

# **METODE DE INTEGRARE A TEHNICII REVERSE ENGINEERING ÎN CONCEPȚIA, FABRICAȚIA ȘI CONTROLUL DIMENSIONAL AL PIESELOR INJECTATE DIN MATERIALE POLIMERICE**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul INGINERIE INDUSTRIALĂ  
de către

**ing. Cristian Cioană**

Conducător științific:  
Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Tudor Iclănzan  
Prof.univ.dr. Petru Berce  
Prof.univ.dr.ing. Octavian Bologna  
Conf.univ.dr.ing. Aurel Tulcan

Ziua susținerii tezei: 17.09.2012

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică |   |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2012

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Lucrarea de doctorat a fost elaborată în cadrul școlii doctorale de la Universitatea „Politehnica” din Timișoara, proiectul **POSDRU/88/1.5/S/50783, Proiect ID50783 (2009)**, co-finanțat de către Fondul Social European – Investește în Oameni, prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013. Activitatea de cercetare a fost efectuată în cadrul departamentului Ingineria Materialelor și Fabricației al Universității „Politehnica” din Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat Prof.dr.ing. Tudor Alexandru Iclănzan pentru îndrumarea, încrederea și încurajarea acordată în realizarea cercetărilor și elaborarea tezei. Aduc mulțumiri colegilor departamentului Ingineria Materialelor și Fabricației pentru sprijinul, sugestiile și materialele puse la dispoziție pe parcursul celor trei ani de activitate.

Timișoara, Septembrie 2012

ing. Cristian Cioană

Cioană Cristian

**Metode de integrare a tehnicii Reverse Engineering în concepția, fabricația și controlul dimensional al pieselor injectate din materiale polimerice**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 8, Nr. 46, Editura Politehnica, 2012, 124 pagini, 146 figuri, 12 tabele.

ISSN: 1842-8967

ISBN: 978-606-554-513-7

Cuvinte cheie: scanare, digitizare, control dimensional, Reverse Engineering, nor de puncte, CAD/CAM.

Rezumat,

Lucrarea de față se înscrie în cadrul cercetărilor care au ca scop îmbunătățirea etapelor de concepție, fabricație și control dimensional a produselor din materiale polimerice. Reducerea timpului destinat acestor faze poate fi posibilă prin integrarea tehnicii Reverse Engineering dar și a altor tehnologii de design și producție. Astfel, sunt reduse costurile aferente apariției produselor pe piață, obținându-se implicit o creștere a calității.

În contextul și problematica de mai sus, obiectivele asumate ale prezentei teze de doctorat au constat în analiza metodelor și tehnicilor moderne de obținere a modelului virtual pornind de la un obiect fizic, stabilirea incertitudinii de scanare/digitizare și integrarea mașinilor în procesul de control dimensional al pieselor din materiale polimerice. Datele obținute în cadrul capitolelor destinate cercetării, au fost folosite pentru a integra tehnicile RE/PV/CAI în etapa de concepție, fabricație și control dimensional al unui nou produs.

Aplicații ale tehnicilor RE/PV/RP/CAI se răspândesc din ce în ce în mai multe domenii industriale la nivel mondial. Aceste tehnici ajută la dezvoltarea rapidă a produselor cu formă complexă, reducând timpul de proiectare, producție și verificare a componentelor.

