

TEZĂ DE ABILITARE

Domeniul de doctorat: Inginerie Industrială

Conf. univ. dr. ing. Aurel TULCAN

Timișoara
2022

TEZĂ DE ABILITARE

**Metode inovative în procesele de deformare plastică la rece,
la proiectarea mașinilor de măsurat în coordonate și la
asigurarea calității pieselor prin măsurare tridimensională**

Conf. univ. dr. ing. Aurel TULCAN

Timișoara
2022

Cuprins

Rezumat	3
Abstract	6
 SECȚIUNEA I.	 9
REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE, PROFESIONALE ȘI ACADEMICE	
 1. Prezentare generală realizări științifice, academice și profesionale	 9
1.1 Realizări științifice	9
1.1.1 Introducere	9
1.1.2 Diseminarea rezultatelor cercetării	9
1.1.2.1 Articole publicate în reviste	10
1.1.2.2 Articole publicate în volumele unor conferințe	13
1.1.2.3 Brevete de invenții	17
1.1.2.4 Cărți	17
1.1.3 Proiecte de cercetare	18
1.1.4 Proiecte cu industria	20
1.2 Realizări academice	25
1.2.1 Activitatea didactică	25
1.2.2 Formare profesională	28
1.2.3 Funcții și responsabilități	29
1.3 Realizări profesionale	29
1.3.1 Prestigiul profesional	29
1.3.2 Membru al unor organizații profesionale	31
1.3.3 Recenzor conferințe naționale și internaționale	31
1.3.4 Premii, diplome și medalii	32
 2. Realizări științifice ale autorului	 33
2.1 Cercetări în domeniul deformărilor plastice la rece	33
2.1.1 Automatizarea proceselor de fabricație prin deformare plastică la rece	33
2.1.1.1 Cercetări privind regimurile de funcționare ale unor sisteme de fabricație prin presare la rece	33
2.1.1.2 Cercetări privind modelarea funcționării părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece	37
2.1.1.3 Cercetări privind modul de realizare a părții de comandă a liniei automate flexibile de presare la rece	48
2.1.1.4 Cercetări privind determinarea capacității productive și a consumului energetic a unor sisteme de fabricație prin presare la rece	50
2.1.1.5 Cercetări privind îmbunătățirea operației de reglare a unei linii automate flexibile de presare la rece	54
2.1.2 Procesul de autofretare a tuburilor cu pereți groși	62

2.2 Proiectarea și verificarea performanțelor mașinilor de măsurat în coordonate	68
2.2.1 Cercetări privind proiectarea mașinilor de măsurat în coordonate	68
2.2.1.1 Cercetări privind rolul mașinilor de măsurat în coordonate în asigurarea calității	68
2.2.1.2 Cercetări privind comportamentul unei mașini de măsurat în coordonate la viteze mari și câmp termic variabil	73
2.2.1.3 Cercetări privind concepția modulară a unei mașini de măsurat în coordonate	81
2.2.1.4 Cercetări privind concepția sistemelor de antrenare liniară pentru modernizarea mașinii de măsurat în coordonate TESA MicroMs 343	85
2.2.1.5 Cercetări privind concepția unei mașini de măsurat în coordonate cu punte în "L"	89
2.2.2 Evaluarea preciziei mașinilor de măsurat în coordonate cu sistem de palpare tactil	96
2.2.2.1 Cercetări privind rolul măsurării tridimensionale în asigurarea calității	96
2.2.2.2 Cercetări privind incertitudinea de măsurare a mașinilor de măsurat în coordonate	100
2.2.2.3 Cercetări privind performanțele unei mașini de măsurat în coordonate pentru diferite configurații și orientări ale sistemului de palpare	107
2.2.2.4 Cercetări privind influența configurației sistemului de palpare asupra preciziei de măsurare a unui mașini de măsurare în coordonate	115
2.3 Cercetări privind asigurarea calității pieselor injectate și printate 3D prin proceduri de măsurare tridimensională	124
2.3.1 Cercetări privind asigurarea calității pieselor injectate	124
2.3.2 Cercetări privind influența parametrilor tehnologici asupra caracteristicilor dimensionale a pieselor realizate din rășini prin printare 3D	130
2.3.3 Cercetări privind influența culorii eco-rășinilor asupra dimensiunii, planeității și rectilinității piesei realizată prin printare 3D	157

SECȚIUNEA II.

PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI

3. Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei	175
3.1 Dezvoltarea carierei științifice	175
3.2 Dezvoltarea carierei profesionale și academice	176

SECȚIUNEA III.

BIBLIOGRAFIE	178
--------------------	-----

Rezumat

Prezenta teză de abilitare "*Metode inovative în procesele de deformare plastică la rece, la proiectarea mașinilor de măsurat în coordonate și la asigurarea calității pieselor prin măsurare tridimensională*" sintetizează activitățile de cercetare și academice în domeniul ingineriei industriale desfășurate de autorul acestei teze în perioada 1999-2022, după susținerea publică în 26.02.1999 a tezei de doctorat cu titlul "*Studiul liniilor automate flexibile de presare la rece*".

Lucrarea este structurată în trei părți principale, prima fiind o sinteză a realizărilor științifice, academice și profesionale ale autorului. În partea a doua se prezintă în detaliu realizările științifice ale autorului urmate în partea a treia de planurile de evoluție și dezvoltare a carierei. Teza de abilitare se încheie cu lista referințelor bibliografice asociate celor trei părți.

În prima parte a tezei de abilitare (**Capitolul 1**) se menționează principalele realizări științifice, academice și profesionale ale autorului, obținute în ultimii 23 de ani de la susținerea publică a tezei de doctorat. Cercetarea efectuată în acești ani poate fi grupată pe două domenii mari: *proces și tehnologii de fabricație prin deformare plastică la rece*, respectiv *măsurări tridimensionale*. Domeniul procese și tehnologii de fabricație prin deformare plastică la rece reprezintă o continuare a cercetărilor din cadrul tezei de doctorat. Cel de-al doilea domeniu, cel al măsurărilor tridimensionale a fost dezvoltat, începând din 2000, pe două direcții: *proiectarea și verificarea performanțelor mașinilor de măsurat în coordonate*, respectiv *asigurarea calității pieselor injectate și printate 3D prin proceduri de măsurare tridimensională*. Pe lângă aceste domenii se mai pot adăuga cercetări în domeniul ingineriei fabricației cum ar fi: injectarea materialelor plastice, activarea cu ultrasunete a diferitelor procese de fabricație, prelucrări de superfinisare prin lepuire, prelucrări prin așchiere etc. Rezultatele cercetării sunt prezentate sub formă de articole științifice, brevete de invenții, cărți publicate respectiv contracte de cercetare. Din punct de vedere al realizărilor academice se prezintă activitatea didactică desfășurată în această perioadă de timp, cea de formare profesională, respectiv funcții și responsabilități ale autorului la nivel de departament și facultate. Prestigiul profesional al autorului tezei este validat prin impactul pe care îl au pe plan național și internațional cărțile de specialitate editate, rezultatele cercetării contractuale și lucrările științifice publicate, respectiv modelele de mașini de măsurat în coordonate proiectate, executate și vândute în Europa și Japonia. La prestigiul profesional se mai poate adăuga calitatea de membru al unor organizații profesionale naționale și internaționale, recenzor conferințe naționale și internaționale, respectiv premiile, medaliile și diplomele obținute.

În partea a doua (**Capitolul 2**) se prezintă cele mai importante rezultate ale cercetării autorului tezei. Această parte a fost structurată pe trei subcapitole, după cum urmează.

Capitolul 2.1 prezintă aspecte legate de automatizarea proceselor de fabricație prin deformare plastică la rece. Astfel au fost prezentate rezultatele unor cercetări privind regimurile de funcționare ale unor sisteme de fabricație prin presare la rece construite pe un singur utilaj sau pe mai multe utilaje de presare. După definirea modurilor de funcționare a unei linii automate flexibile de presare la rece, cercetările au continuat cu modelarea funcționării părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece. Modelarea funcționării părții de comandă a liniei a pornit de la analiza specificațiilor, care trebuie să precizeze funcțiile specifice ale părții de comandă, ținând cont de modalitățile acesteia de realizare și utilizare. Funcționarea liniei a fost descrisă prin intermediul unor diagrame funcționale (GRAFCET - *Graf Funcțional de Comandă Etapă Tranziție*) care permit descrierea tuturor comportamentelor așteptate din partea părții de comandă în raport cu totalitatea evenimentelor sau informațiilor provenind din procesul automatizat. Pe baza modelului obținut prin diferite GRAFCET-uri s-a realizat modelarea fizică a părții de comandă folosind logica cablată, tehnologia utilizată în acest caz fiind cea electromecanică și pneumatică. O importanță deosebită privind liniile automate de presare la rece o are determinarea

capacității productive și a consumului energetic a unor sisteme de fabricație prin presare la rece, respectiv îmbunătățirea operației de reglare a unei linii automate flexibile de presare la rece. Cu ajutorul metodei experimentelor factoriale (DoE) și a analizei dispersionale (ANOVA) s-a determinat consumul de energie electrică pe o linie automată și modul de reducere a acesteia funcție de valoarea factorilor de influență (cadența presei și încărcarea presei). Pentru îmbunătățirea operației de reglare a unei linii automate au fost prezentate acțiunile de reducere a duratei operației de reglare la o linie automat flexibilă de presare la rece construită cu prese clasice prin aplicarea principiilor metodei S.M.E.D (Single Minute Exchange Die). În partea a doua a acestui capitol se prezintă rezultatele unei cercetări experimentale privind parametrii de autofretare a tuburilor cu pereți groși. Această cercetare a fost finanțată de Uzina Mecanică Reșița, având ca temă de studiu autofretarea țevelor de artilerie. În urma acestei cercetări au fost stabilite valorile parametrilor de deformare, realizată cu dorn și bilă de deformare, pentru a obține un tub cu rezistență mai mare la aceeași grosime a peretelui.

Capitolul 2.2 tratează aspecte legate de proiectarea și verificarea performanțelor mașinilor de măsurat în coordonate. În prima parte a subcapitolului 2.2 sunt prezentate rezultatele cercetărilor privind proiectarea mașinilor de măsurat în coordonate. Cercetările au demarat cu un studiu privind rolul mașinilor de măsurat în coordonate în asigurarea calității. În acest sens s-a prezentat conceptul de măsurare tridimensională, factorii care influențează precizia măsurătorilor și principalele sisteme de măsurare tridimensională. În continuare se prezintă un studiu privind comportamentul unei mașini de măsurat în coordonate pentru măsurători de mare viteză și câmp termic variabil. Acest studiu s-a realizat în timpul fazei de proiectare a mașinii de măsurat în coordonate cu portal fix și masă mobilă (Presingo 755). Analiza cu elemente finite realizată cu programul Ansys s-a efectuat pentru două structuri diferite de mașină de măsurat cu portal fix și masă mobilă. În urma acestei analize s-au determinat performanțele dinamice ale celor două structuri la diferite solicitări dinamice și termice ale acestora. Cercetarea a continuat cu un studiu privind concepția modulară a unei mașini de măsurat în coordonate. În acest scop s-a prezentat o soluție de proiectare modulară a arhitecturii cu portal fix și masă mobilă care permite modificarea volumului de măsurare al mașinii, în special în direcția Z, în anumite limite și fără modificări majore. De asemenea, s-a analizat o proiectare modulară a mesei mobile care permite transformarea mașinii din trei axe în mașină în patru axe, cu masă rotativă inclusă (axa R). În continuare au fost prezentate rezultatele privind concepția sistemelor de acționare liniară pentru modernizarea mașinii manuale de măsurat în coordonate TESA MicroMS 343. Scopul activității de cercetare-proiectare a fost de a prezenta o soluție tehnică pentru modernizarea mașinii manuale de măsurat în coordonate TESA MicroMs 343 existentă în laboratorul de măsurători 3D din cadrul Universității Politehnica din Timișoara pentru a deveni o mașină cu comandă numerică. În continuare se prezintă rezultatele cercetării privind proiectarea unei mașini de măsurat în coordonate cu punte în "L" pe baza principiilor fundamentale de proiectare: repetabilitate ridicată (proiectare pentru repetabilitate) și predictibilitate ridicată a răspunsului mașinii la principalele surse de eroare (proiectare pentru predictibilitate). Pe baza celor două principii s-a realizat modelul CAD al mașinii cu punte în formă de "L" și s-a determinat eroarea dinamică a modelului virtual. Analiza cu elemente finite (FEA) a fost utilizată pentru a calcula deformația totală a structurii mecanice și deplasarea totală a vârfului palpatorului cauzată de accelerarea punții în formă de "L".

În partea a doua a capitolului 2.2 sunt prezentate rezultatele privind evaluarea preciziei mașinilor de măsurat în coordonate cu sistem de palpare tactil. Precizia unei mașini de măsurat în coordonate este foarte importantă pentru a fi cunoscută în vederea obținerii unor rezultate de calitate la măsurarea piesei. În acest sens se prezintă un prim studiu referitor la performanțele unei mașini de măsurat în coordonate cu antrenare manuală. Astfel, a fost prezentată modalitatea de evaluare și rezultatele privind precizia (BIAS), repetabilitatea și reproductibilitatea mașinii de măsurat în coordonate TESA MicroMS 343 cu antrenare manuală. Cercetările au continuat cu mai multe studii privind incertitudinea de măsurare a mașinilor de măsurat în coordonate, cu raportare

la mașina TESA MicroMS 343-CNC. Pentru diferite configurații și orientări ale sistemului de palpate cu senzor rezistiv cu declanșare au fost investigați factorii de control: numărul de puncte de măsurare, unghiuri de rotație a capului de măsurare, plane de măsurare, lungimea palpatorului, diametrul sferei de palpate, respectiv module diferite ale senzorului de contact cu declanșare TP20, care au efect asupra incertitudinii de măsurare. Pentru a investiga impactul factorilor asupra incertitudinii de măsurare s-a folosit metoda de planificare a experimentelor (*Design of Experiments - DoE*), a analizei disperse (ANOVA), respectiv a suprafețelor de răspuns. În urma acestor studii experimentale au fost formulate concluzii și recomandări privind configurația sistemului de palpate pentru a reduce incertitudinea de măsurare. O concluzie care se desprinde este aceea că rezultatul măsurării piesei poate fi influențat de configurația sistemului de palpate. În acest sens se recomandă utilizarea de palpatoare de lungime cât mai mică și de diametru cât mai mare (rigiditate ridicată), respectiv măsurarea elementelor geometrice, pe cât posibil, cu același palpator și cu aceeași orientare a capului de măsurare.

Capitolul 2.3 prezintă mai multe cercetări privind asigurarea calității pieselor injectate și printate 3D prin proceduri de măsurare tridimensională. În prima parte sunt descrise principalele direcții privind măsurarea tridimensională a pieselor și adecvarea sau nu a senzorilor de contact sau non-contact la măsurarea pieselor din diferite materiale, respectiv de dimensiuni și precizii diferite. Sunt prezentate de asemenea mai multe strategii de măsurare a unor elemente geometrice a unei piese injectate care poate prezenta abateri dimensionale și geometrice ridicate. Totodată se descrie modul de realizare a inspecției primei piese pentru o piesă injectată din material plastic utilizată în industria auto și se prezintă rezultatele măsurării piesei, respectiv concluziile privind faza de încercare și lansare a producției cu eventualele modificări ale parametrilor de injectare sau corectare a matriței. În partea a doua a capitolului sunt prezentate rezultatele unor cercetări privind influența parametrilor tehnologici asupra caracteristicilor dimensionale a pieselor realizate din rășini prin printare 3D. Piese printate 3D, folosind tehnologia cu control digital al luminii (DLP), au fost realizate din rășină obișnuită și rășini din plante, numite eco-rășini. Principalul obiectiv a cercetării a fost de a determina modul în care structura de susținere în procesul de printare 3D DLP influențează caracteristicile suprafețelor plane și cilindrice. La măsurarea caracteristicilor fizice ale piesei printate a fost utilizată o mașină de măsurat în coordonate (CMM) cu senzor de contact. La realizarea cercetărilor experimentale și la interpretarea rezultatelor s-a utilizat metoda experimentului factorial (DoE), a analizei disperse (ANOVA) și a suprafețelor de răspuns. Pe baza dimensiunilor și a geometriei pieselor printate 3D obținute în urma măsurării tridimensionale a acestora s-au stabilit valorile optime ale factorilor de control (densitate suporturi, adâncime de contact, diametru suprafață de contact) care au influență semnificativă asupra parametrilor dimensionali și geometrici ai piesei printate 3D. Totodată, abaterile dimensionale și geometrice ale piesei au fost încadrate în anumite clase de precizie ale standardelor ISO 2768-1 și ISO 2768-2, stabilind astfel clasa de precizie care poate fi obținută la printarea 3D DLP a acestor piese.

Capitolul 3 prezintă planurile de evoluție și dezvoltare a carierei ale autorului. Prima direcție se referă la *procesele și tehnologii de fabricație prin deformare plastică la rece*. Accentul va fi pus pe automatizarea și optimizarea proceselor de fabricație, respectiv pe proiectarea optimă și inovativă a ștanțelor și matrițelor. A doua direcție se referă la studiul privind adecvarea și performanțele diferitelor sisteme de măsurare tridimensională, în scopul creșterii preciziei de măsurare a pieselor. Cea de a treia direcție are ca scop studiul privind asigurarea calității pieselor prin strategii de măsurare tridimensională. Se vor avea în vedere elaborarea de strategii de măsurare 3D pentru piese realizate din materiale diferite și prin tehnologii de fabricație diferite.

Teza de abilitare se încheie cu **lista referințelor bibliografice** asociate celor trei părți prezentate în capitolele 1, 2 și 3.

Dr. ing. Aurel TULCAN

Timișoara, 04 iulie 2022.

Abstract

The present habilitation thesis "*Innovative methods in cold plastic deformation processes, in the design of Coordinate Measuring Machines and in the Quality Assurance of parts by three-dimensional measurement*" summarizes the research and academic activities in the field of industrial engineering carried out by the author of this thesis in the period 1999-2022, after the public defense on 26.02.1999 of the PhD thesis entitled "*Study of automatic flexible cold forming lines*".

The work is structured in three main parts, the first being a summary of the author's scientific, academic and professional achievements. The second part details the author's scientific achievements followed in the third part by plans for career development. The habilitation thesis ends with the list of bibliographic references associated with the three parts.

In the first part of the habilitation thesis (**Chapter 1**) the main scientific, academic and professional achievements of the author, obtained in the last 23 years since the public defense of the PhD thesis, are mentioned. The research carried out during these years can be grouped into two main areas: cold plastic deformation manufacturing processes and technologies and three-dimensional measurements. The area of cold plastic forming manufacturing processes and technologies is a continuation of the research in the PhD thesis. The second area, three-dimensional measurements, has been developed since 2000 in two directions: the design and performance verification of Coordinate Measuring Machines (CMMs), and the quality assurance of 3D plastic moulded and printed parts by three-dimensional measurement procedures. In addition to these areas, research can be added in the field of manufacturing engineering such as: plastic injection moulding, ultrasonic activation of various manufacturing processes, superfinishing machining by lapping, machining by chipping etc. Research results are presented in the form of scientific articles, patents, published books and research contracts. From the point of view of academic achievements, the teaching activity carried out during this period of time, the professional training activity and the author's functions and responsibilities at department and faculty level are presented. The professional prestige of the author of this habilitation thesis is validated by the national and international impact of the published books, the results of the contract research and the published scientific papers and the CMM models designed, built and sold in Europe and Japan. In addition to the professional prestige can be added the quality of the member of national and international professional organisations, a reviewer for national and international conferences, and prizes, medals and diplomas won.

The second part (**Chapter 2**) presents the most important results of the author's research. This part has been structured in three sub-chapters as follows.

Chapter 2.1 presents issues related to the automation of cold plastic forming manufacturing processes. Thus, the results of research on the operating regimes of some cold forming manufacturing systems built on single or multiple forming machines were presented. After defining the modes of operation of a flexible automatic cold-pressing line, the research continued with modelling the operation of the control unit of a flexible automatic cold-pressing line. The modelling of the operation of the control unit of the line started from the analysis of the specifications, which should specify the specific functions of the control unit, taking into account its modes of realisation and use. The operation of the line was described by means of functional diagrams (GRAFCET – "*Graphe Fonctionnel de Commande Étape Transition*") that allow to describe all the expected behaviours of the control unit in relation to the totality of events or information coming from the automated process. On the basis of the model obtained through different GRAFCETs, the physical modeling of the control unit was performed by using the electromechanical and pneumatic technology. A particular importance for automatic cold-pressing

lines is the determination of the productive capacity and energy consumption of cold-pressing manufacturing systems, i.e. the improvement of the control operation of a flexible automatic cold-pressing line. Using the Design of Experiments (DoE) and Analysis of Variance (ANOVA) methods, the power consumption on an automatic line was determined and how it was reduced depending on the value of the independent factors (press cadence and press loading). In order to improve the setting operation of an automatic line, the actions of reducing the duration of the setting operation on a flexible automatic cold-pressing line built with classical presses by applying the principles of the S.M.E.D (Single Minute Exchange Die) method were presented. In the second part of this chapter, the results of an experimental investigation on the "*autofrettage*" parameters of thick-walled tubes are presented. This research was financed by the Reșița Mechanical Plant (UMR), having as its subject the study of the "*autofrettage*" of artillery tubes. As a result of this research, the values of the "*autofrettage*" parameters were established, carried out with dorn and deformation ball, in order to obtain a tube with higher strength at the same wall thickness.

Chapter 2.2 deals with issues related to the design and performance verification of Coordinate Measuring Machines (CMM). The first part of sub-chapter 2.2 presents the results of research on the design of a CMM. The research started with a study on the role of CMM in quality assurance. This included the concept of coordinate measuring, factors influencing measurement accuracy and the main coordinate measuring systems. A study on the behaviour of a CMM for high speed and variable thermal field measurements is presented. This study was carried out during the design phase of the CMM with fixed bridge and moving table (Presingo 755). Finite element analysis (FEA) performed with Ansys software was carried out for two different structures of the fixed bridge and moving table CMM. Following this analysis, the dynamic performance of the two structures was determined at different dynamic and thermal stresses of the structures. The research continued with a study on the modular design of a CMM. For this purpose, a modular design solution of the architecture with fixed bridge and moving table was presented, which allows the measuring volume of the machine to be modified, especially in the Z-direction, within certain limits and without major modifications. A modular design of the moving table was also analysed which allows the conversion of the machine from a three-axis to a four-axis machine with an included rotating table (R-axis). The results of the design of the linear drive systems for the upgrade of the TESA MicroMS 343 manual handled CMM were presented. The aim of the research-design activity was to present a technical solution for the modernization of the existing TESA MicroMs 343 manual handled CMM in the 3D Measurement Laboratory of the Politehnica University Timișoara to become a CNC machine. The results of the research on the design of a "L-shape" bridge CMM based on fundamental design principles: high repeatability (design for repeatability) and high predictability of the machine response to the main sources of error (design for predictability) are presented below. Based on these two principles, the CAD model of the "L-shape" bridge machine was built and the dynamic error of the virtual model was determined. Finite element analysis (FEA) was used to calculate the total deformation of the mechanical structure and, in particular, the total displacement of the stylus tip caused by the acceleration of the "L-shape" bridge.

The second part of chapter 2.2 presents the results on the evaluation of the accuracy of CMM with tactile probing system. The accuracy of a CMM is very important to be known in order to obtain quality results when measuring the part. In this regard, a first study on the performance of a manually driven CMM is presented. Thus, the evaluation method and the results on the accuracy (BIAS), repeatability and reproducibility of the TESA MicroMS 343 manually driven CMM were presented. The research continued with several studies on the measurement uncertainty of CMM with reference to the TESA MicroMS 343-CNC. For different configurations and orientations of the resistive touch trigger probe system, the control factors: number of measuring points, rotation angles of the measuring head, measuring planes, probe length, diameter of the probe tip, respectively different modules of the TP20 touch trigger probe, which have an

effect on the measurement uncertainty, were investigated. The Design of Experiments (DoE), Analysis of Variance (ANOVA) and Response Surface Method (RSM) were used to investigate the impact of the factors on the measurement uncertainty. As a result of these experimental studies, conclusions and recommendations on the configuration of the probing system to reduce measurement uncertainty were formulated. One conclusion that emerges is that the measurement result of the workpiece can be influenced by the configuration of the probing system. In this respect, it is recommended to use probes of the smallest length and the largest diameter (high rigidity) and to measure geometrical elements as far as possible with the same probe and the same orientation of the measuring head.

Chapter 2.3 presents more research on quality assurance of 3D printed and plastic injection molded parts using 3D measurement procedures. The first part describes the main directions of three-dimensional part measurement and the suitability or unsuitability of contact or non-contact sensors for measuring parts made of different materials, i.e. of different sizes and accuracies. Several strategies for measuring geometric elements of a plastic injection molded part that may exhibit high dimensional and geometric deviations are also presented. It also describes how to carry out first part inspection for a plastic injection molded part used in the automotive industry and presents the results of the part measurement, i.e. conclusions on the test and production start-up phase with possible changes in injection molding or mold calibration parameters. The second part of the chapter presents the results of research on the influence of technological parameters on the dimensional characteristics of parts made of resins by 3D printing. The 3D printed parts, using digital light control (DLP) technology, were made from ordinary resin and plant resins, called eco-resins. The main objective of the research was to determine how the support structure in the DLP 3D printing process influences the characteristics of flat and cylindrical surfaces. A Coordinate Measuring Machine (CMM) with a contact probe was used to measure the physical characteristics of the printed part. The Design of Experiments (DoE), Analysis of Variance (ANOVA) and Response Surface methods were used to carry out the experimental investigations and to analyse the results. On the basis of the dimensions and geometry of the 3D printed parts obtained from their three-dimensional measurement, the optimal values of the independent factors (supports density, contact depth, contact surface diameter) that have a significant influence on the dimensional and geometric parameters of the 3D printed part were determined. At the same time, the dimensional and geometric deviations of the part were classified into certain accuracy classes of ISO 2768-1 and ISO 2768-2 standards, thus establishing the accuracy class that can be achieved in 3D DLP printing of these parts.

Chapter 3 outlines the author's career development plans. The first direction concerns cold plastic forming manufacturing processes and technologies. The focus will be on the automation and optimisation of manufacturing processes, i.e. the optimal and innovative design of dies. The second direction concerns the study of the suitability and performance of different three-dimensional measuring systems to increase part measurement accuracy. The third direction aims at studying the quality assurance of parts by 3D measurement strategies. It will consider the development of 3D measurement strategies for parts made of different materials and using different manufacturing technologies.

The habilitation thesis ends with the list of bibliographic references associated with the three parts presented in Chapters 1, 2 and 3.

Dr. Eng. Aurel TULCAN

Timișoara, 4 July 2022.

SECȚIUNEA I. REALIZĂRI ȘTIINȚIFICE, PROFESIONALE ȘI ACADEMICE

1.1 Realizări științifice

1.1.1 Introducere

În perioada 1992-1999 am desfășurat activitatea de cercetare doctorală la Catedra Tehnologia Construcțiilor de Mașini (TCM), Facultatea de Mecanică Timișoara, sub îndrumarea științifică a domnului Prof. univ. dr. ing. Tudor Alexandru ICLĂNZAN. În 26.02.1999 am susținut public teza de doctorat cu titlul „*Studiul liniilor automate flexibile de presare la rece*”, iar prin Ordinul Ministrului Educației Naționale nr. 5086 din 01.07.1999 mi s-a conferit titlul de „Doctor” în Ramura de știință tehnică, specializarea Tehnologia Construcțiilor de Mașini și s-a eliberat diploma de doctor seria R Nr. 0003348.

Cercetările efectuate după susținerea tezei de doctorat pot fi structurate pe **trei direcții mari**:

- *processe și tehnologii de fabricație prin deformare plastică la rece;*
- *proiectarea și verificarea performanțelor mașinilor de măsurat în coordonate;*
- *asigurarea calității pieselor injectate și printate 3D prin proceduri de măsurare tridimensională,*

la care se mai pot adăuga cercetări în domeniul ingineriei fabricației cum ar fi: injectarea materialelor plastice, activarea cu ultrasunete a diferitelor procese de fabricație, prelucrări de superfinisare prin lepuire, prelucrări prin așchiere etc.

1.1.2 Diseminarea rezultatelor cercetării

Rezultatele activității de cercetare au fost prezentate în cadrul unor manifestări științifice naționale și internaționale, prin articole susținute în cadrul unor conferințe și publicate în volumele acestora sau prin articole publicate în reviste. În tabelul 1.1 sunt prezentate sintetic rezultatele activității publicistice din perioada 1999-2022, iar în subcapitolele care urmează se prezintă detaliat aceste publicații.

Tabel 1.1 Publicații realizate în perioada 1999-2022

Articole și brevete de invenție	Total	Prim autor / unic autor
1. Articole publicate în reviste	43	12
<i>a) Articole publicate în reviste cotate ISI (WoS)</i>	7	4 (2 în Q1)
<i>b) Articole publicate în reviste indexate în alte baze de date internaționale</i>	5	0
<i>c) Articole publicate în reviste naționale/internaționale neindexate</i>	31	8
2. Articole publicate în volumele unor Conferințe	36	16
<i>a) Articole publicate în volume indexate ISI Proceedings (WoS)</i>	13	6
<i>b) Articole publicate în volumele unor manifestări științifice indexate în alte baze de date internaționale</i>	7	2
<i>c) Articole publicate în volumele unor manifestări științifice naționale/internaționale neindexate</i>	16	8
3. Brevete de invenții	5	0
4. Cărți publicate	6	1 / 5

1.1.2.1 Articole publicate în reviste

a) Articole publicate în reviste cotate **ISI** (Indexate Web of Science)

1. **Tulcan Aurel**, Banciu Felicia, Tulcan Liliana, Grozav Ion, *Theoretical model for calculate the elastic and contact deformations of the positioning elements of a 3-2-1 fixture system*, Acta Technica Napocensis Series-Applied Mathematics Mechanics and Engineering, Vol 65(1), 2022, pp. 253-260, SI, ISSN 253-260, WOS:000773188500027, FI 2.573.
2. **Tulcan Aurel**, Vasilescu Mircea Dorin, Tulcan Liliana, *Comparative Study of the Influence of Bio-Resin Color on the Dimension, Flatness and Straightness of the Part in the 3D Printing Process*, Polymers, Vol 13(9), 1412, **2021**, pp. 21, ISSN 2073-4360, DOI:10.3390/polym13091412; WOS:000650706300001, FI 3.426, (Q1).
3. **Tulcan Aurel**, Vasilescu Mircea Dorin, Tulcan Liliana, *Study of the Influence of Technological Parameters on Generating Flat Part with Cylindrical Features in 3D Printing with Resin Cured by Optical Processing*, Polymers, Vol 12(9), 1941, **2020**, pp. 24 + 11 (Supplementary Materials), ISSN 2073-4360, DOI: 10.3390/polym12091941; WOS:000579963900001, FI 3.426, (Q1).
4. Adam Andrei, Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, *Evaluation of specific process parameters and ultrasonically activated injection affecting on the quality of filling in thin walled plastic parts*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, vol 53(4), **2015**, pp. 799/11, ISSN 1429-2955, WOS:000369506100004.
5. Cosma Cristian, Dume Adrian, **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, *Reverse engineering for injection parts*, Materiale Plastice, vol 45(2), **2008**, pp. 208-2013(6), ISSN 0025-5289, WOS:000259119700016.
6. Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Iclănzan Tudor, *Influence factors on the dimensional accuracy of the plastic parts*, Materiale Plastice, vol 45(1), **2008**, pp. 119-124(6), ISSN 0025-5289, WOS:000255295400024.
7. **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Stan Daniel, Iclănzan Tudor, *3-dimensional inspection of injected plastic parts*, Materiale Plastice, vol 44(4), **2007**, pp. 316-320(6), ISSN 0025-5289, WOS:000253078000012.

b) Articole publicate în reviste indexate în alte baze de date internaționale

1. Tulcan Liliana, **Tulcan Aurel**, *Work security at industrial ultrasonics applications*, Nonconventional Technologies Review, Vol 20(1), pp. 15-21(7), **2016**, ISSN 2359 – 8646; ISSN-L 2359 – 8646; On-line: ISSN 2359 – 8654; ISSN-L 2359 – 8646, Copernicus, Proquest, Google Scholar.
2. Tulcan Liliana, **Tulcan Aurel**, *Particular phenomenon into the work space of the ultrasonic aided abrasive lapping*, Nonconventional Technologies Review, Vol 4, pp. 55-59(4), **2011**, ISSN 1454-3087, Copernicus, Proquest, Google Scholar.
3. Țuț Vlad, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian, Șerban Iancu, *Application of CAD/CAM/FEA, reverse engineering and rapid prototyping in manufacturing industry*, International Journal of Mechanics, Vol 4(1), pp. 79(8), **2010**, ISSN 19984448, SCOPUS, Google Scholar.
4. Tulcan Liliana, Botis Mihaela Nistoran, **Tulcan Aurel**, *Aspects of surface microgeometry machining by ultrasonic aided plane lapping*, Nonconventional Technologies Review, Vol 1, pp. 55(5), **2010**, ISSN 1454-3087, Copernicus, Google Scholar.
5. Tulcan Liliana, **Tulcan Aurel**, *Ultrasonic emulsification in the food industry*, Buletinul AGIR supliment /2011 Sisteme integrate pentru productia agroalimentară, pp. 247(4), **2011**, ISSN 247-3548, Index Copernicus, Google Scholar, Academic Keys, Getcited.

c) Articole publicate în reviste naționale/internaționale neindexate

1. Stan Daniel, Șerban Iancu, Sîrbu Alin Nicușor, **Tulcan Aurel**, *Experimental devices and influence parameters in ultrasonic activated extrusion of LDPE*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 56(70), pp. 55(6), 2011, ISSN 1224-6077.
2. Cosma Cristian, **Tulcan Aurel**, Dume Adrian, Iclănzan Tudor, *Reverse engineering for active mould parts*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 7(1), pp. 50(6), **2009**, ISSN 1583-7904.
3. Dume Adrian, Cosma Cristian, Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, *Methodology of obtaining a solid model for injected part using the reverse engineering technique*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 1, pp. 84(6), **2008**, ISSN 1583-7904.
4. Seiculescu Valentin, **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, *Virtual 3d CAD model of complex bodies relised under solid works environment*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 1, pp. 156(7), **2008**, ISSN 1583-7904.
5. Tulcan Liliana, **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, *Analytic model of the smooth material volume for ultrasonic aided plane lapping*, Nonconventional Technologies Review, Vol 1, pp. 89(4), **2006**, ISSN 1454-3087.
6. Cosma Cristian, Iclănzan Tudor, Dume Adrian, **Tulcan Aurel**, *Rapid Prototyping For Reverse Engineering*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 4(2), pp. 17(6), **2006**, ISSN 1583-7904.
7. Tulcan Liliana, **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, *General analytic model for establishing the processed material volume for ultrasonic aided plane lapping*, Nonconventional Technologies Review, Vol 1, pp. 99(6), **2005**, ISSN 1454-3087.
8. Cosma Cristian, **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, *The choosing algorithm for the coordinating measuring machines*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 3(3), pp. 28(6), **2005**, ISSN 1583-7904.
9. Stan Daniel, Iclănzan Tudor, **Tulcan Aurel**, *Considerations on the optimised design of the ultrasonic horn for industrial applications*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 2(3), pp. 32(6), **2004**, ISSN 1583-7904.
10. **Tulcan Aurel**, Grozav Ion, Turc Cristian, Tulcan Liliana, *TESA Micro-Ms 343 Coordinate Measuring Machine Accuracy Evaluation*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 2(3), pp. 38(6), **2004**, ISSN 1583-7904.
11. **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Stan Daniel, *Coordinate measuring machine role in quality assurance*, Journal of Technical Sciences, **2004**, pp. 375(4), ISSN 0035-4074 /973-27-0932-4.
12. Rosinger Ștefan, Seiculescu Valentin, **Tulcan Aurel**, *Sheet Metal 3D Cold Section Machining by Roll Forming*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 1(3), pp. 10(3), **2003**, ISSN 1583-7904.
13. Rosinger Ștefan, **Tulcan Aurel**, Seiculescu Valentin, *Mathematical Algoritm for Determinate the Channel Trajectory on the Roll Forming Tool*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 1(3), pp. 13(5), **2003**, ISSN 1583-7904.
14. Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, *Le Stratégie de L'entreprise et le Prototypage Rapide*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 1(3), pp. 52(4), **2003**, ISSN 1583-7904.

15. **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Seiculescu Valentin, Iclănzan Tudor, Ciorba Ioan, *L'Etude Expérimental des Paramètres d'Auto Frettage des Tubes à Parois Épais*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 1(4), pp. 21(5), **2003**, ISSN 1583-7904.
16. Seiculescu Valentin, Rosinger Ștefan, **Tulcan Aurel**, *Computer Asisted Design of Roll Forming Tools*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 2(3), pp. 34(4), **2003**, ISSN 1583-7904.
17. Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Turc, Cristian Tulcan Liliana, *Considerations theoriques concernant les proprietes rheologiques des polymeres fondus*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61), F1, pp. 45(4), **2002**, ISSN 1224-6077.
18. Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Turc Cristian, Tulcan Liliana, *Vitesse de glissement en paroi. Methode et algorithme d'experimentation*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61), pp. 49(6), **2002**, ISSN 1224-6077.
19. Stan Daniel, Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, *Evaluation de l'activation par ultrasons comme facteur d'influence sur les proprietes d'ecoulement des fondus polymere sous pression*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61), F1, pp. 45(6), **2002**, ISSN 1224-6077.
20. Stan Daniel, Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, *Considerations theoriques concernant l'ecoulement multicouche des polymeres fondus*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61),F1, pp. 61(4), **2002**, ISSN 1224-6077.
21. Tulcan Liliana, **Tulcan Aurel**, Turc Cristian, *Le choix des fonctions objective et des facteurs d'influence significative de lapping assisté par ultrasons*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61), F1, pp. 123(4), **2002**, ISSN 1224-6077.
22. Tulcan Liliana, Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, *Application de la méthode du bilan aléatoire pour la hierarchisation des facteurs d'influence au lapping plane assisté par ultrasons*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61), pp. 127(6), **2002**, ISSN 1224-6077.
23. Turc Cristian, Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, *Some applications of piezo film sensors*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61), F1, pp. 133(4), **2002**, ISSN 1224-6077.
24. Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, *Experimental research regarding the electrochemical boring of high speed steel in active electrolytes*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61), F1, pp. 137(4), **2002**, ISSN 1224-6077.
25. Turc Cristian, Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, *Experimental research regarding the electrochemical boring of high speed steel in passive electrolytes*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61), pp. 141(4), **2002**, ISSN 1224-6077.
26. Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Tulcan Liliana, *The Shape Design of Tool-Electrodes used for Boring by Electrochemical Machining*, Buletinul Științific al Universității

- “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 47(61), F2, pp. 161(4), **2002**, ISSN 1224-6077.
27. **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Tulcan Liliana, *Mesures concernant l'amélioration d'opération de réglage d'une ligne automate flexible pour formage mécanique*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 46(60), F2, pp. 95(20), **2001**, ISSN 1224-6077.
 28. **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Tulcan Liliana, *Système de changement rapide d'outils sur la presse*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 46(60), F2, pp. 99(4), **2001**, ISSN 1224-6077.
 29. **Tulcan Aurel**, *La méthodologie de conception d'une ligne flexible de formage de tôles*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 44(58), pp. 255(6), **1999**, ISSN 1224-6077.
 30. **Tulcan Aurel**, *Determinarea experimentală a consumurilor de energie electrică la prelucrări de ștanțare în regim de alimentare automată a presei PAI 6.3 – partea I*, Acta Universitatis Cibiniensis, Vol XLII, pp 135(6), 1999, ISSN 1221-4949.
 31. **Tulcan Aurel**, *Determinarea experimentală a consumurilor de energie electrică la prelucrări de ștanțare în regim de alimentare automată a presei PAI 6.3 – partea a II-a*, Acta Universitatis Cibiniensis, Vol XLII, pp 141(6), 1999, ISSN 1221-4949.

1.1.2.2 Articole publicate în volumele unor conferințe

a) Articole publicate în volume indexate *ISI Proceedings*

1. **Tulcan Aurel**, Banciu Felicia Veronica, Grozav Ion, *Tolerance allocation using Monte Carlo simulation*, Modtech International Conference - Modern Technologies in Industrial Engineering VIII, Vol 916(012122), pp. 10, **2020**, ISSN: 1757-8981, DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012122; WOS:000625330000122.
2. **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, *Design of Experiments in CMM Probe Configuration Study*, 2016 International Conference on Production Research – Africa, Europe and the Middle East. 4th International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management, Cluj-Napoca, **2016**, pp. 75-80(6), ISBN 978-606-737-180-2, WOS:000436122900013.
3. **Tulcan Aurel**, Banciu Felicia Veronica, Grozav Ion, *Reactions of the locating pins calculation based on force and moment's separation method using a software program*, 2016 International Conference on Production Research – Africa, Europe and the Middle East. 4th International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management, Cluj-Napoca, **2016**, pp. 81-85(6), ISBN 978-606-737-180-2, WOS:000436122900014.
4. Stan Daniel, Șerban Iancu, Sîrbu Alin, **Tulcan Aurel**, *Study on the resonant frequency gliding in the ultrasonic systems loaded with variable axial compression force*, The 16th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation - ModTech 2012 - New face of T.M.C.R., Sinaia, România, **2012**, pp. 913-916(4), ISBN 2066-3919, WOS:000392261800229.
5. **Tulcan Aurel**, Cioană Cristian, Stan Daniel, Cosma Cristian, *Coordinate measuring machine variations for different probe configurations*, The 16th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation - ModTech 2012 - New face of T.M.C.R., Sinaia, România, **2012**, pp. 989-992(4), ISBN 2066-3919, WOS:000392261800248.
6. **Tulcan Aurel**, Cioană Cristian, Cosma Cristian, Grozav Ion, *Coordinate measuring machine measurement uncertainty study*, ModTech International Conference - New face of TMCR

- Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR, 25-27 May 2011, Vadul lui Vodă-Chișinău, Republic of Moldova, Vol 2, pp. 1105-1108(4), **2011**, ISBN 2069-6736, WOS:000392260500277.
7. Cioană Cristian, **Tulcan Aurel**, Dume Adrian, Serban Iancu, *Flow simulation on a reverse engineered*, ModTech International Conference - New face of TMCR Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR, 25-27 May 2011, Vadul lui Vodă-Chișinău, Republic of Moldova, Vol 1, pp. 217-220(4), **2011**, ISBN 2069-6736, WOS:000392260500055.
 8. Cioană Cristian, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian, Iclănzan Tudor, *Reverse engineering for quality control*, ModTech International Conference - New face of TMCR Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR, 25-27 May 2011, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, Vol 2, pp. 221-224(4), **2011**, ISBN 2069-6736, WOS:000392260500056.
 9. Țuț Vlad, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian, Cioană Cristian, *The integration of RE and RP techniques in industrial field*, 2nd International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, Constanța, **2010**, pp. 129-132(4), ISBN 978-960-474-220-2, WOS:000290464600025.
 10. Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian, *The "Industrial Engineering" Profile and Competences*, 14th International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation (ModTech 2010), Slănic Moldova, **2010**, pp. 543-546(4), ISBN 2066-3919, WOS:000282604000133.
 11. **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Turc Cristian, Cosma Cristian, Dume Adrian, *Design of Linear Drive Systems to Retrofit a Coordinate Measuring Machine*, 14th International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation (ModTech 2010), Slănic Moldova, **2010**, pp. 647-650(4), ISBN 2066-3919, WOS:000282604000159.
 12. Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, Banciu Felicia, Pamîntaş Eugen, *A Fuzzy Logic Algorithm on Products Early Design Stage*, 15th International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation (ModTech 2010), Slănic Moldova, **2010**, pp. 651-654(4), ISBN 2066-3919, WOS:000282604000160.
 13. Cosma Cristian, Dume Adrian, **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, *Rapid Development of Products Using the Technique of Reverse Engineering*, 20th International Danube-Adria-Association-for-Automation-and-Manufacturing Symposium, Viena, **2009**, Vol 20, pp. 347-348(2), ISBN 978-3-901509-70-4 / 1726-9679, WOS:000282335600174.

b) Articole publicate în volumele unor manifestări științifice indexate în alte baze de date internaționale

1. **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Stan Daniel, *CMM Design Based on Fundamental Design Principles*, Modern Technologies in Industrial Engineering II, ModTech 2014, Polonia, Advanced Materials Research, Vol 1036, pp. 517-522(6), **2014**, ISSN 10226680 / 978-303835255-6, Trans Tech Publications, Switzerland, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.517 SCOPUS, Google Scholar.
2. Cioană Cristian, **Tulcan Aurel**, Grozav Ion, Cosma Cristian, *Scanning strategies for Aluminium and plastic parts*, 4th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS '11, 26-28 Oct. 2011, Timișoara, Romania, Solid State Phenomena, **2012**, pp. 406(6), ISBN 978-606-554-374-4, Google Scholar.

3. Raduță Aurel, Nicoară Mircea, **Tulcan Aurel**, Locovei Cosmin, *Numerical Techniques Used in Characterization of Biomaterials*, The 6th WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development, EEESD'10, 3rd WSEAS International Conference on Landscape Architecture, LA'10; Timișoara; Romania; 21-23 October **2010**, pp. 140(6), ISBN 978-960-474-237-0, SCOPUS, Google Scholar.
4. Stan Daniel, Șerban Iancu, Tulcan Liliana, Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, *Thermoplastics extrusion die with ultrasonic thermo-pellicular effect*, The 6th WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable Development, EEESD'10, 3rd WSEAS International Conference on Landscape Architecture, LA'10; Timișoara; Romania; 21-23 October **2010**, pp. 404(5), ISBN 978-960-474-237-0, SCOPUS, Google Scholar.
5. Tulcan Liliana, **Tulcan Aurel**, Turc Cristian, Stan Daniel, *Analysis of surface roughness profile machining by ultrasonic lapping*, Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21th International DAAAM Symposium, "Intelligent manufacturing and automation: Focus on interdisciplinary solutions", 20-23rd October 2010, Zadar, Croatia, Vol 20(1), pp. 1497(2), ISBN 1726-9679, SCOPUS, Google Scholar.
6. Cosma Cristian, **Tulcan Aurel**, Dume Adrian, Stan Daniel, Iclănzan Tudor, *A methodology for developing new products using reverse engineering and digital prototyping techniques*, 4th International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN and EUREKA Brokerage Event, Kallithea of Chalkidiki, Greece, **2008**, pp. 775(7), ISBN 978-960-243-649-3, Google Scholar.
7. **Tulcan Aurel**, Seiculescu Valentin, Cosma Cristian, Tulcan Liliana, Bernath Alexander, *Virtual Simulation of a Coordinate Measuring Machine Behavior at Accelerations and Variable Thermal Field*, 3rd International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN and EUREKA Brokerage Event, Kallithea of Chalkidiki, Greece, **2008**, pp. 715(6), ISBN 978-960-243-649-3, Google Scholar.

c) Articole publicate în volumele unor manifestări științifice naționale/internaționale neindexate

1. **Tulcan Aurel**, Cioană Cristian, Stan Daniel, Tulcan Liliana, Bernath Alexander, *Modular design of a coordinate measuring machine*, 4th International Conference on Manufacturing Engineering-ICMEN, Thessaloniki, Greece, **2011**, pp. 181(6), ISBN 978-960-243-649-3.
2. Tulcan Liliana, Nistoran Botiș Mihaela, **Tulcan Aurel**, *Ultrasonic cleaning in the food industry, Integrated systems for agri-food productions*, SIPA'09, Nyiregyhaza, Hungary, **2009**, pp. 289(4), ISBN 978-963-9909-40-3.
3. **Tulcan Aurel**, Seiculescu Valentin, Stan Daniel, Iclănzan Tudor, Bernath Alexander, *Virtual simulation of a coordinate measuring machine behaviour for high-speed measurement*, Simulation Design and Control of Foundry Processes, Krakow, Poland, **2006**, pp. 167(9), ISBN 83-88309-41-2.
4. **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Stan Daniel, Turc Cristian, *Reducing the time of adjustment of a classical press*, Conferința Științifică Internațională Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare-TMCR 2003, 29 Mai, Chișinău, Moldova, **2003**, vol 1, pp. 543(4), ISBN 9975-9748-0-5.
5. Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Turc Cristian, *The modification of the crystallinity rate of the polymers injected / extruded under ultrasonic activation*, Conferința Științifică Internațională Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare-TMCR 2003, 29 Mai, Chișinău, Moldova, **2003**, vol 2, pp. 205(4), ISBN 9975-9748-0-5.

6. Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, *The evolution of technological parameters in the electrochemical boring of high speed steel*, Conferința Științifică Internațională Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare-TMCR 2003, 29 Mai, Chișinău, Moldova, **2003**, vol 2, pp. 291(4), ISBN 9975-9748-0-5.
7. Tulcan Liliana, **Tulcan Aurel**, *Influența concentrației abrazivului la lepuirea plană activată ultrasonic*, Tehnologii neconvenționale, CITN 2000, vol 1, 2-3 Noiembrie, Brașov, Editura Printech București, **2000**, vol 1, pp. 161(4), ISBN 973-652-234-2. 94.
8. Rosinger Ștefan, **Tulcan Aurel**, *Cu privire la regimurile de funcționare ale unor sisteme de fabricație prin presare la rece*, A VII-a Conferință națională "Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000"-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, **2000**, pp. 163(6), ISBN 973-97486-3-5.
9. **Tulcan Aurel**, Rosinger Ștefan, *Capacitatea productivă și consumul energetic ale unor sisteme de fabricație prin presare la rece*, A VII-a Conferință națională "Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000"-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, **2000**, pp. 169(6), ISBN 973-97486-3-5.
10. **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, Stan Daniel, *Modelarea funcționării părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece – partea I*, A VII-a Conferință națională "Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000"-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, **2000**, pp. 175(8), ISBN 973-97486-3-5.
11. **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, Stan Daniel, *Modelarea funcționării părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece – partea a II-a*, A VII-a Conferință națională "Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000"-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, **2000**, pp. 183(6), ISBN 973-97486-3-5.
12. **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, Stan Daniel, *Modul de realizare a părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece*, A VII-a Conferință națională "Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000"-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, **2000**, pp. 189(4), ISBN 973-97486-3-5.
13. Stan Daniel, Iclănzan Tudor, **Tulcan Aurel**, *Interfața solid-polimer topit ca factor de influență asupra proprietăților reologice ale topiturilor de polimer*, A VII-a Conferință națională "Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000"-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, **2000**, pp. 251(8), ISBN 973-97486-3-5.
14. Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, *Stand experimental pentru studiul extrudării activate ultrasonice a topiturilor de polimer*, A VII-a Conferință națională "Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000"-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, **2000**, pp. 259(4), ISBN 973-97486-3-5.
15. Stan Daniel, Iclănzan Tudor, **Tulcan Aurel**, *Rezultate experimentale privind activarea ultrasonică a extrudării poliolefinelor*, A VII-a Conferință națională "Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000"-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, **2000**, pp. 263(6), ISBN 973-97486-3-5.
16. **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, *Lignes automates flexibles pour formage mécanique*, Conception et fabrication de produits mécaniques. Module d'Enseignement Francophone, Timișoara, Editura Eurobit Timișoara, 1999, pp. 157(24), ISBN 973-9441-59-9.

1.1.2.3 Brevete de invenții

1. Iclănzan Tudor, Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian, Dume Adrian, Tulcan Liliana, *Matriță și procedeu de injectare a pieselor miniaturale (Injection moulding process for manufacture of miniature pieces and specific mould design)*, Brevet RO 129443-A03, 2014, Titular UPT, ISI Derwent: DIIDW:2014-L22681.
2. Stan Daniel, Iclănzan Tudor, **Tulcan Aurel**, Turc Cristian, Cosma Cristian, Dume Adrian, Tulcan Liliana, *Matriță cu activare ultrasonică (MOULD WITH ULTRASONIC ACTIVATION of injecting a plastic material to obtain moulded products, in the conditions when the cavities are ultrasonically activated)*, rezultată din contract UPT nr. BC 19/2013 cu Nano Inteliform Timișoara, Brevet RO-129156-A0, CBI, RO-a2013-00273 /03.04.2013, titular: Nano Inteliform Timișoara, ISI Derwent: DIIDW:2014-C42316.
3. Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, Oancă Octavian, Stan Daniel, *Dispozitiv portscula, cu sistem de activare ultrasonica incorporat, pentru prelucrare prin aschiere, abrazare si eroziune ultrasonica (TOOL HOLDING DEVICE WITH INCORPORATED ULTRASOUND ACTIVATION SYSTEM FOR MACHINING BY CHIP REMOVAL, GRINDING AND ULTRASONIC EROSION)*, Brevet RO 128369-A0 /30.05.2013 (CBI 780 /01.11.2012), titular: UPT, drept de utilizare pentru partenerul spaniol TECHNIKER, coordonator de program, ISI Derwent: DIIDW:2013-K35904.
4. Iclănzan Tudor, Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Seiculescu Valentin, Cosma Cristian, *Matriță pentru microinjectare*, Brevet RO 122811-B1, 26.02.2010, titular UPT, ISI Derwent: DIIDW:2010-K26941.
5. Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian, *Dispozitiv pentru uscarea cablurilor cu înveliș polimeric extrudat*, Brevet RO 121874, 2008, Titular UPT.

1.1.2.4 Cărți publicate

Cele șase cărți publicate în Editura Politehnica sunt rezultatul activității de cercetare și a celei didactice desfășurate în domeniul deformărilor plastice la rece și al măsurării tridimensionale.

Cartea *Sisteme flexibile de fabricație prin presare la rece* (2002) reprezintă una dintre puținele apariții editoriale din țară în domeniul sistemelor flexibile de fabricație prin deformare plastică la rece, domeniu dezvoltat de domnul Prof. univ. dr. ing. Rosinger Ștefan de la Catedra de TCM de la Facultatea de Mecanică din Timișoara, cu care am avut o strânsă colaborare didactică și de cercetare în domeniu.

Cartea *Sisteme de control* este prima apariție editorială din țară în domeniul măsurării tridimensionale, la fel și cartea *Măsurări tridimensionale. Aplicații specifice în PC-DMIS* care se referă la realizarea programelor de măsurare piesă folosind softul PC-DMIS.

Cele două cărți: *Tehnologii de deformare plastică. Proiectarea ștanțelor și matrițelor*, respectiv *Elemente de proiectare a ștanțelor și matrițelor* reprezintă un suport important pentru studenți și inginerii proiectanți de ștanțe și matrițe.

În afara cărților editate, pe platforma Campus virtual (<https://cv.upt.ro>) a Universității Politehnica Timișoara se mai găsesc cărți în format electronic, care reprezintă suporturi de curs la unele din disciplinele predate.

1. **Tulcan Aurel**, *Măsurări Tridimensionale. Aplicații specifice în PC-DMIS*, Editura Politehnica, Timișoara, 2022, 217 pag., ISBN 978-606-35-0475-4.

2. **Tulcan Aurel**, *Tehnologii de deformare plastică. Proiectarea ștanțelor și matrițelor*, Editura Politehnica, Timișoara, 2021, 198 pag., ISBN 978-606-35-0442-6.
3. **Tulcan Aurel**, *Tehnologii de deformare plastică. Elemente de proiectare a ștanțelor și matrițelor*, Editura Politehnica, Timișoara, 2021, 164 pag., ISBN 978-606-35-0436-5.
4. **Tulcan Aurel**, *Tehnologii de deformare plastică. Aplicații specifice*, Editura Politehnica, Timișoara, 2019, 117 pag., ISBN 978-606-35-0305-4.
5. **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Iclănzan Tudor, *Sisteme de control*, Editura Politehnica, Timișoara, 2006, 225 pag, ISBN 973-625-022-9.
6. **Tulcan Aurel**, *Sisteme flexibile de fabricație prin presare la rece*, Editura Politehnica, Timișoara, 2002, 239 pag, ISBN 973-625-022-9.
7. **Tulcan Aurel**, *Tehnologii de deformare plastică*, Ebook, 2021, Campus virtual UPT: <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=1702>.
8. **Tulcan Aurel**, *Matematici avansate pentru ingineri*, Ebook, 2021, Campus virtual UPT: <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=1152>.
9. **Tulcan Aurel**, *Proceduri de măsurare 3D*, Ebook, 2013, Campus virtual UPT: <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=1794>.
10. **Tulcan Aurel**, *Utilaje de prelucrare și control*, Ebook, 2013, Campus virtual UPT: <https://cv.upt.ro/course/view.php?id=2985>.

1.1.3 Proiecte de cercetare

Cercetarea științifică desfășurată după susținerea tezei de doctorat s-a efectuat în cadrul a numeroase proiecte/granturi de cercetare sau proiecte realizate cu industria (cu companii naționale și multinaționale), proiecte naționale sau internaționale, la care am fost director de proiect sau membru în echipa proiectului. În tabelul 1.2 sunt prezentate sintetic proiectele de cercetare, respectiv cele cu industria, iar în subcapitolele următoare, este prezentată lista proiectelor în care am fost implicat. Cercetarea s-a efectuat, la început în cadrul Centrului de Dezvoltare în Plasturgie (director centru: Prof. univ. dr. ing. Tudor Iclănzan) și ulterior în cadrul Centrului de Cercetare în Inginerie Integrată (director centru: Prof. univ. dr. ing. George Drăghici).

Tabel 1.2 Proiecte/granturi de cercetare și contracte cu industria realizate în perioada 1999-2022

Proiecte/granturi de cercetare și contracte cu industria	Nr.	Valoare totală (minimă) proiecte [Euro]
A. Proiecte/granturi de cercetare	24	2.098.916
a1) Coordonator	7	48.137
a1.1) proiecte/granturi internaționale	0	0
a1.2) proiecte/granturi naționale	7	48.137
a2) Membru în echipa de cercetare	17	2.050.779
a2.1) proiecte/granturi internaționale	3	104.500
a2.2) proiecte/granturi naționale	14	1.946.279
B. Proiecte cu industria	49	186.648
b1) Coordonator	23	90.042
b1.1) proiecte internaționale	1	40.000
b1.2) proiecte naționale	22	50.042
b2) Membru în echipa de proiect	26	96.606
b2.1) proiecte internaționale	1	25.000
b2.2) proiecte naționale	25	71.606

*1.1.3.1 Coordonator proiecte/granturi de cercetare**a1.2) proiecte/granturi naționale*

1. *Dezvoltarea unui accelerator de afaceri studențesc în cadrul societății antreprenoriale studențești din Universitatea Politehnica Timișoara (DAAS SAS-UPT)*, CNFIS-FDI_2018-0533, **2018**, Valoare **28.365 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Drăgan Florin, Tulcan Liliana, Turc Cristian, Dume Adrian, Cosma Cristian, Ștef Dorian, Dungan Luisa, Macarie Isabela, Nagy Gabriela, Birtea Adina)**.
2. *Sisteme expert de optimizare a proceselor tehnologice*, PNII ESOP 71-133/2007, **2010**, Valoare **8.703 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Seiculescu Valentin, Stan Daniel, Ferician Florin, Cosma Cristian, Dume Adrian, Rotar Daniel, Turc Cristian)**.
3. *Reingineria produselor pe baza tehnicilor de prototipare rapidă și măsurare tridimensională*, Contract nr. A1/GR181/19.05.2006, **2006**, Valoare **2.837 Euro (Dir. Tulcan Aurel, Iclănzan Tudor, Seiculescu Valentin, Stan Daniel, Tulcan Liliana, Cosma Cristian, Dume Adrian)**.
4. *Reingineria produselor pe baza tehnicilor de prototipare rapidă și măsurare tridimensională*, Contract nr. 32940 tema 31/2005, cod CNCSIS 201, **2005**, Valoare **3.036 Euro (Dir. Tulcan Aurel, Iclănzan Tudor, Seiculescu Valentin, Stan Daniel, Tulcan Liliana, Cosma Cristian, Dume Adrian)**.
5. *Reingineria produselor pe baza tehnicilor de prototipare rapidă și măsurare tridimensională*, Contract nr. 32940 tema 24/2004, cod CNCSIS 201, **2004**, Valoare **2.220 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Iclănzan Tudor, Seiculescu Valentin, Stan Daniel, Tulcan Liliana, Cosma Cristian, Dume Adrian)**.
6. *Retehnologizarea unităților de presare la rece prin automatizare flexibilă*, Contract nr. 33501/2002, tema 12, cod CNCSIS 74, **2002**, Valoare **1.439 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Tulcan Liliana, Stan Daniel)**.
7. *Retehnologizarea unităților de presare la rece prin automatizare flexibilă*, Contract nr. 34977/2001, tema 43, cod CNCSIS 144, **2001**, Valoare **1.537 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Tulcan Liliana, Stan Daniel)**.

*1.1.3.2 Membru în echipa de cercetare**a2.1) Proiecte/granturi internaționale*

1. *Ultrasonic assisted processes for machining of high precision components*, RO: MNT 7-021/ **2010-2012**, Valoare **73.000 Euro (Dir. Turc Cristian; Drăghici George, Tulcan Aurel, Stan Daniel, Belgiu George, Grozav Ion, Tulcan Liliana)**.
2. *European Network for Plastics and Composites Training*, LdV/PAR/2009 RO/ 051, **2009-2012**, Valoare **14.000 Euro (Dir. Stan Daniel; Iclănzan Tudor, Șerban Viorel, Tulcan Aurel, Cosma Cristian, Dume Adrian)**.
3. *Sistem de management al calității formării continue*, Leonardo da Vinci D/99/1/052213/PI/ III.3.a /CONT, **1999-2000**, Valoare **17.500 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**.

a2.2) Proiecte/granturi naționale

1. *Asigurăți Viitorul prin Educație și Antreprenoriat – AVEA*, Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Capital Uman 2014-2020 Axa prioritară 6 - Educație și competențe Perioada 01.09.2019-2021, POCU/379/6/21/6.7/6.9/6-10/123900/, Valoare **1.626.435 Euro (Dir. Herban Sorin; Tulcan Aurel, Stanciu Loredana, Dumitrel Alina, Mățiu-Iovan Liliana, Grecea Carmen, Socalici Ana, Tămășilă Matei, Mușuroi Sorin, Dejica Daniel, Grecea Daniel ș.a.)**.

2. *Sisteme expert de optimizare a proceselor tehnologice*, PNII ESOP 71-133/2007, **2007-2009**, Valoare **105.816 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Stan Daniel, Tulcan Aurel, Cosma Cristian, Dume Adrian, Ferician Florin)**.
3. *Centrul virtual pentru tehnologii integrate cu aplicații ale energiei electroacustice în ingineria matrițelor avansate*, CEEX ULTRATECH Nr. 265/2006, **2006-2008**, Valoare **52.478 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Stan Daniel, Seiculescu Valentin, Tulcan Aurel)**.
4. *Materiale, tehnologii și echipamente pentru profilări plane și spațiale – MATEPROF*, CEEX MATEPROF Nr.130/2006, **2006-2008**, Valoare **64.809 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Tulcan Aurel, Stan Daniel, Ferician Florin, Cosma Cristian, Dume Adrian)**.
5. *Rețea de fabricație inovativă – IMAN*, CEEX IMAN nr.41/2005, **2005-2008**, Valoare **38.576 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Tulcan Aurel, Stan Daniel, Ferician Florin, Cosma Cristian, Dume Adrian)**.
6. *Realizarea unei proceduri de evaluare a invențiilor și a unui pol de intermediere și consultanță privind aplicarea acestora*, Contract nr. 32940, tema 27/**2005**, cod CNCSIS 193, Valoare **4.968 Euro (Dir. Stan Daniel; Iclănzan Tudor, Tulcan Aurel, Seiculescu Valentin)**.
7. *Realizarea unei proceduri de evaluare a invențiilor și a unui pol de intermediere și consultanță privind aplicarea acestora*, Contract nr. 32940, tema 21/**2004**, cod CNCSIS 193, Valoare **3.207 Euro (Dir. Stan Daniel; Iclănzan Tudor, Tulcan Aurel, Seiculescu Valentin)**.
8. *Implementarea unui centru de calitate și măsurări tridimensionale la Universitatea Politehnica din Timișoara*, Contract nr. 33550/**2003**, tema 13, cod CNCSIS 15, Valoare **1.050 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Tulcan Aurel, Stan Daniel)**.
9. *Implementarea unui centru de calitate și măsurări tridimensionale la Universitatea Politehnica din Timișoara*, Contract nr. 33501/**2002** tema 22, cod CNCSIS 498, Valoare **1.683 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Tulcan Aurel, Stan Daniel)**.
10. *Implementarea unui centru de calitate și măsurări tridimensionale la Universitatea Politehnica din Timișoara*, Contract nr. 34977/**2001** tema 20, cod CNCSIS 873, Valoare **2.358 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Tulcan Aurel, Stan Daniel)**.
11. *Dezvoltarea studiilor aprofundate și de doctorat în domeniul fabricației flexibile, concepției integrate și a ingineriei simultane*, Grant D cod CNCSIS nr.55/rI 1998-**2001**, Valoare **40.000 \$ (Dir. Drăghici George, Pircea Ioan, Iclănzan Tudor, Stan Daniel, Tulcan Aurel, Turc Cristian, Belgiu George)**.
12. *Sistem mobil de prototipare rapidă*, Contract nr. 55/**1999**, Valoare **5.000 \$ (Dir. Iclănzan Tudor, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**.
13. *Școala universitară de formare inițială și continuă a personalului didactic și a trainerilor din domeniul specializărilor tehnice și ingineresti - DidaTec*, POSDRU/87/S/1.3/60891, Contract 5152/50 din 01.04.2013, (**Dir. Vasiiu Radu, Tulcan Aurel, ș.a.**).
14. *Școala doctorală în sprijinul cercetării în context european*, POSDRU/21/1.5/G/13798, 2010, (**Dir. Daniel Andreescu, Tulcan Aurel, ș.a.**).

1.1.4 Proiecte cu industria

1.1.4.1 Coordonator proiecte cu industria

bl.1) proiecte internaționale

1. *Motorizare mașini de măsurat tridimensional și proiectarea de mașini de măsurat noi*, Convenție nr.12048/2000 UPT- Industrielle CNC-und Messtechnik Germania, **Valoare 40.000 Euro (Dir. Tulcan Aurel / 2008-2013)**; Stan Daniel, Iclănzan Tudor). Beneficiar Industrielle CNC-und Messtechnik GmbH, Germania.

b1.2) proiecte naționale

1. *Cercetări și consultanță tehnică privind ameliorarea calității la măsurarea tridimensională a unor produse din materiale polimerice specifice companiei PLASESS*, Contract nr. BC 17/26.01.2021, Valoare **1.336 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Tulcan Liliana)**. Beneficiar SC Plases SRL.
2. *Cercetări privind optimizarea soluțiilor de proiectare organe de mașini și scule de presare specifice companiei Zoppas*, Contract nr. BC 39/01.04.2021, Valoare **2.877 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Mărgineanu Dan, Tulcan Liliana)**. Beneficiar SC Zoppas Industries Romania SRL.
3. *Cercetări și consultanță tehnică privind ameliorarea calității la măsurarea tridimensională a unor produse specifice companiei Continental automotive*, Contract nr. BC 35/03.04.2019, Valoare **5767 Euro (Dir. Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
4. *Cercetări și consultanță tehnică privind specificarea geometrică a produselor specifice companiei Continental automotive*, Contract nr. BC 9/22.01.2019, Valoare **802 Euro (Dir. Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
5. *Cercetări privind ameliorarea calității produselor - elemente de încălzire - specifice companiei Zoppas*, Contract BC 38 / 14.05.2018, Valoare **2.148 Euro (Dir. Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Zoppas Industries Romania SRL.
6. *Cercetări privind ameliorarea calității sistemelor de iluminat din industria auto*, Contract nr. BC 11/14.02.2017, Act adițional nr.2 din 05.02.2019, Act adițional nr.3 din 16.02.2021-31.01.2023, Valoare **13.357 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Daniel Stan, Liliana Tulcan)**. Beneficiar SC Hella România SRL.
7. *Cercetări și investigații privind determinarea preciziei unor componente din domeniul automotive*, Contract cadru nr. 18/02.03.2017, Valoare **314 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Tulcan Liliana)**. Beneficiar SC Lemman Industrie SRL.
8. *Cercetări și consultanță tehnică privind specificarea geometrică a produselor și măsurarea pieselor pe mașini de măsurat tridimensional*, Contract nr. BC 36/10.04.2017, Valoare **1.363 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Tulcan Liliana)**. Beneficiar SC Lemman Industrie SRL.
9. *Cercetări și consultanță tehnică privind specificarea geometrică a produselor specifice companiei FLEX*, Contract nr. BC 85/03.10.2017, Valoare **1.224 Euro (Dir. Tulcan Aurel)**. Beneficiar FLEX LTD.
10. *Cercetări și consultanță tehnică privind ameliorarea calității la măsurarea tridimensională a unor produse din materiale polimerice*, Contract nr. BC 77/21.07.2016, Valoare **1.844 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Daniel Stan, Liliana Tulcan, Florina Pop, Cristian Pop)**. Beneficiar SC Plases SRL.
11. *Specificarea geometrică a unor produse din industria auto*, Contract nr. CEP 22/04.11.2016, Valoare **975 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Liliana Tulcan, Florina Pop, Cristian Pop)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
12. *Cercetări și consultanță tehnică privind optimizarea procesului de injectare a materialelor polimerice*, Contract nr. BC 52/07.05.2015, Valoare **900 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Stan Daniel)**. Beneficiar Asociația Profimatt.
13. *Cercetări și consultanță tehnică privind îmbunătățirea specificațiilor geometrice ale produsului PCB carrier MFC411*, Contract nr. BC 127/16.12.2015, Valoare **273 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Tulcan Liliana)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.

14. *Cercetări și consultanță tehnică privind îmbunătățirea preciziei dimensionale și de formă a unor produse din industria automotive*, Contract nr. BC 29 /26.02.2014, Valoare **2.566 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Margineanu Dan, Tulcan Liliana)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
15. *Cercetări și consultanță tehnică privind îmbunătățirea preciziei unor componente de motor realizate din materiale polimerice*, Contract nr. BC 59 /06.05.2014, Valoare **962 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Stan Daniel, Tulcan Liliana)**. Beneficiar SC MAHLE componente de motor SRL.
16. *Cercetări și consultanță tehnică privind îmbunătățirea preciziei unor componente de motor din industria automotive specifice firmei MAHLE*, Contract nr. 21/21.02.2013, Valoare **2.228 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Mărgineanu Dan)**. Beneficiar SC MAHLE componente de motor SRL.
17. *Cercetări și consultanță tehnică privind îmbunătățirea preciziei unor componente de motor din industria automotive specifice firmei MAHLE*, Contract nr. 50/14.05.2013, Valoare **1.344 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Mărgineanu Dan, Liliana Tulcan)**. Beneficiar SC MAHLE componente de motor SRL.
18. *Cercetări și investigații privind precizia dimensională și de formă a unor componente specifice Elbromplast*, Contract nr. 81/19.07.2012, Valoare **4.752 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Stan Daniel, Tulcan Liliana)**. Beneficiar SC Elbromplast SA.
19. *Asistență tehnică în domeniul controlului statistic al proceselor de fabricație și planificarea experimentelor*, Contract nr. 125/23.10.2012, Valoare **1.032 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Grozav Ion)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
20. *Asistență tehnică în domeniul controlului statistic și a măsurărilor tridimensionale*, Contract Nr: 81/04.07.2011, Valoare **1.439 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Grozav Ion)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
21. *Studii privind îmbunătățirea preciziei dimensionale și de formă a produselor din industria auto*, Contract Nr.121/06.12.2011, Valoare **1.492 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Grozav Ion, Cioană Cristian)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
22. *Cercetări și investigații privind precizia dimensională și de formă a componentelor din industria auto*, Contract nr. 130/16.12.2011, Valoare **3.228 Euro (Dir. Tulcan Aurel; Tulcan Liliana)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.

1.1.4.2 Membru în echipa de proiect

b2.1) proiecte internaționale

1. *Motorizare mașini de măsurat tridimensional și proiectarea de mașini de măsurat noi*, Convenție nr.12048/2000 UPT- Industrielle CNC-und Messtechnik Germania, Valoare **25.000 Euro (Dir. Iclănzan Tudor, Resp. Tulcan Aurel /2000-2008)**, Stan Daniel). Beneficiar Industrielle CNC-und Messtechnik GmbH, Germania.

b2.2) proiecte naționale

1. *Analiza MFR (Melt Flow Rate) și consultanță privind calitatea produselor injectat*, Contract nr. BC 50 /31.05.2018, Valoare **1.466 Euro (Dir. Stan Daniel; Tulcan Aurel)**. Beneficiar MGI Coutier (Akwel).
2. *Analiza MFR (Melt Flow Rate) și consultanță privind calitatea produselor injectat*, Contract nr. BC 46 /03.05.2017, Valoare **1.405 Euro (Dir. Stan Daniel; Tulcan Aurel)**. Beneficiar MGI Coutier (Akwel).

3. *Proiectarea pieselor injectate din mase plastice*, Contract nr. CEP 24/10.02.2017, Valoare **841 Euro (Dir. Stan Daniel; Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
4. *Servicii de analiza MFR (Melt Flow Rate) și consultanță privind calitatea produselor injectate*, Contract nr. BC 44 /13.04.2016, Valoare **1.603 Euro (Dir. Stan Daniel; Tulcan Aurel)**. Beneficiar MGI Coutier (Akwel).
5. *Servicii de consultanță pentru inovare, asistență tehnologică matrițe cu activare ultrasonică*, Contract nr. BC 19 /20.02.2013, Valoare **22.470 Euro (Dir. Daniel Stan; Tulcan Aurel, Cosma Cristian, Dume Adrian, Tulcan Liliana, Turc Cristian, Adam Andrei)**. Beneficiar SC NanoInteliform microinjection SRL.
6. *Proiectarea echipamentelor pentru realizarea ambalajelor din PET*, Contract nr. BC 102/18.09.2012, Valoare **11.272 Euro (Dir. Radu Bogdan; Tulcan Aurel, Stan Daniel, Botea Traian, Prostean Gabriela, Cosma Cristian)**. Beneficiar SC SIPA Engineering Romania SRL.
7. *Cercetări și investigații privind componentele electronice din industria auto*, Contract nr.31/2011 Valoare **3.315 Euro (Dir. Răduță Aurel; Locovei Cosmin, Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
8. *Asistență tehnică în domeniul material, metode de prelucrare, acoperiri, piese din material plastic, procese de deformare plastic la rece, măsurări și controlul statistic al proceselor de fabricație*, Contract Nr: 5/08.01.2010, Valoare **3.255 Euro (Dir. Grozav Ion; Stan Daniel, Tulcan Aurel, Nicoară Mircea, Răduță Aurel, Cucuruz Laurențiu, Vaszilcsin Nicolae)**. Beneficiar SC Continental Automotive România SRL.
9. *Realizarea serviciilor de execuție a proiectului cu titlul "Activități de consultanță privind optimizarea selecției de materiale, concepție constructivă, proiectare tehnologii și asigurarea calității la producția elementelor electrice de încălzire"*, Contract Nr: 136/09.12.2009, Valoare **10.987 Euro (Dir. Nicoară Mircea; Răduță Aurel, Locovei Cosmin, Seiculescu Valentin, Grozav Ion, Stan Daniel, Tulcan Aurel, Margineanu Dan)**. Beneficiar SC Zoppas Industries Romania SRL.
10. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în "Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 796 /2007, Valoare **1.108 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Esser SRL.
11. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în "Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 773 /2007, Valoare **554 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC ELBA SA.
12. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în "Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 762 /2007, Valoare **1.108 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Salomon SRL.
13. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în "Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 755 /2007, Valoare **554 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Lemman Industrie SRL.
14. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în "Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 780 /2007, Valoare **554 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Yazaki SRL.
15. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în "Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 434 /2006, Valoare **1.700 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Esser SRL.

16. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în “Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 435 /2006, Valoare **2.550 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. SC ELBA SA.
17. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în “Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 436 /2006, Valoare **1.700 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. SC Sol Plus SRL.
18. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în “Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 437 /2006, Valoare **1.700 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. SC Salomon SRL.
19. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în “Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 493 /2006, Valoare **850 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Leman Industrie SRL.
20. *Asistență tehnică pentru formare de nivel master în “Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite*, Contract Nr: 552 /2006, Valoare **850 Euro (Dir. Iclănzan Tudor; Seiculescu Valentin, Ferician Florin, Stan Daniel, Tulcan Aurel)**. Beneficiar SC Yazaki SRL.
21. *Proiectarea setului de role pentru realizarea prin profilare a produsului stâlp CC-2.1*, Contract nr. 844/2002, Valoare **799 Euro (Dir. Seiculescu Valentin; Rosinger Ștefan, Stan Daniel, Tulcan Aurel, Krausz Alfred)**. Beneficiar SC Tehnomet sa.
22. *Implementarea sistemului pentru managementul calității în educația permanentă*, Contract nr. 607/2001, (**Dir. Iclănzan Tudor, Seiculescu Valentin, Stan Daniel, Tulcan Aurel**).
23. *Asistență tehnică pentru implementarea unui sistem de calitate în educația permanentă*, Contract nr. 690/2001, (**Dir. Iclănzan Tudor, Seiculescu Valentin, Stan Daniel, Tulcan Aurel**).
24. *Cercetări asupra dornurilor utilizate la instalațiile de autofretare a țevelor de artilerie în vederea reducerii uzurii*, Contract nr. 505/2000, Valoare **600 Euro (Dir. Iclănzan Tudor, Seiculescu Valentin, Tulcan Aurel, Nicoară Mircea)**.
25. *Cercetări privind procesul de autofretare a țevelor de artilerie*, Contract nr. 452/1999, Valoare **365 Euro (Dir. Iclănzan Tudor, Seiculescu Valentin, Tulcan Aurel, Belgiu George, Șoșdean Dănuț, Tulcan Liliana)**. Beneficiar UM Reșița.

1.2 Realizări academice

1.2.1 Activitatea didactică

Cariera didactică universitară a început în decembrie 1990 la Catedra Tehnologia Construcțiilor de Mașini (TCM) din cadrul Facultății de Mecanică din Timișoara. În decembrie 1990 am ocupat, prin concurs, postul de preparator universitar, în 1994 postul de asistent universitar, în 1998 postul de șef de lucrări, iar din 2008 și până în prezent postul de conferențiar universitar.

În calitate de membru al Catedrei TCM / Departamentul IMF (din 2005), după susținerea tezei de doctorat (perioada 1999-2022) am desfășurat activități de curs / laborator / proiect la disciplinele:

- *Tehnologia deformărilor plastice și injectării materialelor – TDPIM* (curs, laborator, proiect) - anul II Colegiu de Tehnologia prelucrării metalelor;
- *Metode și mijloace de control – MMC* (curs, laborator) - anul II Colegiu de Tehnologia prelucrării metalelor;
- *Proiectarea mașinilor de presare și injectare - PMPI* (curs, laborator, proiect) - anul IV Mașini și sisteme de producție;
- *Sisteme de control – SC* (curs, laborator) - anul V TCM;
- *Măsurări tridimensionale – MT* (curs, laborator) - anul I Master Reingineria produselor din materiale polimerice și compozite;
- *Proiectare asistată CAD – PACAD* (laborator) - anul III Inginerie industrială și anul IV TCM;
- *Modificarea și optimizarea formei - MOF* (curs, laborator, proiect) - anul IV Design industrial;
- *Sisteme flexibile de fabricație – SFF* (curs, proiect) - anul II Master Inginerie Integrată;
- *Utilaje de prelucrare și control – UPC* (curs, laborator, proiect) - anul III Inginerie și management industrial, Inginerie economică industrială/grupa mecanică, de la Facultatea de Management în Producție și Transporturi;
- *Tehnologii de deformare plastică – TDP* (curs, laborator, proiect) – anul III Inginerie Industrială;
- *Proceduri de măsurare 3D –* (curs, laborator) – anul IV TCM;
- *Măsurări tridimensionale – MT* (curs, laborator) - anul II Master Ingineria produselor din materiale polimerice și compozite și Master Inginerie Integrată;
- *Matematici avansate pentru ingineri – MAPI* (curs, laborator) – anul I Master: Ingineria produselor din materiale polimerice și compozite, Inginerie Integrată, Materiale și tehnologii avansate, Procedee productive de sudare în mediu de gaze protectoare.

În tot acest interval de timp am fost permanent preocupat de ridicarea nivelului științific și actualizarea materiilor predate în conformitate cu ultimele realizări pe plan internațional, de expunerea acestora într-o manieră modernă și accesibilă studenților, care să le faciliteze însușirea tehnicilor de laborator și a deprinderilor de proiectare, utilizând tehnici moderne de calcul în proiectare, execuție și exploatare, cât și în ceea ce privește controlul dimensional al pieselor. În cadrul cursurilor, pentru o mai bună înțelegere a noțiunilor prezentate, s-au folosit metode moderne de predare corelate cu prezentarea unor studii de caz.

Legat de partea aplicativă de laborator am actualizat conținutul unor lucrări de laborator existente, am realizat lucrări de laborator noi și standuri noi de laborator, respectiv laboratoare noi. În anul 2000 am introdus, alături de dl. prof.univ.dr.ing. Tudor ICLĂNZAN, pentru prima dată în Universitatea Politehnica Timișoara, conceptul de *Măsurare tridimensională*, prin introducerea disciplinei noi de *Sisteme de control* la anul V TCM și am realizat primul laborator de Măsurare Tridimensională din UPT în parteneriat cu Compania Industrielle CNC-und Messtechnik, Germania (*convenție de colaborare nr. 12048/10.10.2000*). Implementarea conceptului de măsurare

tridimensională la Universitatea Politehnica Timișoara a presupus, din partea autorului acestei teze:

- efectuarea de cercetări privind precizia de măsurare a unei mașini de măsurat tridimensional, respectiv rolul acestora în asigurarea calității produselor;
- *Concepția sistemelor de antrenare pentru 5 tipuri de mașini de măsurat de producție Brown&Sharpe, Mitutoyo, Cordax Seffield și TESA;*
- *Concepția sistemelor de antrenare pentru mașina manuală de măsurat TESA MicroMS 343 și transformarea ei în mașină CNC (intrată în dotarea laboratorului de Măsurări tridimensionale – IMF/ UPT);*
- *Concepția, analiza cu element finit și proiectarea a două mașini de măsurat tridimensionale noi (arhitectură cu portal fix și masă mobilă): PRESINGO 755 în 3 axe (X,Y,Z) de precizie sub micrometrică (0,9 micrometri), respectiv PRESINGO 755 în 4 axe (X,Y,Z,R), cu execuție în Germania, ca rezultat al activității de cercetare în cadrul colaborării internaționale mai sus amintite.*
- *Concepția pentru prima dată la o mașină de măsurat tridimensională a unei mese rotative de precizie ridicată (axa a IV-a, axa R de rotație – PRESINGO 755 în 4 axe), înglobată în masa mașinii;*
- *Concepția, analiza cu element finit și proiectarea unei mașini de măsurat tridimensionale noi (arhitectură cu punte în L): NovaBernath 565 în 3 axe (X,Y,Z) de precizie micrometrică (2,9 micrometri), cu execuție în România de către Nova Grup Cugir, respectiv unele componente în China și Germania.*

Dotări realizate în cadrul Laboratoarelor de Măsurări Tridimensionale (Lab. MT 1 și MT 2):

- ***Mașina de măsurat în coordonate TESA MicroMS 343 - manuală + soft de măsurare Quindos3.0*** (Firma Messtechnik Wetzlar-Germania) - colaborare internațională cu compania Industrielle CNC-und Messtechnik Germania (director Tudor Iclănzan; resp. Aurel Tulcan);
- ***Mașina de măsurat în coordonate TESA MicroMS 343-CNC + soft de măsurare Quindos 7*** (firma Messtechnik Wetzlar - Germania) - colaborare internațională cu compania Industrielle CNC-und Messtechnik Germania și contracte de cercetare (director Aurel Tulcan);
- ***Scanner laser cu masă rotativă Roland Picza LPX-600*** - contract de cercetare (Dir. Tudor Iclănzan; Aurel Tulcan - membru în echipa de cercetare);
- ***Mașină de măsurat în coordonate DEA GLOBAL Advantage 7.10.7*** (precizie 1,9 micrometri), cu cap de măsurare rotativ și magazie de palpatoare cu șase stații, soft de măsurare PC-DMIS 2022.1 (1 licență online și 25 licențe offline) – Parteneriat cu compania Hexagon Manufacturing Intelligence (coordonator: Aurel Tulcan);
- ***Accesorii specifice pentru măsurarea tridimensională*** (controllere, senzori, palpatoare, sisteme de fixare piesă, compresoare, sisteme de filtrare aer, aparate de climatizare etc.) - contracte de cercetare (director Aurel Tulcan).

Dotări realizate în cadrul laboratorului de Deformări plastice la rece (DPR) prin implicare directă a autorului acestei teze:

- ***Foarfecă ghilotină*** cu acționare manuală;
- ***Foarfecă unghiulară*** cu acționare manuală;
- ***Tipizat cu 4 coloane de ghidare*** și cu placă de desprindere mobilă (parteneriat cu compania Meusburger - coordonator Aurel Tulcan);
- ***Ștanță combinată cu acțiune succesivă*** de perforare și decupare cu coloane de ghidare și placă de desprindere mobilă;
- ***Softul Metalix*** specializat în dezvoltarea de soluții CAD/CAM avansate pentru prelucrarea pieselor din table: crearea automată a desfășurății piesei, optimizare croire, generare cod NC pentru programarea mașinilor de debitare prin ștanțare/laser/plasmă/oxigaz/jet de apă a semifabricatelor tip tablă și țevă, crearea tehnologiei de îndoire: simularea pe calculator și

generarea programelor pentru presele abkant etc. (parteneriat cu compania AGO Trade Group - coordonator Aurel Tulcan).

În ceea ce privește activitatea de proiect am depus eforturi de trecere de la activitatea de proiectare clasică la cea modernă de proiectare asistată de calculator (CAD), cu descărcarea de componente, tipizate de ștanțe și matrițe, de pe site-urile unor companii de profil. Activitatea de proiectare se face folosind softuri performante de proiectare asistată (SOLIDWORKS) și de analiză cu element finit (COSMOS, ANSYS), respectiv de optimizare a croirii și de simulare a îndoirii pe prese abkant (METALIX).

Experiența didactică acumulată a condus la editarea unor cărți de specialitate, ca suporturi de curs, lucrări de laborator și proiect. Dintre acestea, cărțile *Sisteme de control* (Editura Politehnica, 2006) și *Măsurări Tridimensionale. Aplicații specifice în PC-DMIS* (Editura Politehnica, 2022), se constituie ca *premiere naționale* în ceea ce privește Măsurarea tridimensională.