## CUPRINS

INTRODUCERE .....	7
1. CONSIDERAȚII ASUPRA TEHNICII REVERSE ENGINEERING .....	9
1.1. Introducere .....	9
1.1.1. Abordarea convențională .....	9
1.1.2. Abordarea neconvențională (Reverse Engineering) .....	13
1.2. Etapele tehnicii Reverse Engineering .....	18
1.2.1. Colectarea datelor .....	19
1.2.2. Procesarea datelor obținute (norului de puncte) .....	21
1.2.3. Adaptarea datelor pentru CAD .....	26
1.3. Utilizarea tehnicii RE .....	30
1.3.1. Reverse Engineering integrat în Prototiparea Rapidă .....	31
1.3.2. Reverse Engineering utilizat în procesul de proiectare .....	34
1.3.3. Rolul tehnicilor RE în inspectarea pieselor.....	36
1.4. Concluzii .....	38
2. OBIECTIVELE CERCETĂRII DOCTORALE ȘI PREZENTAREA PLATFORMEI OPERAȚIONALE .....	39
2.1. Definirea obiectivelor cercetării doctorale .....	39
2.2. Prezentarea platformei operaționale .....	40
3. CERCETĂRI PRIVIND METODE DE OBTINERE A MODELULUI VIRTUAL.....	46
3.1. Metoda Sketch based 3D modeling.....	46
3.1.1. Introducere .....	46
3.1.2. Studiu de caz.....	48
3.1.3. Cercetări privind acuratețea metodei .....	53
3.2. Dezvoltarea obiectelor virtuale folosind programe NC.....	58
3.2.1. Introducere .....	58
3.2.2. Metoda propusă .....	60
3.3. Concluzii .....	63
4. CERCETĂRI PRIVIND PERFORMANȚELE MAȘINILOR DE SCANAT/DIGITIZAT .....	64

4.1. Scanarea pe mașina Roland LPX-600.....	64
4.1.1. Cercetări privind performanțele de scanare pe mașina Roland LPX-600 .....	67
4.1.2. Cercetări privind scanarea detaliilor de formă .....	73
4.1.3. Cercetări privind obținerea unui model virtual printr-o .....	77
metodă hibridă .....	77
4.2. Cercetări privind precizia de captare a formei .....	82
4.2.1. Cercetări privind precizia dimensională a mesh-ului .....	83
4.2.2. Cercetări privind precizia dimensională a mașinilor de captare a formei .....	87
4.3. Integrarea mașinii Modela MDX-15 în procesul de control dimensional.....	93
4.4. Concluzii .....	98
5. REPROIECTAREA UNUI PRODUS ȘI VERIFICAREA PRECIZIEI DIMENSIONALE ..	100
5.1. Aplicarea tehnicii Reverse Engineering .....	102
5.2. Reproiectarea și simularea umplerii cavităților matriței.....	104
de injectare .....	104
5.3. Fabricarea matriței și injectarea pieselor .....	107
5.4. Controlul dimensional al pieselor injectate.....	109
5.5. Concluzii .....	114
6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	115
6.1. Concluzii .....	115
6.2. Contribuții personale.....	116
6.3. Direcții viitoare de cercetare .....	117
7. BIBLIOGRAFIE .....	118

## INTRODUCERE

Piața de desfacere este într-o continuă dezvoltare. Pentru a ține pasul cu trendul<sup>1</sup> actual producătorii trebuie să dezvolte produse cu complexitate ridicată, dar cu costuri reduse. Astfel, apar dificultăți în etapele de proiectare, testare, fabricație și controlul produselor dezvoltate. În ultimele două decenii, datorită unei evoluții uimitoare în domeniul tehnologiei informației (IT), au fost dezvoltate într-un ritm extrem de rapid tehnologii de design și producție. Dintre elementele de bază ce permit reducerea costurilor de aducere pe piață a unui produs pot fi menționate: Proiectarea asistată de calculator (Computer Aided Design – CAD), Ingineria asistată de calculator (Computer Aided Engineering – CAE), Fabricația asistată de calculator (Computer Aided Manufacturing – CAM) [Fischer, 1999], Prototipare rapidă (Rapid Prototyping – RP), Prototipare virtuală (Virtual Prototyping – VP) și Ingineria inversă (Reverse Engineering). Această grupă de tehnologii permite introducerea pe piață a unor produse tot mai apropiate de cerințele consumatorilor, reducând costurile de producție paralel cu îmbunătățirea permanentă a calității [Tamaș, 2008].

Teza, **Metode de integrare a tehnicii Reverse Engineering în concepția, fabricația și controlul dimensional al pieselor injectate din materiale polimerice**, este o lucrare cu caracter științific având la bază o tehnică apărută în anii '50, dar care a explodat în anii '90 și s-a extins cu succes în toate domeniile de activitate umană. Cercetările ce au fost realizate în cadrul acestei teze au ca punct de plecare studiile efectuate în cadrul lucrării de licență, care a cuprins o generalizare a tehnicii Reverse Engineering aplicată în domeniul *reproiectării* produselor. Tehnica Reverse Engineering (RE) este unul din instrumentele de lucru care permite optimizarea concepției și realizării produselor. Astfel, dezideratul unei producții flexibile cu cheltuieli minime, de calitate și oferită în termene cât mai scurte beneficiarilor devine tot mai mult o realitate palpabilă.

Teza debutează cu studiul bibliografic (**Capitolul 1**) realizat accesând site-urile unor reviste de prestigiu (Sciedirect, Springerlink, Proquest, s.a.), rezultând un capitol dedicat tehnicii Reverse Engineering. Cunoașterea teoretică a fost consolidată de studiul amănunțit al concepției și proceselor de fabricație care servesc la crearea produselor din materiale polimerice. Informațiile de natură teoretică ajută studiului și asimilării unor soluții tehnice cu potențial de implementare industrială, dar și integrării acestora în procesul controlului calității. Sunt prezentați și explicați termenii **Forward Engineering** și **Reverse Engineering**, punându-se accent pe rolul acestora în domeniul Ingineriei Industriale. A fost prezentată importanța și au fost detaliate etapele tehnicii Reverse Engineering, făcându-se trimitere la articole științifice relevante și de actualitate.

Cercetările teoretice au condus la formularea obiectivelor prezentei teze (**Capitolul 2**). Existența la Universitatea Politehnica din Timișoara a unei baze experimentale adecvate a făcut posibilă abordarea tehnicii Reverse Engineering și efectuarea unor serii de cercetări experimentale ce au dus la implementarea sa în procesul controlului calității produselor din materiale polimerice.

---

<sup>1</sup> Trend (*Anglicism*) - direcție principală de dezvoltare a unui fenomen, a unei evoluții pe termen lung; mișcare economică de lungă durată, situație, evoluție a pieței, a comerțului.

În **Capitolul 3** au fost cercetate și evaluate noi metode de introducere a formei unui obiect fizic într-un mediu virtual evitând folosirea metodelor prezentate în Capitolul 1. Au fost analizate și testate două metode ce nu implică cumpărarea unor echipamente relativ scumpe, dar necesită dezvoltarea abilităților de a lucra cu suprafețe nedefinite. Soft-urile pentru modelare 3D permit crearea și manipularea de obiecte geometrice extrem de sofisticate și au fost adoptate pe scară largă de către inginerii specialiști în industrie. Proiectarea asistată de calculator (*CAD - Computer Aided Design*) este în prezent din ce în ce mai utilizată în diverse domenii, aflându-se în plină evoluție.

Am dedicat un întreg capitol (**Capitolul 4**) studierii echipamentelor de captare a formei ce se află în dotarea Facultății de Mecanică din cadrul UPT. S-a urmărit aflarea preciziei de captare a formei în scopul integrării echipamentelor în procesul de control a calității dimensionale pentru piese injectate din materiale polimerice. A fost testată precizia mașinilor de captare a formei și abaterile dimensionale ce pot apărea în urma procesului de cosmetizare sau a procesului de îmbinare a mai multor scanări. S-a identificat incertitudinea volumetrică de scanare/digitizare. În urma studiului bibliografic realizat s-a găsit o nișă ce nu a fost complet epuizată de către comunitatea științifică. Ținând cont de datele obținute în acest capitol, mașinile au fost integrate în procesul controlului calității dimensionale.