Un aspect important în activitatea didactică a fost cel de coordonare a studenților în vederea elaborării proiectului de diplomă și a lucrării de disertație. În perioada 1999-2022 am coordonat peste 110 studenți de la ciclul licență și master, majoritatea dintre ei având teme din diverse companii, având ca specific concepția, fabricația și controlul tridimensional. O preocupare constantă a mea a fost de încurajare a studenților de a redacta, susține și publica o lucrare științifică bazată pe rezultatele obținute în cadrul proiectului de diplomă și a lucrării de disertație, în cadrul unor simpozioane studențești sau a unor reviste.

În 2008 și 2019 am participat, în calitate de responsabil program de studii de masterat *Ingineria produselor din materiale polimerice și compozite* și responsabil domeniu Inginerie Industrială/program de studii de masterat, la coordonarea și întocmirea documentației de autoevaluare periodică în vederea evaluării programelor de studii de către ARACIS.

Începând cu anul 2000 am oferit sprijin și îndrumare pentru cercetare la un număr de 12 doctoranzi aflați în stagiul de pregătire la doctorat sub coordonarea prof.univ.dr.ing. Tudor ICLÂNZAN și prof.univ.dr.ing. George DRĂGHICI. Dintre aceștia, la un număr de 6 am participat în comisia de îndrumare.

În anul 2018 am primit finanțare pentru proiectul CNFIS_FDI_2018_0533 *”Dezvoltarea unui accelerator de afaceri studențesc în cadrul societății antreprenoriale studențești din Universitatea Politehnica Timișoara (DAAS^{SAS-UPT})”*, având ca obiectiv general: asigurarea unui cadru adecvat pentru dezvoltarea unor afaceri de către studenții și absolvenții universității. În cadrul acestui proiect am organizat mai multe evenimente dedicate antreprenoriatului în cadrul UPT și am amenajat un spațiu în Facultatea de Mecanică, dotat cu mobilier și tehnică de calcul și de videoconferințe dedicat studenților pentru dezvoltarea de startup-uri în faza de preaccelerare și accelerare. Ulterior, prin parteneriatul avut cu Incuboxx Timișoara, startup-urile dezvoltate în cadrul acceleratorului de afaceri vor putea fi mutate în Incuboxx pentru faza de incubare și apoi consolidare a afacerii respective.

În perioada 2015-2019 am organizat și coordonat la nivel de facultate mai multe concursuri studențești: *Concurs ContiTest; Conti Engineering; Workshop proiectare; Vitesco test* alături de companiile Continental automotive România și Vitesco Technologies. Aceste concursuri s-au adresat, cu precădere, studenților din anul 3 și 4 de studii de licență și a celor de la masterat, unde studenții și-au putut etala cunoștințele dobândite în facultate și afla noutăți din domeniul concepției și fabricației automobilelor.

1.2.2 Formare profesională

În toată perioada de după susținerea tezei de doctorat am fost conștient de faptul că formarea profesională trebuie să fie continuă, fiind necesară acumularea de noi cunoștințe din domeniul de preocupări didactice și de cercetare. Am participat la o serie de cursuri de perfecționare în domeniul concepției, fabricației și măsurării tridimensionale a produselor, respectiv în domeniul managementului universitar, după cum urmează:

- 1999, Cursul de iarnă: *Conception et fabrication de produits mécaniques*, organizat de către Universitatea Politehnica din București și Institutul National Politehnic din Grenoble, Franța;
- 2000, Cursul de toamnă: *Modelisation de la connaissance pour la conception et la fabrication intégrées*, organizat de către Universitatea Politehnica din București și Institutul National Politehnic din Grenoble, Franța;
- 2007, Cursul de specializare: *Instruire în domeniul măsurărilor tridimensionale utilizând softul Quindos7*, organizat de către Compania Messtechnik Wetzlar, Leitz, Germania – producătoarea soft-ului de măsurare Quindos7;
- 2019, Cursul de Profesionalizare a Managementului Universitar: Proiect: ”Dezvoltarea capacității Ministerului Educației Naționale de monitorizare și prognoză a evoluției învățământului superior în raport cu piața muncii”. Îmbunătățirea capacității sistemului de management în educație prin dezvoltarea competențelor managerilor din învățământul superior, respectiv creșterea capacității de consiliere și orientare profesională, organizat sub egida Ministerului Educației Naționale în parteneriat cu Academia Română.

În perioada 2016-2021 am participat, în calitate de coorganizator, la o serie de workshop-uri realizate în parteneriat cu diverse companii. În cadrul acestor workshop-uri am ținut prelegeri și am audiat prezentările specialiștilor din companii referitoare la noutățile din domeniul lor de preocupări: măsurare tridimensională, deformări plastice și injectarea pieselor din materiale plastice. În continuare voi prezenta câteva dintre manifestările la care am participat:

- *Măsurarea dimensională într-o nouă lumină - măsurarea instantanee. Noutăți de la KEYENCE*, Timișoara, 18.03.2016, organizatori UPT și compania Keyence;
- *Technologies for injection moulding. Highlights of machine, material and software from ENGEL, INICAD DESIGN and ALBIS*, Timișoara, 01.03.2016, organizatori Centrul de Competențe în Plasturgie (CCP)/UPT și companiile ENGEL, INICAD și ALBIS;
- *HxGN Local Scanning Event*, Timișoara, 16.11.2017, organizatori UPT și compania Hexagon Manufacturing Intelligence;
- *Creșterea eficienței la injectarea materialelor plastice – Noutăți de la ENGEL și parteneri producători de echipamente și instalații*, Timișoara, 15.05.2017, organizatori CCP/UPT și compania ENGEL;
- *Creșterea eficienței la injectarea materialelor plastice – Noutăți de la Hürmak și parteneri producători de echipamente și instalații*, Timișoara, 28.02.2018, organizatori CCP/UPT și companiile ARTEM GROUP TRADE&CONSULT și Hurmak;
- *Calitatea conduce productivitatea - noutăți PC-DMIS și Q-DAS la măsurarea tridimensională*, Timișoara, 17.09.2019, organizatori UPT și compania Hexagon Manufacturing Intelligence;
- *Proiectarea ștanțelor și matrițelor folosind tipizate de înaltă precizie*, Timișoara, 02.12.2019, organizatori UPT și compania Meusburger;
- *Dezvoltarea de soluții CAD/CAM avansate pentru prelucrarea pieselor din table folosind softul Metalix*, Timișoara, 07.12.2021 (Online), organizatori UPT și compania AGO Trade Group.

1.2.3 Funcții și responsabilități

În perioada 2000-2022 am avut diferite funcții și responsabilități la nivel de departament și facultate. În 2012-2016 am fost membru în consiliul departamentului Ingineria Materialelor și Fabricației (IMF) iar în perioada 2016-2020 prodecan al Facultății de Mecanică. Din 2018 până în prezent sunt membru al board-ului domeniului de Inginerie Industrială și a programelor de studii de licență Tehnologia construcțiilor de mașini (TCM) și TCM-IFR, președinte al board-ului de domeniu Inginerie Industrială (master) și a programului de studii de master Ingineria produselor din materiale polimerice și compozite.

1.3 Realizări profesionale

1.3.1 Prestigiul profesional

Activitatea profesională și științifică desfășurată poate fi evaluată prin impactul pe care acestea îl au pe plan național și internațional cărțile de specialitate editate, rezultatele cercetării contractuale și lucrările științifice publicate. Două dintre cărțile editate sunt premiere la nivel național iar celelalte au adus o serie de contribuții și noutăți în domeniul deformărilor plastice. Lucrările științifice publicate se regăsesc pe site-uri de specialitate și în baze de date internaționale, cum ar fi: Web of Science, Scopus, Googler Scholar, Copernicus etc.

Prestigiul profesional în cadrul cercetării contractuale poate fi validat și prin cele trei modele de mașini de măsurat în coordonate realizate ca prototipuri, proiectate integral de autorul acestei teze (convenția nr.12048/10.10.2000 dintre Universitatea Politehnica Timișoara și Industrielle CNC-und Messtechnik Germania), care au fost făcute public la nivel internațional prin:

- **Expunerea mașinii de măsurat în coordonate PRESINGO 755** la *Expoziția de Tehnică de Măsurare de la Sinsheim-Germania*, 2007 și 2008, producător Industrielle CNC-und Messtechnik, respectiv 3D-Präzisionstechnik AG, iar în 2008 s-a produs și în colaborare cu firma IBTL, cu denumirea ConoPortal, respectiv cu firma Wenzel, toate din Germania;
- **Expunerea și utilizarea mașinii de măsurat în coordonate PRESINGO 755** la *Firma Messtechnik Wetzlar, Germania (din cadrul grupului Hexagon)*, producătorul softului de măsurare Quindos7, pentru trainig în Quindos7 a reprezentanților concernului Hexagon din întreaga lume (2007-2008);
- **Postarea mașinii de măsurat în coordonate PRESINGO 755** pe diferite site-uri ale unor firme specializate în producerea și comercializarea de mașini de măsurat în coordonate (perioada 2006-2013), cum ar fi:
 - <http://www.icncmt.de>
 - <http://www.presingo.de>
 - <http://www.trimess.de/new.html>
 - <http://www.ibtl.de>
- **Expunerea mașinii de măsurat în coordonate NovaBernath 565** la *Târgul Internațional București (TIB)*, 2012, producător Industrielle CNC-und Messtechnik Germania și Nova Grup Cugir, România.

Prestigiul profesional poate fi validat și prin calitatea de membru al comitetului de organizare a unor workshop-uri în cadrul UPT cu participarea a numeroase companii din domeniu și a organizării unor școli de vară.

În 2014, la inițiativa prof.univ.dr.ing. George DRĂGHICI, în calitate de coordonator, împreună cu alți colegi de la departamentul Ingineria Materialelor și Fabricației am demarat prima școală de vară "Product design and manufacturing" ce a constat în cursuri și activități practice pe

durata a două săptămâni, pentru o grupă de studenți de la Institutul Politehnic din Grenoble (*L'Institut polytechnique de Grenoble*) Franța. Primul acord a fost semnat pentru o perioadă de trei ani (2014-2016), dar ca urmare a bunelor rezultate obținute și a feedback-ului primit de la studenți, acest acord a fost prelungit de mai multe ori, până în 2022.

În 2019, împreună cu prof.univ.dr. Remus HANEA de la Universitatea Tehnică Delft, Olanda am organizat în perioada 22.07-02.08.2019 școala de vară internațională "*Data Assimilation and its application*", adresată studenților din ultimul an de masterat și doctorat, în matematică și inginerie. Grupul de studenți a fost format din 25 de studenți internaționali și 10 studenți români, iar cursurile au fost predate de 14 profesori, experți cu recunoaștere internațională.

În perioada 2016-2021 am participat, în calitate de director al Centrului de Competențe în Plasturgie (CCP) din UPT, ca și co-organizator a opt *workshop-uri* alături de companii multinaționale din țară și din exterior (ex. Hexagon Manufacturing Intelligence România/Germania, Keyence SUA/România, INICAD Design România, Engel Austria, Albis Germania, Koch Technik Germania, ONI Germania, Hürmak Turcia, Artem group România, Henkel Germania), dedicate studenților, cadrelor didactice din UPT și angajaților unor companii multinaționale din România. În cadrul acestor *workshop-uri* am ținut prelegeri referitoare la rolul universității în creșterea competențelor în domeniul concepției, fabricației și a controlului tridimensional, cu particularitate în domeniul automotive. În 2017 am ținut o prelegere la *Târgul Internațional DemoPlast Arad*, în fața unei audiențe compusă din expozanți și participanți la târg, privind "*Suport și asistență pentru dezvoltarea companiilor în domeniul prelucrării materialelor plastice și compozite – orientarea continuă către INOVARE*", în care am prezentat oferta Centrului de Competențe în Plasturgie (CCP) din cadrul UPT în vederea creșterii competitivității companiilor și a dezvoltării de noi produse și tehnologii.

În anul 2017 am participat la constituirea acordului pentru un program de dublă diplomă la nivel de master, dintre L'Ecole Nationale Supérieure des Mines d'Albi-Carmaux Franța și Universitatea Politehnică Timișoara (semnat de rectorul UPT în 24.03.2017), în calitate de coordonator departamental pentru programele de studii de masterat din domeniul ingineriei industriale (*Inginerie Integrată, Ingineria produselor din materiale polimerice și compozite, Procedee productive de sudare în mediu de gaze protectoare*) și ingineria materialelor (*Materiale și tehnologii avansate*) din cadrul Facultății de Mecanică. Acest acord permite studenților masteranzi efectuarea de cursuri la cele două universități din Franța și România și obținerea unei duble diplome.

Prestigiul profesional poate fi validat și prin calitatea de președinte sau membru în comisii de concursuri didactice. Astfel, în perioada 2016-2022 am fost numit președinte la trei comisii de concurs pentru ocuparea postului de conferențiar din cadrul departamentului IMF, respectiv președinte la cinci comisii de contestații concurs conferențiar din Facultatea de Mecanică. Am mai participat ca membru în comisii de concurs de șef de lucrări și conferențiar (Universitatea Politehnică București). În perioada 2012-2016 am fost numit președinte comisie grad didactic la patru concursuri de grad didactic I la Colegiul Tehnic Transilvania Deva, Colegiul Tehnic Reșița, Grup școlar industrial Oțelu Roșu, Colegiul Național Preparandia - Dimitrie Țichindeal Arad, iar în 2016 am fost Referent științific grad didactic I la Liceul Tehnologic Trandafir Cocârla Caransebeș.

Participarea în calitate de referent științific în cadrul unor comisii de evaluare și susținere a tezei de doctorat își aduce semnificativ aportul la prestigiul meu profesional. Am participat în calitate de referent științific la trei teze de doctorat la Universitatea Politehnică Timișoara, la două teze de doctorat la Universitatea Politehnică București și la o teză de doctorat la Universitatea Tehnică din Cluj Napoca.

O realizare, pe care aş putea-o considera de suflet şi care îşi poate aduce aportul la prestigiul meu profesional, constă în organizarea manifestării aniversare de *60 de ani a specializării de Tehnologia Construcţiei de Maşini* din cadrul Facultăţii de Mecanică din Timişoara. La această manifestare au participat cadre didactice din UPT (actuale şi seniori) şi din aproape toate centrele universitare din ţară, persoane cu diferite funcţii din companiile naţionale şi multinaţionale partenere, absolvenţi de TCM care îşi desfăşoară activitatea în ţară sau în străinătate şi studenţi. Cu această ocazie a fost scoasă şi o monografie:

- **Aurel Tulcan (Editor coordonator)**, Ioan Carţiş, Mihai Nica, Gavril Urdea, Mircea Şelariu, Florin Grosu, Ion Grozav, Tudor Iclănzan, George Drăghici, Mircea Popa, Florin Ferician, Eugen Pămîntaş, Dănuţ Şoşdean, Adrian But, Daniel Stan, Turc Cristian, Felicia Banciu, Cristian Cosma, Adrian Dume, Dorian Ştef, *Specializarea de Tehnologia Construcţiilor de maşini la 60 de ani*, Editura Politehnica, Timişoara, 2018, 243 pag., ISBN 978-606-35-0190-6.

1.3.2 Membru al unor organizaţii profesionale

Activitatea desfăşurată în domeniu şi experienţa acumulată a făcut posibilă cooptarea în organizaţii profesionale naţionale şi internaţionale, după cum urmează:

- Membru al *Asociaţiei Române de Standardizare - ASRO: Comitetul Tehnic 58 – Metrologie* (2010–prezent). În anul 2010, în urma experienţei dobândite în domeniul măsurărilor tridimensionale, am fost invitat de către Asociaţia Română de Standardizare-ASRO, de a mă alătura, în calitate de membru, *Comitetului Tehnic 58 – Metrologie*, cu drepturi depline ale organizaţiilor internaţionale de standardizare CEI şi ISO şi al organizaţiilor europene de standardizare CENELEC şi CEN. În toată această perioadă am participat la studiul, analiza şi actualizarea unor standarde ISO internaţionale aflate în faza de lucru şi implementarea acestora ca standarde la nivel naţional.
- Membru al *Asociaţiei Universitare de Ingineria Fabricaţiei – AUIF* (2004-prezent). În anul 2004 am devenit membru (fondator) al asociaţiei, iar în anul 2019 am fost ales ca Vicepreşedinte AUIF, filiala Timişoara (2019 - prezent).
- Membru al *Consortiului Facultăţilor de Inginerie Mecanică şi Industrială din România* (2017-prezent). Acest consorţiu a luat fiinţă în urma mai multor întâlniri a factorilor de decizie din domeniul Ingineriei Mecanice şi Industriale, întâlniri la care am participat în calitate de prodecan al Facultăţii de Mecanică şi de cunosător al domeniului Inginerie Industrială.

1.3.3 Recenzor conferinţe naţionale şi internaţionale

Activitatea de cercetare efectuată şi participarea la conferinţe naţionale şi internaţionale, respectiv publicarea rezultatelor în proceedings şi reviste au condus la creşterea vizibilităţii mele ca cercetător. În acest sens am fost cooptat ca membru în comitetul ştiinţific sau ca recenzor al unor conferinţe internaţionale:

- Membru în comitetul ştiinţific/de organizare al conferinţei: *International Conference on Advanced Materials and Structures*: AMS '11; 18; 20 şi 22;
- Membru în comitetul ştiinţific al conferinţei: *International Conference on Nonconventional Technologies*, Timişoara, 2018;
- Referent ştiinţific la Conferinţa Internaţională: *5th International Conference on Advanced Materials and Structures - AMS '13*, www.scientific.net
- ferent ştiinţific la Conferinţa internaţională: *Modern Technologies in Industrial Engineering (ModTech 2015)*, <http://modtech.ro>;
- ferent ştiinţific la Conferinţa internaţională: *Modern Technologies in Industrial Engineering (IMANEE 2021)*, <https://imane.ro>;
- Organizator, recenzor şi membru în comisia de susţinere de lucrări ştiinţifice: *Zilele tehnice studenţeşti–ZTS*”, Timişoara, 2009, 2010 şi 2015.

1.3.4 Premii, diplome și medalii

Activitatea de cercetare realizată în cadrul unor colective de cercetare au condus la obținerea, în colectiv, a unor premii și medalii naționale și internaționale, după cum urmează:

- Medalie de argint la al 53-lea Salon Mondial de Inovare, Cercetare și Noi Tehnologii, EUREKA, Bruxelles, 2004, brevet de invenție selectat de către comisa MECT pentru participare la Salonul Internațional de Invenții EUREKA – Bruxelles, 2004 (Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian);
- Medalie de argint la cel de al 37-lea Salon Internațional al Invențiilor, Tehnicilor și Produselor Noi, Geneva, 2009 (Iclănzan Tudor, Stan Daniel, Seiculescu Valentin, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian);
- Medalie de argint la Salonul INVENTIKA, București, 2009 (Iclănzan Tudor, Stan Daniel, Seiculescu Valentin, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian);
- Diplomă de excelență și medalia de aur cu mențiune specială la Salonul Internațional de Inventică PRO INVENT ediția a XII-a, Cluj Napoca, România, 2014, pentru invenția "*Matriță pentru microinjectare*" (Iclănzan Tudor, Stan Daniel, Seiculescu Valentin, **Tulcan Aurel**, Cosma Cristian);
- Diplomă de excelență la Salonul Internațional de Inventică PRO INVENT ediția a XII-a, Cluj Napoca, România, 2014, pentru invenția "*Dispozitiv portsculă cu sistem de activare ultrasonică încorporat*" (Turc Cristian, **Tulcan Aurel**, Oanca Octavian, Stan Daniel);
- Premiul 3 la a 14 Conferință Internațională „Modern Technologies, Quality and Innovation,, (ModTech 2010), Slănic-Moldova, România, 2010;
- Premiu de excelență la conferința internațională "Integrated systems for agri-food productions, SIPA '09", Nyiregyhaza, Ungaria, 2011 (Tulcan Liliana, **Tulcan Aurel**);
- Premierea rezultatelor cercetării - Articole, Competiții 2020 și 2021 - Premiu pentru articole publicate în zona roșie (Q1) UEFSCDI /PN-PIII-P1-1-PRECISI-2021; UEFSCDI /PN-PIII-P1-1-PRECISI-2022 (**Tulcan Aurel**, Vasilescu Mircea Dorin, Tulcan Liliana);
- Premiere brevet de invenție, 2019, UEFSCDI / PNCDI III, SP 1.1 -PREC BVT-2019 (Stan Daniel, **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Cosma Cristian, Dume Adrian).

2. Realizări științifice ale autorului

2.1 Cercetări în domeniul deformărilor plastice la rece

Cercetările în domeniul deformărilor plastice la rece au început în cadrul colectivului de Tehnologia presării la rece (TPR) condus de domnul prof.univ.dr.ing. Rosinger Ștefan. Pe lângă preocupările privind studiul proceselor de deformare plastică la rece, în colectivul coordonat de domnul profesor Rosinger erau preocupări intense privind automatizarea proceselor de fabricație prin deformare plastică la rece, colectivul de la Timișoara fiind în centrul cercetărilor naționale din domeniul liniilor automate flexibile de ștanțare-matrițare-profilare. Majoritatea cercetărilor s-au efectuat în cadrul unor contracte cu industria sau a unor granturi de cercetare, a căror rezultate au fost prezentate în cadrul unor conferințe sau publicate în reviste.

Teza mea de doctorat intitulată „*Studiul liniilor automate flexibile de presare la rece*” reprezintă o continuare a cercetărilor efectuate de echipa coordonată de domnul profesor Rosinger, alături de domnul prof.univ.dr.ing. Tudor Iclănzan. Rezultatele cercetărilor ulterioare au fost publicate în volumele unor conferințe (proceedings) sau în reviste.

2.1.1 Automatizarea proceselor de fabricație prin deformare plastică la rece

Primele lucrări publicate după susținerea tezei de doctorat, împreună cu alți colegi a fost la a VII-a Conferință națională „*Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000*”-cu participare internațională, Cluj-Napoca, 2000, conferință neindexată la acea vreme. Lucrările descriu o metodă nouă folosită la modelarea funcționării părții de comandă a liniilor automate flexibile de presare la rece, respectiv capacitatea productivă a acestora.

2.1.1.1 Cercetări privind regimurile de funcționare ale unor sisteme de fabricație prin presare la rece

Cercetările efectuate în lucrarea [1] s-au referit la regimurile de funcționare ale unor sisteme de fabricație prin presare la rece, construite pe un singur utilaj sau pe mai multe utilaje de presare. Au fost prezentate modalitățile posibile de lucru ale preseii de comandă din sistemul de fabricație, și în corelare cu acestea, pe ale preselor comandate. În scopul definirii unor arhitecturi optime ale sistemelor de fabricație au fost indicate relații obligatorii, respectiv relații preferențiale în funcționarea componentelor sistemelor de fabricație.

În funcție de durata și corelarea în timp a acțiunilor de alimentare, evacuare, cât și de coborâre și ridicare a organului de execuție al preseii, în asociere cu poziții relative dintre semifabricat și elementele mobile active și de fixare ale sculei de deformare, au fost stabilite condițiile pentru care este posibilă (2.1.1), respectiv pentru care se exclude (2.1.2) și (2.1.3) posibilitatea lucrului în regim de lovituri repetate.

$$t_{al} < t_{ha} + t_{hr2} \quad (2.1.1)$$

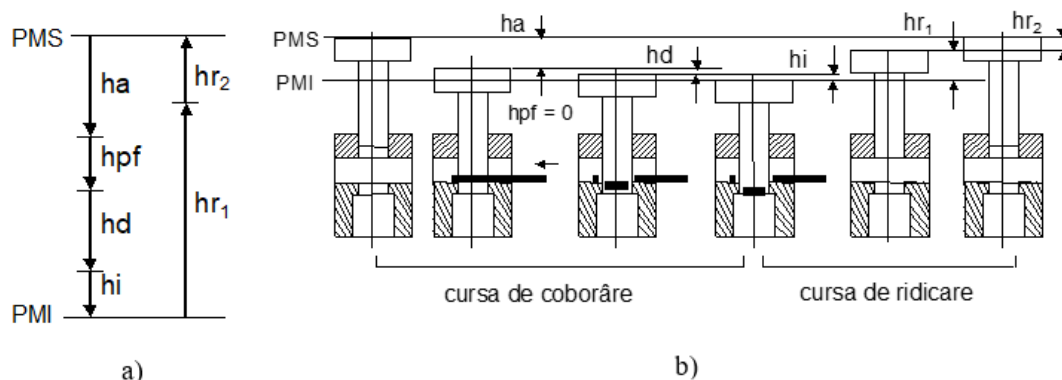
$$t_{al} > t_{ha} + t_{hr2} \quad (2.1.2)$$

$$T_{cd} < T_{da} \quad (2.1.3)$$

Divizarea cursei berbecului preseii se prezintă în Figura 2.1.1, pentru cazul general, respectiv cazul ștanțării. De menționat că situația din relația (2.1.3) intervine în special în cazul unei echipări tehnic inadecvate (greșite) a preseii cu dispozitivul de alimentare aferent, normală fiind adaptarea unor dispozitive capabile să realizeze alimentarea și în condițiile funcționării preseii în regim de lovituri repetate. În practică, totuși, uneori se admite și situația conformă cu (2.1.3), ca și o soluție fortuită, de compromis.

Pentru cazul sistemelor de fabricație (S.F.) construite pe mai multe utilaje de presare (ex. linii automate de presare), dincolo de condițiile de mai sus a căror valabilitate se menține pentru utilajele fiecărui post în parte, se impune în plus și o condiție de funcționare corelată dintre utilajele

sistemului de fabricație. Această corelare vizează asigurarea unei valori identice pentru volumul pe unitatea de timp a producției fiecărui post al S.F.



- t_{at} - durata acțiunii de alimentare a sculei cu semifabricat;
- t_{ha} - durata acțiunii de apropiere față de semifabricat, dată de spațiul dintre PMS și nivelul cel mai de jos al culisoului presei pentru care încă este posibilă introducerea semifabricatului în sculă;
- t_{hr2} - durata parcurgerii spațiului cuprins din punctul în care devine posibilă introducerea unui nou semifabricat în sculă, respectiv a evacuării piesei sau deșeurii obținut și până la PMS;
- T_{cd} - durata unui ciclu de coborâre-ridicare a berbecului presei;
- T_{da} - durata unui ciclu de alimentare a dispozitivului care echipează presa în cauză.

Figura 2.1.1. Divizarea cursei berbecului a) cazul general b) exemplu în cazul ștanțării

La stabilirea regimurilor în care vor putea funcționa utilajele componente ale unui asemenea sistem, se vor avea în vedere că:

- se impune definirea unui utilaj de referință față de care se va asigura corelarea prin egalare a producției pe unitatea de timp a restului utilajelor; acest utilaj devine astfel un utilaj de comandă, și în consecință, restul utilajelor vor avea funcționări comandate. Cerința de a realiza aceeași producție pe unitatea de timp în fiecare post al S.F., pretinde ca drept utilaj de referință-comandă să fie luat cel care dispune de capacitate productivă minimă. În cazul în care nu este în discuție un S.F. liniar ci unul cu ramificații (Figura 2.1.2) se va lua în considerație capacitatea productivă însumată a tuturor utilajelor cu amplasament în paralel, care constituie postul de lucru în cauză.

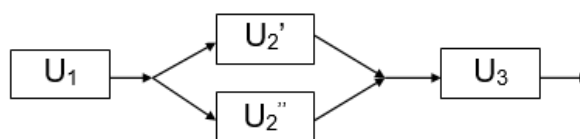


Figura 2.1.2. Sistem de fabricație cu ramificații

- durata ciclului de mișcări ale organului de execuție al presei, pentru cazul funcționării acesteia în regim de lovituri singulare T_S , este mai mare decât pentru cazul funcționării în regim de lovituri repetate T_r . Corelația este dată de (2.1.4):

$$T_S = T_r \cdot q \quad (2.1.4)$$

unde q este un coeficient supraunitar care ține seamă de felul cuplajului presei ($q = 1.05-1.45$).

- pentru două utilaje de presare, chiar de același tip, în condiții de funcționare independentă între ele, în mod practic nu se obțin numere strict identice de curse duble pe minut [c.d./min], datorită unor cauze legate atât de execuție, cât și de ordin funcțional.

Presa (utilajul) de comandă poate funcționa după următoarele regimuri:

- *lovituri repetate (LR)*, caz optimal, realizabil dacă condiția (2.1.1) este îndeplinită;
- *lovituri singulare comandate (LSC)*, caz impus dacă apare situația definită prin relația (2.1.2) sau (2.1.3); semnalul de comandă a loviturii de berbec va fi dat în acest caz de dispozitivul de alimentare cu care este echipată presa, la încheierea ciclului acțiunii de alimentare cu semifabricat.

Restul preselor din compunerea S.F., toate cu funcționare comandată, vor putea lucra în regim de:

a) lovituri singulare comandate (LSC), semnalul efectuării loviturii fiind dat de utilajul din vecinătate. În acest caz presa amplasată în vecinătatea imediată a presei de comandă primește, în mod nemijlocit, comenzile acesteia, pe când cele amplasate mai departe primesc comenzile în mod indirect, prin intermediul preselor interpușe între ele și presa de comandă. Astfel, fiecărei lovituri de berbec ale presei de ordinul i îi va corespunde câte o lovitură de berbec a presei de ordinul $i+1$.

O asemenea stare de fapt face ca, principial, S.F. să se poată constitui fără de acumulator interposturi ale obiectelor prelucrării, ceea ce reduce extensiunea și simplifică arhitectura sistemului de fabricație. În practică, ținând seamă de micile decalaje în timp dintre acțiunile a două utilaje de presare învecinate, pentru cazul prelucrării semifabricatelor continue, se prevede o acumulare interposturi cu o rezervă mică de material, de ordinul a 1-2 pași de avans ai semifabricatului. De menționat însă că o asemenea acumulare nu pune nicio problemă de ordin constructiv, respectiv nicio modificare a arhitecturii S.F.

Ținând seamă de relația (2.1.4), se deduce că pentru situația că utilajul de comandă funcționează în regim de lovituri repetate, se pretinde ca acesta să aibă, definit în mod constructiv sau funcțional, un mers mai lent decât utilajul comandat ($n_{cd} < n_{cdt}$), ceea ce echivalează și cu concluzia de mai sus, cum că utilajul de comandă trebuie să fie cel cu capacitate productivă (C_p) minimă. Ca și considerent de siguranță se recomandă:

$$n_{cdt} \geq 1.1 \dots 1.2 n_{cd} \quad (2.1.5)$$

unde: n_{cd} - număr de curse duble pe minut a presei de comandă;
 n_{cdt} - număr de curse duble pe minut a presei comandate.

Conform cu relația (2.1.5), utilajul cu mișcările cele mai lente trebuie ales drept utilaj de comandă al S.F. De regulă, aceasta poate fi presa cu forța nominală de presare cea mai mare din șirul preselor S.F., o presă prevăzută din construcție cu posibilități de reglaj a numărului de c.d./min, sau una la care s-a adaptat un dispozitiv de temporizare inclus în circuitul de comandă al acesteia. Poziția pe care o ocupă utilajul de comandă în cadrul șirului de utilaje ale S.F. poate fi oarecare.

b) Lovituri repetate efectuate cu intermitență (LRI), comandate de variația între limite definite a rezervei de material din acumulatorul învecinat presei în cauză. În acest caz, egalarea numărului de lovituri de berbec ale presei de ordinul i cu cele ale presei de ordinul $i+1$ intervine nu prin lovitură după lovitură, ci periodic, după un anume timp de lucru. Acest lucru presupune realizarea unui acumulator interposturi pentru obiectele prelucrării, nu numai în amonte dar și în aval față de utilajul de presare care funcționează prin lovituri repetate efectuate cu intermitență, aspect important la definirea arhitecturii S.F.

În conformitate cu cele prezentate mai sus, în Figura 2.1.3 au fost definite sensurile comenzilor și natura regimurilor de funcționare posibile în cadrul S.F.

a) *pentru cazul comenzilor care se dau de la presă la presa alăturată*, deci cu semnale date de organele de execuție ale preselor, sau în cazuri particulare, de elementele de execuție ale dispozitivelor de alimentare cu care sunt echipate aceste prese, marcajul din figură este făcut cu săgeți cu linie unică continuă corespunzătoare unui sens, respectiv întreruptă corespunzătoare sensului opus;

- b) pentru cazul comenzilor care se dau prin intermediul acumuloarelor de material amplasate între posturile de lucru ale S.F., marcajul este cu săgeți cu linie dublă.

Comenzile pot avea o propagare după un singur sens, în situația în care presa de comandă U_0 este un utilaj de capăt al S.F. (Figura 2.1.3, zona încadrată cu linie continuă, cu un număr de n utilaje comandate), fie o propagare în două sensuri în care caz presa de comandă U_0 are amplasate de o parte k , iar de alta n utilaje comandate.

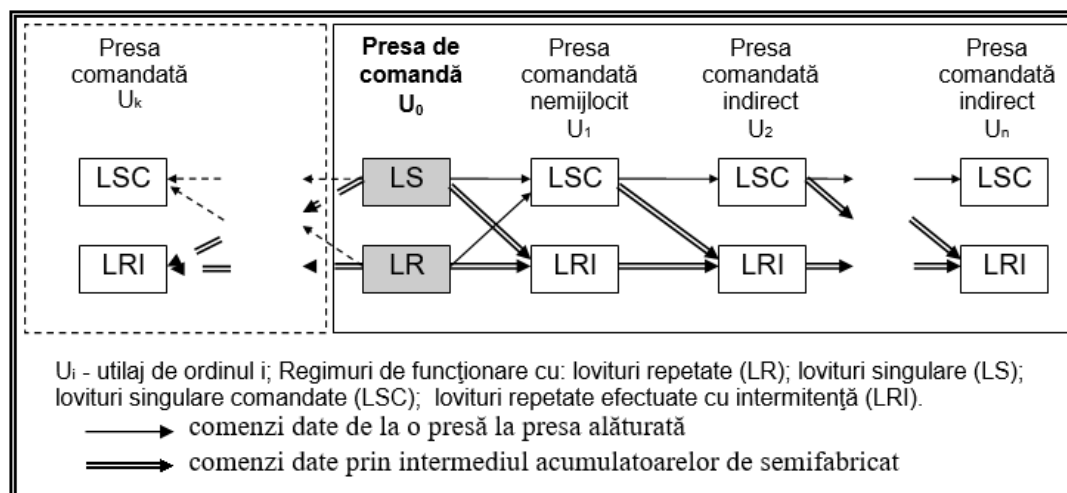


Figura 2.1.3. Sensurile comenzilor și natura regimurilor de funcționarea preselor

În compunerea S.F. care prelucrează lamine subțiri, apar frecvent utilaje rotative cum ar fi derulorul de bandă, mașina de îndreptat bandă, respectiv mașina de profilare, adică acele utilaje care prelucrează semifabricatul în mișcare de avans.

Derulorul de bandă împreună cu mașina de îndreptat au rolul de a asigura alimentarea cu semifabricat bandă a primului post de presare din cadrul S.F. Modul de funcționare a lor în cadrul S.F. depinde de tipul lor constructiv, putând apărea două situații (Figura 2.1.4):

- derulorul (D) și mașina de îndreptat (MI) (Figura 2.1.4a) funcționează sincron, cu intermitență, comanda de pornire și oprire a mașinii de îndreptat fiind dată de către acumulatorul de bandă amplasat între aceasta și prima presă (P_1) din cadrul S.F., situație care apare când:
 - derulorul este fără acționare proprie, derularea benzii realizându-se prin tragerea acesteia de către mașina de îndreptat;
 - derulorul este cu acționare proprie fiind dotat cu un sistem de reglare continuă a turației care permite menținerea constantă a vitezei de derulare și sincronizarea acesteia cu viteza benzii care trece prin mașina de îndreptare.
 - atât derulorul cât și mașina de îndreptat funcționează cu intermitență, comanda de pornire și oprire fiind dată de către cele două acumuloare amplasate între derulor, mașina de îndreptat, respectiv prima presă (Figura 2.1.4b). Această situație apare în cazul în care derulorul este cu acționare proprie, dar fără posibilitatea de reglare continuă a turației în timpul procesului.
- Mașinile de profilare sunt destinate realizării profilelor lungi pornind de la semifabricat fâșie sau bandă, fiind dispuse, de regulă, la capătul S.F. În funcție de tipul de semifabricat prelucrat apar diferite arhitecturi de S.F., pornirea și oprirea mașinii de profilare fiind dată de:
- ultimul utilaj (U_n) din cadrul S.F., care poate fi o presă sau o unitate de retezare, în cazul în care mașina de profilare prelucrează semifabricat individual (Figura 2.1.5a);

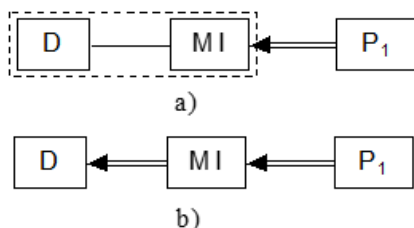


Figura 2.1.4. Sensul comenzilor și modul de funcționare a derulorului și a mașinii de îndreptat

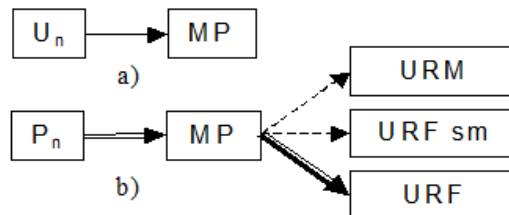


Figura 2.1.5. Sensul comenzilor și modul de funcționare a mașinii de profilare

- acumulatorul de semifabricat amplasat între ultima presă (P_n) și mașina de profilare (MP) (Figura 2.1.5b) în cazul în care se prelucrează semifabricat bandă. Comanda unității de retezare, amplasată în aval de MP, este dată prin intermediul:
- profilului obținut, în cazul în care se realizează retezarea din mers a profilului pe o unitate de retezare mobilă (URM) sau pe o unitate de retezare fixă pe care s-a montat o stanță mobilă (URF sm);
 - acumulatorului de semifabricat cu buclă poligonală, în cazul în care se realizează retezarea staționară a profilului pe o unitate de retezare fixă (URF).

Pentru a simplifica și reduce extensiunea SF, prin posibilitatea construirii subsistemelor de transport fără acumulator al obiectelor prelucrării, se impune ca regimul de funcționare a utilajelor de prelucrare să fie cel de lovituri repetate (LR) sau lovituri singulare (LS). Deci, din acest punct de vedere, este de evitat lucrul utilajelor de prelucrare prin lovituri repetate executate cu intermitență (LRI), desigur acolo unde un asemenea regim de lucru este evitabil. În consecință, rămâne de acționat prin (LRI), în situațiile în care:

- unul dintre utilajele învecinate din SF efectuează prelucrare pe semifabricat staționar, iar celălalt pe semifabricat în mișcare de avans;
- capacitățile productive ale celor două utilaje învecinate, raportate la tactul de lucru al utilajelor, diferă și acestea nu se pot aduce la aceeași valoare prin mijloace tehnice simple.

2.1.1.2 Cercetări privind modelarea funcționării părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece

După definirea modurilor de funcționare a unei linii automate flexibile de presare la rece, cercetările au continuat cu modelarea funcționării părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece [2],[3]. Studiul s-a efectuat pe o linie automată flexibilă de presare la rece realizată în laboratorul de presare la rece de la Universitatea Politehnica Timișoara, în cadrul cercetării mele la doctorat.

Automatizarea în cadrul producției industriale (cazul sistemelor flexibile de fabricație și în general toate procedeele cu caracter secvențial) pune astăzi probleme de complexitate crescândă pentru care metodele vechi nu mai oferă răspunsuri satisfăcătoare. Față de aceste probleme noi au apărut diferite unelte grafice care repun totul pe noțiuni de *stări*, *tranziții* între stări, *condiții*, *evenimente* [4]. Ele permit descrierea funcțiilor cu o evoluție paralelă în timp și totodată sincronizarea sau coordonarea între aceste funcții. Ținând cont de gradul de complexitate relativ ridicat privind modul de funcționare a unei linii automate de presare la rece constituită din mai multe utilaje interconectate între ele, este necesar ca, în vederea asigurării unui maxim de acuratețe în faza de concepție a sistemului automatizat, premiză a funcționării sale eficiente ulterior, să fie utilizate aceste tehnici moderne de modelare.

Modelarea funcționării părții de comandă a liniei pornește întotdeauna de la analiza caietului de sarcini, care trebuie să precizeze funcțiile specifice ale părții de comandă, ținând cont de modalitățile acestora de realizare și utilizare. Funcționarea liniei poate fi descrisă prin intermediul unor diagrame funcționale (GRAFCET – Graf de Comandă Etapă Tranziție) care permit descrierea tuturor comportamentelor așteptate din partea părții de comandă în raport cu totalitatea evenimentelor sau informațiilor provenind din procesul automatizat [5].

1) Noțiuni de bază GRAFCET

GRAFCET-ul este un instrument de descriere grafică a comportamentului așteptat de la partea de comandă față de evenimentele sau informațiile provenite de la un proces automatizat [5-9]. El stabilește o corespondență cu caracter secvențial și combinatoriu între:

- **intrări**, adică transferurile de informații de la *partea operativă PO* spre *partea de comandă PC*;
- **ieșiri**, adică transferurile de ordine de la PC spre PO (Figura 2.1.6).

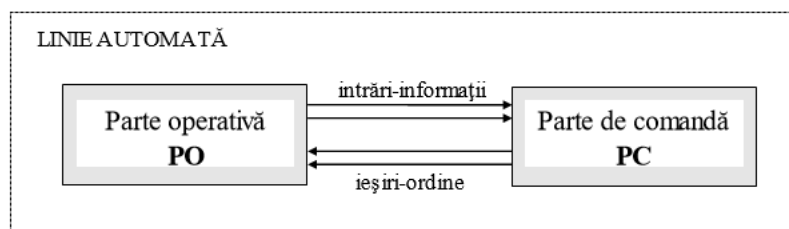


Figura 2.1.6 Descompunere linie automată

Raportându-ne la o linie flexibilă de ștanțare-matrițare, partea operativă reprezintă partea de linie care cuprinde partea mecanică (prese, dispozitive de avans etc.), elemente de acționare (organele motoare), senzori etc. Partea de comandă regroupează toate componentele de tratare a informației utilizate pentru funcționarea părții operative. Ea va transmite comenzi și va primi informații asupra stării procesului de lucru. La aceste două părți mai este legat un al treilea element: partea operator sau pupitru, care permite operatorului să intervină în ceea ce privește modul de funcționare a liniei automate, oprirea de urgență etc.

Grafcet-ul este destinat să reprezinte automatisme logice, adică sisteme în care informațiile au un caracter "tot" sau "nimic". În acest caz se utilizează algebra Booleană în care o variabilă a poate să aibă doar două valori: 0 sau 1. Complementul variabilei a va fi notat cu $\bar{a}$. Dacă $a = 0$ atunci $\bar{a} = 1$, iar dacă $a = 1$ atunci $\bar{a} = 0$. Suma logică (funcția SAU) a două variabile a și b se notează $a + b$, iar produsul logic (funcția ȘI) este notat $a \cdot b$ sau ab . Grafcet-ul este constituit din elemente grafice de bază, o interpretare și reguli de evoluție.

1.1 Elemente grafice de bază

1.1.1 Etape

Etapa este simbolizată grafic printr-un pătrat (Figura 2.1.7) având un reper numeric plasat în partea superioară. O etapă poate fi activă sau inactivă. Etapele care trebuie să fie active în momentul în care se pune în funcțiune sistemul sunt reprezentate printr-un pătrat dublu și poartă denumirea de etape inițiale.



Figura 2.1.7. Mod de reprezentare etapă

Etapelor (*ieșirile sistemului*) le sunt asociate *acțiuni* de efectuat care pot fi efectuate numai când etapa respectivă este *activă*. Fiecărei etape i se mai poate asocia o variabilă internă (sau de stare) X_i a cărei valoare este: $X_i = 1$ dacă etapa i este activă, iar $X_i = 0$ dacă etapa i este inactivă.

1.1.2 Tranziții

Tranzițiile, reprezentate printr-o linie orizontală îngroșată (Figura 2.1.8), indică posibilitățile de evoluție ale sistemului între etape. Tranziția poate fi considerată ca o barieră care se deschide sau se închide. Fiecărei tranziții îi este asociată o *condiție logică* numită *receptivitate*. Receptivitatea (R_i) scrisă sub forma unei condiții logice este o funcție combinatorie de informații logice (variabile de intrare ale grafet-ului, respectiv stare internă – variabila X_i). Aceste informații pot proveni din exteriorul sistemului automat (de exemplu comenzile unui operator), din partea operativă (semnalele unor senzori) sau de la elementele interne ale părții de comandă (temporizatoare, numărătoare etc.).

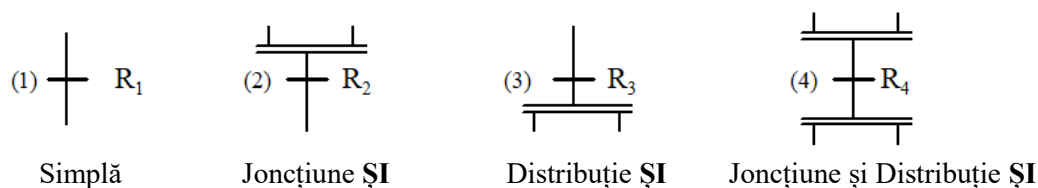


Figura 2.1.8. Reprezentare tranziție

1.1.3 Legături orientate

Legăturile orientate (Figura 2.1.9) arată căile de evoluție a stării GRAFCET-ului. Acestea leagă între ele etapele și tranzițiile, structurate într-o rețea alternativă, care constituie scheletul secvențial grafic al GRAFCET-ului. Sensul general de parcurs este de sus în jos.

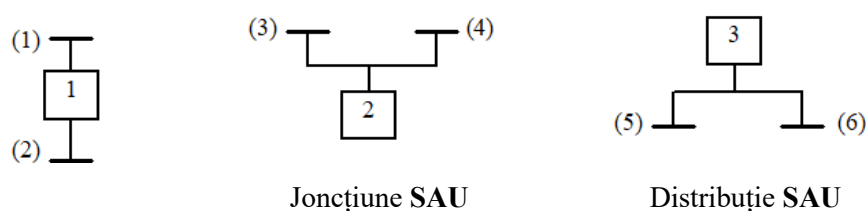


Figura 2.1.9. Reprezentarea legăturilor orientate

În Figura 2.1.10 se prezintă modul de reprezentare grafică a unui GRAFCET. Din punct de vedere a sintaxei, trebuie respectată alternanța *etapă* → *tranziție* și *tranziție* → *etapă*.

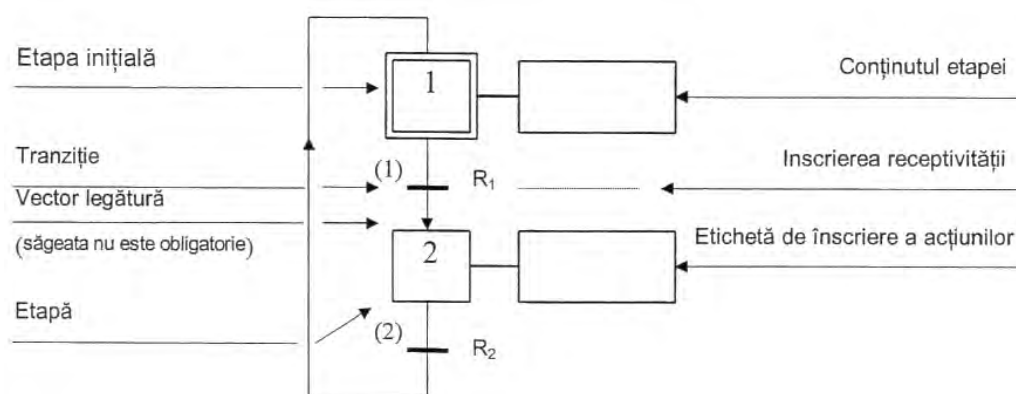


Figura 2.1.10. Mod de reprezentare GRAFCET

1.2 Interpretare GRAFCET

Constă din traducerea comportamentului părții de comandă față de intrările și ieșirile sale, interpretare care este caracterizată de:

- **acțiuni** asociate *etapelor*;
- **receptivități** asociate *tranzițiilor*.

În această lucrare, acțiunile asociate etapelor sunt *acțiuni la nivel*, care indică o stare (de exemplu: clește deschis), iar receptivitățile asociate tranzițiilor sunt sub forma unor *condiții logice*, care sunt funcții booleene de variabile externe și interne (de exemplu: $\bar{a} + b \cdot X_4$). Receptivitatea poate fi timpul, caz în care este suficientă mențiunea t urmată de originea și durata sa. Originea este momentul ultimei activări a unei etape anterioare. Reprezentarea este următoarea $t/i/\delta$ și reprezintă timpul δ scurs de la ultima activare a etapei i .

1.3 Reguli de evoluție

Definesc în mod clar comportamentul *dinamic* al părții de comandă astfel descrisă.

Regula 1: inițializarea – precizează etapele active la începutul funcționării (etapele inițiale).

Regula 2: străbaterea unei tranziții. O tranziție poate fi *validată* sau *nevalidată*. Ea este *validată* când toate etapele imediat precedente legate la aceasta *sunt active*. O tranziție poate fi străbătută numai dacă sunt îndeplinite cele două condiții:

- *tranziția este validată*, și
- *receptivitatea asociată este adevărată* (adică egală cu 1).

Când cele două condiții de evoluție sunt *reunite*, tranziția *poate fi străbătută* și este *obligatoriu* străbătută.

Regula 3: evoluția provocată prin străbaterea unei tranziții. Străbaterea unei tranziții provoacă simultan:

- *dezactivarea tuturor etapelor* imediat precedente legate la această tranziție;
- *activarea tuturor etapelor* imediat următoare legate la această tranziție.

Regula 4: evoluții simultane. Mai multe tranziții *ce pot fi* străbătute *sunt* simultan străbătute.

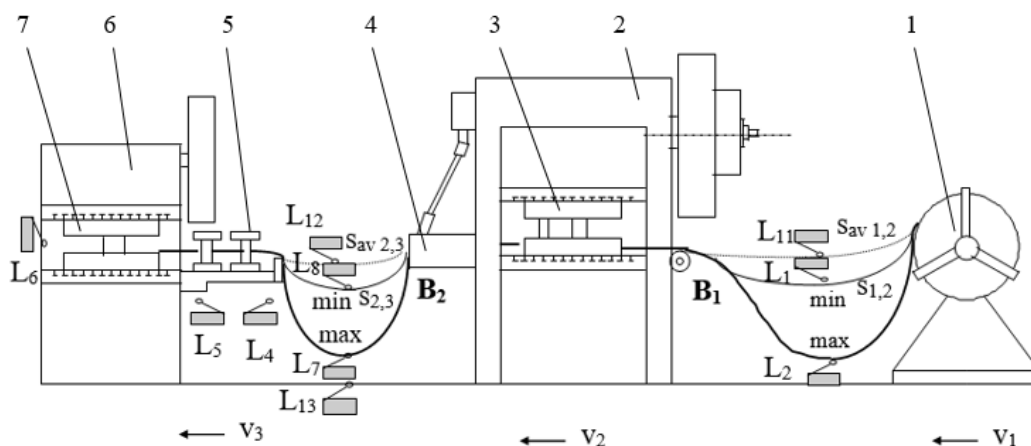
Regula 5: activarea și dezactivarea simultană. Dacă în cursul funcționării sistemului o aceeași etapă trebuie să fie simultan activată și dezactivată, ea va rămâne *activă*.

2. Descriere linie automată

Linia automată de ștanțare-matrițare realizată în laboratorul de presare la rece de la Universitatea Politehnica Timișoara (Figura 2.1.11) se compune din două celule de bază construite pe două prese cu excentric de uz general PAI 40, respectiv PAI 6.3, și un derulor de bandă cu acționare proprie pe care se montează ruloul de bandă [2]. Conexiunea dintre utilaje este realizată de către semifabricatul bandă prin intermediul a două acumulate de semifabricat (în scopul asigurării unei viteze medii de avans a benzii de-a lungul liniei) prevăzute fiecare cu câte un sistem de palpare cu rol de comandă a utilajelor.

Alimentarea automată a sculelor cu semifabricat se realizează de către cele două dispozitive de alimentare cu care sunt echipate presele [10]. Primul dispozitiv este acționat direct de la arborele principal al presei printr-o legătură mecanică, la fiecare cursă dublă a presei realizând avansul benzii cu un pas. Cel de-al doilea dispozitiv este cu acționare electro-pneumatică. Deoarece dispozitivul dispune de o cadență inferioară presei, acesta va lucra în regim de lovituri repetate (reglabile), urmând ca la sfârșitul fiecărei curse de avans să dea o comandă presei în vederea efectuării unei curse duble. Ambele dispozitive pot deservi atât scule cu căutători când la sfârșitul cursei de avans trebuie să realizeze dubla eliberare a benzii în vederea acțiunii căutătorului, cât și scule fără căutători. În general se recomandă ca în al doilea post al liniei automate, sculele să fie prevăzute cu căutători, dispozitivul de alimentare urmând să lucreze cu dublă eliberare. Acest lucru

are ca și scop poziționarea cât mai ușoară a semifabricatului (având deja prelucrări în postul 1) în sculă, cât și pentru realizarea precisă a piesei ținând cont că erorile de pas realizate de dispozitive se cumulează, iar la un număr mare de pași poate apărea situația în care eroarea cumulată să depășească toleranța prescrisă pe piesă. Pe scula montată pe prima presă se vor realiza prelucrările de ștanțare, iar pe cea de a doua sculă se vor realiza prelucrările de matrițare și cele finale de separare a piesei.



1-derulor de bandă cu acționare proprie; 2-presa PAI 40; 3,7-scule de presare; 4-dispozitiv de avans acționat de la arborele presei; 5-dispozitiv de avans pneumatic; 6-presa PAI 6.3; B₁, B₂-acumulate de semifabricat sub formă de buclă simplă; s-lungimea buclei de siguranță; S-lungimea buclei de acumulare; s_{av}-lungimea buclei de avarie; L₁...L₁₃-microîntrerupătoare fine de cursă; v-viteza benzii prin utilaj.



Figura 2.1.11. Vedere de ansamblu a liniei. Modul de dispunere a microîntrerupătoarelor fine de cursă (funcționare în regim de lovituri repetate – Auto 2 ($v_3 > v_2 < v_1$))

3. Stabilirea specificațiilor tehnologice

La stabilirea modului de funcționare a unei linii automate de presare la rece care prelucrează semifabricat tip bandă, respectiv la conceperea părții de comandă trebuie să se asigure:

- posibilitatea acționării aparte a fiecărui utilaj din cadrul liniei, de interes atât în faza de reglaj cât și în cazul funcționării independente a utilajelor;
- funcționarea în regim automat a liniei, în tot ansamblul ei, impunându-se egalarea vitezei medii de prelucrare a semifabricatului continuu în cadrul fiecărui post de lucru al liniei;
- oprirea automată a liniei când se constată abateri față de procesul normal de lucru.

Ca și date ale problemei se are în vedere că:

- derulorul de bandă este cu acționare proprie;
- presele dispun de instalații proprii de acționare;
- dispozitivele de avans lucrează în perfect sincronism cu berbecul preselor;
- transferul semifabricatului continuu între posturile liniei inclusiv orientarea acestuia în scule nu necesită nicio acțiune aparte prin comanda liniei automate, ele obținându-se implicit prin alimentarea-evacuarea obiectului prelucrării în și din cele două scule.

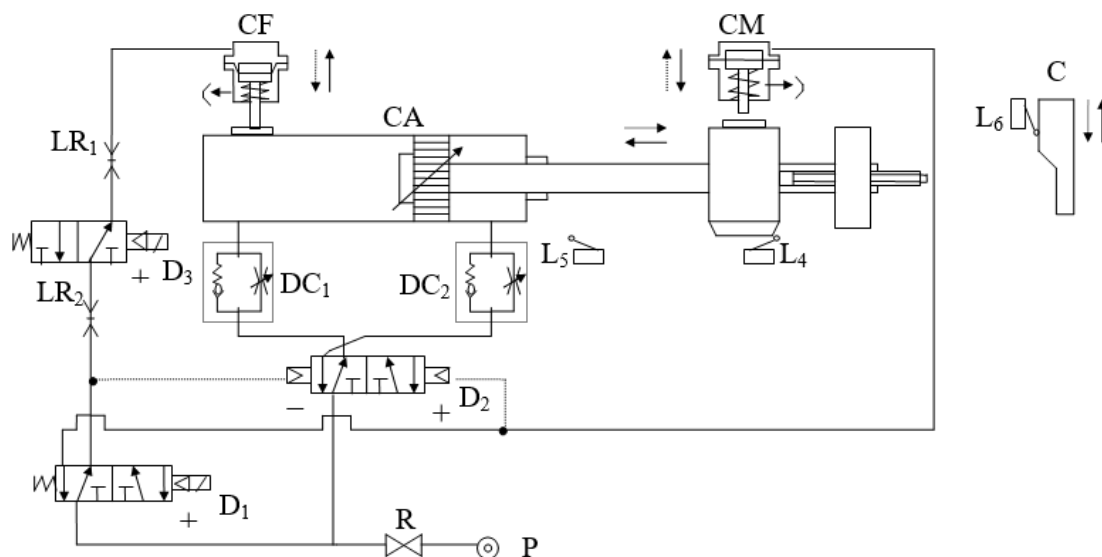
Pe lângă funcționarea în regim de reglaj, linia poate funcționa în mod automat, în regim de lovituri comandate, respectiv în regim de lovituri repetate executate cu intermitență în funcție de raportul vitezelor benzii prin cele două utilaje de presare.

Primul pas care trebuie parcurs în acțiunea de modelare a funcționării părții de comandă a liniei constă în elaborarea graficet-ului de nivel 1, cel al specificațiilor funcționale. Acest lucru a fost prezentat în [11] unde au fost definite de manieră clară și precisă toate *funcțiile*, *informațiile* și *comenzile* implicate în automatizarea părții operative fără a se specifica însă *modul de materializare* a acestora din punct de vedere tehnologic. Astfel au fost descrise, textual, acțiunile asociate etapelor și receptivităților asociate tranzițiilor.

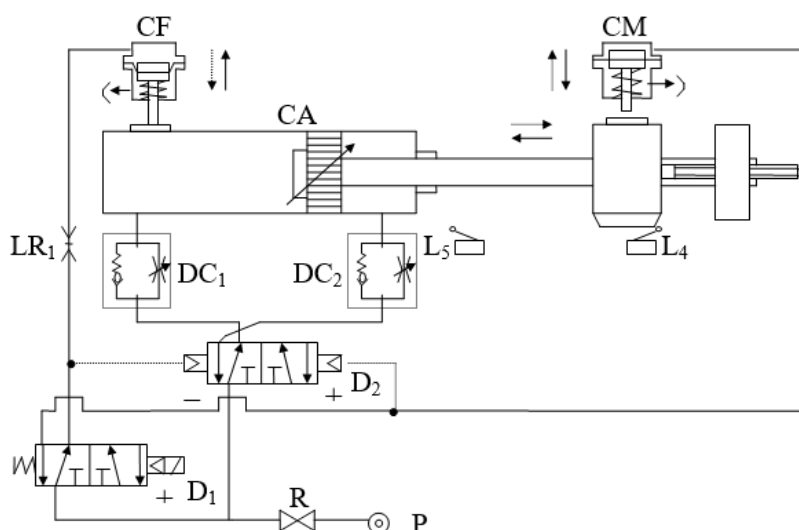
Trecerea la graficet-ul de nivel 2, cel al specificațiilor tehnologice presupune definirea modului în care vor fi materializate din punct de vedere tehnologic informațiile și acțiunile descrise în graficet-ul de nivel 1. Specificațiile tehnologice precizează maniera în care partea de comandă va trebui să fie fizic inserată în ansamblul care constituie sistemul automat și mediul său. La elaborarea unui graficet de nivel 2 se definesc [6],[8,9]:

- lanțurile tehnologice pentru materializarea informațiilor și acțiunilor necesare sistemului automat: senzori, organe de dialog cu mediul exterior sistemului, sisteme de acționare etc.;
- condițiile de funcționare (sau *specificațiile operaționale*) care nu întotdeauna sunt specificate prin Graficet: siguranța în funcționare, moduri de funcționare și oprire.

În acest context, în vederea detectării poziției diferitelor elemente aflate în mișcare au fost folosiți senzori de poziție sub forma microîntrerupătoarelor fine de cursă, dispunerea acestora de-a lungul liniei fiind prezentată în Figura 2.1.11 (doar pentru funcționarea cu intermitență în regim de lovituri repetate – Auto 2 – când raportul vitezelor prin utilaje este: $v_3 > v_2 < v_1$). Comenzile de pornire-oprire a diferitelor echipamente din cadrul liniei, de selectare a diverselor moduri de funcționare se face pe cale electrică cu ajutorul unor butoane de pornire-oprire, respectiv comutatoare. În cazul dispozitivului pneumatic, a cărei funcționare a fost descrisă prin graficet-ul de nivel 1 [11], s-a optat pentru varianta de acționare electro-pneumatică. Situația prezentată în Figura 2.1.12 corespunde retragerii cleștelui mobil spre dreapta (dispozitivul lucrând prin împingere) până la închiderea microlimitatorului L_4 care comandă deplasarea distribuitorului D_1 spre stânga urmată de reversarea mișcării cleștelui mobil. La sfârșitul acțiunii de avans are loc închiderea microlimitatorului L_5 care comandă reversarea mișcării cleștelui mobil (D_1 în poziție normală), respectiv dă un semnal presei în vederea efectuării unei curse duble. Separarea acțiunii de avans/retragere față de cea de închidere/deschidere a cleștilor se realizează cu ajutorul distribuitorului pilotat D_2 . Dispozitivul poate deservi atât scule cu căutători când realizează dubla eliberare, cât și scule fără căutători. Trecerea de la un mod de lucru la altul se face cu ajutorul distribuitorului D_3 cu comandă electrică care poate fi inclus pe circuitul cleștelui fix cu ajutorul celor două perechi de cuple rapide LR_1 - LR_2 . Semnalul de comandă este dat de microlimitatorul fine de cursă L_6 , acționat de cama C montată pe berbecul presei. În momentul în care se utilizează o sculă fără căutători, are loc *reconfigurarea* schemei de acționare a dispozitivului prin "scoaterea" din circuit a distribuitorului D_3 și realizarea legăturii cu ajutorul cuplei rapide LR_1 .



a) cu dublă eliberare, pentru sculă cu căutători



b) fără dublă eliberare, pentru sculă fără căutători

CA -cilindru de avans; CF -clește fix; CM -clește mobil; DC₁, DC₂ -drosele de cale; C -camă montată pe berbecul presei; LR₁, LR₂ -legături rapide; D₁, D₃ -distribuitoare cu comandă electrică; D₂ -distribuitor cu comandă pneumatică; R-robinet; L₄, L₅, L₆ -microlimitatoare fine de cursă

Figura 2.1.12. Schema de acționare a dispozitivului pneumatic

Reglarea dispozitivului presupune:

- *reglarea mărimii pasului*: se comandă oprirea căruciorului mobil la sfârșitul acțiunii de avans după care se reglează distanța dintre limitatoarele de cursă;
- *reglarea vitezei de avans/retragere* (cadența dispozitivului): se efectuează cu ajutorul a două drosele de cale DC₁, DC₂ montate pe circuitul cilindrului de avans CA;
- *reglarea distanței dintre tampoanele de fixare a benzii*: se face prin înșurubarea acestor tampoane la distanța dorită în funcție de lățimea benzii și de dispunerea orificiilor/denivelărilor pe bandă.

4. Elaborare graficet de nivel 2

În scopul abordării mai ușoare a procesului de modelare a liniei, s-a conceput o organigramă, prezentată în Figura 2.1.13, legată de modul de punere în funcțiune a liniei. Pornind de la aceasta, în vederea realizării unor modele de dimensiuni acceptabile, diversele faze în funcționarea liniei [2],[10,11] au fost descrise prin mai multe graficet-uri ierarhizate între ele.

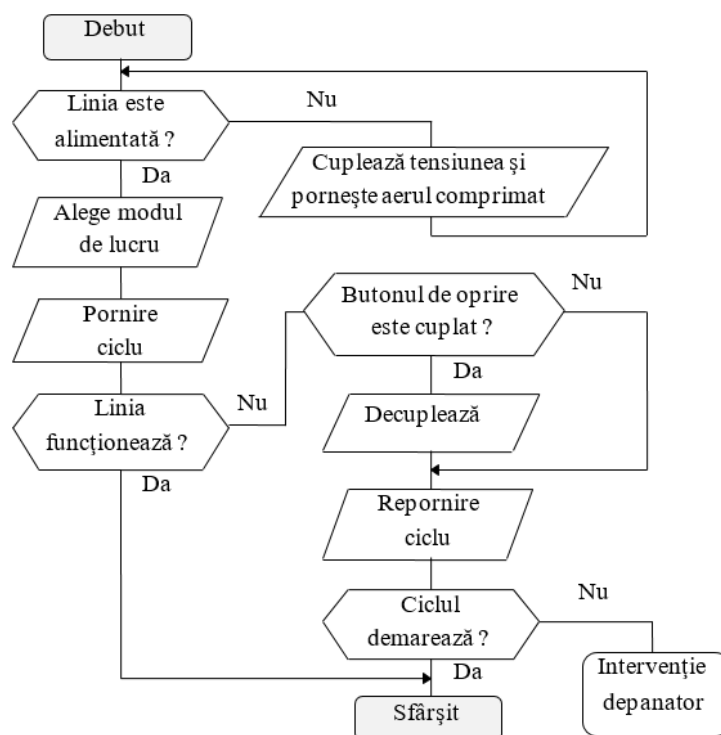


Figura 2.1.13. Organigramă privind punerea în funcțiune a liniei

Pornirea și oprirea liniei a fost descrisă (Figura 2.2.14) prin graficet-ul **G1** (graficet "master"), care este totodată și graficet de siguranță în exploatare [5,6],[8,9]. Punerea sub tensiune a părții de comandă se face prin acționarea butonului P, în condițiile în care niciunul dintre microîntrerupătoarele L₁₁, L₁₂ sau L₁₃ nu este acționat (banda nu a atins lungimea de avarie, respectiv, între presa 1 și presa 2, banda perforată nu s-a rupt). Oprirea generală a liniei se face prin acționarea butonului O. În cazul atingerii buclelor de avarie [2],[10] sau la ruperea accidentală a benzii perforate, situată între cele două prese, prin intermediul acestui graficet se comandă oprirea automată a liniei. Aceasta se realizează cu ajutorul macroacțiunii "Forțează" [6],[8] asociată etapei 10, macroacțiune care obligă graficetul **G5** (graficet "slave" față de **G1**), indiferent de situația în care se află, să treacă în etapa 50, etapă în care linia nu mai funcționează.

În Figurile 2.1.15...2.1.17 sunt reprezentate graficet-urile **G2**, **G3**, **G4** care descriu modul de funcționare a motoarelor electrice a preselor, respectiv alimentarea cu aer comprimat. Prin acționarea butoanelor de pornire P_{MP1}, respectiv P_{MP2} se comandă pornirea motoarelor celor două prese, care vor funcționa până când se comandă oprirea lor prin acționarea butoanelor de oprire O_{MP1}, O_{MP2}, sau a butonului de oprire generală. Alimentarea cu aer comprimat se face prin deschiderea robinetului (R), iar oprirea aerului comprimat se face prin închiderea robinetului ($\bar{R}$).

Descrierea modului de funcționare a liniei este prezentată în Figura 2.1.18 prin intermediul unui graficet principal **G5**. După punerea liniei sub tensiune, când are loc activarea etapei 11 (X₁₁=1), iar **G5** evoluează din etapa 50 în etapa 51, se poate alege unul din cele patru moduri de funcționare a liniei, prezentate la nivel de macroetape (52, 53, 54 sau 55). Pentru fiecare mod de

funcționare s-a realizat o descriere detaliată sub forma unor grafcet-uri de sarcină **G5.1...G5.4**, în lucrare fiind prezentat (Figura 2.1.19) doar **G5.3** (corespunzător regimului de funcționare Auto 2).

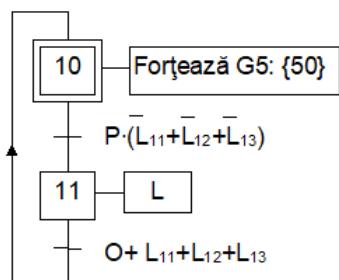


Figura 2.1.14. Grafcet de siguranță - G1

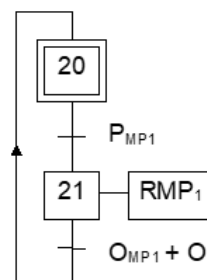


Figura 2.1.15. Grafcet motor presă 1 - G2

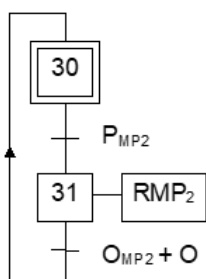


Figura 2.1.16. Grafcet motor presă 2 - G3

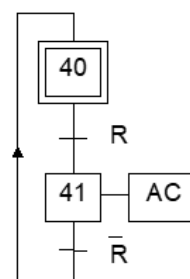


Figura 2.1.17. Grafcet aer comprimat - G4

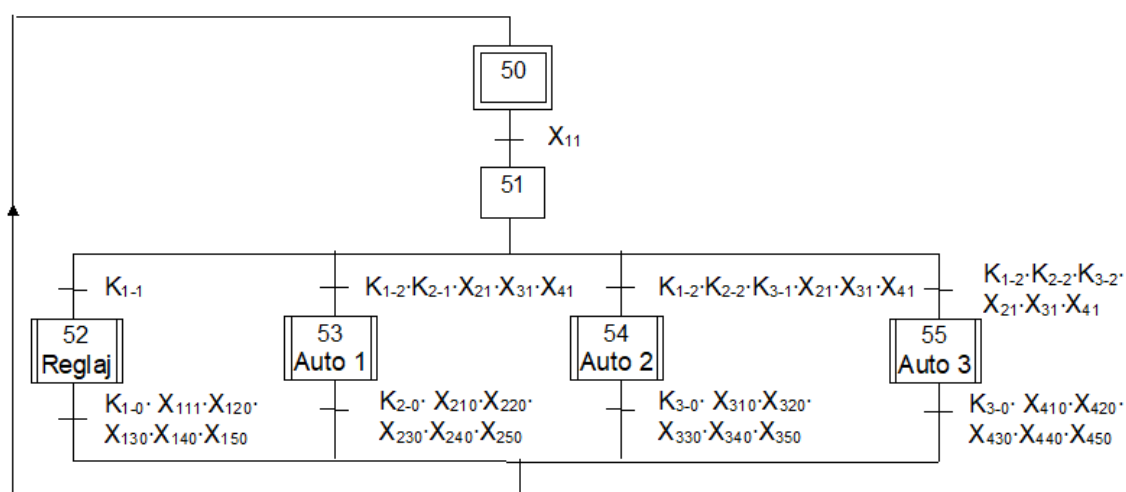


Figura 2.1.18. Grafcet principal - G5

LEGENDĂ: *P, O* - buton de pornire/oprire generală; *L* - lampă de semnalizare prezență tensiune; *L1...L13* - microîntrerupătoare fine de cursă; *PMP1, PMP2, OMP1, OMP2* - butoane de pornire/oprire motoare presă 1 și 2; *RMP1, RMP2* - rotire motor presa 1 și 2; *R* - robinet; *AC* - aer comprimat la dispozitivul pneumatic; *K1, K2, K3* - comutatoare pentru alegerea modului de funcționare; *K4* - comutator derulor; *RD* - rotire derulor; *P1, P2, O1, O2* - butoane de pornire/oprire ciclu de lucru la presa 1, respectiv la dispozitivul pneumatic; *K5* - comutator pentru reglarea pasului la dispozitivul pneumatic; *ICD* - o cursă dublă a berbecului presei; *CD* - curse duble ale berbecului presei în regim de lovituri repetate; Δ - timpul reglat între două curse duble ale presei 1; δ - timpul necesar comutării distribuitorului *D2* dintr-o poziție în alta; *LR1, LR2* - legături rapide.

Odată ales modul de funcționare prin activarea uneia dintre macroetapele 52, 53, 54 sau 55 din grafcet-ul principal, are loc, în cadrul grafcet-ului de sarcină respectiv, activarea *simultană* a tuturor etapelor aflate în aval legate de prima tranziție, a cărei receptivitate, reprezentată prin starea internă a macroetapei activate, este adevărată. În cadrul fiecărui grafcet de sarcină este descrisă, de la stânga la dreapta, funcționarea derulorului de bandă, a presei PAI 40 (prima presă din cadrul liniei), a dispozitivului pneumatic și a presei PAI 6.3 (presa a doua), evoluția fiecăruia dintre acestea desfășurându-se în paralel cu celelalte. În cazul dispozitivului pneumatic se observă descrierea a două variante funcționale: cu dublă eliberare și fără dublă eliberare. Alegerea uneia dintre variante implică automat anularea celeilalte, prin condițiile care au fost impuse la etapa 330 ($LR_1 \cdot LR_2$ - dublă eliberare), respectiv 340 ($LR_1 \cdot \overline{LR_2}$ - fără dublă eliberare, când se scoate din circuit distribuitorul D_3 (Figura 2.1.12).

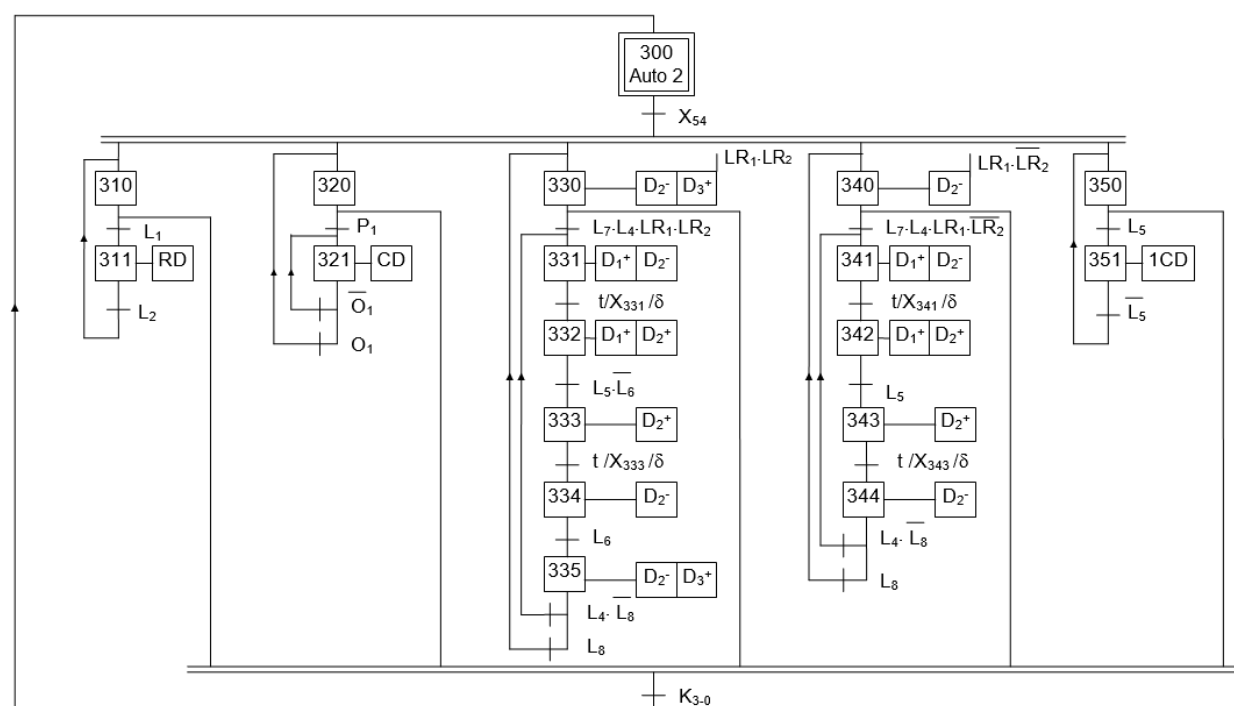


Figura 2.1.19. Grafcet de sarcină - G5.3

Gestiunea numărului de piese realizate pe linie se face cu ajutorul unui numărător a cărei funcționare este descrisă prin grafcet-ul **G6** (Figura 2.1.20). Etapei inițiale 40 îi este asociată acțiunea impulsională $(N \leftarrow 0)^*$ [6] care semnifică *aducerea la zero* a numărătorului N , după care acesta trece imediat în etapa 41 de așteptare, ca urmare a străbaterii tranziției care este validată și a cărei receptivitate este întotdeauna adevărată ($=1$). La sfârșitul cursei de avans a dispozitivului pneumatic se dă o comandă presei 2 în vederea efectuării unei curse duble, deci a unei piese, tranziția cu această receptivitate este străbătută, fiind activată etapa 42 la care este asociată acțiunea impulsională $(N \leftarrow N+1)^*$ care semnifică *adaugă 1* la numărătorul N .

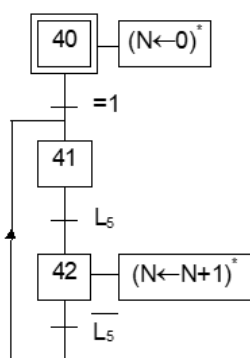


Figura 2.1.20. Grafcet numărător - G6

În continuare se va face o scurtă prezentare privind punerea în funcțiune a liniei, notațiile folosite în elaborarea grafcet-urilor de nivel 2 fiind prezentate în legendă. Pentru început se pune sub tensiune partea de

comandă (grafcet **G1**-Figura 2.1.14), prin acționarea butonului P, cu condiția ca niciun microîntrerupător fine de cursă L_{11} , L_{12} , L_{13} să nu fie acționat. În acest moment grafcet-ul **G5** (Figura 2.1.18) evoluează din etapa inițială 50 în etapa 51 ($X_{11}=1$) după care se poate alege modul de lucru. Prin trecerea comutatorului K_1 pe poziția 1 (K_{1-1}) se activează macroetapa 52, în vederea reglării liniei, sau în cazul funcționării independente a utilajelor (grafcet de sarcină **G5.1** nereprezentat în lucrare). După montarea ruloului de bandă pe derulor, se reglează poziția microîntrerupătoarelor L_1 și L_2 . Când este acționat L_1 are loc rotirea derulorului iar la acționarea lui L_2 se comandă oprirea derulorului. După montarea sculei pe presa 1 și reglarea pasului la dispozitivul de avans se pornește motorul presei prin acționarea butonului de pornire P_{MP1} (grafcet **G2**- Figura 2.1.15) după care se comandă pornirea ciclului de lucru a presei. După efectuarea reglajului se dă comanda de oprire a ciclului de lucru. În cazul dispozitivului de avans pneumatic, se alege mai întâi modul de funcționare: cu sau fără dublă eliberare, după care se cuplează aerul comprimat (grafcet **G4** –Figura 2.1.17) prin deschiderea robinetului R și se efectuează reglarea pasului de avans. În continuare se dă comanda dispozitivului pentru a efectua câteva curse duble. Datorită faptului că dispozitivul dispune de o cadență inferioară cadenței presei 2 [10], la sfârșitul fiecărei curse de avans a căruciorului acesta dă o comandă presei 2 în vederea efectuării unei curse duble. Dacă motorul acesteia este pornit (grafcet **G3** –Figura 2.1.16) iar dispozitivul nu se află în faza de reglare a pasului, presa va efectua o cursă dublă contorizată de numărătorul N (grafcet **G6** - Figura 2.1.10), după care berbecul va staționa la punctul mort superior până când va primi un nou semnal. În continuare se va regla și poziția celorlalte microîntrerupătoare dispuse de-a lungul liniei. După efectuarea tuturor reglajelor se trece comutatorul K_1 pe poziția 0, caz în care grafcet-ul principal **G5** (Figura 2.1.18) revine în etapa 51 când se poate alege unul din cele trei regimuri de funcționare automată a întregii linii.

Alegerea regimului Auto 2 poate fi făcută dacă receptivitatea $K_{1-2} \cdot K_{2-2} \cdot K_{3-1} \cdot X_{21} \cdot X_{31} \cdot X_{41}$ asociată tranziției din amonte de macroetapa 54 este adevărată ($=1$), ceea ce presupune trecerea comutatoarelor K_1 și K_2 în poziția 2, respectiv K_3 în poziția 1, au fost pornite motoarele celor două prese ($X_{21}=1$, $X_{31}=1$), respectiv a fost cuplat aerul comprimat ($X_{41}=1$). În acest moment se activează macroetapa 54 ($X_{54}=1$), care are ca și efect activarea etapelor 310, 320, 330 sau 340 (după caz), respectiv 350 din grafcet-ul de sarcină **G5.3**. În acest moment linia este în așteptarea comenzii de pornire a ciclului de lucru. Pentru a realiza acest lucru se apasă butonul P_1 pentru a pune în mișcare berbecul presei PAI 40 (presa cea mai lentă din cadrul liniei) care va lucra, fără oprire, în regim de lovituri repetate. În momentul în care banda din acumulatorul din aval de presa PAI 40 atinge lungimea de acumulare ($L_7=1$), iar receptivitatea asociată tranziției imediat în aval de etapa 330 sau 340 este adevărată, se comandă pornirea dispozitivului pneumatic care va lucra fără oprire până se consumă banda din acumulator ($L_8=1$), după care va sta. La sfârșit de cursă de avans ($L_5=1$) dispozitivul dă un semnal presei PAI 6.3 în vederea efectuării unei curse duble. Oprirea liniei se face prin oprirea presei PAI 40 ($O_1=1$), care, prin intermediul buclelor, conduce la oprirea celorlalte utilaje. În final se realizează oprirea generală prin acționarea butonului O, care are și rol de oprire de urgență dacă se constată abateri de la funcționarea corectă a liniei.

În final se poate concluziona că utilizarea GRAFCET-ului la modelarea funcționării părții de comandă a liniei automate conduce la o serie de avantaje. Acesta oferă posibilități superioare de interpretare, ușurință în utilizare, este un mijloc eficace de dialog între automatician și beneficiarul automatizării, pe tot parcursul modelării, de la specificațiile caietului de sarcini până la implementarea finală. El permite obținerea unui *model lizibil*, punând în evidență paralelismele și sincronizările care pot apare, fiind ușor de înțeles de către persoane cu pregătire de specialitate diferită, atât în faza de concepție, cât și în timpul exploatării sau la modificarea părții automatizate, prin utilizarea unui *limbaj descriptiv* independent de aspectele tehnice. Totodată este de un real ajutor în localizarea imediată a unor anomalii care pot să apară în timpul funcționării liniei. El permite detectarea incoerențelor, evitarea blocajelor sau a conflictelor în funcționare. În plus, la fiecare etapă de elaborare a sa, această diagramă poate fi rafinată, corectată sau modificată, fără a necesita repunerea în cauză a părților deja studiate.

2.1.1.3 Cercetări privind modul de realizare a părții de comandă a liniei automate flexibile de presare la rece

După modelarea părții de comandă a unei linii automate cercetarea a continuat cu modul de realizare a părții de comandă. În ceea ce privește opțiunea tehnologică pentru realizarea părții de comandă, aceasta poate să nu apară specificată la nivelul Grafcet-ului, rămânând la latitudinea specialistului care o realizează, pe baza funcțiile indicate prin Grafcet. Astfel, partea de comandă poate fi realizată [12] având la bază tehnica:

- **cablată**, caz în care înlănțuirea funcțiilor de comandă impune o rețea de componente conectate unele în raport cu celelalte. În acest caz poate fi utilizată tehnologia electromecanică, electronică sau pneumatică;
- **programată**, când înlănțuirea funcțiilor de comandă este programată sub forma unor instrucțiuni care sunt tratate și gestionate de către unitatea centrală a părții de comandă. Aceasta poate fi realizată cu ajutorul:
 - ⇒ *automatelor programabile industriale* care nu reclamă cunoștințe de informatică, și care posedă, aproape toate, un limbaj adaptat Grafcet-ului, fiind înzestrate cu mai multe intrări și ieșiri;
 - ⇒ *micro și mini-calculatoarelor*, a căror utilizare reclamă cunoștințe de informatică. Grafcet-ul trebuie tradus într-un limbaj bazat pe structuri algoritmice. Totodată acestea nu posedă, în general, intrări și ieșiri industriale, motiv pentru care vor trebui să fie create;
 - ⇒ *microsisteme* sub forma unor plăci electronice construite în jurul unui microprocesor, dotate cu intrări și ieșiri industriale. La fel ca și în cazul calculatoarelor este necesară transformarea Grafcet-ului într-un limbaj bazat pe structuri algoritmice, dar în acest caz posibilitățile de dialog cu operatorul sunt reduse.

Alegerea tehnologiei părții de comandă nu este întotdeauna evidentă, fiind necesar să fie luați în calcul o serie de factori. Pentru a ușura acest lucru au fost puse la punct documente de analiză realizate de ADEPA (Agence pour le Developpement de la Productique Appliquée à l'Industrie) [9], care permit alegerea tehnologiei adaptate la cazul concret. În mare, principalele criterii care stau la bază sunt:

- **funcționale**, bazate pe analiza *numărului de semnale de intrare-ieșire*, care are o influență privind complexitatea schemei și a *volumului de tratare a informațiilor*, legat de complexitatea și numărul de etape al Grafcet-ului. Aceste două criterii influențează alegerea unei tehnici bazată pe logica cablată sau programată.
- **tehnologice**, având la bază dorința de a avea o instalație omogenă, ușor de întreținut, ceea ce impune alegerea unei tehnologii a părții de comandă identică cu cea a părții operative. Această soluție ideală (de ex. automatisme în întregime electrice sau pneumatice) nu poate fi întotdeauna respectată;

- **economice**, care țin cont de costurile privind investiția, funcționarea și întreținerea sistemului automatizat.

Pe baza celor menționate mai sus și în urma parcurgerii documentului de analiză ADEPA, am ajuns la **concluzia** că, pentru cazul concret al unei linii automate flexibile de ștanțare-matrițare construită pe prese de uz general, se poate folosi în condiții de eficiență atât tehnica bazată pe logica cablată, cât și pe cea programată prin utilizarea unui automat programabil. În final, luând în calcul și resursele materiale și financiare existente (de care s-a dispus în cadrul laboratorului de presare la rece de la Universitatea Politehnica Timișoara unde s-a realizat linia) am optat pentru utilizarea tehnicii bazate pe *logica cablată*, tehnologia utilizată în acest caz fiind cea electromecanică și pneumatică.

Pe baza graficet-ului de nivel 2 [2],[3] am conceput schema electrică de comandă a liniei, schemă prezentată în Figura 2.1.21. Aceasta s-a realizat pe baza montajelor cu relee și contactoare. Legătura cu circuitul de comandă al preselor și a derulorului este prezentată în partea de jos a figurii. Schema s-a conceput în așa fel încât se păstrează *aproape nemodificat* circuitul de comandă al preselor (Figura 2.1.22), *micile modificări* constând doar în introducerea în paralel a unor contacte în circuitul de comandă al pedalei preselor, respectiv al motorului derulorului și al motoarelor preselor.