**Capitolul 5** prezintă aplicarea tehnicilor RE/PV/CAI pentru a reduce timpul de proiectare, fabricație și control dimensional în dezvoltarea unui nou produs. Avantajul echipamentului de scanare este cel de a reduce timpul procesului de control dimensional pentru piesele injectate. La finalul testelor se poate lua decizia de lansare pe piață a noilor produse. Aplicații ale tehnicilor RE/PV/CAI se răspândesc din ce în ce în mai multe domenii industriale la nivel mondial. În multe situații piesele ce se doresc a fi modificate nu au model virtual sau o bază de date a producției pentru a identifica parametrii necesari la modificarea și refabricarea lor. Aceste tehnici ajută dezvoltarea rapidă a produselor cu formă complexă reducând timpul de proiectare și verificare a componentelor.

În final, teza sintetizează rezultatele obținute prezentând contribuțiile originale în domeniul studiat și perspectivele de cercetare care se întrevăd în viitorul apropiat.

Prezenta teză se adresează creării modelelor virtuale pornind de la obiecte existente prin folosirea tehnicii Reverse Engineering sau a altor metode de introducere a formei în mediul virtual. Propune aplicații în domeniului de control dimensional prin integrarea echipamentelor și soft-urilor specifice tehnicii RE în procesul de control al calității pieselor injectate din materiale polimerice.



# 1. CONSIDERAȚII ASUPRA TEHNICII REVERSE ENGINEERING

## 1.1. Introducere

În acest capitol se face o scurtă introducere în domeniul ingineriei și proiectării industriale, fiind prezentate tehnici și metode de proiectare. Sunt prezentați și explicați termenii **Forward Engineering** și **Reverse Engineering**. Punându-se accent pe cel din urmă, care prezintă un proces modern folosit în proiectarea/reproiectarea produselor. Va fi prezentată importanța și vor fi detaliate etapele tehnicii Reverse Engineering.

Pentru a înțelege mai bine funcția și definiția proiectării de produse trebuie mai întâi să definim domeniul din care face parte. Astfel, *proiectarea industrială* este (conform Societății de Proiectare Industrială din America) serviciul profesional pentru crearea și dezvoltarea conceptelor și specificațiilor care optimizează funcția, valoarea și esteticul produselor, pentru beneficiul reciproc atât al producătorului cât și al consumatorului. Proiectarea industrială este o formă a artei aplicată oriunde esteticul și funcționalitatea produselor pot fi îmbunătățite pentru a fi mai apoi fabricate. Rolul ei este de a crea soluții pentru probleme ingineresti, marketing, dezvoltare de brand sau chiar vânzări. Succesul proiectării este măsurat de profitul pe care îl aduce producătorului, dar și de serviciul și plăcerea pe care le oferă consumatorului.

Termenul de *proiectare industrială* îi aparține americanului Joseph Sinel, 1919. Inițial, proiectanții industriali se ocupau doar de produse specifice consumatorilor, dar cu timpul scopul profesional al acestora s-a lărgit incluzând bunuri de larg consum, cum ar fi mașini agricole, scule industriale, echipament de transport, ambalaje, etc. Acest domeniu larg include mai multe activități de proiectare, cum ar fi: proiectare de servicii, sisteme dar și de produse.

*Proiectarea unui produs* implică generarea, dezvoltarea și fabricarea unei idei într-un obiect fizic, implică crearea unor obiecte noi cumpărabile. Include atât partea estetică, dar și partea practică a produsului și are nevoie de un echilibru între știință și artă pentru a avea succes. Forma și funcționalitatea sunt esențiale pentru a avea succes comercial, iar prin *proiectare de produse* se poate înțelege procesul de transformare a ideilor în produse atrăgătoare din punct de vedere estetic. Forma, culoarea, percepția consumatorului, folosirea și confirmarea sunt câteva elemente cu care se lucrează în proiectarea unui produs. Inginerii proiectanți au aptitudinile necesare pentru a aduce produsele, de la forma de simplă idee —>pe piață unde vor fi comercializate. Cu excepția esteticului, proiectanții se ocupă și de aspecte tehnologice, funcționale, ergonomice și tehnologia materialelor din care sunt făcute produselor.

### 1.1.1. Abordarea convențională

Abordarea convențională a procesului de proiectare a unui produs este cunoscută sub numele de *Forward Engineering* și este procesul tradițional de dezvoltare a unei idei până la implementarea fizică a unui produs.

Fiecare problemă de proiectare necesită metode speciale, timp și anumite tehnici, dar există o rutină generală (fig.1.1) aplicată la toate. După ce proiectantul este informat de nevoile clientului, buget și echipamentul de care dispune, specialiștii din echipa de proiectare fac un studiu al produselor asemănătoare. Un plan de proiectare este făcut și desene preliminare ale produsului sunt apoi schițate pe baza planului întocmit. Schițele concludente sunt apoi alese pentru a fi îmbunătățite și studiate, iar apoi clientului i se prezintă studiul făcut, deseori sub formă de machetă. Clientul alege designul favorit, iar apoi proiectantul se ocupă de alegerea materialului și specificațiile de finisare și preparare ale ansamblului. Un prototip, sau mai nou un prototip digital, este creat și prezentat clientului pentru aprobare. În cazul unui automobil sunt făcute câteva prototipuri ce vor fi testate în diferite medii cu diferite tipuri de climă, iar abia după ce s-au adus modificări, iar echipa de proiectare este sigură de calitatea produsului, se trimite dosarul celorlalte secții de proiectare a căror slujbă va fi să proiecteze sculele și dispozitivele necesare aducerii produsului la viață.

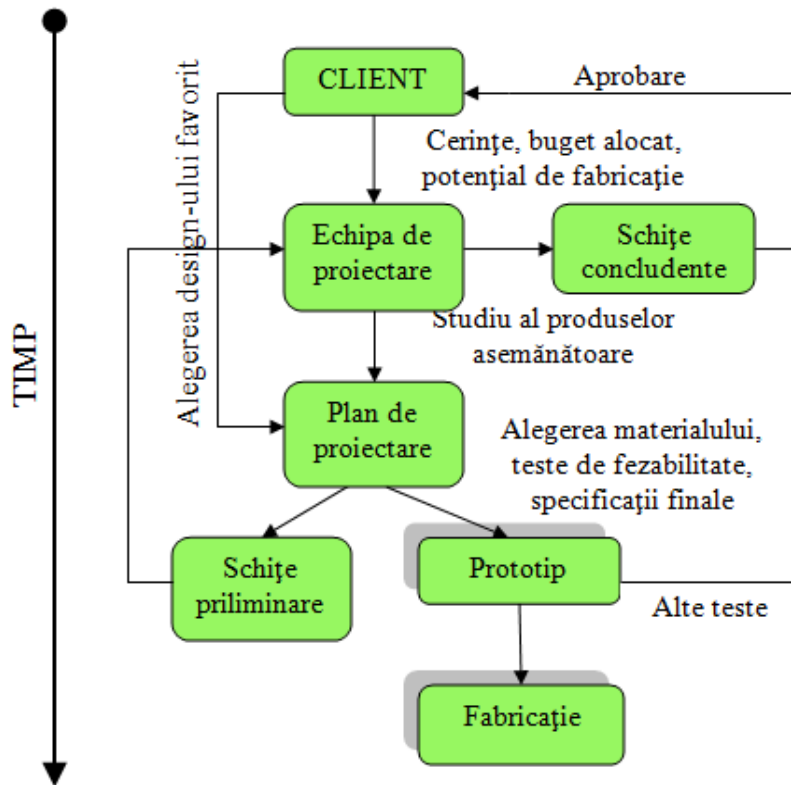


Fig. 1.1 Principalele etape de proiectare ale unui produs

Înainte de a începe proiectarea unui produs trebuie aleasă metodologia de lucru. Cele mai renumite sunt metodele **Bottom-Up** și **Top-Down**. Acești termeni au fost aplicați pentru prima dată în domeniul nanotehnologiei de către Foresight Nanotech Institute în 1989 cu scopul de a face distincții între fabricație moleculară (producerea în masă și automată a obiectelor cu precizie ridicată) și tehnologii de fabricație convenționale.