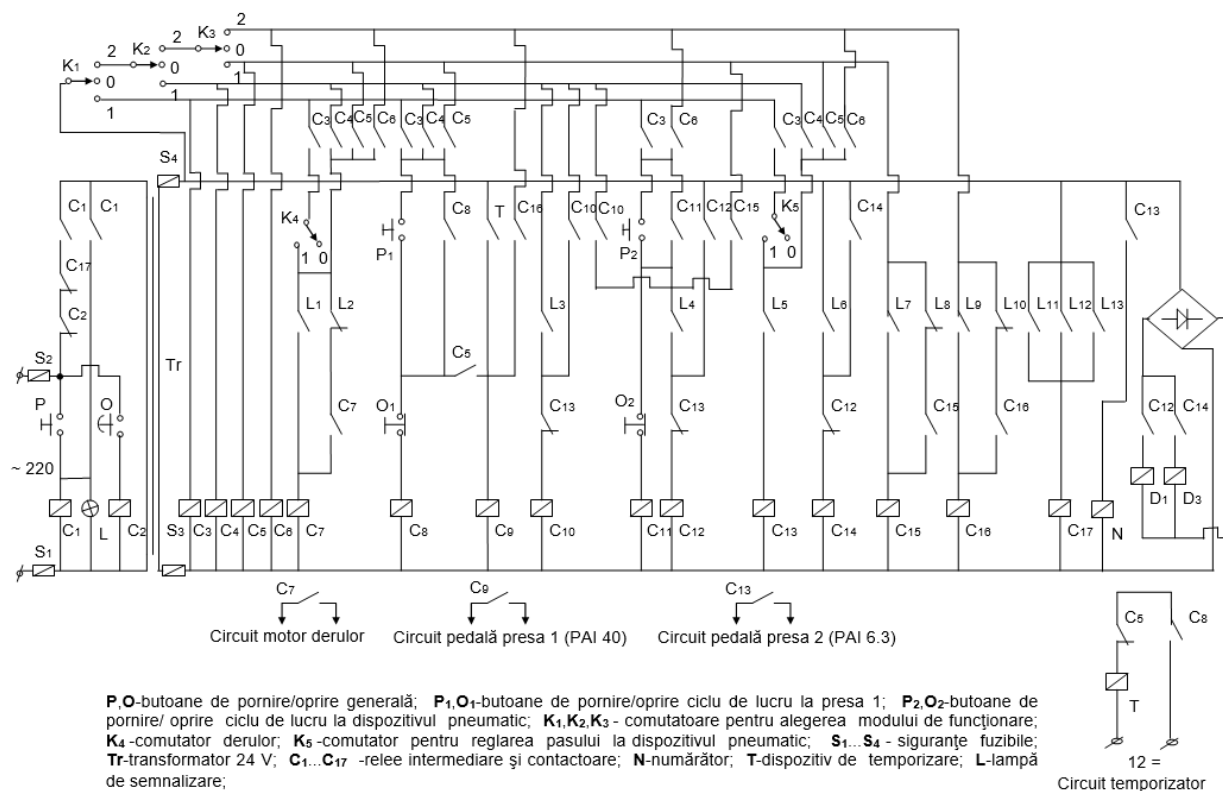


Figura 2.1.21. Schema electrică (simplificată) a părții de comandă a liniei

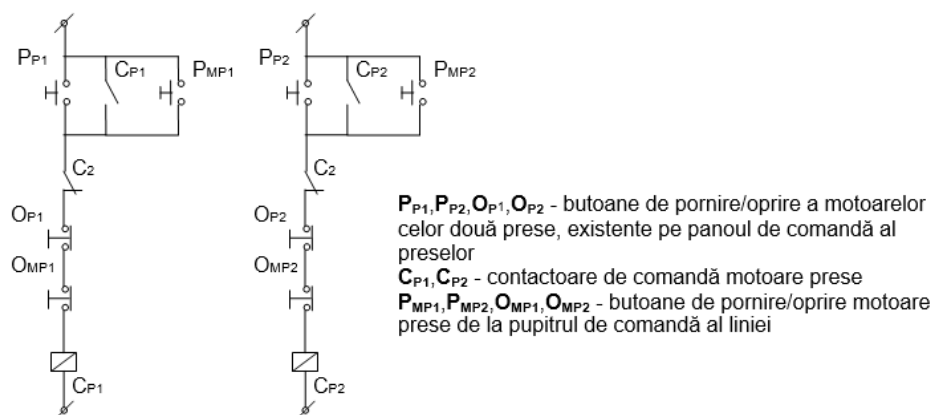


Figura 2.1.22. Circuite de comandă motoare prese

Modul de funcționare a liniei este cel prezentat la punctul 2.1.1.2 [2],[3], toate comenzile privind funcționarea acesteia fiind date de la pupitrul de comandă. Pornirea liniei prin cuplarea tensiunii acesteia se face prin apăsarea butonului P, iar oprirea generală sau de urgență cu ajutorul butonului O. În cazul în care se dorește reglarea liniei sau exploatarea individuală a utilajelor, se trece comutatorul K₁ pe poziția 1. Cuplarea derulorului se face prin trecerea comutatorului K₄ pe poziția 1, iar pornirea și oprirea acestuia se face cu ajutorul microlimitatoarelor L₁ și L₂. Pornirea ciclului de lucru al presei PAI 40 se realizează cu ajutorul butonului P₁, iar reglarea numărului de curse duble pe minut se realizează cu ajutorul unui temporizator T. Cea de a doua presă (PAI 6.3) este comandată de către dispozitivul de avans a cărei pornire este realizată cu ajutorul butonului P₂. În cazul în care se dorește reglarea pasului la dispozitiv se trece comutatorul K₅ pe poziția 1. Funcționarea liniei în regim automat presupune trecerea comutatorului K₁ pe poziția 2. În cazul funcționării în regim de lovituri comandate (auto 1) se trece K₂ pe poziția 1, comanda de pornire a ciclului de lucru al liniei fiind dată de către butonul P₁ care acționează asupra presei de comandă. Funcționarea în regim de lovituri repetate executate cu intermitență - auto 2 (p < 70 mm) presupune trecerea lui K₂ pe poziția 2 iar K₃ pe poziția 1. Pornirea ciclului de lucru al liniei se face și în acest caz prin intermediul butonului P₁. În cazul pașilor p > 70 mm (auto 3) se trece K₃ pe poziția 2, pornirea ciclului de lucru al liniei realizându-se prin intermediul butonului P₂ de la dispozitivul de comandă. Oprirea liniei în caz de avarie se face cu ajutorul microlimitatoarelor L₁₁, L₁₂, L₁₃. Gestiunea numărului de piese executate pe linie se realizează cu ajutorul numărătorului N.

Avantajul unei astfel de soluții constă atât în simplitate și preț de cost redus, cât mai ales în faptul că ambele prese pot lucra ca și utilaje integrate în cadrul liniei, caz în care comanda se realizează de la pupitrul de comandă al liniei, cât și ca utilaje independente, caz în care fiecare presă poate fi comandată de la panoul său de comandă. Micile modificări care au fost efectuate asupra panourilor de comandă ale preselor constau doar în introducerea în paralel a unor contacte în circuitul de comandă al pedalei, respectiv al motoarelor preselor.

2.1.1.4 Cercetări privind determinarea capacității productive și a consumului energetic a unor sisteme de fabricație prin presare la rece

O altă cercetare efectuată în acest domeniu se referă la determinarea capacității productive și a consumului energetic a unor sisteme de fabricație prin presare la rece [13]. Avându-se în vedere că preșele (de comandă sau comandate) constitutive ale unui sistem de fabricație (S.F.) prin presare la rece dispun de variante posibile de funcționare, se cere să se precizeze, pentru diversele situații tipice de aplicație, care sunt variantele de funcționare optime. În acest context, a prezentat interes evidențierea eventualelor corelări obligatorii sau eventualelor influențe ce apar între natura regimului de funcționare a S.F. pe de o parte, și pe de altă parte, arhitectura S.F., capacitatea productivă a SF și consumul energetic aferent prelucrării unui produs.

Stabilirea capacității productive a unui S.F. a pornit de la realizarea unei diferențieri [14] între:

⇒ *capacitatea productivă nominală* C_{pn} (2.1.6) a unui utilaj de presare singular echipat cu sculă de deformare servind realizării unui anumit produs, aceasta fiind cea corespunzătoare funcționării presei în regim de lovituri repetate (LR) cu n [cd/min], scula de deformare realizând un număr de i produse la fiecare lovitură de berbec:

$$C_{pn} = n \cdot i \quad [\text{piese/min}] \quad (2.1.6)$$

⇒ *capacitatea productivă efectivă* C_{pef} (2.1.7) a acestui utilaj:

$$C_{pef} = n_{ef} \cdot i \quad [\text{piese/min}] \quad (2.1.7)$$

unde n_{ef} este numărul efectiv de lovituri pe care le realizează pe minut berbecul presei.

Raportându-ne cu acești indicatori la S.F. automate, și ținând seama de faptul că presa de comandă (fiind utilaj independent este asimilabil unui utilaj singular) poate funcționa după două regimuri [11], pentru acest post de lucru al SF se vor înregistra:

➤ pentru lucrul prin lovituri repetate (LR), o capacitate productivă nominală C_{pnpc} :

$$C_{pnpc} = n_{pc} \cdot i \quad [\text{piese/min}] \quad (2.1.8)$$

➤ pentru lucrul prin lovituri singulare (LS), o capacitate productivă efectivă C_{pefpc} :

$$C_{pefpc} = n_{efpc} \cdot i \quad [\text{piese/min}] \quad (2.1.9)$$

Întrucât, în mod evident

$$n_{efpc} \leq n_{pc} \quad (2.1.10)$$

rezultă

$$C_{pefpc} \leq C_{pnpc} \quad (2.1.11)$$

Apare astfel opțiunea de lucru a presei de comandă prin lovituri repetate (LR).

Pe de altă parte, întrucât într-un S.F. automat se impune egalarea producției pe unitatea de timp din toate posturile de lucru ale sistemului, anume egală cu producția pe care o realizează presa de comandă, evident că la capătul S.F. vor rezulta tot atâtea produse pe unitatea de timp, câte se realizează prin operația efectuată pe presa de comandă, deci:

$$C_{pefSF} = C_{pefpc} = n_{efpc} \cdot i \quad [\text{piese/min}] \quad (2.1.12)$$

obținându-se un maxim de

$$C_{pefSF} = C_{pnpc} = C_{pnSF} = n_{pc} \cdot i \quad [\text{piese/min}] \quad (2.1.13)$$

Relațiile (2.1.12) și (2.1.13) evidențiază independența capacității productive a S.F. în raport cu regimul de funcționare a preselor comandate din sistem (lovituri singulare LS, sau lovituri repetate executate cu intermitență LRI).

Fabricația unui produs pe un S.F. automat, în raport cu fabricația acestuia pe prese individuale în regim neautomat, conduce pe lângă creșterea productivității muncii, respectiv scăderea manoperei [10], și la modificarea valorii consumului de energie electrică pe produs. În cadrul aceluiași S.F., consumul de energie electrică pe produs poate suferi modificări în funcție de regimul de funcționare a S.F., ceea ce impune stabilirea regimului optim de funcționare din acest punct de vedere. Realizarea acestui lucru presupune în primul rând determinarea consumului de

energie electrică pentru fiecare utilaj în parte și apoi determinarea consumului de energie electrică pe produs în funcție de regimul de funcționare a S.F.

Cercetările au fost efectuate pe linia automată de ștanțare-matrițare realizată în laboratorul de presare la rece de la Universitatea Politehnica Timișoara (Figura 2.1.11) compusă din două celule de bază construite pe două prese cu excentric de uz general PAI 40, respectiv PAI 6.3, și un derulor de bandă cu acționare proprie pe care se montează ruloul de bandă. Conexiunea dintre utilaje este realizată de către semifabricatul bandă prin intermediul a două acumulatori de semifabricat (în scopul asigurării unei viteze medii de avans a benzii de-a lungul liniei) prevăzute fiecare cu câte un sistem de palpare cu rol de comandă a utilajelor. Linia poate funcționa în cele două moduri definite în [15], în regim de lovituri singulare comandate (LSC), respectiv de lovituri repetate executate cu intermitență (LRI).

Pornind de la un program factorial pe care l-am realizat cu ajutorul softului Statgraphics, a fost trasată, în Figura 2.1.23, variația energiei totale consumate de către presa PAI 40 [16], respectiv PAI 6.3 [17], pe durata unei curse duble, în funcție de cadența (n), respectiv încărcarea presei (F), iar în (2.1.14) și (2.1.15) relațiile de calcul ale energiei totale pentru fiecare presă, obținute pe baza coeficienților de regresie calculați.

$$E_{tlc\ PAI\ 40} = -76.2833 \cdot n + 1.05392 \cdot F + 1.96078 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot F + 0.491667 \cdot n^2 + 3.67647 \cdot 10^{-3} \cdot F^2 + 3514.67 \quad (2.1.14)$$

$$E_{tlc\ PAI\ 6.3} = -7.12142 \cdot n + 0.690641 \cdot F - 1.19936 \cdot 10^{-3} \cdot n \cdot F + 0.0241141 \cdot n^2 + 0.020212 \cdot F^2 + 692.983 \quad (2.1.15)$$

Pentru determinarea energiei electrice consumate de derulor s-a trasat puterea consumată de motorul electric în unitatea de timp (Figura 2.1.24). Se observă că la fiecare pornire a motorului se înregistrează pe un interval de timp de 0.5 secunde un vârf de putere de 936 W, după care puterea devine constantă ($P_D = 380$ W) la funcționarea normală a derulorului. Energia consumată pe durata unui ciclu $E_{tlc\ D}$ al derulorului este:

$$E_{tlc\ D} = E_p + E_f = E_p + P_D \cdot t_{fD} \quad (2.1.16)$$

unde: $E_p = 374$ [W·s] - energia consumată la pornire, de valoare constantă;

$E_f = P_D \cdot t_{fD}$ - energia consumată în timpul funcționării, care depinde de timpul de funcționare t_{fD} al derulorului după pornire.

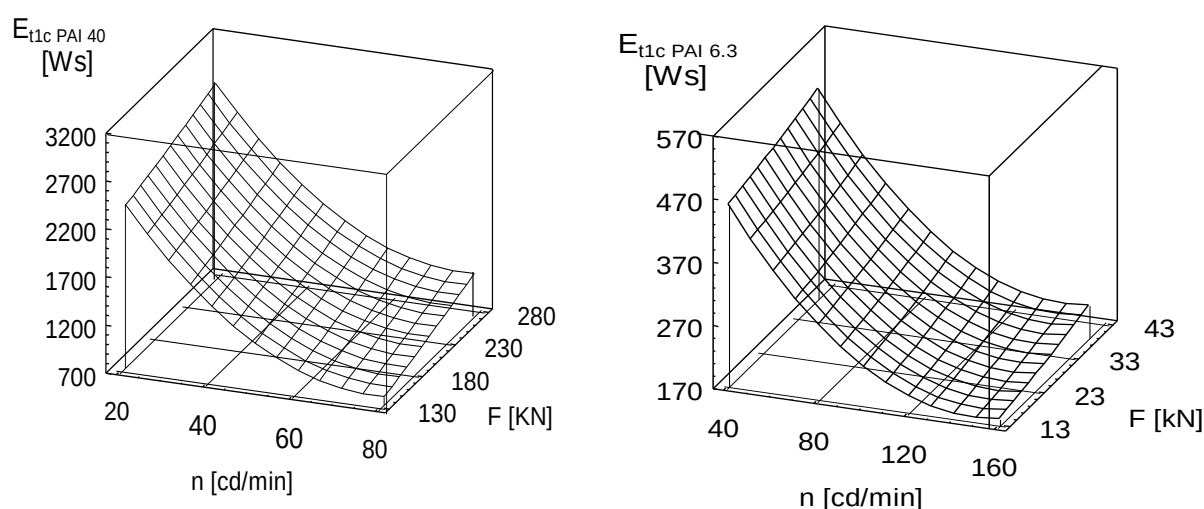


Figura 2.1.23. Energia totală consumată pe durata unui ciclu de presare în cazul presei PAI 40, respectiv a presei PAI 6.3

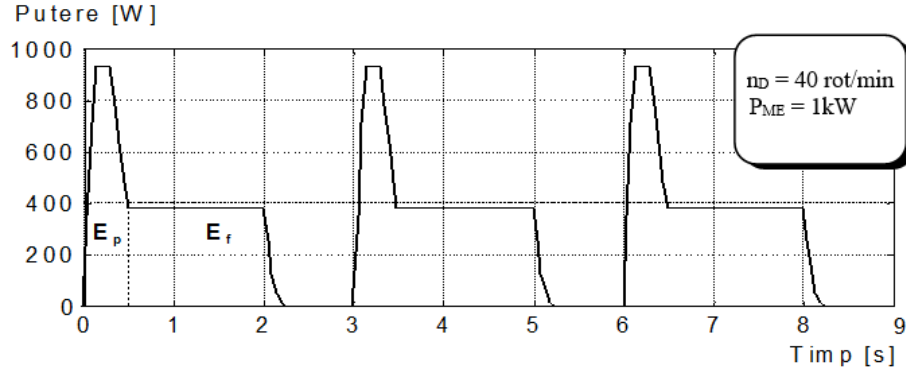


Figura 2.1.24. Variația puterii consumate în timp, la derulul

Având deja determinate consumurile de energie electrică pentru fiecare utilaj component al liniei, s-a trecut la determinarea consumului de energie electrică pe linie. Acest lucru s-a realizat ținând cont de timpul de funcționare al fiecărui utilaj din cadrul liniei. Valorile timpilor de funcționare t_f și de staționare t_s a utilajelor în cadrul liniei s-au determinat, pe baza algoritmului prezentat în [18], utilizând programul de calculator “PRES”. Determinarea efectivă a energiei electrice consumate pe linie într-un interval de timp t s-a făcut pe baza unor relații de calcul care s-au stabilit în funcție de ciclograma de funcționare a liniei, după cum urmează:

- funcționarea în regim de lovituri singulare comandate (LSC):

$$E_{tSF(LSC)} = \left[\frac{1}{t_{fD} + t_{sD}} \cdot E_{t1cD} + \frac{n_{PAI40}}{60} \cdot (E_{t1cPAI40} + E_{t1cPAI6.3}) \right] \cdot t \quad (2.1.17)$$

- funcționarea în regim de lovituri repetate executate cu intermitență (LRI):

$$E_{tSF(LRI)} = \left[\frac{1}{t_{fD} + t_{sD}} \cdot E_{t1cD} + \frac{n_{PAI40}}{60} \cdot E_{t1cPAI40} + \frac{1}{t_{fPAI6.3} + t_{sPAI6.3}} \cdot \left(\frac{t_{fPAI6.3} \cdot n_{PAI6.3}}{60} \cdot E_{t1cPAI6.3} + P_{gPAI6.3} \cdot t_{sPAI6.3} \right) \right] \cdot t \quad (2.1.18)$$

unde $P_{gPAI6.3}$ - reprezintă puterea consumată la mersul în gol a preseii, când se realizează doar rotirea volantului.

Energia electrică consumată pe produs (Figura 2.1.25 și 2.1.26) s-a determinat cu următoarea relație:

$$E_{t/p} = E_{tSF} / N_p \quad (2.1.19)$$

unde N_p reprezintă numărul de produse realizate în intervalul de timp t .

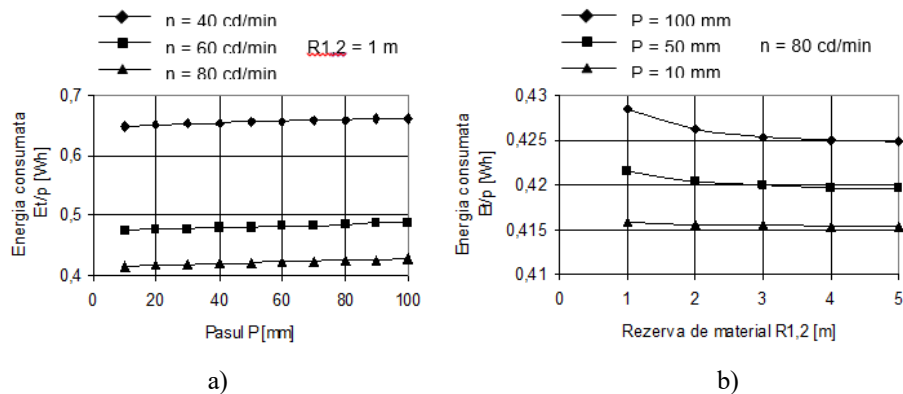


Figura 2.1.25. Energia electrică consumată pe produs la funcționarea în regim de LSC

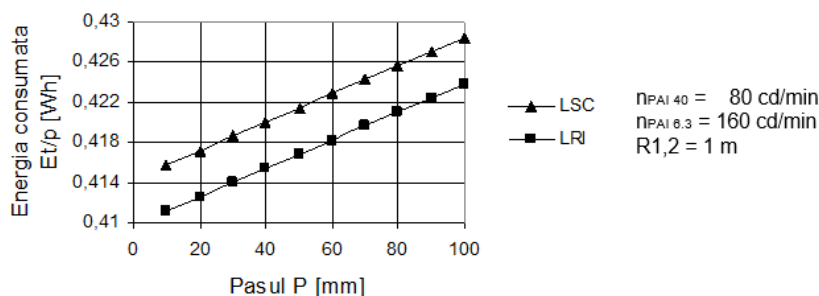


Figura 2.1.26. Energia electrică consumată pe produs la funcționarea în regim de LSC, respectiv de LRI

Din Figura 2.1.25.a se observă că în cazul funcționării S.F. în regim de LSC când presa de comandă PAI40 funcționează în regim de lovituri singulare ($n < 80$ cd/min) apare o creștere a energiei electrice pe produs față de situația în care presa de comandă funcționează în regim de lovituri repetate ($n = 80$ cd/min). Acest lucru se datorează creșterii energiei consumate la o cursă dublă ca urmare a creșterii ponderii energiei consumate la mersul în gol [16], invers proporționale cu cadența presei. Exploatarea S.F. în regim de LRI (Figura 2.1.26) comparativ cu cea în regim de LSC conduce la o ușoară scădere a consumului de energie electrică pe produs, ca urmare a exploatării în regim de lovituri repetate a ambelor prese.

Pentru a obține valori cât mai mici a energiei electrice consumate pe produs se impune asigurarea, în cazul utilajelor cu funcționare intermitentă, a unor timpi de funcționare cât mai mari. Acest lucru depinde de arhitectura S.F., timpilor de funcționare fiind mai mari în cazul în care valorile de capacitate productivă a utilajelor din cadrul S.F. sunt mai apropiate. Frecvența pornirilor și a opririlor utilajelor conduce și ea la modificarea consumului de energie electrică pe produs, putând fi stabilită prin intermediul acumulatorilor de semifabricat, prin asigurarea unor rezerve de material corespunzătoare. Acest lucru a fost scos în evidență în Figura 2.1.25.b, în care se observă o micșorare a energiei electrice consumate cu creșterea rezervei de material $R_{1,2}$ datorită reducerii frecvenței pornirilor derulorului. În ceea ce privește cel de-al doilea acumulator, în cazul de față, datorită faptului că raportul cadențelor celor două prese PAI40 și PAI6.3 este de $1/2$, timpilor de funcționare și staționare a presei PAI6.3 sunt egali astfel că influența valorii rezervei de material $R_{2,3}$ nu se mai face resimțită.

În final se poate concluziona că pentru realizarea unor consumuri energetice pe produs de valoare cât mai mică se recomandă funcționarea S.F. în regim de LRI, caz favorabil și din punct de vedere al exploatării utilajelor. În cazul în care se optează pentru varianta de LSC, atunci este de dorit ca presa de comandă să funcționeze în regim de lovituri repetate.

2.1.1.5 Cercetări privind îmbunătățirea operației de reglare a unei linii automate flexibile de presare la rece

Un alt aspect important referitor la automatizarea procesului de prelucrare prin deformare plastică la rece constă în măsurile de îmbunătățire a operației de reglare a unei linii automate flexibile de presare la rece. În lucrarea [19] se prezintă acțiunile de reducere a duratei operației de reglare la o linie automat flexibilă de presare la rece construită cu prese clasice. Pornind de la separarea operației de reglare internă și externă, în faza a doua se realizează o conversie a operației de reglare internă în operație de reglare externă. În cele din urmă, sunt prezentate principalele măsuri privind îmbunătățirea operațiunii de reglare.

Operațiile de prelucrare prin deformare plastică la rece sunt în general caracterizate de timpi de bază scurți în comparație cu timpii auxiliari, care sunt destul de lungi. În cazul unei linii automate, pentru a trece de la un produs la altul, linia trebuie să fie oprită și să se facă reglarea

acesteia. În cazul în care utilajele care alcătuiesc linia nu au posibilități de reglare automată, timpul necesar pentru reglarea liniei va fi mai lung. În cazul producției diversificate, valoarea timpului de ajustare în raport cu timpul necesar pentru fabricarea unui produs va avea o influență semnificativă. În aceste condiții, se poate spune că reglajul este parametrul critic pentru trecerea de la un produs la altul. În cazul în care timpul de pregătire este redus, organizarea producției pe linie se poate face în loturi mici. Pentru a reduce timpul de pregătire, trebuie luate o serie de măsuri. Acest lucru poate fi realizat prin aplicarea principiilor metodei S.M.E.D (Single Minute Exchange Die) [20,21].

Primul pas care trebuie făcut pentru a pune în aplicare principiile metodei S.M.E.D. la operațiunea de reglare a liniei este de a separa operația de reglare în două categorii:

- *reglarea internă*, montarea sau demontarea sculelor, care se poate face numai atunci când presa (linia) este oprită;
- *reglarea externă*, transportul sculelor după utilizare la locul de depozitare sau aducerea de scule noi la prese, care se poate face în timpul funcționării liniei. În acest caz, îmbunătățirea operațiunii de reglare constă în trei etape prezentate în Figura 2.1.27.

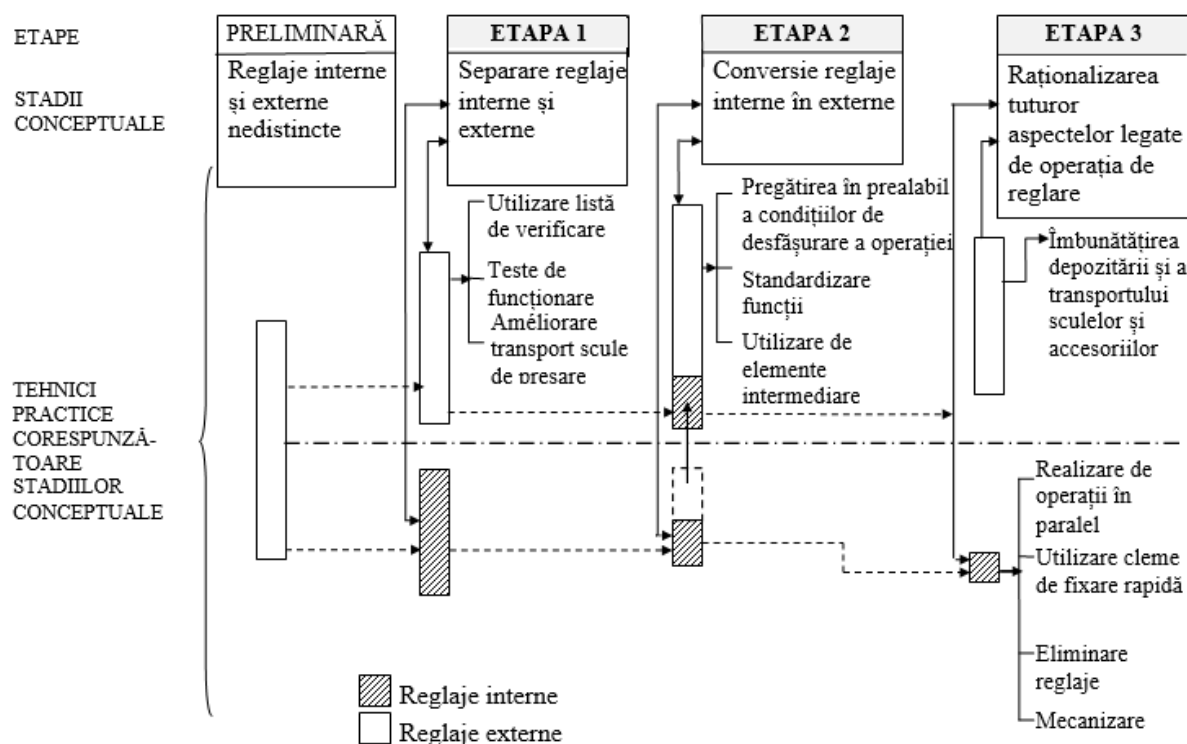


Figura. 2.1.27. Stadii conceptuale privind îmbunătățirea reglajului

Cel mai important pas spre aplicarea SMED este să se facă distincția între reglajele interne și externe (ETAPA 1). În sistemele tradiționale, reglajele interne și externe sunt amestecate: ceea ce ar putea fi făcut în exterior se face în interior, și de aceea presele staționează pentru perioade lungi de timp. Pentru a programa aplicarea SMED, trebuie să se studieze în detaliu condițiile reale din atelier. Ținând cont de aceste aspecte, în cele ce urmează se prezintă câteva tehnici eficiente pe care le-am identificat, pentru a ne asigura că operațiile care pot fi efectuate în extern sunt efectuate efectiv în timp ce linia funcționează.

- Utilizarea unei liste de verificare*, pentru fiecare sculă care face parte din linie. Această listă va include denumirea piesei care urmează să fie fabricată, codul sculei, accesoriile necesare pentru schimbarea sculei, parametrii de reglare etc. O listă de verificare este utilă pentru a ști

dacă toate piesele sunt acolo unde trebuie să fie, dar nu spune dacă acestea sunt în perfectă stare de funcționare.

- b) Testare funcții, presupune verificarea dacă fiecare sculă/accesoriu este în perfectă stare de funcționare. Este foarte important să se termine reparațiile pieselor defecte înainte de a începe reglajul intern.
- c) Îmbunătățirea transportului sculelor de presare și a unor accesorii. Sculele ar trebui scoase din locul de depozitare și transportate la prese, iar apoi puse la loc atunci când un lot este terminat. Acest lucru ar trebui să se facă în exterior, fie de către operator în timp ce presa funcționează în regim automat, fie de către un alt lucrător care este responsabil de transport. Aceasta presupune:
 - plasarea noii scule lângă presă înainte de a o opri;
 - preluarea vechii scule de pe suportul mobil și așezarea acesteia lângă presă;
 - plasarea noii scule pe masa presei;
 - transportul vechii scule la locul de depozitare după ce a fost finalizată reglarea și a fost pornită presa.

În ETAPA 2 are loc conversia reglajelor interne în reglaje externe. În cele ce urmează sunt prezentate câteva soluții privind conversia reglajelor, pe care le-am identificat, după cum urmează:

a) Pregătirea în prealabil a condițiilor de desfășurare a operației

Primul pas în conversia operațiilor de stabilire a conversiei este pregătirea lor în avans. Un exemplu în acest caz ar putea fi alimentarea liniei cu un rulou de bandă. Pentru a elimina întârzierile datorate așteptării materialului, un nou rulou de bandă ar trebui adus lângă derulor în timp ce linia este în funcțiune și pus în poziție atunci când ruloul anterior este terminat. Soluția tehnică pentru a trece de la reglajul intern la cel extern ar fi derulorul dublu, cu două mandrine de alimentare cu rulou bandă. În acest caz, ruloul poate fi plasat pe mandrina liberă în timp ce prima mandrină este încărcată și linia funcționează.

b) Standardizarea funcțiilor

Există o nevoie tot mai mare de standardizare a operațiilor de reglare. O modalitate de a face acest lucru este de a standardiza dimensiunile și mărimile tuturor sculelor și accesoriilor necesare, dar această metodă, numită standardizare a formelor, este costisitoare. Standardizarea funcțională unifică numai acele părți ale căror funcții sunt necesare în legătură cu operațiunile de reglare. Toate funcțiile individuale sunt analizate și luate în considerare una câte una. Toate operațiile sunt defalcate în elemente de bază, de exemplu, prinderea, centrarea etc. În continuare, trebuiesc selectate operațiile care trebuie standardizate. Se face o distincție clară între acele elemente care pot fi standardizate și cele care necesită ajustări.

În cadrul procedurii de reglare a unei presei, reglarea cursei berbecului este una dintre cele mai critice și mai solicitante aspecte ale reglării. De exemplu, în timp ce ștanțarea permite o mică marjă de eroare, această situație nu va fi valabilă în cazul ambutisării sau al îndoirii. În acest caz, dacă reglarea cursei are ca rezultat o cursă insuficientă, se vor obține piese imperfecte. În cazul în care cursa este prea mare, scula va fi deteriorată sau distrusă.

Orice probleme legate de reglarea cursei pot fi rezolvate prin standardizarea înălțimii sculelor (Figura 2.1.28). Înălțimea diferitelor scule trebuie să fie aceeași în funcție de capacitatea presei în cauză. Atunci când înălțimile sculelor sunt standardizate, odată ce cursa presei a fost reglată, nu mai este necesar să se facă alte ajustări. Sunt eliminate operațiunile consumatoare de timp și solicitante, iar timpul de pregătire este redus substanțial.

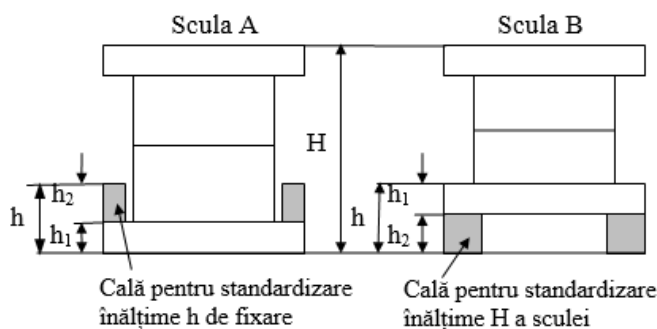


Figura 2.1.28. Înălțime standardizată a sculei și fixare a plăcii de bază

Atunci când înălțimea de fixare este standardizată, fixarea se poate face cu aceleași elemente de strângere (de exemplu, șuruburi, cleme etc.). Standardizarea înălțimii de fixare:

- reduce substanțial timpul de reglare;
- elimină necesitatea de a căuta șuruburi și blocuri adecvate;
- elimină necesitatea de a regla înălțimea șuruburilor de fixare.

O altă dificultate de reglare este alinierea găurii berbecului și a capului sculei. Această problemă poate fi rezolvată cu ușurință prin utilizarea unui dispozitiv de centrare montat pe partea din spate a presei (Figura 2.1.29). Obținerea unei distanțe K între axa alezajului din berbec și dispozitivul de centrare se face prin utilizarea unei cale de centrare de dimensiune X corespunzătoare pentru fiecare sculă. Această metodă de centrare poate duce la eliminarea capului sculei, dar în acest caz este necesar să se folosească o altă metodă de fixare a sculei pe berbecul presei.

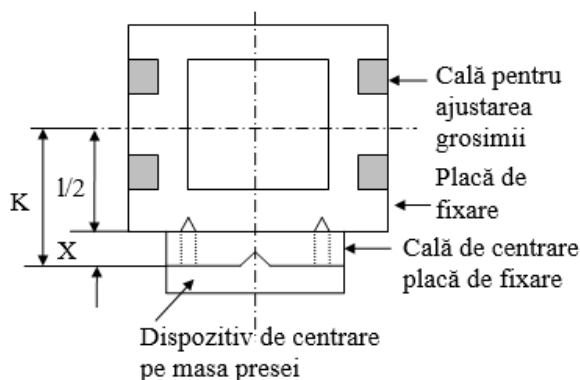


Figura 2.1.29. Centrarea sculei pe masa presei

c) Utilizarea plăcilor standardizate

O posibilitate de conversie a reglajului intern în reglaj extern este utilizarea plăcilor standardizate. Operația de montare a sculei pe cele două plăci standardizate - reglajul extern - se realizează în afara presei, în timp mascat, pe un banc de reglaj. Setul de plăci astfel obținut, care reprezintă "bloc sculă", este adus la presă, unde este centrat și fixat rapid.

Pentru a reduce timpul de reglare în conformitate cu principiile menționate în [19], trebuie standardizată înălțimea sculei, care trebuie să fie identică în funcție de capacitatea presei în cauză. În acest scop, în lucrarea [22] s-a prezentat o soluție pe care am conceput-o privind modul de montare a sculei pe două plăci cu dimensiunile standardizate l și l_0 (Figura 2.1.30). Dimensiunile ($a \times b \times h$) și ($a' \times b' \times h'$) sunt corelate cu dimensiunile mesei presei și ale berbecului, precum și cu dimensiunile elementelor de prindere care fixează acest "bloc" pe masa presei și pe berbec.

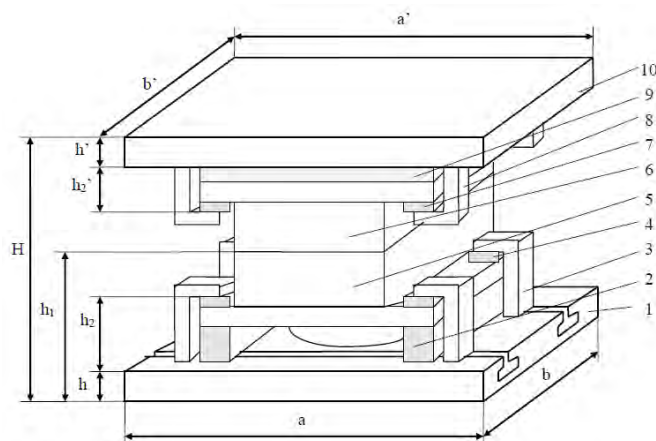


Figura 2.1.30. Vedere de ansamblu a sculei cu adaptările aferente

Operația de fixare a sculei pe cele două plăci de dimensiuni standardizate - reglajul extern - se realizează în afara preseii, în timp mascat, pe un banc de reglaj. În cazul în care sculele de presare sunt alimentate cu semifabricat bandă cu ajutorul unor dispozitive de avans, este necesar, dacă este posibil, să se stabilească o înălțime standardizată h_1 pentru antrenarea benzii. Astfel, nu mai este nevoie de reglarea înălțimii dispozitivului de avans (care se face la nivel intern). Pentru a asigura înălțimea h_1 , între partea inferioară a sculei 5 și placa 1 se introduce o cală 2. Standardizarea înălțimii H a sculei, pentru a elimina reglarea cursei berbecului preseii, poate fi rezolvată prin introducerea unei cale 9 între partea superioară a sculei și placa 10. Atât partea superioară, cât și partea inferioară a sculei sunt fixate pe cele două plăci cu ajutorul elementelor de strângere 3 și 8. Ca elemente de prindere pot fi utilizate șuruburi sau bride speciale. În al doilea caz, înălțimea de strângere h_2 și h_2' trebuie să fie standardizată. Acest lucru se poate face cu calele 4 și 7.

d) Utilizare scule modulare cu sistem de schimbare rapidă

În lucrarea [23] se prezintă modul de reducere a duratei de reglare a preseii care poate fi obținută printr-o nouă concepție de scule bazată pe principiul unei scule modulare cu sistem de schimbare rapidă "a elementelor active". Scula modulară concepută pentru o familie de piese duce astfel la evitarea utilizării mai multor scule dedicate fiecărei piese. O astfel de sculă modulară, odată montată și reglată pe presă, poate fi utilizată pentru întreaga familie de piese fără ajustări suplimentare [20],[22]. Fabricarea unui alt tip de piesă constă pur și simplu în înlocuirea elementelor componente a "sculei pachet" (de exemplu: placă de bază, activă, port poanson, presiune și de cap, respectiv a poansoanelor). Introducerea, poziționarea și fixarea "sculei pachet" se poate face în mai puțin de un minut. Reglarea și testarea elementelor active se poate face pe o presă de reglare și testare cu opțiuni de comandă manuală.

O astfel de sculă modulară este prezentată în Figura 2.1.31. Aceasta este compusă din placa de sprijin inferioară 5 și placa de sprijin superioară 8 a cărei ghidare este asigurată prin intermediul coloanelor 6 și a bușelor de ghidare 7. Elementele active ale sculei împreună cu elementele utilizate pentru poziționarea semifabricatelor sunt montate pe placa de bază 12 și pe placa de cap 11. Această operație se efectuează pe bancul de reglare. Cele două subansambluri construite pe

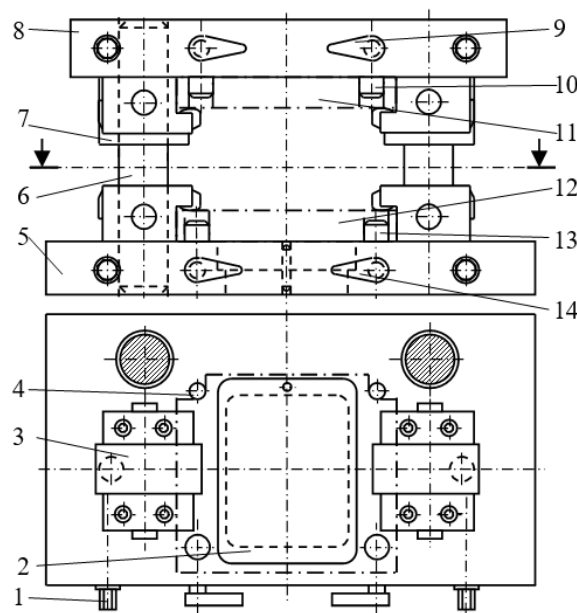


Figura 2.1.31. Sculă modulară utilizată pentru o familie de piese

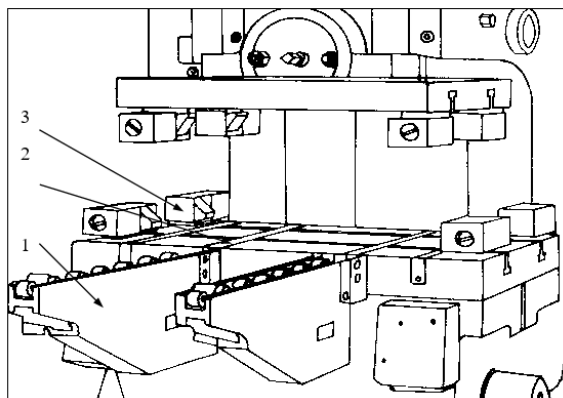
plăcile de bază și de cap sunt introduse între plăcile de sprijin inferioară și superioară, ghidarea fiind asigurată de elementele de fixare cu bride 3. Poziționarea precisă se realizează cu ajutorul bolțurilor 4 și a știfturilor de centrare retractabile 10 și 13. Prin rotirea pârghiilor 9 și 14, știfturile de centrare intră în orificiile existente în cele două plăci de sprijin și realizează astfel centrarea. Deplasarea știfturilor se face cu ajutorul a doi arbori pinion având montate la capăt pârghiile 9 și 14, care angrenează cremaliera plasată în partea inferioară a știfturilor. Fixarea rapidă a plăcilor de schimb (de bază și de cap) se realizează prin utilizarea unor dispozitive mecanice cu pârghii 3, prin rotirea manuală a arborelui cu came 1. În cazul în care evacuarea pieselor și a deșeurilor se face prin cădere prin orificiul din masa presei, în placa de susținere inferioară 5 se va realiza un orificiu de evacuare.

În ETAPA 3, după parcurgerea etapelor 1 și 2, s-a trecut la îmbunătățirea generală a fiecărei operații elementare de reglare. Aceste etape pot fi tratate simultan.

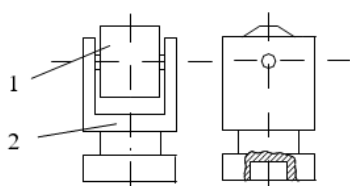
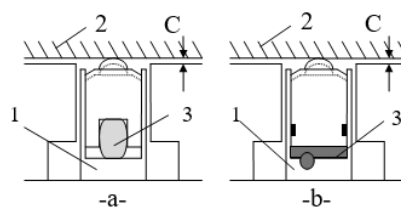
a) Îmbunătățirea operațiunilor externe

În acest caz, depozitarea și transportul pieselor, sculelor, semifabricatelor și accesoriilor pot fi îmbunătățite. În ceea ce privește depozitarea sculelor, se pot utiliza magazii automate în care sculele sunt depozitate pe rafturi. Un echipament automat preia sculele și le trimite pe bandă rulantă sau pe o masă elevatoare mobilă la presele corespunzătoare. Se recomandă utilizarea unei mese elevatoare mobile atunci când linia automată conține prese cu înălțimi diferite ale mesei. Pentru a reduce timpul de schimbare a sculei, se recomandă utilizarea unei mese elevatoare cu două poziții.

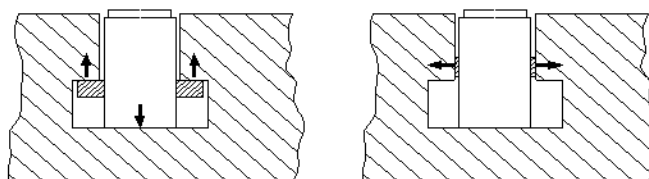
Transferul "blocului sculă" pe masa presei se poate face cu ajutorul unei mese elevatoare. Pentru a face transferul "blocului sculă" rapid și în siguranță, se recomandă utilizarea unei perechi de console 1 (Figura 2.1.32) poziționate și menținute în fața mesei presei cu ajutorul unui set de cleme înșurubate. Mișcarea sculei se face manual sau este asistată de un dispozitiv auxiliar motorizat. Pentru a deplasa rapid sculele (prin reducerea frecării), se utilizează transportoare cu role sau bile 2, care sunt introduse în canalele T ale mesei presei. Transportoarele cu role sau bile sunt alcătuite din module de rulare (Figura 2.1.33).



1-consolă; 2-transportoare cu roți sau bile; 3-elemente de fixare

Figura 2.1.32. Elemente de introducere și fixare rapidă a sculei pe masa presei**Figura. 2.1.33.** Modul de rulare**Figura. 2.1.34.** Vedere frontală transportor cu bile

Fiecare modul de rulare conține o roță sau bilă 1 și un suport 2. Mai multe module de rulare sunt introduse într-un segment 1 (Figura 2.1.33) cu o secțiune transversală dreptunghiulară. Distanța $C=1\text{ mm}$ între scula 2 și masa presei este asigurată de modulele de rulare, care ridică scula cu ajutorul unui arc din elastomer 3 (Figura 2.1.34a) sau cu ajutorul presiunii hidraulice din camera 3 (Figura 2.1.34b). Când scula este fixată, arcul este comprimat sau când presiunea hidraulică este eliberată, scula se sprijină pe masă. Fixarea rapidă a segmentelor în canalele T se poate face cu elemente de prindere verticale sau laterale (Figura 2.1.35). Alternativ, se poate realiza o fixare permanentă cu șuruburi și găuri filetate realizate în partea de jos a canalului din masa presei.

**Figura. 2.1.35.** Fixarea verticală sau laterală a segmentului transportor în canalul T al mesei presei

b) Îmbunătățiri ale reglajelor interne

1. Implementarea operațiilor paralele.

O modalitate de a reduce timpul de reglare internă este ca mai mulți operatori să efectueze această operație în paralel. Această situație se întâlnește în cazul preselor mari, când este invariabil necesar să se lucreze atât în partea din față, cât și în partea din spate a presei. Atunci când un singur operator efectuează aceste operații, se pierde timp cu deplasarea în jurul presei. Cea mai mare problemă în timpul operațiilor efectuate în paralel este siguranța operatorilor. Ori de câte ori un operator a finalizat o operațiune de bază, acesta trebuie să o semnalizeze celui alt operator sau celorlalți operatori.

2. Utilizarea bridelor funcționale

La fixarea sculelor pe masa preseii este foarte importantă analizarea funcțiilor de bază și găsirea celei mai ieftine și mai convenabile metode de fixare. În bibliografia de specialitate [24-26] s-a precizat că soluțiile actuale de fixare utilizează bride montate pe masă și pe berbecul preseii (Figura 2.1.32), care pot fi acționate manual sau automat cu ajutorul unor elemente elastice, al presiunii hidraulice sau pneumatice,

În cazul bridelor cu acționare manuală, principiul mecanic al bridelor este cel al unei pârgii acționate de o camă cu autofrânare. Fixarea se face cu o cheie. Forța de strângere este, în general, mai mare decât cea a sistemului convențional de strângere cu șuruburi și piulițe.

Strângerea cu ajutorul elementelor elastice (Figura 2.1.36) și deblocarea hidraulică reprezintă o soluție tehnică destul de simplă, dar performanțele sunt în general insuficiente: compromisul *forță+cursă+dimensiune* nu este niciodată satisfăcător, iar coincidența frecvențelor de vibrație ale preseii cu frecvența naturală a unuia dintre sisteme poate provoca deplasarea sculei.

Dispozitivele de prindere acționate hidraulic sunt utilizate în principal pentru fixarea rapidă (instantanee) a sculelor de presare. Fie că este vorba de acțiune simplă (presiune ridicată) sau dublă acțiune (presiune medie), toate soluțiile hidraulice necesită o conexiune hidraulică permanentă între unitatea hidraulică și bride. Pentru a obține un nivel suficient de siguranță, este necesar să se creeze circuite hidraulice independente pe fiecare presă și să se controleze permanent presiunea pe fiecare dintre circuite. Acest tip de instalare necesită o unitate hidraulică cu distribuție complexă. Sub presiune, furtunurile devin dure, extrem de rigide și supuse la oboseală, mai ales atunci când trebuie să sufere variații de curbura (de exemplu, conexiunea dintre bridă și berbecul mobil), ceea ce poate duce la ruperea furtunurilor hidraulice.

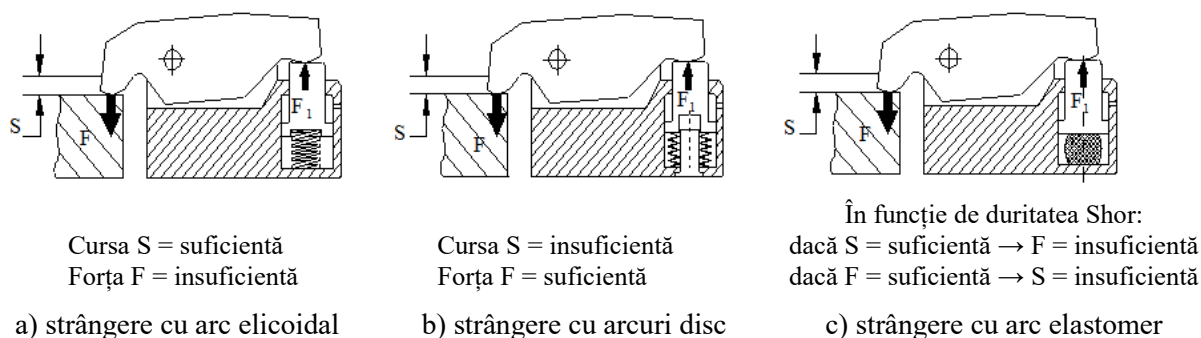


Figura 2.1.36. Metode de fixare mecanică cu elemente elastice

În Figura 2.1.37 este prezentată o nouă soluție tehnică [24] care elimină dezavantajele descrise mai sus. Deoarece fiecare bridă are propria sa energie de strângere, eficiența sistemului de fixare este direct și exclusiv legată de performanța fiecărei bride, iar fiabilitatea instalației nu mai depinde de elemente externe complexe, cum ar fi grupurile hidraulice. Brida se află întotdeauna în poziția închisă. Deschiderea bridelor (pentru fixarea și defixarea sculelor) se face cu ajutorul unui generator de presiune hidraulică (pompă pneumo-hidraulică). Deoarece este necesar să se deschidă bridele doar atunci când presa este oprită, generatorul de presiune hidraulică poate fi utilizat pentru toate presele din atelier. Comanda se dă de către operator printr-o singură apăsare a pedalei pompei. Durata de viață a unei astfel de bride este excepțională (câteva milioane de cicluri). În cazul unei deschideri accidentale, reumplerea cu azot este simplă. Având în vedere avantajele

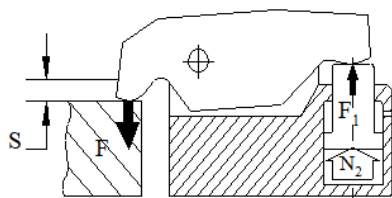


Figura 2.1.37. Bridă cu azot comprimat

menționate mai sus, se recomandă utilizarea acestui tip de flanșă pe prese individuale, precum și pe linii automate flexibile, deoarece nu necesită o instalație hidraulică complexă și costisitoare.

3. Eliminarea ajustărilor

Eliminarea ajustărilor (modificarea valorii de reglare) înseamnă doar eliminare și nu o reducere a timpului alocat acestora. Cea mai mare dificultate a operațiunii de reglare constă în reglarea corectă a echipamentului. Atunci când reglajele sunt făcute intuitiv, nu există nicio modalitate de a evita piesele de probă. Numărul de piese de probă depinde, de obicei, de îndemânarea reglorului. Trebuie remarcat faptul că ajustările nu reprezintă o operațiune independentă. Pentru a le elimina, trebuie să ne întoarcem și să îmbunătățim primele etape ale reglării interne, astfel încât ajustarea să nu depindă, pe cât posibil, de îndemânarea reglorului. Este foarte important să se facă o ajustare corectă de la început, caz în care nu este nevoie de piese de probă. O modalitate de a scăpa de ajustări este de a face măsurători folosind, de exemplu, instrumente de măsurare sau chiar calibre atunci când trebuie făcute ajustări la valori fixe.

4. Mecanizarea și automatizarea

Mecanizarea și/sau automatizarea ar trebui luate în considerare după ce s-a încercat totul pentru a îmbunătăți reglajul, folosind metodele descrise mai sus. Ar trebui să evităm greșeala de a ne grăbi cu mecanizarea încă de la început. Există un motiv simplu pentru acest lucru. Mecanizarea unei operațiuni de reglare ineficiente va aduce economii de timp, dar nu va face mare lucru pentru a remedia defectele de bază ale unui proces de reglare prost conceput. Este mult mai eficientă mecanizarea unor reglaje care au fost raționalizate anterior.

Mecanizarea și automatizarea poate fi aplicată pentru manipularea sculelor (de obicei scule mari) folosind, de exemplu, mese elevatoare mobile, conveioare cu role, transportoare mecanice cu role sau cu bile, respectiv transportoare hidraulice montate în canalele T ale mesei presei, pentru blocarea și deblocarea rapidă a sculelor folosind elemente de prindere mecanice, hidraulice sau pneumatice [24,25]. De asemenea, este posibil să se încerce reglarea automată a cursei presei. Cu toate acestea, ar trebui să se acorde întotdeauna prioritate eliminării acestor ajustări și standardizării înălțimii sculelor.

În concluzie se poate spune că aplicarea principiilor S.M.E.D. la liniile automate flexibile pentru deformare plastică la rece oferă calea către o producție diversificată, în loturi mici, la niveluri minime de stoc, permițând o reducere a timpilor de schimbare a sculelor și trecerea rapidă de la un produs la altul. În acest caz, timpul de producție poate fi redus chiar dacă numărul de reglaje crește, deoarece timpul necesar pentru un reglaj este redus considerabil. Alegerea unor sisteme de schimbare rapidă a sculelor depinde de gradul de automatizare dorit.

2.1.2 Procesul de autofretare a tuburilor cu pereți groși

În lucrarea [27] se prezintă rezultatele unei cercetări experimentale privind parametrii de autofretare a tuburilor cu pereți groși. Această lucrare reprezintă o parte din cercetările efectuate în cadrul contractului de cercetare nr. 452/1999, coordonat de prof.univ.dr.ing. Tudor ICLĂNZAN și finanțat de Uzina Mecanică Reșița, având ca temă un studiu privind autofretarea țevelor de artilerie [28]. Deoarece cercetările au fost efectuate în domeniul militar, doar o parte din rezultate au fost publicate, iar pentru un oțel din care au fost confecționate tuburile s-a folosit denumirea ”oțel special”, denumirea reală a acestuia fiind confidențială.

În prima parte au fost prezentate aspectele teoretice privind solicitările la presiune internă ridicată la care sunt supuse tuburile cu pereți groși existente în diferite instalații industriale. Creșterea rezistenței acestor piese se poate face prin:

- creșterea dimensiunilor;
- fretare;
- autofretare.

Există o mare diferență între tuburile fretate și cele autofretate [29]. În primul caz, tensiunile inițiale existente în diferitele straturi ale materialului sunt obținute prin strângerea a două tuburi împreună, iar în al doilea caz printr-o tehnologie specială de deformare aplicată unui singur tub. Procesul tehnologic de autofretare a unui tub cu pereți groși constă în aplicarea unei presiuni ridicate în interiorul tubului. Această presiune va determina apariția unor tensiuni echivalente în interiorul țevii care depășesc limita de curgere convențională (σ_c) pe întreaga grosime a peretelui (tub complet autofretat) sau până la un diametru intermediar (D_c), situat între diametrul interior și

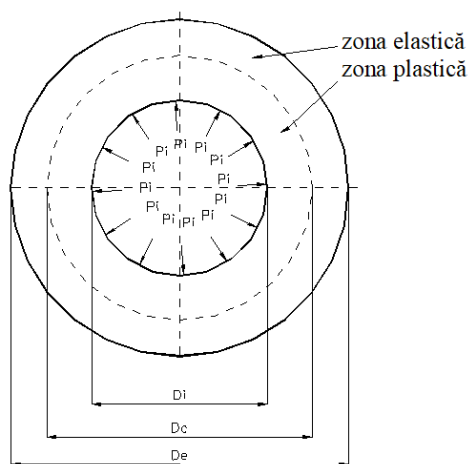


Figura 2.1.38. Tub parțial fretat

cel exterior (tub parțial autofretat). Atunci când presiunea de autofretare dispare, în interiorul tubului rămân deformări variabile pe grosimea peretelui: maxim în interior și minim în exterior [30,31]. În timpul procesului de autofretare, când forța unitară echivalentă atinge valoarea limitei de curgere convenționale (σ_c), în interiorul tubului parțial autofretat se disting două zone (Figura 2.1.38), delimitate de stratul de pe diametrul intermediar (D_c):

- o zonă elasto-plastică situată între diametrul interior (D_i) și diametrul intermediar (D_c);
- o zonă elastică situată între diametrul intermediar (D_c) și diametrul exterior (D_e).

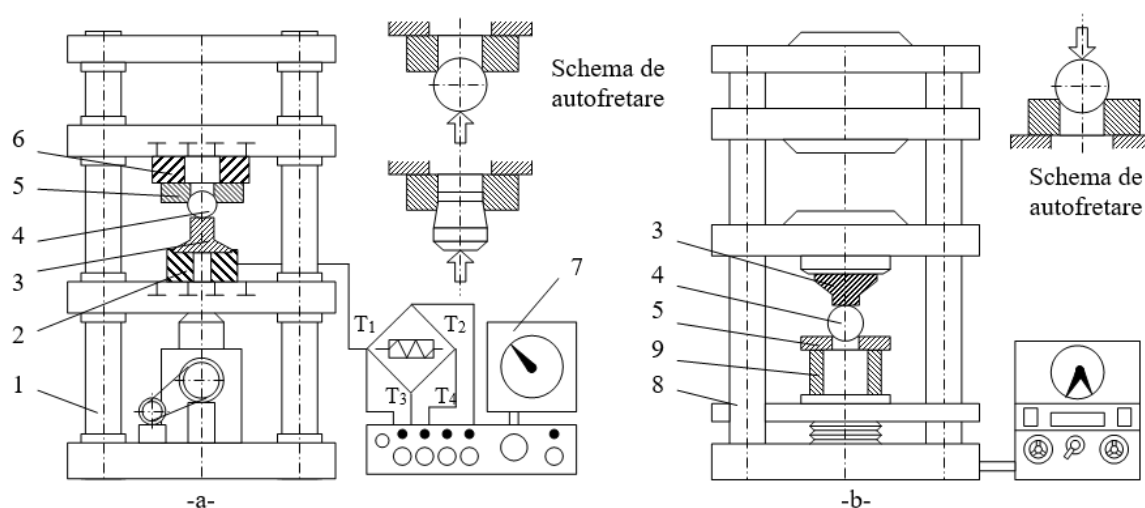
Atunci când presiunea de autofretare dispare, zona elasto-plastică nu revine la forma inițială din cauza deformărilor remanente. Zona elastică tinde să revină la forma sa inițială, dar fiind împiedicată de zona plastică, aceasta produce tensiuni de compresiune în această zonă.

Avantajul autofretării constă în faptul că se obține un tub cu rezistență mai mare la aceeași grosime a peretelui. În timpul funcționării țevii autofretate, tensiunile din interior depășesc tensiunile de compresiune din peretele tubului. Acestea pot atinge valoarea presiunii de autofretare fără modificări dimensionale în interiorul tubului.

Pentru a determina principalii parametri care influențează procesul de autofretare, au fost utilizate ca piese de încercare plăci inelare cu grosimea $g=30$ mm. Grosimea plăcilor a fost determinată în funcție de cursa preselor și a dispozitivelor de presare [28]. Au fost efectuate două montaje experimentale:

- un montaj experimental pe presa hidraulică PACH 200, acționată de un cilindru hidraulic care permite sarcini de până la 2000 kN și înregistrarea adâncimii de penetrare a sculei și a deformărilor radiale externe ale epruvetelor (Figura 2.1.39a,c).
- un montaj experimental pe presa hidraulică RM, care are posibilitatea de a programa forța de presare până la 1000 kN și care permite înregistrarea adâncimii de penetrare a sculei și a deformărilor radiale externe ale epruvetelor (Figura 2.1.39b,d).

Planul experimental conceput este prezentat în Tabelul 2.1.1, iar notațiile și schema de autofretare sunt prezentate în Figura 2.1.40. Pentru fiecare material, există trei valori pentru supraînălțarea teoretică S_t . Experimentele au fost efectuate folosind ca sculă de deformare o bilă de rulment sau un dorn special cu o suprafață de centrare. Probele au fost fosfatate în prealabil și s-a asigurat lubrifierea între suprafețele de contact folosind un amestec de vaselină cu vaselină siliconată. Unele probe au fost încălzite într-un cuptor la o temperatură de 70°C și apoi transportate la prese. Se poate aprecia că autofretarea a fost efectuată la o temperatură de 60°C. Toate testele de autofretare au fost efectuate pe presa PACH 200. Pentru probe (piesele de testare) au fost utilizate două tipuri diferite de materiale.



1 - presa PACH 200; 2 – traductor de forță; 3 - element de sprijin; 4 - bilă (sau dorn); 5 - epruvetă; 6 - placă de sprijin; 7 – aparat de măsurat forță; 8 - presă RM; 9 - piesă de sprijin



c)

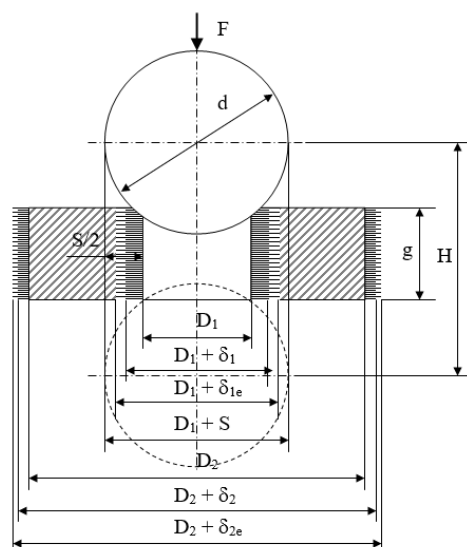


d)

Figura 2.1.39. Instalația experimentală

Tabel 2.1.1 Plan experimental

Încercare nr.	Material	D ₂ [mm]	D ₁ [mm]	S _t [mm]	d [mm]	T [°C]
1.1 - 1.3	Oțel special* (*confidențial)	200	84,5	0,5	φ84,98 / bilă	20
1.4; 1.5						60
1.6 - 1.8					φ84,92 / dorn	20
1.9; 1.10						60
2.1 - 2.3			84	1	φ84,98 / bilă	20
2.4; 2.5						60
2.6 - 2.8					φ84,92 / dorn	20
2.9; 2.10						60
3.1 - 3.8	33MoCr11	290	83	2	φ84,98 / bilă	20
4.1 - 4.5		150	84,75	0,25	φ84,98 / bilă	20
5.1 - 5.5		150	84,5	0,5	φ84,98 / bilă	20
6.1 - 6.5		150	84	1	φ84,98 / bilă	20



F - forța axială de autofretare;
 d - diametrul bilei și a dornului;
 D_1 - diametrul interior inițial al tubului;
 D_2 - diametrul exterior inițial al tubului;
 S - supraînălțare;
 δ_1 - deformația remanentă a interiorului tubului;
 δ_2 - deformație remanentă a exteriorului tubului;
 δ_{1e} - deformare circumferențială elastică a interiorului tubului;
 δ_{2e} - deformare circumferențială elastică a exteriorului tubului;
 g - grosimea tubului;
 H - adâncimea de penetrare.

Figura 2.1.40. Schema de autofretare cu bilă

Rezultatele experimentale sunt prezentate în mod centralizat în Tabelul 2.1.2. Timpul mediu pentru un experiment a fost de aproximativ 1,5...3,5 minute la presa RM. Viteza de lucru a avut o evoluție progresivă de la zero la valori maxime, care a atins uneori valoarea de 0,7 m/min. Timpul mediu pentru un test pe presa PACH 200 a fost de aproximativ 25 de minute, ceea ce corespunde unei viteze de penetrare de aproximativ 1 mm/min.

Rezultatele prezentate în Tabelul 2.1.2 și Tabelul 2.1.3 evidențiază parametrii semnificativi ai procesului de autofretare:

- forța de apăsare axială;
- deformația radială remanentă.

Tabel 2.1.2 Rezultate experimentale centralizate

Materialul utilizat pentru tuburi (probe)							
Oțel special*		Sculă utilizată					
33MoCr11							
Bilă d = 84,98 mm	Bilă d = 84,98 mm	T [°C]	20	60	20	60	20
		S _t [mm]	0,5		1		2
		S [mm]	0,47	0,48	0,972	0,98	1,964
		K = D ₂ /D ₁	2,36		2,37		3,49
		F _{max} [kN]	174	131	392	316	876
		δ _{2e} [mm]	0.13	0,07	0,326	0,380	0,996
		(δ _{2e} /D ₂)10 ⁻⁴	6,5	3,5	16,3	19	34,3
		δ ₁ [mm]	0,090	0,096	0,432	0,484	1,246
	Dorn d = 84,92mm	T [°C]	20	60	20	60	
		S _t [mm]	0,5		1		
		S [mm]	0,410	0,414	0,91	0,90	
		K = D ₂ /D ₁	2,36		2,37		
		F _{max} [kN]	355	155	614	458	
		δ _{2e} [mm]	0,186	0,086	0,456	0,270	
		(δ _{2e} /D)10 ⁻⁴	9,3	4,3	22,8	13,5	
		δ ₁ [mm]	0,036	0,044	0,266	0,264	
Bilă d = 84,98 mm	T [°C]	20					
	S _t [mm]	0,25	0,5	1			
	S [mm]	0,194	0,442	0,932			
	K = D ₂ /D ₁	1,76	1,77	1,78			
	F _{max} [kN]	60	140	275			
	δ _{2e} [mm]	0,09	0,20	0,36			
	(δ _{2e} /D)10 ⁻⁴	6	13,3	24			
	δ ₁ [mm]	0,018	0,09	0,47			

Tabel 2.1.3 Rezultate centralizate

Material tub / Sculă		$K=D_2/D_1$	S [mm]	δ_1 [mm]	$\frac{\delta_1}{K} \cdot 100$ [%]	$\frac{S}{K} \cdot 100$ [%]	$\frac{\delta_1}{S} \cdot 100$ [%]	T [°C]
Oțel special*	Bilă	2,36	0,47	0,090	3,81	19,91	19,14	20
		2,36	0,48	0,096	4,06	20,33	20	60
		2,3	0,972	0,432	18,22	41,01	44,44	20
		2,37	0,98	0,484	20,42	41,35	49,38	60
		3,49	1,964	1,964	35,70	56,27	63,44	20
	Dorn	2,36	0,410	0,036	1,52	17,37	8,78	20
			0,414	0,044	1,86	17,54	10,62	60
		2,37	0,91	0,266	11,22	38,39	29,30	20
			0,90	0,264	11,13	37,97	29,33	60
33MoCr11	Bilă	1,76	0,194	0,018	1,02	11,02	9,27	20
		1,77	0,442	0,090	5,08	24,97	20,36	20
		1,78	0,932	0,470	26,40	52,35	50,43	20

Referitor la **forța axială de autofretare**, se observă:

- o creștere progresivă a forței până când se atinge valoarea maximă în momentul în care diametrul (d) al bilei sau al dornului este atins în interiorul epruvetei. Forța rămâne constantă la această valoare până când bila sau dornul începe să iasă din tub, moment în care forța scade semnificativ (Figura 2.1.41).

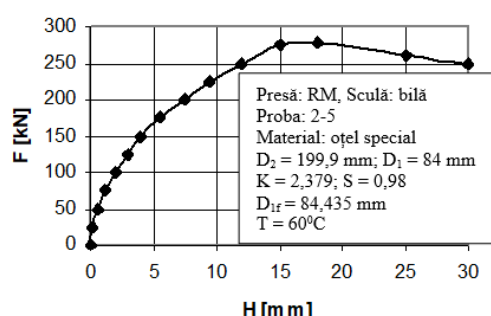


Figura 2.1.41. Variația forței axiale de autofretare cu grosimea tubului

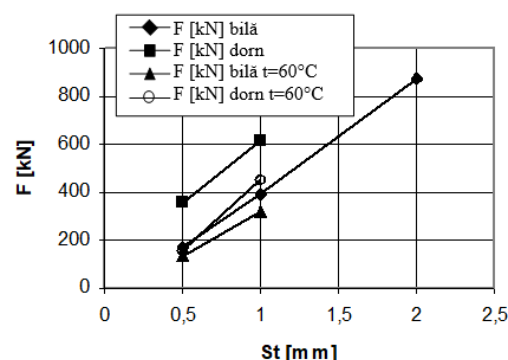


Figura 2.1.42. Variația forței axiale de autofretare cu supraîncălzirea

- pentru aceleași supraîncălziri reale de deformare (S), aceeași temperatură a tubului și aceeași grosime relativă a peretelui (K), utilizarea dornului în procesul de autofretare conduce la o creștere a forței axiale de presare cu 100% pentru o supraîncălzire $St=0,5$ mm și cu 58% pentru o supraîncălzire $St=1$ mm, în comparație cu forța axială de presare în cazul utilizării bilei (Figura 2.1.42).
- autofretarea tuburilor încălzite (60°C la începutul procesului) duce la o scădere a forței de presare axială (Figura 2.1.42):
 - o aproximativ 25% pentru $St = 0,5$ mm și 20,5% pentru $St = 1$ mm (autofretare cu bilă);
 - o aproximativ 56,3% pentru $St = 0,5$ mm și 25,4% pentru $St = 1$ mm (autofretare cu dorn).

Se poate observa că ipoteza unor condiții de lubrifiere mai bune pentru piesele încălzite conduce la o scădere a forței axiale de autofretare. Pentru tuburile încălzite, forța axială de autofretare cu dorn poate fi chiar mai mică decât forța axială de autofretare cu bilă atunci când piesa se află la temperatura $T=20^\circ$.

Autofretarea pieselor din oțel 33MoCr11 (autofretare cu bilă) conduce la forțe de presare mai mici decât autofretarea pieselor din oțel special*, pentru aceleași supraîncălziri. Trebuie remarcat faptul că grosimea relativă a acestor tuburi (probe) a fost mai mică decât grosimea relativă a pieselor din oțel special.

În ceea ce privește **deformația radială remanentă**, aceasta este un parametru care exprimă gradul de autofretare atins. Dacă analizăm Tabelul 2.1.3, putem observa că:

- pe fiecare tub (probă), s-a produs o deformare radială remanentă a diametrului interior între 8,78% și 63,44% din supraînălțare (S) și între 3,81% și 35,70% din grosimea relativă K (Figurile 2.1.43-2.1.45).
- nu s-a constatat nicio deformare remanentă pe bilă și pe dorn. Ambele scule de deformare pot fi refolosite;

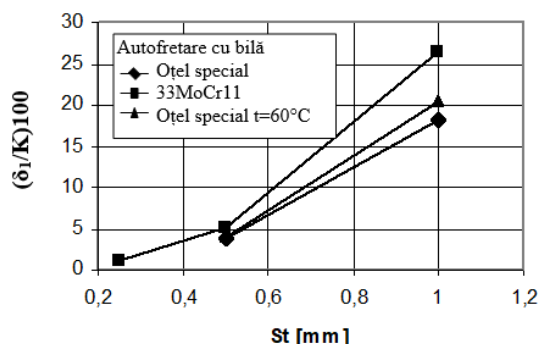


Figura 2.1.43. Deformația remanentă raportată la K

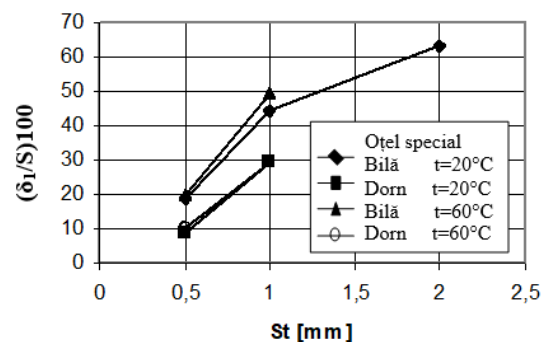


Figura 2.1.44. Deformația remanentă raportată la St

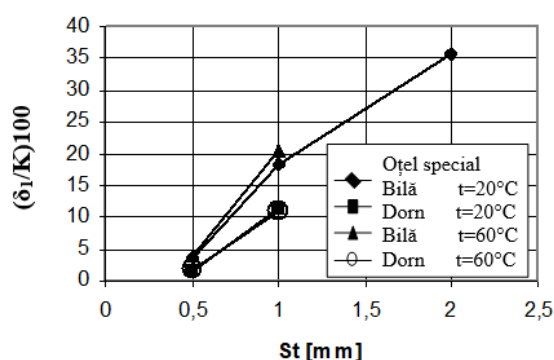


Figura 2.1.45. Deformația remanentă raportată la K

Variația deformațiilor remanente indică următoarele:

- pentru aceeași grosime relativă K, acestea cresc proporțional cu creșterea supraînălțării (Figura 2.1.43);
- pentru aceeași parametri inițiali de autofretare, deformațiile remanente sunt mai mari în cazul autofretării cu bilă decât în cazul autofretării cu dorn (Figura 2.1.44 și Figura 2.1.45);
- sunt mai mari, procentual față de K, pentru piesele din oțel 33MoCr11, deoarece σ_c este mai mic (Figura 2.1.43);
- pentru piesele încălzite, în cazul autofretării cu bilă există o creștere nesemnificativă a deformațiilor remanente (maxim 0,05 mm pentru St = 1 mm), iar în cazul autofretării cu dorn, deformațiile remanente sunt aproximativ aceleași (Figura 2.1.45).

În ceea ce privește forța axială de presare, se poate observa că, la aceleași valori pentru St, T și K, aceasta este mai mare în cazul autofretării cu dorn decât în cazul autofretării cu bilă, dar scade odată cu creșterea temperaturii. Autofretarea pieselor din oțel 33MoCr11 conduce la forțe mai mici decât autofretarea pieselor din oțel special*.

Pentru același K, deformațiile remanente cresc ca procent din creșterea supraînălțării. Pentru aceeași parametri inițiali, acestea sunt mai mari în cazul autofretării cu bilă și cresc procentual din K în cazul pieselor din oțel 33MoCr11. În cazul pieselor încălzite, deformațiile remanente cresc nesemnificativ dacă se utilizează o bilă și rămân aproape aceleași în cazul autofretării cu dorn.

2.2 Proiectarea și verificarea performanțelor mașinilor de măsurat în coordonate

În anul 2000 am început colaborarea cu compania Industrielle CNC-und Messtechnik (ICNCMT), Germania, în cadrul convenției nr.12048/10.10.2000 (dir. Prof.univ.dr.ing. Tudor Iclănzan și Aurel Tulcan). În ce mă privește, această colaborare mi-a permis să mă dezvolt ca cercetător într-un nou domeniu de cercetare, și anume cel al *măsurărilor tridimensionale* și al *mașinilor de măsurat în coordonate*. În cadrul celor peste 25 de stagii petrecute la compania ICNCMT Germania, în perioada 2001-2013, am proiectat sisteme de antrenare pentru deplasarea ansamblurilor mobile (masă, portal, sanie, pinolă) pentru modernizarea ("retrofit") a mai multor mașini de măsurat existente pe piață (cu acționare manuală sau CNC) produse de diverse companii cunoscute în domeniu, respectiv am proiectat integral trei arhitecturi de mașini de măsurat. Toate aceste mașini, modernizate sau modele noi, se regăsesc la diverse companii din Europa și din Japonia. Dat fiind caracterul "confidențial" a unor soluții tehnice, doar o parte din rezultatele acestor cercetări de proiectare-dezvoltare au fost publicate.

2.2.1 Cercetări privind proiectarea mașinilor de măsurat în coordonate

2.2.1.1 Cercetări privind rolul mașinilor de măsurat în coordonate în asigurarea calității

Prima lucrare publicată în acest domeniu, nou pentru mine, a fost legată de rolul mașinilor de măsurat în coordonate în asigurarea calității [32]. În prima parte a lucrării am efectuat un studiu referitor la măsurarea tridimensională, factorii care influențează precizia măsurătorilor și principalele sisteme de măsurare tridimensională.

În industria zilelor noastre ciclurile inovante ale produselor devin din ce în ce mai scurte, produsele urmând a fi modificate sau înlocuite la intervale mici de timp. Producătorii industriali trebuie să realizeze piese din ce în ce mai complexe cu toleranțe foarte precise.

Măsurarea tridimensională reprezintă astăzi o tehnică aproape indispensabilă pentru asigurarea calității pieselor și deci a competitivității firmelor pe piață. Practic este imposibil de imaginat prezența unor produse pe piață care să nu aibă o *certificare de conformitate* ce poate fi obținută în prezent doar prin măsurarea pe echipamente de măsurat tridimensional a diferitelor piese. Măsurarea în trei dimensiuni a tuturor lungimilor și a valorilor care pot fi derivate din lungimi reprezintă caracteristica principală a tehnologiei de măsurare în coordonate.

Implementarea tehnologiei de măsurare tridimensională se datorează următoarelor cerințe:

- măsurarea conform cerințelor din domeniile de fabricație;
- obținerea unor precizii de măsurare și a unei reproductibilități ridicate;
- asigurarea rapidă a rezultatelor;
- măsurarea dimensiunii, a formei și a poziției pe o singură mașină;
- includerea datelor CAD;
- obținerea unei precizii de măsurare indiferent de condițiile mediului ambiant;
- reprezentarea grafică a rezultatelor.

Evoluția pieselor, de la piese cilindrice la piese prismatice de forme oarecare, antrenează o evoluție a echipamentelor legate în special de informatică și electronică. Noile sisteme (Figura 2.2.1) trebuie să corespundă astăzi din ce în ce mai mult cerințelor referitoare la o producție "agilă", care permite schimbarea rapidă a produsului.

Datorită preciziei lor ridicate de măsurare, sistemele tactile sunt cele mai utilizate sisteme de măsurare. Pentru a obține punctele de măsurare, acestea presupun un contact între elementul de palpăre (ex. de formă sferică, din rubin) și suprafața unei piese. Sistemele optice sunt utilizate în general pentru măsurarea sculelor, a marginilor pieselor din tablă și a pieselor mici sau moi. Noile sisteme au apărut ca o necesitate de a obține multe puncte de măsurare într-un timp scurt, ceea ce

a dus la apariția și dezvoltarea sistemelor de scanare. Aceste sisteme pot rezolva cu ușurință problemele apărute la măsurarea suprafețelor interioare ale pieselor.

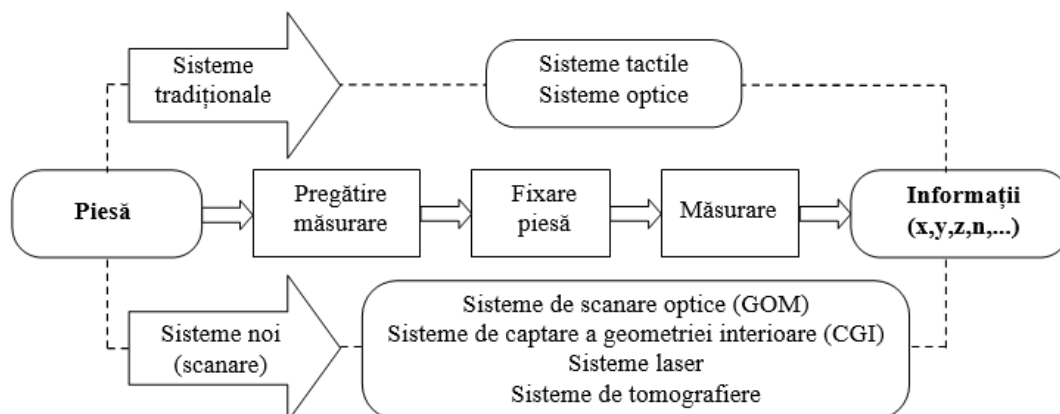


Figura 2.2.1. Sisteme de măsurare-digitizare-scanare

Timpul de măsurare, precizia sistemului, prelucrarea datelor și costurile sunt principalele atribute în descrierea unui sistem de măsurare. O atenție deosebită este acordată capacității de măsurare a acestor sisteme. Atunci când dorim să găsim sistemul potrivit, adecvat cerințelor noastre de calitate, trebuie să luăm în considerare mulți factori care influențează rezultatele măsurătorilor. În acest scop, am întocmit diagrama tridimensională de măsurare cauză-efect, prezentată în Figura 2.2.2.

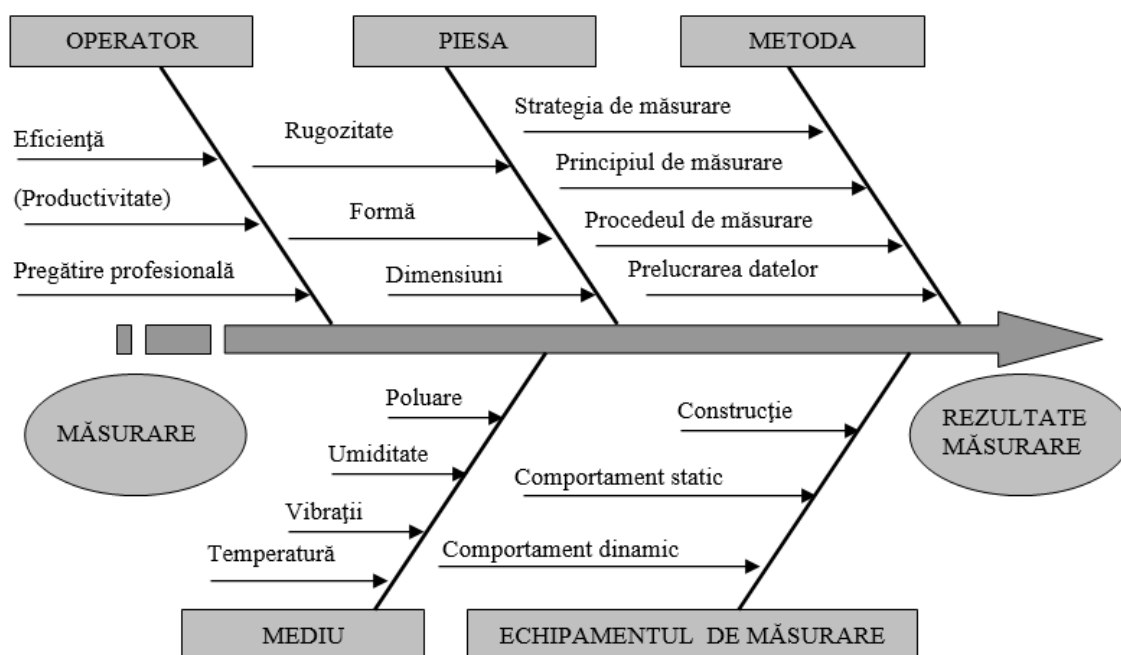


Figura 2.2.2. Diagrama cauză-efect la măsurarea tridimensională

În partea a doua a lucrării sunt prezentate tipurile comune de mașini de măsurat în coordonate și modul de alegere a uneia în funcție de spectrul de piese care urmează să fie măsurate, de dimensiunile și toleranțele acestora și de sarcinile de măsurare date.

Controlul proceselor și asigurarea calității în operațiunile moderne de producție depind din ce în ce mai mult de performanța mașinilor de măsurat în coordonate (CMM). CMM-urile înlocuiesc metodele tradiționale de inspecție cu calibre și dispozitive de fixare și reduc timpul și

forța de muncă necesare în operațiunile de control al calității. În anumite cazuri, instrumentele de măsurare specifice, cum ar fi calibrele sau alte dispozitive, pot fi capabile să măsoare mai rapid decât sistemele în coordonate, dar, cel mai adesea, calitatea rezultatelor obținute lasă mult de dorit. Cu o CMM ne putem adapta la orice schimbare. Trebuie doar modificat programul de măsurare.

CMM-urile pot fi utilizate pentru diverse sarcini și piese de măsurare, cu o incertitudine de măsurare redusă în comparație cu alte mijloace. CMM-urile se recomandă pentru măsurarea pieselor mici de precizie, a pieselor mari (caroserii de mașini), pentru calibrarea pieselor etalon și a calibrelor de măsurare. CMM-urile nu oferă doar capacitatea de a inspecta dimensiuni geometrice standard, ci și piese cu caracteristici speciale, cum ar fi arbori cu came, angrenaje, șuruburi melcate, filete, șuruburi compresor, palete de turbine și multe altele.

Atunci când trebuie să alegem o CMM, există multă incertitudine în alegerea sistemului potrivit pentru propria aplicație, deoarece ne confruntăm cu întrebări dificile [33-35]. CMM-urile sunt sisteme foarte complexe, de înaltă tehnologie și cu posibilități aproape infinite. Selectarea echipamentului potrivit poate fi o decizie critică. Cu toate acestea, cu o metodă structurată, sarcina devine relativ ușoară. Se sugerează să ne concentrăm asupra criteriilor substanțiale. Referința principală este spectrul de piese care urmează să fie măsurate, dimensiunile și toleranțele acestora, precum și sarcinile de măsurare date. Selectarea CMM-ului poate începe cu următoarele criterii:

- arhitectură;
- domeniu de măsurare;
- incertitudinea de măsurare;
- senzori;
- sistem de comandă (controller);
- soft de măsurare.

Din punct de vedere al *arhitecturii mașinii*, mașinile de măsurat în coordonate pot fi împărțite în două grupe:

- mașini de măsurat în coordonate carteziane;
- mașini tip brațe articulate.

Majoritatea mașinilor de măsurat funcționează în coordonate carteziane. Mașinile de măsurat au trei ansambluri mobile care se deplasează după direcții (X,Y,Z) perpendiculare una față de cealaltă. În mod normal în pinolă (ansamblul mobil cu secțiunea transversală cea mai redusă) se montează sistemul de palpate. Fiecare axă conține un sistem de măsurare a deplasărilor (traductor de deplasare) cu precizie și rezoluție ridicată pentru a determina poziția axei. Cele mai utilizate arhitecturi de mașini sunt cele de tip portal și cu braț orizontal. În afară de acestea, există unele mașini tip braț articulat (Figura 2.2.3). Mașinile cu portal fix și masă mobilă sunt utilizate mai ales pentru piesele uzinate, de precizie ridicată. Pentru piesele din tablă, plastic, adesea se preferă modelul cu braț orizontal. Pe lângă aceste modele de bază, se folosesc și modele speciale.

În ceea ce privește *domeniul de măsurare (X x Y x Z)* al mașinii, lungimile axelor necesare se determină pornind de la cea mai mare piesă care urmează să fie măsurată. În cazul în care configurația piesei și programul de măsurare presupune utilizarea unui sistem de palpate prin contact (cu palpator), respectiv dispozitiv de instalare piesă, domeniul de măsurare minim necesar real ar putea fi considerabil mai mare decât dimensiunile piesei. Diferitele arhitecturi au, de asemenea, nevoi diferite în ceea ce privește spațiul și accesibilitatea.

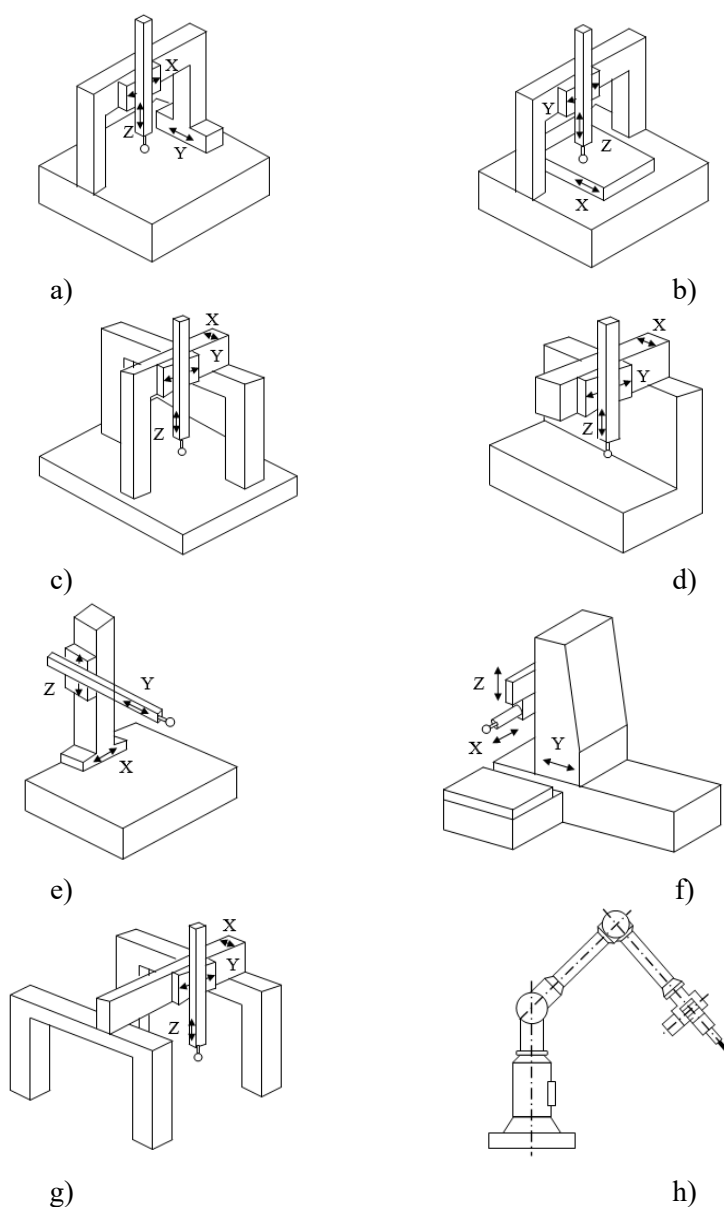


Figura 2.2.3. Arhitectura mașinilor de măsurat în coordonate;
a) portal mobil; b) portal fix și masă mobilă; c) punte în "L"; d) în consolă; e) braț orizontal;
f) braț orizontal și masă rotativă; g) pod rulant; h) Arhit braț articulat.

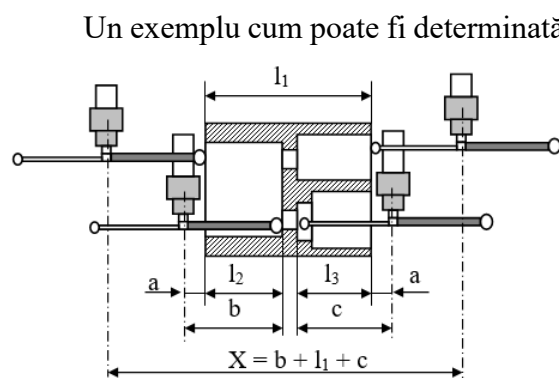


Figura 2.2.4. Determinarea lungimii axei X

Un exemplu cum poate fi determinată lungimea axei necesare (exemplu pentru axa X) este prezentat în Figura 2.2.4. În acest caz, se va lua în considerare cea mai mare piesă, dimensiunea capului de măsurare și lungimea necesară a senzorului și a palpatorului pentru a palpa punctele necesare de pe suprafața piesei. Pe baza desenelor piesei, se poate calcula domeniul de măsurare minim necesar.

Precizia (sau incertitudinea de măsurare) este probabil cea mai importantă caracteristică a unei mașini de măsurat în coordonate și este definită prin:

- incertitudinea de măsurare a lungimii volumetrice (E);
- incertitudinea de palpate volumetrică (P);
- incertitudinea volumetrică de scanare prin palpate (THP).

Incertitudinile (E), (P) sunt calculate atunci când mașina este utilizată pentru măsurarea dimensiunilor liniare, iar incertitudinea (THP) atunci când mașina este utilizată în modul de măsurare prin scanare.

O precizie mai mare (incertitudine mai mică) înseamnă, în mod normal, o investiție mai mare pentru o mașină. Investiția trebuie întotdeauna considerată împreună cu costurile pentru mașinile din producție și cu eforturile necesare pentru asigurarea condițiilor de mediu pentru mașina de măsurat.

Pentru mașinile cu senzori tactili, incertitudinea de măsurare a lungimii volumetrice este definită în mod normal în condiții specificate de temperatură și vibrații, inclusiv pentru senzorul cu un palpator vertical scurt. În timpul măsurărilor, sunt necesare palpatoarele verticale și orizontale mai lungi, cu articulații rotative, pentru a ajunge în toate punctele necesare de pe suprafața piesei. Toate aceste componente au o influență suplimentară asupra incertitudinii de măsurare a lungimii volumetrice. Este important să se adauge această influență la specificația de bază.

În prezent, mașinile de măsurat existente pe piață sunt oferite de o serie de producători, în toate tipurile de incertitudini. Pe baza desenelor pieselor, pot fi calculate erorile maxime admise ale mașinii. Toate caracteristicile care urmează să fie inspectate (distanțe liniare și unghiulare, toleranțe de formă, orientare, poziție nominală și bătaie) sunt completate într-un tabel, împreună cu toleranțele acestora. Apoi pot fi calculate specificațiile mașinii (E), (P) și (THP), și raportul specificație/toleranță. Pe baza incertitudinilor maxime admisibile ale CMM, (E), (P) și (THP), calculate, poate fi selectată cea mai potrivită CMM. În Tabelul 2.2.1 se prezintă un exemplu de calcul a incertitudinii de palpate volumetrică E necesară pentru măsurarea unor distanțe și diametre date. În mod normal, raportul minim acceptabil este de 1:4, dar "regula de aur" la măsurarea 3D recomandă un raport de 1:10.

Tabel 2.2.1 Calculul specificației E necesare pentru distanțe și diametre date

Element geometric piesă			$E = 0,6 + L / 600 \text{ } [\mu\text{m}]$		
Tip	Valoare nominală [mm]	Abatere superioară Abatere inferioară [mm]	Eroare mașină [mm]	Eroare % din toleranța piesei	Raport
Diametru	280	-0,010 -0,030	$\pm 0,0011$	11%	1:9,1
Distanță	350	+0,012 - 0,012	$\pm 0,0011$	9,1%	1:11
Distanță	35	0,000 - 0,004	$\pm 0,0006$	30%	1:3,3

Senzorii sunt, practic, cele mai importante componente ale mașinii de măsurat. În funcție de sarcina de măsurare, se utilizează senzori tactili și senzori non-contact.

Senzorii cu declanșare tactili (*Trigger probe* - TP) sunt cei mai utilizați senzori. Senzorul este dispozitivul care semnalează mașinii că s-a realizat un contact între elementul de palpate (sfera de rubin) a palpatorului și suprafața piesei de măsurat. Senzorul cu declanșare tactil detectează puncte unice cu o precizie ridicată. Senzorii de scanare tactili (*Scanning probe* - SP), sunt capabili să preia puncte la distanțe apropiate în timp scurt. Senzorii de scanare (măsuranți) pot fi folosiți la achiziția punctelor discrete, dar sunt mult mai adecvați în a măsura forma piesei (de exemplu: planeitate, cilindricitate, suprafețe ale paletelor de turbină etc.).

Senzorii optici cu triangulație pot fi senzori cu declanșare sau măsuranzi. Aceștia măsoară distanța față de un plan într-o direcție, fără contact cu piesa. Ei nu provoacă nicio deformare suprafețelor piesei, permițând inspectarea pieselor flexibile, moi sau cu suprafețe delicate.

În funcție de *sistemul de comandă*, mașinile pot fi împărțite, în trei grupe:

- mașini manuale, cu deplasarea manuală pe cele trei axe, utilizate în general pentru sarcini de măsurare scurte, fără nicio pregătire sau pentru un ciclu de măsurare programat în producție;
- mașini motorizate, comandate de la o unitate de comandă manuală cu joystick;
- mașini motorizate și control CNC. Aceste mașini execută automat ciclul de măsurare preprogramat. Ele pot fi, de asemenea, deplasate manual, de la o unitate de comandă manuală (Joystick).

Softurile de măsurare, dezvoltate de diferiți producători de mașini de măsurat sunt, în general, similare. Atunci când alegem un soft, decizia trebuie luată în funcție de forma piesei și de preferințele proprii (import model CAD al piesei, module specializate pentru diferite aplicații, module de statistică, reverse-engineering etc.).

În final se poate concluziona că măsurarea tridimensională reprezintă astăzi o tehnică indispensabilă pentru controlul proceselor și asigurarea calității. Mașinile de măsurat în coordonate sunt cele mai utilizate echipamente de control tridimensional. Controlul proceselor și asigurarea calității în operațiunile moderne de producție depind din ce în ce mai mult de performanța mașinilor, care sunt sisteme foarte complexe, de înaltă tehnologie și cu posibilități aproape infinite. Alegerea mașinii potrivite poate fi o decizie critică. Cu această metodă structurată descrisă mai sus, sarcina devine relativ ușoară. Utilizatorul poate alege o mașină care îndeplinește cerințele sale specifice de precizie și de aplicare.

2.2.1.2 Cercetări privind comportamentul unei mașini de măsurat în coordonate la viteze mari și câmp termic variabil

În lucrările [36] și [37] s-a realizat un studiu privind comportamentul unei mașini de măsurat în coordonate pentru măsurători de mare viteză și câmp termic variabil. Acest studiu s-a realizat în timpul fazei de proiectare a mașinii de măsurat în coordonate cu portal fix și masă mobilă (Presingo 755), de către autorul acestei teze de abilitare, folosind programul Solidworks.

Precizia unei mașini de măsurat în coordonate (CMM) este foarte importantă pentru a fi cunoscută încă din faza de concepție și proiectare inițială, pentru a obține rezultate de calitate ale măsurătorilor pe piesă. Unul dintre cei mai importanți factori care influențează rezultatele măsurătorilor este mașina însăși, care este alcătuită din patru componente principale:

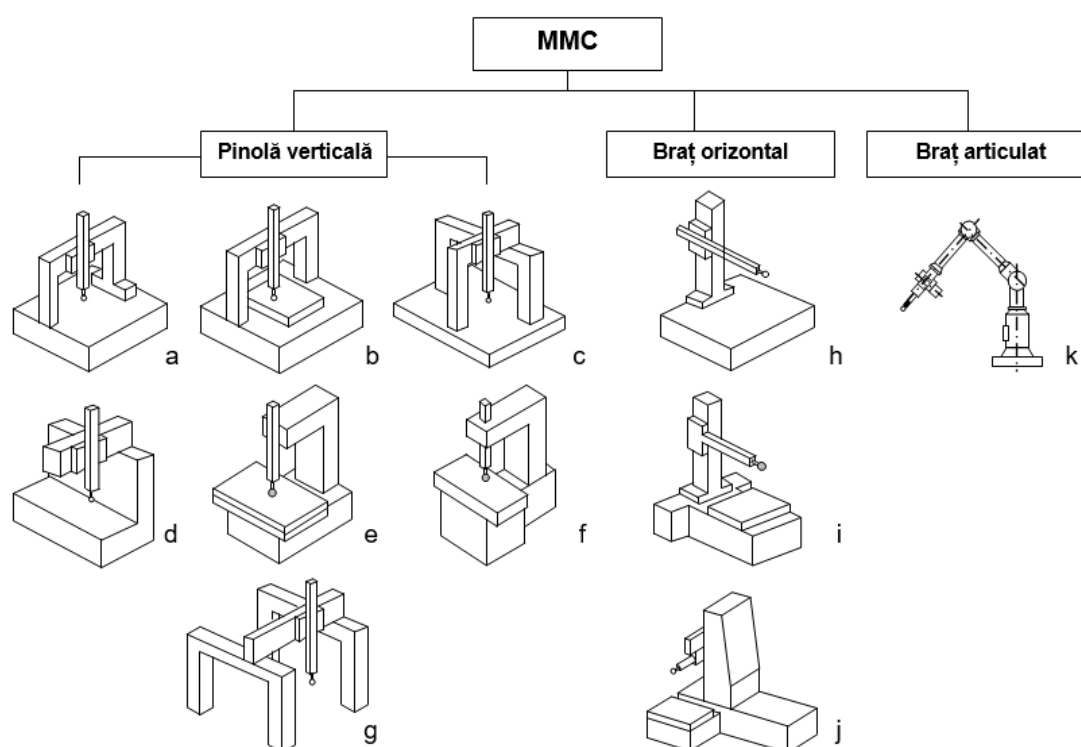
- structura mecanică;
- sistemul de comandă și control;
- softul de măsurare;
- sistemul de palpare (senzorii),

care, odată integrate și aduse în stare de interacțiune, constituie mașina propriu-zisă. Unul dintre aceste patru elemente tehnologice este structura mecanică de înaltă precizie, capabilă să poziționeze senzorul în orice punct al volumului său de lucru într-un mod extrem de repetabil.

În majoritatea cazurilor, structura mecanică a unei mașini este reprezentarea fizică a unui sistem de referință cartezian. Structura mecanică poate fi caracterizată prin doi parametri: *dimensiuni* și *arhitectură*. Dimensiunile determină volumul de măsurare al structurii mecanice și pot influența arhitectura mașinii, incertitudinea de măsurare, reacția structurii însăși la gradienti termici etc. Arhitectura este în mod fundamental funcție de dimensiunile structurii mecanice și este concepută pentru a optimiza: performanțele dinamice ale mașinii (viteză și accelerație); caracteristicile metrologice ale mașinii; accesibilitatea la suprafețele piesei de măsurat; ergonomia

și costurile de manipulare accesibile. În ultimii ani, tendința este de a maximiza rigiditatea structurii, reducând masa relevantă, pentru a obține cea mai mare accelerație (și decelerație) posibilă, astfel încât să se îmbunătățească parametrii dinamici ai mașinii.

Arhitecturile consolidate în decursul anilor [38] sunt prezentate în Figura 2.2.5. Aceste tipuri de arhitecturi nu au aceeași răspândire în industrie. Unele arhitecturi nu oferă avantaje deosebite dacă sunt comparate cu arhitecturi mai ușor și mai ieftin de fabricat, iar alte arhitecturi sunt indicate în special pentru dimensiuni foarte mari.



a) Portal mobil; b) Portal fix; c) Punte în formă de L; d) În consolă cu masă fixă; e) Coloană; f) În consolă cu masă mobilă; g) Pod rulant; h) Braț orizontal mobil; i) Braț orizontal cu masă mobilă; j) Braț orizontal cu masă fixă; k) Braț articulat.

Figura 2.2.5. Arhitectura mașinilor de măsurat în coordonate

În cele ce urmează va fi descrisă doar arhitectura cu portal fix și masă mobilă (Figura 2.2.5b), care reprezintă obiectivul cercetării. Acest tip de arhitectură permite construirea de mașini de precizie foarte mare, care sunt foarte eficiente din punct de vedere metrologic. Mașina cu portal fix este tipul tipic de mașină de laborator, fiind versatilă și potrivită pentru numeroase aplicații, de la piese cu geometrie simplă la piese cu geometrie complexă, cum ar fi: roți dințate, came, palete de turbină, șuruburi compresor etc. Echipate cu senzori sofisticati, mașinile cu portal fix pot fi utilizate pentru scanare continuă de înaltă precizie.

Arhitectura mașinii analizate (Presingo 755) este de tip portal fix și masă mobilă cu volumul de măsurare 700x500x500 mm. La acest tip de arhitectură, portalul este fixat la baza mașinii și, în consecință, este static. Au fost luate în considerare două structuri diferite de portal (Figura 2.2.6), cu aceleași dimensiuni și cu:

- montanții realizați din fontă cenușie și traversa din granit;
- montanții realizați din granit cu două piese de legătură din fontă cenușie și traversa din granit.

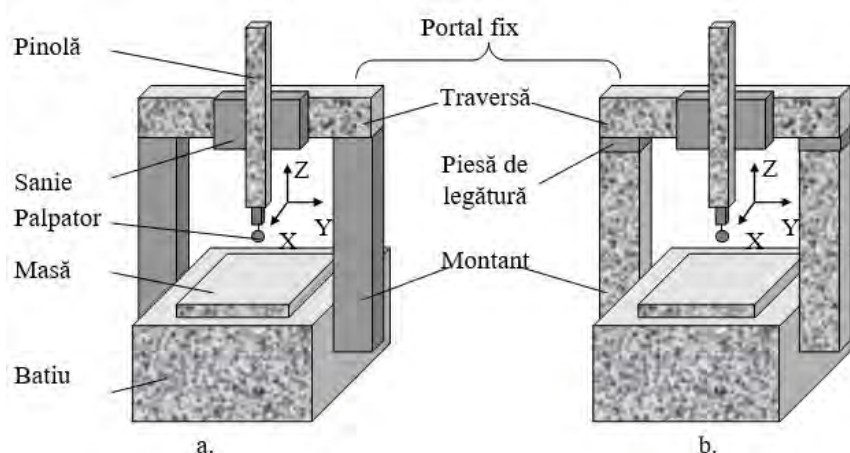


Figura 2.2.6. Configurația mașinii de măsurat

Toate îmbinările dintre traversă și montanți (piese de legătură) sunt din oțel și sunt reglabile. Batiul, masa mobilă și pinola sunt realizate de asemenea din granit. Părțile principale ale saniei sunt fabricate din fontă cenușie.

Sania și masa sunt principalele componente mobile. Acestea sunt acționate de motoare de curent continuu cu tahogeneratoare și șuruburi cu bile. Sistemul de coordonate al mașinii este OXYZ. Mișcarea pe axa X este realizată de către masa mobilă, care se deplasează pe ghidajele din batiu, în direcția X. Sania se deplasează de-a lungul traversei în direcția Y. Pinola se deplasează pe verticală, în lungul axe Z. Legătura dintre ansamblele mobile și ghidaje se face cu ajutorul lagărelor cu aer.

Acest tip de construcție permite poziționarea sistemului de antrenare în concordanță cu centrul de greutate al ansamblului care urmează să fie deplasat (masă, sanie și pinolă), reducând astfel la minimum momentele de rotire nedorite, la accelerarea și decelerarea ansamblului. Sania, care este un ansamblu foarte complex al structurii mecanice a mașinii, este prezentată, ca exemplu, în Figura 2.2.7. După cum se poate observa, soluția constructivă realizată a permis ca distanța dintre centrul de greutate și axa sistemului de antrenare cu șurub cu bile să fie foarte mică, ceea ce oferă posibilitatea de deplasare cu viteze mari.

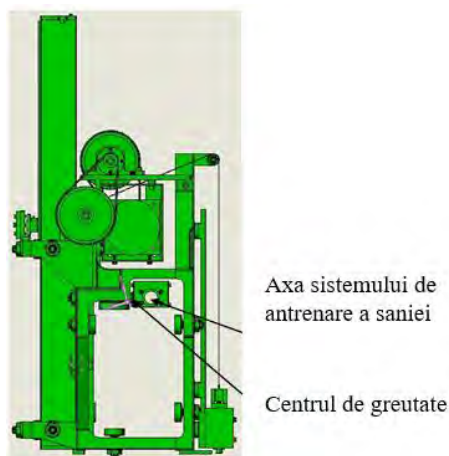


Figura 2.2.7. Poziția sistemului de antrenare a saniei în concordanță cu centrul de greutate

- montanții din fontă cenușie și traversa din granit (Figura 2.2.8);
- montanții din granit cu două piese de legătură din fontă cenușie și traversa din granit (Figura 2.2.9).

Sania Y (incluzând pinola Z) a fost accelerată cu 1500 mm/s^2 de-a lungul ghidajului Y, în direcția -Y (Figura 2.2.8a, Figura 2.2.9a) a sistemului de referință al mașinii OXYZ. Pinola a fost plasată la mijlocul traversei ($Y/2$), în cea mai joasă poziție în direcția Z, ceea ce corespunde cazului cel mai nefavorabil din punctul de vedere al deformării pinolei. Toate componentele mașinii au

fost încărcate cu forța gravitațională (Figura 2.2.8b, Figura 2.2.9b), iar masa mobilă a fost încărcată cu o forță (3500N), care reprezintă greutatea maximă a piesei de prelucrat (Figura 2.2.8c, Figura 2.2.9c). Pentru fiecare componentă a mașinii a fost selectat materialul adecvat, din care este confecționată aceasta.

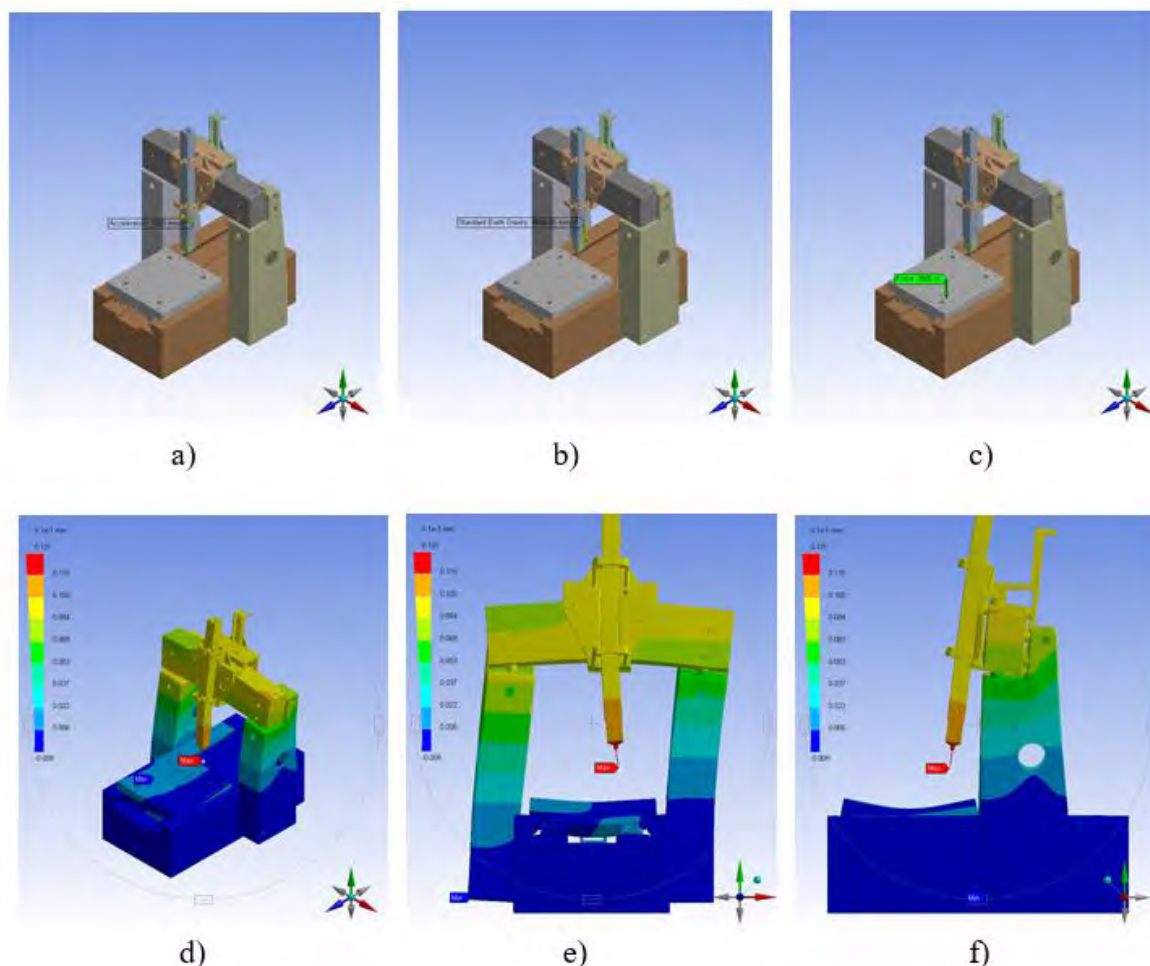


Figura 2.2.8. Deformația totală a structurii mecanice cu montanți din fontă cenușie

Ambele modele au fost rulate în soft-ul Ansys®. Analiza cu elemente finite (FEA) a permis determinarea deformației totale a structurii mecanice. După cum se poate observa în Figura 2.2.8 și Figura 2.2.9, deformarea maximă se localizează la vârful palpatorului. Pentru structura cu montanți din fontă cenușie, valoarea maximă este de 13,1 μm , iar pentru structura cu montanți din granit, deformarea maximă este de 14,5 μm .

Pentru ambele structuri mecanice, forma deformării este aproape similară. Valoarea maximă a deformației totale se datorează deformării, în ordinea descrescătoare a influenței lor, a pinolei Z, a saniei, a traversei și a montanților, precum și rotirii saniei, a traversei Y și a pinolei Z în jurul anumitor axe.

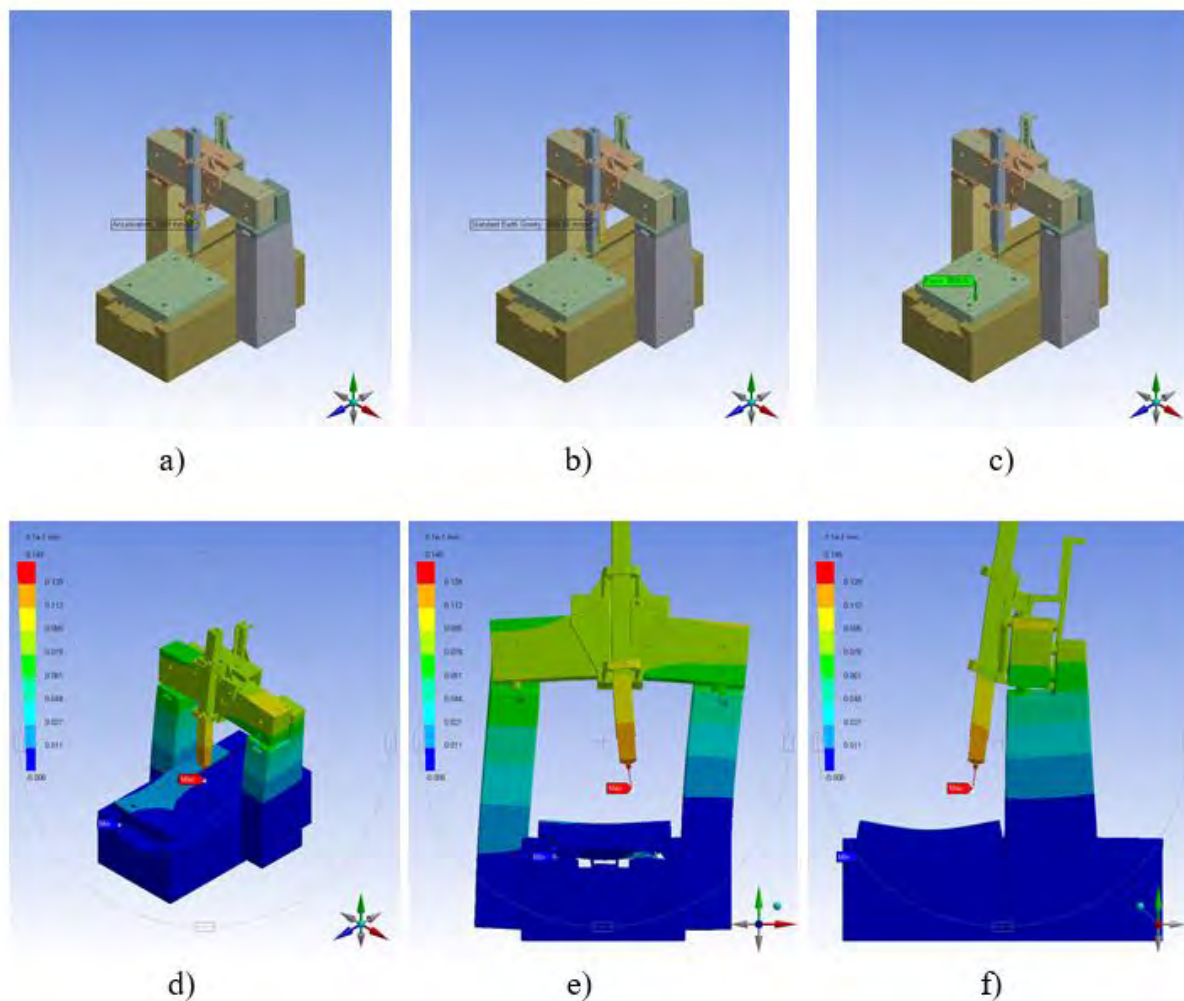


Figura 2.2.9. Deformația totală a structurii mecanice cu montanți din granit

Structura mecanică cu montanți din fontă cenușie este mai rigidă decât structura mecanică cu montanți din granit și fontă cenușie. În primul caz, deformația maximă este de 13,1 μm , cu 1,4 μm mai mică decât în cazul celei de-a doua structuri.

Greutatea montanților din fontă cenușie reprezintă 60% din greutatea montanților din granit și a pieselor de legătură din fontă cenușie. Astfel, la aceeași rigiditate, prima structură permite reducerea greutății mașinii, ceea ce reprezintă un avantaj. Din punct de vedere dinamic, masa portalului nu are nicio influență, deoarece portalul este fix, deci static. Primul dezavantaj al montanților realizați din fontă cenușie este costul ridicat. Pentru fiecare dimensiune a montantului este necesară o nouă formă de turnare care implică costuri suplimentare. Din punct de vedere al comportamentului termic, dilatarea termică a montanților din fontă cenușie este mai semnificativă decât cea a montanților din granit și fontă cenușie deoarece coeficientul de dilatare termică al granitului este mult mai mic față de cel al fontei cenușii, iar înălțimea părții suplimentare din fontă cenușie raportată la înălțimea totală a montantului este mică. Un alt avantaj important al montanților realizați din granit este costul redus, deoarece sunt ușor de fabricat. Construcția modulară a montanților din granit plus piesa de legătură permite modificarea volumului de măsurare foarte simplu și ușor: se păstrează piesele de legătură cu toate îmbinările și se schimbă doar montanții din granit, care sunt ușor și ieftin de fabricat. Analizând principalele avantaje și dezavantaje specificate mai sus, se poate concluziona că cea de-a doua structură mecanică oferă mai multe avantaje economice decât prima, la performanțe dinamice comparabile.

Prototipul mașinii de măsurat în coordonate (Presingo 755), construită cu portal fix din granit, a fost testat conform ISO 10360 [40]. Rezultatele sunt prezentate în Tabelul 2.2.2. În timpul testelor, efectuate la 20°C și fără vibrații, mașina se deplasează cu o viteză și o accelerație ridicată pentru a arăta proprietățile dinamice ale acesteia. Variațiile vitezei și accelerației în timpul procesului de măsurare au cauzat forțe de inerție, de la pornire la viteza normală și de la viteza normală la oprire, care au o mare influență asupra erorilor dinamice. După cum se poate observa în Tabelul 2.2.2, incertitudinea de măsurare a mașinii este sub 1 μm. Această precizie ridicată este obținută dacă punctele de pe suprafața piesei sunt palpate la viteză constantă (Figura 2.2.10), după panta de decelerare, când structura mecanică a mașinii, care este suficient de rigidă, este capabilă să revină la forma nedeformată.

Tabel 2.2.2 Date tehnice mașină de măsurat Presingo 755

Mărimea axelor	Axa X	700 mm
	Axa Y	500 mm
	Axa Z	500 mm
Incertitudinea de măsurare a lungimii volumetrică	ISO 10360-2, cap de măsurare SP80, controller UCC2 Renishaw®	$E = 0,9 + L/400$ [μm]
Incertitudinea de palpare volumetrică	ISO 10360-2, cap de măsurare SP80, controller UCC2 Renishaw®	$P = 0,9 + L/400$ [μm]
Incertitudinea de scanare volumetrică	ISO 10360-4, cap de măsurare SP80, controller UCC2 Renishaw®	THP = 1,4 [μm]
Viteza de deplasare maximă	Mod CNC	300 mm/sec
	Mod manual (comandă de la Joystick)	120 mm/sec
Accelerația maximă	După cele 3 axe	1500 mm/s ²

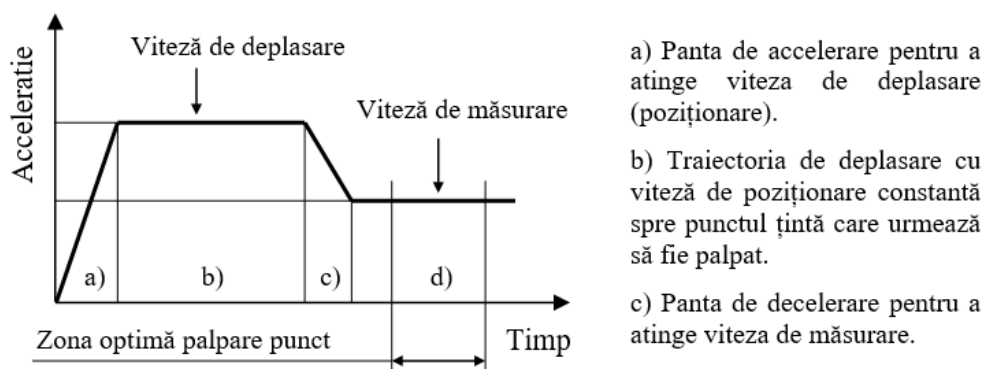


Figura 2.2.10. Diagrama de deplasare pentru palparea unui punct

Cercetările efectuate în lucrarea [37] reprezintă o continuare și o extindere a celor din lucrarea [36] privind concepția și proiectarea unei mașini de măsurat în coordonate de precizie ridicată la viteze de măsurare mari, unde erorile dinamice vor avea o mare influență asupra preciziei. Arhitectura mașinii este de tip portal fix ("cadru închis") cu masă mobilă (Figura 2.2.11). La acest tip de arhitectură, portalul este fixat de batiul mașinii și, în consecință, este static. Structura principală este realizată exclusiv din granit și fontă cenușie, evitându-se aluminiul. Batiul mașinii, masa mobilă și pinola sunt realizate din granit. Montanții sunt din granit cu două piese de legătură din fontă cenușie și traversa din granit. Toate elementele de legătură dintre traversă și montanți sunt din oțel și sunt reglabile. Părțile principale ale saniei (Figura 2.2.12) sunt realizate din fontă cenușie.

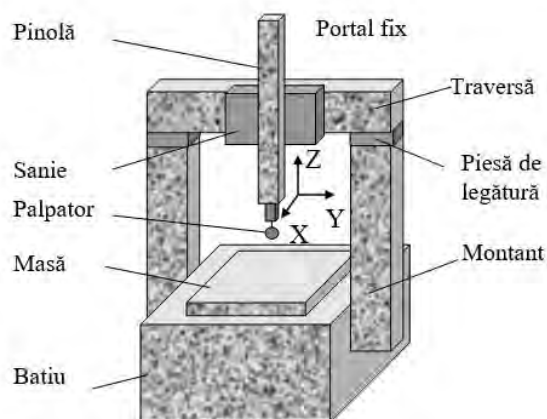


Figura 2.2.11. Configurația mașinii

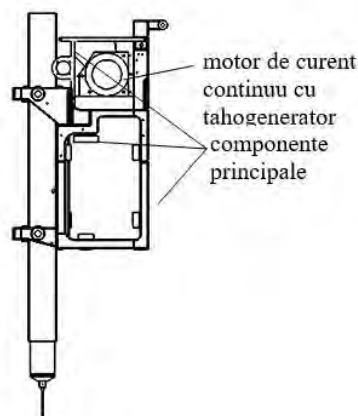


Figura 2.2.12. Ansamblu sanie

a) Deformații dinamice ale structurii mecanice

În această lucrare [37], studiul pentru stabilirea deformațiilor dinamice [41,42] ale structurii mecanice a mașinii a fost realizat pentru o mașină prototip actuală (Presingo 755) cu volumul de măsurare 700x500x500 mm (Figura 2.2.13) și pentru o nouă mașină cu volumul de măsurare 1200x1000x700 mm (Figura 2.2.14).

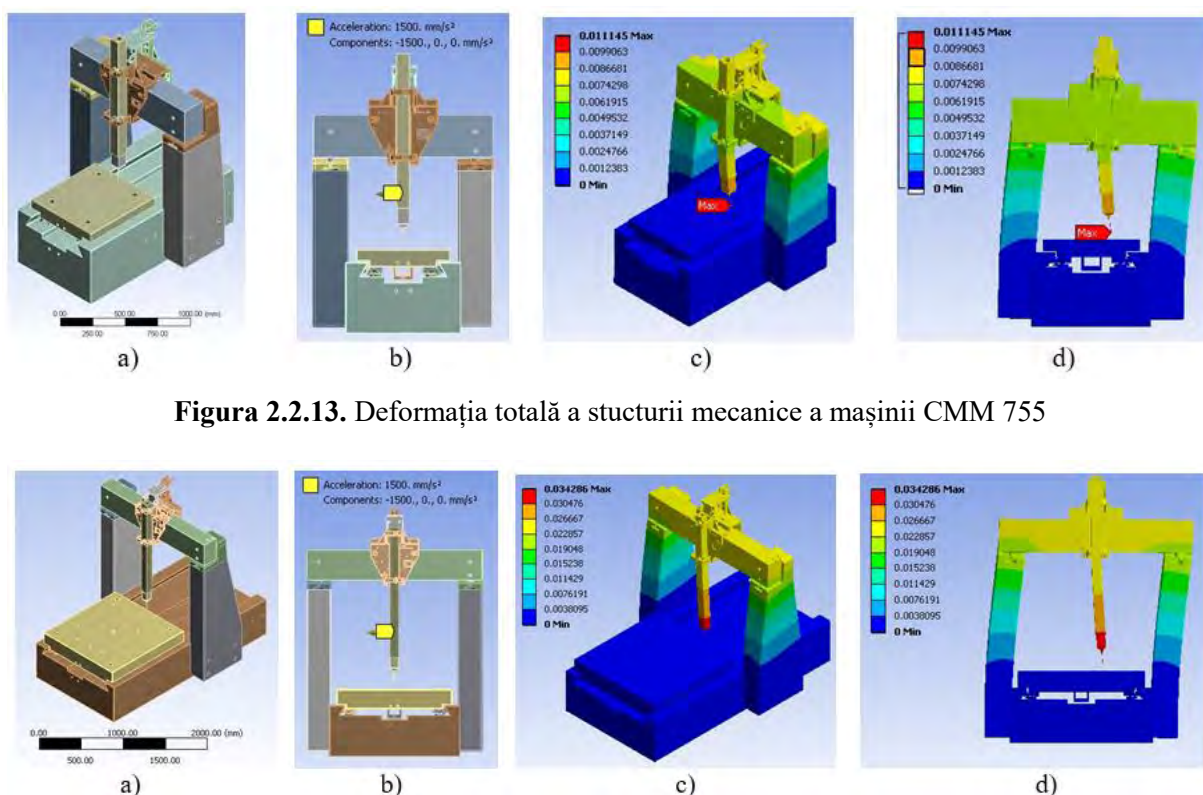


Figura 2.2.13. Deformația totală a stucturii mecanice a mașinii CMM 755

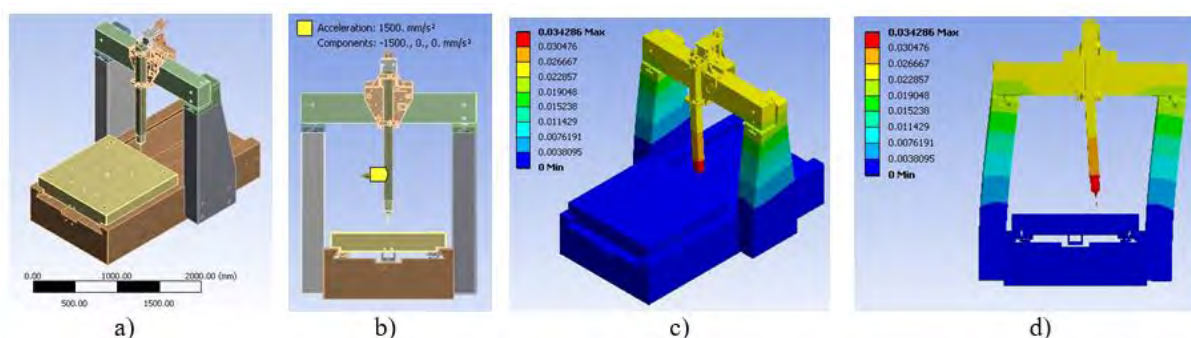


Figura 2.2.14. Deformația totală a stucturii mecanice a mașinii CMM 12.10.7

Sania-Y, care include și pinola-Z, este accelerată până la 3000 mm/s² de-a lungul ghidajului Y în direcția (-Y) a sistemului de referință OXYZ al mașinii. Pinola este plasată la mijlocul traversei (Y/2), în poziția cea mai joasă în direcția Z, care corespunde cazului cel mai nefavorabil din punctul de vedere al deformării pinolei. Pentru fiecare componentă a mașinii a fost selectat materialul potrivit.

Ambele modele de mașini au fost rulate în programul Ansys®. Analiza cu elemente finite (FEA) permite calculul deformației totale a structurii mecanice. După cum se poate observa în Figura 2.2.13 și Figura 2.2.14, deformația maximă se localizează la vârful palpatorului. Deformația totală a structurii mașinilor este prezentată în Figura 2.2.15. Pentru o accelerație de 1500 mm/s^2 , (Figura 2.2.13b, Figura 2.2.14b), valoarea maximă a deformației totale a primei structuri este de $11,1 \text{ } \mu\text{m}$, iar pentru cea de-a doua structură de $34,2 \text{ } \mu\text{m}$ (Figura 2.2.13c,d, Figura 2.2.14c,d). Valoarea maximă pentru deformația totală se datorează deformării, în ordinea descrescătoare a influenței lor, a palpatorului (cu diametrul de 4 mm și lungimea de 90 mm) și a pinolei-Z, a saniei, a traversei și a montanților, precum și a rotațiilor saniei, a traversei-Y și a pinolei-Z în jurul anumitor axe.

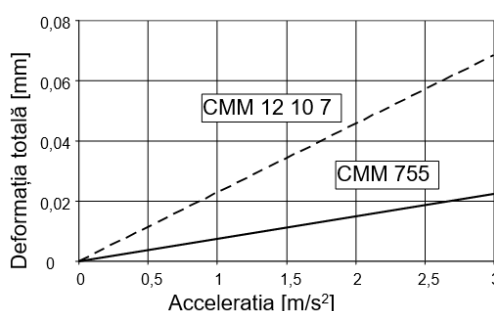


Figura 2.2.15. Deformația totală a structurii mecanice a mașinilor

b) Deformații termice ale saniei

Pentru o mașină de măsurat cu precizie ridicată este foarte important să se studieze reacția structurii mecanice la gradientii termici. Mașina de măsurat cu portal fix este tipul tipic de mașină de laborator și trebuie avut în vedere faptul că, pentru a obține caracteristici metrologice extraordinare ale mașinii în cauză, este nevoie de un mediu controlat pentru a putea fi exploatate pe deplin. În acest caz, variațiile de temperatură pot avea ca surse temperatura internă indusă de sistemele de acționare ale mașinii.

Motoarele disc de curent continuu cu tahogenerator, utilizate în cadrul sistemelor de antrenare (masă, sanie), sunt instalate în afara batiului mașinii și a traversei. Pentru axa Z, motorul disc de curent continuu cu tahogenerator este instalat sub placa superioară a saniei (Figura 2.2.12). Acest motor disc se află în apropierea pinolei și este important pentru a afla în ce mod poziția vârfului palpatorului este influențată de temperatura internă indusă de motor.

În acest studiu am considerat că motorul ($P=350 \text{ W}$) generează o căldură internă de $1,33\text{--}10\text{--}5 \text{ W/mm}^3$. Căldura din motor este disipată prin convecție. Coeficientul de transfer de căldură prin convecție este de $25 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Sarcina termică a fost aplicată în partea superioară a saniei.

În Figura 2.2.16 se prezintă deformația totală a saniei. Valoarea maximă a deformației este de $0,0028 \text{ mm}$ și este localizată în partea superioară a saniei. Deformația vârfului palpatorului este de $1,26\cdot 10^{-4} \text{ mm}$, adică $0,0126 \text{ } \mu\text{m}$.

În final se poate concluziona că un avantaj important al arhitecturii cu portal fix ("cadru închis") cu montanți din granit este reducerea costurilor, deoarece este ușor de fabricat, în comparație cu montanții din fontă cenușie [36]. Construcția modulară a montantului din granit plus piesa de legătură permite schimbarea volumului de măsurare foarte simplu și ușor: se păstrează piesele de legătură cu toate elementele de asamblare și se schimbă doar montanții din granit, care sunt ușor și ieftin de fabricat. Pentru cea de-a doua structură s-a folosit aceeași sanie, care este cel mai complex ansamblu al mașinii, și s-a mărit doar lungimea pinolei, a traversei, a a montanților din granit, respectiv batiul mașinii.

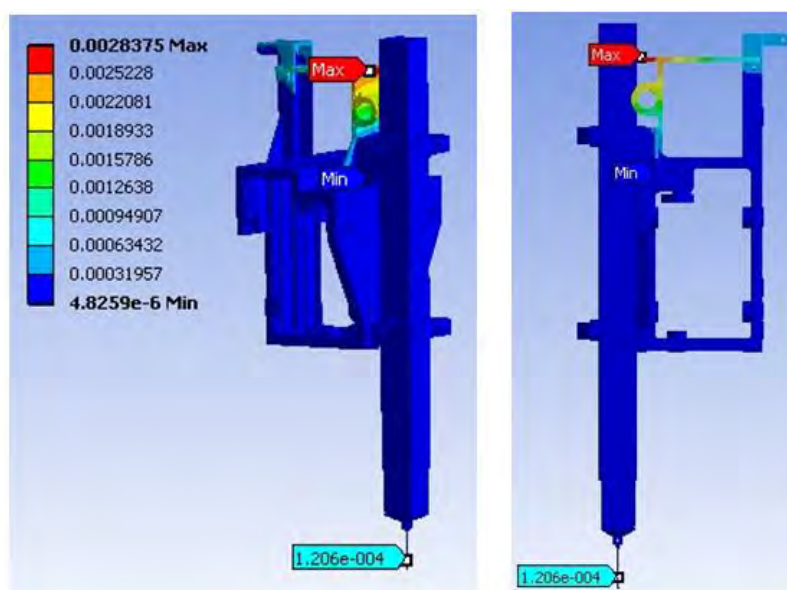


Figura 2.2.16. Deformația termică a saniei

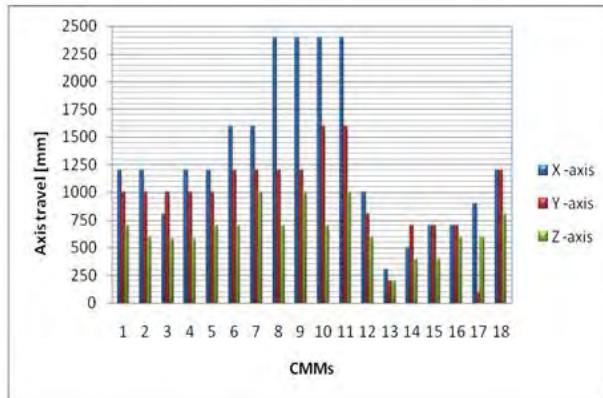
Din punct de vedere dinamic, pentru mașina CMM 755, valoarea maximă a deformației totale a structurii mecanice este de $11,1 \mu\text{m}$, iar pentru CMM 12.10.7 valoarea maximă este de $34,2 \mu\text{m}$, la o accelerație de 1500 mm/s^2 . Această deformație este localizată la vârful palpatorului cu dimensiunile: 4 mm în diametru și 90 mm lungime. Pentru a doua structură mecanică, valoarea maximă a deformației este de 3 ori mai mare decât pentru prima structură mecanică. Modul de reducere a deformației maxime a pinolei și a vârfului palpatorului, la aceeași accelerație, poate fi prin creșterea secțiunii pinolei.

Din punct de vedere termic, valoarea maximă a deformației este de $0,0028 \text{ mm}$ și se află în partea superioară a saniei. Deformarea vârfului palpatorului este de $1,26 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$. Deformațiile structurii mecanice datorate gradientilor termici induse de sistemele de acționare ale mașinii sunt foarte mici și nu influențează (semnificativ) precizia mașinii.

2.2.1.3 Cercetări privind concepția modulară a unei mașini de măsurat în coordonate

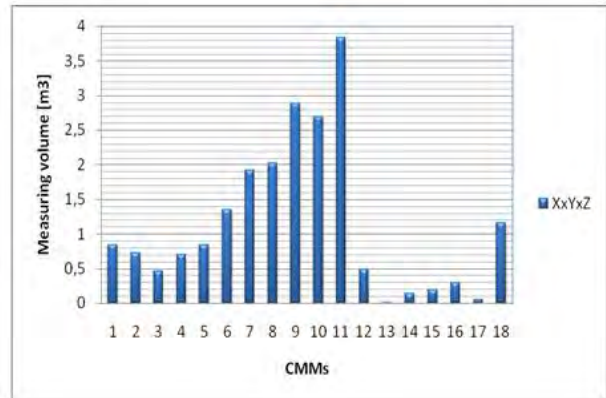
În lucrarea [43] se prezintă un studiu privind **concepția modulară** a unei mașini de măsurat în coordonate. Scopul lucrării a fost de a prezenta o soluție de proiectare modulară a arhitecturii cu portal fix și masă mobilă care permite modificarea volumului de măsurare al mașinii, în special în direcția Z, în anumite limite și fără modificări majore. De asemenea, este analizată o proiectare modulară a mesei mobile care permite transformarea mașinii din trei axe în mașină în patru axe, cu masă rotativă inclusă (axa R).

Pe piață, există o varietate de arhitecturi (Figura 2.2.5) și configurații de mașini care dispun de trei axe de coordonate. Mișcarea în lungul axelor X, Y și Z descrie anvelopa de măsurare. În prima parte a acestei cercetări am efectuat un studiu referitor la oferta de vânzare a constructorilor [44-46] de mașini de măsurat cu portal fix și masă mobilă. În Figura 2.2.17 se poate vedea anvelopa de măsurare pentru cele mai importante mașini cu portal fix, iar în Figura 2.2.18 este prezentat volumul de măsurare pentru aceste mașini.



Legendă: Axis travel=lungime axă; X-axis=axa-X;
Y-axis=axa-Y; Z-axis=axa-Z;
CMMs=mașini de măsurat în coordonate

Figura 2.2.17. Anvelopa de măsurare la mașinile cu portal fix



Legendă: Measuring volume=volum de măsurare;
CMMs=mașini de măsurat în coordonate

Figura 2.2.18. Volumul de măsurare la mașinile cu portal fix

Analizând Figura 2.2.17 și Figura 2.2.18, se poate observa că există o zonă cu un volum de măsurare mai puțin acoperit. Această zonă acoperă un volum de măsurare cuprins între 0,05-0,2 m³, respectiv 0,3-0,5 m³. Acest studiu, realizat la începutul proiectării noii mașini, ne-a determinat să alegem volumul de măsurare al mașinii Presingo 755, de 0,175 m³, care corespunde anvelopei de măsurare: X=700 mm, Y=500 mm și Z=500 mm.

Configurația cu portal fix a principalelor mașini de pe piață este prezentată în Figura 2.2.6a. Portalul fix este realizat din doi montanți din fontă și o traversă orizontală din granit.

a) Designul modular a portalului

Noua configurație a portalului fix (Figura 2.2.19a) constă din doi montanți din granit cu două piese de legătură din fontă cenușie și o traversă orizontală din granit. Părțile suplimentare sunt fixate pe partea superioară a montanților cu ajutorul unor șuruburi. Toate elementele de legătură dintre montanți și traversă sunt realizate din oțel și sunt reglabile. Realizarea montanților din granit este mai ușoară din punct de vedere al fabricării, se realizează cu costuri mai mici și oferă o rigiditate comparabilă cu cea a montanților din fontă [36]. Această construcție modulară a portalului permite creșterea distanței dintre masă și sistemul de palpăre ($H_{Z2} > H_{Z1}$) (Figura 2.2.19b), menținând în același timp cursa pe axa Z (aceeași anvelopă de măsurare) prin simpla înlocuire a celor doi montanți din granit (H_{L1}) cu montanți noi mai înalți (H_{L2}). Această posibilitate este limitată de cerințele privind precizia și rigiditatea mașinii.

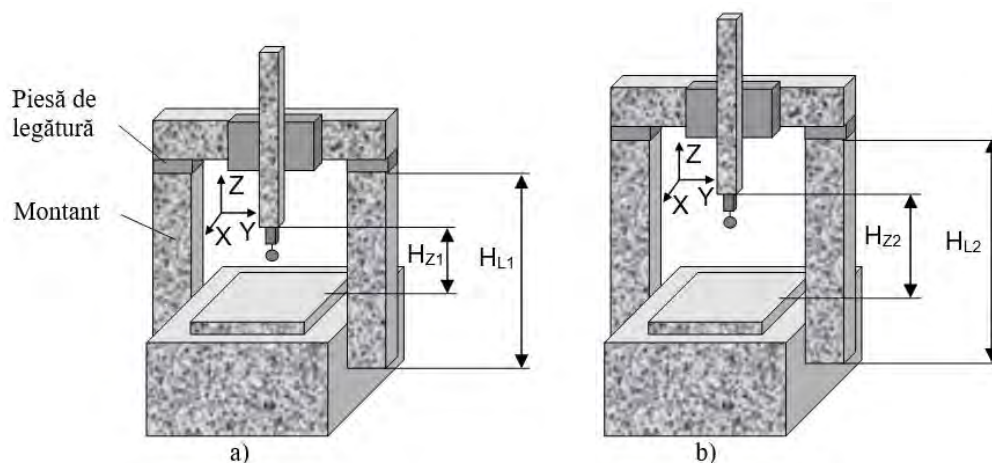


Figura 2.2.19. Construcția modulară cu portal fix

b) *Designul modular al mesei*

Adesea, măsurarea pieselor cilindrice necesită a patra axă de acționare: axa de rotație R. Acest lucru se poate întâmpla în special la măsurarea roților dințate sau a paletelor de turbină. Pe unele mașini cu cap de măsurare fix [47-49], pentru măsurarea, de exemplu, a roților dințate sunt utilizate arhitecturi de palpatoare în stea (Figura 2.2.20a), care sunt deplasate în jurul piesei în direcția X, Y și Z.

Unele sisteme de palpate tactile sunt ele însele dispozitive rotative motorizate (Figura 2.2.20b), vârful palpatorului putând fi rotit vertical până la 105° (unghi de elevație) și printr-o rotație completă de $\pm 180^\circ$ (unghi de azimut) [50,51]. Acest lucru permite palpatorului să palpeze puncte pe suprafața piesei, la diferite unghiuri, fără a fi nevoie de schimbări frecvente, consumatoare de timp, ale palpatoarelor din magazia de palpatoare.



Figura 2.2.20. Măsurare cu diferite sisteme de palpate:
a) sistem de palpate cu palpatoare în stea; b) cap de măsurare motorizat, rotativ.

În unele cazuri, pentru măsurarea pieselor complexe este necesară utilizarea unei mese rotative (RT). Mesele rotative opționale (detașabile) pot fi utilizate pentru a spori gradul de apropiere a palpatorului de piesă la măsurarea pieselor complexe. Masa rotativă, ca a patra axă de acționare, oferă un grad sporit de flexibilitate.

Masa rotativă opțională (detașabilă) se montează pe masa mașinii (Figura 2.2.21a). În acest caz, datorită înălțimii mesei rotative (H_{RT}), distanța (H_Z) în direcția Z este redusă. Înălțimea maximă a piesei de măsurare devine $H_{ZRT} = H_Z - H_{RT}$. Uneori, această pierdere de înălțime ar putea fi un inconvenient pentru măsurarea unor piese mai mari în direcția Z care se află la limita anvelopei de măsurare a mașinii.

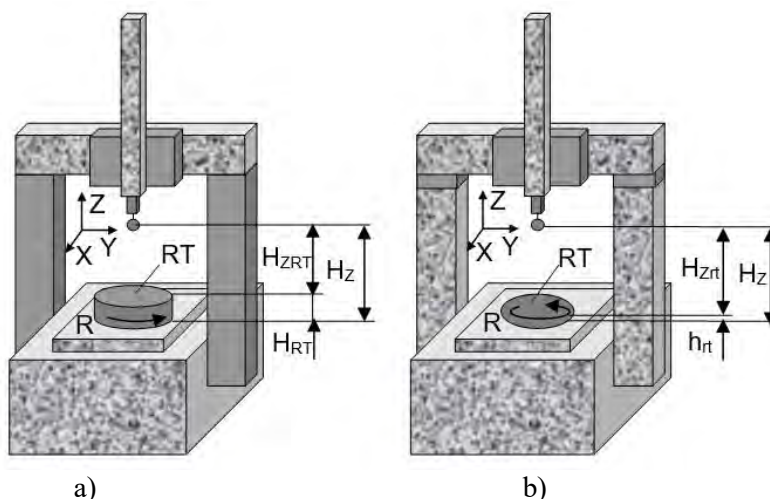


Figura 2.2.21. Mașină cu masă rotativă detașabilă / inclusă:
a) masă rotativă detașabilă; b) masă rotativă inclusă în masa mașinii.

O soluție la inconvenientul menționat constă în realizarea unei mese rotative în interiorul mesei mobile din granit (Figura 2.2.21b). Masa de granit se deplasează de-a lungul ghidajelor din batiu (axa X), iar masa rotativă se rotește în interiorul mesei (axa R). Datorită diferenței mici de înălțime (câțiva milimetri) dintre suprafața mesei de granit și suprafața superioară a mesei rotative (h_{RT}), înălțimea maximă a piesei de măsurare rămâne aproape similară ($H_{Zrt} = H_Z - h_{rt} \cong H_Z$) cu înălțimea inițială.

În Figura 2.2.22a se prezintă construcția modulară a mașinii CMM 755 în 3 axe, iar Figura 2.2.22b se prezintă construcția modulară a mașinii CMM 755 cu o masă rotativă inclusă în interiorul mesei. Proiectarea completă a celor două mașini am realizat-o în softul de proiectare Solidworks. Datorită unor aspecte legate de confidențialitate, imagini cu masa rotativă inclusă în masa mașinii nu pot fi publicate. Ideea de a introduce o masă rotativă în masa mașinii a fost ceva inovator la acel moment. Niciun model de mașină de măsurat existent pe piață nu avea masă rotativă inclusă. În Figura 2.2.23 se prezintă cele două modele de mașini fabricate în Germania de către companiile 3D Präzisions Technik și Industrielle CNC-und Messtechnik, pe baza proiectului și a documentației tehnice furnizate de către autorul acestei teze, și a căror date tehnice sunt prezentate în Tabelul 2.2.2.

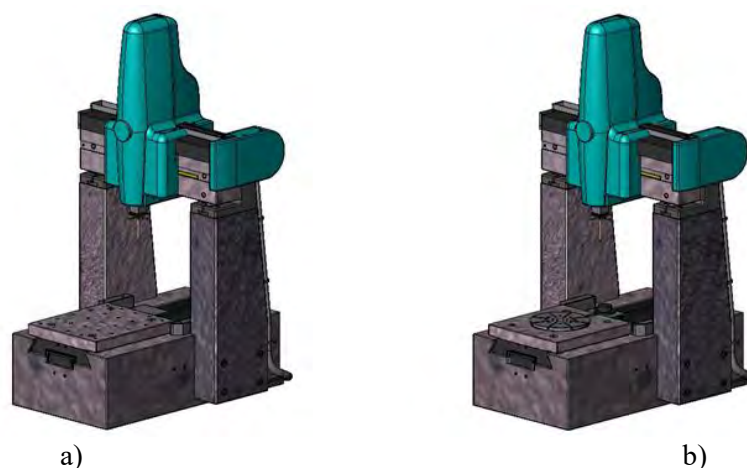


Figura 2.2.22. Modelul CAD al mașinii de măsurat CMM 755
a) mașină în 3 axe; b) mașină în 4 axe, cu masă rotativă inclusă.
(proiect realizat integral de autorul acestei teze de abilitare)



a)

*poză realizată în anul 2007 la compania Messtechnik
Wetzlar, Germania (grup Hexagon Metrology)



b)

**poză realizată în anul 2007 la compania
3D Präzisions Technik Asslar, Germania

Figura 2.2.23. Mașina de măsurat Presingo 755:
a) model în 3 axe*; b) model în 4 axe, cu masă rotativă inclusă**.

În concluzie, un avantaj important al portalului fix cu montanți din granit este reducerea costurilor, deoarece este mai ușor de fabricat decât cu montanții din fontă cenușie. Construcția modulară a montantului din granit plus piesă de legătură ne permite să mărim distanța dintre masă și sistemul de palpate foarte simplu și ușor, păstrând piesele de legătură cu toate îmbinările și schimbând doar înălțimea montanților din granit, care sunt ușor și ieftin de fabricat. Construcția modulară a portalului ne permite, de asemenea, să mărim anvelopa de măsurare folosind aceeași sanie, care este cel mai complex ansamblu al mașinii, și mărirea doar a lungimea pinolei, a traversei, a montanților de granit și a batiului mașinii. Această posibilitate este limitată de cerințele privind precizia și rigiditatea mașinii.

Construcția modulară a mașinii permite, de asemenea, înlocuirea mesei simple de granit cu o masă din granit care are inclusă o masă rotativă. În cazul în care un client, posesor al unei mașini CMM 755 în 3 axe, are nevoie, în viitor, să măsoare piese complexe care necesită o masă rotativă, printr-o simplă acțiune de modernizare, vechea masă va fi înlocuită cu una nouă, care are inclusă masa rotativă. În acest caz, clientul va avea o mașină în 4 axe fără a modifica anvelopa de măsurare a mașinii și la un cost mic.

Cercetările viitoare ar putea consta în îmbunătățirea sistemelor de asamblare dintre montanți și traversă pentru o reglare mai ușoară a poziției și orientării traversei față de batiul mașinii. O altă activitate de cercetare viitoare poate consta în îmbunătățirea dinamicii și preciziei mesei rotative.

2.2.1.4 Cercetări privind concepția sistemelor de antrenare liniară pentru modernizarea mașinii de măsurat în coordonate TESA MicroMs343

În lucrarea [52] s-a efectuat o cercetare privind concepția sistemelor de acționare liniară pentru modernizarea mașinii manuale de măsurat în coordonate TESA MicroMS 343. Scopul activității de cercetare-proiectare prezentată în cadrul acestei lucrări a fost de a prezenta o soluție tehnică pentru modernizarea mașinii manuale de măsurat în coordonate TESA MicroMs 343 existentă în laboratorul de măsurători 3D din cadrul Universității Politehnica din Timișoara (Figura 2.2.24) pentru a deveni o mașină cu comandă numerică.



Figura 2.2.24. Mașina TESA MicroMS 343 cu antrenare manuală

Majoritatea mașinilor de măsurat în coordonate dispun de sisteme de antrenare pentru fiecare axă care aduc sistemul de palpate în orice punct al volumului de lucru cu o repetabilitate ridicată. Aceste mașini pot fi controlate numeric de la unitatea de control manual (*Joystick*) sau de către calculator. Pe lângă mașinile de măsurat în coordonate cu comandă numerică, în multe

companii există încă un număr important de mașini, controlate manual. Aceste mașini, în general de generație mai veche, au un design simplu și un volum de măsurare mai mic. În mod normal, ele sunt utilizate pentru sarcini de măsurare scurte, fără nicio pregătire sau pentru un ciclu de măsurare programat în producție.

Mașina TESA MicroMs 343 este o arhitectură de tip portal mobil (Figura 2.2.5a). Structura sa mecanică este realizată din aluminiu. Toate părțile principale, cu excepția ghidajelor și a pinolei, sunt realizate prin turnare. Sistemele de ghidare sunt echipate cu lagăre de aer care utilizează o peliculă subțire de aer sub presiune pentru a asigura o interfață de susținere a ansamblului mobil cu "*frecare zero*" între suprafețe care altfel ar fi în contact una cu cealaltă. Fiind fără contact, lagărele de aer evită problemele tradiționale legate de rulmenți, cum ar fi frecarea, uzura și lubrifierea, și oferă avantaje distincte în aplicațiile de poziționare precisă și la viteze ridicate. Deoarece nu există frecare între suprafețe, mișcarea ansamblurilor mobile ale mașinii (portal, sanie și pinolă) necesită forțe și momente de cuplu mai mici din partea sistemului de antrenare.

Cerințele pentru sistemele de antrenare care vor fi utilizate pentru modernizarea mașinii TESA sunt:

- mișcări silențioase, fără vibrații sau alunecare;
- ușor de montat și demontat pe mașină, pe suprafețele de turnare ale batiului, portalului mobil și a saniei, fără a fi nevoie de prelucrări mecanice de frezare;
- aliniere ușoară și precisă, fără a "deforma" geometria mașinii;
- design compact pentru a se adapta cât mai bine în limita geometriei mașinii;
- întreținere redusă;
- sensibilitate redusă la contaminare cu praf;
- cost redus.

Principalele sisteme de antrenare, utilizate în general pentru a deplasa componentele mobile ale unei mașini de măsurat (portal mobil, sanie și pinolă) sunt:

- sistemul de antrenare cu șurub cu bile;
- sistemul de antrenare cu pinion și cremalieră;
- sistemul de antrenare cu roți de fricțiune;
- sistem de antrenare cu bară și piuliță.

Fiecare dintre aceste sisteme de acționare are avantaje și dezavantaje și sunt utilizate, în funcție de anumite condiții, la diferite tipuri de mașini. În continuare sunt prezentate câteva aspecte ale studiului pe care l-am efectuat referitor la sistemele de antrenare.

Sistemul de antrenare cu șurub cu bile (Figura 2.2.25) este utilizat frecvent pentru a motoriza mașini, datorită gradului său ridicat de precizie la viteze mari de până la 100m/min, rigidității ridicate și stabilității termice, cu vibrații și zgomot redus și design compact. Acest sistem de acționare este ușor și rapid de montat pe mașină. Un dezavantaj al șurubului cu bile este prețul său ridicat.

Sistemul de antrenare cu pinion-cremalieră (Figura 2.2.26) este, în general, o soluție ieftină și poate fi utilizat pentru a deplasa ansamblurile mobile ale mașinii atât pe distanțe mici, cât și pe distanțe lungi. Viteza acestui sistem de acționare este mai mică decât cea a șuruburilor cu bile din cauza vibrațiilor care pot fi introduse în mașină. Pentru a reduce vibrațiile, se pot utiliza pinioane din material plastic (ex. poliamidă). Cremaliera trebuie montată pe suprafețele pieselor fixe ale mașinii cu ajutorul unor șuruburi și știfturi și trebuie să asigure o poziționare precisă în raport cu ghidajele. Având în vedere structura mecanică a mașinii TESA, cremaliera ar putea fi montată doar pe ghidaje, ceea ce este exclus. O altă soluție pentru montare ar putea consta în fixarea cremalierii la ambele capete cu șuruburi (Figura 2.2.26b), soluție realizată de autorul acestei teze. În acest caz, există riscul deformării cremalierii din cauza greutatea acesteia și a forțelor de

acționare a cremalierii-pinion. Pentru a elimina acest inconvenient, se poate monta un contrarulment pe partea opusă a cremalierii. Rotația pinionului va fi asigurată de o transmisie cu curea, care va conduce la creșterea dimensiunilor ansamblului sistemului de antrenare.



Figura 2.2.25. Sisteme de antrenare cu șurub cu bile

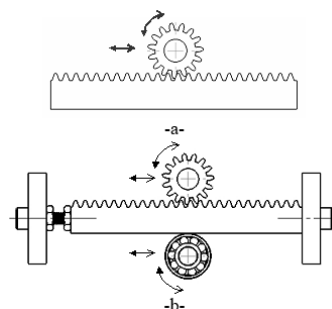


Figura 2.2.26. Sisteme de antrenare cu pinion-cremalieră

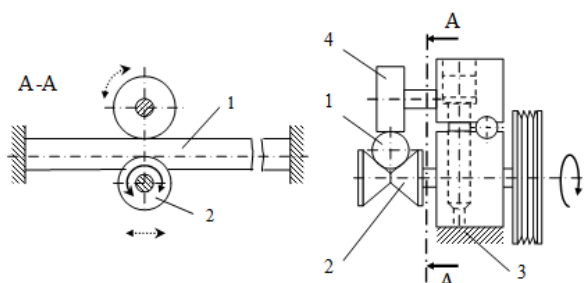


Figura 2.2.27. Sisteme de antrenare cu bară și rolă presoare

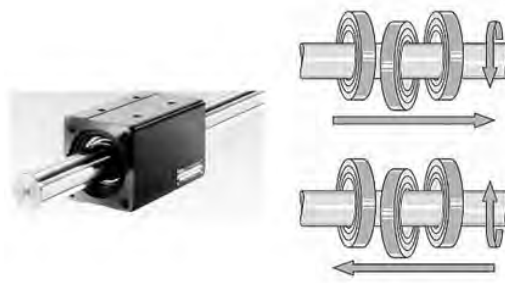


Figura 2.2.28. Sisteme de antrenare cu bară lisă și piuliță

Sistemul de antrenare cu bară și rolă presoare (Figura 2.2.27) este format dintr-o bară rotundă 1 (sau pătrată) fixată la ambele capete cu un șurub și o rolă presoare de fricțiune 2 plasată în ansamblul mobil 3. Fixarea capetelor barei și alinierea acesteia este foarte simplă și ușor de realizat. Presiunea de contact între bară și rolă se realizează cu ajutorul unui contrarulment cu role 4. Acest sistem de antrenare este relativ simplu și este utilizat, în general, pentru axa lungă (X), la mașinile cu braț orizontal. Inconvenientele sistemului constau în uzura în timp a rolei presoare și o dinamică ceva mai redusă datorită riscului de alunecare/patinare a rolei pe bară. Rotația rolei este asigurată de o transmisie cu curea, care conduce la creșterea gabaritului sistemului de antrenare.

Sistemul de antrenare cu bară lisă și piuliță (Uhing) [53] transformă rotația barei lise rotunde într-o mișcare de deplasare a piuliței. Acest efect se obține prin utilizarea în interiorul piuliței a unor inele de rulare care sunt montate în rulmenți cu role și au o suprafață de rulare cu o formă specială (Figura 2.2.28). Aceste inele sunt apăsate pe bară și se rostogolesc pe suprafața barei la un anumit unghi. Caracteristici sistemului:

- fără joc la reversarea mișcării;
- funcționare silențioasă;
- design compact;
- instalarea nu necesită mult spațiu;
- protecție la suprasarcină prin alunecare, împingerea axială poate fi multiplicată prin cuplarea mai multor piulițe;
- sunt disponibile diferite mărimi de pas;
- proprietăți bune de etanșare împotriva prafului, murdăriei, umidității etc.

În urma analizei sistemelor de antrenare descrise mai sus în ceea ce privește relația dintre performanță, designul compact și costul său redus, am ales sistemul de antrenare cu bară lisă și piuliță (Uhing) pentru modernizarea mașinii de măsurat în coordonate TESA MicroMS 343. Având în vedere forțele și cuplurile mici necesare pentru a mișca portalul, sania, pinola și cursele acestora, s-a utilizat o bară cu diametrul de 10 mm (RS 4-10-4) pentru axele X și Z și o bară cu diametrul de 15 mm (RS 4-15-4) pentru axa Y. Forța admisă este $F_a = 200$ N (diametru bară de 10 mm) și viteza de rotație a barei de până la 10000 rot/min, respectiv $F_a = 260$ N (diametru bară de 15 mm) și viteza de rotație a barei de până la 8000 rot/min.

Proiectarea completă s-a realizat cu ajutorul softului Solidworks. Toate piesele (cu excepția pieselor standardizate) au fost realizate din aluminiu și au fost prelucrate pe mașina de frezat CNC ISEL. Sistemele de acționare pentru axele X, Y și Z sunt prezentate în Figura 2.2.29, Figura 2.2.30, Figura 2.2.31, iar "noua" mașină de măsurat în coordonate CNC este prezentată în Figura 2.2.32. Proiectarea sistemelor de antrenare, execuția pieselor prin frezare cât și montarea acestora pe mașina TESA au fost realizate de către autorul acestei teze de abilitare, la compania ICNCMT, Germania.

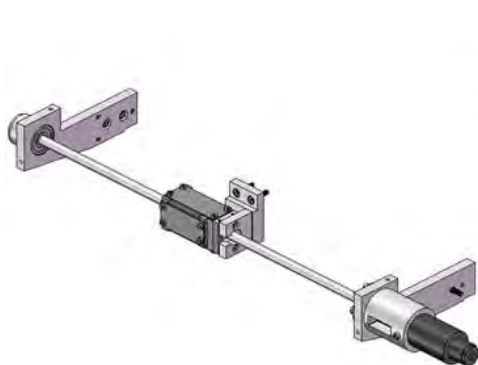


Figura 2.2.29. Sistem de antrenare pe axa X

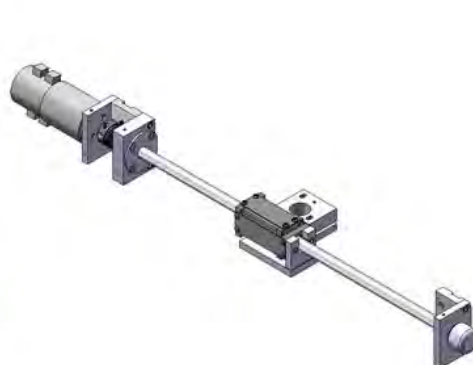
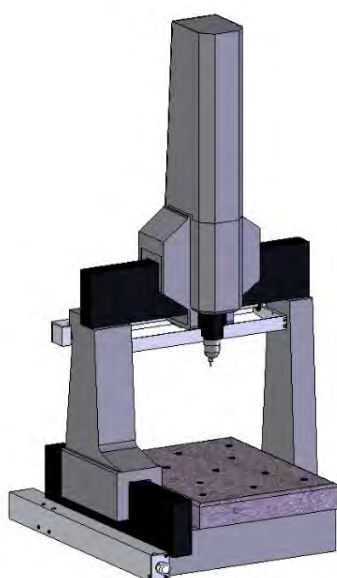


Figura 2.2.30. Sistem de antrenare pe axa Y



Figura 2.2.31. Sistem de antrenare pe axa Z



a)



b)

**poză din laboratorul de Măsurări Tridimensionale –
Departamentul IMF din Universitatea Politehnica Timișoara*

Figura 2.2.32. Mașina de măsurat TESA MicroMs 343 – CNC: a) modelul CAD al mașinii TESA cu sistemele de antrenare liniare; b) Mașina TESA cu sistemele de antrenare montate.

Preluarea forței axiale la accelerare și decelerare s-a realizat cu un rulment radial-axial cu două rânduri de bile cu contact unghiular, fixat la un capăt al barei și un rulment cu bile cu contact radial la celălalt capăt al arborelui. Cele două carcase ale rulmenților sunt montate pe batiu (axa Y), pe suprafețele interioare ale montanților portalului mobil (axa X), în interiorul saniei (axa Z) și sunt fixate cu ajutorul unor șuruburi. Aceste zone ale mașinii, realizate prin turnare, nu sunt suficient de precise pentru a asigura o poziție corectă a sistemului de antrenare. Pentru a contracara acest neajuns, fiecare piesă cu rol de carcasă rulment a fost prevăzută cu 3 șuruburi de reglare, prin intermediul cărora se poate regla poziția piesei de susținere. Capetele acestor 3 șuruburi de reglare intră în contact cu zona de montare de pe mașină. Operația de fixare și aliniere a sistemului de antrenare necesită reglarea poziției șurubului de reglare și a șuruburilor de fixare, în timp ce poziția axei barei este verificată cu ajutorul unui comparator. Abaterea admisă între axa barei și ghidaj este de maxim 0,01mm.

Piulița sistemului de antrenare este fixată pe ansamblul mobil (portal, sanie și pinolă). Din cauza abaterilor de aliniere, sistemul de antrenare poate duce la modificarea "geometriei" mașinii, ale cărei sisteme de ghidare sunt echipate cu lagăre de aer care utilizează o peliculă subțire de aer sub presiune. Pentru a evita acest lucru, piulița este fixată pe ansamblul mobil printr-un ansamblu "dublu paralelogram" ("know-how" Tulcan Aurel-Bernath Alexander) format din două perechi de lamele elastice. Această construcție permite preluarea abaterilor de la paralelism dintre axa barei și ghidaj, în timpul deplasării ansamblului mobil.

Pentru fiecare axă a fost utilizat un motor de curent continuu cu tahogenerator [54]. Transmiterea mișcării de la motor la bara de antrenare s-a realizat prin intermediul unui cuplaj elastic cu burdof [55]. Acesta compensează orice nealiniere între arborele de acționare și motor, cum ar fi: dezaxarea paralelă, dezaxarea unghiulară și mișcarea axială.

În concluzie, aplicarea unei modernizări la o mașină existentă permite adăugarea tehnologiei actuale la o structură mecanică mai veche, economisind bani considerabili față de achiziționarea unei mașini noi. Referindu-ne la TESA MicroMS 343, soluțiile tehnice pentru sistemele de acționare a axelor X, Y și Z permit instalarea și alinierea ușoară a acestora pe structura mecanică originală, fără prelucrări prealabile, cu excepția câtorva găuri filetate (realizate în batiu, montanți și sanie) necesare pentru a le fixa. Noua mașină cu axă motorizată și control CNC, cu controler Renishaw UCC2® și softul de măsurare Quindos7®, execută automat ciclul de măsurare preprogramat și poate fi, de asemenea, comandată manual prin joystick.

2.2.1.5 Cercetări privind concepția unei mașini de măsurat în coordonate cu punte în "L"

În lucrarea [56] se prezintă rezultatele cercetării privind proiectarea unei mașini de măsurat în coordonate cu punte în "L" pe baza principiilor fundamentale de proiectare. În prima parte a acestei cercetări s-a efectuat un studiu referitor la dobândirea și dezvoltarea cunoștințelor despre proiectarea unei mașini CMM. Sunt prezentate principalele aspecte de proiectare mecanică în vederea obținerii unei precizii ridicate de poziționare și de măsurare și sunt atribuite două obiective principale: o *repetabilitate ridicată* (proiectare pentru repetabilitate) și o *predictibilitate ridicată* a răspunsului mașinii la principalele surse de eroare (proiectare pentru predictibilitate).

Pe piață este disponibilă o varietate de arhitecturi de mașini: cu portal, în consolă, cu coloană, pod rulant, braț orizontal și braț articulat (Figura 2.2.5). Fiecare configurație are avantaje care o fac mai potrivită pentru o anumită aplicație. Pentru a efectua sarcini de măsurare cu o flexibilitate mare și o precizie ridicată, a fost proiectată o nouă mașină de măsurat în coordonate. Arhitectura mașinii de măsurat în coordonate este cu punte în "L", cu un domeniu de măsurare de 500x600x400 mm. La proiectarea mașinii CMM 564 s-au avut în vedere următoarele obiective:

- incertitudine de măsurare volumetrică mai mică de $2,5 \mu\text{m}$;
- volum de măsurare de $500 \times 600 \times 400 \text{ mm}$;
- viteza maximă pe fiecare axă a mașinii de 300 mm/s ;
- Costuri accesibile.

a) Principalele considerente de proiectare

În etapa de proiectare a unei mașini, dobândirea și dezvoltarea cunoștințelor privind proiectarea mașinilor de înaltă precizie este foarte importantă. În cele mai multe cazuri, structura mecanică a unei mașini este reprezentarea fizică a unui sistem de referință cartezian și poate fi caracterizat prin doi parametri: *dimensiuni* și *arhitectură*. Dimensiunile determină anvelopa de măsurare a structurii mecanice și pot influența arhitectura mașinii, incertitudinea de măsurare, reacția structurii mecanice la gradienti termici etc. Arhitectura este în mod fundamental funcție de dimensiunile structurii mecanice și este concepută pentru a optimiza: performanța dinamică a mașinii, caracteristicile metrologice ale acesteia, accesibilitatea la suprafețele piesei care urmează să fie măsurată, ergonomia și costurile. În cazul arhitecturilor consolidate, una dintre tendințele actuale este de a maximiza rigiditatea structurii mecanice, reducând masa relevantă, pentru a obține cea mai mare accelerație posibilă, astfel încât să se îmbunătățească parametrii dinamici ai mașinii.

Aspectele de proiectare mecanică pentru o mașină de măsurat de precizie formulate în [57-62] oferă o descriere cuprinzătoare a principalelor aspecte mecanice pentru a obține o precizie ridicată de poziționare și măsurare. Principalele obiective de proiectare pentru a obține o incertitudine de poziționare sau de măsurare redusă sunt *proiectarea pentru repetabilitate* și *proiectarea pentru predictibilitate*.

Repetabilitatea, definită ca "rezultatele aceleiași acțiuni a mașinii efectuate în aceleași condiții sunt egale", este esențială pentru modelarea predictivă. Proiectarea pentru repetabilitate necesită, în principal, proiectarea pentru o rigiditate ridicată, cu utilizarea eficientă a materialului și reducerea la minimum a histerezisului în asamblarea pieselor, maximizarea rigidității sistemelor de legătură și rulmenți, optimizarea performanțelor sistemelor de acționare și control, stabilitatea termică a mașinii și o izolare adecvată împotriva vibrațiilor.

Proiectarea pentru predictibilitate înseamnă o predictibilitate ridicată a răspunsului mașinii la principalele surse de eroare. Pentru a prezice erorile dimensionale ale componentelor este necesară o înțelegere completă a comportamentului mașinii. Abaterile privind comportamentul cinematic, efectele termice, static, dinamic și al sistemului de control reprezintă cele cinci surse de eroare care determină precizia mașinii.

Cerințele dinamice ale mașinii se referă la întreaga buclă metrologică și structurală, definită ca "un ansamblu de componente mecanice, care mențin poziția relativă între obiecte specificate", nu doar la mecanica mașinii. În majoritatea cazurilor, sistemul de măsurare al unui sistem în buclă închisă, din cauza limitărilor fizice, este inevitabil amplasat la o anumită distanță față de palpator. Pentru a avea un design cu o buclă structurală bună, traseul dintre sistemul de măsurare și palpator trebuie să fie cât mai rigid posibil pentru a minimiza abaterile. Datorită faptului că structura mecanică a unei mașini are o rigiditate finită, geometria se va modifica sub sarcină și poate afecta performanța mașinii în cazul deplasării ansamblurilor (piese în accelerare), atunci când se schimbă sarcina, ca poziție și dimensiune. În cazul în care sistemele de antrenare nu acționează în linie cu centrul de greutate al ansamblului mobil, forțele de inerție provoacă rotații ale pieselor mașinii. Efectele dinamice pot juca un rol major în comportamentul mașinii. Pentru a reduce erorile dinamice de poziționare, se recomandă ca piesele să fie proiectate pentru forțe minime și, în cazul translației, masa să fie menținută la un nivel mic și să fie antrenată cât mai aproape posibil de axele de reacție. O bună proiectare a mașinii are o încărcare uniform distribuită. Erorile dinamice pot fi prezise și compensate, cu ajutorul unor modele corecte.

b) Design-ul mașinii CMM 564

Design-ul mașinii CMM 564 este prezentat în Figura 2.2.33. Această mașină are două componente în formă de portal. Unul dintre aceste portaluri este format din două coloane și o traversă fixată pe montanți față de batiul mașinii. Cealaltă punte, care are forma unui "L inversat", se deplasează de-a lungul traversei Y a portalului fix, în lungul ghidajelor, iar montantul opus se sprijină pur și simplu pe ghidajul mesei, situate în partea stângă a batiului mașinii. Structura mecanică a mașinii (batiu, portal fix și puntea în L mobilă) este realizată din granit, iar pinola este, de asemenea, realizată din granit. Granitul este ales datorită coeficientului său scăzut de dilatare termică, $7,2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, a stabilității dimensionale seculare excelente și, de asemenea, este relativ ieftin.

Pieseile principale ale săniilor sunt construite din aliaje de aluminiu. Deplasarea ansamblelor mobile pe ghidaje se face cu ajutorul lagărelor de aer, care asigură "zero frecare". Toate elementele de legătură dintre ansamblele mobile și lagărele de aer sunt realizate din oțel și sunt reglabile. Domeniul de măsurare (XxYxZ) este de 500x600x400 mm. În plus, mașina este echipată cu un sistem de palpare cu declanșare care constă într-un cap de măsurare cu un palpator cu lungimea de 10 mm și diametrul sferei de palpare de 2 mm.