Metodele Bottom-Up și Top-Down sunt strategiile de prelucrare a informațiilor și de ordonare a cunoștințelor, care implică de cele mai multe ori folosirea unui soft, dar de asemenea și teorii științifice. În practică ele pot fi privite ca un stil de a gândi și de a preda. În multe cazuri *Top-Down* este folosit ca un sinonim de analiză sau de descompunere și de *Bottom-Up* de sinteză.

Abordare *Top-Down* este, în esență, un sistem de dezmembrare ce începe cu produsul finit pentru a obține cunoștințe asupra subsistemelor sale. Într-o astfel de abordare este formulată mai întâi o imagine de ansamblu a sistemului. Fiecare subsistem este apoi descris până la ultimul detaliu, uneori descompunându-l în mai multe niveluri suplimentare subsistemului până când întreg sistemul se reduce la elementele de bază.

Abordarea *Bottom-Up* este la fel ca jocurile Puzzle. Lipirea mai multor componente pentru crearea unor sisteme, făcând astfel ca sistemele inițiale să devină subsisteme într-un sistem superior și nou. Într-o astfel de abordare elementele individuale de bază ale sistemului sunt mai întâi specificate în detaliu. Aceste elemente sunt apoi legate împreună pentru a forma subsisteme mai complexe, care apoi la rândul lor sunt legate uneori în mai multe niveluri până se ajunge la un nivel superior de sistem.

În procesul de proiectare a unui produs, analiza și identificarea cerințelor, căutarea soluțiilor, analiza și decizia în alegerea soluțiilor optime sunt etape foarte importante, mai ales în fazele primare, când se stabilesc cerințele produsului (caracteristici tehnice, costuri, etc.). Întregul curs al dezvoltării produsului și principalele sale caracteristici sunt determinate de aceste cerințe. Activitățile de proiectare și dezvoltare, dar și costurile aferente schimbărilor de design se intensifică pe măsură ce proiectul avansează spre etapa finală, fiind mult mai mici în fazele de concepție când sunt luate deciziile pentru stabilirea soluției optime. Pentru a alege cele mai bune soluții din mai multe variante propuse, echipa de proiectare apelează la informații cât mai relevante privind produsul în ansamblul său și cerințele pieței.

Este foarte importantă o clasificare a sarcinilor la începutul proiectului, iar structurarea problemelor principale în activități, căutarea, analiza și combinarea soluțiilor într-un concept unitar sunt etape obligatorii în orice proces de proiectare al unui produs. Ca rezultat, inginerul proiectant elaborează o listă cu cerințele produsului, structura sa funcțională, soluțiile de principiu, diferite caracteristici tehnice pe care le combină în funcție de criteriile derivate din analiza produsului. Există o legătură directă între lucrul metodic în primele faze ale unui proiect, identificarea și refolosirea informațiilor obținute anterior. Această legătură necesită produse software speciale, care să preia informațiile, să le combine și să le structureze automat pentru a avea un acces facil la acestea.

Chiar și cel mai simplu produs este asociat cu o matrice complexă de factori, care determină activitatea de proiectare și, ca urmare, definirea produsului final rezistă dintr-o acumulare continuă de cunoștințe. Definirea produsului final este dependentă de organizarea departamentului, tipul și mijloacele de proiectare folosite, specializările inginerilor proiectanți, dar și de diferiți factori externi care nu pot fi întotdeauna controlați.