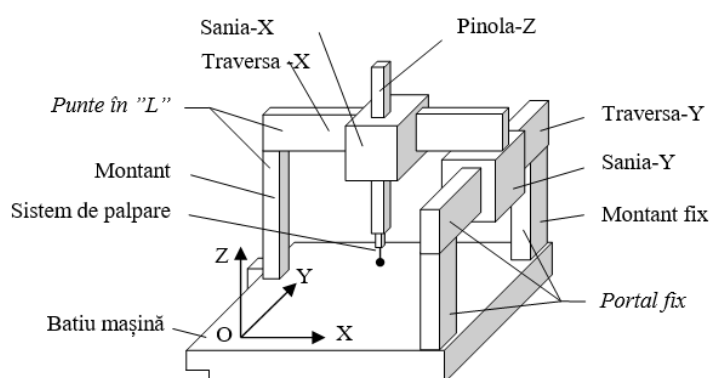


Figura 2.2.33. Design-ul mașinii 564

c) Analiza erorilor dinamice ale mașinii

Analiza erorilor dinamice ale mașinii pentru o arhitectură cu punte în "L" a evidențiat două tipuri de erori dinamice: erori de înclinare și de răsucire a punții [63]. Eroarea dinamică de rotație a punții în "L" este, de obicei, cel mai semnificativ factor. În cazul mașinii cu punte "L", forța de antrenare este aplicată pe sania-Y (Figura 2.2.34, Figura 2.2.35), într-o poziție mai apropiată de centrul de greutate, în comparație cu o mașină cu portal mobil. Acest lucru ar putea reduce înclinarea punții în "L" în timpul deplasării, permițând accelerații și decelerații mai mari.

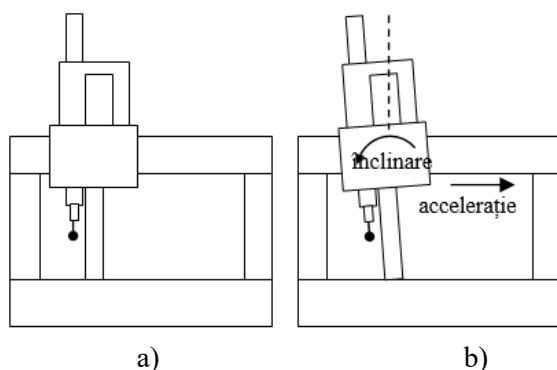


Figura 2.2.34. Eroare de înclinare la mașină cu punte în "L": a) staționară sau viteză constantă; b) în timpul accelerării.

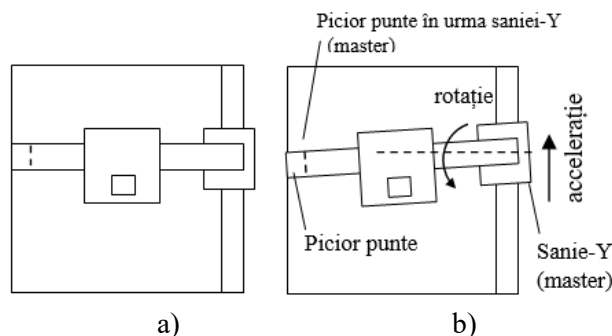


Figura 2.2.35. Eroare de rotație la mașină cu punte în "L": a) staționară sau viteză constantă; b) în timpul accelerării.

În continuare, în cadrul acestei lucrări se prezintă eroarea dinamică a unui model virtual (CAD) de mașină cu punte în formă de "L". Analiza cu elemente finite (FEA) a fost utilizată pentru a calcula deformația totală a structurii mecanice și, în special, deplasarea totală a vârfului palpatorului cauzată de accelerarea punții în formă de "L". Pentru a investiga efectul celor patru parametri asupra deplasării totale a vârfului palpatorului, așa cum se arată în Tabelul 2.2.3, a fost creat în Statgraphics un experiment factorial de tip *screening* 2^4 [64], cu 4 factori de influență și două niveluri de variație pentru fiecare factor. Pozițiile X, Y și Z reprezintă poziția minimă/maximă a palpatorului, conform sistemului de coordonate prezentat în Figura 2.2.33. Datorită simetriei portalului fix, nivelul maxim al poziției pe axa Y a palpatorului este luat în mijlocul axei Y. Cele 16 combinații de factori au fost luate în ordine aleatorie.

Tabel 2.2.3 Niveluri ale factorilor de influență

Factori		Niveluri	
		Minim	Maxim
(A) Poziție-X	[mm]	0	500
(B) Poziție-Y	[mm]	0	300
(C) Poziție-Z	[mm]	0	400
(D) Accelerație	[mm/s ²]	10	500

Puntea în "L" (incluzând sania-X și pinola-Z) a fost accelerată (Figura 2.2.36a) în lungul traversei-Y în direcția +Y a sistemului de referință OXYZ al mașinii pentru diferite poziții ale sistemului de palpate și diferite accelerații. Pentru fiecare componentă a mașinii a fost selectat materialul adecvat. În Figura 2.2.36b se prezintă deformația totală a mașinii pentru o poziție a sistemului de palpate în anvelopa de măsurare. În cadrul lucrării publicate au fost prezentate doar aceste figuri reprezentative, studiul fiind ceva mai amplu.

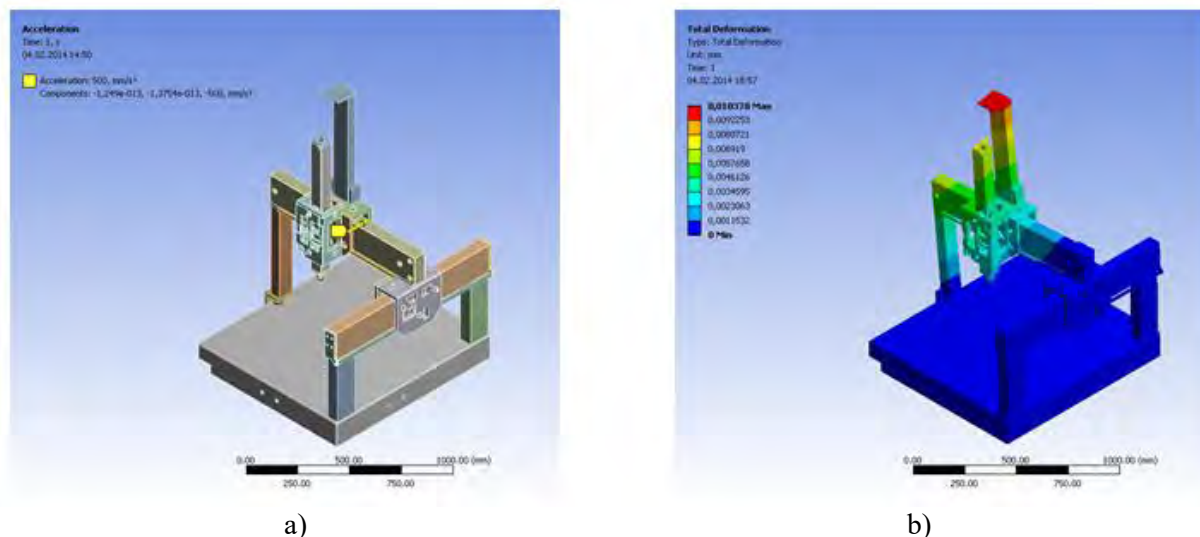


Figura 2.2.36. Analiza cu elemente finite a structurii mecanice cu punte în "L"

Rezultatele analizei dispoziționale (ANOVA) pentru deplasarea palpatorului sunt prezentate în Tabelul 2.2.4. Deoarece valoarea lui $P < \alpha = 0,05$ (puterea studiului), cu un nivel de încredere de 95% se poate spune că poziția-X (A), accelerația (D) și interacțiunea AD sunt factorii care prezintă un impact semnificativ asupra deformației totale a mașinii, măsurate la vârful palpatorului. Coeficientul de corelație R^2 indică faptul că modelul de regresie aplicat are o potrivire bună. R^2 ajustat, care este mai potrivit pentru compararea modelelor cu un număr diferit de variabile independente, este de 99,57%. R^2 ajustat implică faptul că modelul de regresie pare să aibă o adecvare satisfăcătoare.

Tabel 2.2.4 Analiza dispersională pentru deplasare palpator

Sursa	Suma pătratelor SS	Grade de libertate Df	Media pătratelor MS	Raport -F	Valoare-P
A:X-axis	84,7504	1	84,7504	649,97	0,0000
B:Y-axis	0,222312	1	0,222312	1,70	0,2485
C:Z-axis	0,317532	1	0,317532	2,44	0,1794
D:Acc	283,99	1	283,99	2177,97	0,0000
AB	0,0775622	1	0,0775622	0,59	0,4754
AC	0,55577	1	0,55577	4,26	0,0939
AD	84,7504	1	84,7504	649,97	0,0000
BC	0,000196	1	0,000196	0,00	0,9706
BD	0,222312	1	0,222312	1,70	0,2485
CD	0,317532	1	0,317532	2,44	0,1794
Total error	0,65196	5	0,130392		
Total (corr.)	455,856	15			

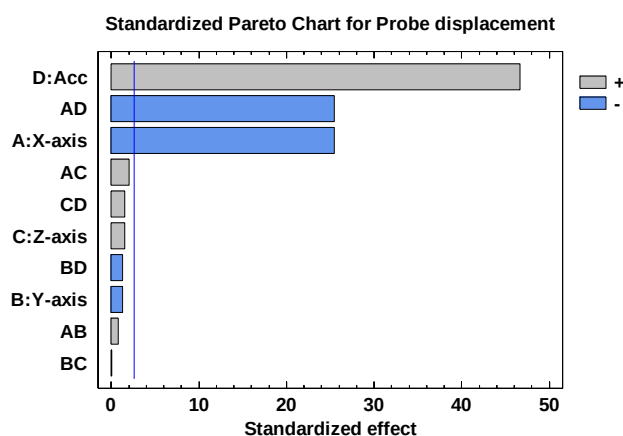
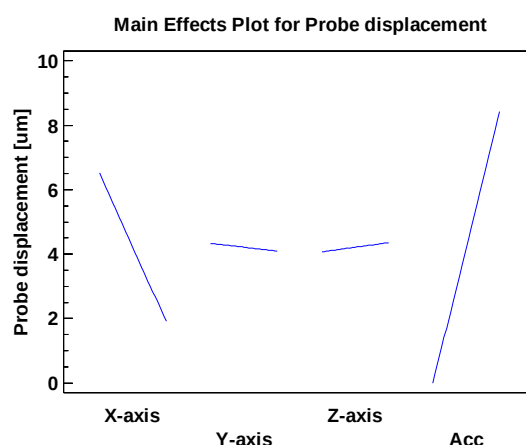
R-pătrat = 99,857 %

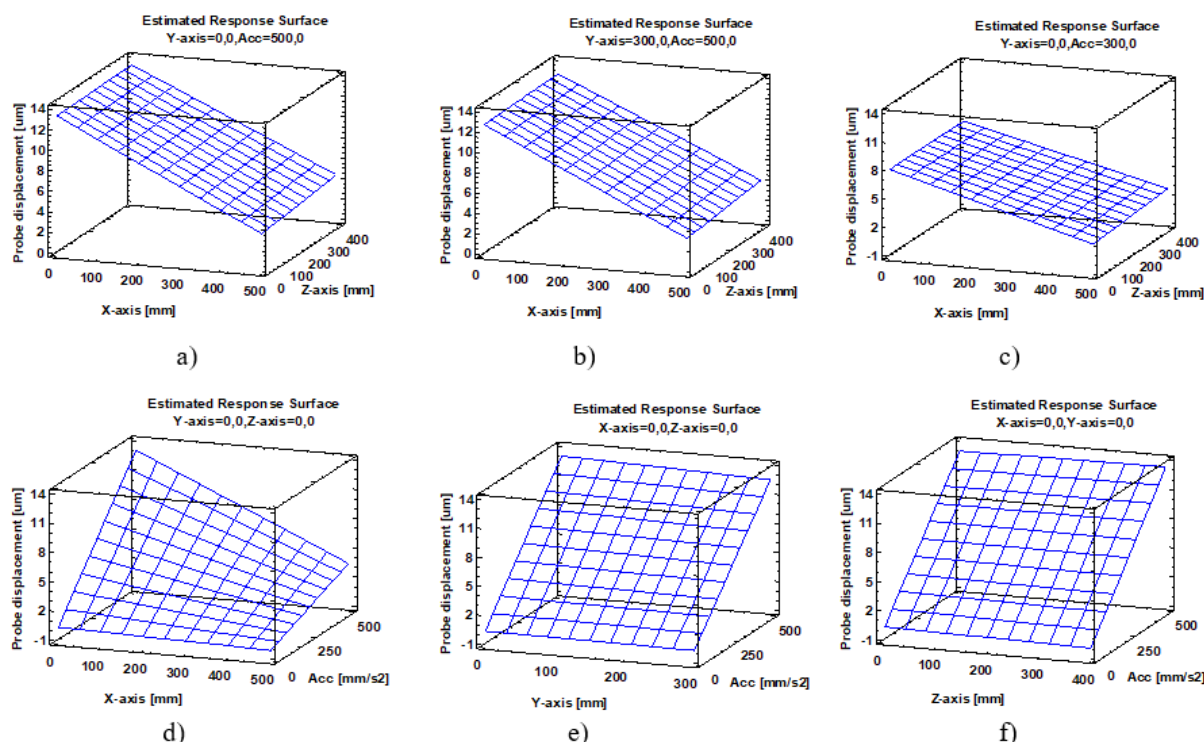
R-pătrat ajustat pentru d.f. = 99,5709 %

Ecuția de regresie a deplasării palpatorului este prezentată în (2.2.1).

$$PD_{Yacc} = 0,2525 - 0,001024*X - 0,000440833*Y - 0,000914375*Z + 0,025966*A + 0,00000185667*X*Y + 0,0000037275*X*Z - 0,000036824*X*A - 1,16667E-7*Y*Z - 0,00000314333*Y*A + 0,0000028175*Z*A. \quad (2.2.1)$$

În Figura 2.2.37 și Figura 2.2.38 se prezintă diagrama Pareto și diagrama efectelor principale pentru deplasarea palpatorului. În Figura 2.2.39 este prezentată suprafața de răspuns pentru deplasarea palpatorului. Pe baza Figurilor 2.2.37, 2.2.38, și 2.2.39 se pot face următoarele observații. Deplasarea saniei X de la poziția zero la cursa X maximă a condus la o reducere a deformației totale a palpatorului. Ceilalți doi factori Y și Z au o influență aproape nesemnificativă asupra deformației totale a mașinii. Accelerația are cea mai mare influență asupra deformației totale a structurii mecanice.

**Figura 2.2.37.** Diagrama Pareto**Figura 2.2.38.** Diagrama efectelor principale



Legendă: *Estimated Response Surface*=Suprafață de răspuns estimată; *Probe displacement* = deplasare palpator; *Acc* = accelerație; *X-axis* = axa X; *Y-axis* = axa Y; *Z-axis* = axa Z.

Figura 2.2.39. Suprafața de răspuns a deplasării palpatorului

În timpul palpării punctului pe suprafața piesei, părțile mobile ale mașinii se deplasează, după rampa de decelerare (Figura 2.2.10), cu o viteză de măsurare constantă, într-o funcționare cvasi-statică bazată pe senzorul cu declanșare, pentru a evita erorile dinamice ale structurii mecanice ale mașinii, minimizând efectul negativ al accelerației asupra preciziei măsurătorilor. Acest lucru va crește durata ciclurilor de măsurare. Din cauza limitei de pagini, erorile dinamice cauzate de deplasarea căruciorului X și a pinolei Z, care sunt mult mai mici decât eroarea cauzată de deplasarea punții, nu au fost prezentate în lucrarea [56].

În final se poate concluziona că a fost propusă o metodologie de aplicare a metodei de proiectare a experimentelor (DOE) și a analizei cu elemente finite (FEA) la studiul deformării totale a punții în "L" a mașinii. Analiza cu elemente finite a întregului sistem al mașinii a fost utilizată pentru a prezice comportamentul structural dinamic al mașinii în diferite condiții de încărcare. FEA a avut ca scop determinarea raportului de deformare totală a mașinii la diferite accelerații ale punții în "L" în mișcare. Experimentul factorial ("screening") a avut ca scop identificarea factorilor importanți din punct de vedere statistic care afectează deformarea totală a mașinii. Analiza dispersională (ANOVA) a fost utilizată pentru a studia efectul fiecărui factor și interacțiunile dintre factori. În cele din urmă, a fost stabilit un model matematic al deformării totale a structurii mecanice, care va fi comparat cu erorile dinamice măsurate experimental ale prototipului mașinii CMM 564 (Figura 2.2.40). Prototipul a fost realizat de către compania Industrielle CNC-und Messtechnik, Germania și Nova Grup Cugir, România, pe baza proiectului și a documentației grafice întocmite de autorul acestei teze de abilitare.



Figura 2.2.40. Prototipul mașinii CMM 564 cu punte în ”L”

*poză realizată în anul 2012, la Târgul Internațional București (TIB 2012)
(proiect realizat integral de autorul acestei teze de abilitare).

2.2.2 Evaluarea preciziei mașinilor de măsurat în coordonate cu sistem de palpare tactil

2.2.2.1 Cercetări privind rolul măsurării tridimensionale în asigurarea calității

În lucrarea [65] se prezintă principalele aspecte privind rolul măsurării tridimensionale în asigurarea calității. Precizia unei mașini de măsurat în coordonate este foarte importantă pentru a fi cunoscută în vederea obținerii unor rezultate de calitate la măsurarea piesei. În prima parte sunt prezentate principalele aspecte privind mașinile de măsurat în coordonate, factorii care influențează precizia măsurării și evaluarea sistemului de măsurare tridimensională.

Mașinile de măsurat în coordonate sunt considerate cele mai moderne echipamente de control. În prezent, peste 80% din controlul pieselor de lucru se realizează cu ajutorul acestor mașini. La definirea unei mașini de măsurat, atributele esențiale sunt: precizia, timpul de măsurare, datele de măsurare și costurile.

Când vorbim despre evaluarea unui sistem de măsurare, ne punem adesea întrebarea: de ce să verificăm acuratețea sistemului de măsurare? Răspunsul la această întrebare poate fi [66]:

- pentru a verifica dacă sistemul funcționează așa cum este garantat:
 - testul de acceptare;
 - recertificarea anuală a sistemului;
 - teste intermediare;
- pentru a compara precizia sistemului cu toleranța piesei;
 - este sistemul adecvat pentru a rezolva sarcina de măsurare?
 - optimizarea performanțelor sistemului;
- pentru a compara sistemele de măsurare;
 - ce sistem este cel mai bun pentru a rezolva problemele specifice?
 - cum se pot compara sistemele atunci când definițiile performanțelor și metodele de testare nu sunt aceleași?

Cei mai utilizați parametri de precizie [67,68] sunt:

- *Repetabilitatea* - variația măsurărilor obținute cu o mașină de măsurat atunci când este utilizată de mai multe ori de către un operator;
- *Reproductibilitatea* - variația în media măsurărilor efectuate de către diferiți operatori care utilizează aceeași mașină;
- *Bias* - diferența dintre media observată a măsurărilor și valoarea de referință;
- *Stabilitate* - variația măsurărilor obținute atunci când se măsoară o singură caracteristică pe o perioadă de timp îndelungată.

Procedura de verificare trebuie să includă toate sursele de erori (Figura 2.2.2). Principalele surse de erori sunt:

- eroarea senzorului;
- erori de palpare;
- erori algoritmice;
- erori datorate operatorului;
- mediul înconjurător.

În a doua parte a lucrării a fost prezentată modalitatea de evaluare și rezultatele privind precizia (BIAS), repetabilitatea și reproductibilitatea mașinii de măsurat în coordonate TESA MicroMS 343 cu antrenare manuală.

TESA Micro-MS 343 este o mașină de măsurat în coordonate cu portal mobil cu antrenare manuală (Figura 2.2.41). Sistemul de palpare (Renishaw) instalat în pinola-Z este compus din:

- cap de măsurare cu acționare manuală PH1;
- senzor de contact cu declanșare TP2 cu 5 direcții de palpare ($\pm X, \pm Y, +Z$);

- palpator cu element de palpăre sferic din rubin cu diametrul sferei de rubin de 4 mm, lungimea tijei palpatorului din oțel de 14 mm și diametrul tijei de 2 mm. Palpatorul se instalează în senzorul de contact cu declanșare TP2 prin înșurubare.
- sferă etalon pentru calibrarea palpatorului.

Softul de măsurare utilizat a fost Quindos V3.3, de la compania Leitz.

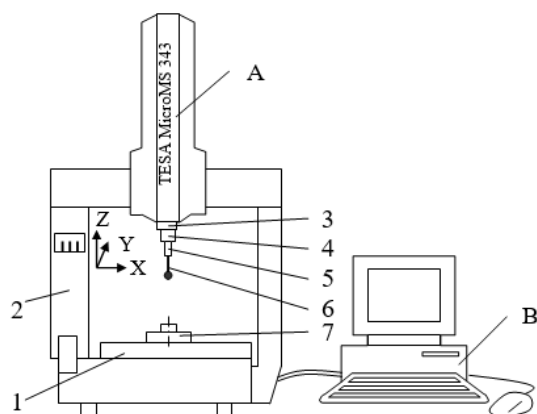


Figura 2.2.41. Descriere mașină TESA-manuală:

A – mașina de măsurat TESA; B - dulap electronic și unitatea de calcul;

1-masă din granit; 2-portal mobil; 3-pinolă; 4-cap de măsurare; 5-senzor; 6-palpator; 7-piesa de lucru.

a) Rezultate experimentale

La realizarea experimentului au fost folosite piese de formă cilindrică. Pentru fiecare piesă s-a măsurat diametrul într-o secțiune circulară prin palparea a opt puncte echidistante. Etapele parcurse la măsurarea piesei sunt prezentate în Figura 2.2.42. Pentru studiul repetabilității și reproductibilității au fost măsurate zece piese, de către operatorii A, B, C (Tabelul 2.2.5), de trei ori. Pentru studiul de liniaritate (BIAS) au fost măsurate cinci piese (interval de lungime: 60-100 mm) cu lungimi cunoscute, de zece ori (Tabelul 2.2.6).

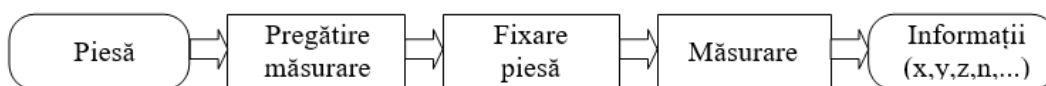


Figura 2.2.42. Etape necesare la măsurarea piesei

Tabelul 2.2.5 Rezultate experimentale pentru repetabilitate / reproductibilitate (R&R)

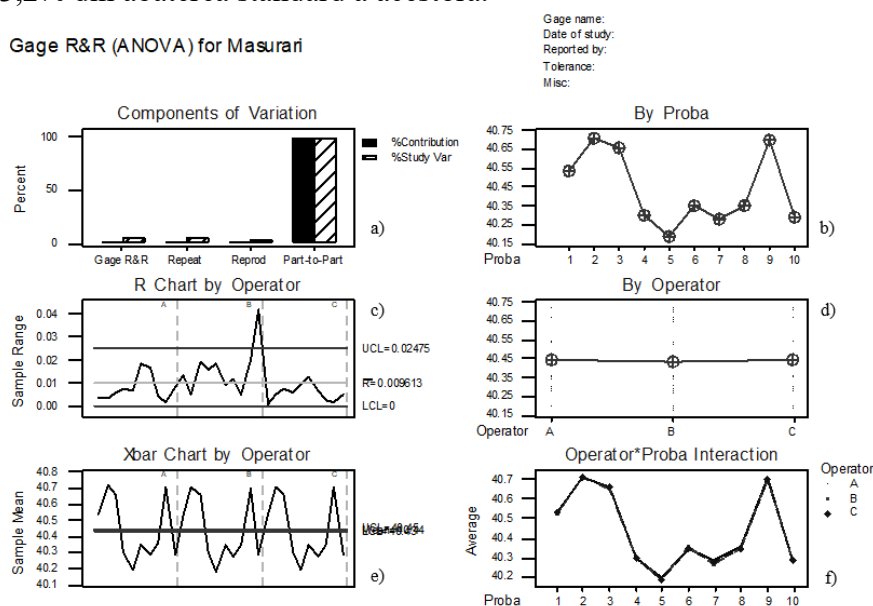
Piese	Operator / Măsurători								
	A			B			C		
1	40,5403	40,5376	40,5371	40,5365	40,5332	40,5324	40,5397	40,5403	40,5408
2	40,7231	40,7215	40,7201	40,7184	40,7131	40,7173	40,7158	40,7183	40,7209
3	40,6691	40,6678	40,6636	40,6507	40,6576	40,6697	40,6634	40,6697	40,6624
4	40,2987	40,2912	40,2957	40,3014	40,2871	40,3028	40,2954	40,2983	40,2925
5	40,1882	40,1946	40,1934	40,1708	40,1795	40,1887	40,1844	40,1932	40,1878
6	40,3563	40,3383	40,3481	40,3460	40,3494	40,3548	40,3432	40,3557	40,3457
7	40,2805	40,2933	40,2769	40,6285	40,2594	40,2713	40,2732	40,2785	40,2797
8	40,3500	40,3539	40,3516	40,3393	40,3446	40,3445	40,3447	40,3429	40,3427
9	40,7176	40,7177	40,7192	40,6941	40,7039	40,7142	40,7105	40,7089	40,7097
10	40,2770	40,2852	40,2826	40,2837	40,3028	40,2612	40,2821	40,2832	40,2874

Tabelul 2.2.6 Rezultate experimentale pentru liniaritate / BIAS

Piese	Măsurători									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	100,0684	100,0707	100,0678	100,0685	100,0679	100,0664	100,0676	100,0660	100,0688	100,0706
II	90,0581	90,0520	90,0596	90,0522	90,0554	90,0604	90,0586	90,0561	90,0602	90,0594
III	80,0543	80,0586	80,0569	80,0576	80,0569	80,0560	80,0571	80,0584	80,0560	80,0558
IV	70,0470	70,0481	70,0467	70,0455	70,0468	70,0459	70,0463	70,0470	70,0483	70,0471
V	60,0412	60,0428	60,0457	60,0468	60,0434	60,0468	60,0446	60,0423	60,0444	60,0438

b) Evaluare rezultate**b1) Repetabilitate și reproductibilitate (R&R):**

Datele experimentale au fost prelucrate cu ajutorul pachetului software MINITAB [69]. Graficul din Figura 2.2.43a arată că repetabilitatea și reproductibilitatea (R&R) este mai mică decât dispersia pieselor care au fost măsurate. Acest lucru este evidențiat și mai mult de tabelul R&R (Tabel 2.2.7) în care se poate observa că repetabilitatea este de 0,1% din dispersia pieselor măsurate și de 3,2% din abaterea standard a acestora.

Gage R&R (ANOVA) for Masurari

Legendă: Gage R&R (ANOVA) for Masurari=Repetabilitate și reproductibilitate pentru măsurări;
 Percent=procent; Components of variation=componente ale dispersiei;
 Sample Range=amplitudine eșantion; R chart by Operator=diagrama R pentru operator;
 Sample Mean=medie eșantion; Xbar by Operator=diagrama medie aritmetică pentru operator.

Figura 2.2.43. Diagrame studiu repetabilitate și reproductibilitate (R&R)

Reproductibilitatea este de 0,03% din dispersia pieselor și de 1,58% din abaterea standard a pieselor. R&R împreună este de 0,13% din dispersia pieselor și de 3,57% din abaterea standard a pieselor.

Toate datele de mai sus arată că R&R a mașinii de măsurat TESA Micro-MS 343 este mai mică de 20%, valoarea limită până la care se poate aprecia că un sistem de măsurare este foarte bun pentru a fi utilizat în procesul de măsurare a acestor piese. Numărul de categorii distincte pe care sistemul de măsurare le poate observa la aceste piese de lucru este de 39. Această valoare este mai mare decât cinci, care este limita minimă pentru un sistem de măsurare bun.

Tabel 2.2.7 Repetabilitate și reproductibilitate (R&R)

Sursă	DispComp	%Contribuție (DispComp)	
Total R&R	0.000052	0.13	
Repetabilitate	0.000042	0.10	
Reproductibilitate	0.000010	0.03	
Operator	0.000010	0.03	
De la piesă la piesă	0.040438	99.87	
Total Dispersie	0.040489	100.00	
Sursă	Deviație standard (SD)	Studiu Disp 5.15*SD	%Studiu Disp (%SD)
Total R&R	0.007189	0.03703	3.57
Repetabilitate	0.006445	0.03319	3.20
Reproductibilitate	0.003187	0.01641	1.58
Operator	0.003187	0.01641	1.58
De la piesă la piesă	0.201091	1.03562	99.94
Total Dispersie	0.201220	1.03628	100.00
Număr categorii distincte = 39			

Figura 2.2.43c arată că există unele diferențe semnificative între operatori, chiar dacă Figura 2.2.43d nu subliniază acest lucru. Acest lucru poate fi explicat prin precizia ridicată a mașinii de măsurat, astfel încât diferențele mici dintre operatori au devenit semnificative la acest nivel. Cea mai mică variație a fost pentru operatorul C și cea mai mare pentru operatorul B. Diferența de semnificație între operatori poate fi observată în tabelul ANOVA. Există o valoare $p=0,00302$ în cazul cu interacțiune operator-piesă (Tabelul 2.2.8) și $p=0,00052$ în cazul fără interacțiune (Tabelul 2.2.9). În ambele cazuri, valoarea $p < 5\%$, deci este evident că există diferențe semnificative între modul de măsurare al operatorilor.

Figura 2.2.43f și tabelul ANOVA cu interacțiuni (Tabelul 2.2.8) arată că nu există o interacțiune semnificativă între operator și piesele măsurate. Valoarea $p=0,44262$ este mai mare de 5%, astfel încât această interacțiune nu are o influență semnificativă.

Figura 2.2.43e prezintă toate punctele de măsurare în afara limitelor din grafic, ceea ce justifică faptul că sistemul de măsurare este adecvat pentru măsurarea acestor piese.

Tabelul 2.2.8 Studiul R&R - ANOVA cu două direcții cu interacțiuni

Sursa	DF	SS	MS	F	P
Proba	9	3.27583	0.363981	8570.97	0.00000
Operator	2	0.00069	0.000346	8.15	0.00302
Operator*Proba	18	0.00076	0.000042	1.03	0.44262
Repetabilitate	60	0.00248	0.000041		
Total	89	3.27976			

Tabelul 2.2.9 Studiul R&R - ANOVA cu două direcții fără interacțiuni

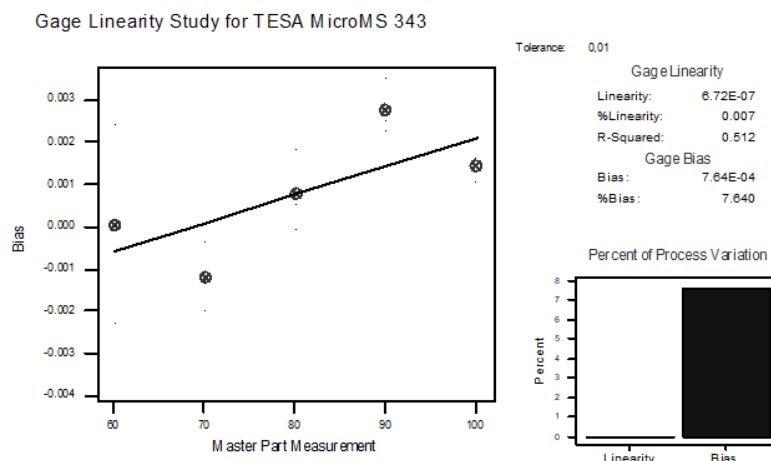
Sursa	DF	SS	MS	F	P
Proba	9	3.27583	0.363981	8763.33	0.00000
Operator	2	0.00069	0.000346	8.33	0.00052
Repetabilitate	78	0.00324	0.000042		
Total	89	3.27976			

b2) Studiu de liniaritate și BIAS

La măsurare au fost utilizate piese ale căror valori efective au fost stabilite cu un sistem de măsurare mai precis. Piesele de lucru utilizate au avut valori efective în intervalul [60, 100] mm. Pe baza acestor valori s-a calculat valoarea BIAS, cu ajutorul softului MINITAB.

Cu aceleași măsurători poate fi calculată și liniaritatea mașinii de măsurat. Liniaritatea este variația erorii sistematice (Bias) într-un interval dat (dispersia naturală a procesului sau domeniul de măsurare a sistemului de măsurare). Liniaritatea permite corelațiile multiple ale erorilor sistematice independente (Bias) în intervalul dat.

Figura 2.2.44 arată că liniaritatea sistemului de măsurare este foarte bună. Aceasta este prezentată ca procent din intervalul analizat, iar valoarea sa este $L = 0,007\%$. Pentru experimente a fost luat un proces de fabricație cu un câmp de toleranță $T = 0,01$ mm. În aceste condiții, mașina de măsurare a avut o eroare sistematică (BIAS) $B = 7,64\%$, ceea ce reprezintă o valoare foarte bună.



Legendă: *Gage Linearity Study for TESA MicroMS 343*=studiu liniaritate pentru TESA MicroMS 343;
Master part measurement=măsurare piesă etalon; *Linearity*=liniaritate;
Percent of proces Variation=procent din dispersia procesului; *Tolerance*=toleranță

Figura 2.2.44. Studiul liniarității și BIAS

În final se poate concluziona că verificările de precizie trebuie să includă toate sursele de eroare, în special erorile geometrice și de palpate. Verificările de precizie trebuie să fie efectuate prin aceleași proceduri de măsurare, cu aceiași operatori și în același mediu ca și măsurătorile zilnice normale. La măsurarea pe o mașină manuală ar trebui să se aplice o metodă de măsurare de precizie bine definită.

2.2.2.2 Cercetări privind incertitudinea de măsurare a mașinilor de măsurat în coordonate

În lucrarea [70] se prezintă un studiu privind incertitudinea de măsurare a mașinilor de măsurat în coordonate, cu raportare la mașina TESA MicroMS 343-CNC. La utilizarea unei mașini de măsurat în coordonate (CMM) pentru a măsura o piesă, mulți factori afectează incertitudinea de măsurare. Precizia unei mașini de măsurat în coordonate este foarte importantă pentru a fi cunoscută pentru măsurarea cu precizie a unei piese. Rezultatul unei măsurători este doar o aproximare a valorii mărimii raportate și nu este complet fără a fi însoțit de o declarație cantitativă a incertitudinii sale.

În trecut, au fost efectuate o serie de studii în domeniul incertitudinii CMM. Unele dintre acestea s-au concentrat asupra îmbunătățirii preciziei prin dezvoltarea de hard, soft și strategii de operare, iar unele studii au aplicat planificarea experimentelor ("Design of Experimente") pentru a studia incertitudinea de măsurare [71-74]. Cercetările efectuate în [71] s-au ocupat de poziția (x, y) și de diametrul unei găuri. În cercetarea noastră din această lucrare [70] s-a prezentat o metodologie de estimare a incertitudinilor de măsurare CMM pentru localizarea unei sfere (x, y, z), diametrul și forma unei sfere.

Procesul de măsurare realizat cu ajutorul unei mașini de măsurat în coordonate (CMM), ca orice alt proces, poate fi reprezentat ca în Figura 2.2.45. Figura arată că rezultatul dorit al procesului de măsurare poate fi atins printr-o bună setare a factorilor controlabili, chiar și atunci când asupra mașinii de măsurat în coordonate acționează unii factori de zgomot, numiți factori necontrolabili. Scopul acestui experiment a fost de a investiga efectul unor factori controlabili asupra incertitudinii unei măsurii.

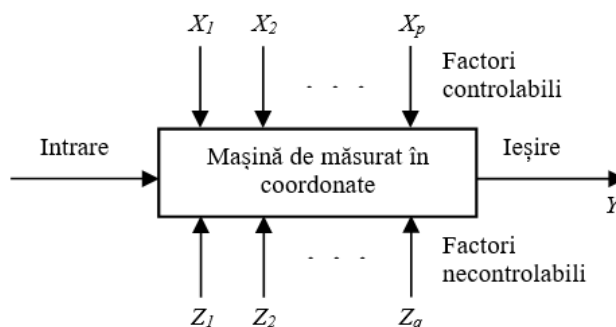


Figura 2.2.45. Modelul general al procesului de măsurare

Mașina de măsurat în coordonate utilizată pentru studiile experimentale este o mașină cu portal mobil - TESA Micro-MS 343 CNC, motorizată de către autorul acestei teze [52]. Această mașină (Figura 2.2.46a) este echipată cu un sistem de palpate (Renishaw) care constă din:

- cap de măsurare cu indexare manuală MH20i, reglabil după 2 axe (Figura 2.2.46b): unghi de elevație $A=0^\circ \dots 90^\circ$ și unghi de azimut $B=\pm 180^\circ$. Repetabilitatea pozițională (2σ) este de $1,5\mu\text{m}$ la vârful palpatorului, cu modul senzor TP20 SF (forță standard) și palpatoare de 10 mm.
- senzor de contact cu declanșare cu 5 căi TP20 cu modul senzor de forță standard (SF);
- palpator cu filet M2 cu sferă din rubin cu diametrul de 2 mm și lungimea de 20mm.

Sfera de referință (etalon) utilizată pentru calibrarea palpatorului în diferite poziții este o sferă de 25 mm, cu certificat de etalonare (diametrul real al sferei este de 24,9996 mm - certificat de compania Renishaw). Această sferă de referință a fost utilizată și ca piesă de măsurare. Softul de măsurare utilizat este Quindos7, de la compania Leitz Messtechnik Wetzlar, Germania.

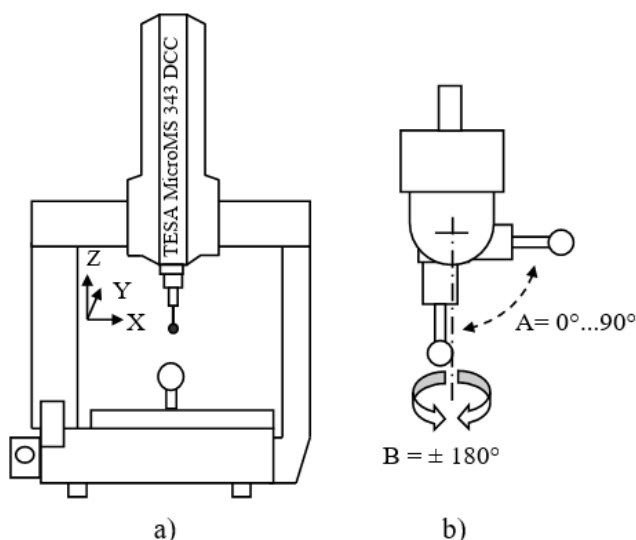


Figura 2.2.46. Mașina TESA cu cap de măsurare cu indexare manuală

a) Factori controlabili la măsurarea 3D

Există o mulțime de factori care influențează procesul de măsurare: viteza, lungimea palpatorului, raportul de palpare, punctele de măsurare, poziția de pornire etc. [71]. În lucrare s-a dorit investigarea altor factori de control care au efect asupra incertitudinii de măsurare. Cercetarea dezvoltată în această lucrare a folosit ca factori controlabili: numărul de puncte de măsurare utilizate pentru efectuarea măsurărilor ("No Points") și două unghiuri de rotație a capului de măsurare: unghi A ("Angle A") și unghi B ("Angle B") (Figura 2.2.47). Utilizând măsurătorile efectuate în cadrul experimentului s-a dorit realizarea unei abordări a incertitudinii extinse a procesului de măsurare utilizând analiza dispersională (ANOVA).

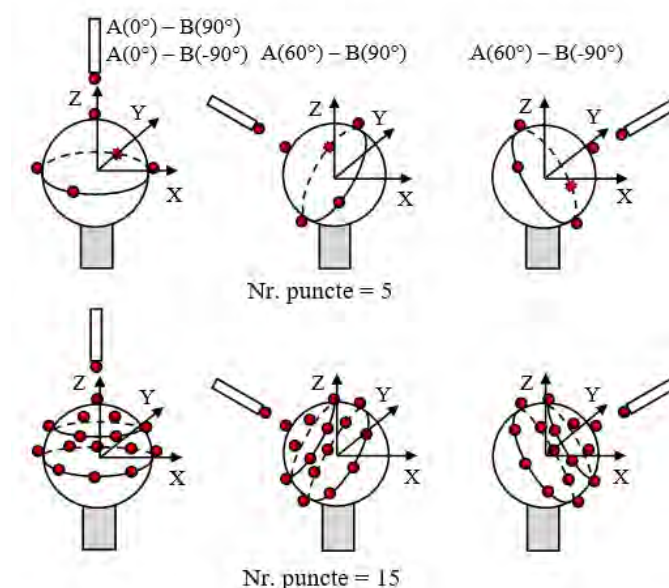


Figura 2.2.47. Dispunerea punctelor de măsurare

b) Definiere experiment factorial

Pentru a minimiza resursele utilizate, s-a ales pentru investigație un experiment factorial fracționat tip "screening" 2^{3-1} , folosind șase replici. Pentru proiectarea experimentului a fost utilizat softul statistic MINITAB 15. Experimentul trebuie să găsească acei factori controlabili care afectează incertitudinea de măsurare. Ieșirile procesului de măsurare au fost alese să fie: x-localizare, y-localizare, z-localizare a sferei de măsurare, *Dia* - diametrul sferei de măsurare, *Form* - abaterea de la forma geometrică a sferei de măsurare, *Dia Dev*- abaterea diametrului de la sfera de referință.

c) Analiza rezultatelor experimentului factorial

În lucrarea [70] (datorită limitării numărului de pagini) au fost prezentate doar câteva dintre figurile și tabelele reprezentative. Tabelul 2.2.10 arată că modelul matematic creat include peste 97% din valorile experimentale ($R^2=97.5$), ceea ce reprezintă un model matematic foarte bun. De asemenea, deoarece valoarea lui $p < 0,05$ (pentru $\alpha=5\%$) pentru toți factorii controlabili, înseamnă că toți factorii au un efect semnificativ asupra localizării pe x.

Tabel 2.2.10 Estimare efecte pentru localizarea pe X

Factorial Fit: x versus No Points; Angle A; Angle B						
Estimated Effects and Coefficients for x (coded units)						
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P	
Constant		0,000046	0,000137	0,33	0,742	
No Points	-0,001175	-0,000587	0,000137	-4,28	0,000	
Angle A	0,005925	0,002962	0,000137	21,58	0,000	
Angle B	0,004725	0,002363	0,000137	17,21	0,000	
S = 0,000672619 R-Sq = 97,50% R-Sq(adj) = 97,12%						

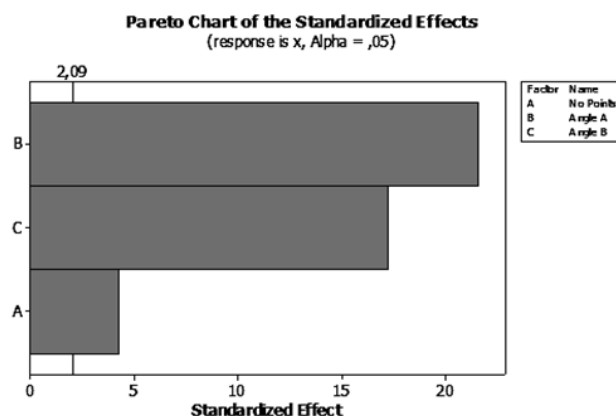
Legendă:

Factorial Fit: x versus No Points, Angle A, Angle B=potrivire factorială: x versus Nr. Puncte, Unghi A, Unghi B;

Estimated Effects and Coefficients for x (coded units)=estimare efecte și coeficienți pentru z (codificat)

No Points=nr. puncte; Angle A=unghi A; Angle B=unghi B; S-deviație standard; R-Sq(adj)=coeficient de corelație(ajustat).

Diagrama Pareto pentru localizare-x este prezentată în Figura 2.2.48. Graficul Pareto arată, de asemenea, că rangul efectului asupra localizării-x este: B - unghiul A, C - unghiul B, A - nr. puncte. Tabelele și diagramele Pareto sunt similare pentru toate celelalte rezultate ale procesului de măsurare. Pentru toate celelalte ieșiri ale experimentului, rangul efectului factorilor controlabili este prezentat în Tabelul 2.2.11.



Legendă: No Points=nr. puncte; Angle A=unghi A; Angle B=unghi B;
Standardized Effect=efect standardizat; $\alpha=0,05$.

Figura 2.2.48. Diagrama Pareto pentru efecte standardizate: factorul localizare-X

Tabel 2.2.11 Efectul semnificativ al factorilor controlabili

Factori de ieșire	Efect semnificativ al factorilor de control	Valoare -p
Localizare-x	B, C, A	0,0 ; 0,0; 0,0
Localizare-y	A	0,037
Localizare-z	A	0
Diametru (Dia)	C, B	0,0; 0,0
Abatere de formă (Form)	A, C, B	0,0; 0,0; 0,0
Deviație Diametru (Dia Dev)	C, B	0,0; 0,0
A – nr. puncte (No. Points); B – Unghi A (Angle A); C – Unghi B (Angle B)		

Pentru toate ieșirile procesului de măsurare a fost analizat efectul principal al factorilor controlabili. În Figura 2.2.49 sunt prezentate efectele principale pentru abaterea de formă (*Form*). Figura 2.2.49 arată că numărul de puncte de măsurare are un efect semnificativ pozitiv important, unghiul A un efect semnificativ pozitiv ceva mai redus, iar unghiul B are un efect semnificativ negativ.

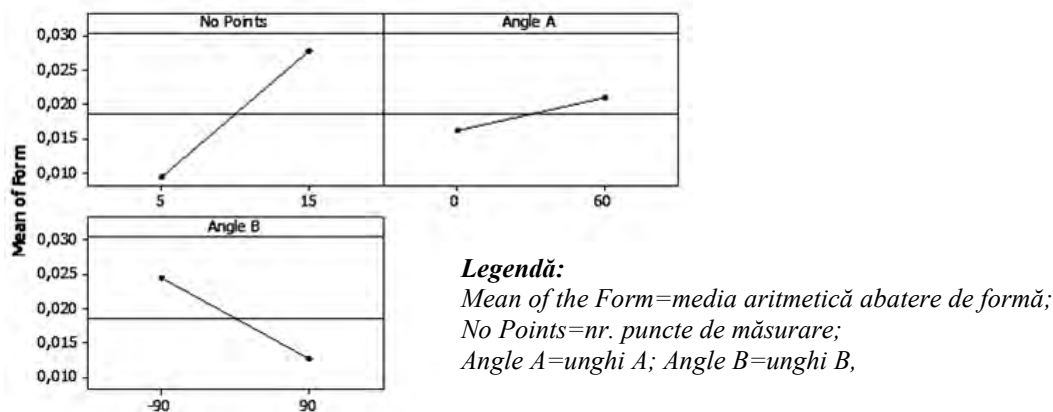


Figura 2.2.49. Efecte principale pentru abaterea de formă (*Form*)

Efectele principale pentru alți factori de răspuns (ieșiri) ale procesului de măsurare sunt rezumate în Tabelul 2.2.12. Planul factorial oferă posibilitatea de a optimiza procesul de măsurare, găsind valoarea optimă pentru factorii controlabili care oferă rezultatele dorite. Valorile dorite pentru toate ieșirile și valorile optime pentru factorii controlabili (soluția globală) pot fi observate în Tabelul 2.2.13.

Tabel 2.2.12 Principalele efecte ale factorilor de control

Factori de ieșire / control	Nr. Puncte	Unghi A	Unghi B
Localizare-x	slab negativ	puternic pozitiv	puternic pozitiv
Localizare-y	pozitiv	slab pozitiv	slab negativ
Localizare-z	slab negativ	pozitiv	slab negativ
Diametru (Dia)	niciun efect	negativ	pozitiv
Abatere de formă (Form)	puternic pozitiv	pozitiv	negativ
Deviație Diametru (Dia Dev)	niciun efect	negativ	puternic pozitiv

Tabel 2.2.13 Soluția de optimizare răspuns

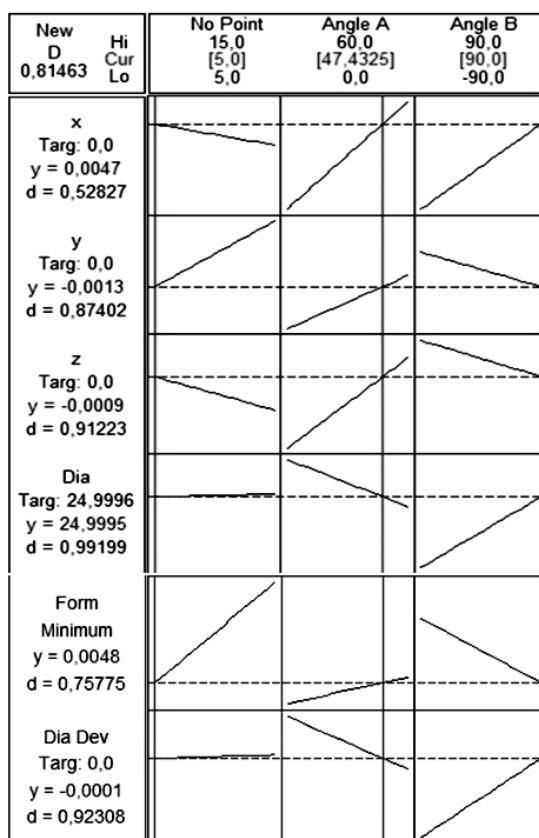
Response Optimization Parameters				
	Goal	Lower	Target	Upper
x	Target	-0,010	0,0000	0,010
y	Target	-0,010	0,0000	0,010
z	Target	-0,010	0,0000	0,010
Dia	Target	24,990	24,9996	25,000
Form	Minimum	0,000	0,0000	0,020
Dia Dev	Target	-0,001	0,0000	0,001
Global Solution				
No Points	=	5,0000		
Angle A	=	41,5802		
Angle B	=	90,0000		

Legendă: Response Optimization Parameters=optimizare parametri de răspuns; Dia=diametru sferă; Form=abatere de formă; Dia Dev=deviație diametru sferă; Global solution=soluție globală; No Point=număr puncte; Angle a=unghi A; Angle B=unghi B.

Proporția în care sunt atinse toate funcțiile de ieșire dorite și valorile optime pentru factorii controlabili pot fi observate în Figura 2.2.50. Valorile optime pentru factorii controlabili sunt:

Nr. puncte = 5; unghiul A = 47^0 ; unghiul B = 90^0 .

Cu aceste valori ale factorilor controlabili se estimează că în proporție de aproximativ 81% se obțin valorile dorite pentru funcțiile de ieșire ale procesului de măsurare.



Legendă: Targ (target)=valoare țintă; No Points=număr puncte;
Angle A=unghi A; Angle B=unghi B.

Figura 2.2.50. Valori optime pentru factorii de control

d) Analiza rezultatelor referitoare la incertitudine

Pentru studiul incertitudinii este important să se cunoască abaterea standard a setului de șase replici realizate în experimentul factorial. Metoda ANOVA a fost utilizată pentru toate funcțiile de răspuns ale procesului de măsurare. Din cauza limitei de pagini, în lucrarea [70] au fost prezentate doar câteva dintre tabelele reprezentative.

În Tabelul 2.2.14 se prezintă analiza dispersională ANOVA pentru funcția de ieșire *Dia Dev*, respectiv pentru abaterea diametrului palpatorului. În tabel se poate observa că pentru cele patru combinații (Nivel) utilizate în experimentul factorial cu șase replici (a se vedea coloana N), se obțin abaterile standard ale erorilor de măsurare, prezentate în coloana *StDev*.

Tabel 2.2.14 Analiza dispersională ANOVA pentru deviație diametru

Source	DF	SS	MS	F	P
Comb	3	0,0000214	0,0000071	55,12	0,000
Error	20	0,0000026	0,0000001		
Total	23	0,0000240			

S = 0,0003595 R-Sq = 89,21% R-Sq(adj) = 87,59%

Level	N	Mean	StDev
1	6	0,0000833	0,0003601
2	6	-0,0001667	0,0005164
3	6	-0,0021833	0,0003189
4	6	-0,0015500	0,0001378

Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev

Pooled StDev = 0,0003595

Legendă: Level=nivel; N=nr. replici; Mean=medie aritmetică; StDev=abatere standard; Individual 95% CIs or Mean=interval de confidență 95% pentru medii; S=abatere (deviație) standard; R-Sq=coeficient de corelație.

Abaterea standard cumulată (*Pooled StDev*) reprezintă erorile globale pentru toate combinațiile de experimente. Efectuând ANOVA pentru toate ieșirile procesului de măsurare, au fost obținute valorile rezumate în Tabelul 2.2.15.

Tabel 2.2.15 Abaterea standard cumulată

Factori de ieșire / control	Abatere standard cumulată (Pooled StDev)	Incertitudine extinsă U	Dom. incertitudine ($\pm U=2U$)
Localizare-x	0,001044	0,00209	0,00418
Localizare-y	0,001072	0,00214	0,00429
Localizare-z	0,001205	0,00241	0,00482
Diametru (Dia)	0,000400	0,00080	0,00160
Abatere de formă (Form)	0,000532	0,00106	0,00213
Deviație Diametru (Dia Dev)	0,0003595	0,00072	0,00144

U este termenul pentru "incertitudine extinsă".

Măsurătoarea adevărată = *Măsurătoarea observată (rezultat)* $\pm U$

$U=2u_c$, unde u_c = abaterea standard a erorilor combinate, în cazul nostru este estimată din abaterea standard cumulată. Utilizând metoda ANOVA a fost posibilă estimarea domeniului de incertitudine al măsurătorilor efectuate cu mașina noastră de măsurat în coordonate.

În final se poate concluziona că a fost propusă o metodologie de estimare a incertitudinii de măsurare a mașinii de măsurat în coordonate folosind metode statistice precum proiectarea experimentelor și analiza dispersională (ANOVA). În strategia de experimentare secvențială, planul experimental a constatat dintr-un experiment factorial fracționat 2^{3-1} , cu șase replici, având ca scop identificarea factorilor importanți din punct de vedere statistic care afectează incertitudinea de măsurare. Experimentul a evidențiat efectul semnificativ important al factorilor de control selectați (unghiul A, unghiul B și numărul de puncte de paplare). Aceste efecte semnificative impun reglarea mașinii de măsurat în coordonate pe valorile optime care au fost prezentate în această lucrare. Analiza ANOVA a oferit posibilitatea de a găsi abaterea standard cumulată pentru toate rezultatele din cadrul acestui experiment, care poate fi utilizată pentru a calcula domeniul de incertitudine al mașinii TESA MicroMs-343-CNC, pentru toate ieșirile observate.

2.2.2.3 Cercetări privind performanțele unei mașini de măsurat în coordonate pentru diferite configurații și orientări ale sistemului de palpate

În lucrarea [75] se prezintă un studiu privind performanțele unei mașini de măsurat în coordonate pentru diferite configurații ale sistemului de palpate. Această lucrare se înscrie în șirul lucrărilor privind performanțele unei mașini de măsurat în coordonate, fiind o continuare a lucrării anterioare [70].

La utilizarea unei mașini de măsurat în coordonate (CMM) pentru a măsura o piesă, o serie de factori afectează rezultatele măsurătorilor. De multe ori este necesar să se măsoare aceeași caracteristică în mod repetat, folosind mai multe setări. În acest caz, este foarte important să se cunoască efectele modificării configurației sistemului de palpate. Scopul acestei cercetări a fost determinarea efectelor pe care le-ar avea selectarea planului de măsurare, a lungimii palpatorului și a dimensiunii vârfului palpatorului asupra capacității mașinii de a măsura în mod repetat diametrul unei sfere.

În trecut au fost efectuate multe cercetări în domeniul CMM pentru a crește utilizarea în industrie, pe măsură ce se descoperă neajunsuri și se dezvoltă noi nevoi. Domeniile pe care le-au acoperit cercetările sunt dezvoltarea de noi algoritmi de compensare a sistemului de palpate, optimizarea orientării pieselor, strategii de eșantionare, trasee de inspecție generate pe calculator, îmbunătățirea preciziei prin dezvoltarea de hardware, software și strategii de operare [71-76].

Precizia și repetabilitatea măsurătorilor pot fi afectate de mai mulți factori. Unii dintre aceștia, care pot să nu fie atât de evidenți, includ diametrul palpatorului, lungimea palpatorului, unghiurile de contact ale palpatorului și forța de contact necesară a senzorului. Adesea, în cercetare, pentru a asigura interesul studiului de fezabilitate, trebuie făcute unele presupuneri. Pentru acest studiu, au fost făcute două ipoteze:

- *Diferitele palpatoare și combinații ale acestora nu vor afecta măsurătorile efectuate pe o mașină de măsurat în coordonate;*
- *Capacitatea mașinii de a palpa suprafața pieselor din mai multe direcții.*

Pe piață există mulți senzori disponibili pentru mașini de măsurat. Acești senzori pot fi grupați în senzori cu contact sau fără contact. Soluțiile fără contact includ opțiuni de scanare cu laser și soluții cu camere video calibrate. Senzorii cu contact pot fi împărțiți în două grupe: senzori cu declanșare (*Touch Trigger Probe - TTP*) și de scanare (*Scanning Probe - SP*). Senzorii de scanare sunt senzori de măsurare continuă prin contact și sunt capabili să achiziționeze un număr mare de puncte în unitatea de timp în vederea determinării caracteristicilor de formă ale unei piese. Senzorii de contact cu declanșare (TTP) sunt cea mai răspândită tehnologie disponibilă și sunt utili atunci când sunt necesare mai puține puncte de măsurare, cum ar fi măsurătorile pentru determinarea dimensiunilor sau a poziției unor elemente geometrice de pe piesă. Senzorii cu declanșare pot fi piezoelectrice, tensometrice și rezistivi.

În cadrul acestui studiu, a fost utilizat un senzor cu declanșare rezistiv. Principala problemă a senzorilor rezistivi este ceea ce se numește precursă, sau eroarea de tip lob a acestora, care apare din cauza modelului mecanic al senzorului (Figura 2.2.51). Eroarea de tip lob se datorează schimbării efortului de declanșare a senzorului după diferite direcții de palpate. Harta erorii de tip lob are o formă aproximativ triunghiulară, cu punctele sale răspândite la aproximativ 120°.

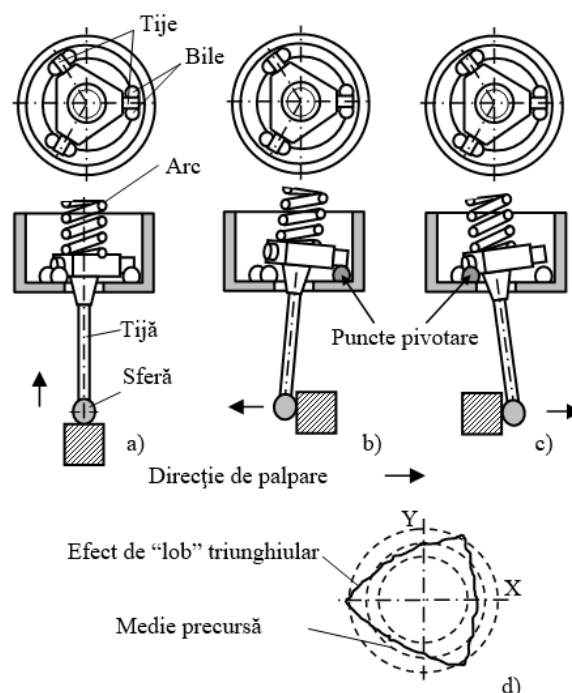


Figura 2.2.51. Mecanismul cinematic al senzorului rezistiv

Scopul acestei cercetări a fost de a investiga efectul variațiilor configurațiilor capului de măsurare asupra capacității mașinii de a măsura în mod repetat o caracteristică sferică. În acest caz, mecanismul cinematic al capului de măsurare a fost fi deviat în plan (în jurul axei palpatorului), unde efectul de tip lob este semnificativ (Figura 2.2.51b, c) și, de asemenea, în lungul axei palpatorului (Figura 2.2.51a).

Mașina utilizată în acest studiu a fost TESA MicroMS 343 CNC cu portal mobil, echipată cu un sistem de palpate (Renishaw) care constă din:

- cap de măsurare cu acționare manuală MH20i;
- senzor de contact cu declanșare TP20, cu palpate după 5 direcții, cu modul de forță standard (SF);
- palpatoare cu sferă de rubin și filet M2.

Sfera de referință utilizată pentru calibrarea palpatorelor a fost utilizată și ca piesă de măsurare. Softul de măsurare utilizat este Quindos7.

Variabilele independente investigate au fost: trei plane de măsurare: *Plan_XY*, *Plan_YZ* și *Plan_ZX* (Figura 2.2.52a), două lungimi ale palpatorului (*S_Length*) de 10 și 50 mm (lungimea minimă și maximă admisă de MH20i cu modul SF) și două diametre ale vârfului palpatorului (*P_Dia*) de 1 și 4 mm. Au fost utilizate palpatoarele D1xL10, D4xL10 și extensia palpatorului L40 mm. Strategia de eșantionare a constat din măsurarea unei calote sferice (jumătate din sferă) în 15 puncte de măsurare. Selectarea numărului de puncte s-a bazat pe raportul dintre timpul de măsurare necesar și îmbunătățirea calității măsurării elementului geometric [77]. Distribuția punctelor de măsurare în planul XY este prezentată în Figura 2.2.52b. Distribuția punctelor pentru măsurarea în planul YZ și ZX este similară. În acest caz, piesa se află într-o poziție fixă, iar sistemul de palpate se deplasează în jurul ei. După fiecare configurație a capului de măsurare, înainte de a măsura piesa, s-a calibrat palpatorul.

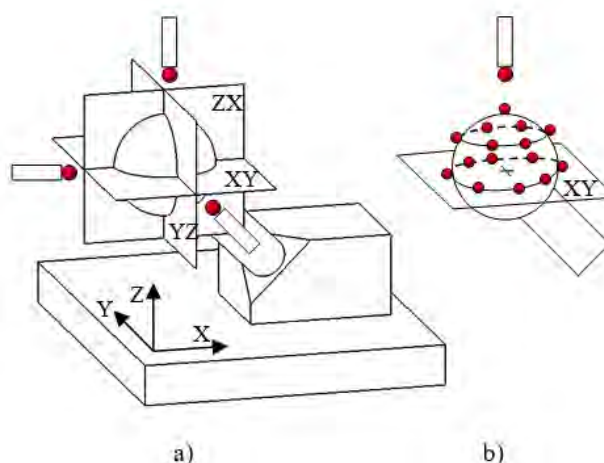


Figura 2.2.52. Plane de măsurare și distribuția punctelor de palpate

Pentru aceste variabile independente, a fost selectat un *experiment factorial* 2^3 , folosind zece replici [64]. Pentru proiectarea experimentului a fost utilizat softul statistic MINITAB 16. Rezultatul procesului de măsurare (variabila dependentă) este diametrul sferei de măsurare (*Dia*).

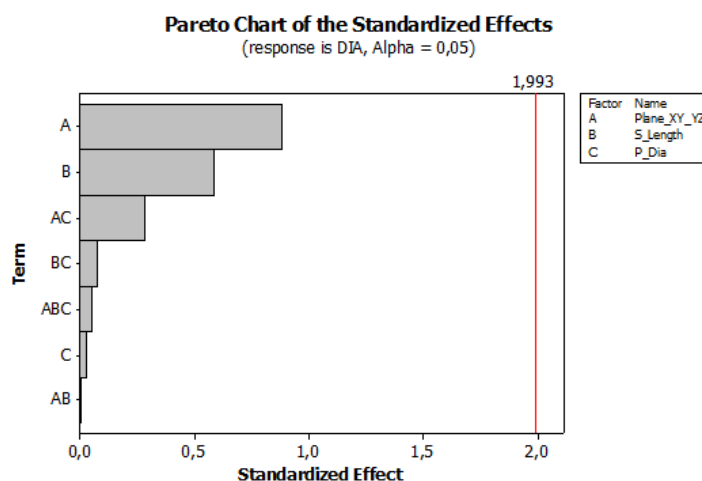
Deoarece au existat 3 plane de măsurare, iar ceilalți factori de control au doar 2 valori (minimă și maximă), a fost necesar să se facă experimente tip arbore pentru a avea toate combinațiile dintre cele trei plane. Din cauza limitării de pagini, în lucrarea [75] au fost prezentate doar câteva dintre figurile și tabelele reprezentative. În Tabelul 2.2.16 se prezintă efectul și coeficienții estimați atunci când s-au ales planele XY și YZ (*Plane_XY* și *Plane_YZ*).

Tabel 2.2.16 Efecte estimate pentru planele XY și YZ

Estimated Effects and Coefficients for DIA (coded units)					
Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		24,9978	0,000219	114230,15	0,000
Plane_XY_YZ	0,0004	0,0002	0,000219	0,89	0,379
S_Length	0,0003	0,0001	0,000219	0,59	0,558
P_Dia	0,0000	0,0000	0,000219	0,03	0,977
Plane_XY_YZ*S_Length	0,0000	0,0000	0,000219	0,01	0,995
Plane_XY_YZ*P_Dia	-0,0001	-0,0001	0,000219	-0,28	0,780
S_Length*P_Dia	-0,0000	-0,0000	0,000219	-0,07	0,941
Plane_XY_YZ*S_Length*P_Dia	0,0000	0,0000	0,000219	0,05	0,959
S = 0,00195734 R-Sq = 91,66% R-Sq(adj) = 89,12%					

Legendă: Estimated Effects and Coefficients for DIA (coded units)=estimare efecte și coeficienți pentru răspuns DIA (codificat); Constant=constantă; Plane_XY_YZ=plan_XY_YZ; S_Length=lungime palpator; P_Dia=diametru element de palpate; S=abatere standard; R-Sq(adj)= R^2 coeficient de corelație(ajustat).

Analizând valoarea lui *P* (puterea studiului) se constată că toți factorii controlați (de intrare) și interacțiunile lor au valori mai mari de 0,05 ($P > 0,05$), ceea ce înseamnă că toți factorii și interacțiunile nu au un efect semnificativ din punct de vedere statistic (nivel de încredere 95%) asupra funcției de răspuns: diametrul sferei (*DIA*). În Figura 2.2.53 se prezintă diagrama Pareto pentru acest experiment, în care se poate observa, de asemenea, că toți factorii controlați și interacțiunile lor se află în stânga liniei 1,993, deci toți nu au un efect semnificativ asupra funcției de răspuns.



Legendă: Pareto Chart of the Standardized Effects (response is DIA, Alpha = 0,05)=diagrama Pareto a efectelor standardizate (răspuns este diametrul, $\alpha=0,05$); Standardized effect=efect standardizat;
Factori: Plane_XY_YZ=plan_XY_YZ; S_Length=lungime palpator; P_Dia=diametru element de palpate.

Figura 2.2.53. Diagrama Pareto pentru diametru sferă (DIA) în planele XY și YZ

În cadrul experimentului s-a realizat și analiza dispersională (ANOVA), un fragment din tabelul ANOVA este prezentat în Tabelul 2.2.17. Toate valorile lui P sunt mai mari de 0,05, ceea ce dovedește că toți factorii de control și interacțiunile lor nu au un efect semnificativ asupra funcției de răspuns.

Tabel 2.2.17 ANOVA pentru diametrul sferei (DIA) în planele XY și YZ

Analysis of Variance for DIA (coded units)			
Source	DF	F	P
Main Effects	3	0,38	0,770
Plane_XY_YZ	1	0,78	0,379
S_Length	1	0,35	0,558
P_Dia	1	0,00	0,977
2-Way Interactions	3	0,03	0,994
Plane_XY_YZ*S_Length	1	0,00	0,995
Plane_XY_YZ*P_Dia	1	0,08	0,780
S_Length*P_Dia	1	0,01	0,941
3-Way Interactions	1	0,00	0,959
Plane_XY_YZ*S_Length*P_Dia	1	0,00	0,959
Residual Error	72		
Pure Error	72		
Total	79		

Legendă: Analysis of Variance for Dia (coded units)=analiza dispersională pentru Diametru măsurat (unități codificate)

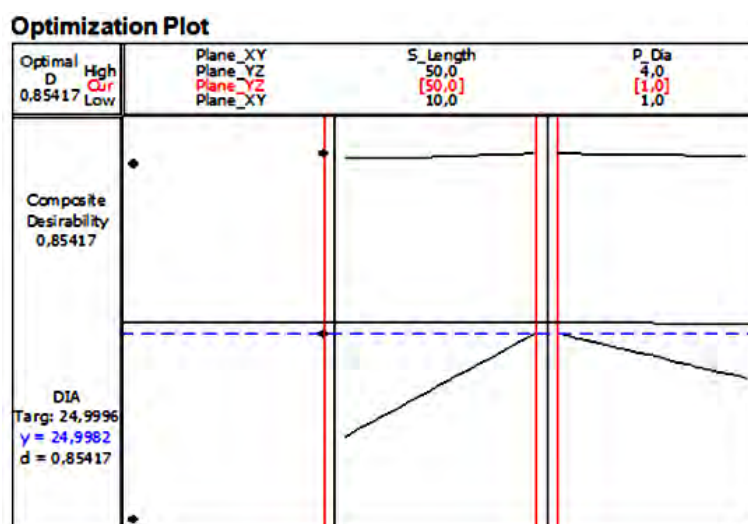
Main Effects=efecte principale; Plane_XY_YZ=plan_XY_YZ; S-Length=lungime palpator;
P_Dia=diametru element de palpate; 2-Way Interactions=interacțiuni de nivelul 2;
3-Way Interactions=interacțiuni de nivelul 3;

Pentru acest studiu s-a urmărit găsirea combinațiilor optime ale factorilor de control, pentru a obține cea mai bună valoare a funcției de răspuns (de ieșire), respectiv pentru a avea cea mai bună apropiere de valoarea țintă 24,9996 mm. Rezultatul optimizării este prezentat în Tabelul 2.2.18 și în Figura 2.2.54.

Tabel 2.2.18 Rezultate optimizare

Response Optimization						
Parameters						
	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
DIA	Target	24,99	24,9996	30	1	1
Global Solution						
Plane_XY_YZ	=	1	(Plane_YZ)			
S_Length	=	50				
P_Dia	=	1				
Predicted Responses						
DIA	=	24,9982	,	desirability =	0,854167	
Composite Desirability = 0,854167						

Legendă: Parameters=parametri; Goal=obiectiv; Lower=limită inferioară; Target=țintă; Upper=limită superioară; Plane_XY_YZ=plan_XY_YZ; S_Length=lungime palpator; P_Dia= diametru element de palpare; Predicted Responses=răspunsuri previzionate; DIA=diametru sferă; desirability=dezirabilitate.



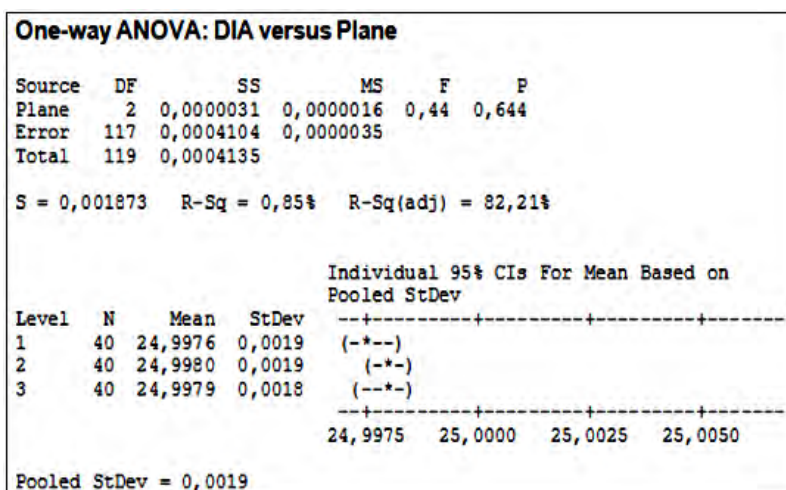
Legendă: Optimization Plot=grafic de optimizare; Plane_XY_YZ=plan_XY_YZ; S_Length=lungime palpator; P_Dia= diametru element de palpare; Optimal=optim; High=maxim; Low=minim; Target=țintă; d=dezirabilitate

Figura 2.2.54. Valorile optime ale factorilor de control

Se poate observa că obiectivul a fost îndeplinit în proporție de aproximativ 85,4% ($d=0,85417$) dacă factorii de control au fost setați la valorile indicate în Tabelul 2.2.18 sau în Figura 2.2.54. Valori similare au fost obținute și pentru alte combinații ale planelor de măsurare (planul XY cu planul ZX și planul YZ cu planul ZX).

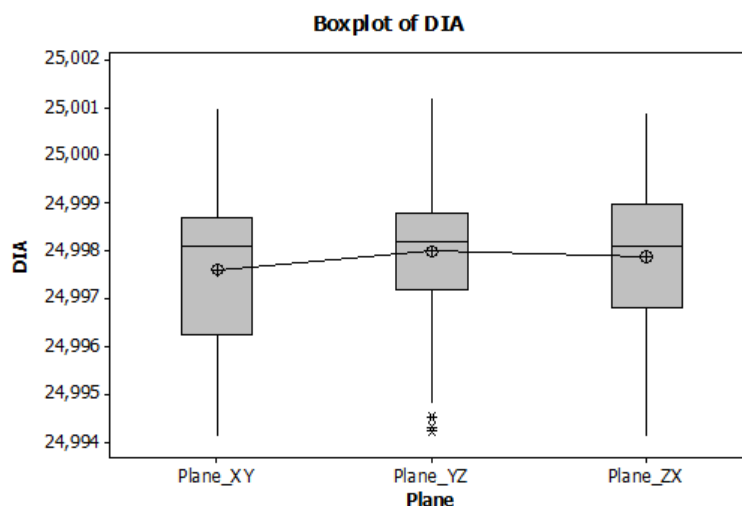
Pentru o mai bună comparare a tuturor măsurătorilor a fost efectuată o analiză dispersională (ANOVA) folosind măsurătorile pentru toate cele trei plane (XY cod 1, YZ cod 2 și ZX cod 3). Rezultatele ANOVA pentru planele de măsurare sunt prezentate în Tabelul 2.2.19.

Tabel 2.2.19 ANOVA pentru planele de măsurare



Legendă: One-way ANOVA:DIA versus Plane=ANOVA unidirecțională: Diametru sferă versus plane de măsurare; S=abatere standard; R-Sq(adj)= R^2 coeficient de corelație (ajustat); Level=nivel; Mean=medie aritmetică; StDev=abatere standard nivel; Individual 95% CIs=interval de încredere 95%.

Deoarece $p < 0,05$ și intervalele de încredere pentru toate planele de măsurare sunt suprapuse, acestea dovedesc că planele de măsurare nu reprezintă un efect semnificativ. În Figura 2.2.55 se poate vedea o reprezentare cutie cu antene (box plot) a diametrului sferei de măsurare (DIA) pentru toate planele de măsurare. Figura 2.2.55 dovedește, de asemenea, că toate planele nu au un efect semnificativ, toate cutiile cu antene fiind suprapuse. AVOVA pentru lungimea palpatorului (S_Length) este prezentată în Tabelul 2.2.20.



Legendă: DIA=diametru sferă; Plane=plan

Figura 2.2.55. Reprezentare tip cutie cu antene pentru planele de măsurare

Tabelul 2.2.20 ANOVA pentru lungime palpator (S_Length)

One-way ANOVA: DIA versus S_Length						
Source	DF	SS	MS	F	P	
S_Length	1	0,0000048	0,0000048	1,39	0,241	
Error	118	0,0004087	0,0000035			
Total	119	0,0004135				

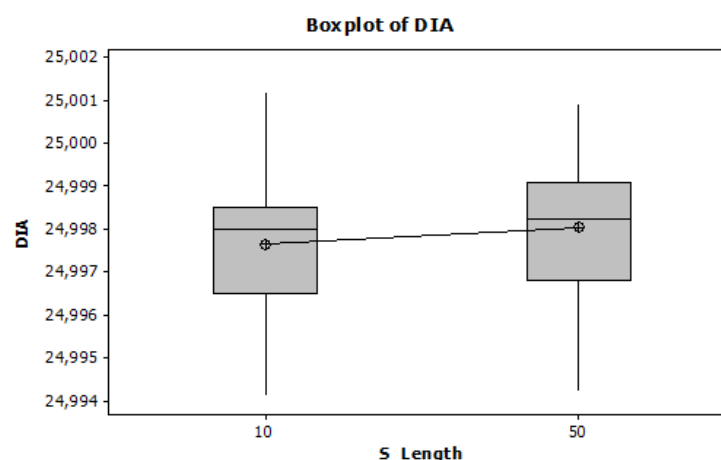
S = 0,001861 R-Sq = 91,16% R-Sq(adj) = 90,32%

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev			
10	60	24,9976	0,0019	-----+-----+-----+-----			
				(-*)			
50	60	24,9980	0,0019	-----+-----+-----+-----			
				(-*-)			
				-----+-----+-----+-----			
				24,9975	25,0000	25,0025	25,0050

Pooled StDev = 0,0019

Legendă: One-way ANOVA:DIA versus S_Length=ANOVA unidirecțională: Diametru sferă versus lungime palpator; S=abatere standard; R-Sq(adj)=R² coeficient de corelație (ajustat); Level=nivel; Mean=medie aritmetică; StDev=abatere atandard nivel; Individual 95% CIs=interval de încredere 95%).

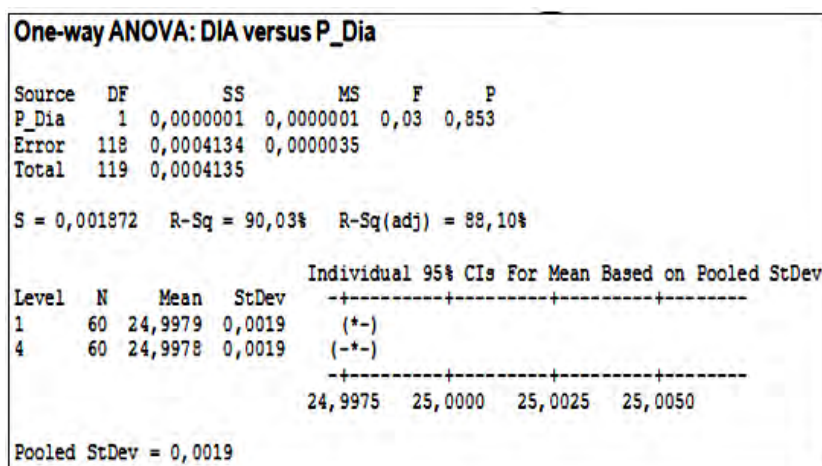
Valoarea P și suprapunerea intervalului de încredere dovedesc că lungimea palpatorului (S_Length) nu are nicio influență semnificativă din punct de vedere statistic. Acest lucru este dovedit și de Figura 2.2.56, unde cele două cutii (casete) sunt suprapuse.



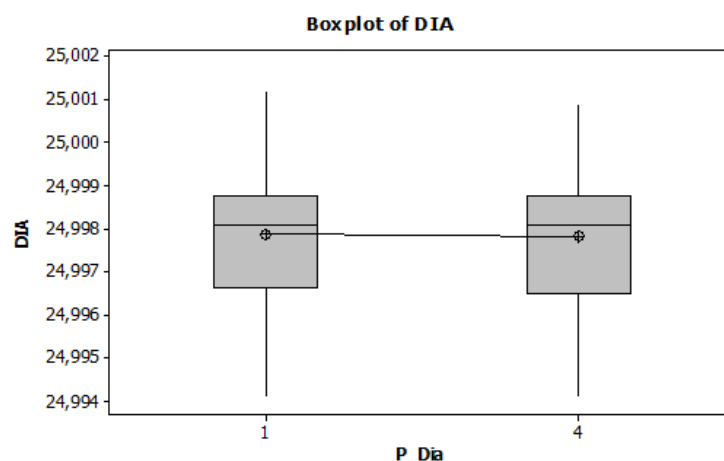
Legendă: DIA=diametru sferă; S_Length=lungime palpator

Figura 2.2.56. Reprezentare tip cutie cu antene pentru lungime palpator

Pentru factorul de control diametru element de palpate (P_Dia), rezultatele ANOVA sunt prezentate în Tabelul 2.2.21 și în Figura 2.2.57. Tabelul ANOVA și reprezentarea cu cutii și antene dovedesc că nici factorul de control: diametrul elementului de palpate (P_Dia) nu are un efect semnificativ din punct de vedere statistic.

Tabelul 2.2.21 ANOVA pentru diametru element de palpare (P_Dia)

Legendă: One-way ANOVA:DIA versus P_Dia=ANOVA unidirecțională: Diametru sferă versus diametru element de palpare; S=abatere standard; R-Sq(adj)=R² coeficient de corelație (ajustat); Level=nivel; Mean=medie aritmetică; StDev=abatere atandard nivel; Individual 95% CIs=interval de încredere 95%).



Legendă: DIA=diametru sferă; P_Dia=diametru element de palpare

Figura 2.2.57. Reprezentare tip cutie cu antene pentru diametru element de palpare

În final se poate concluziona că scopul acestei cercetări a fost o înțelegere clară a modului în care configurațiile sistemului de palpare ar afecta orice măsurători efectuate pe o mașină de măsurat în coordonate. Pe baza rezultatelor obținute prin planificarea experimentelor (Design of Experiments-DoE) și analiza dispersională (ANOVA), rezultatele măsurătorilor unei sfere arată că planele de măsurare XY, YZ și ZX, lungimea palpatorului și diametrul elementului de palpare au o influență, dar nu semnificativă din punct de vedere statistic. Interacțiunile dintre factori arată toate variații minore de măsurare pentru aceeași caracteristică. Chiar dacă lungimea palpatorului nu are un efect semnificativ din punct de vedere statistic, se recomandă utilizarea unor valori mici pentru acesta. Pentru măsurători precise, se recomandă utilizarea unui diametru cât mai mare pentru elementul de palpare (de obicei de formă sferică).

Recomandările pentru cercetări ulterioare, bazate pe acest studiu, sunt includerea unor module senzor diferite și includerea unor niveluri suplimentare la unele dintre variabilele existente pentru a determina dacă un model de regresie multiplă este fezabil.

2.2.2.4 Cercetări privind influența configurației sistemului de palpare asupra preciziei de măsurare a unui mașini de măsurare în coordonate

În lucrarea [78] se prezintă un studiu privind influența sistemului de palpare asupra preciziei de măsurare a unui mașini de măsurare în coordonate. Scopul acestei cercetări a fost de a determina efectele pe care le-ar avea selectarea de module diferite ale senzorului de contact cu declanșare TP20, lungimea palpatorului și dimensiunea sferei palpatorului asupra capacității mașinii de a măsura în mod repetat diametrul unui calibru cilindric interior (tip inel). Această cercetare, realizată cu ajutorul mașinii TESA MicroMS343-CNC, utilizează metoda de planificare a experimentelor (*Design of Experiments - DoE*) și a analizei dispersionale (ANOVA) pentru a investiga impactul factorilor și al interacțiunilor acestora asupra rezultatului măsurării.

În prezent, standardele de calitate cerute pentru produse cresc considerabil și, prin urmare, toleranțele de fabricație devin tot mai stricte. Majoritatea pieselor fabricate sunt inspectate cu ajutorul mașinilor de măsurat în coordonate (CMM), care sunt capabile să măsoare, pentru orice tip de piesă, dimensiunile, respectiv toleranțele de formă, orientare, poziție și bătaie [79,80]. Pentru fiecare dintre parametrii geometrici ai piesei de măsurat, utilizatorul poate adopta oricare dintre o serie de strategii de măsurare. Aceste strategii includ selectarea unei anumite configurații a senzorului și a palpatorului, numărul și poziția punctelor de măsurare, precum și direcția și viteza de palpare a palpatorului [81]. Strategia de măsurare selectată, adoptată pentru măsurarea piesei, determină modul în care erorile sunt introduse în sistemul de măsurare și influențează incertitudinea măsurătorilor. Pentru programatorul pe mașini de măsurat în coordonate, estimarea preciziei măsurătorilor efectuate cu CMM-uri este extrem de importantă pentru menținerea încrederii și fiabilității măsurătorilor. Factorii care pot conduce la efecte asupra rezultatului de măsurare și a incertitudinii de măsurare pot fi rezumați în șase grupe: *mașina de măsurare, mediul, piesa de măsurat, strategia de măsurare, operatorul și definirea sarcinii de lucru* [80]. O sursă de erori care poate să nu fie atât de evidentă include diametrul elementului de palpare, lungimea palpatorului, unghiul de contact al palpatorului și forța de contact necesară a palpatorului. În trecut au fost efectuate numeroase cercetări [71-84] cu privire la multe dintre sursele de erori care pot afecta precizia și repetabilitatea măsurătorilor.

Această cercetare a urmărit să determine ce efecte ar avea asupra capacității mașinii de măsurat în coordonate măsurarea în mod repetat a unui singur diametru, selecția modulului senzorului TP20, lungimea și dimensiunea palpatorului. Sistemele de palpare sunt selectate pentru măsurători în funcție de piesa și de sarcina de măsurare. În literatura de specialitate este recomandată utilizarea de palpatoare scurte și cu diametrul mare a elementului de palpare [79-81]. Dar, există piese de măsurat cu elemente geometrice de dimensiune redusă sau cu adâncime mare. În acest caz, selecția sistemului de palpare necesită palpatoare lungi cu dimensiuni mici. În această cercetare, pentru a asigura interesul studiului de fezabilitate, s-a pornit de la ipoteza că: *diferitele configurații ale modulului senzorului TP20 și ale palpatorului nu vor afecta măsurătorile efectuate pe o mașină de măsurat în coordonate*.

Sistemele de palpare pentru mașini de măsurat sunt parte integrantă a întregului sistem de măsurare și formează legătura dintre mașină și piesa de măsurat. Selectarea, configurarea, calibrarea și utilizarea corespunzătoare sunt vitale pentru a exploata întregul potențial al unei mașini de măsurat. Senzorii utilizați pe mașini pot fi grupați în senzori cu contact (cu atingere) sau fără contact (optoelectronice) [85,86]. Senzorii cu declanșare (TTP) reprezintă cea mai răspândită tehnologie disponibilă și sunt utili atunci când sunt necesare mai puține puncte măsurate pe piesă, cum ar fi măsurătorile pentru dimensiuni și poziție.

Această cercetare se referă la senzori cinematici rezistivi. Acești senzori se bazează pe un mecanism în care trei perechi de contacte dispuse la 120°, care constituie un suport izostatic, sunt menținute închise prin intermediul forței generate de un arc de compresiune (Figura 2.2.58a și b).

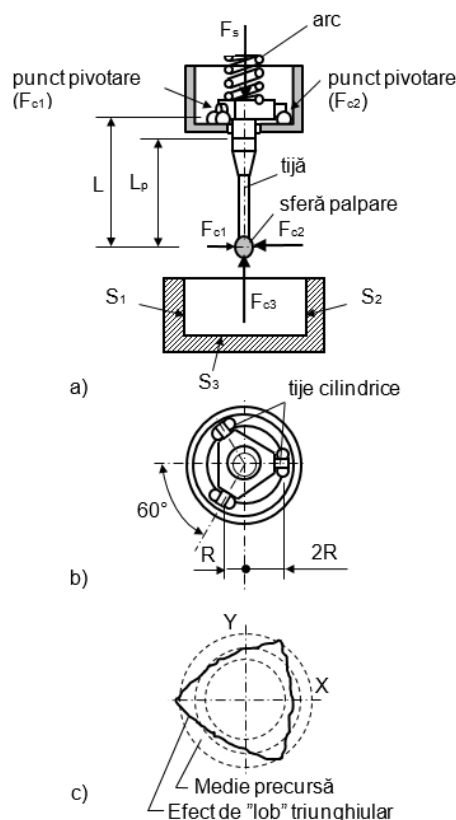


Figura 2.2.58. Mecanic sensor cinematic rezistiv

Datorită faptului că punctele de contact sunt dispuse la 120° , forța de palpare nu este uniformă. Forțele de palpare, atunci când sunt măsurate suprafețele piesei S1, S2 și S3 (Figura 2.2.58a), sunt prezentate în ecuațiile (2.2.2), (2.2.3) și (2.2.4).

$$F_{c1} = \frac{F_s \cdot R}{L} \quad (2.2.2)$$

$$F_{c2} = \frac{F_s \cdot 2R}{L} \quad (2.2.3)$$

$$F_{c3} = F_s \quad (2.2.4)$$

Se observă valori diferite ale deplasării palpatorului din poziția neutră până în poziția de declanșare în funcție de direcția de palpare. Harta erorii de tip "lob" are o formă aproximativ triunghiulară, cu valorile maxime ale precurselor orientate la aproximativ 120° (Figura 2.2.58c).

Scopul acestei cercetări a fost de a investiga efectul variațiilor configurațiilor capului de măsurare asupra capacității mașinii de a măsura în mod repetat o caracteristică cilindrică. În acest caz, mecanismul cinematic al senzorului a fost orientat în plan (în jurul axei palpatorului), unde efectul de lob este semnificativ.

Experimentele au fost efectuate pe mașina de măsurat în coordonate cu portal mobil TESA MicroMS 343 [52], echipată cu un sistem de palpare Renishaw [87] care constă din:

- cap de măsurare orientabil manual MH20i, cu un increment de indexare de 15° , pe 2 axe: unghi de elevație $A=0^\circ \dots 90^\circ$ și unghi de azimut $B=\pm 180^\circ$;
- module senzor de contact cu declanșare TP20 în 5 direcții;
- palpatoare drepte cu element de palpare de formă sferică, din rubin, cu filet M2.

Planul experimental a fost conceput pentru trei factori de influență (variabile independente): diametrul sferei palpatorului (P_Dia), lungimea palpatorului (P_Length) și modulele senzorului TP20 ($TP20_M$). Factorul de răspuns (variabila dependentă) este diametrul măsurat (Dia) al calibrului inelar (Mitutoyo), cu diametrul interior certificat de 30,005 mm (Figura 2.2.59).

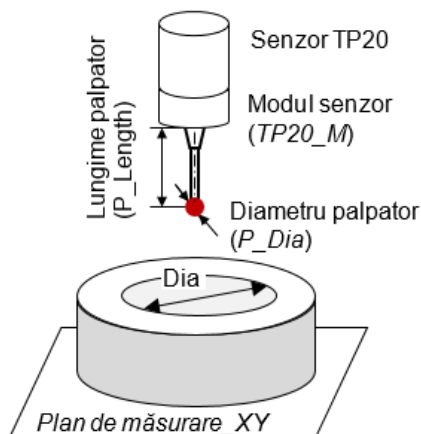


Figura 2.2.59. Factori experimentali

Nivelurile variabilelor independente sunt prezentate în Tabelul 2.2.22. Notăția codificată (+) și (-) a fost utilizată pentru a reprezenta nivelurile minime și maxime ale celor trei factori. Modulele senzorului TP20 cele mai utilizate pentru măsurarea caracteristicilor geometrice mici, și utilizate în această cercetare, sunt modulul de forță redusă (LF) și modulul de forță standard (SF). Lungimea maximă a palpatorului admisă pentru modulul de forță redusă este de 30 mm și de 50 mm pentru modulul de forță standard. În conformitate cu această limitare, lungimea maximă a palpatorului utilizat în acest experiment a fost de 30 mm, iar lungimea minimă de 10 mm [87]. Diametrul elementului (sferei) de palpare este de 1 mm și 3 mm.

Tabel 2.2.22 Niveluri limită ale variabilelor independente

Diametru element de palpare P_Dia [mm]		Lungime palpator P_Length [mm]		Modul senzor TP20 $TP20_M$ [-]	
-	+	-	+	-	+
1	3	10	30	LF	SF

Piesa de măsurat (de formă inelară) a fost orientată pe planul orizontal al mașinii (planul XY) și măsurată ca un cerc interior cu 72 de puncte de palpare (un punct pe un arc de 5°). Selectarea numărului de puncte s-a bazat pe raportul timp/calitatea rezultatelor măsurării [81]. Pentru fiecare combinație a sistemului de palpare, palpatorul a fost calibrat cu ajutorul unei sfere de referință (etalon). Softul de măsurare utilizat este Quindos7.

Pentru acești trei factori independenți, a fost creat un *experiment factorial* 2^3 , cu zece replici [64]. Rezultatul procesului de măsurare (variabila dependentă) este diametrul interior măsurat al piesei de măsurare (Dia). Matricea experimentului factorial 2^3 , cu opt încercări, este prezentată în Tabelul 2.2.23.

Tabelul 2.2.23 Matricea experimentului factorial

Replica nr. 1 Nr. experiment	Factori independenți (variabile de intrare)		
	Diametru element de palpăre P_Dia [mm]	Lungime palpator P_Length [mm]	Modul senzor $TP20_M$ [-]
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	-	-
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	+

În Tabelul 2.2.24 sunt prezentate rezultatele măsurătorilor. Pentru proiectarea experimentului și prelucrarea rezultatelor a fost utilizat softul statistic Statgraphics Centurion 16. Pentru a testa semnificația statistică a efectelor a fost efectuată analiza dispersională (ANOVA) (Tabelul 2.2.25). Această tehnică de analiză are capacitatea de a face comparații multiple fără a acumula efectele alfa (α) și permite o comparație simultană a fiecăruia dintre factorii independenți și interacțiunile lor.

Tabel 2.2.24 Rezultate măsurare

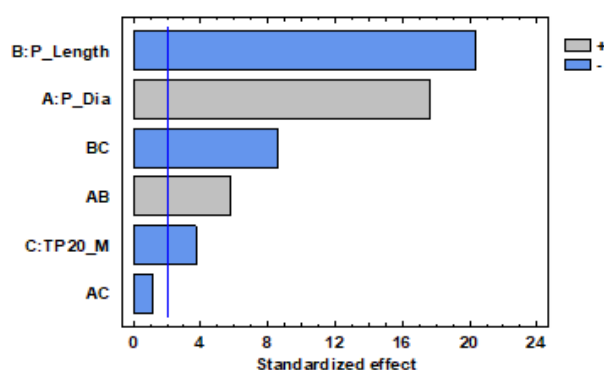
Nr. replică	Configurare sistem de palpăre / nr. experiment							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	1_10_LF	1_10_SF	1_30_LF	1_30_SF	3_10_LF	3_10_SF	3_30_LF	3_30_SF
1	30,0027	30,0039	30,0016	30,0009	30,0041	30,0043	30,0027	30,0015
2	30,0029	30,0037	30,0016	30,0007	30,0045	30,0043	30,0033	30,0022
3	30,0029	30,0036	30,0019	30,0004	30,0045	30,0040	30,0035	30,0024
4	30,0031	30,0039	30,0013	30,0000	30,0046	30,0044	30,0037	30,0027
5	30,0029	30,0039	30,0019	30,0005	30,0044	30,0042	30,0038	30,0031
6	30,0031	30,0039	30,0021	30,0006	30,0045	30,0042	30,0038	30,0029
7	30,0029	30,0036	30,0019	30,0005	30,0044	30,0045	30,0035	30,0031
8	30,0027	30,0039	30,0013	30,0002	30,0044	30,0044	30,0038	30,0031
9	30,0029	30,0042	30,0021	30,0002	30,0045	30,0044	30,0034	30,0034
10	30,0029	30,0038	30,0027	30,0006	30,0044	30,0046	30,0035	30,0034

Tabel 2.2.25 Analiza dispersională (ANOVA) pentru diametru

Sursă	Suma pătratelor SS	Grade libertate Df	Media pătratelor MS	Factor F	Valoare P
A:P_Dia	0,000045	1	0,000045	311,08	0,0000
B:P_Length	0,000059858	1	0,000059858	413,79	0,0000
C:TP20_M	0,0000019845	1	0,0000019845	13,72	0,0004
AB	0,000004802	1	0,000004802	33,20	0,0000
AC	1,805E-7	1	1,805E-7	1,25	0,2682
BC	0,0000108045	1	0,0000108045	74,69	0,0000
blocks	0,0000016645	9	1,84944E-7	1,28	0,2659
Total error	0,00000925804	64	1,44657E-7		
Total (corr.)	0,000133552	79			
$R^2 = 93,0678 \%$, R^2 (ajustat) = $91,4431 \%$; Eroare standard a estimărilor = 0,000380338, Eroare absolută a mediei = 0,000281125; Durbin-Watson statistică = 2,76616 ($P=0,9928$)					

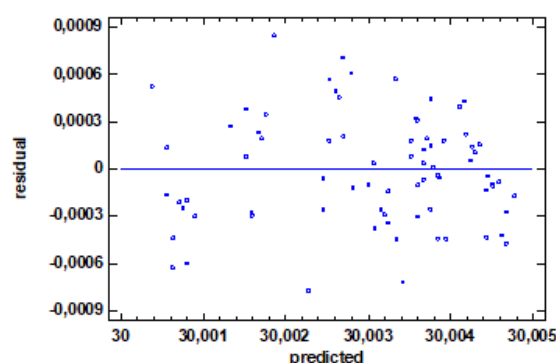
Pentru această cercetare, a fost selectat $\alpha=0,01$ (1%) pentru a reduce, la o șansă la o sută, posibilitatea de a face o eroare de tip I. Cele trei variabile independente au fost codificate prin A, B și C, iar interacțiunea prin AB, AC și BC, care sunt produse ale factorilor independenți. Tabelul ANOVA împarte variabilitatea diametrului măsurat (*Dia*) în părți separate pentru fiecare dintre efecte. Apoi, se testează semnificația statistică a fiecărui efect prin compararea pătratului mediu cu o estimare a erorii experimentale. În acest caz, toți cei trei factori principali și două interacțiuni ale acestora au valori P mai mici de 0,01, ceea ce indică faptul că sunt semnificativ diferite de zero la un nivel de încredere de 99,0%. Coeficientul de corelație R^2 indică faptul că modelul ajustat explică 93,07% din variabilitatea diametrului măsurat (*Dia*). Coeficientul de corelație R^2 ajustat, care este mai potrivit pentru compararea modelelor cu un număr diferit de variabile independente, este de 91,44%, ceea ce arată că există o corelație puternică între factorii independenți, iar modelarea matematică a fenomenului este bună.

Influența factorilor independenți asupra diametrului măsurat este prezentată în graficul Pareto (Figura 2.2.60), unde linia verticală, reprezentată pentru $P=0,01$, separă factorii semnificativi de ceilalți. Cea mai mare influență asupra rezultatului măsurării o are lungimea palpatorului, urmată de dimensiunea elementului (sferei) de palpare și de două interacțiuni. În Figura 2.2.61 sunt afișate valorile reziduale față de valorile prezise ale diametrului măsurat (*Dia*), unde se poate observa că nu există un aranjament sistematic între rezultatele obținute experimental și dispersia reziduală față de valorile estimate de modelul matematic.



Legendă: Standardized effect=efect standardizat;
P_Length=lungime palpator; P-Dia=diametru element
de palpare; TP20_M=modul senzor TP20.

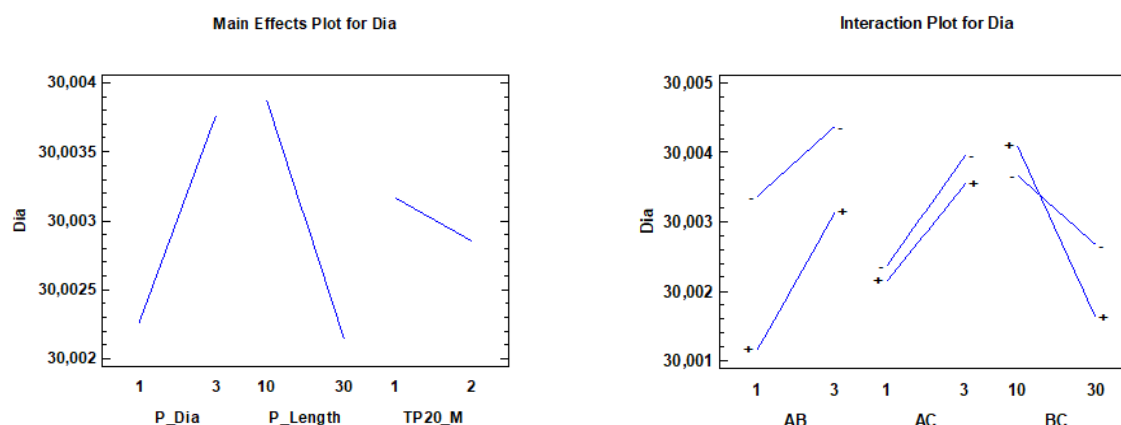
Figura. 2.2.60. Diagrama Pareto pentru diametru



Legendă: residual=reziduu; predicted=prezis.

Figura. 2.2.61. Diagrama reziduală pentru diametrul măsurat

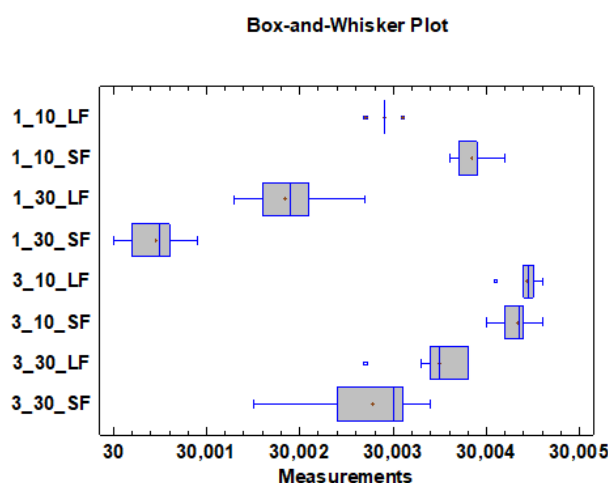
În Figura 2.2.62 sunt prezentate graficul efectelor principale și cel de interacțiune pentru diametrul măsurat. Aceste diagrame prezintă diametrul măsurat estimat (*Dia*) în funcție de fiecare factor experimental (diagrama efectelor principale) sau în funcție de perechi de factori (diagrama interacțiunii).



Legendă: Main Effects Plot for Dia=diagramă efecte principale pentru Diametru; Interaction plot for Dia=diagramă interacțiuni pentru diametru; Dia=diametru măsurat; P_Dia=diametru element de palpare; P_Length=lungime palpator; TP20_M=module senzor TP20.

Figura 2.2.62. Diagrama efectelor principale și interacțiunilor

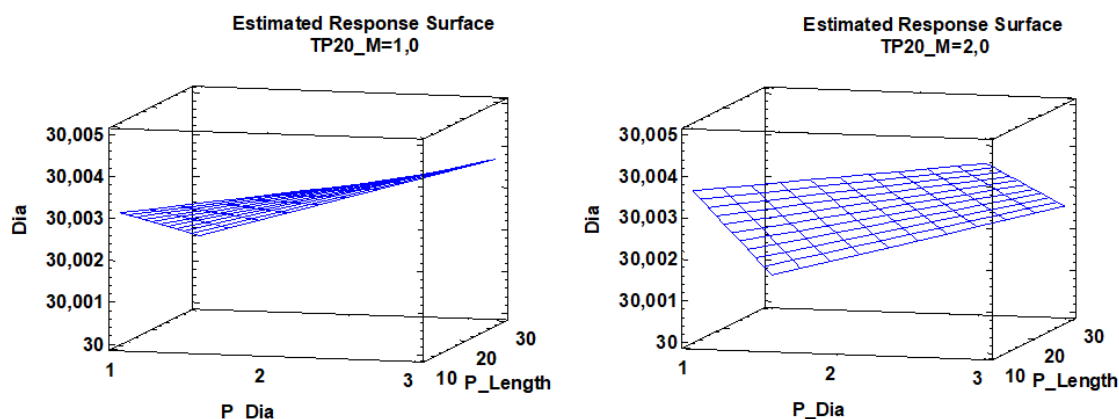
În Figura 2.2.63 sunt prezentate opt diagrame cutii cu antene (*box-and-whisker*), câte una pentru fiecare configurație a sistemului de palpare. Partea dreptunghiulară a graficului se extinde de la cuartila inferioară la cuartila superioară, acoperind jumătatea centrală a eșantionului. Liniile centrale din interiorul fiecărei cutii arată localizarea medianelor eșantionului. Semnele plus indică localizarea mediilor eșantionului. Antenele se întind de la cutie până la valorile minime și maxime din eșantion, cu excepția punctelor exterioare sau foarte exterioare, care vor fi reprezentate separat. Se poate observa că par să existe diferențe în ceea ce privește cantitatea de dispersie pentru variabilele modulului senzor, lungimea și diametrul palpatorului, ceea ce arată diferențe statistice în ceea ce privește dispersia variabilelor independente.



Legendă: Box-and-Whisker Plot=diagramă cutii cu antene; Measurements=măsurători; LF=modul forță redusă; SF=modul forță standard.

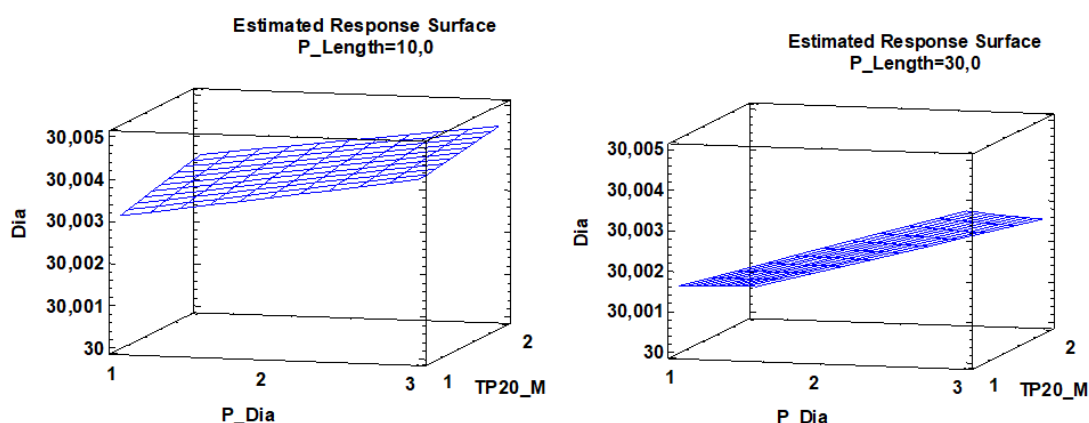
Figura 2.2.63. Diagrama cutii cu antene pentru diametrul măsurat (Dia)

În Figurile 2.2.64, 2.2.65 și 2.2.66 se prezintă graficul suprafeței de răspuns a diametrului măsurat estimat (*Dia*) în funcție de diametrul elementului (sferei) de palpare (*P_Dia*), lungimea palpatorului (*P_Length*) și modulul senzorului (*TP20_M*) în diferite combinații. Pentru fiecare combinație, doi factori independenți sunt variați de la nivelul minim la cel maxim, în timp ce al treilea factor independent este menținut constant. Înălțimea suprafeței reprezintă valoarea diametrului măsurat (*Dia*).



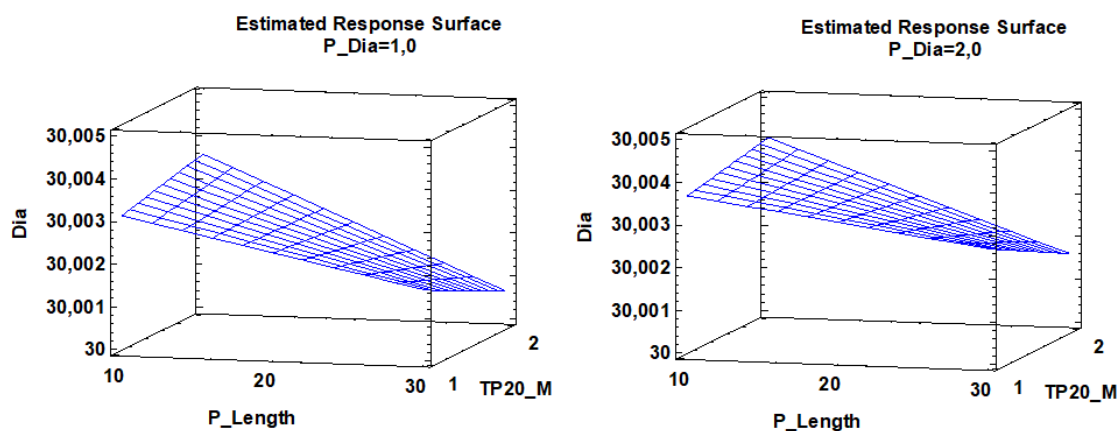
Legendă: Estimate Response Surface=suprafața de răspuns estimată; Dia=diametru măsurat; P_Dia=diametru element de palpare; P_Length=lungime palpator; TP20_M=modul senzor.

Figura 2.2.64. Suprafața de răspuns estimată pentru diametru și lungime palpator



Legendă: Estimate Response Surface=suprafața de răspuns estimată; Dia=diametru măsurat; P_Dia=diametru element de palpare; P_Length=lungime palpator; TP20_M=modul senzor.

Figura 2.2.65. Suprafața de răspuns estimată pentru diametru palpator și modul senzor



Legendă: Estimate Response Surface=suprafața de răspuns estimată; Dia=diametru măsurat; P_Dia=diametru element de palpare; P_Length=lungime palpator; TP20_M=modul senzor.

Figura 2.2.66. Suprafața de răspuns estimată pentru lungime palpator și modul senzor

Scopul acestei cercetări a fost acela de a înțelege în mod clar modul în care configurația sistemului de palpate ar afecta măsurătorile efectuate pe mașina de măsurat. Pe baza rezultatelor experimentului factorial 2^3 (DoE) și a analizei disperse (ANOVA) se poate concluziona că există o diferență semnificativă din punct de vedere statistic în ceea ce privește măsurătorile între modulul senzorului, lungimea palpatorului și diametrul elementului de palpate. Ipoteza care a fost făcută la începutul acestei cercetări: *diversele configurații ale modulului senzorului TP20 și ale palpatorului nu vor afecta măsurătorile efectuate pe mașina de măsurat este falsă*. Acest lucru este foarte important pentru programatorul pe mașina de măsurat în coordonate în decizia sa privind selectarea sistemelor de palpate pentru a menține încrederea și fiabilitatea măsurătorilor.

Lungimea palpatorului este cel mai critic parametru care poate afecta precizia rezultatelor măsurătorilor, fiind urmat de dimensiunea palpatorului și, în final, de modulul senzorului. Este cunoscut faptul că, atunci când elementul de palpate este adus în contact cu piesa, acesta este supus unor forțe de contact, care produc deformații elastice. Mărimea deformațiilor poate varia în funcție de diferiți parametri, cum ar fi: lungimea palpatorului, diametrul elementului de palpate, materialul elementului de palpate, forța de contact dată de modulul senzorului, viteza de palpate etc.

În Tabelul 2.2.26 se prezintă estimările medii și BIAS pentru diametrul măsurat al etalonului inelar. Cea mai critică combinație de sistem de palpate este lungimea maximă a palpatorului (30 mm) cu diametrul minim al elementului (sferei) de palpate (1 mm) și modulul de forță standard (SF). Această combinație de sistem de palpate oferă un BIAS de 4,5 micrometri.

Tabel 2.2.26 Estimări medii și BIAS pentru diametrul măsurat

Configurație sistem de palpate	Medie [mm]	Diametru de referință [mm]	BIAS [mm]
1 10 LF	30,0029	30,005	-0,0021
1 10 SF	30,0039		-0,0011
1 30 LF	30,0018		-0,0032
1 30 SF	30,0005		-0,0045
3 10 LF	30,0044		-0,0006
3 10 SF	30,0043		-0,0007
3 30 LF	30,0035		-0,0015
3 30 SF	30,0028		-0,0022

În Tabelul 2.2.27 se prezintă combinația de niveluri de factori care maximizează diametrul măsurat (*Dia*) în regiunea indicată (30,005). Sistemul de palpate selectat trebuie să fie cât mai rigid posibil, ceea ce înseamnă că palpatoarele trebuie să fie scurte și cu diametrul elementului de palpate cât mai mare posibil.

Tabel 2.2.27 Combinația de nivel al factorului care optimizează diametrul măsurat

Factor	Minim	Maxim	Optim
Diametru element de palpate (<i>P Dia</i>)	1,0	3,0	3,0
Lungime palpator (<i>P Length</i>)	10,0	30,0	10,0
Modul senzor (<i>TP20 M</i>)	1,0	2,0	2,0

Studiul repetabilității și reproductibilității (R&R) pentru aceste opt configurații ale sistemului de palpate arată o abatere standard estimată a procesului de măsurare egală cu 0,00137661, iar dispersia totală (TV) este egală cu 0,00137661 (Tabelul 2.2.28). Din dispersia totală, 94,6298% se datorează diferențelor dintre configurațiile sistemului de palpate (reproductibilitate), în timp ce 5,37019% se datorează mașinii (repetabilitate).

Tabel 2.2.28 Raport repetabilitate și reproductibilitate (R&R)

<i>Măsurători</i>	<i>Estimat</i>	<i>Procent</i>	<i>Estimat</i>	<i>Procent</i>	<i>Procent</i>
<i>Unitate</i>	<i>Sigma</i>	<i>Dispersie totală</i>	<i>Dispersie</i>	<i>Contribuția</i>	<i>la R&R</i>
Repetabilitate	0,00031901	23,1737	1,01768E-7	5,37019	5,37
Reproductibilitate	0,00133913	97,2779	0,00000179328	94,6298	94,63
R & R	0,00137661	100,0	0,00000189505	100,0	100,00
Părți	0,0	0,0	0,0	0,0	
Dispersie totală	0,00137661	100,0	0,00000189505		

Pentru programatorul pe mașini de măsurat în coordonate, în decizia sa privind selectarea sistemelor de palpate, se recomandă, prin urmare, să nu folosească niciodată palpatoare mai lungi decât este strict necesar și construite din materiale cu cel mai bun compromis între greutate redusă și rigiditate [80]. Numărul de palpatoare diferite trebuie să fie cât mai mic posibil.

Recomandările pentru cercetări viitoare, bazate pe acest studiu, sunt includerea unor module de senzor TP20 diferite cu capul de măsurare MH20i, includerea unor viteze diferite de deplasare a mașinii de măsurat și reproducerea acestui studiu pe mai multe mașini de măsurat în coordonate.

2.3 Cercetări privind asigurarea calității pieselor injectate și printate 3D prin proceduri de măsurare tridimensională

2.3.1 Cercetări privind asigurarea calității pieselor injectate

În lucrarea [88] se prezintă principalele aspecte privind rolul măsurării tridimensionale în asigurarea calității. Lucrarea argumentează necesitatea inspecției tridimensionale a pieselor injectate din material plastic, prezentând cerințele speciale și condițiile particulare relativ la specificitatea naturii materialului piesei. Este prezentată o strategie de măsurare pe mașini de măsurat în coordonate pentru verificarea poziției, preciziei dimensionale și formei pentru găuri circulare, canale rotunde (sloturi) și contururi liniare pentru piese din material plastic utilizate în industria auto datorită modificărilor dimensionale cauzate de contracție și deformația piesei.

a) Direcții privind măsurarea dimensională a pieselor injectate din material plastic

Cheia implementării controlului procesului de injectare este utilizarea strategiei prin care înțelegem procesul de injectare din punct de vedere al materialului plastic. Este important să înțelegem cum diferitele variabile ale procesului care acționează asupra materialului plastic determină caracteristicile finale ale piesei din material plastic. Pentru a atinge un grad maxim de control a procesului cu efecte pozitive asupra produsului injectat din material plastic, este important să se măsoare și să se controleze variabilele materialului plastic.

În procesul de injectare sunt în jur de 20 de parametri de proces, împărțiți în două grupe: parametri de produs și parametri de proces, parametri care trebuie monitorizați pentru controlul procesului și pentru asigurarea calității produsului [89-92]. Parametrii de produs sunt: dimensiunile produsului, greutatea și aspectul. Dimensiunea produsului este unul din cei mai importanți parametri. În mod evident, dimensiunile produsului trebuie monitorizate pentru a fi siguri că produsul este în interiorul specificațiilor dimensionale [93,94]. Posibilele cauze pentru variația dimensională a unui produs injectat sunt prezentate în Figura 2.3.1.

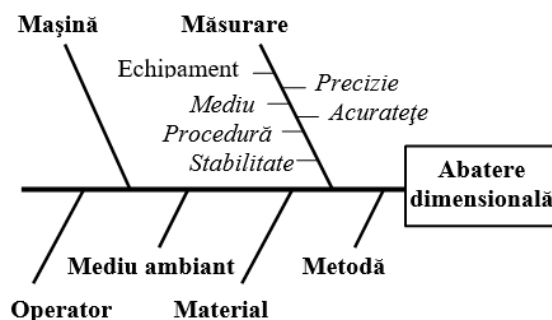


Figura 2.3.1. Diagrama de analiză a variației pentru abatere dimensională

Măsurarea dimensiunilor produsului este adeseori cea mai critică măsurare în procesul de injecție a materialelor plastice. Alegerea metodei de măsurare va depinde de câțiva factori, cum ar fi forma și dimensiunile produsului, câmpul de toleranță, costul echipamentului de măsurare etc.

Soluțiile pentru măsurarea tridimensională pot fi împărțite în două grupuri care depind de caracteristici variate, cum ar fi tehnologia, construcția sistemului sau tipul de măsurare. Controlul procesului și asigurarea calității depind din ce în ce mai mult de performanțele mașinilor de măsurat în coordonate (CMM) [95,96]. CMM-urile sunt recomandate la măsurarea pieselor de precizie, de dimensiuni mici, pieselor mari (caroserii auto, piese din material plastic), la calibrarea pieselor etalon și a etaloanelor de măsurare. CMM nu furnizează doar capacitatea de a măsura dimensiuni pentru elemente geometrice standard ci și piese cu elemente geometrice speciale [32],[36].

Dispozitivele utilizate la explorarea piesei în vederea generării informației elementului măsurand sunt senzorii, grupați în două familii: senzori de contact și senzori non-contact [38],[49],[97]. Datorită acurateții lor de măsurare foarte ridicată, senzorii de contact (tactili) sunt cei mai utilizați, și sunt corespunzători pentru un domeniu foarte larg de aplicații de măsurare. Pentru a obține punctele de măsurare ei presupun un contact între sfera de rubin a palpatorului și suprafața piesei. Unele sisteme de palpare oferă module cu un domeniu larg pentru forța de declanșare care permit ca performanța sistemului de palpare să fie cât mai potrivită cu sarcina de măsurat. De exemplu, modulul de forță redusă poate fi utilizat pentru aplicații care reclamă forțe mici de declanșare - de exemplu garnituri din cauciuc, unele piese din material plastic etc. Cu toate acestea, măsurarea punct cu punct oferă un ritm de măsurare mai redus deoarece implică o mișcare mecanică de la un punct până la următorul. Ca și rezultat, sunt colectate mai puține date putând rămâne uneori suprafețe critice neverificate. La măsurarea continuă sezoarul rămâne în contact cu piesa urmărind profilul ei și măsurând puncte în concordanță cu legile pre-determinate pentru o singură traiectorie de măsurare. În general, senzorii măsuranți, de acuratețe ridicată și mai cuprinzători față de măsurarea punct cu punct, grație capacității de a urmări un profil și de a determina coordonatele spațiale relevante aproape în mod continuu, pot furniza informații complete despre forma elementului geometric măsurat.

Sistemele non-contact sunt de dată relativ recentă în raport cu tehnologia tactilă, mai consolidată. Metodele optice non-contact tradiționale includ lumina structurată (franje Moiré), scanere laser și tehnici bazate pe fotogrametrie [98,99]. Senzorii optici sunt în general utilizați la măsurarea sculelor, muchiilor pieselor din tablă sau material plastic, a pieselor foarte mici imposibil de măsurat cu senzorii de contact și a pieselor realizate din materiale moi (ex. unele piese din material plastic sau cauciuc) unde chiar și o presiune neglijabilă aplicată de către senzorul de contact poate distruge suprafața piesei și face măsurarea imposibilă. Aceste metode achiziționează în general mai multe puncte decât metodele de măsurare prin contact. Cu toate acestea, ele asigură un grad mai redus de acuratețe iar fiecare metodă are dezavantaje specifice care le limitează utilizarea. Senzorii non-contact cresc productivitatea ca urmare a vitezei de achiziție de date foarte ridicată, dar ei încă au unele limitări în comparație cu senzorii de contact convenționali. Tabelul 2.3.1 prezintă caracteristicile generale ale senzorilor de contact și non-contact.

Tabel 2.3.1 Caracteristici generale ale senzorilor de contact și non contact

Caracteristici	Contact	Non contact
Performanțe metrologice	Ridicate	Medii
Sensibilitate la condițiile de suprafață ale piesei (netezire, rugozitate, culoare etc.)	Rară	Ridică
Sensibilitate la rigiditatea și flexibilitatea piesei	Ridică	Nu
Sensibilitate la condițiile de iluminare ambientală	Nu	Ridică
Viteză de achiziție date	Medie	Foarte ridicată
Capacitatea de a măsura elemente adânci	Ridică	Foarte redusă

b) Procedură de localizare elemente geometrice pe o piesă injectată care prezintă deformații folosind senzor de contact

Măsurarea tridimensională a pieselor injectate din material plastic este efectuată, în cele mai multe cazuri, pe CMM cu senzori de contact, exceptând piesele injectate de dimensiuni mici greu accesibile pentru măsurarea unor elemente interioare, sau piesele din material plastic de rigiditate foarte redusă. Chiar dacă câmpul de toleranță la piesele injectate din material plastic este în general mai mare decât câmpul de toleranță al pieselor uzinate din materiale metalice, măsurarea poate fi mult mai dificilă datorită deformației piesei ca urmare a contracției acesteia. Deformația este mai pronunțată la piesele complexe, de dimensiuni mari și cu pereți subțiri.

Procedura de măsurare pentru piesele injectate cu o deformare importantă presupune pentru început localizarea poziției elementului geometric care urmează a fi măsurat și apoi măsurarea propriu-zisă. Probleme pot apărea la măsurarea orificiilor de dimensiuni mici. În acest caz diametrul sferei de palpăre a palpatorului este apropiat de dimensiunea orificiului, iar datorită deformăției piesei poate exista o abatere mare față de poziția nominală a centrului orificiului existând astfel riscul de coliziune între elementul de palpăre și muchia orificiului. Pentru a reduce riscul de deteriorare a sistemului de palpăre este recomandat ca introducerea palpatorului în orificiu să se facă cu viteză de deplasare redusă (viteză de căutare).

În cele ce urmează se prezintă o procedură de localizare a unui orificiu circular, a unui canal (slot) și a unei muchii rectilinii pentru o piesă injectată utilizată în industria auto (Figura 2.3.2). Piesa are dimensiunile de 800x100x500mm, pereți subțiri (ex. 2 mm) și o formă complexă. Înainte de a măsura cercul B (ex. $\varnothing 5\text{mm}$) trebuie realizată o pre-orientare a centrului orificiului. Apoi trebuie măsurat cercul a doua oară (ex. 8 puncte) într-un plan situat la jumătatea grosimii peretelui față de planul A.

Strategia utilizată la localizarea unui cerc

Pentru a localiza cercul B, la început trebuie palpat planul din jurul orificiului (plan A – Figura 2.3.2 și 2.3.3a) și realizată o orientare spațială. Se pune acest plan în poziția de zero față de axa Y. Se intră în orificiu (viteză redusă) față de coordonatele nominale ale centrului cercului (X_B , Z_B) la jumătatea grosimii peretelui față de planul A.

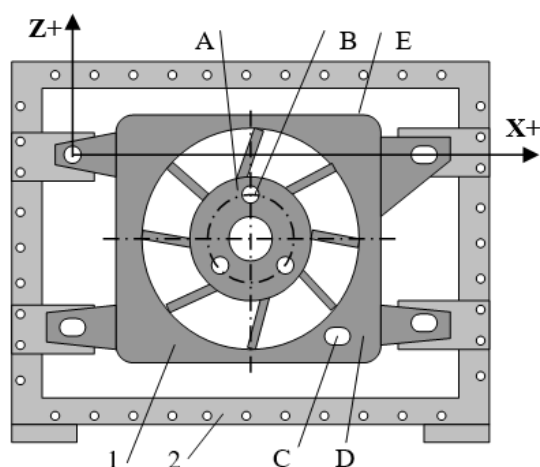


Figura 2.3.2. Exemplet de piesă injectată din material plastic fixată pe un dispozitiv special

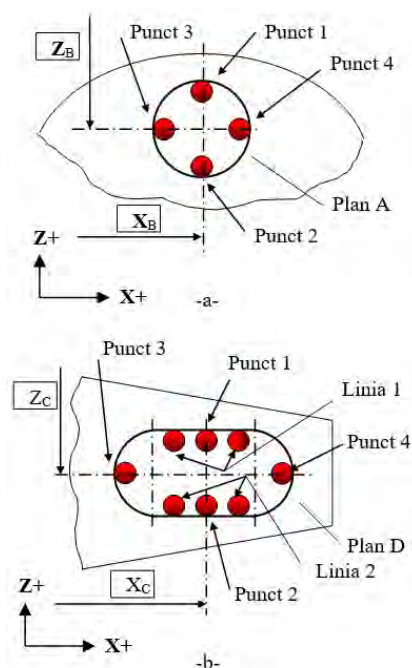


Figura 2.3.3. Măsurare orificiu circular și slot rotund

Se măsoară poziția de simetrie după axa Z (punct 1 și punct 2 - Figura 2.3.3a) în interiorul orificiului. Punctul de simetrie obținut se pune în poziția de zero față de axa Z. Față de acest punct de zero în Z se determină simetria după axa X (punct 3 și punct 4). Punctul de simetrie se pune pe zero pe axa X. Pe baza punctului de simetrie în X se atinge punctul de simetrie în Z – acesta fiind poziția finală a centrului cercului.

Strategia utilizată la localizarea unui slot

Pentru localizarea slotului C, la început trebuie măsurat planul aflat în jurul orificiului (plan D – Figura 2.3.2 și 2.3.3b) și se face o orientare spațială. Se pune planul în poziția de zero după axa Y. Se intră în slot (viteză redusă) în poziția nominală a centrului slotului (X_c, Z_c) la jumătatea grosimii peretelui față de planul D. Se măsoară simetria în Z (punct 1 și punct 2) în interiorul slotului. Punctul de simetrie obținut se pune pe zero în Z. Conform cu acest zero în Z se atinge punctul de simetrie în X (punct 3 și punct 4). Punctul de simetrie este zero în X. Conform cu acest punct de simetrie în X se atinge punctul de simetrie în Z – care este centrul final al slotului pe Z.

Pentru a obține centrul în X se aplică strategia:

Se determină distanța dintre punctul 1 și punctul 2. Se ia jumătate din această distanță și se mută rezultatul după punctul 3. Acesta este centrul în X pentru a măsura cercul din partea stângă și pe urmă din partea dreaptă. Se palpează cercul (8 puncte) la jumătatea grosimii față de planul D pe un arc de cerc cu 160° . Se determină punctul de simetrie a acestor două cercuri măsurate. Acest punct de simetrie va fi centrul pe axa X. În final se măsoară slotul a doua oară în minim 24 de puncte (dacă softul de măsurare permite acest lucru), la jumătatea grosimii peretelui față de planul D. Dacă softul nu permite se va apela la următoarea metodă. Se determină linia de simetrie între cele două linii ale slotului (linia 1 și linia 2), care se vor măsura în minim 3 puncte. Cu această linie de simetrie se va face o aliniere în plan. Conform cu această linie se va măsura cercul din partea stângă și din partea dreaptă și se determină punctul de simetrie a celor două cercuri. Acest punct de simetrie este centrul slotului.

Strategia utilizată la localizarea unui contur liniar

La măsurarea unui contur liniar de pe fața E (Figura 2.3.2) se palpează la început un punct de căutare pe partea exterioară a muchiei (Figura 2.3.4). Pe baza acestui punct de căutare se palpează partea frontală a peretelui la jumătatea grosimii acestuia. Punctele de căutare au rolul de a evita întreruperea operației de măsurare prin palparea „în gol” sau cu tija palpatorului în situația în care piesa este deformată (Figura 2.3.4). Pentru obținerea conturului liniar se aplică următoarea

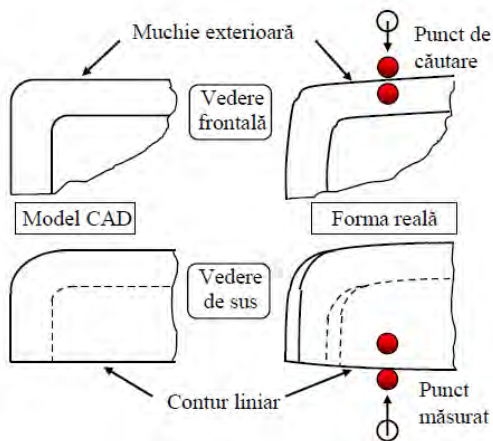


Figura 2.3.4. Măsurare contur liniar

metodă: Dintre toate punctele măsurate se alege, în concordanță cu poziția nominală, punctul cu diferența maximă. Distanța de la acest punct la poziția nominală, multiplicată cu 2 este rezultatul căutat.

c) Inspecția primei piese la injectare piesă din material plastic

Matrițele de injectare sunt adesea construite pornind de la date CAD modificate intenționat, prin încorporarea unor factori de contracție uniformi sau neuniformi, prin adăugarea unor unghiuri pentru a scoate piesa, linii de separare etc. Comportarea la contracție

joacă un rol critic în determinarea dimensiunilor finale ale matriței de injectare și ale piesei. Cunoștințele practice sunt de asemenea folosite în scopul reducerii zonelor cu material de grosime ridicată versus zone cu grosimi reduse și posibilitatea adăugării de elemente geometrice în scopul reducerii deformării și contorsionării piesei.

În anumite cazuri particulare pentru piese simple, prin utilizarea acestor reguli, matrițele pot fi proiectate și uzinate pentru a produce piese bune fără a fi necesare modificări ulterioare. Pentru piese injectate de formă complexă cu acuratețe ridicată, chiar și prin utilizarea acestor reguli

de bază, modificările ulterioare ale matrițelor sunt necesare în cele mai multe cazuri. Aceste piese necesită așa zisa inspecție a primei piese și un control de calitate periodic sau continuu [100,101].

Un exemplu de inspecția primei piese pentru o piesă injectată din material plastic PBT-GF50, utilizată în industria auto este prezentată în continuare. Măsurările au fost efectuate pe o mașină de măsurat în coordonate Zeiss Eclipse® utilizând pachetele software Calypso® și Holos® [102,103].

Pentru măsurarea pe CMM a dimensiunilor și a formei piesei injectate aceasta a fost fixată pe masa mașinii (Figura 2.3.5), fără deformarea piesei. Al doilea pas a constat în măsurarea unor elemente geometrice necesare pentru alinierea piesei și pentru determinarea sistemului de referință al piesei (Figura 2.3.6). În cadrul sistemului de referință al piesei, fiecare element geometric al piesei a fost măsurat într-un număr de puncte, iar pe baza informațiilor primite s-a făcut evaluarea acestora (Figura 2.3.7).



Figura 2.3.5. Fixarea piesei pe masa mașinii

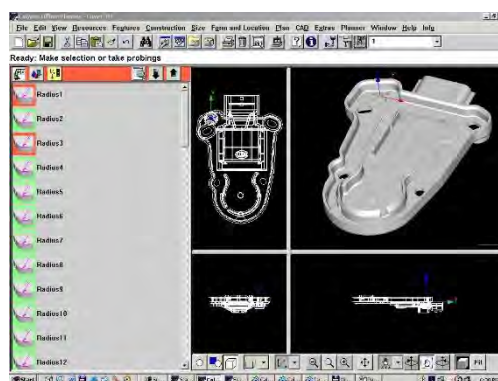


Figura 2.3.6. Sistemul de referință piesă

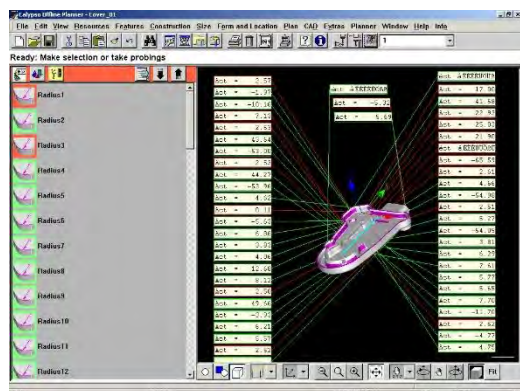


Figura 2.3.7. Rezultatele măsurării piesei

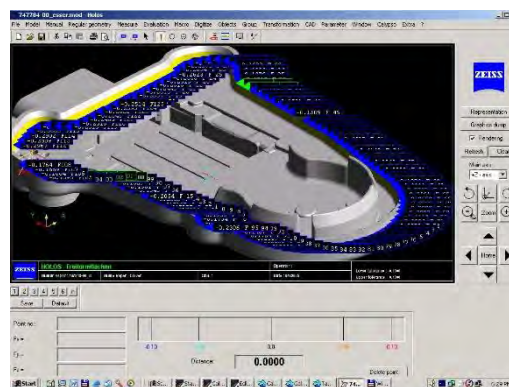


Figura 2.3.8. Rezultatele măsurării profilului piesei

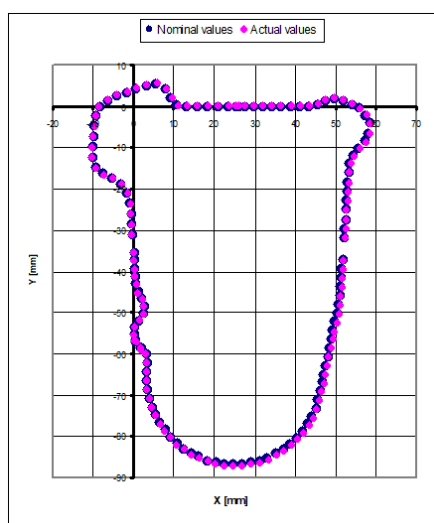
Deoarece piesa va fi asamblată cu o altă piesă este foarte important ca profilul exterior al piesei să se îmbine corespunzător cu profilul interior al piesei conjugate. Pentru a realiza acest lucru, profilul de formă complexă al piesei a fost digitizat în 125 de puncte de măsurare (Figura 2.3.8), într-un plan situat la 2.58 mm față de planul frontal al piesei, utilizând pachetul software Holos® al firmei Zeiss. În Tabelul 2.3.2 sunt prezentate rezultatele pentru punctele măsurate (doar pentru primele și ultimele 5 puncte măsurate), indicând abaterile față de punctele nominale (CAD). Figura 2.3.9 prezintă conturul exterior al profilului, ca și comparație grafică între conturul fizic și conturul nominal (CAD) al piesei, precizând cele 125 puncte nominale și actuale ale profilului.

Fiind vorba de o piesă industrială, din domeniul auto, echipa de la asigurarea calității trebuie să verifice dacă piesa este în câmpul de toleranță sau în care zonă piesa este deformată. Scopul este de a compara piesa fizică cu modelul CAD. Pe baza rezultatelor măsurătorilor și a calității produsului se va lua decizia de lansare sau nu a producției. Dacă piesa nu corespunde

formeii și preciziei dorite, echipa de la asigurarea calității trebuie să identifice zonele cu probleme și să definească cauzele. În cazul de față se observă că abaterea în anumite zone ale piesei depășesc câmpul de toleranță impus. Abaterea maximă este de 0.006 mm iar abaterea minimă -0.4992 mm. Abaterea standard este 0.244 mm la un câmp de toleranță de 0.200 mm.

Tabelul 2.3.2 Rezultatele măsurării conturului (punctele 1-5; 121-125)

Punct	X act X Nom	Y act Y Nom	Z act Z Nom	Ex	Ey	Ez	Distanța
1	0.6657 0.7614	4.4623 4.1883	2.5807 2.5807	-0.0957	0.2740	0.0000	-0.2902
2	3.0754 3.1664	5.2747 4.9822	2.5812 2.5812	-0.0910	0.2925	0.0000	-0.3063
3	5.6691 5.6175	5.5471 5.2383	2.5814 2.5814	0.0516	0.3088	-0.0000	-0.3131
4	8.0522 7.8644	4.3753 4.1638	2.5810 2.5810	0.1878	0.2115	0.0000	-0.2828
5	9.4090 9.2055	2.0823 2.0247	2.5784 2.5784	0.2035	0.0576	0.0000	-0.2115
121	-9.3965 -9.2051	-2.3931 -2.4162	2.5787 2.5787	-0.1914	0.0232	0.0000	-0.1928
122	-8.4624 -8.2635	0.0145 -0.1430	2.5795 2.5795	-0.1989	0.1575	0.0000	-0.2537
123	-6.4078 -6.2772	1.5907 1.3130	2.5878 2.5878	-0.1306	0.2776	0.0000	-0.3068
124	-4.0812 -3.9643	2.6250 2.3523	2.5820 2.5820	-0.1169	0.2727	0.0000	-0.2967
125	-1.7182 -1.6165	3.5732 3.3114	2.5800 2.5800	-0.1017	0.2618	0.0000	-0.2809
Abatere superioară: 0.1000 mm							Abatere standard = 0.2444
Abatere inferioară: -0.1000 mm							min(52) = -0.4992 max(101) = 0.0006



Legendă: Nominal values=valori nominale;
Actual values=valori actuale

Figura 2.3.9. Reprezentarea grafică a profilului digitizat

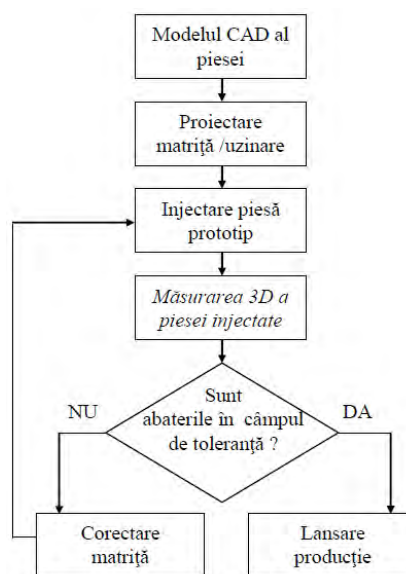


Figura 2.3.10. Faza de încercare și lansare producție

Ciclul complet de la proiectarea piesei până la lansarea producției, cu modificările în faza de încercare sunt prezentate în Figura 2.3.10. După corectarea matriței, noile piese vor fi măsurate și comparate cu modelul CAD, respectiv cu specificațiile acestuia.

În final se poate concluziona că parametrii dimensionali sunt cele mai des întâlnite caracteristici de calitate ale pieselor injectate din material plastic. Comparativ cu piesele uzinate din materiale metalice, piesele injectate din material plastic prezintă deformații dimensionale și de formă mult mai mari față de modelul CAD și de aceea la măsurarea lor se vor aplica uneori proceduri speciale privind localizarea unor elemente geometrice de pe piesele injectate.

2.3.2 Cercetări privind influența parametrilor tehnologici asupra caracteristicilor dimensionale a pieselor realizate din rășini prin printare 3D

Lucrarea [104], publicată într-o revistă situată în zona roșie (Q1), este rezultatul muncii de echipă a celor trei autori ai lucrării, specialiști în măsurare tridimensională, printare 3D, și planificarea experimentelor factoriale. Partea cu printarea 3D a pieselor i-a revenit în totalitate coautorului lucrării, Mircea Vasilescu.

Principalul obiectiv al lucrării a fost de a determina modul în care structura de susținere în procesul de printare 3D DLP influențează caracteristicile suprafețelor plane și cilindrice. Piesa de studiu a fost printată cu ajutorul tehnologiei de printare 3D cu control digital al luminii (LCD). Pentru măsurarea caracteristicilor fizice ale piesei printate a fost utilizată o mașină de măsurat în coordonate (CMM) cu senzor de contact.

1. Introducere

Atât în cercetare, cât și în producție, calitatea obținută prin procesul de printare 3D are un rol esențial în realizarea unor piese sau ansamble cu rol funcțional [105-108]. În același timp, utilizarea acestei tehnologii permite reducerea costurilor de fabricație [109,110], precum și a nivelului de poluare [111-114]. Printarea 3D este un proces tehnologic relativ nou [115,116] care permite generarea de piese mai rapid decât alte metode similare de fabricație. În literatura de specialitate, există mai multe studii legate de printarea 3D, printre acestea numărându-se cele care se ocupă de evoluția în timp a acestui mediu [117,118].

Suprafețele plane și profilate au un rol esențial în ceea ce privește mișcarea cinematică și cea funcțională. Utilizarea unei astfel de abordări pentru generarea unor caracteristici specifice ale pieselor, cu costuri reduse, permite reducerea costurilor de proiectare și a celor de producție [119,120]. Se poate lua în considerare analiza suprafețelor plane sau rotunde, care asigură generarea fațetelor pe care se poate realiza mișcarea liniară/de rotație, cu viteză și precizie ridicată.

Generarea elementelor rotunde sau plane create prin prelucrarea convențională prin injectare a materialelor sau prin procedeul de printare FDM (Fused Depositing Modeling) [121-123], utilizează plasticul topit care va fi depus strat cu strat în locuri prestabilite. În cadrul procesării cu control digital al luminii (DLP) [124], generarea piesei se face prin polimerizare optică a materialului.

Proiectarea piesei utilizate în procesul de printare se poate realiza cu o versiune educațională a softului Fusion 360. Programul este un soft gratuit de proiectare 3D asistată de calculator (CAD) și de fabricație asistată de calculator (CAM) [125]. Acest soft permite generarea de corpuri solide cu o precizie mai mare sau mai mică a suprafețelor sau formelor.

În contextul tehnologic actual, producția de componente cu costuri de fabricație reduse și cel mai scurt proces de fabricație pentru realizarea de subansamble sau componente este foarte importantă. Deoarece printarea 3D asigură aceste deziderate, determinarea preciziei dimensionale a piesei, precum și a erorilor de formă și de poziție este, de asemenea, esențială. Metrologia tridimensională permite precizia și reproductibilitatea măsurărilor în ingineria mecanică [126-128] pentru măsurarea unor caracteristici precum lungimea, unghiurile și alte relații geometrice ale piesei printate 3D. Avantajul integrării printării 3D cu metrologia 3D ne permite să investigăm atât procesul de printare, cât și să determinăm modalitățile tehnologice pentru atingerea obiectivului propus și menționat anterior.

Pe baza unei analize a literaturii de specialitate, se poate observa că temele propuse de autori sunt noi în domeniul tehnic al printării 3D care utilizează tehnologia DLP. Aceeași constatare este și în cazul calității suprafeței elementelor printate 3D care sunt măsurate cu ajutorul unei mașini de măsurat în coordonate (CMM) cu senzori de contact, care are o precizie mai mare în comparație cu sistemele de scanare.

2. Materiale și metode

2.1. Considerații privind materialul utilizat pentru printare și imprimanta utilizată pentru realizarea pieselor experimentale

Rășina utilizată pentru printare este specifică procesului de printare DLP, cu o lungime de undă de solidificare de 405 nm [129,130]. Densitatea lichidă a rășinii este de $1,100 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, iar densitatea solidă a rășinii este de $1,184 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$. În printarea 3D cu rășină, o grosime a stratului de 0,05 mm este foarte recomandată pentru o generare. Timpul de expunere a stratului recomandat pentru rășină este de 3 până la 15 secunde pentru grosimea stratului de 0,02 până la 0,10 mm, iar timpul de expunere în partea inferioară este de 20 până la 80 de secunde pentru 4 până la 8 straturi în poziția inferioară. Din experiența autorilor la printarea 3D cu acest tip de rășină, timpul de expunere recomandat pentru utilizare este de 50 de secunde pentru cele opt straturi de jos și 6 secunde pentru 0,05 mm strat.

Imprimanta utilizată pentru generarea piesei este de tip model comercial cu costuri reduse. Pentru acest proces de printare, a fost utilizată o imprimantă ANYCUBIC PHOTON [131]. Acest tip de imprimantă folosește în procesul de printare lumina emisă prin utilizarea unui ecran transparent cu diametrul de mărimea unui punct multiplu cu valoarea de 47 micrometri. Pentru a genera fotopolimerizarea, se utilizează o sursă de lumină ultravioletă cu o putere de 25 wați și o lungime de undă de 405 nm. Rezoluția de-a lungul axei Z este de 1,25 μm . O incintă cu proprietăți termice și măsurare automată a temperaturii și umidității este propusă de autori pentru a fi utilizată în procesul de printare. Această incintă cu automatizare ARDUINO este realizată în laboratorul de printare 3D. Aceste două elemente fizice au fost măsurate în interiorul camerei imprimantei și în incintă. Utilizarea unei incinte poate menține temperatura de printare a rășinii între 25°C și 30°C, ceea ce este vital pentru un bun proces de printare cu rășină.

2.2. Considerații privind generarea modelului utilizat pentru realizarea pieselor experimentale

Atât în cercetare, cât și în producție, calitatea suprafețelor și a preciziei obținute prin printare 3D, au un rol esențial în realizarea unor piese sau ansamble cu rol funcțional. Printarea 3D este un proces tehnologic relativ nou care permite generarea de piese mai rapid decât alte metode mecanice sau chimice similare. Suprafețele plane și profilate au un rol esențial, atât în ceea ce privește mișcarea cinematică, cât și cea funcțională. Utilizarea unei astfel de abordări pentru generarea unor caracteristici specifice ale pieselor la costuri reduse permite reducerea atât a costurilor de proiectare, cât și a costurilor de producție.

În cadrul lucrării au fost analizate caracteristicile dimensionale și de suprafață ale piesei. Acest studiu ne-a permis să proiectăm o piesă care să includă ambele tipuri de caracteristici menționate mai sus și care să permită o examinare completă și corectă, din punct de vedere experimental. În Figura 2.3.11 este prezentată piesa de formă paralelipipedică cu o lungime de 55 mm, o lățime de 35 mm și o grosime de 5 mm. Piesa are trei găuri cilindrice cu diametrul de 5 mm, 10 mm și 15 mm și trei bosaje cilindrice cu diametrul de 5 mm, 10 mm și 15 mm și înălțimea de 10 mm, toate generate prin operații CAD specifice.

O etapă esențială a generării corpului piesei este transformarea structurii mecanice CAD create în corpul piesei cu o precizie mai mică cu 752 de triunghiuri sau mai mare cu 2342 de triunghiuri. Figura 2.3.12 prezintă rețeaua generată cu diferite niveluri de rafinare. În imaginea din stânga, în Figura 2.3.12a, a fost prezentată piesa cu cel mai mic nivel de rafinare a ochiurilor de rețea, cu 752 de triunghiuri, iar în imaginea din dreapta, Figura 2.3.12b, componenta corpului cu cel mai înalt nivel de rafinare a ochiurilor de rețea, cu 2342 de triunghiuri.

Se poate observa că rezoluția poate fi modificată mai mult sau mai puțin, pentru suprafețele care au o secțiune circulară, atunci când se generează structura corpului de bază.

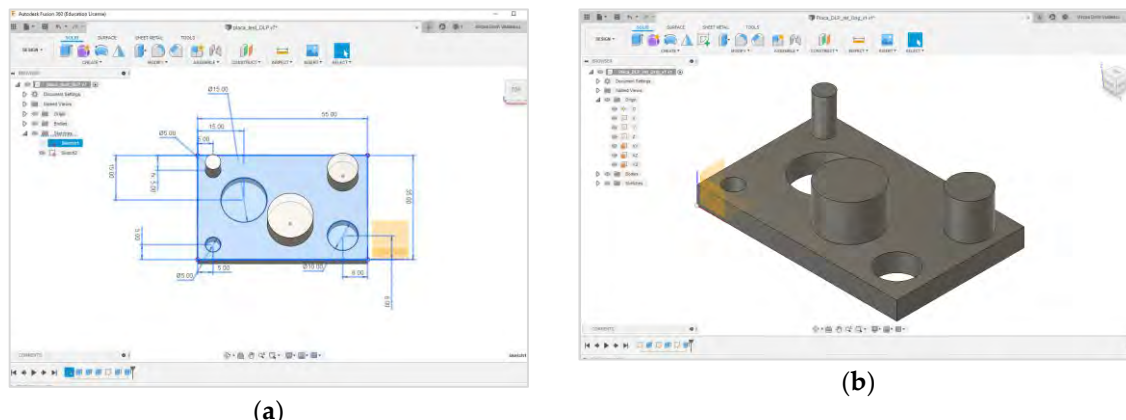


Figura 2.3.11. Generarea CAD a piesei: (a) Specificațiile piesei; (b) Modelul 3D

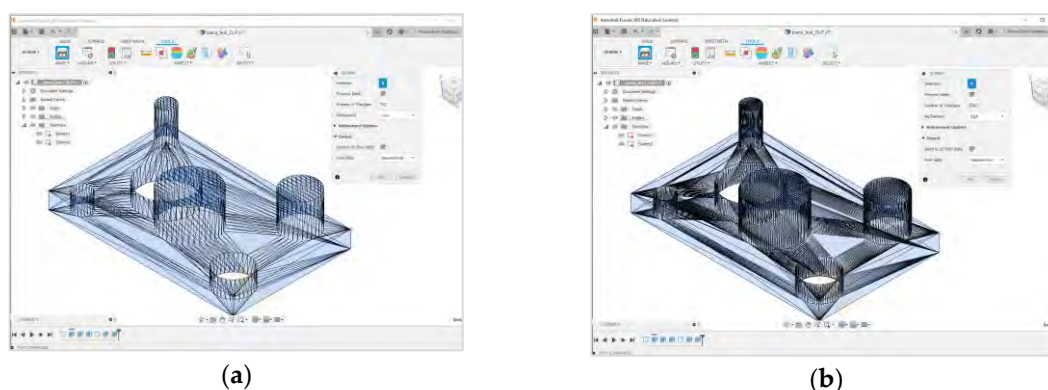


Figura 2.3.12. Rețea piesă: (a) nivel de rafinare scăzut; (b) nivel de rafinare ridicat

Un aspect esențial, care face posibile măsurătorile 3D, a fost localizarea elementelor cilindrice (găuri și bosaje) pe suprafața piesei. Distanțele minime dintre suprafețele cilindrice ale acestora sunt de 3 mm, ținând cont de diametrul de 2 mm al vârfului palpatorului instalat în sistemul de palpate al mașinii de măsurat în coordonate (CMM) utilizate pentru măsurarea piesei.

2.3. Considerații privind măsurarea piesei printate 3D

Pentru măsurarea caracteristicilor fizice, cum ar fi lungimi, unghiuri și alte elemente geometrice în raport cu piesa printată 3D, s-a utilizat o mașină de măsurat în coordonate (CMM) DEA Global Advantage 7.10.7 cu senzor de contact [132]. Această mașină este calibrată (cu certificat de etalonare) și are eroarea maximă admisibilă (MPEE) pentru măsurarea lungimii: $MPEE = 1,9 + L/300 \text{ } \mu\text{m}$ [132,133]. Softul metrologic utilizat pentru crearea și executarea programelor de măsurare a fost PC-DMIS 2019 R2 [134]. Primul pas în crearea programului de măsurare a constat în alinierea piesei fizice, instalată pe CMM, cu modelul CAD importat în softul PC-DMIS și setarea originii în conformitate cu modelul CAD, prezentată în Figura 2.3.13a. Piesa printată a fost fixată într-o menghină paralelă cu trei pini [135], prezentată în Figura 2.3.13b. Pentru a putea fixa piesa între cei trei pini ai menghinei, marginea straturilor inferioare solide ale piesei printate a fost îndepărtată prin tăiere. În Figura 2.3.13c se prezintă modul de definire a suprafețelor piesei și a planelor de măsurare, în care au fost evaluate caracteristicile cilindrice. Definiția strategiei de palpate a piesei este prezentată în Tabelul 2.3.3. Caracteristica măsurată (ex. plan, linie și cerc) este definită pentru fiecare dintre suprafețele fizice, coordonata Z a planului de măsurare a caracteristicii și numărul de puncte de palpate (contact). Modelele punctelor de palpate obținute în urma măsurătorilor pentru suprafețele plane și cilindrice și abaterile din fiecare punct de palpate sunt prezentate în Figura 2.3.13d. Săgețile indică direcția abaterilor și se poate observa cum dimensiunea ar putea produce o modificare a structurii piesei printate 3D.

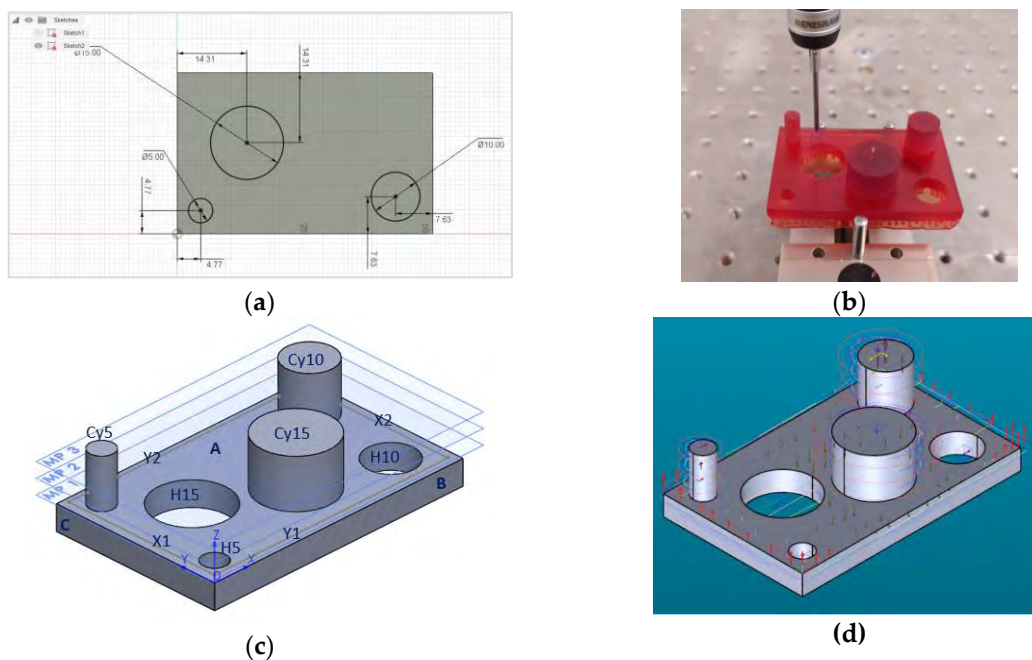


Figura 2.3.13. Măsurarea piesei: (a) Originea modelului 3D; (b) Fixarea piesei; (c) Definirea suprafețelor piesei; (d) Distribuția punctelor de palpate și direcția abaterilor.

Tabel 2.3.3 Definirea strategiei de palpate

Element fizic	Caracteristică măsurată	Coordonata Z plan de măsurare MP [mm]	Nr. puncte palpate
Suprafața A	Plan	0	110
Suprafața B	Linie dreaptă	-2	14
Suprafața C	Linie dreaptă	-2	12
Suprafața B1	Linie dreaptă	-2	14
Suprafața C1	Linie dreaptă	-2	12
Contur X1	Linie dreaptă	0	12
Contur X2	Linie dreaptă	0	12
Contur Y1	Linie dreaptă	0	20
Contur Y2	Linie dreaptă	0	20
Orificiu Φ 5	Cerc	-2.5	36
Orificiu Φ 10	Cerc	-2.5	72
Orificiu Φ 15	Cerc	-2.5	72
Cilindru Φ 5	Cerc MP 1 / Cerc MP 2 / Cerc MP 3	2 / 5 / 8	36 / 36 / 36
Cilindru Φ 10	Cerc MP 1 / Cerc MP 2 / Cerc MP 3	2 / 5 / 8	72 / 72 / 72
Cilindru Φ 15	Cerc MP 1 / Cerc MP 2 / Cerc MP 3	2 / 5 / 8	72 / 72 / 72

2.4. Consideratii privind metoda utilizată în cadrul experimentului

Metoda utilizată în cadrul experimentului s-a bazat pe teste succesive de printare și măsurare, stabilite pentru a minimiza numărul de piese printate 3D, precum și numărul de măsurători.

Prima etapă se referă la proiectarea piesei. În această etapă, pe baza experienței anterioare a autorilor lucrării, s-a avut în vedere mai întâi comportamentul suprafețelor plane generate în funcție de modul în care acestea sunt produse. Ulterior, după determinarea unei suprafețe optime, următorul pas a fost identificarea setărilor optime de susținere, privind forma suporturilor piesei supusă procesului de printare, pe baza unui experiment factorial.

Cea de-a doua etapă a constat în crearea programului de măsurare folosind modelul 3D pentru măsurarea pieselor printate. În urma generării pieselor printate în prima etapă, au fost efectuate corecții ale programului de măsurare și verificarea modului de realizare a procesului de măsurare.

Primul program experimental complet a constat în stabilirea numărului de suporturi care au fost deteriorate sau rupte în urma procesului de printare. De asemenea, a fost identificat modul în care ruperea unor suporturi influențează dimensiunea în procesul de măsurare. Dimensiunea este studiată atât din punct de vedere al mărimii, cât și din punct de vedere a poziției geometrice.

În cel de-al doilea experiment factorial s-a luat în considerare modul în care dimensiunea geometrică și modificările privind densitatea suporturilor ar putea influența caracteristicile măsurate ale piesei printate. În acest sens, s-a luat în considerare și o analiză dispersională specifică unui proces de cercetare experimentală. În cele din urmă, aceste date au fost puse în concordanță cu standardele ISO [139].

3. Rezultate

Din punct de vedere experimental, autorii au împărțit experimentul în două părți, din cauza volumului de date care trebuie puse în experiment și a informațiilor din literatura de specialitate, respectiv din experiența anterioară a acestora.

3.1. Rezultate privind suporturile deteriorate sau rupte în timpul procesului de printare 3D DLP

Pentru o soluție rezonabilă în primul experiment de printare, autorii au luat în considerare generarea automată a suporturilor, folosind valoarea specifică prezentată în Tabelul 2.3.4.

Tabelul 2.3.4 Valoarea experimentală pentru suporturile generate în mod automat

Număr	Tip	Diametru suprafață de contact [mm]	Densitate suport [%]	Număr suporturi generate	Număr suporturi rupte	Planeitate [mm]
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	Ușor	0,8	30	243	243	<i>imposibil</i>
2		0,8	40	418	154	0,853
3		0,8	50	868	95	0,830
4		0,8	60	927	45	0,823
5	Mediu	1,2	30	92	34	1,031
6		1,2	40	180	15	0,649
7		1,2	50	296	1	0,584
8		1,2	60	421	0	0,763
9	Mare	1,6	30	56	16	0,646
10		1,6	40	89	2	0,631
11		1,6	50	158	0	0,495
12		1,6	60	229	0	0,700

Metoda de numărare a numărului total de suporturi utilizate în planul de generare este metoda hârtiei. Aceasta se bazează pe o bandă de hârtie cu o grosime de 0,1 mm utilizată pentru a determina dacă există un spațiu (punct de separare) între suporturi și piesă. În Figura 2.3.14. se prezintă o piesă printată (densitate mare) cu o densitate a suporturilor de 30%, 40% și 50%.

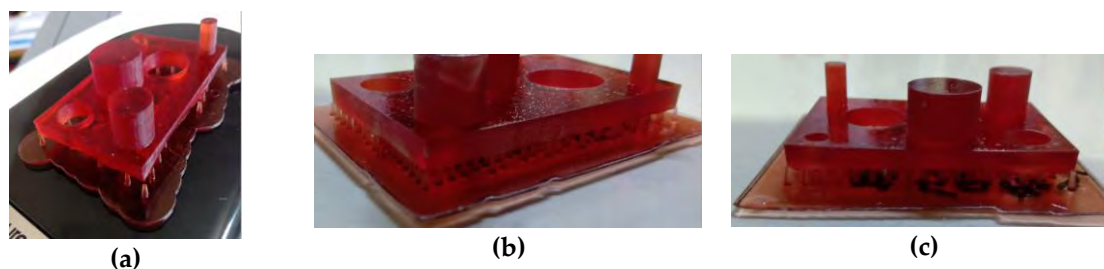


Figura 2.3.14. Tipul de suporturi cu densitate mare: (a) densitate 30%; (b) densitate 40%; (c) densitate 50%.

În Tabelul 2.3.4 se poate observa că în prima și a doua coloană există o corelație directă între valori. Aceeași situație este pentru coloanele trei și patru. Pe baza acestei observații se impune selectarea a două dintre acestea și s-a decis alegerea diametrului suprafeței de contact și densitatea suporturilor (coloanele 2 și 3). Pornind de la această observație, în programul Statgraphics Centurion [136] a fost creat un experiment factorial de tip suprafață de răspuns 3^2 [137]. Au fost selectați doi factori experimentali (independenți) și două variabile de răspuns (dependente) pentru această parte a experimentului. Factorii independenți au fost diametrul suprafeței de contact a suporturilor și densitatea suporturilor. Ca variabile dependente, s-a luat numărul de suporturi rupte și planeitatea suprafeței A prezentată în Figura 2.3.13c. Pentru fiecare factor independent, au fost alese cele trei niveluri: minim, mediu și maxim.

Experimentul a început cu o densitate a suporturilor de 30 %. În Tabelul 2.3.4 se observă că pentru diametrul suprafeței de contact de 0,8 mm toate suporturile au fost rupte (procent de 100%). Pentru celelalte două valori de 1,2 mm și 1,6 mm ale diametrului suprafeței de contact, procentul de suporturi rupte este de 36,95% și 26,78%. Din cauza numărului mare de suporturi rupte la o densitate a suporturilor de 30%, pentru experimentul factorial tip 3^2 , au fost alese valorile de densitate a suporturilor de 40%, 50% și 60%.

Prima analiză a experimentului factorial începe cu variabila dependentă ”suporturi rupte”. În Tabelul 2.3.5 se prezintă analiza dispersională [136],[138] pentru suporturi rupte. Dacă valoarea P pentru factorii independenți este mai mică de 0,05, pentru un nivel de încredere de 95%, factorii independenți afectează semnificativ rezultatul sau răspunsul variabilei dependente. Se poate observa că numărul de suporturi rupte este afectat semnificativ de diametrul suprafeței de contact a acestora, urmat de densitatea suportului și de efectul de ordinul doi a diametrului de contact și interacțiunea dintre diametrul de contact și densitatea suportului. Influența factorilor care afectează numărul de suporturi rupte este vizibilă în Diagrama Pareto, prezentată în Figura 2.3.15. Toate benzile care depășesc linia verticală arată că factorii afectează în mod semnificativ variabila dependentă *numărul de suporturi rupte*.

Tabel 3.3.5 Analiza dispersională (ANOVA) pentru *Suporturi rupte*

Sursă	Suma pătratelor	Grade de libertate	Media pătratelor	Factor Fischer -F	Valoare P
A ¹	14210.7	1	14210.7	76.53	0.0031
B ¹	2646.0	1	2646.0	14.25	0.0326
AA ¹	3872.0	1	3872.0	20.85	0.0197
AB ¹	2862.25	1	2862.25	15.41	0.0294
BB ¹	32.0	1	32.0	0.17	0.7060
Total error	557.083	3	185.694		
Total (corr.)	24180.0	8			

A: Diametru de contact, B: Densitate suport, AA: Diametru de contact la pătrat, AB: Interacțiune Diametru de contact cu Densitate suport, BB: Densitate suport la pătrat,

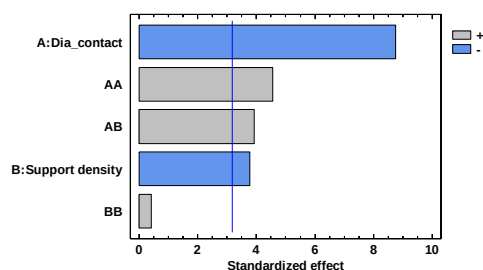


Figura 2.3.15. Diagrama Pareto pentru
Suporturi rupte

Legendă: *Dia_contact*=diametru contact;
Support density=densitate suport;
Broken supports=suporturi rupte

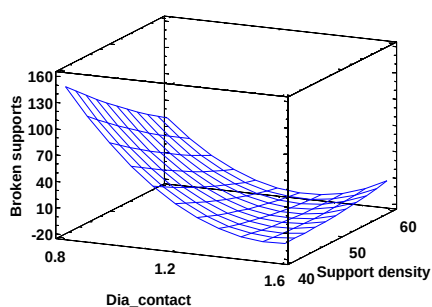


Figura 2.3.16. Suprafața de răspuns estimată
pentru *Suporturi rupte*

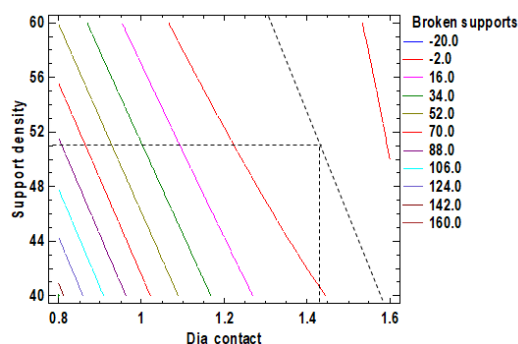


Figura 2.3.17. Contururile suprafeței de
răspuns estimate pentru *Suporturi rupte*

În relația (2.3.1) se prezintă modelul de regresie ajustat pentru funcția dependentă *Suporturi rupte*.

$$\begin{aligned} \text{Suporturi rupte} = & 1150.92 - 1116.04 \cdot \text{Diametru contact} - 14.125 \cdot \text{Densitate suport} + \\ & 275.0 \cdot \text{Diametru contact}^2 + 6.6875 \cdot \text{Diametru contact} \cdot \text{Densitate suport} + 0.04 \cdot \text{Densitate} \\ & \text{suport}^2. \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

Creșterea diametrului suporturilor de contact și a densității suporturilor duce la o reducere a numărului de suporturi rupte. În Figura 2.3.16 se prezintă suprafața de răspuns estimată, iar în Figura 2.3.17 contururile suprafeței de răspuns estimate pentru numărul de suporturi rupte. Valoarea optimă este pentru o densitate a suporturilor de 51 % și un diametru de contact de 1,43 mm. Suprafața de răspuns estimată este importantă pentru a observa poziția punctului minim sau maxim al suprafeței. Valoarea este determinată prin măsurarea punctului din Figura 2.3.17 în care este prezentat conturul suprafeței de răspuns determinate.

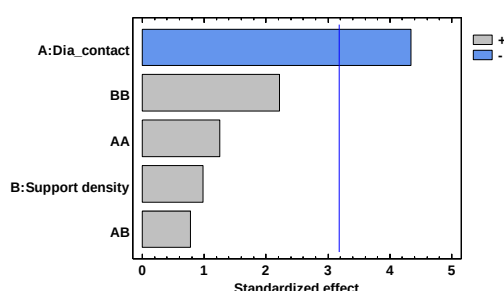
A doua parte a acestei analize a experimentului factorial a continuat cu abaterea de la planeitate a suprafeței plane a piesei. Această suprafață a fost notată în Figura 2.3.13c cu *A*. Analiza dispersională pentru planeitate este prezentată în Tabelul 2.3.6. Planeitatea suprafeței *A* este influențată, pentru un nivel de încredere de 95%, doar de diametrul suprafeței de contact a suporturilor care afectează semnificativ acest experiment. Diagrama Pareto pentru planeitate poate fi observată în Figura 2.3.18. Acest fapt este indicat în tabel prin valoarea *P* care este mai mică de 0,05 numai pentru diametrul suprafeței de contact.

Creșterea diametrului suporturilor de contact duce la o reducere a planeității suprafeței. Pentru densitatea suporturilor, planeitatea minimă cu o valoare de 0,49 mm este atinsă la o valoare a densității suporturilor de 48,5%. În Figura 2.3.19 este prezentată suprafața de răspuns estimată, iar în Figura 2.3.20, conturul suprafeței de răspuns estimate pentru planeitate. Suprafața de răspuns estimată este importantă pentru a observa poziția punctului minim sau maxim al suprafeței. Valoarea este determinată de măsurarea punctului din Figura 2.3.20 în care este prezentat conturul suprafeței de răspuns determinate.

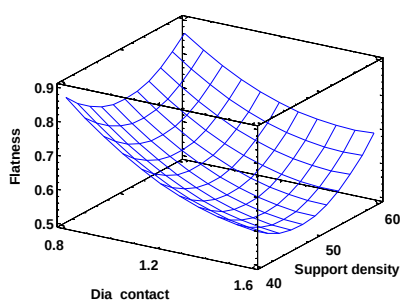
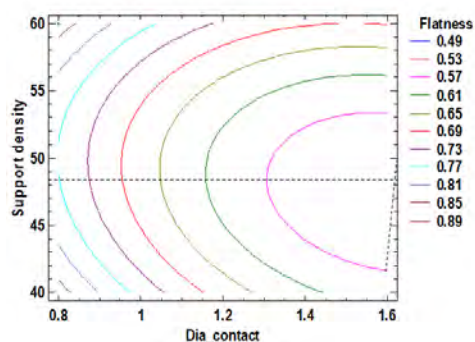
Tabel 3.3.6 Analiza dispersională (ANOVA) pentru *Planeitate*

<i>Sursă</i>	<i>Suma pătratelor</i>	<i>Grade de libertate</i>	<i>Media pătratelor</i>	<i>Factor Fischer -F</i>	<i>Valoare P</i>
A ¹	0.0770667	1	0.0770667	18.86	0.0225
B ¹	0.0039015	1	0.0039015	0.96	0.4005
AA ¹	0.00642222	1	0.00642222	1.57	0.2987
AB ¹	0.00245025	1	0.00245025	0.60	0.4951
BB ¹	0.0200667	1	0.0200667	4.91	0.1134
Total eroare	0.0122555	3	0.00408518		
Total (corectat)	0.122163	8			

¹A: Diametru de contact, B: Densitate suport, AA: Diametru de contact la pătrat, AB: Interacțiune Diametru de contact cu Densitate suport, BB: Densitate suport la pătrat,



Legendă: Dia_contact=diametru contact;
Support density=densitate suport;
Flatness=planeitate.

Figura 2.3.18. Diagrama Pareto pentru *Planeitate***Figura 2.3.19.** Suprafața de răspuns estimată pentru *Planeitate***Figura 2.3.20.** Contururile suprafeței de răspuns estimate pentru *Planeitate*

În relația (2.3.2) se prezintă modelul de regresie ajustat pentru funcția dependentă *Planeitate*.

$$\begin{aligned} \text{Planeitate} = & 4.19647 - 1.44271 \cdot \text{Diametru contact} - 0.105042 \cdot \text{Densitate suport} + \\ & 0.354167 \cdot \text{Diametru contact}^2 + 0.0061875 \cdot \text{Diametru contact} \cdot \text{Densitate suport} + \\ & 0.00100167 \cdot \text{Densitate suport}^2. \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

Analizând suprafața de răspuns estimată pentru suporturile rupte, se constată că există o valoare minimă a suporturilor rupte la o densitate a suporturilor de 50% și un diametru de contact de 1,4 mm. Referitor la planeitatea suprafeței definită prin generarea automată a suporturilor, se poate obține o valoare minimă la o densitate a suporturilor de 48% și un diametru de contact de 1,6 mm. Este important de observat că, pentru un diametru de contact de 1,2 mm la suporturile din sistemul de generare automată, adâncimea de contact este de 0,2 mm, iar pentru 1,6 mm, în aceeași situație, valoarea este de 0,3 mm. Din interpolarea matematică a valorii diametrului de contact între 1,2 mm și 1,6 mm, rezultă o valoare de 0,25 mm pentru adâncimea de contact de 1,4 mm.

3.2. Rezultate privind dimensiunea constructivă a suporturilor în procesul de printare 3D DLP a pieselor

Studiul influenței geometriei dimensionale a suporturilor este realizat în cea de-a doua parte a acestui experiment. Pentru fiecare structură de generare a suporturilor, suporturile generate în mod automat au fost corectate manual, pentru a repara erorile de generare automată a suporturilor. Datele pentru cel de-al doilea experiment sunt prezentate în Tabelul 2.3.7. Experimentul factorial utilizat este de tip Box-Behnken, în care au fost studiate efectele a trei factori în 15 combinații, într-un singur bloc. Ordinea experimentelor a fost randomizată.

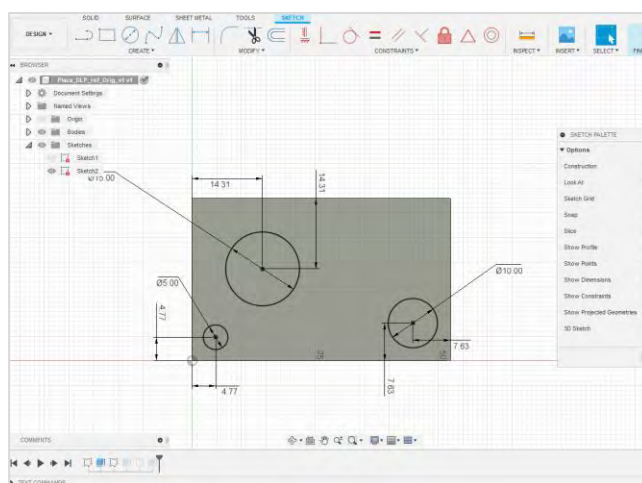
Tabelul 2.3.7 Valori experimentale ale dimensiunilor suporturilor generate prin printare 3D pe baza modelului 3D al piesei

Nr.	Densitate suport [%]	Factori independenți		Nr. suporturi		Variabilă de răspuns
		Adâncime contact [mm]	Diametru suprafață de contact [mm]	Total	Rupte	
1	40	0,1	1,2	190	33	
2	40	0,2	1,6	112	1	
3	40	0,3	1,2	214	11	
4	40	0,2	0,8	484	7	
5	50	0,2	1,2	296	1	
6	50	0,1	1,6	193	1	
7	50	0,1	0,8	868	95	
8	50	0,3	0,8	909	4	
9	50	0,2	1,2	296	1	
10	50	0,2	1,2	296	0	
11	50	0,3	1,6	158	0	
12	60	0,3	1,2	466	2	
13	60	0,2	1,6	269	0	
14	60	0,2	0,8	982	4	
15	60	0,1	1,2	479	1	

Un aspect important avut în vedere în cea de-a doua parte a experimentului a fost acela de a genera un model cât mai apropiat de valorile finale pe care dorim să le obținem pentru piesa printată. Deoarece printarea se face pe direcție verticală, de-a lungul axei Z, pentru această direcție, nu există nicio modificare a valorilor dimensionale. Tabelul 2.3.8 prezintă dimensiunile care au fost supuse procesului de corecție. În Figura 2.3.21 este prezentat modul de generare a modelului corectat.

Tabelul 2.3.8 Valoarea dimensională pentru corectarea dimensiunilor nominale ale elementelor geometrice printate ale piesei

Nr.	Tip dimensiune	Valoare nominală [mm]	Valoare măsurată [mm]	Valoare extensie/contractie [mm]	Valoare printată [mm]	Obs.
1	Elemente cilindrice	5	5,24	0,24	4,76	
2		10	10,46	0,46	9,54	
3		15	15,68	0,68	14,32	
4	Găuri cilindrice	5	5,09	0,09	4,91	
5		10	10,18	0,18	9,82	
6		15	15,42	0,42	14,58	
7	Elemente liniare	55	57,54	2,54	52,46	
8		35	37,04	2,04	32,96	
9		5	4,85	-0,15	5,15	
10	Dimensiune punct central gaură Y	5	5,29	0,29	4,71	
11		8	8,47	0,47	7,53	
12		15	15,87	0,87	14,13	
13	Dimensiune punct central gaură X	15	15,69	0,69	14,31	
14		5	5,23	0,23	4,77	
15		8	8,37	0,37	7,63	
16	Dimensiune punct central Y pentru cilindru	5	5,29	0,29	4,71	
17		8	8,47	0,47	7,53	
18		12	12,7	0,7	11,30	
19	Dimensiune punct central X pentru cilindru	25	26,15	1,15	23,85	
20		5	5,23	0,23	4,77	
21		7	7,32	0,32	6,68	

**Figura 2.3.21.** Coordonatele punctului central pentru gaura generată în schița 2

3.2.1. Rezultate privind planeitatea suprafeței corpului piesei cu o dimensiune diferită a suporturilor

În cadrul procesului experimental desfășurat în această fază a fost realizat un plan de măsurare în care suprafața plană A, prezentată în Figura 2.3.22, a fost măsurată în 110 puncte, în conformitate cu Tabelul 2.3.3.

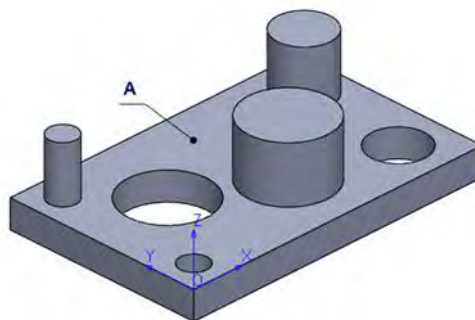


Figura 2.2.22. Definirea suprafeței plane măsurate

Valorile experimentale au fost centralizate în Tabelul 2.3.9, iar analiza dispersională pentru planeitate a fost prezentată în Tabelul 2.3.10. Se observă că doar factorii A, C, AA, BB, BC și CC pătrat au o influență semnificativă asupra planeității. Ceilalți au o influență minoră care poate fi ignorată. Valoarea P din Tabelul 2.3.10, mai mică de 0,05, indică, pentru un nivel de încredere de 95 % [138-140], că numai factorii independenți A și C, precum și interacțiunile AA, BB, BC și CC influențează semnificativ răspunsul variabilei dependente. Factorii de influență care afectează planeitatea pot fi, de asemenea, observați în Diagrama Pareto standardizată, prezentată în Figura 2.3.23.

Tabel 2.3.9 Valori experimentale pentru *Planeitate*

Nr.	Factori independenți			Variabilă de răspuns
	Densitate suport [%]	Adâncime contact [mm]	Diametru suprafață de contact [mm]	Planeitate [mm]
1	40	0,1	1,2	1,209
2	40	0,2	1,6	1,011
3	40	0,3	1,2	1,015
4	40	0,2	0,8	1,083
5	50	0,2	1,2	0,584
6	50	0,1	1,6	0,865
7	50	0,1	0,8	0,830
8	50	0,3	0,8	1,032
9	50	0,2	1,2	0,583
10	50	0,2	1,2	0,586
11	50	0,3	1,6	0,495
12	60	0,3	1,2	0,865
13	60	0,2	1,6	0,890
14	60	0,2	0,8	0,907
15	60	0,1	1,2	0,925

Modelul de regresie ajustat pentru planeitate, pentru cel de-al doilea experiment, este prezentat în ecuația (2.3.3):

$$\begin{aligned}
 \text{Planeitate} = & 9.7485 - 0.313337 * \text{Densitate suport} - 2.9575 * \text{Adâncime contact} - \\
 & 1.07219 * \text{Diametru contact} + 0.00293375 * \text{Densitate suport}^2 + 0.0335 * \text{Densitate suport} * \\
 & \text{Adâncime contact} + 0.0034375 * \text{Densitate suport} * \text{Diametru contact} + 12.6125 * \text{Adâncime} \\
 & \text{contact}^2 - 3.575 * \text{Adâncime contact} * \text{Diametru contact} + 0.596094 * \text{Diametru contact}^2.
 \end{aligned}
 \quad (2.3.3)$$

Tabelul 2.3.10 Analiza dispersională pentru *Planeitate*

<i>Sursă</i>	<i>Suma pătratelor</i>	<i>Grad de libertate</i>	<i>Medie pătrate</i>	<i>Factor-F</i>	<i>Valoare P</i>
A: Densitate suport	0.0667951	1	0.0667951	13.58	0.0142
B: Adâncime contact	0.0222605	1	0.0222605	4.53	0.0867
C: Diametru contact	0.0436601	1	0.0436601	8.88	0.0308
AA: Densitate suport ²	0.317793	1	0.317793	64.61	0.0005
AB: Interacțiune Densitate suport cu Adâncime contact	0.004489	1	0.004489	0.91	0.3833
AC: Interacțiune Densitate suport cu Diametru contact	0.00075625	1	0.00075625	0.15	0.7111
BB: Adâncime contact ²	0.0587354	1	0.0587354	11.94	0.0181
BC: Interacțiune Adâncime contact cu Diametru contact	0.081796	1	0.081796	16.63	0.0096
CC: Diametru contact ²	0.0335867	1	0.0335867	6.83	0.0475
Eroare totală	0.0245918	5	0.00491835		
Total (corectat)	0.617948	14			

În suprafața de răspuns estimată din Figurile 2.3.24-2.3.26, este important să se observe poziția punctului minim sau maxim al suprafeței. Valoarea este determinată prin măsurarea punctului din Figurile 2.3.27, 2.3.28 și 2.3.29, în care este prezentat conturul suprafeței de răspuns. Pentru o mai bună prezentare a datelor de planeitate rezultate în urma experimentului factorial, acestea au fost centralizate în Tabelul 2.3.11.

Tabelul 2.3.11 Valoarea factorului experimental pentru planeitate

Factor experimental	A [mm]	B [%]	C [mm]	Sursa	Planeitate [mm]
A: Diametru contact	1.20	51.50	0.22	Figurile 2.3.24 și 2.3.27	0.4
B: Densitate suport	1.30	51.50	0.20	Figurile 2.3.25 și 2.3.28	0.4
C: Adâncime contact	1.55	50.00	0.26	Figurile 2.3.26 și 2.3.29	0.4

În ceea ce privesc aspectele legate de planeitate, au fost observate următoarele:

1. Impactul densității suportului și al diametrului de contact este mai mare decât adâncimea de contact a geometriei suportului;
2. Planeitatea minimă a putut fi obținută într-un punct poziționat la 51,50% densitate de suport, 0,23 mm adâncime de contact medie pentru cele trei valori și 1,35 mm diametru de contact, cu o valoare a planeității în jur de 0,40 mm;
3. Valoarea minimă a planeității, obținută pentru cele cincisprezece combinații ale experimentului indicate în Tabelul 2.3.12, este de 0,495 mm, pentru nivelurile de 50% densitate a suporturilor, 0,3 mm adâncime de contact și 1,6 mm diametru de contact.

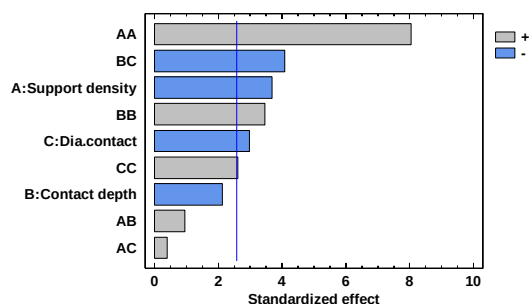


Figura 2.3.23. Diagrama Pareto pentru *Planeitate*

Legendă: Support density=densitate suport;
Dia_contact=diametru contact;
Contact depth=adâncime contact;
Flatness=planeitate

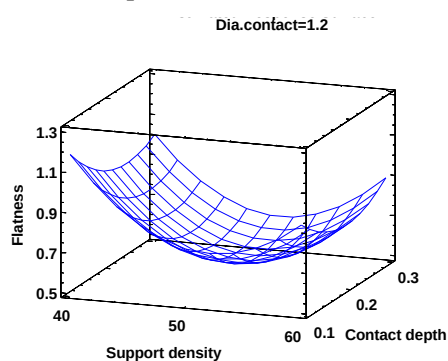


Figura 2.3.24. Suprafața de răspuns estimată pentru *Planeitate*

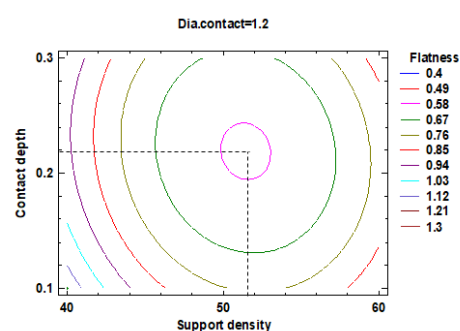


Figura 2.3.27. Contururile suprafeței de răspuns estimate pentru *Planeitate*

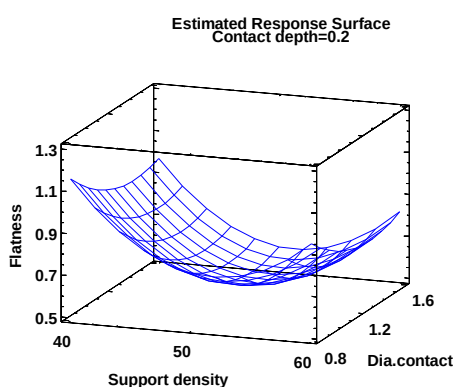


Figura 2.3.25. Suprafața de răspuns estimată pentru *Planeitate*

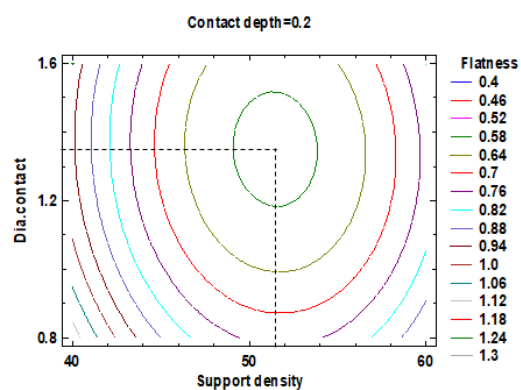


Figura 2.3.28. Contururile suprafeței de răspuns estimate pentru *Planeitate*

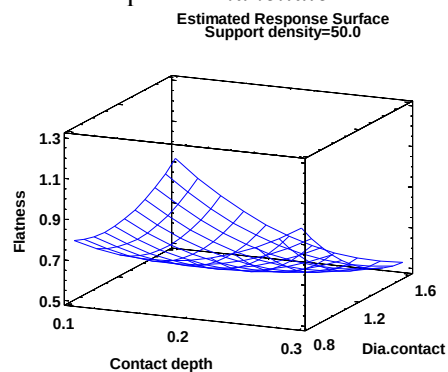


Figura 2.3.26. Suprafața de răspuns estimată pentru *Planeitate*.

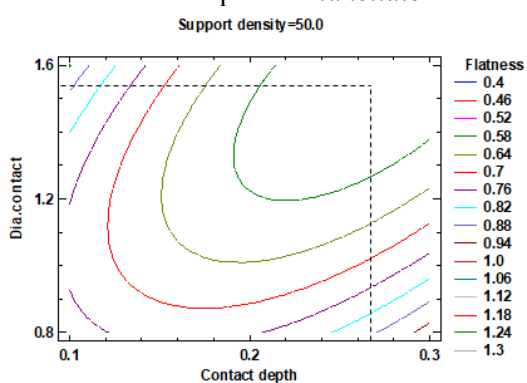


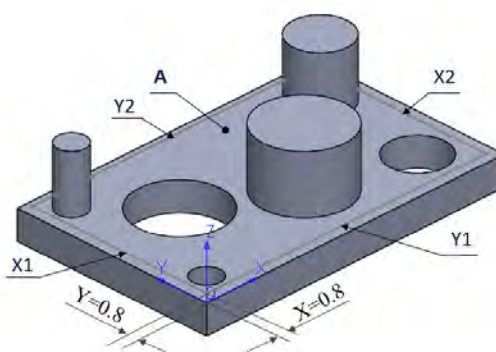
Figura 2.3.29. Contururile suprafeței de răspuns estimate pentru *Planeitate*

Tabel 2.3.12 Valori experimentale pentru *Planeitate*

Nr.	Factori independenți			Variabila de răspuns
	Densitate suport [%]	Adâncime contact [mm]	Diametru suprafață de contact [mm]	Planeitate [mm]
1	40	0,1	1,2	1,209
2	40	0,2	1,6	1,011
3	40	0,3	1,2	1,015
4	40	0,2	0,8	1,083
5	50	0,2	1,2	0,584
6	50	0,1	1,6	0,865
7	50	0,1	0,8	0,830
8	50	0,3	0,8	1,032
9	50	0,2	1,2	0,583
10	50	0,2	1,2	0,586
11	50	0,3	1,6	0,495
12	60	0,3	1,2	0,865
13	60	0,2	1,6	0,890
14	60	0,2	0,8	0,907
15	60	0,1	1,2	0,925

3.2.2. Rezultate privind rectilinitatea suprafeței piesei cu dimensiuni diferite ale suporturilor

Pentru procesul experimental desfășurat în această etapă s-a realizat un plan de măsurare în ceea ce privește rectilinitatea a patru contururi de pe suprafața corpului piesei. Măsurarea conturilor s-a făcut de-a lungul axelor X și Y. Aceste contururi notate cu X1, X2 și Y1, Y2, sunt prezentate, în general, în Figura 2.3.13c și mai detaliat în Figura 2.3.30. Măsurarea s-a făcut la o distanță de 0,8 mm față de marginile exterioare ale suprafeței A, prezentate în Figura 2.3.30. Strategia de palpăre a conturilor este prezentată în Tabelul 2.3.3. De la originea sistemului de coordonate al piesei, conturul X1 a fost măsurat de-a lungul axei Y, la distanța X=0,8 mm față de marginea piesei. De la originea piesei, conturul Y1 a fost măsurat de-a lungul axei X, la distanța Y=0,8 mm față de marginea piesei. Același principiu a fost utilizat pentru conturile X2 și Y2.

**Figura 2.3.30.** Definire contururi liniare

Conturul X1

Factorii de influență care afectează rectilinitatea pot fi observați în diagrama Pareto, prezentată în Figura 2.3.31. Toate benzile care depășesc linia verticală arată că factorii afectează în mod semnificativ variabila dependentă. Se poate observa că doar diametrul suprafeței de contact nu are o influență semnificativă asupra rectilinității conturului X1. Pentru o mai bună prezentare a datelor privind rectilinitatea rezultate în urma experimentului factorial, acestea au fost centralizate în Tabelul 2.3.13.

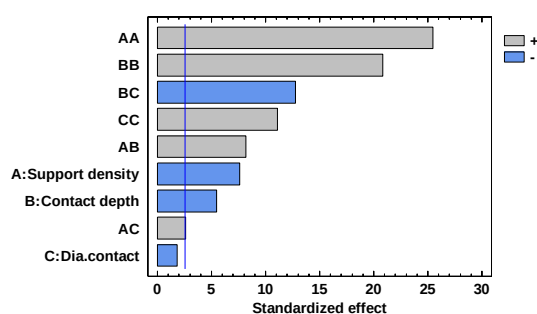
Tabelul 2.3.13 Valoarea factorului experimental pentru *Rectilinitate X1*

Factor experimental	A [mm]	B [%]	C [mm]	Sursa	Rectilinitate [mm]
A: Diametru contact	1.20	51.00	0.21	Figurile 2.3.32 și 2.3.35	0.13
B: Densitate suport	1.20	51.00	0.20	Figurile 2.3.33 și 2.3.36	0.13
C: Adâncime contact	1.28	50.00	0.21	Figurile 2.3.34 și 2.3.37	0.13

Modelul de regresie ajustat pentru rectilinitatea conturului X1 este prezentat în ecuația (2.3.4):

$$\begin{aligned}
 \text{Rectilinitate_X1} = & 3.27675 - 0.0993125 * \text{Densitate suport} - 3.14 * \text{Adâncime contact} - \\
 & 0.488438 * \text{Diametru contact} + 0.00089375 * \text{Densitate suport}^2 + 0.0275 * \text{Densitate suport} * \\
 & \text{Adâncime contact} + 0.0021875 * \text{Densitate suport} * \text{Diametru contact} + 7.3125 * \text{Adâncime} \\
 & \text{contact}^2 - 1.075 * \text{Adâncime contact} * \text{Diametru contact} + 0.242969 * \text{Diametru contact}^2.
 \end{aligned}
 \quad (2.3.4)$$

La suprafețele de răspuns prezentate în Figurile 2.3.32, 2.3.33 și 2.3.34, se poate observa poziția punctului minim sau maxim al suprafeței. Valoarea este determinată prin măsurarea punctului din Figurile 2.3.35, 2.3.36 și 2.3.37, în care este prezentat conturul suprafeței de răspuns determinate.



Legendă: Support density=densitate suport;
Dia_contact=diametru contact;
Contact depth=adâncime contact;
Straightness_X1=rectilinitate_X1

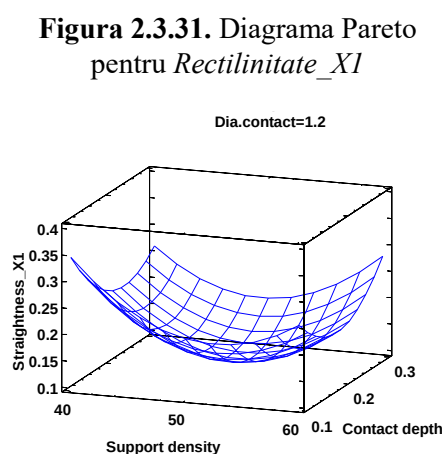


Figura 2.3.32. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_X1*

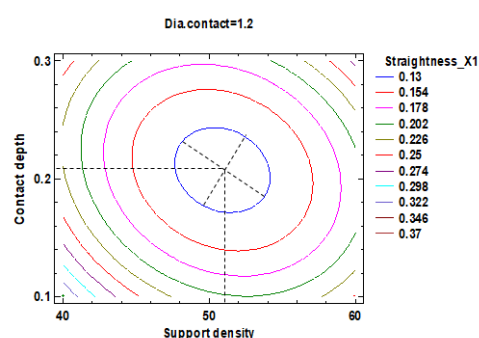


Figura 2.3.35. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_X1*

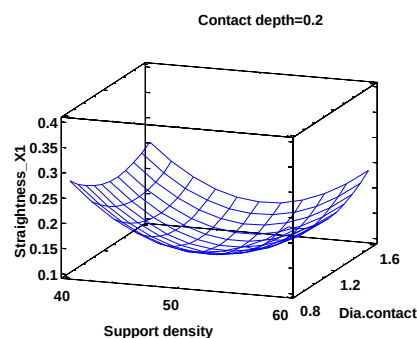


Figura 2.3.33. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_X1*

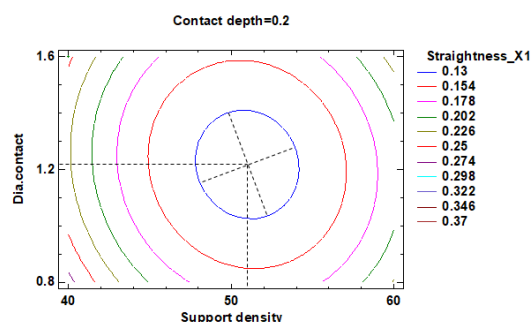


Figura 2.3.36. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_X1*

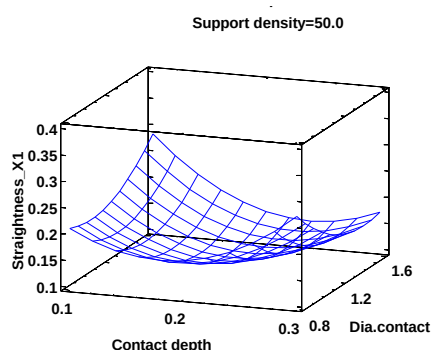


Figura 2.3.34. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_X1*

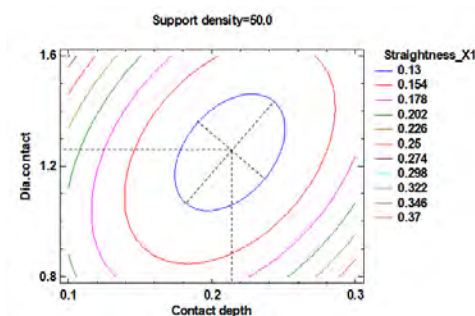


Figura 2.3.37. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_X1*

Contur X2

Factorii de influență care afectează rectilinitatea pot fi observați în Diagrama Pareto, prezentată în Figura 2.3.38. Se poate observa că numai efectul de ordinul doi al densității suportului și adâncimii de contact au o influență semnificativă asupra rectilinității conturului X2.

Modelul de regresie ajustat pentru rectilinitatea conturului X2 este prezentat în ecuația (2.3.5):

$$\begin{aligned} \text{Rectilinitate_X2} = & 4.02087 - 0.114313 * \text{Densitate suport} - 3.62625 * \text{Adâncime contact} - \\ & 0.975 * \text{Diametru contact} + 0.00098625 * \text{Densitate suport}^2 + 0.03225 * \text{Densitate suport} * \\ & \text{Adâncime contact} + 0.006125 * \text{Densitate suport} * \text{Diametru contact} + 9.6125 * \text{Adâncime} \\ & \text{contact}^2 - 1.625 * \text{Adâncime contact} * \text{Diametru contact} + 0.399219 * \text{Diametru contact}^2. \end{aligned} \quad (2.3.5)$$

Pentru o mai bună prezentare a datelor de rectilinitate rezultate din experimentul factorial, aceste informații au fost centralizate în Tabelul 2.3.14.

Tabelul 2.3.14 Valoarea factorului experimental pentru *Rectilinitate X2*

Factor experimental	A [mm]	B [%]	C [mm]	Sursa	Rectilinitate [mm]
A: Diametru contact	1.20	51.00	0.20	Figurile 2.3.39 și 2.3.42	0.1
B: Densitate suport	1.20	51.00	0.20	Figurile 2.3.40 și 2.3.43	0.1
C: Adâncime contact	1.25	50.00	0.21	Figurile 2.3.41 și 2.3.44	0.1

Pe suprafața de răspuns estimată din Figurile 2.3.39, 2.3.40 și 2.3.41, este important să se remarce poziția punctului minim sau maxim al suprafeței. Valoarea este determinată prin măsurarea punctului din Figurile 2.3.42, 2.3.43 și 2.3.44, care prezintă conturul suprafeței de răspuns determinate.

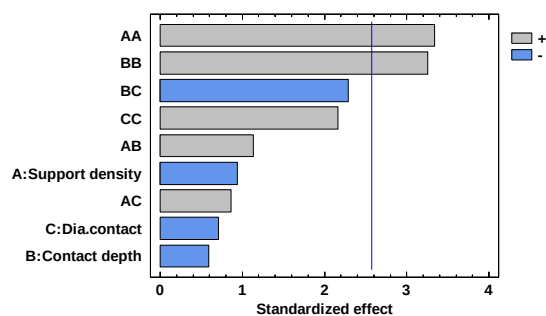


Figura 2.3.38. Diagrama Pareto pentru *Rectilinitate_X2*.

Legendă: *Support density*=densitate suport;
Dia_contact=diametru contact;
Contact depth=adâncime contact;
Straightness_X2=rectilinitate_X2

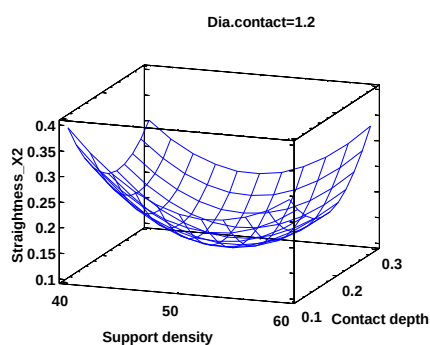


Figura 2.3.39. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_X2*

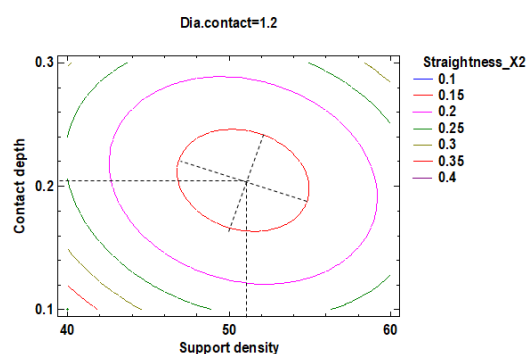


Figura 2.3.42. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_X2*

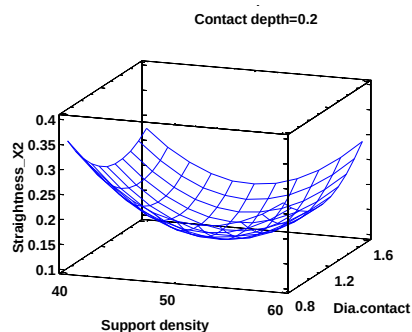


Figura 2.3.40. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_X2*

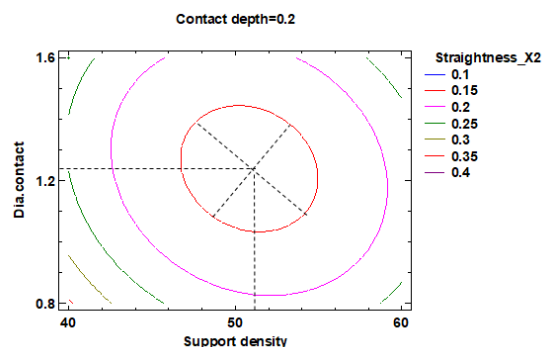


Figura 2.3.43. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_X2*

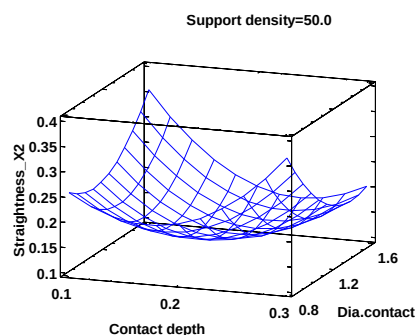


Figura 2.3.41. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_X2*

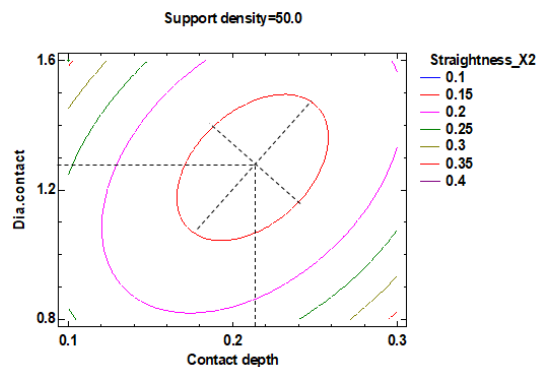


Figura 2.3.44. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_X2*

La aceste experiment care are ca obiect de studiu influența dimensiunii suporturilor asupra rectilinității conturilor situate în apropierea marginilor suprafeței piesei, se pot observa următoarele:

1. Există diferențe între cele două direcții de măsurare a rectilinității. Diferențele sunt produse de existența găurilor în corpul piesei pe o parte a pieselor sub care nu există suporturi. Aceste aspecte au determinat faptul că rectilinitatea (0,1 mm) este mai bună pe partea piesei cu bosaj cilindric (suprafață sprijinită) în comparație cu rectilinitatea (0,13 mm) pe partea opusă, care nu este sprijinită.
2. Dimensiunea optimă a suporturilor, pentru conturul X1, este la 51% densitate de structură pentru susținerea piesei, iar pentru geometria suporturilor, la 0,21 mm adâncimea punctului de contact și 1,23 mm valoarea medie a diametrului de contact;
3. Dimensiunea optimă a suporturilor, pentru conturul X2, este la 51% densitate de structură pentru susținerea piesei și pentru geometria suporturilor, la 0,20 mm punct de adâncime de contact și 1,22 mm diametru de contact;
4. Valoarea minimă a rectilinității de-a lungul axei Y este de 0,120 mm, prezentată în Tabelul 2.3.15, care se obține pentru conturul X1 la o densitate a suporturilor de 50%, la o adâncime de contact de 0,2 mm și un diametru de contact de 1,2 mm.

Tabelul 2.3.15 Valori experimentale pentru dimensiunea suporturilor pentru evaluare *Rectilinitate*

Nr.	Factori independenți			Variabile răspuns			
	Densitate suporturi [%]	Adâncime contact [mm]	Diametru suprafață de contact [mm]	Rectilinitate [mm]		În lungul axei-Y X1	În lungul axei-Y X2
				În lungul axei-X Y1	Y2		
1	40	0,1	1,2	0,862	0,826	0,337	0,330
2	40	0,2	1,6	0,679	0,668	0,260	0,304
3	40	0,3	1,2	0,686	0,673	0,258	0,302
4	40	0,2	0,8	0,871	0,685	0,287	0,394
5	50	0,2	1,2	0,310	0,349	0,122	0,136
6	50	0,1	1,6	0,871	0,658	0,287	0,394
7	50	0,1	0,8	0,499	0,502	0,209	0,280
8	50	0,3	0,8	0,751	0,630	0,267	0,326
9	50	0,2	1,2	0,311	0,348	0,120	0,134
10	50	0,2	1,2	0,309	0,350	0,124	0,135
11	50	0,3	1,6	0,252	0,294	0,173	0,180
12	60	0,3	1,2	0,871	0,685	0,287	0,394
13	60	0,2	1,6	0,558	0,602	0,231	0,250
14	60	0,2	0,8	0,598	0,571	0,223	0,242
15	60	0,1	1,2	0,659	0,589	0,256	0,293

Contur Y1

Factorii de influență care afectează rectilinitatea conturului Y1 pot fi observați în diagrama Pareto, prezentată în Figura 2.3.45. Se poate observa că doar interacțiunea de ordin doi dintre densitatea suporturilor și adâncimea de contact, respectiv interacțiunea dintre adâncimea de contact cu diametrul de contact are o influență semnificativă asupra rectilinității conturului Y1.

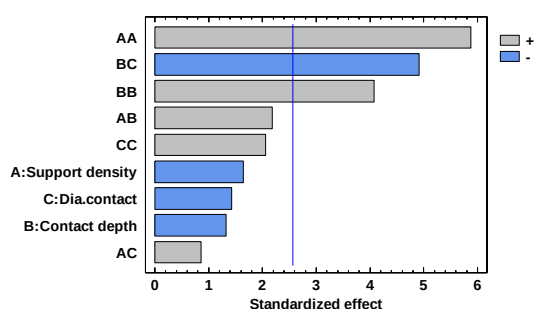
Ecuția de regresie a modelului ajustat pentru rectilinitatea conturului Y1 este prezentată în (2.3.6):

$$\begin{aligned}
 \text{Rectilinitate}_{Y1} = & 9.41137 - 0.307325 * \text{Densitate suport} - 6.25625 * \text{Adâncime contact} - \\
 & 0.925313 * \text{Diametru contact} + 0.00271375 * \text{Densitate suport}^2 + 0.097 * \text{Densitate suport} * \\
 & \text{Adâncime contact} + 0.0095 * \text{Densitate suport} * \text{Diametru contact} + 18.8125 * \text{Adâncime} \\
 & \text{contact}^2 - 5.44375 * \text{Adâncime contact} * \text{Diametru contact} + 0.594531 * \text{Diametru contact}^2.
 \end{aligned}
 \tag{2.3.6}$$

Pentru o mai bună înțelegere a datelor de rectilinitate rezultate în urma experimentului factorial, datele corespunzătoare au fost centralizate în Tabelul 2.3.16. Analizând suprafața de răspuns estimată din Figurile 2.3.46, 2.3.47 și 2.3.48, este important să se observe poziția punctului minim sau maxim al suprafeței. Valoarea este determinată prin măsurarea punctului din Figurile 2.3.49, 2.3.50 și 2.3.51, în care este prezentat conturul suprafeței de răspuns determinate.

Tabelul 2.3.16 Valoarea factorului experimental pentru *Rectilinitate YI*

Factor experimental	A [mm]	B [%]	C [mm]	Sursa	Rectilinitate [mm]
A: Diametru contact	1.20	51.00	0.21	Figurile 2.3.46 și 2.3.49	0.25
B: Densitate suport	1.30	51.00	0.20	Figurile 2.3.47 și 2.3.50	0.25
C: Adâncime contact	1.60	50.00	0.26	Figurile 2.3.48 și 2.3.51	0.25



Legendă: Support density=densitate suport;
Dia_contact=diametru contact;
Contact depth=adâncime contact;
Straightness_YI=rectilinitate_YI

Figura 2.3.45. Diagrama Pareto pentru *Rectilinitate_YI*

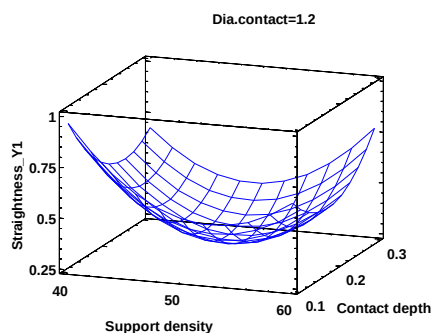


Figura 2.3.46. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_YI*

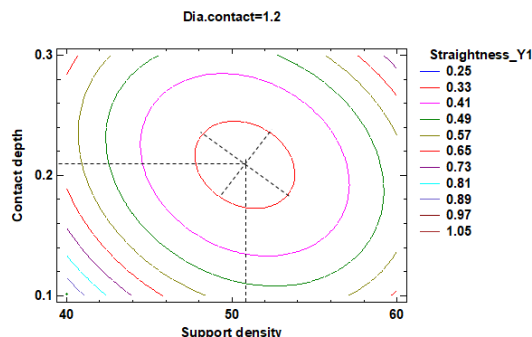


Figura 2.3.49. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_YI*

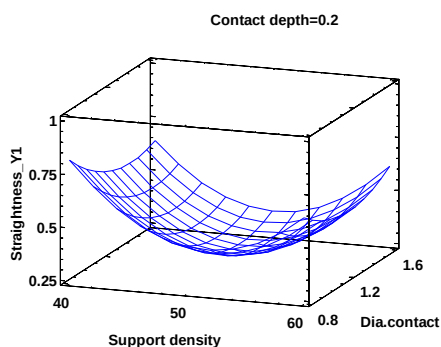


Figura 2.3.47. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_YI*

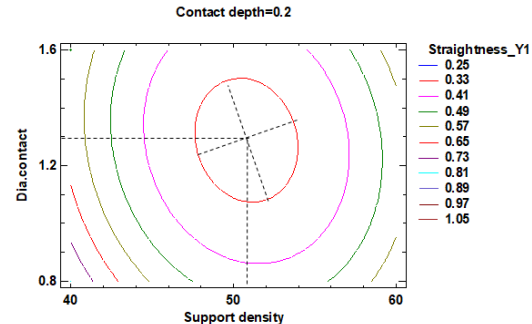


Figura 2.3.50. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_YI*

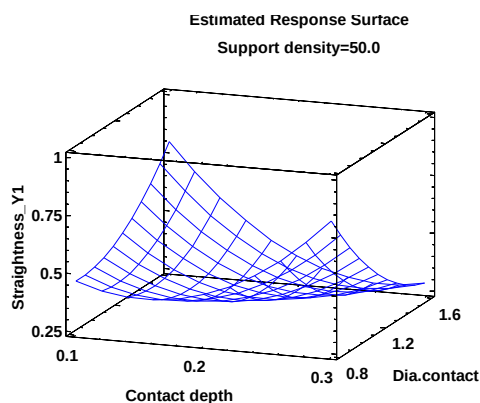


Figura 2.3.48. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_Y1*

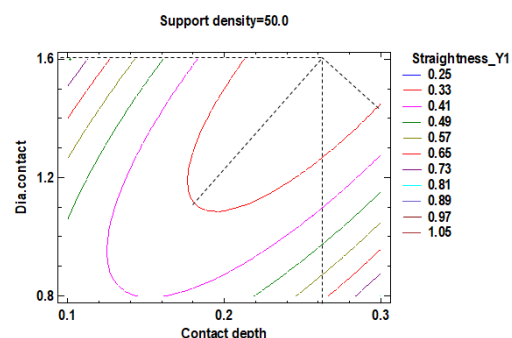


Figura 2.3.51. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_Y1*

Contur Y2

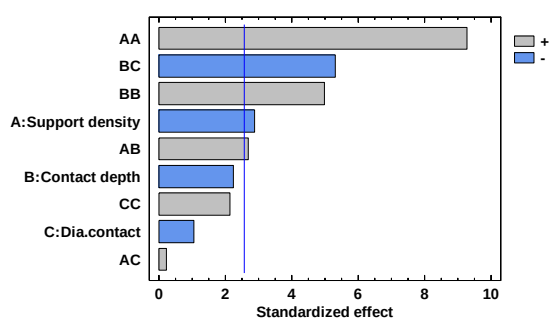
Factorii de influență care afectează rectilinitatea pot fi observați în diagrama Pareto, prezentată în Figura 2.3.52. Se poate observa că densitatea suportului și interacțiunea de ordin doi dintre densitatea suportului și diametrul de contact, respectiv interacțiunile dintre densitatea suportului și diametrul de contact, adâncimea de contact și densitatea suportului au o influență semnificativă asupra rectilinității conturului Y2.

Pentru o mai bună prezentare a datelor privind rectilinitatea rezultate în urma experimentului factorial, acestea au fost centralizate în Tabelul 2.3.17.

Tabelul 2.3.17 Valoarea factorului experimental pentru *Rectilinitate Y2*

Factor experimental	A [mm]	B [%]	C [mm]	Sursa	Rectilinitate [mm]
A: Diametru contact	1.20	51.00	0.21	Figurile 2.3.53 și 2.3.56	0.29
B: Densitate suport	1.35	51.00	0.20	Figurile 2.3.54 și 2.3.57	0.29
C: Adâncime contact	1.60	50.00	0.26	Figurile 2.3.55 și 2.3.58	0.29

Pe suprafața de răspuns estimată din Figurile 2.3.53, 2.3.54 și 2.3.55, este important să se observe poziția punctului minim sau maxim al suprafeței. Valoarea este determinată prin măsurarea punctului din Figurile 2.3.56, 2.3.57 și 2.3.58, în care este prezentat conturul suprafeței de răspuns determinate.



Legendă: Support density=densitate suport;
Dia contact=diametru contact;
Contact depth=adâncime contact;
Straightness_Y2=rectilinitate_Y2

Figura 2.3.52. Diagrama Pareto pentru *Rectilinitate_Y2*

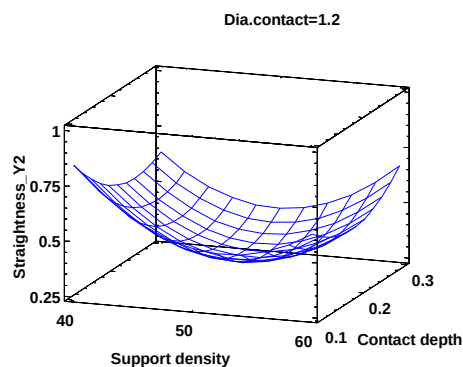


Figura 2.3.53. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_Y2*

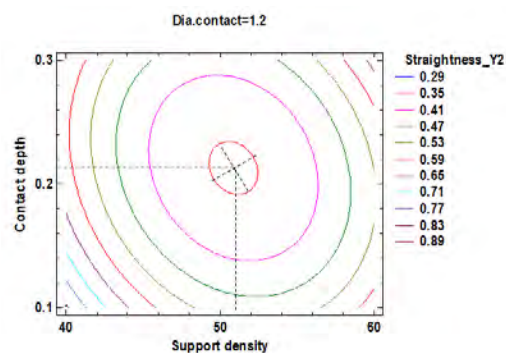


Figura 2.3.56. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_Y2*

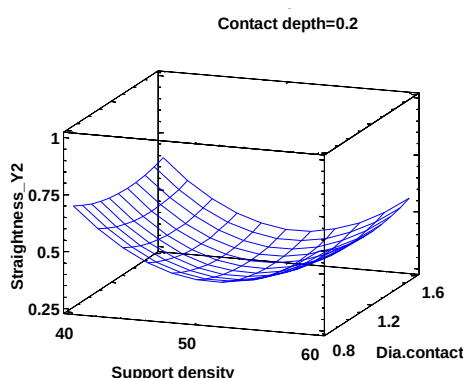


Figura 2.3.54. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_Y2*

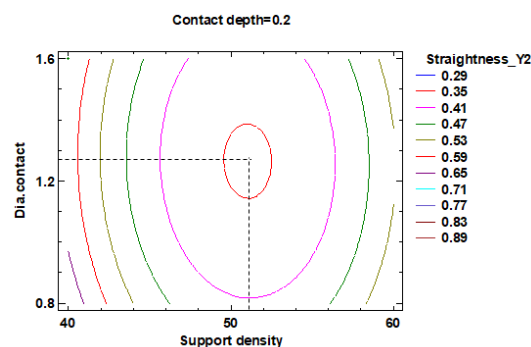


Figura 2.3.57. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_Y2*

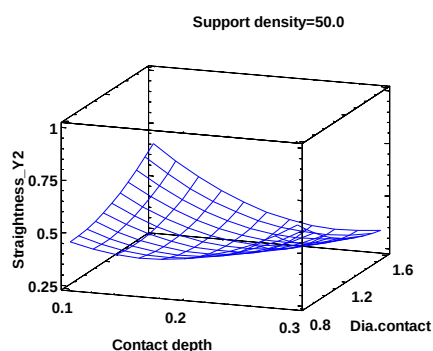


Figura 2.3.55. Suprafața de răspuns estimată pentru *Rectilinitate_Y2*

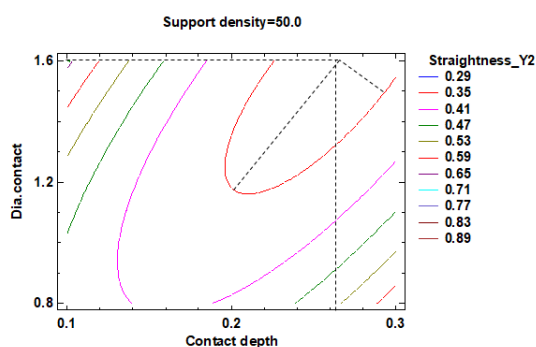


Figura 2.3.58. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru *Rectilinitate_Y2*

Ecuția de regresie a modelului ajustat pentru rectilinitatea conturului Y2 este prezentată în (2.3.7):

$$\begin{aligned} \text{Rectilinitate_Y2} = & 7.22063 - 0.24275 \cdot \text{Densitate suport} - 4.59875 \cdot \text{Adâncime contact} - \\ & 0.270312 \cdot \text{Diametru contact} + 0.00224 \cdot \text{Densitate suport} + 0.06225 \cdot \text{Densitate suport} \cdot \\ & \text{Adâncime contact} + 0.0013125 \cdot \text{Densitate suport} \cdot \text{Diametru contact} + 12.025 \cdot \text{Adâncime} \\ & \text{contact}^2 - 3.075 \cdot \text{Adâncime contact} \cdot \text{Diametru contact} + 0.323437 \cdot \text{Diametru contact}^2 \end{aligned} \quad (2.3.7)$$

În cel de-al doilea experiment, în care se studiază influența dimensiunii suporturilor asupra rectilinității conturilor situate în apropierea marginilor suprafeței piesei, se poate observa că:

1. Există diferențe între cele două direcții de măsurare a rectilinității. Aceste diferențe sunt produse de existența găurilor într-o parte a pieselor sub care nu există suporturi. Acest aspect

- a determinat ca rectilinitatea (0,25 mm) să fie mai bună pe partea piesei cu bosaj cilindric (suprafață sprijinită) în comparație cu rectilinitatea (0,29 mm) pe partea opusă a piesei, cu gaură și fără suprafața sprijinită pe suporturi.
2. Dimensiunea optimă a suporturilor, pentru conturul Y1, este la 51% densitate a structurii pentru susținerea piesei și pentru geometria suporturilor, la 0,22 mm adâncimea punctului de contact și 1,40 mm valoarea medie a diametrului de contact;
 3. Dimensiunea optimă a suporturilor, pentru conturul Y2, este la 51% densitate a structurii pentru susținerea piesei și pentru geometria suporturilor, la 0,22 mm punct de adâncime de contact și 1,40 mm diametru de contact.
 4. Valoarea minimă a rectilinității de-a lungul axei X este de 0,252 mm, prezentată în Tabelul 2.3.12, este posibilă să rezulte, pentru conturul Y1, la o densitate a suporturilor de 50%, la o adâncime de contact de 0,3 mm și un diametru de contact de 1,6 mm

3.2.3. Rezultate privind circularitatea elementelor cilindrice cu o dimensiune diferită a suporturilor

Pentru o mai bună prezentare a procesului experimental desfășurat în această fază, a fost realizat un plan de măsurare, în care sunt luate în considerare gaura H15 și cilindrul Cy15, indicate în Figura 2.3.59.

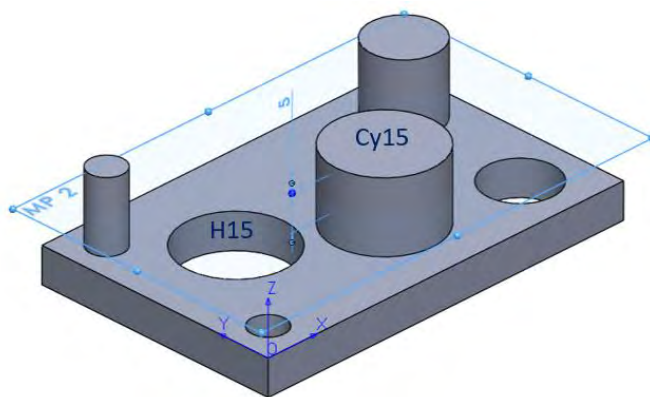


Figura 2.3.59. Definirea elementelor cilindrice și a planului de măsurare

Pentru toate caracteristicile rotunde (găuri și cilindri exteriori indicați în Figura 2.3.13c) s-a efectuat analiza dispersională pentru circularitate. Din cauza numărului limitat de pagini, în cadrul lucrării au fost prezentate doar o parte din informațiile obținute.

În ceea ce privește circularitatea găurilor, în cele ce urmează, sunt prezentate doar rezultatele pentru circularitatea găurii cu diametrul de 15 mm, marcată H15 conform Figurii 2.3.59. În Figura 2.3.60 se prezintă Diagrama Pareto standardizată în care factorii A, B, C și efectul de ordinul doi CC afectează semnificativ circularitatea conturului găurii. Celelalte interacțiuni au o influență minoră și pot fi ignorate.

Ecuția de regresie a modelului ajustat pentru circularitatea găurii cu diametrul de 15 mm este prezentată în (2.3.8):

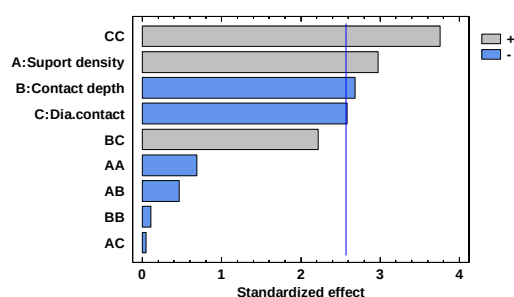
$$\begin{aligned}
 \text{Circularitate Gaură H15} = & 0.19625 + 0.0055875 * \text{Densitate suport} - 0.3125 * \text{Adâncime} \\
 & \text{contact} - 0.398438 * \text{Diametru contact} - 0.00003875 * \text{Densitate suport}^2 - 0.0025 * \text{Densitate} \\
 & \text{suport} * \text{Adâncime contact} - 0.0000625 * \text{Densitate suport} * \text{Diametru contact} - 0.0625 * \\
 & \text{Adâncime contact}^2 + 0.3 * \text{Adâncime contact} * \text{Diametru contact} + 0.132031 * \text{Diametru} \\
 & \text{contact}^2.
 \end{aligned} \quad (2.3.8)$$

Pentru o mai bună prezentare a datelor privind circularitatea rezultate în urma experimentului factorial, aceste date au fost centralizate în Tabelul 2.3.18.

Suprafața de răspuns estimată din Figurile 2.3.61, 2.3.62 și 2.3.63 este importantă pentru a observa poziția punctului minim sau maxim al suprafeței. Valoarea se determină prin măsurarea punctului din Figurile 2.3.64, 2.3.65 și 2.3.66, în care se prezintă conturul suprafeței de răspuns determinate.

Tabelul 2.3.18 Valoarea factorului experimental pentru *Circularitate Gaură 15 mm*

Factor experimental	A [mm]	B [%]	C [mm]	Sursa	Circularitate [mm]
A: Diametru contact	1.20	40.00	0.30	Figurile 2.3.61 și 2.3.64	0.045
B: Densitate suport	1.30	40.00	0.20	Figurile 2.3.62 și 2.3.65	0.045
C: Adâncime contact	1.20	50.00	0.30	Figurile 2.3.63 și 2.3.66	0.045



Legendă: Support density=densitate suport;
Dia_contact=diametru contact;
Contact depth=adâncime contact;
Hole_15=gaură_15 mm

Figura 2.3.60. Diagrama Pareto pentru *Circularitate Gaură H15*

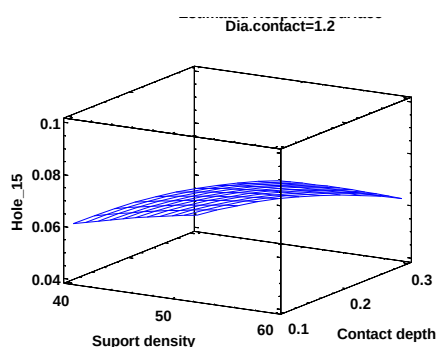


Figura 2.3.61. Suprafața de răspuns estimată pentru *circularitate gaură H15*

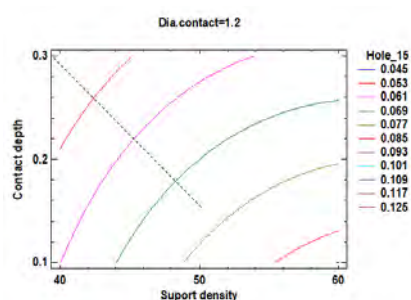


Figura 2.3.64. Contururi ale suprafeței de răspuns pentru *circularitate gaură H15*

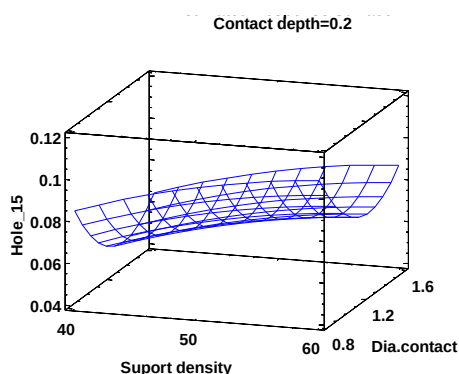


Figura 2.3.62. Suprafața de răspuns estimată pentru *circularitate gaură H15*

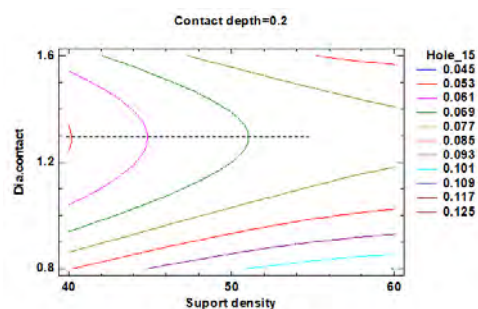


Figura 2.3.65. Contururi ale suprafeței de răspuns pentru *circularitate gaură H15*

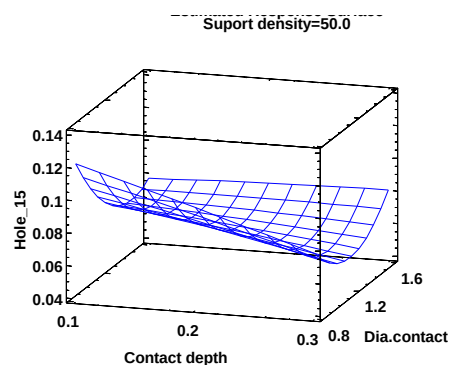


Figura 2.3.63. Suprafața de răspuns estimată pentru circularitate gaură H15

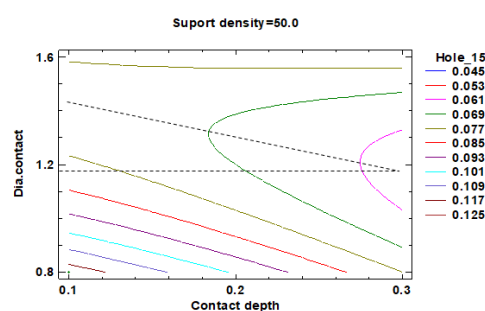


Figura 2.3.66. Contururi ale suprafeței de răspuns pentru circularitate gaură H15

Din cele prezentate mai sus, referitoare la influența suporturilor asupra circularității găurilor cilindrice, se poate observa că:

1. Impactul celor trei factori principali și al efectului de ordinul doi al diametrului de contact este mai semnificativ decât interacțiunile factorilor și alte efecte de ordinul doi ale geometriei suportului;
2. Abaterea de la circularitate minimă se poate obține într-un punct poziționat la o densitate de 40% a suporturilor, o adâncime de contact de 0,3 mm și un diametru de contact de 1,20 mm, cu o valoare a circularității în jur de 0,045 mm.

În ceea ce privește circularitatea elementelor cilindrice exterioare, în cele ce urmează se vor prezenta doar rezultatele circularității cilindrului cu diametrul de 15 mm, determinat în planul doi de măsurare, notat cu MP2, conform Figurii 2.3.59, cu coordonatele Z definite în Tabelul 2.3.3. În Figura 2.3.67 se prezintă Diagrama Pareto, din care se poate observa că numai interacțiunea dintre diametrul de contact și adâncimea de contact are efecte semnificative asupra circularității conturului cilindrului.

Ecuția de regresie a modelului ajustat pentru circularitatea cilindrului cu diametrul de 15mm este determinată în planul de măsurare MP2 și prezentată în (2.3.9):

$$\begin{aligned} \text{Circularitate Cerc}_{15_MP2} = & 0.555375 - 0.0188708 * \text{Densitate suport} + \\ & 1.10292 * \text{Adâncime contact} - 0.181875 * \text{Diametru contact} + 0.000155833 * \text{Densitate suport}^2 \\ & - 0.0165 * \text{Densitate suport} * \text{Adâncime contact} + 0.0043125 * \text{Densitate suport} * \text{Diametru} \\ & \text{contact} + 1.30833 * \text{Adâncime contact}^2 - 0.70625 * \text{Adâncime contact} * \text{Diametru contact} + \\ & 0.0395833 * \text{Diametru contact}^2. \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

Pentru o mai bună înțelegere a datelor privind circularitatea rezultate în urma experimentului factorial, aceste date au fost centralizate în Tabelul 2.3.19. Analizând suprafața de răspuns estimată din Figurile 2.3.68, 2.3.69 și 2.3.70, este important să se observe poziția punctului minim sau maxim al suprafeței. Valoarea a fost determinată prin măsurarea punctului din Figurile 2.3.71, 2.3.72 și 2.3.73, în care este prezentat conturul suprafeței de răspuns.

Tabelul 2.3.19 Valoarea factorului experimental pentru Circularitate cerc 15 mm

Factor experimental	A [mm]	B [%]	C [mm]	Sursa	Circularitate [mm]
A: Diametru contact	1.20	58.00	0.27	Figurile 2.3.68 și 2.3.71	0.015
B: Densitate suport	0.80	60.00	0.20	Figurile 2.3.69 și 2.3.72	0.015
C: Adâncime contact	1.60	50.00	0.28	Figurile 2.3.70 și 2.3.73	0.015

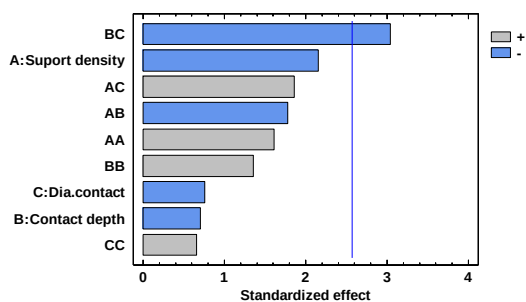


Figura 2.3.67. Diagrama Pareto pentru *Circularitate cerc_15_2*

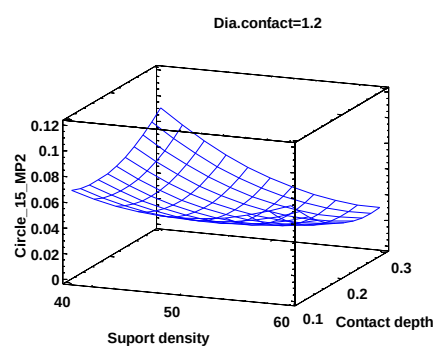


Figura 2.3.68. Suprafața de răspuns estimată pentru *Circularitate cerc_15_2*

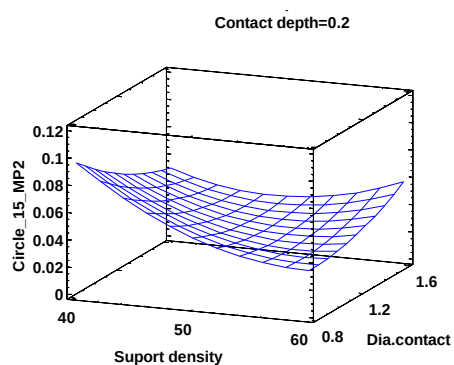


Figura 2.3.69. Suprafața de răspuns estimată pentru *Circularitate cerc_15_2*

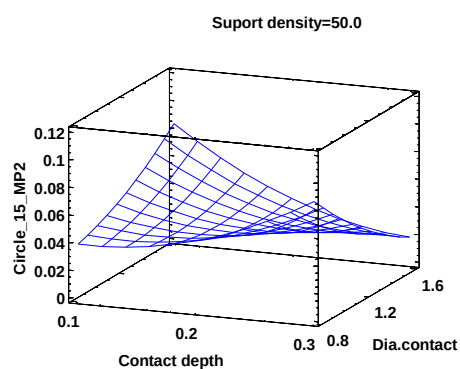


Figura 2.3.70. Suprafața de răspuns estimată pentru *Circularitate cerc_15_2*

Legendă: Support density=densitate suport;
Dia_contact=diametru contact;
Contact depth=adâncime contact;
Circle_15_MP2=cerc_15_MP2

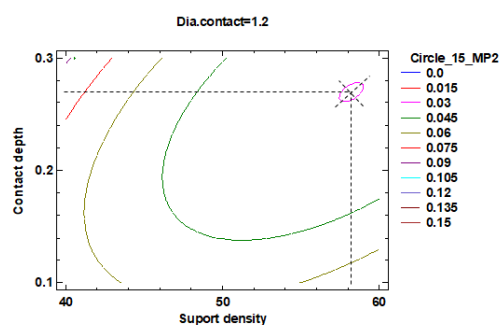


Figura 2.3.71. Contururi ale suprafeței de răspuns pentru *Circularitate cerc_15_2*

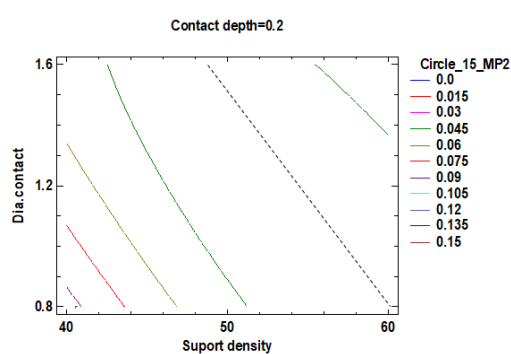


Figura 2.3.72. Contururi ale suprafeței de răspuns pentru *Circularitate cerc_15_2*

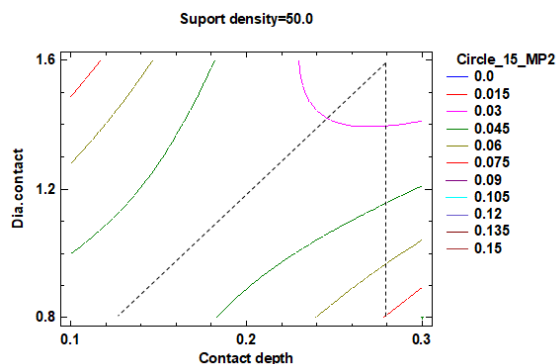


Figura 2.3.73. Contururi ale suprafeței de răspuns pentru *Circularitate cerc_15_2*

Analizând datele de mai sus referitoare la influența dimensiunii suporturilor asupra circularității elementelor cilindrice exterioare, măsurate ca cercuri în trei plane de măsurare, s-au constatat următoarele:

1. Pentru cilindrul de 15 mm, măsurat ca cerc în planul de măsurare MP2, impactul interacțiunii dintre adâncimea de contact și diametrul de contact este mai semnificativ decât impactul factorilor principali, interacțiunile acestora și efectele lor de ordinul doi;
2. Abaterea de la circularitate minimă poate fi obținută într-un punct poziționat la o densitate a suporturilor de 59%, o adâncime de contact de 0,28 mm și un diametru de contact de 1,2 mm, cu o valoare a circularității în jur de 0,015 mm;

În ceea ce privesc caracteristicile cilindrice (găuri și cilindri exteriori) măsurate ca cercuri interioare sau exterioare, s-au constatat următoarele:

1. Valoarea minimă a circularității, prezentată în Tabelul 2.3.20, este de 0,018 mm pentru gaura de 5 mm, 0,043 mm pentru gaura de 10 mm, la o densitate de 50%, o adâncime de contact de 0,1 mm și un contact de 1,6 mm;
2. Valoarea minimă a circularității pentru toate caracteristicile cilindrice, obținută în timpul celor cincisprezece execuții ale experimentului, este prezentată în Tabelul 2.3.20 și corespunde la o densitate de suport de 60%, o adâncime de 0,2 mm și un diametru de 1,6 mm.

Tabelul 2.3.20. Valori experimentale pentru dimensiune suporturi ale caracteristicii generate prin printare 3D - *Circularitate*

Nr.	Factori independenți			Variabile de răspuns					
	Densitate suporturi [%]	Adâncime contact [mm]	Diametru suprafață de contact [mm]	Circularitate [mm]					
				Gaură			Cilindru		
				Φ 5	Φ 10	Φ 15	Φ 5	Φ 10	Φ 15
							Plan de măsurare		
							MP 3	MP 3	MP 3
							MP 2	MP 2	MP 2
							MP 1	MP 1	MP 1
(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1	40	0,1	1,2	0,025	0,033	0,068	0,069	0,044	0,098
							0,045	0,189	0,059
							0,114	0,111	0,051
2	40	0,2	1,6	0,021	0,031	0,055	0,035	0,191	0,060
							0,064	0,149	0,043
							0,190	0,077	0,037
3	40	0,3	1,2	0,048	0,038	0,045	0,064	0,066	0,043
							0,066	0,088	0,092
							0,187	0,035	0,037
4	40	0,2	0,8	0,024	0,045	0,088	0,118	0,122	0,062
							0,131	0,049	0,113
							0,120	0,052	0,067
5	50	0,2	1,2	0,024	0,116	0,069	0,023	0,038	0,035
							0,021	0,051	0,041
							0,080	0,079	0,042
6	50	0,1	1,6	0,018	0,043	0,081	0,071	0,049	0,106
							0,059	0,037	0,102
							0,043	0,094	0,097

(0)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
7	50	0,1	0,8	0,036	0,138	0,111	0,079	0,045	0,045
							0,032	0,047	0,030
							0,038	0,054	0,042
8	50	0,3	0,8	0,023	0,073	0,074	0,168	0,100	0,063
							0,024	0,041	0,068
							0,101	0,033	0,038
9	50	0,2	1,2	0,025	0,118	0,070	0,022	0,040	0,033
							0,022	0,050	0,042
							0,080	0,079	0,042
10	50	0,2	1,2	0,023	0,117	0,068	0,023	0,038	0,035
							0,021	0,051	0,041
							0,080	0,079	0,042
11	50	0,3	1,6	0,024	0,094	0,092	0,026	0,045	0,060
							0,022	0,056	0,027
							0,028	0,044	0,037
12	60	0,3	1,2	0,024	0,101	0,056	0,064	0,110	0,116
							0,051	0,040	0,040
							0,049	0,031	0,039
13	60	0,2	1,6	0,023	0,064	0,084	0,030	0,034	0,081
							0,027	0,040	0,040
							0,034	0,054	0,048
14	60	0,2	0,8	0,025	0,090	0,118	0,034	0,065	0,055
							0,037	0,058	0,041
							0,066	0,081	0,040
15	60	0,1	1,2	0,028	0,109	0,089	0,059	0,146	0,070
							0,049	0,043	0,073
							0,062	0,096	0,063

4. Concluzii

Primele rezultate experimentale indică faptul că planeitatea în corelație cu suporturile rupte este mai bună pentru o densitate a suporturilor de la 48% la 50%.

În cel de-al doilea experiment, care studiază influența dimensiunii suporturilor asupra planeității piesei, se poate observa că valoarea planeității (0,4 mm) obținută după corecția suporturilor, prin poziție și număr, este mai bună în comparație cu valoarea planeității (0,49 mm) obținută anterior. Această observație este importantă pentru deciziile tehnologice. A doua observație este că densitatea suporturilor se situează între 50% și 52% pentru o soluție optimă.

Pe această bază se poate concluziona că, în conformitate cu standardul ISO 2768-2 [139] privind toleranțele geometrice pentru elementele fără indicații individuale de toleranță, valoarea planeității care ar putea fi obținută, pentru lungimile nominale ale piesei de peste 30 mm până la 100 mm, ar putea fi inclusă în clasa de toleranță L, cu o valoare standard de 0,4 mm [139].

Pe baza observațiilor de mai sus, se poate concluziona că, în conformitate cu standardul ISO 2768-2 [139], valoarea rectilinității care ar putea fi obținută, pentru lungimile nominale ale piesei de peste 30 mm până la 100 mm, ar putea fi inclusă în clasa de toleranță K, cu o valoare standard de 0,2 mm [139].

Pe baza observațiilor de mai sus, se poate concluziona că, în conformitate cu standardul ISO 2768-2 [139], valoarea circularității care ar putea fi obținută în urma procesului de printare 3D DLP poate fi inclusă în clasa de toleranță H, cu o valoare standard de 0,1 mm [139].

Din primul experiment și, respectiv, din prima parte a celui de-al doilea experiment, se poate observa că pentru o suprafață plană se recomandă ca densitatea suporturilor, cu corecția ulterioară a dispunerii acestora, să fie cuprinsă între 50% și 52%. Geometria acestora asigură o valoare optimă pentru un diametru de contact între 1,2 mm și 1,3 mm, respectiv cu o adâncime de contact între 0,20 mm și 0,23 mm pentru o suprafață cu valoare bună după standardele de rectilinitate și planeitate.

Pentru caracteristicile de circularitate, valoarea optimă obținută pentru densitatea de suporturi este cuprinsă între 40% și 60%. Geometria acestora asigură o valoare optimă pentru un diametru de contact de 1,2 mm, respectiv o adâncime de contact între 0,28 mm și 0,30 mm pentru o valoare bună care urmează standardele generale pentru caracteristicile cilindrice.

2.3.3 Cercetări privind influența culorii eco-rășinilor asupra dimensiunii, planeității și rectilinității piesei realizată prin printare 3D

Lucrarea [140], publicată într-o revistă situată în zona roșie (Q1), este rezultatul muncii de echipă a celor trei autori ai lucrării, specialiști în măsurare tridimensională, printare 3D, și planificarea experimentelor factoriale, fiind o continuare a cercetării efectuate în lucrarea [104]. Partea cu printarea 3D a pieselor i-a revenit în totalitate coautorului lucrării, Mircea Vasilescu.

Principalul obiectiv al lucrării a fost de a determina dacă culoarea rășinii pe bază de plante, numită de producător "eco-rășină", are o influență asupra dimensiunilor și preciziei geometrice a piesei printate 3D. Piesa de studiu a fost printată cu ajutorul tehnologiei de printare 3D cu control digital al luminii (LCD). Analiza planeității, a rectilinității și a abaterilor dimensionale a fost realizată cu ajutorul unei mașini de măsurat în coordonate (CMM) cu senzor de contact. Pentru analiza datelor s-au folosit metodele de analiză dispersională (ANOVA) și a suprafețelor de răspuns.

1. Introducere

Realizarea pieselor prin printare 3D poate fi efectuată prin diferite procese de printare. În acest studiu a fost luat în considerare procesul cu lumină digitală (DLP). Acest tip de printare este important în ceea ce privește calitatea suprafeței printate și precizia printării pentru diferite piese mecanice. Acest studiu continuă cercetările autorilor din lucrarea [104] privind investigarea aspectelor caracteristicilor tehnologice, care pot influența procesul de printare 3D cu rășină. Trebuie remarcat faptul că acest studiu a fost realizat pentru rășină standard, care poate fi comparat cu piesele printate 3D prin depunere de material (FDM) [141-145]. În același timp, este important de menționat că timpul de printare este mai scurt pentru metoda de printare prin procesare digitală a luminii și sunt posibil de printat 3D piese cu diferite structuri de suport [146-149].

Acest articol studiază dacă aceasta influențează construcția tehnologică a piesei imprimate. Este esențial să se determine acest aspect referitor la piesele imprimate 3D prin elementele de proiectare a acestora. Principalele aspecte analizate au fost modul în care elementele dimensionale și caracteristicile de suprafață se modifică dacă o piesă este printată 3D cu o anumită culoare de rășină.

Compoziția chimică și structura eco-rășinii sunt diferite de rășina de bază [150]. Cel mai important aspect este că eco-rășina este mai complexă, având în vedere compoziția chimică a rășinii de bază. Acesta este motivul pentru care în această lucrare a fost studiată influența acestui tip de eco-rășină și a colorantului în raport cu caracteristicile tehnologice ale piesei printate 3D.

Pentru a determina influența culorii eco-rășinii asupra calității caracteristicilor piesei printate 3D este necesară o metodă de măsurare foarte precisă. Una dintre cele mai precise metode de măsurare este metoda de măsurare tactilă [151,152]. Metoda tactilă, deși nu este atât de rapidă

în comparație cu metoda fără contact (optică/laser), asigură cea mai bună acuratețe a rezultatelor măsurătorilor în intervalul micrometric. Un alt motiv pentru utilizarea metodei de măsurare tactilă este acela de a evita orice influență a culorii sau a transparenței rășinii ecologice asupra rezultatelor măsurătorii, care ar putea fi influențată de utilizarea metodei optice. Metoda de măsurare tactilă nu necesită operații pregătitoare, cum ar fi acoperirea părților lucioase, transparente sau negre [152]. În concluzie, măsurarea caracteristicilor fizice ale pieselor printate au fost efectuate pe o mașină de măsurat în coordonate (CMM) cu senzor tactil.

Scopul principal al studiului a constat în definirea modului în care culoarea rășinii influențează geometria piesei printate și măsura în care apar abaterile de dimensiune și formă. Pe baza abaterilor dimensionale ale piesei, în conformitate cu standardul ISO 2768-1 [153] privind toleranțele pentru dimensiuni liniare și unghiulare fără indicații individuale de toleranță, piesa printată va fi inclusă într-o clasă de toleranță, cu o limită de valoare standard, pentru lungimile nominale ale piesei de peste 30 mm până la 100 mm. În mod similar, vor fi analizate abaterile de formă geometrică ale piesei și, în conformitate cu standardul ISO 2768-2 [154], referitor la toleranțele geometrice pentru caracteristici fără indicații individuale de toleranță, valoarea abaterilor de rectilitate și planeitate va fi inclusă într-o clasă de toleranță, cu o limită de valoare standard, pentru intervale de lungimi nominale de peste 30 până la 100 mm. În cele din urmă, lucrarea de față a permis definirea clasei de precizie care poate fi obținută prin procesul de printare 3D utilizând diferite culori de eco-rășină, în ceea ce privește acuratețea dimensională și geometrică a pieselor fabricate cu ajutorul tehnologiei DLP.

2. Materiale și metode

2.1. Materiale utilizate în cadrul experimentului

Pentru piesa printată 3D au fost utilizate cinci rășini de culori diferite. Culoarea a pornit de la rășina transparentă și s-a terminat cu cea de culoare neagră. Autorii au dorit să determine dacă culoarea rășinii ar putea genera modificări în ceea ce privește precizia dimensională și geometrică a pieselor. Rășina utilizată este în concordanță cu tipul de imprimantă 3D și este o eco-rășină ANYCUBIC [155].

Din punct de vedere al structurii chimice a rășinii pe bază de plante [156], aceasta se bazează pe câteva componente specifice, menționate mai jos:

- concentrație de 45% de acizi Fany, soia, epoxidați, esterii Bu;
- 30% acrilat de izooctil;
- 15% 2-((2,2-Bis(((1-oxoalil)oxi)metil)butoxi)metil)-2-etil-1,3-propandiil diacrilat;
- 5% 2-hidroxi-1-(4-(4-(2-hidroxi-2-metilpropionil)benzil)fenil)-2-metilpropan-1-unu;
- 5% policloro-ftalocianină de cupru.

Din compoziția rășinii, marea majoritate a compoziției este de tip vegetal sau rășină vegetală (45%). De asemenea, se poate observa că 5% din compoziție este de tip colorant. Ultima poziție este cea a colorantului verde care se adaugă la structura de bază a rășinii. Se poate observa că existența pigmentului în suspensie poate produce efecte diferite asupra comportamentului materialului în timpul printării 3D cu rășină de diferite culori.

2.2. Imprimanta 3D, sistemul de postpolimerizare și mașina de măsurat utilizate în cadrul experimentului

2.2.1. Imprimanta 3D și sistemul de postpolimerizare utilizate pentru printarea 3D a piesei cu rășină

Imprimanta 3D utilizată în acest studiu a fost o imprimantă ANYCUBIC PHOTON 3D cu un soft nou în comparație cu imprimanta 3D utilizată în studiul anterior [104]. Această imprimantă 3D poate printa o piesă diferită cu o setare diferită pentru fiecare element. Imprimanta 3D a fost plasată într-o cameră termică pentru o bună stabilitate termică și de umiditate pentru printare.

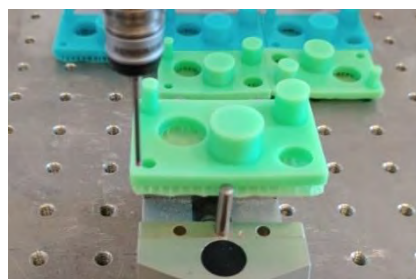
Pentru postpolimerizare, a fost utilizat un rezervor care conținea alcool sanitar de 70%, iar într-un alt rezervor, apă distilată pentru a doua etapă de polimerizare a eco-rășinii. Prima etapă de polimerizare se face prin scufundarea piesei printate în rezervor și, după această etapă, se face o polimerizare suplimentară a unei suprafețe a piesei printate. Pentru acest studiu, polimerizarea suprafeței a fost realizată prin expunerea piesei imprimate la lumină normală.

2.2.2. Mașină de măsurat utilizată pentru determinarea geometriei piesei printate

Pentru măsurarea caracteristicilor fizice ale pieselor printate 3D s-a utilizat o mașină de măsurat în coordonate (CMM) cu portal mobil DEA Global Advantage 7.10.7, prezentată în Figura 2.3.74a [157]. Piesa printată 3D a fost fixată într-o menghină paralelă cu trei pini [158] instalată pe masa CMM, prezentată în Figura 2.3.74b. Deoarece CMM utilizează senzori tactil, diferitele culori de eco-rășină utilizate pentru piesele printate nu influențează acuratețea rezultatelor măsurătorilor. Eroarea maximă admisibilă (MPEE) pentru măsurarea lungimii, specificată în certificatul de calibrare a mașinii, este: $MPEE = 1,9 + L/300 \mu m$ [157],[159]. Pentru a crea și a executa programele de măsurare pentru a verifica geometria pieselor printate 3D, a fost utilizat softul de metrologie PC-DMIS 2019 R2 [160].



(a)



(b)

Figura 2.3.74. Mașina de măsurat în coordonate utilizată pentru măsurarea pieselor printate: (a) vedere piese printate pe masa mașinii 3D; (b) fixarea piesei.

2.3. Planul experimental

2.3.1. Determinarea timpului de expunere la printarea 3D cu rășină

Această etapă este importantă pentru ca procesul de printare să atingă caracteristicile unei bune polimerizări a piesei printate 3D. Acest pas este executat cu un program special generat de softul ANYCUBIC numit RERF [161]. În acest sens, din punctul nostru de vedere, setarea este de 4 s pentru prima piesă printată, iar iterația a fost de 1s pentru fiecare pas.

2.3.2. Generarea structurii piesei printate 3D

Această etapă a luat în considerare datele obținute în studiul anterior [104]. S-a stabilit că, pentru calcul, situația optimă corespunzătoare este la 55% densitate de suporturi cu o adâncime de contact de 0,25 mm și un diametru al suprafeței de contact de 1,25 mm. Cele două valori extreme luate în considerare au fost 50% și 60% pentru densitatea suporturilor, 1,2 mm și 1,6 mm pentru diametrul suprafeței de contact și 0,2 mm și 0,3 mm pentru adâncimea de contact. Aceste valori corespund unui număr zero de suporturi rupte. Datele de generare a piesei printate sunt prezentate

în Tabelul 2.3.21. Acest tabel prezintă în mod simultane valorile care sunt importante pentru setarea construcției suporturilor. Înălțimea stratului a fost de 0,05 mm pentru toate culorile.

Tabelul 2.3.21. Datele de intrare pentru generarea piesei

Nr.	Tip suport sus	Rază (mm)	Lungime (mm)	Adâncime contact (mm)	Tip suport mijloc	Tip suport jos	Rază (mm)	Densitate (%)	Nr. straturi
1	Conic	0.60	3.00	0.20	Cilindric	Patină	5.00	50	370
2	Conic	0.63	3.00	0.25	Cilindric	Patină	5.00	55	370
3	Conic	0.80	4.00	0.30	Cilindric	Patină	7.00	60	390

Se poate observa că numărul de straturi este diferit din punctul de vedere al generării straturilor. Acest aspect este important pentru măsurarea dimensiunii 3D a piesei.

2.3.3. Printarea pieselor

Pentru fiecare culoare a eco-rășinii, în prima etapă au fost printate simultan două piese, prezentate în Figura 2.3.75a, la valoarea inferioară și superioară. La valoarea medie, piesa a fost printată în a doua etapă, prezentată în Figura 2.3.75b, în aceleași condiții ca și primele două piese printate.

Este esențial de remarcat faptul că structura de susținere a fost corectată pentru a distribui aceste elemente în această etapă. Corecția a fost efectuată la trei niveluri. La primul nivel, a fost fixată densitatea liniară a suporturilor din peretele lateral al piesei. La al doilea nivel, a fost corectată densitatea suporturilor în găurile circulare generate în piesă. Ultima corecție se referă la eroarea generată de o densitate slabă a suporturilor de pe suprafața plană a piesei. Softul în care au fost dezvoltate suporturile a fost ANYCUBIC PHOTON slicer 64 [162]. După această etapă, structura a fost salvată ca fișier stereolitografic (STL). Această structură a fost importată în Photon Workshop V2.1.21 [163], generând straturile procesului de printare.

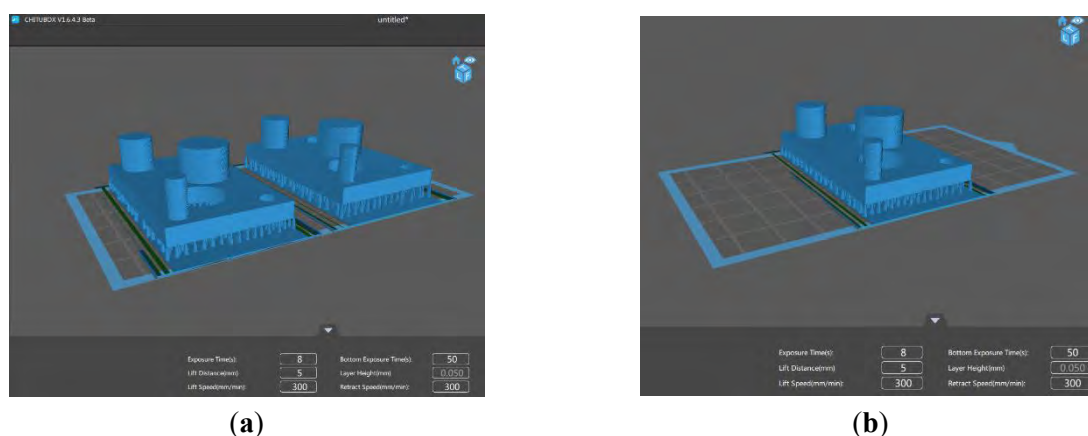


Figura 2.3.75. Generarea pieselor printate 3D:
(a) la valoarea inferioară și superioară; (b) la valoarea medie.

2.3.4. Studiul dimensiunilor și al geometriei piesei printate 3D

Primul pas în crearea programului de măsurare a fost importul modelului CAD al piesei și efectuarea alinierii manuale a piesei printate și apoi a alinierii automate. Deoarece piesa printată are abateri mari de la geometria nominală, precizia alinierii automate este esențială. Al doilea pas a fost măsurarea caracteristicilor analizate. În Figura 2.3.76a se prezintă caracteristicile de măsurare ale piesei printate, iar în Tabelul 2.3.22 este definită strategia de palpate a piesei printate.

Pentru fiecare suprafață fizică, se definește caracteristica de măsurare (de exemplu, plan, linie dreaptă), coordonata Z a planului de măsurare și numărul de puncte de palpate.

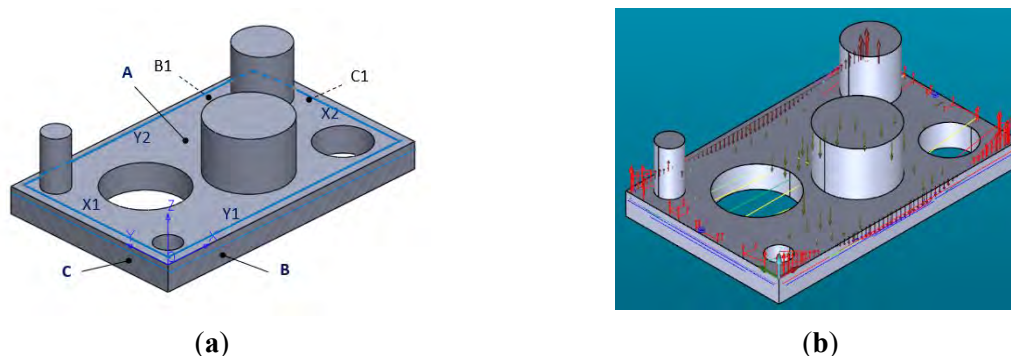


Figura 2.3.76. Măsurarea piesei printate: (a) Definirea caracteristicilor de măsurare ale piesei: A, B, C, B1, C1 - suprafețe plane; X1, X2, Y1, Y2 - contururi liniare; (b) Modelele punctelor de palpate și direcția de deviație.

Distribuția punctelor de palpate pentru măsurarea suprafeței plane și a diferitelor contururi (linii drepte), precum și abaterea din fiecare punct de palpate sunt prezentate în Figura 2.3.76b. Săgețile indică direcțiile abaterilor piesei printate 3D. Lungimea săgeților este proporțională cu mărimea abaterilor.

Tabel 2.3.22 Definirea strategiei de palpate a piesei

Element fizic	Element măsurat	Coordonata Z a planului de măsurare (MP) (mm)	Nr. puncte de palpate
Suprafața A	Plan	0	110
Suprafața B	Linie dreaptă	-2	14
Suprafața C	Linie dreaptă	-2	12
Suprafața B1	Linie dreaptă	-2	14
Suprafața C1	Linie dreaptă	-2	12
Contur X1	Linie dreaptă	0	35
Contur X2	Linie dreaptă	0	35
Contur Y1	Linie dreaptă	0	55
Contur Y2	Linie dreaptă	0	55

3. Rezultate

3.1. Determinarea condițiilor de printare și a dimensiunilor piesei printate

3.1.1. Determinarea timpului de expunere la printarea 3D cu rășină

Această etapă este esențială pentru procesul de printare prin caracteristicile printării. Este necesar să se facă acest lucru din când în când, deoarece este posibil să se modifice caracteristicile de polimerizare a eco-rășinii din procesul de printare. Noua versiune a imprimantei 3D ANYCUBIC are un proces dedicat acestui aspect. Poziția corectă poate fi determinată prin inspecția optică a acelorași caracteristici ale piesei printate. Una dintre aceste caracteristici este textul de testare al imprimantei 3D, care este foarte fin și dificil de imprimat.

A fost determinată valoarea corectă pentru printarea 3D la care viteza de ridicare a platformei pe axa Z a fost de 2 mm/s. Viteza de retragere a platformei pe axa Z pentru eco-rășină non-neagră sau mată a fost de 5 mm/s; au fost generate opt straturi de jos cu un timp de expunere de 60 s, prezentate în Figura 2.3.77a.

Pentru a determina setarea optimă cu ajutorul acestui soft, s-au efectuat mai multe verificări. Prima dintre ele a fost legată de integritatea structurii generate și de aranjarea corectă a elementelor generate. Se poate observa că, pentru un timp de expunere scurt, indiferent de culoare, există probleme de generare corectă din punct de vedere geometric. Cel de-al doilea aspect a fost legat de elasticitatea sau rigiditatea elementelor V. Al treilea aspect a fost legat de textul scris sub elementul V, în partea dreaptă, de către producătorul softului.

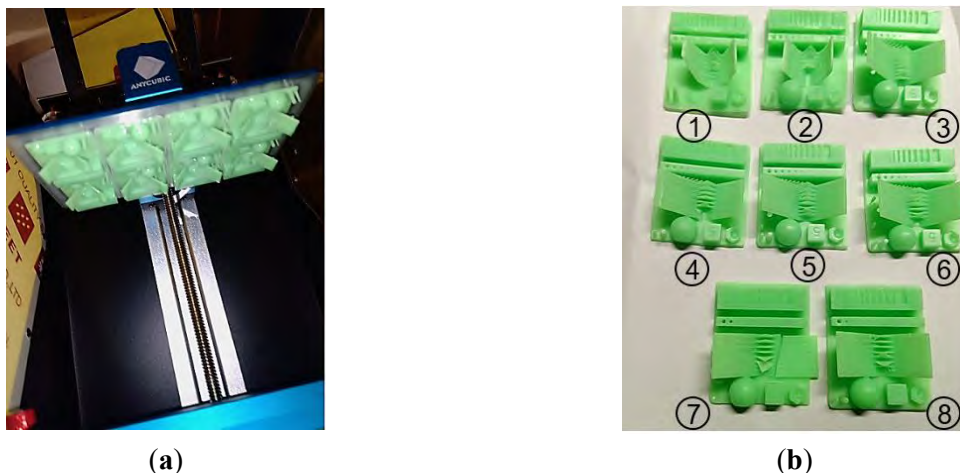


Figura 2.3.77. Imprimanta 3D ANYCUBIC și testul privind timpul de expunere: (a) Platforma în poziția de sus pe axa Z cu opt piese printate simultan; (b) Poziții pe platforma cu piese printate.

Pe baza acestor observații, a fost determinat timpul minim de expunere pentru fiecare culoare, care este detaliat în cele ce urmează:

- Pentru eco-rășina verde, valoarea pentru care printarea 3D poate da rezultate bune de printare este cuprinsă între 8 și 9 s, determinată pentru pozițiile 5 și 6 din Figura 2.3.77b;
- Pentru eco-rășina albastră, valoarea pentru care printarea 3D poate da rezultate bune de printare este de 9 s, determinată pentru poziția 6 din Figura 2.3.77b;
- pentru eco-rășina violetă, valoarea pentru care printarea 3D poate da rezultate bune de printare este de 9 s, determinată pentru poziția 6 din Figura 2.3.77b;
- Pentru eco-rășina neagră, valoarea pentru care printarea 3D poate da rezultate bune de printare este de 10 s, determinată pentru poziția 7 din Figura 2.3.77b. Această valoare este determinată de zona de secțiune a suporturilor, în care o valoare de 8 s nu este suficientă pentru rezistența mecanică și de polimerizare. În plus, viteza de retragere a platformei pe axa Z a fost redusă de la 5 la 3 mm/s pentru același considerent mecanic;
- Pentru eco-rășina transparentă, valoarea pentru care printarea 3D poate da rezultate bune de printare este de 8 s, determinată pentru poziția 5 din Figura 2.3.77b. Un aspect important este printarea în paralel a două sau mai multe piese cu înălțimi diferite pentru suporturi și alte structuri geometrice. În Figura 2.3.78 se prezintă structura grea și structura medie printată cu un timp de polimerizare de 8 s. În ceea ce privește integritatea suportului, structura grea oferă rezultate bune, în timp ce structura medie este afectată. Această observație este bună pentru eco-rășina neagră și transparentă.



Figura 2.3.78. Piese transparente printate cu un timp de 8 s: structură grea în stânga și structură medie în dreapta.

- În Figura 2.3.79, se poate observa structura după reprintare cu 10 s pentru timpul de polimerizare.



Figura 2.3.79. Piese transparente printate cu 10 s pentru structura grea în poziția din stânga și cu 8 s pentru structura medie în poziția din dreapta.

3.1.2. Rezultate privind dimensiunile corpului piesei imprimate

În acest proces experimental au fost măsurate suprafețele laterale ale corpului piesei printate cu cinci culori de eco-rășină. Fiecare suprafață laterală a piesei a fost măsurată ca o linie dreaptă, prezentată în Figura 2.3.80, în 14 puncte de palpate pentru măsurarea lungimii și 12 puncte de palpate pentru măsurarea lății, conform Tabelului 2.3.23.

Datele de intrare pentru generarea piesei printate și rezultatele măsurătorilor dimensiunilor corpului sunt prezentate în Tabelul 2.3.23. Culoarea eco-rășinii și densitatea suporturilor au fost factorii experimentali, iar abaterea de lungime și lățime au fost variabilele de răspuns. Datele sunt structurate identic în ceea ce privește etapa de printare.

Datele experimentale au fost analizate cu softul Minitab 17 [164]. Factorul experimental al culorii eco-rășinii a fost utilizat ca un cod de culoare de la 1 la 5, prezentat în Tabelul 2.3.23. O analiză dispersională (ANOVA) [164,165] a fost efectuată pentru ambele variabile de răspuns. În Tabelul 2.3.24 se prezintă analiza dispersională pentru abaterea de lungime.

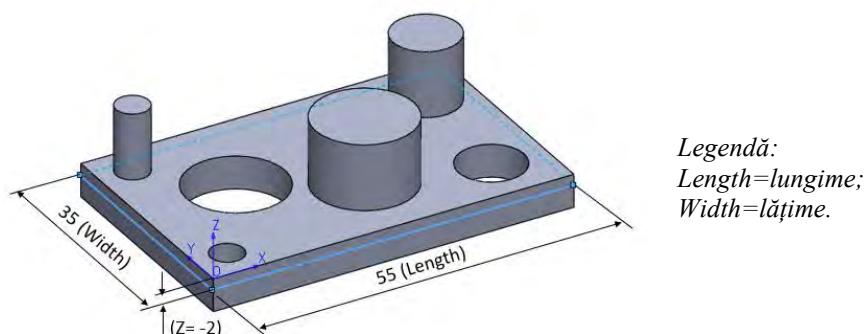


Figura 2.3.80. Definirea măsurării lungimii și lățimii.

Tabelul 2.3.23 Datele de intrare pentru generarea piesei printate și rezultatele măsurătorilor dimensionale

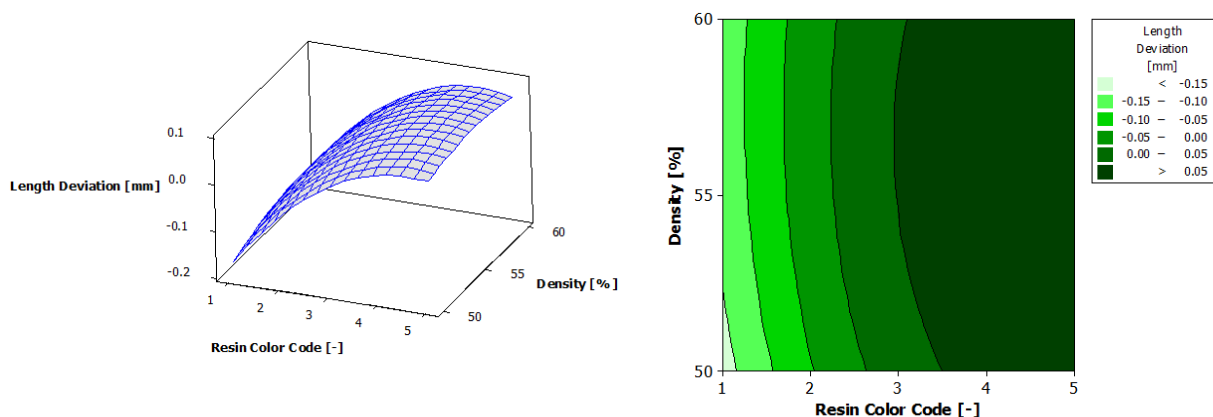
Nr.	Culoare	Cod culoare	Densitate (%)	Lungime (mm)	Lățime (mm)	Deviație (%)		Obs.
						Lungime	Lățime	
1.	2.		3.	4.	5.	6.	7.	8.
1	Verde	1	50	54.786	34.821	-0.214	-0.179	
2		1	55	54.936	34.978	-0.064	-0.022	
3		1	60	54.823	3.873	-0.177	-0.127	
4	Albastră	2	50	54.984	34.983	-0.016	-0.017	
5		2	55	54.985	35.007	-0.015	0.007	
6		2	60	55.016	34.995	0.016	-0.005	
7	Violetă	3	50	54.977	35.007	-0.023	0.007	
8		3	55	54.994	35.003	-0.006	0.003	
9		3	60	54.992	34.977	-0.008	-0.023	
10	Neagră	4	50	55.111	35.113	0.111	0.113	
11		4	55	55.119	35.090	0.119	0.090	
12		4	60	55.125	35.091	0.125	0.091	
13	Transparentă	5	50	55.076	35.076	0.076	0.076	
14		5	55	55.033	35.010	0.033	0.010	
15		5	60	55.079	35.057	0.079	0.057	

Tabelul 2.3.24. Analiza dispersională pentru abaterea de lungime

Sursa	Grade de libertate	Suma pătratelor	Media pătratelor	Valoare - F	Valoare - p
	(Df)	(SS)	(MS)		
Culoare rășină	4	0.123243	0.030811	19.65	0.000
Densitate	2	0.001928	0.000964	0.61	0.564
Eroare	8	0.012543	0.001568		
Total	14	0.137714	0.030811		

Dacă valoarea p pentru factorii experimentali este mai mică de 0,05, pentru un nivel de încredere de 95%, factorii experimentali afectează semnificativ rezultatul variabilei de răspuns [165]. Se poate observa că abaterea de lungime este afectată semnificativ de culoarea eco-rășinii, în timp ce densitatea suporturilor nu are o influență semnificativă asupra abaterii de lungime.

În Figura 2.3.81 se prezintă suprafața de răspuns estimată pentru abaterea de lungime, iar în Figura 2.3.82 se prezintă contururile suprafeței de răspuns estimate pentru abaterea de lungime. Se poate observa că, pentru eco-rășina verde, albastră și violetă, abaterile de lungime sunt negative, iar pentru eco-rășina neagră și transparentă, abaterile sunt pozitive. Eco-rășina violetă cu o densitate a suporturilor de 55 % și 60 % oferă deviația minimă a lungimii (-0,006 mm și -0,008 mm), care este foarte aproape de zero. Această combinație poate conduce la obținerea unei lungimi reale foarte apropiate de lungimea nominală.



Legendă: Length Deviation=deviație lungime; Resin Color Code=cod de culoare rășină; Density=densitate.

Figura 2.3.81. Suprafața de răspuns estimată pentru abaterea de lungime

Figura 2.3.82. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru abaterea de lungime

Ecuția de regresie a modelului ajustat pentru abaterea lungimii piesei printate este prezentată în (2.3.10):

$$\begin{aligned} \text{Deviație lungime} = & 0.0024 + 0.1159 \text{CuloareRășină_Neagră} - 0.0074 \text{CuloareRășină_Albastră} \\ & + 0.0603 \text{CuloareRășină_Transparentă} - 0.1541 \text{CuloareRășină_Verde} - 0.0147 \\ & \text{CuloareRășină_Violetă} - 0.0156 \text{Densitate_50} + 0.0110 \text{Densitate_55} + 0.0046 \text{Densitate_60}. \end{aligned} \quad (2.3.10)$$

În Tabelul 2.3.25 se prezintă analiza dispersională pentru abaterea lățimii. Se poate observa că abaterea lățimii este influențată în mod semnificativ doar de culoarea eco-rășinii (valoare p mai mică de 0,05). În același timp, densitatea suporturilor nu are o influență semnificativă asupra abaterii de lungime (valoare p mai mare de 0,05).

Tabelul 2.3.25. Analiza dispersională pentru abaterea de lățime

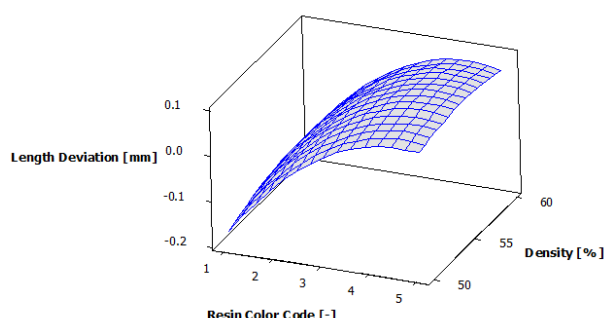
Sursa	Grade de libertate (Df)	Suma pătratelor (SS)	Media pătratelor (MS)	Valoare - F	Valoare - p
Culoare rășină	4	0.071184	0.017796	9.41	0.004
Densitate	2	0.001121	0.000561	0.30	0.751
Eroare	8	0.015137	0.001892		
Total	14	0.087442	0.017796		

Ecuția de regresie a modelului ajustat pentru abaterea lățimii piesei printate este prezentată în (2.3.11):

$$\begin{aligned} \text{Deviație lățime} = & 0.0054 + 0.0926 \text{CuloareRășină_Neagră} - 0.0104 \text{CuloareRășină_Albastră} \\ & + 0.0423 \text{CuloareRășină_Transparentă} - 0.1147 \text{CuloareRășină_Verde} - 0.0097 \\ & \text{CuloareRășină_Violetă} - 0.0054 \text{Densitate_50} + 0.0122 \text{Densitate_55} - 0.0068 \text{Densitate_60}. \end{aligned} \quad (2.3.11)$$

În Figura 2.3.83 se prezintă suprafața de răspuns estimată pentru abaterea lățimii, iar în Figura 2.3.84 se prezintă contururile suprafeței de răspuns estimate pentru abaterea lățimii. Se poate observa că, pentru eco-rășina verde, albastră și violetă, pentru aproape toate combinațiile de densitate a suportului, abaterile de lățime sunt negative. Pentru eco-rășina neagră și transparentă, abaterile sunt pozitive. Eco-rășina violetă cu o densitate a suporturilor de 55% oferă cea mai mică abatere a lățimii (0,003 mm), care este foarte aproape de zero. Un rezultat bun în ceea ce privește

abaterea lăţimii ($-0,005$ mm) oferă şi eco-răşina albastră cu o densitate a suporturilor de 60%. Aceste combinaţii de culoare a eco-răşinii şi de densitate a suporturilor pot obţine o lăţime reală foarte apropiată de lăţimea nominală.



Legendă: Length Deviation=deviaţie lungime; Resin Color Code=cod de culoare răşină; Density=densitate.

Figura 2.3.83. Suprafaţa de răspuns estimată pentru abaterea de lăţime

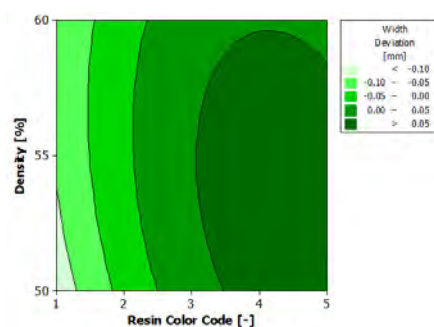


Figura 2.3.84. Contururi ale suprafeţei de răspuns estimate pentru abaterea de lăţime

3.1.3. Rezultate privind planeitatea corpului piesei printate

În cadrul procesului experimental desfăşurat în această fază, suprafaţa plană *A*, prezentată în Figura 2.3.85, a fost măsurată în 110 puncte de contact, conform Tabelului 2.3.22. Punctele de palpare au fost repartizate pe întreaga suprafaţă a piesei printate.

Datele de intrare pentru generarea piesei printate şi rezultatele măsurătorilor privind planeitatea suprafeţei sunt prezentate în Tabelul 2.3.26. Datele sunt structurate în mod identic în ceea ce priveşte etapa de printare.

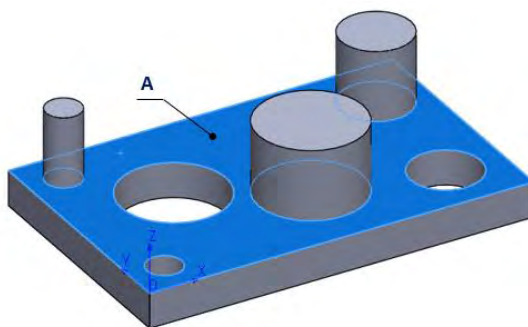


Figura 2.3.85. Definirea suprafeţei plane măsurate

Analiza dispersională pentru planeitate este prezentată în Tabelul 2.3.27. Deoarece valoarea p este mai mică de 0,05 [165] pentru ambii factori experimentali - culoarea răşinii şi densitatea suporturilor - aceştia au o influenţă semnificativă din punct de vedere statistic, cu un nivel de încredere de 95%, asupra planeităţii suprafeţei corpului. Impactul culorii eco-răşinii asupra planeităţii este mai important decât cel al densităţii suporturilor.

Tabelul 2.3.26 Datele de ieșire pentru planeitatea piesei printate

Nr.	Culoare rășină	Cod culoare	Densitate (%)	Planeitate (mm)	Obs.
1.	2.	3.	4.	5.	6.
1	Verde	1	50	1.182	
2		1	55	1.240	
3		1	60	1.035	
4	Albastră	2	50	1.161	
5		2	55	1.044	
6		2	60	0.949	
7	Violetă	3	50	1.217	
8		3	55	1.121	
9		3	60	0.911	
10	Neagră	4	50	0.763	
11		4	55	0.727	
12		4	60	0.722	
13	Transparentă	5	50	1.026	
14		5	55	0.776	
15		5	60	0.885	

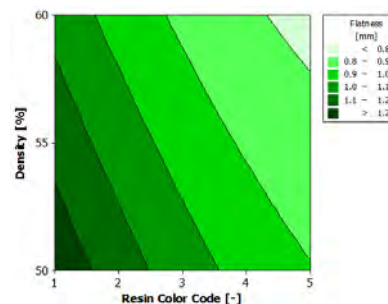
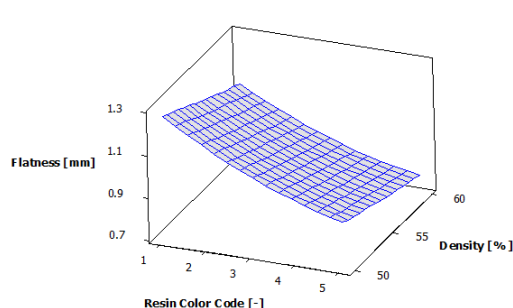
Tabelul 2.3.27. Analiza dispersională pentru planeitate

Sursa	Grade de libertate (Df)	Suma pătratelor (SS)	Media pătratelor (MS)	Valoare - F	Valoare - p
Culoare rășină	4	0.33395	0.083489	12.25	0.002
Densitate	2	0.07178	0.035891	5.27	0.035
Eroare	8	0.05451	0.006814		
Total	14	0.46024			

Ecuția de regresie a modelului ajustat pentru abaterea de la planeitate a corpului piesei printate este prezentată în (2.3.12):

$$\begin{aligned}
 \text{Planeitate} = & 0.9839 - 0.2466 \text{ CuloareRășină_Neagră} + 0.0674 \text{ CuloareRășină_Albastră} \\
 & - 0.0883 \text{ CuloareRășină_Transparentă} + 0.1684 \text{ CuloareRășină_Verde} + 0.0991 \\
 & \text{CuloareRășină_Violetă} + 0.0859 \text{ Densitate_50} - 0.0023 \text{ Densitate_55} - 0.0835 \text{ Densitate_60}.
 \end{aligned}
 \quad (2.3.12)$$

În Figura 2.3.86 se prezintă suprafața de răspuns estimată pentru planeitate, iar în Figura 2.3.87 se prezintă contururile suprafeței de răspuns estimate pentru planeitatea suprafeței de răspuns a suprafeței corpului piesei printate. Se poate observa că eco-rășina verde oferă valoarea maximă pentru abaterea de planeitate (1,240 mm) cu o densitate a suporturilor de 55%. Eco-rășina neagră oferă valoarea minimă pentru abaterea de planeitate (0,722 mm) cu o densitate a suporturilor de 60%. Un rezultat bun (0,776 mm) dă, de asemenea, eco-rășina transparentă cu 55% densitate de suporturi.



Legendă: Flatness=planeitate; Resin Color Code=cod de culoare rășină; Density=densitate.

Figura 2.3.86. Suprafața de răspuns estimată pentru abaterea de planeitate

Figura 2.3.87. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru abaterea de planeitate

3.1.4. Rezultate privind rectilinitatea suprafeței corpului unei piese imprimate

În ceea ce privește rectilinitatea suprafeței corpului piesei printate studiate în acest experiment, au fost măsurate patru contururi liniare notate cu X1, X2 și Y1, Y2, prezentate în Figura 2.3.88, de-a lungul axelor X și Y. Contururile liniare au fost definite cu un decalaj de 0,8 mm față de marginile exterioare ale suprafeței A în interiorul suprafeței. Punctele de palpăre pentru fiecare contur sunt prezentate în Tabelul 2.3.22.

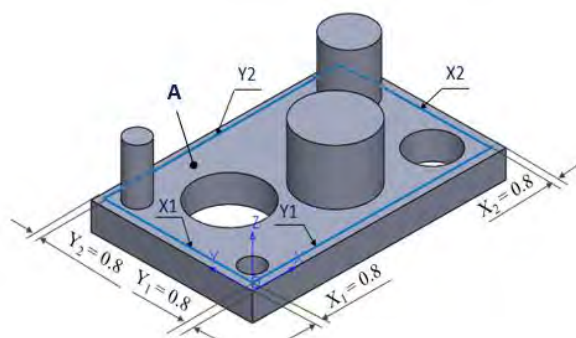


Figura 2.3.88. Definirea contururilor liniare măsurate

Datele de ieșire pentru rectilinitatea suprafeței corpului piesei printate, măsurată paralel cu axele X și Y, sunt prezentate în Tabelul 2.3.28. Datele sunt structurate în mod identic în raport cu etapa de printare. Analiza rectilinității începe cu conturul X1.

Conform analizei dispersionale pentru rectilinitatea conturului X1, prezentată în Tabelul 2.3.29, ambii factori experimentali - culoarea rășinii și densitatea suporturilor - au o influență semnificativă din punct de vedere statistic de 95% asupra rectilinității conturului X1. Pentru ambii factori experimentali, valoarea p este mai mică de 0,05.

Ecuția de regresie a modelului ajustat pentru rectilinitatea conturului X1 este prezentată în ecuația (2.3.13):

$$\begin{aligned} \text{Rectilinitate}_{X1} = & 0.25813 - 0.05447 \text{ CuloareRășină_Neagră} + 0.02353 \text{ CuloareRășină_Albastră} \\ & - 0.06447 \text{ CuloareRășină_Transparentă} + 0.07087 \text{ CuloareRășină_Verde} + \\ & 0.02453 \text{ CuloareRășină_Violetă} + 0.02487 \text{ Densitate}_{50} - 0.00493 \text{ Densitate}_{55} - \\ & 0.01993 \text{ Densitate}_{60}. \end{aligned} \quad (2.3.13)$$

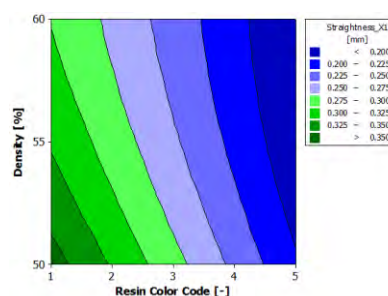
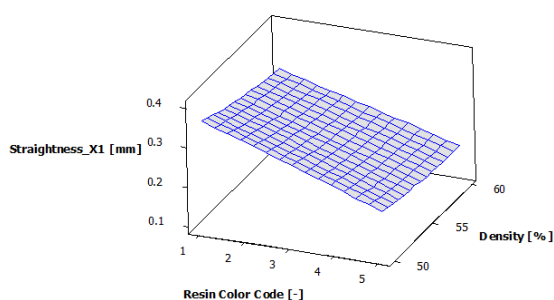
Tabelul 2.3.28. Datele de ieșire pentru rectilinitatea piesei printate în direcția X și Y

Nr.	Culoare rășină	Cod culoare	Densitate (%)	Rectilinitate (mm)				Obs.
				X1	X2	Y1	Y2	
1.	2.		3.	4.	5.	6.	7.	8.
1	Verde	1	50	0.357	0.318	0.971	0.664	
2		1	55	0.312	0.370	0.937	0.862	
3		1	60	0.318	0.378	0.798	0.666	
4	Albastră	2	50	0.329	0.257	0.796	0.762	
5		2	55	0.270	0.303	0.795	0.749	
6		2	60	0.246	0.307	0.780	0.723	
7	Violetă	3	50	0.308	0.286	0.825	0.805	
8		3	55	0.282	0.319	0.825	0.829	
9		3	60	0.258	0.294	0.669	0.595	
10	Neagră	4	50	0.223	0.237	0.575	0.568	
11		4	55	0.193	0.224	0.576	0.528	
12		4	60	0.195	0.212	0.570	0.530	
13	Transparentă	5	50	0.198	0.193	0.533	0.480	
14		5	55	0.209	0.239	0.603	0.509	
15		5	60	0.174	0.186	0.464	0.443	

Tabelul 2.3.29. Analiza dispersională pentru rectilinitatea conturului X1

Sursa	Grade de libertate (Df)	Suma pătratelor (SS)	Media pătratelor (MS)	Valoare - F	Valoare - p
Culoare rășină	4	0.039901	0.009975	38.06	0.000
Densitate	2	0.005200	0.002600	9.92	0.007
Eroare	8	0.002097	0.000262		
Total	14	0.047198			

În Figura 2.3.89 se prezintă suprafața de răspuns estimată pentru rectilinitatea conturului X1 iar în Figura 2.3.90 se prezintă conturul suprafeței de răspuns estimate pentru rectilinitatea conturului X1 al suprafeței corpului piesei printate. Se poate observa că valoarea maximă pentru abaterea de rectilinitate este de 0,357 mm și este obținută pentru eco-rășina verde cu o densitate a suporturilor de 50%. Valoarea minimă a abaterii de rectilinitate este de 0,174 mm. Aceasta este obținută pentru eco-rășina transparentă cu o densitate a suporturilor de 60%. Rezultate bune se obțin, de asemenea, pentru eco-rășina neagră: 0,193 mm abatere de rectilinitate pentru o densitate a suporturilor de 55% și 0,195 mm abatere de rectilinitate pentru o densitate a suporturilor de 60%.



Legendă: Straightness_X1=rectilinitate_X1; Resin Color Code=cod de culoare rășină; Density=densitate.

Figura 2.3.89. Suprafața de răspuns estimată pentru rectilinitate contur X1**Figura 2.3.90.** Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru rectilinitate contur X1

Contur X2

În Tabelul 2.3.30 se prezintă analiza dispersională pentru rectilinitatea conturului X2. Se poate observa că rectilinitatea conturului X2 este influențată în mod semnificativ doar de culoarea eco-rășinii (valoare p mai mică de 0,05). În același timp, densitatea suporturilor nu are o influență semnificativă asupra rectilinității conturului X2 (valoare p mai mare de 0,05).

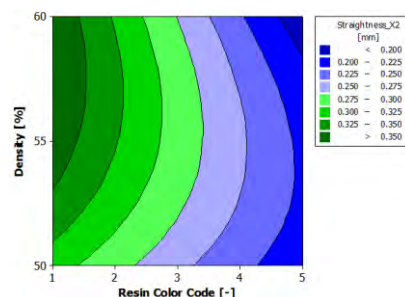
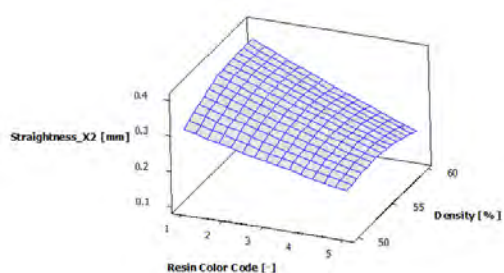
Tabelul 2.3.30. Analiza dispersională pentru rectilinitate contur X2

Sursa	Grade de libertate (Df)	Suma pătratelor (SS)	Media pătratelor (MS)	Valoare - F	Valoare - p
Culoare rășină	4	0.043758	0.010939	24.73	0.000
Densitate	2	0.002692	0.001346	3.04	0.1047
Eroare	8	0.003538	0.000442		
Total	14	0.049988			

În ecuația (2.3.14) se prezintă ecuația de regresie a modelului ajustat pentru rectilinitatea conturului X2:

$$\begin{aligned}
 \text{Rectilinitate_X2} = & 0.27487 - 0.0505 \text{ CuloareRășină_Neagră} + 0.0141 \\
 & \text{CuloareRășină_Albastră} - 0.0689 \text{ CuloareRășină_Transparentă} + 0.0805 \\
 & \text{CuloareRășină_Verde} + 0.0248 \text{ CuloareRășină_Violetă} - 0.01667 \text{ Densitate_50} + 0.01613 \\
 & \text{Densitate_55} + 0.00053 \text{ Densitate_60.}
 \end{aligned}
 \quad (2.3.14)$$

În Figura 2.3.91 se prezintă suprafața de răspuns estimată pentru rectilinitatea conturului X2, iar în Figura 2.3.92 se prezintă conturul suprafeței de răspuns estimate pentru rectilinitatea conturului X2 al suprafeței corpului piesei printate. Se poate observa că valoarea maximă pentru abaterea de rectilinitate este de 0,378 mm, valoare obținută pentru eco-rășina verde cu densitate de suport de 60 %. Valoarea minimă pentru abaterea de rectilinitate este de 0,186 mm, obținută pentru eco-rășina transparentă cu o densitate de 60% a suporturilor. Un rezultat bun este, de asemenea, acceptat pentru eco-rășina transparentă, 0,193 mm abatere de rectilinitate pentru o densitate de suport de 50%.



Legendă: *Straightness_X2*=rectilinitate_X2; *Resin Color Code*=cod de culoare rășină; *Density*=densitate.

Figura 2.3.91. Suprafața de răspuns estimată pentru rectilinitate contur X2**Figura 2.3.92.** Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru rectilinitate contur X2*Contur Y1*

Conform analizei dispersonale pentru rectilinitatea conturului Y1, prezentată în Tabelul 2.3.31, ambii factori experimentali - culoarea rășinii și densitatea suporturilor - au o influență semnificativă din punct de vedere statistic de 95% asupra rectilinității conturului Y1. Pentru ambii factori experimentali, valoarea p este mai mică de 0,05. Impactul culorii eco-rășinii asupra rectilinității conturului Y1 este mai semnificativ decât cel al densității suporturilor.

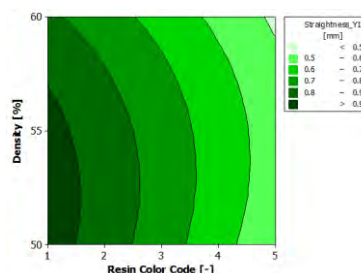
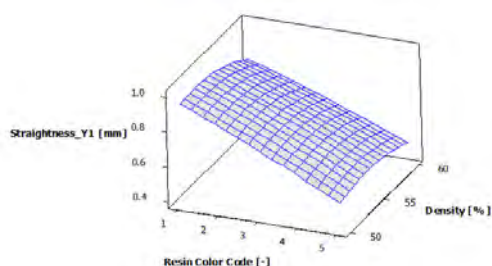
Tabelul 2.3.31. Analiza dispersională pentru rectilinitate contur Y1

Sursa	Grade de libertate (Df)	Suma pătratelor (SS)	Media pătratelor (MS)	Valoare - F	Valoare - p
Culoare rășină	4	0.29095	0.072738	33.68	0.000
Densitate	2	0.02559	0.012796	5.93	0.026
Eroare	8	0.01728	0.002159		
Total	14	0.33382			

În ecuația (2.3.15) se prezintă ecuația de regresie a modelului ajustat pentru rectilinitatea conturului Y1:

$$\begin{aligned} \text{Rectilinitate_Y1} = & 0.7145 - 0.1408 \text{ CuloareRășină_Neagră} + 0.0759 \text{ CuloareRășină_Albastră} \\ & - 0.1811 \text{ CuloareRășină_Transparentă} + 0.1875 \text{ CuloareRășină_Verde} + 0.0585 \\ & \text{CuloareRășină_Violetă} + 0.0255 \text{ Densitate_50} + 0.0327 \text{ Densitate_55} - 0.0583 \text{ Densitate_60}. \end{aligned} \quad (2.3.15)$$

În Figura 2.3.93 se prezintă suprafața de răspuns estimată pentru rectilinitatea conturului Y1, iar în Figura 2.3.94 se prezintă conturul suprafeței de răspuns estimate pentru rectilinitatea conturului Y1 al suprafeței corpului piesei imprimate. Se poate observa că valoarea maximă a abaterii de rectilinitate este de 0,971 mm, valoare obținută pentru eco-rășina verde cu densitatea suporturilor de 50 %. Valoarea minimă pentru abaterea de rectilinitate este de 0,464 mm, obținută pentru eco-rășina transparentă cu o densitate a suporturilor de 60%.



Legendă: *Straightness_Y1=rectilinitate_Y1; Resin Color Code=cod de culoare rășină; Density=densitate.*

Figura 2.3.93. Suprafața de răspuns estimată pentru rectilinitate contur Y1**Figura 2.3.94.** Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru rectilinitate contur Y1

Contur Y2

În Tabelul 2.3.32 se prezintă analiza dispersională pentru rectilinitatea conturului Y2. Se poate observa că rectilinitatea conturului Y2 este afectată în mod semnificativ doar de culoarea eco-rășinii (valoare p mai mică de 0,05). În același timp, densitatea suporturilor nu are o influență semnificativă asupra rectilinității conturului Y2 (valoare p mai mare de 0,05).

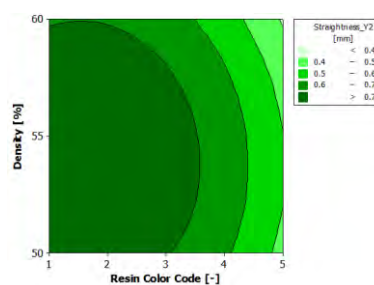
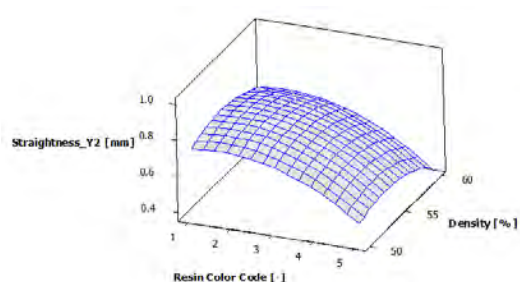
Tabelul 2.3.32. Analiza dispersională pentru rectilinitate contur Y2

Sursa	Grade de libertate (Df)	Suma pătratelor (SS)	Media pătratelor (MS)	Valoare - F	Valoare - p
Culoare rășină	4	0.19670	0.049174	11.09	0.002
Densitate	2	0.02755	0.013776	3.11	0.100
Eroare	8	0.03546	0.004432		
Total	14	0.25971			

În ecuația (2.3.16) se prezintă ecuația de regresie a modelului ajustat pentru rectilinitatea conturului Y2:

$$\begin{aligned} \text{Rectilinitate_Y2} = & 0.6475 - 0.1055 \text{ CuloareRășină_Neagră} + 0.0971 \text{ CuloareRășină_Albastră} - 0.1702 \text{ CuloareRășină_Transparentă} + 0.0831 \text{ CuloareRășină_Verde} + 0.0955 \\ & \text{CuloareRășină_Violetă} + 0.0083 \text{ Densitate_50} + 0.0479 \text{ Densitate_55} - 0.0561 \text{ Densitate_60}. \end{aligned} \quad (2.3.16)$$

În Figura 2.3.95 se prezintă suprafața de răspuns estimată pentru rectilinitatea conturului Y2, iar în Figura 2.3.96 se prezintă conturul suprafeței de răspuns estimate pentru rectilinitatea conturului Y2 al suprafeței corpului piesei imprimate. Se poate observa că valoarea maximă pentru abaterea de rectilinitate este de 0,862 mm, valoare obținută pentru eco-rășina verde cu o densitate a suporturilor de 55%. Valoarea minimă pentru abaterea de rectilinitate este de 0,443 mm, obținută pentru eco-rășina transparentă cu o densitate a suporturilor de 60%.



Legendă: Straightness_Y2=rectilinitate_Y2; Resin Color Code=cod de culoare rășină; Density=densitate.

Figura 2.3.95. Suprafața de răspuns estimată pentru rectilinitate contur Y2

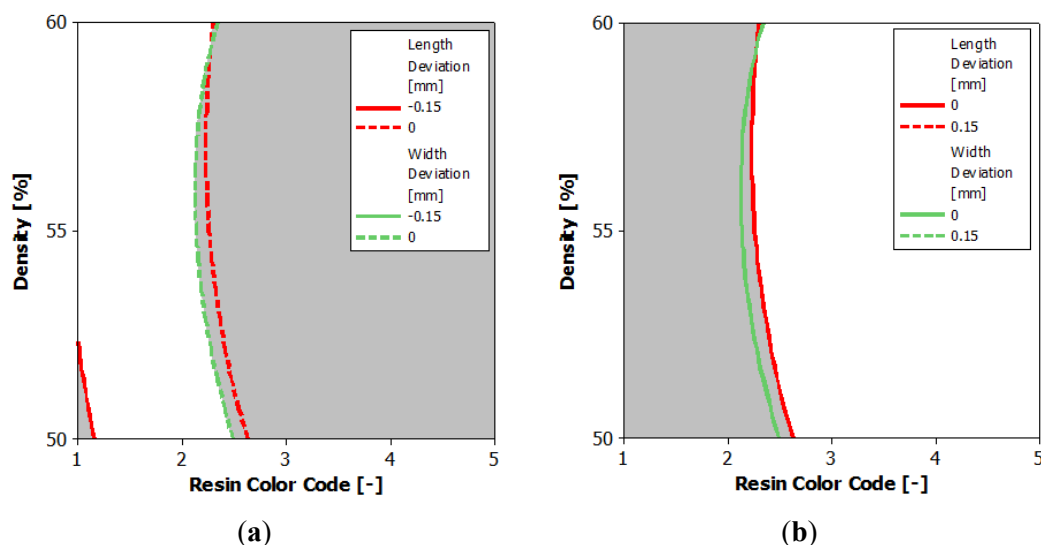
Figura 2.3.96. Contururi ale suprafeței de răspuns estimate pentru rectilinitate contur Y2

4. Discuție

Prima concluzie este aceea de a lua în considerare timpul de expunere corect pentru printare. Se poate observa că timpul de expunere pentru o singură piesă printată este în concordanță cu toate culorile eco-rășinii din programul de determinare a timpului de expunere. Pentru mai multe piese printate cu un set diferit de suporturi, se recomandă să se ia în considerare o valoare mare pentru timpul de expunere în zona suporturilor sau a tuturor pieselor printate. Acest aspect se observă doar pentru rășina neagră și transparentă.

A doua concluzie se referă la dimensiunile corpului piesei printate în conformitate cu standardul ISO 2768-1 [153] în ceea ce privesc dimensiunile liniare și unghiulare fără indicații de toleranțe individuale. În Figura 2.3.97 se prezintă graficul de contururi suprapuse ale deviației lungimii și lățimii. În Figura 2.3.97a, zona albă reprezintă combinația optimă dintre culoarea eco-rășinii și densitatea suporturilor care dă abateri negative între 0 și -0,15 mm a lungimii și lățimii piesei printate. În Figura 2.3.97b, zona albă reprezintă combinația optimă dintre culoarea eco-rășinii și densitatea suporturilor care determină abateri pozitive între 0 și 0,15 mm în ceea ce privește lungimea și lățimea piesei printate. Pentru eco-rășina albastră și violetă, abaterile de lungime și lățime sunt mici, dimensiunile piesei printate fiind foarte apropiate de dimensiunile nominale ale piesei.

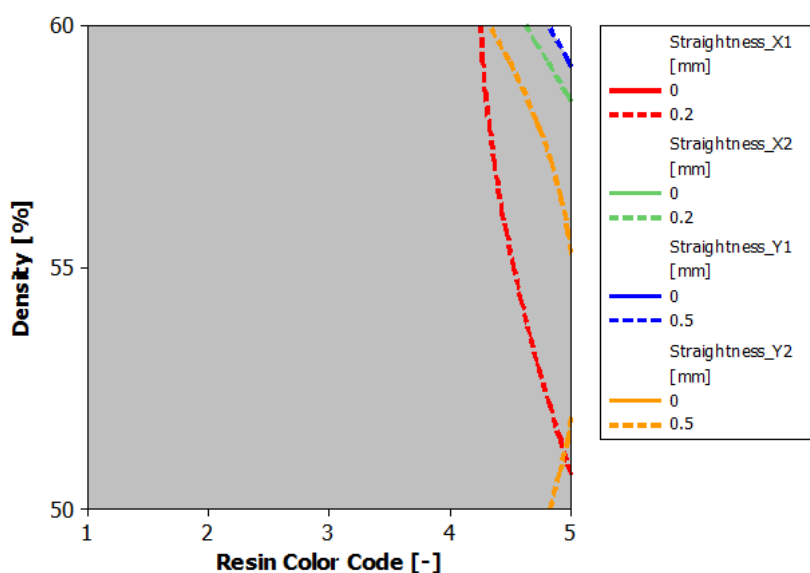
Pe baza acestor observații, se poate concluziona că pentru toate celelalte combinații, cu excepția eco-rășinii verzi cu 50% densitate de suport, lungimea și lățimea piesei printate pot fi incluse în clasa de toleranță f, cu o valoare standard de $\pm 0,15$ mm, pentru lungimi nominale ale piesei de peste 30 mm până la 100 mm [153].



Legendă: Density=densitate; Resin Color Cod=cod culoare rășină; Length Deviation=abatere lungime, Width Deviation=abatere lățime

Figura 2.3.97. Diagrama de contur suprapusă a deviației de lungime și a deviației de lățime: (a) deviații negative; (b) deviații pozitive

Cea de-a treia concluzie se referă la rectilinitatea conturilor corpului piesei printate în conformitate cu standardul ISO 2768-2 [154], în ceea ce privesc toleranțele geometrice pentru caracteristicile fără indicații de toleranțe individuale. În Figura 2.3.98 se prezintă graficul cu suprapunerea conturilor de rectilinitate X1, X2 și Y1, Y2. Zona albă reprezintă combinația optimă dintre culoarea eco-rășinii și densitatea suporturilor care oferă abateri de rectilinitate de până la 0,2 mm pentru conturile X1 și X2 și de până la 0,5 mm pentru conturile Y1 și Y2. Aceste valori ale abaterilor de rectilinitate au putut fi obținute numai pentru piesa printată din eco-rășină transparentă cu o densitate a suporturilor de 60%.



Legendă: Density=densitate; Resin Color Cod=cod culoare rășină; Straightness_X1=rectilinitate_X1; Straightness_X2=rectilinitate_X2; Straightness_Y1=rectilinitate_Y1; Straightness_Y2=rectilinitate_Y2.

Figura 2.3.98. Diagramă de contur suprapusă pentru Rectilinitate_X1; X2; Y1; Y2

Pe baza acestor observații, se poate concluziona că abaterile de rectilinitate a contururilor X1 și X2 ale piesei printate pot fi incluse în clasa de toleranță K, cu o valoare standard de 0,2 mm. Pentru lungimile nominale ale piesei, peste 30 mm și până la 100 mm, abaterile de rectilinitate a conturului Y1 și Y2 ale piesei printate sunt foarte apropiate de clasa de toleranță L și ar putea fi incluse în această clasă de toleranță cu o valoare standard de 0,4 mm [154].

Cea de-a patra concluzie implică determinarea condițiilor optime care vor produce cea mai bună valoare pentru abaterile de la forma corpului piesei printate. Deoarece planeitatea și rectilinitatea suprafeței plane a piesei printate sunt importante în determinarea calității piesei printate, aceste proprietăți vor fi luate în considerare simultan. În Figura 2.3.99 se prezintă o soluție optimă pentru variabilele de intrare.



Legendă: Goal=obiectiv; Lower/Target=Valoare inferioară/Țintă; Upper=superioară;
Flatness=planeitate; Straightness_X1,X2,Y1,Y2=rectilinitate_X1,X2,Y1,Y2;
Predicted Response=răspuns prezis; Desirability=valoare dorită;
Optimal desirability=dezirabilitate optimă; Density=densitate; Color Co=cod culoare.

Figura 2.3.99. Grafic de optimizare a planeității și a rectilinității_X1; X2; Y1; Y2

Setările valorii țintă pentru variabilele de intrare planeitate și rectilinitate au fost stabilite la valoarea zero. Setările valorii de creștere au fost stabilite la 0,8 mm pentru abaterile de planeitate, 0,2 mm pentru abaterile de rectilinitate ale contururilor X1 și X2 și 0,5 mm pentru abaterile de rectilinitate ale contururilor Y1 și Y2. În concluzie, valorile precizate mai sus pot fi obținute doar pentru combinația de 60% densitate de suporturi și eco-rășină transparentă.

SECȚIUNEA II. PLANURI DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI

3. Planuri de evoluție și dezvoltare a carierei

Planul de evoluție și dezvoltare a carierei din punct de vedere științific, academic și profesional are în vedere contextul economic actual, de utilizare eficientă a resurselor prin folosirea de tehnologii performante, prietenoase cu mediul, în vederea obținerii unor produse cu nivel tehnic și de calitate ridicat, la costuri cât mai reduse. Evoluția carierei se manifestă pe două paliere, cu efecte sinergice reciproce, unul dintre ele acoperind activitățile academice, iar celălalt fiind dedicat activităților de cercetare, ambele în domeniul ingineriei industriale.

3.1 Dezvoltarea carierei științifice

Principalele activități de cercetare pe care intenționez să le desfășor în continuare urmează direcțiile principale sintetizate în actuala teză de abilitare, care au fost parțial investigate și necesită o aprofundare mai detaliată în vederea obținerii unor rezultate noi, respectiv identificarea unor direcții de actualitate și dezvoltarea unor noi direcții de cercetare. În acest sens mă voi axa pe studii și cercetări în următoarele direcții:

- *Procese și tehnologii de fabricație prin deformare plastică la rece.* Acest domeniu poate fi abordat în următoarele direcții:
 - Automatizarea unor operații în cadrul proceselor de fabricație prin deformare plastică la rece (diferite de cele prezentate în cadrul acestei lucrări);
 - Analiza privind limitele tehnologice la operațiile de ștanțare și deformare plastică în scopul îmbunătățirii calității pieselor și a creșterii fiabilității și durabilității ștanțelor și matrițelor;
 - Optimizarea proceselor de fabricație a pieselor realizate pe prese CNC de ștanțare și îndoire: proiectare piese ștanțate și îndoite (raze minime, unghiuri), dimensionarea semifabricatului, croire combinată, debitare semifabricate, parametri de proces;
 - Proiectarea procesului tehnologic de deformare plastică la rece folosind softuri de simulare și analiză FEA;
 - Proiectarea optimală și inovativă a ștanțelor și matrițelor (reconfigurabile) în vederea creșterii calității pieselor și a flexibilității proceselor de ștanțare-matrițare;
- *Adecvarea și performanțele diferitelor sisteme de măsurare tridimensională:*
 - Analiza comparativă a sistemelor de măsurare tridimensională care folosesc tehnologii de măsurare prin contact, optic și laser pentru a determina adecvarea, acuratețea și eficiența la măsurarea pieselor realizate din materiale diferite și prin tehnologii de fabricație diferite;
 - Analiza comparativă a sistemelor de măsurare tridimensională prin contact cu senzori cu declanșare și senzori de scanare la măsurarea dimensiunilor și a formelor geometrice ale diferitelor tipuri de piese;
 - Optimizarea controlului pieselor direct pe fluxul de fabricație al acestora;
- *Asigurarea calității pieselor prin strategii de măsurare tridimensională:*
 - Realizarea unor strategii de măsurare tridimensională a unor piese care prezintă deformații mari (piese din tablă, piese injectate, piese printate 3D), respectiv în cazul unor piese de precizie ridicată;
 - Realizarea unor strategii de măsurare tridimensională a unor piese tip conector (piese injectate cu diferite inserții metalice de tip pini) folosite în industria automotive;
 - Aplicarea metodei de reverse-engineering la măsurarea și scanarea 3D a unor implanturi din domeniul medical, cu precădere cel stomatologic;

Aceste direcții de cercetare, similare cu cercetările mele din domeniile pentru care am dobândit expertiză pe parcursul activității mele, pot genera un număr mare de teme de cercetare pentru doctoranzii din domeniul Inginerie Industrială.

3.2 Dezvoltarea carierei profesionale și academice

Experiența dobândită în coordonarea unor echipe de cercetare la granturi și proiecte de cercetare cu parteneri industriali, respectiv ca membru în echipe de cercetare (prezentate la cap. 1.1.3), demonstrează abilitățile de conducere a echipelor de cercetare ale autorului acestei teze și va fi de mare ajutor în coordonarea activității de cercetare a viitorilor doctoranzi. De asemenea, o importanță deosebită o are și experiența în coordonarea studenților la susținerea lucrărilor de licență și disertație, respectiv cea de îndrumare a doctoranzilor, în calitate de membru al unor comisii de îndrumare.

Temele de doctorat ale viitorilor doctoranzi pe care candidatul îi va coordona vor fi în concordanță cu principalele direcții de cercetare prezentate în acest capitol. Pentru a familiariza viitorii doctoranzi cu temele de cercetare, înainte de a se înscrie la doctorat, îmi propun să încep să lucrez cu aceștia încă din timpul studiilor de masterat, prin coordonarea unor teme de disertație.

Cercetarea experimentală efectuată de către autorul acestei teze a fost realizată, în marea ei parte, în două laboratoare existente în departamentul de Ingineria Materialelor și Fabricației din Universitatea Politehnica Timișoara: *Laboratorul de deformări plastice la rece* (Figura 3.1) și *Laboratorul de Măsurări tridimensionale* (Figura 3.2), laborator a cărui baze au fost puse în anul 2001 de către autorul acestei teze.



Figura 3.1. Laboratorul de Deformări plastice la rece



Figura 3.2. Laboratorul de Măsurări tridimensionale

Prin abilitatea de a atrage fonduri din contracte de cercetare și prin parteneriate cu diverse companii, autorul acestei teze a dotat cele două laboratoare cu echipamente și softuri dedicate, după cum urmează:

Laboratorul de deformări plastice la rece:

- soft METALIX pentru proiectare CAD/CAM a pieselor din tablă, debitare semifabricate, croire combinată și prelucrare piese pe prese CNC de ștanțare și îndoire;
- foarfecă de colț și foarfecă ghilotină cu acționare manuală;
- tipizate ștanțe cu coloane de ghidare;

Laboratorul de măsurări tridimensionale:

- mașină de măsurat în coordonate TESA MicroMS343 cu antrenare manuală;
- mașină de măsurat în coordonate TESA MicroMS343-CNC;
- mașină de măsurat în coordonate DEA GLOBAL Advantage 7.10.7;
- scanner laser Roland LPX-600;
- senzori, palpatoare și alte accesorii pentru măsurarea pe mașini în coordonate;
- instrumente de măsurare de precizie;
- softuri de măsurare tridimensională Quindos7 și PC-DMIS 2022 (licențe online și offline);
- soft Q-DAS pentru controlul statistic al proceselor industriale (în special pentru domeniul auto).

Aceste laboratoare vor constitui infrastructura de cercetare de bază în activitatea de cercetare a doctoranzilor. Dacă această structură existentă nu este adecvată pentru anumite activități de cercetare, autorul tezei are acces la facilități din cadrul altor instituții sau companii (ex. compania Meusburger și AGO Trade Group pentru domeniul deformărilor plastice la rece, respectiv compania Hexagon Manufacturing Intelligence pentru domeniul măsurărilor tridimensionale etc.).

În paralel cu activitatea de cercetare realizată cu viitorii doctoranzi mă voi implica în modernizarea laboratoarelor existente și dotarea acestora cu echipamente și softuri pentru cercetare. În acest sens intenționez să modernizez laboratorul de deformări plastice cu softurile de simulare Dynaform și Autoform folosite în procesul de proiectare a matrițelor și de simulare a procesului de deformare a tablelor metalice. În cazul laboratorului de măsurări tridimensionale intenționez să asigur dotarea acestuia cu tehnică de scanare laser (braț articulat Romer cu senzor de contact și scanner laser). Aceste noi facilități ar extinde foarte mult temele de cercetare pentru doctoranzi.

Pentru a susține activitatea de cercetare a viitorilor doctoranzi, intenționez să depun cereri de finanțare granturi de cercetare și să continui colaborarea cu companiile industriale pe diverse teme de cercetare/dezvoltare/proiectare, astfel încât activitatea de cercetare desfășurată de doctoranzi să aibă aplicare practică. Rezultatele care vor fi obținute în urma procesului de cercetare vor fi prezentate la conferințe internaționale și vor fi publicate în reviste internaționale cu factor de impact.

SECȚIUNEA III.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Rosinger Ștefan, **Tulcan Aurel**, *Cu privire la regimurile de funcționare ale unor sisteme de fabricație prin presare la rece*, A VII-a Conferință națională de tehnologii și utilaje pentru prelucrarea materialelor prin deformare plastică la rece, Cluj-Napoca, 2000.
- [2] **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, Stan Daniel, *Modelarea funcționării părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece – partea I*, A VII-a Conferință națională “Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000”-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, 2000, pp. 175(8), ISBN 973-97486-3-5.
- [3] **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, Stan Daniel, *Modelarea funcționării părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece – partea a II-a*, A VII-a Conferință națională “Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000”-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, 2000, pp. 183(6), ISBN 973-97486-3-5.
- [4] CĂLIN S., POPESCU T., ș.a., *Conducerea adaptivă și flexibilă a proceselor industriale*, Editura Tehnică, București, 1988.
- [5] BOSSY J.C., ș.a., *Le Grafcet - sa pratique et ses applications*, Editions Casteilla, Paris, 1991.
- [6] DAVID R., ALLA H., *Du Grafcet aux réseaux de Petri*, Hermes, Paris, 1992.
- [7] DESCOTES-GENON B., LADET P., *Modélisation et simulation d'applications de commande séquentielle décrites par GRAFCET*, Point en automatique, vol.2, Technique & Documentation (Lavoisier), Paris, 1986.
- [8] GREPA – Group Equipement de Production Automatisée de l'Ageance pour le Developpement de la Production Appliquée a l'Industrie: *Le GRAFCET de nouveaux concepts*, Cepadeus Editions, Toulouse, 1986.
- [9] Pinot, M., Jégoux, R., Maillard, J.P.: *Du Grafcet aux automates programmables-analyse fonctionnelle et maintenance*, Les editions Foucher, Paris, 1991.
- [10] **Tulcan Aurel**, *Studiul liniilor automate flexibile de presare la rece*. Teză de doctorat, Timișoara, 1999.
- [11] **Tulcan Aurel**, *Aspects concernant le mode de fonctionnement d'une ligne flexible de formage de tôles, 1^{ere} et 2^{eme} partie*, Buletinul Științific al Universității “Politehnica” din Timișoara, Tom 43(57),1998.
- [12] **Tulcan Aurel**, Iclănzan Tudor, Stan Daniel, *Modul de realizare a părții de comandă a unei linii automate flexibile de presare la rece*, A VII-a Conferință națională “Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000”-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, 2000, pp. 189(4), ISBN 973-97486-3-5.
- [13] **Tulcan Aurel**, Rosinger Ștefan, *Capacitatea productivă și consumul energetic ale unor sisteme de fabricație prin presare la rece*, A VII-a Conferință națională “Tehnologii și utilaje pentru prelucrarea prin deformare plastică la rece -TPR 2000”-cu participare internațională, 11-12 Mai, Cluj-Napoca, 2000, pp. 169(6), ISBN 973-97486-3-5.
- [14] Rosinger Ștefan, **Tulcan Aurel**, *Flexibilitatea și capacitatea productivă a liniilor automate de ștanțare-matrițare a semifabricatelor bandă*, Lucrările celei de a II-a Sesiune de Comunicării Științifice a Universității “Aurel Vlaicu”, Arad, 1994.

- [15] Rosinger Ștefan, **Tulcan Aurel**, *Cu privire la regimurile de funcționare ale unor sisteme de fabricație prin presare la rece*, A VII-a Conferință națională de tehnologii și utilaje pentru prelucrarea materialelor prin deformare plastică la rece, Cluj-Napoca, 2000.
- [16] **Tulcan Aurel**, *Determinarea experimentală a consumurilor specifice de energie electrică la prelucrări de ștanțare, în regim de alimentare automată a preselor-parte I și II*, A VIII-a Conferință Internațională de Inginerie Managerială și Tehnologică, TEHNO-98, Timișoara, 1998.
- [17] **Tulcan Aurel**, *Determinarea experimentală a consumurilor de energie electrică la prelucrări de ștanțare în regim de alimentare automată a preseii PAI 6.3-parte I și II*, Conferința Internațională Beyond 2000: Engineering Research Strategies, Sibiu, 1999.
- [18] **Tulcan Aurel**, Teodorescu Carol, Ferician Florin, *Program de calcul al acumulatorilor de bandă și de optimizare a funcționării liniilor automate de presare la rece a semifabricatelor continue subțiri*, Revista Deformări Plastice Vol. 2 (1995), Nr. 3-4 (5-6).
- [19] **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Tulcan Liliana, *Mesures concernant l'amélioration d'opération de réglage d'une ligne automate flexible pour formage mécanique*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 46(60), F2, pp. 95(20), 2001, ISSN 1224-6077.
- [20] Shingo Shingo, *Le système SMED - une révolution en gestion de production (The SMED system - a revolution in manufacturing)*, Les Editions d'organisation, Paris, 1985.
- [21] Shingo Shingo, *Le système Shingo - Les clés de l'amélioration de la production (The Shingo system - the production improvement keys)*, Les Editions d'organisation, Paris, 1990.
- [22] **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Tulcan Liliana, *Système de changement rapide d'outils sur la presse*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Journal of Mechanical Engineering, Transaction on Mechanics, Vol 46(60), F2, pp. 99(4), 2001, ISSN 1224-6077.
- [23] **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Stan Daniel, Turc Cristian, *Reducing the time of adjustment of a classical press*, Conferința Științifică Internațională Tehnologii Moderne, Calitate, Restructurare-TMCR 2003, 29 Mai, Chișinău, Moldova, **2003**, vol 1, pp. 543(4), ISBN 9975-9748-0-5.
- [24] *** *Système de changement rapide d'outils*, catalog al firmei Rotobloc Dimeco, 1994.
- [25] *** *Press Die-Change System*, prospect al firmei AIOI Seiki, 1994.
- [26] *** *Efficient clamping technology from one supplier*. Prospect al firmei Hilma-Römheld, 1994.
- [27] **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Seiculescu Valentin, Iclănzan Tudor, Ciorba Ioan, *L'Etude Expérimental des Paramètres d'Auto Frettage des Tubes à Parois Épais*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 1(4), pp. 21(5), **2003**, ISSN 1583-7904.
- [28] Iclănzan Tudor, **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Seiculescu Valentin, *Cercetări privind procesul de autofretare a țevelor de artilerie*, Contract nr. 452/1999 cu Uzina Mecanică Reșița.
- [29] Ciorba Ioan, *Cercetarea procesului de autofretare a țevelor de artilerie*, Teză de doctorat, Timișoara, 2001.
- [30] Buzdugan Gheorghe, *Rezistența materialelor*, Editura Academiei București, 1986.
- [31] Deutsch Ioan, *Rezistența materialelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- [32] **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Stan Daniel, *Coordinate measuring machine role in quality assurance*, Journal of Technical Sciences, 2004, pp. 375(4), ISSN 0035-4074 /973-27-0932-4.

- [33] *** *How to select a CMM*, <http://www.leitz-metrology.com>, Accesat în 2004-02-16.
- [34] *** *How to select a CMM*, <http://www.brownandsharpe.com>, Accesat în 2004-02-16.
- [35] *** *CMM's. How to find the right system*, <http://www.iacmm.org>, Accesat în 2004-02-18.
- [36] **Tulcan Aurel**, Seiculescu Valentin, Stan Daniel, Iclănzan Tudor, Bernath Alexander, *Virtual simulation of a coordinate measuring machine behaviour for high-speed measurement*, Simulation Design and Control of Foundry Processes, Krakow, Poland, 2006, pp. 167(9), ISBN 83-88309-41-2.
- [37] **Tulcan Aurel**, Seiculescu Valentin, Cosma Cristian, Tulcan Liliana, Bernath Alexander, *Virtual Simulation of a Coordinate Measuring Machine Behavior at Accelerations and Variable Thermal Field*, 3rd International Conference on Manufacturing Engineering ICMEN and EUREKA Brokerage Event, Kallithea of Chalkidiki, Greece, 2008, pp. 715(6), ISBN 978-960-243-649-3, Google Scholar.
- [38] Iacmm: The fundamental elements of the Co-ordinate Measuring Machine, <http://www.iacmm.org>, Accesat în 2006-07-18.
- [39] Y. H. Mu, B. K. A. Ngoi, *Dynamic Error Compensation of Coordinate Measuring Machines for High-Speed Measurement*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlag London, 1999, 15:810-814.
- [40] ISO 10 360 – Acceptance and reverication tests for coordinate measuring machines, <http://www.leitz-metrology.com>, Accesat în 2006-05-16.
- [41] Pereira P.H., Hocken R.J., *Characterization and compensation of dynamic errors of a scanning coordinate measuring machine*, Precision Engineering 31 (2007), Elsevier, 22-32
- [42] Y. H. Mu, B. K. A. Ngoi, *Dynamic Error Compensation of Coordinate Measuring Machines for High-Speed Measurement*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer-Verlag London (1999) 15:810-814
- [43] **Tulcan Aurel**, Cioană Cristian, Stan Daniel, Tulcan Liliana, Bernath Alexander, *Modular design of a coordinate measuring machine*, 4th International Conference on Manufacturing Engineering-ICMEN, Thessaloniki, Greece, **2011**, pp. 181(6), ISBN 978-960-243-649-3.
- [44] Leitz: *Coordinate measuring machines for the measuring room*, www.leitz-metrology.com, Accesat în 2006-06-28.
- [45] Mitutoyo: *Legex Series - Coordinate measuring machines*, www.mitutoyo.com, Accesat în 2006-06-28.
- [46] Qingdao: *Fixed bridge style of FD-Elephant series*, www.fd-cmm.com, Accesat în 2006-06-28.
- [47] Leitz: *Hexagon Metrology Probes - CMM catalogue*, www.leitz-metrology.com, Accesat în 2011-01-17.
- [48] Renishaw: *SP80 – ultra-high accuracy scanning probe*, www.renishaw.com, Accesat în 2011-01-17.
- [49] Weckenmann, A., Estler, T., Peggs, G., McMurtry, D., *Probing Systems in Dimensional Metrology*. Annals of the CIRP, Vol.53/2 (2004) pp: 1-28.
- [50] Renishaw: *PH10 motorised indexing heads*, www.renishaw.com, Accesat în 2011-01-17.
- [51] Renishaw: *REVO – five axis measurement system*, www.renishaw.com, Accesat în 2011-01-17.
- [52] **Tulcan Aurel**, Stan Daniel, Turc Cristian, Cosma Cristian, Dume Adrian, *Design of Linear Drive Systems to Retrofit a Coordinate Measuring Machine*, 14th International Conference

- on Modern Technologies, Quality and Innovation (ModTech 2010), Slănic Moldova, **2010**, pp. 647-650(4), ISBN 2066-3919, WOS:000282604000159.
- [53] Uhing, J., *Linear drive nut*, <http://www.uhing.com>, Accesat în 10.11.2009.
- [54] Faulhaber, *DC Motors-Tacho*, <http://www.faulhaber.com>, Accesat în 15.12.2009.
- [55] Ruland, Bellows coupling, <http://www.ruland.com>, Accesat în 15.12.2009.
- [56] **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Stan Daniel, *CMM Design Based on Fundamental Design Principles*, Modern Technologies in Industrial Engineering II, ModTech 2014, Polonia, Advanced Materials Research, Vol 1036, pp. 517-522(6), **2014**, ISSN 10226680 / 978-303835255-6, *Trans Tech Publications, Switzerland*, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1036.517, SCOPUS, Google Scholar.
- [57] P. Schellekens, N. Rosielle, H. Vermeulen, M. Vermeulen, S. Wetzels, W. Pril, *Design for Precision. Current Status and Trends*, Annals of the CIRP, Vol. 47/2 (1998) 557-586.
- [58] W.G. Weekers, P.H.J. Schellekens, Assessment of Dynamic Errors of CMMs for Fast Probing, Annals of the CIRP, Vol. 44/1 (1995) 469-474.
- [59] T.A.M. Rujil, J. van Eijk, *A Novel Ultra Precision CMM Based on Fundamental Design Principles*, Proceedings of the ASPE Topical Meeting on Coordinate Measuring Machines, Vol.29 (2003) 33-38.
- [60] K.C. Fan, C.L. Liu, P.T. Wu, Y.C. Chen, W.L. Wang, *The Structure Design of a Micro Precision CMM with Abbé Principle*, Proceedings of the 35th International MATADOR Conference, Taiwan (2007) 297-300
- [61] K.C. Fan, *The system and the mechatronics of a pagoda type Micro-CMM*, International Journal Nanomanufacturing, Vol.8, Nos.1/2 (2012) 67-86.
- [62] E. Bennett, W. Weekers, *Modern CMM Design Concepts*, Information on <http://www.hexagonmetrology.us>.
- [63] D.W. Chang, A.D. Space, *CMM Dynamic Error Analysis, Control and Compensation*, Information on <http://www.aspe.net>.
- [64] D.C. Montgomery, *Design and analyses of experiments*, 5th edition, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [65] **Tulcan Aurel**, Grozav Ion, Turc Cristian, Tulcan Liliana, *TESA Micro-Ms 343 Coordinate Measuring Machine Accuracy Evaluation*, Academic Journal of Manufacturing Engineering, Vol 2(3), pp. 38(6), **2004**, ISSN 1583-7904.
- [66] Metronor, *Accuracy Verification Procedures*, Boeing Large Scale Optical Metrology Seminar. www.Metronor.com, 2004.
- [67] MAYER, P., *High Measurement Accuracy on the Shop Floor*. www.Metronor.com, 2004.
- [68] WHEELER, D. J., CHAMBERS, D. S., *Understanding Statistical Process Control*, Knoxville, Tennessee, 1986.
- [69] Minitab, Minitab® 13, statistical software.
- [70] **Tulcan Aurel**, Cioană Cristian, Cosma Cristian, Grozav Ion, *Coordinate measuring machine measurement uncertainty study*, ModTech International Conference - New face of TMCR Modern Technologies, Quality and Innovation - New face of TMCR, 25-27 May 2011, Vadul lui Vodă-Chișinău, Republic of Moldova, Vol 2, pp. 1105-1108(4), **2011**, ISBN 2069-6736,
- [71] Feng, C. X. J.; Saal, A.L.; Salsbury, J. G.; Ness, A. R. & Lin, G. C. S. (2007). *Design and analysis of experiments in CMM measurement uncertainty study*. Precision Engineering Vol.

- 31, Issue 2, April, 2007, pp. 94-101, Elsevier, ISSN: 0141-6359.
- [72] Hamburg-Piekar, D. & Donatelli, G. D. (2006). *A hybrid approach to the uncertainty analysis of coordinate measurements*. Metrology for Sustainable Development, Proceedings of XVIII Imeko World Congress, ISBN: 978-960-7475-40-4, ISSN: 1106-5516, Rio de Janeiro, 17-22 September, 2006.
- [73] Pirateli-Filho, A. & Giacomo, B. D. (2003). *CMM uncertainty analysis with factorial design*. Precision Engineering Vol. 27, Issue 3, July 2003, pp. 283-288, Elsevier, ISSN: 0141-6359.
- [74] Nardelli, V. C. & Donatelli, G. D. (2006). *A simple solution to interim check of coordinate measuring machines*. Metrology for Sustainable Development, Proceedings of XVIII Imeko World Congress, ISBN: 978-960-7475-40-4, ISSN: 1106-5516, 17-22 September 2006, Rio de Janeiro, Brazil.
- [75] **Tulcan Aurel**, Cioană Cristian, Stan Daniel, Cosma Cristian, *Coordinate measuring machine variations for different probe configurations*, The 16th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation - ModTech 2012 - New face of T.M.C.R., Sinaia, România, **2012**, pp. 989-992(4), ISBN 2066-3919.
- [76] Berisso, K., Ollison, T., *Coordinate Measuring Machine Variations for Selected Probe Head Configurations*. Journal of Industrial Technology, Vol. 26, Number 1, pp. 1-11, 2010.
- [77] Flack, D., *CMM Measurement Strategies*. Measurement Good Practice Guide No.41. Available from: <http://publications.npl.co.uk>, Accessed: 12.01.2012.
- [78] **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, *Design of Experiments in CMM Probe Configuration Study*, 2016 International Conference on Production Research – Africa, Europe and the Middle East. 4th International Conference on Quality and Innovation in Engineering and Management, Cluj-Napoca, **2016**, pp. 75-80(6), ISBN 978-606-737-180-2.
- [79] Robert J., Hocken, Paulo H. Pereira, *Coordinate Measuring Machines and Systems*, 2nd edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, USA, 2012.
- [80] Robert Rothmeier, *Measuring Strategies in Tactile Coordinate Metrology*, 3rd edition, Zeiss Metrology Academy, Oberkochen, Germany, (2014).
- [81] D., Flack, *CMM Measurement Strategies, Measurement Good Practice Guide No.41*, National Physical Laboratory, Queen's Printer and Controller of HMSO, UK, 2014.
- [82] J. B. Aquino Silva, *Approach to determine the parametric errors of coordinate measuring machines using response surface methodology*, 19th International Congress of Mechanical, Proceedings of COBEM 2007, Brasilia, 2007.
- [83] A., Wozniak, M., Dobosz, *Metrological feasibilities of CMM touch trigger probes. Part I: 3D theoretical model of probe pretravel*, Measurement, 34, pp. 273-286, Elsevier, 2003.
- [84] M., Dobosz, A., Wozniak, *CMM touch trigger probes testing using a reference axis*, Precision Engineering 29, pp. 281-289, Elsevier, 2005.
- [85] Renishaw, *Renishaw touch-trigger probing technology*, Available from: www.renishaw.com, Accessed: 10.02.2016.
- [86] Iacmm, *The sensors*, Available from: www.iacmm.org, Accesat în 01.06.2006.
- [87] Renishaw, *MH20i*, Available from: www.renishaw.com, Accesat în 10.02.2016.
- [88] **Tulcan Aurel**, Tulcan Liliana, Stan Daniel, Iclănzan Tudor, *3-dimensional inspection of injected plastic parts*, Materiale Plastice, vol 44(4), **2007**, pp. 316-320(6), ISSN 0025-5289, WOS:000253078000012.
- [89] RAUWENDAAL C., *Statistical Process Control in Injection Molding and Extrusion*, Hanser Publishers, Munich, 2000, p.87-91.

- [90] KAZMER D.O., Speight R. G., *Polymer Injection Molding Technology for the Next Millenium, Journal of Injection Molding Technology*, 1997
- [91] GREENER J., WIMBERHER-FRIEDL R., *Precision Injection Molding, Process, Materials and applications*, ISBN 3-446-21670-7, Hans Gardner Publications, 2006, p.1-13 ; 29-54
- [92] ANDERSON M.J., KRABER S. L., *Keys to successful designed experiments*, Available from: <http://www.statease.com>.
- [93] CUPȘA E., DRĂGHICI G., *Use of SPC in the quality assurance of plastic closures manufacture*, Academic Journal of Manufacture Engineering, Vol. 4, nr.2, 2006, Timisoara, Romania
- [94] CUPȘA E., *Mould maps introduction in the maintenance planning of the forming moulds in the injection process of plastic closures*, Academic Journal of Manufacture Engineering, Vol. 4, nr.4, 2006, Timisoara, Romania
- [95] NICOLA D'APUZZO, Overview of 3D surface digitization technologies in Europe, Available from: <http://www.homometrica.ch>
- [96] RAPHET, B., Mésure tridimensionnelle, Le journal d'information technologique de Haute Savoie, nr.64.
- [97] Iacmm: The sensors. Available from: <http://www.iacmm.org>.
- [98] GERSHON R., BENADY M., Noncontact 3-D measurement technology enters a new era, Available from: <http://www.qualitydigest.com>
- [99] KENNEDY S., Coordinate measuring Machines, Available from: <http://www.qualitydigest.com>
- [100] ***, *Quality control of injection molded parts*, Available from: <http://www.gom.com>
- [101] ***, *3D Digitizing in Tool and Moldmaking*, Available from: <http://www.gom.com>
- [102] ***, Calypso-The Easy Way to Create Part Programs, Available from: <http://www.zeiss.de>
- [103] ***, Holos-NT.Customized Applications-Customized Software, Available from: <http://www.zeiss.de>
- [104] **Tulcan Aurel**, Vasilescu Mircea Dorin, Tulcan Liliana, *Study of the Influence of Technological Parameters on Generating Flat Part with Cylindrical Features in 3D Printing with Resin Cured by Optical Processing*, Polymers, Vol 12(9), 1941, **2020**, pp. 24 + 11 (Supplementary Materials), ISSN 2073-4360, DOI: 10.3390/polym12091941; WOS:000579963900001, FI 3.426, (Q1).
- [105] Arnold. C.; Monsees, D.; Hey, J.; Schweyen, R. Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function of Various Printing Parameters, *Materials* **2019**, 12(12), 1-15, doi.org/10.3390/ma12121970.
- [106] Wu, H.C.; Chen, T.T.C. Quality control issues in 3D-printing manufacturing: a review, *Rapid Prototyping Journal* **2018**, 24(3), 607-614. doi.org/10.1108/RPJ-02-2017-0031.
- [107] Gordeev, E.G.; Galushko, A.S.; Ananikov, V.P. Improvement of quality of 3D printed objects by elimination of microscopic structural defects in fused deposition modeling, *Journal.pone*, **2018**, 1-19, doi.org/10.1371/journal.pone.0198370.
- [108] Elkaseer, A.; Schneider, S.; Scholz, S. Experiment-Based Process Modeling and Optimization for High-Quality and Resource-Efficient FFF 3D Printing, *Applied Sciences* **2020**, 10(8), 1-18; https://doi.org/10.3390/app10082899.
- [109] Straub, J.; Initial Work on the Characterization of Additive Manufacturing (3D Printing) Using Software Image Analysis, *Machines* **2015**, 3(2), 55-71, doi.org/10.3390/machines3020055.

- [110] Fastowicz, J.; Grudziński, M.; Teclaw, M.; Okarma, K. Objective 3D Printed Surface Quality Assessment Based on Entropy of Depth Maps, *Entropy* **2019**, *21*(1), 97; doi.org/10.3390/e21010097.
- [111] Lifsetb, R. 3D Printing and Industrial Ecology, *Journal of Industrial Ecology* **2017**, *21*(S1), S6-S8.
- [112] Mendes, L.; Kangas, A.; Kukko, K.; Mølgaard, B.; Säämänen, A.; Kanerva, T.; Ituarte, I.F.; Huhtiniemi, M.; Stockmann- Juvala, H.; Partanen, J.; Hämeri, K.; Eleftheriadis, K.; Viitanen, A.K. - Characterization of Emissions from a Desktop 3D Printer, *Journal of Industrial Ecology*, Special Issue: Environmental Dimensions of Additive Manufacturing and 3D Printing **2017**, pp S94-S106.
- [113] Denga, Y., Caob, S.J., Chenc, A., Guod, Y. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction, *Building and Environment* **2016**, *104*, 311-319.
- [114] Cavaliere, A.; Carotenuto, F.; Di Gennaro, F.; Gioli, B.; Gualtieri, G.; Martelli, F.; Matese, A.; Toscano, P.; Vagnoli, C.; Zaldei, A. Pollution Development of Low-Cost Air Quality Stations for Next Generation Monitoring Networks: Calibration and Validation of PM2.5 and PM10 *Sensors*, **2018**, *18*, 1-20, doi:10.3390/s18092843.
- [115] ISO/ASTM 52900:2015. Additive Manufacturing - General Principles - Terminology, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015.
- [116] ISO/ASTM 52921:2013. Standard terminology for additive manufacturing - Coordinate systems and test methodologies, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2013.
- [117] Ligon, S.C.; Liska, R.; Stampfl, J.; Gurr, M.; Mulhaupt, R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing, *Chemical Reviews* **2017**, *117*, 10212–10290. doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074.
- [118] Valentincic, J.; Perosa, M.; Jerman, M.; Sabotin, I.; Lebar, A.; Low Cost Printer for DLP Stereolithography, *Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering* **2017**, *63*, 559–566, doi.org/10.5545/sv-jme.2017.4591.
- [119] Pérez, M.; Medina-Sánchez, G.; García-Collado, A.; Gupta, M.; Carou, D. Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters, *Materials* **2019**, *12*(12), 1-13, DOI:10.3390/ma11081382.
- [120] Rodríguez-Panes, A.; Claver, J.; Camacho, A.M. The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis, *Materials* **2019**, *12*(12), 1-21, DOI:10.3390/ma11081333.
- [121] Mazzanti, V.; Malagutti, L.; Mollica, FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties, *Polymers* **2019**, *11*, 1-22, DOI:10.3390/polym11071094.
- [122] Kuznetsov, V.E.; Solonin, A.N.; Urzhumtsev, O.D.; Schilling, R.; Tavitov, A.G. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process, *Polymers* **2018**, *10*, 313. doi.org/10.3390/polym10030313.
- [123] The RepRap Project. Available online: <http://reprap.org/> (accessed on 03 May 2020).
- [124] Borrelloac, J.; Nasserb, P.; Iatridisb, J.C.; Costaac, K.D. 3D printing a mechanically-tunable acrylate resin on a commercial DLP-SLA printer, *Additive Manufacturing* **2018**, *23*, 374–380, doi.org/10.1016/j.addma.2018.08.019.

- [125] Fusion 360 cloud-based 3D CAD/CAM software for students and educators. Available online: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/students-teachers-educators> (accessed on 03 May 2020).
- [126] Hocken, R.J.; Ferreira, P.H. *Coordinate Measuring Machines and Systems* Second edition; CRC Press Taylor & Francis Group, New York, USA, **2012**, 57-124.
- [127] Henzold, G. *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification using ISO and ASME standards, Edition 2*; Elsevier, UK, 2006; pp. 7-85.
- [128] Roithmeier, R. *Measuring Strategies in Tactile Coordinate Metrology*, 3rd Complete Revised Edition; Zeiss Metrology Academy, Oberkochen, Germany, **2014**, 28-82.
- [129] ANYCUBIC Colored UV Resin 500mL. Available online: <https://www.anycubic.com/products/copy-of-colored-uv-resin?variant=30151438204988> (accessed on 03 May 2020).
- [130] Colored UV Resin 500mL. Available online: <https://www.anycubic.com/products/translucent-uv-resin-for-photon-series?variant=29407040340028>, (accessed on 03 May 2020).
- [131] ANYCUBIC Photon. Available online: <https://www.anycubic.com/collections/anycubic-photon-3d-printers/products/anycubic-photon-3d-printer>, (accessed on 03 May 2020).
- [132] Hexagon Manufacturing Intelligence, Global Classic. Available online: <https://www.hexagonmi.com/en-US/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/global-classic> (accessed on 03 May 2020).
- [133] ISO 10360, Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMM). Available online: <https://www.hexagonmi.com/solutions/technical-resources/metrology-101/about-iso-10360-standards-for-cmms> (accessed on 03 May 2020).
- [134] Hexagon Manufacturing Intelligence, PC-DMIS. Available online: <https://www.hexagonmi.com/en-US/products/software/pc-dmis> (accessed on 03 May 2020).
- [135] ALUFIX, Modular Fixturing Systems. Available online: <https://www.witte-barskamp.de/assets/downloads/Kataloge/Modulare-Spannsysteme/ALUFIX/ALUFIX-2019-E-Web1.pdf> (accessed on 25 May 2020).
- [136] Statgraphics Centurion XVI, User manual. Available online: <https://www.statgraphics.com/centurion-xvi>, (accessed on 03 June 2020).
- [137] Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments*, 6th Edition; John Willey & Sons Inc., USA, 2005, pp. 347-463.
- [138] Borrer, C.M. *The Certified Quality Engineer Handbook*, Third Edition; ASQ Quality Press, Milwaukee, USA, 2009; pp. 459-490.
- [139] ISO 2768-2:1989. General Tolerances – Part 2; Geometrical tolerances for features without individual tolerances indications, International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1989.
- [140] **Tulcan Aurel**, Vasilescu Mircea Dorin, Tulcan Liliana, *Comparative Study of the Influence of Bio-Resin Color on the Dimension, Flatness and Straightness of the Part in the 3D Printing Process*, Polymers, Vol 13(9), 1412, **2021**, pp. 21, ISSN 2073-4360, DOI:10.3390/polym13091412; WOS:000650706300001, FI 3.426, (**Q1**).
- [141] Kuznetsov, V.E.; Solonin, A.N.; Urzhumtsev, O.D.; Schilling, R.; Tavitov, A.G. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D

- Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process. *Polymers* **2018**, *10*, 313, doi:10.3390/polym10030313.
- [142] ISO/ASTM 52900:2015. *Additive Manufacturing—General Principles—Terminology*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2015.
- [143] Chua, C.K.; Chou, S.M.; Wong, T.S. A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **1998**, *14*, 146–152, doi:10.1007/bf01322222.
- [144] Pérez, M.; Medina-Sánchez, G.; García-Collado, A.; Gupta, M.; Carou, D. Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling (FDM) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters. *Materials* **2018**, *11*, 1382, doi:10.3390/ma11081382.
- [145] Rodríguez-Panes, A.; Claver, J.; Camacho, A.M. The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis. *Materials* **2018**, *11*, 1333, doi:10.3390/ma11081333.
- [146] Etemad-Shahidi, Y.; Qallandar, O.B.; Evenden, J.; Alifui-Segbaya, F.; Ahmed, K.E. Accuracy of 3-Dimensionally Printed Full-Arch Dental Models: A Systematic Review. *J. Clin. Med.* **2020**, *9*, 3357, doi:10.3390/jcm9103357.
- [147] Fiedor, P.; Ortyl, J. A New Approach to Micromachining: High-Precision and Innovative Additive Manufacturing Solutions Based on Photopolymerization Technology. *Materials* **2020**, *13*, 2951, doi:10.3390/ma13132951.
- [148] Park, S.-M.; Park, J.-M.; Kim, S.-K.; Heo, S.-J.; Koak, J.-Y. Flexural Strength of 3D-Printing Resin Materials for Provisional Fixed Dental Prostheses. *Materials* **2020**, *13*, 3970, doi:10.3390/ma13183970.
- [149] Im, C.-H.; Park, J.-M.; Kim, J.-H.; Kang, Y.-J.; Kim, J.-H. Assessment of Compatibility between Various Intraoral Scanners and 3D Printers through an Accuracy Analysis of 3D Printed Models. *Materials* **2020**, *13*, 4419, doi:10.3390/ma13194419.
- [150] Ph.D. Chemist Explains 3D Printer Resin. Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=ht4tbCiFxeM> (accessed on 15 December 2020).
- [151] Noura, H.; Salgado, J.-A.; El-Hayek, N.; Ducourtieux, S.; Delvallée, A.; Anwer, N. Setup of a high-precision profilometer and comparison of tactile and optical measurements of standards. *Meas. Sci. Technol.* **2014**, *25*, 044016, doi:10.1088/0957-0233/25/4/044016.
- [152] Bulgaru, M.; Bocăneţ, V.; Muntean, M. Research regarding tactile scanning versus optical scanning. *MATEC Web Conf.* **2019**, *299*, 04013, doi:10.1051/mateconf/201929904013.
- [153] ISO 2768-1:1989. *General Tolerances—Part 1; Tolerances for Linear and Angular Dimensions without Individual Tolerance Indications*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1989.
- [154] ISO 2768-2:1989. *General Tolerances—Part 2; Geometrical Tolerances for Features without Individual Tolerances Indications*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 1989.
- [155] ANYCUBIC Colored UV Resin 500 mL. Available online: <https://www.anycubic.com/products/copy-of-colored-uv-resin?variant=30151438204988> (accessed on 15 December 2020).
- [156] SDS Report, No.: CANEC 1916332501. 26 August 2019. Available online: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjLTS_OPvAhUi_rslHQ8OA3QQFjACegQIAhAD&url=https%3A%2F%2Fcdn.website-editor.net%2F77957cc2bab9412e863746d91116db70%2Ffiles%2Fuploaded%2FMDS.PDF&usq=AOvVaw0fc33oUzKPXGjZTydrq2lJ (accessed on 15 December 2020).

- [157] Hexagon Manufacturing Intelligence, Global Classic. Available online: <https://www.hexagonmi.com/en-US/products/coordinate-measuring-machines/bridge-cmms/global-classic> (accessed on 15 February 2021).
- [158] ALUFIX, Modular Fixturing Systems. Available online: <https://www.wittebarskamp.de/assets/downloads/Kataloge/Modulare-Spannsysteme/ALUFIX/ALUFIX-2019-E-Web1.pdf> (accessed on 16 February 2021).
- [159] ISO 10360. Geometrical Product Specifications (GPS)—Acceptance and Reverification Tests for Coordinate Measuring Systems (CMM). Available online: <https://www.hexagonmi.com/solutions/technical-resources/metrology-101/about-iso-10360-standards-for-cmms> (accessed on 16 February 2021).
- [160] Hexagon Manufacturing Intelligence, PC-DMIS. Available online: <https://www.hexagonmi.com/en-IN/products/software/pc-dmis> (accessed on 15 February 2021).
- [161] Upgraded Anycubic Photon S: 8x Anti-Aliasing, A Quick Test to Know the Best Exposure Time. Available online: <https://www.youtube.com/watch?v=5-Tvj0tVU4E> (accessed on 15 December 2020).
- [162] Anycubic Care. Available online: <https://www.anycubic.com/products/anycubic-photon-3d-printer> (accessed on 15 December 2020).
- [163] Photon Workshop. Available online: <https://www.anycubic.com/blogs/videos/photon-workshop> (accessed on 15 December 2020).
- [164] Minitab Statistical Software. Available online: <https://www.minitab.com/en-us/supports/minitab/minitab-17.3.1-update/> (accessed on 4 March 2021).
- [165] Borror, C.M. *The Certified Quality Engineer Handbook*, 3rd ed.; ASQ Quality Press: Milwaukee, MI, USA, 2009; pp. 459–490.