Proiectantul este cel care creează o imagine amplă asupra produsului, partea de creare propriu-zisă a produsului îi revine departamentelor de proiectare industrială și tehnologică. În procesul de lucru proiectantul se folosește de diverse tehnici de proiectare, care cu timpul au fost simplificate datorită apariției soft - urilor de proiectare.

Astfel, abordarea convențională a procesului de proiectare unui produs folosind soft-uri specifice activității de proiectare poate fi cea prezentată în fig.1.2.

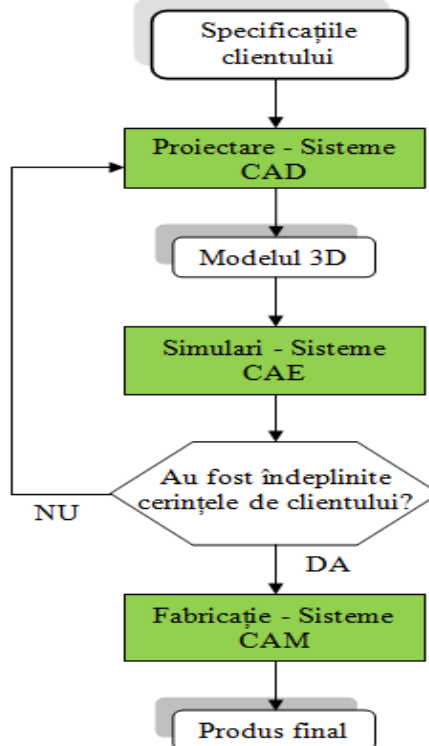


Fig. 1.2 Abordarea convențională a procesului de proiectare

Echipele de proiectare întâmpină o problemă complexă în crearea informațiilor, mai ales dacă se dorește ca acestea să poată fi refolosite. Problema este amplificată de diferențele între termeni, caracteristicile, tipurile, sursele, formele și cunoștințele legate de design. Informațiile necesare pentru un proiect trebuie adunate la nivelul oricărei etape și faze care se parcurg. Orice detaliu și informație legate de fiecare funcție a produsului sunt notate printr-o procedură în patru etape: cerințe, idei de soluții, conformitate cu cerințele și evaluarea soluțiilor.

Cerințele sunt identificate și colectate structurat pe baza principalelor caracteristici ale procesului sau baza testelor efectuate pe prototip. Scopul este de a structura aceste cerințe în grupuri logice și de a genera întrebări pentru procesul de analiză.

Primul pas în găsirea soluțiilor constă în a identifica funcțiile produsului, apoi de a căuta variante pentru fiecare funcție. Variantele de soluții trebuie analizate din punct de vedere al avantajelor și dezavantajelor, apoi se realizează o matrice cu aceste soluții pentru a avea o privire de ansamblu asupra proiectului și a observa legătura dintre funcții și soluțiile găsite.

Următorul pas este de a stabili dacă o soluție găsită este sau nu conformă cu cerințele. Uneori, dacă se schimbă cerințele, unele soluții găsite inacceptabile anterior pot deveni valide în noile condiții. După analiză, dacă soluțiile sunt viabile, acestea trec în faza de evaluare. Evaluarea se face pe baza criteriilor tehnico-economice.

Toate soluțiile viabile și deciziile sunt stocate în fișiere pentru a servi la realizarea proiectelor viitoare. Astfel, la începerea unui nou proiect se recomandă folosirea părților bune din proiectele anterioare pentru a scurta timpul de lucru și a crește calitatea proiectului.

### 1.1.2. Abordarea neconvențională (Reverse Engineering)

Noua tendință este utilizarea ingineriei în sens invers, metoda cunoscută sub numele de *Reverse Engineering* [Martins, 2005] (Ingineria Inversă). *Reverse Engineering* este contrariul a *Forward Engineering* (fig.1.3). Această metodă pornește de la produsul existent și crează un model virtual, pentru modificare sau reproducere aspectului/funcției/rolului unui produsului.

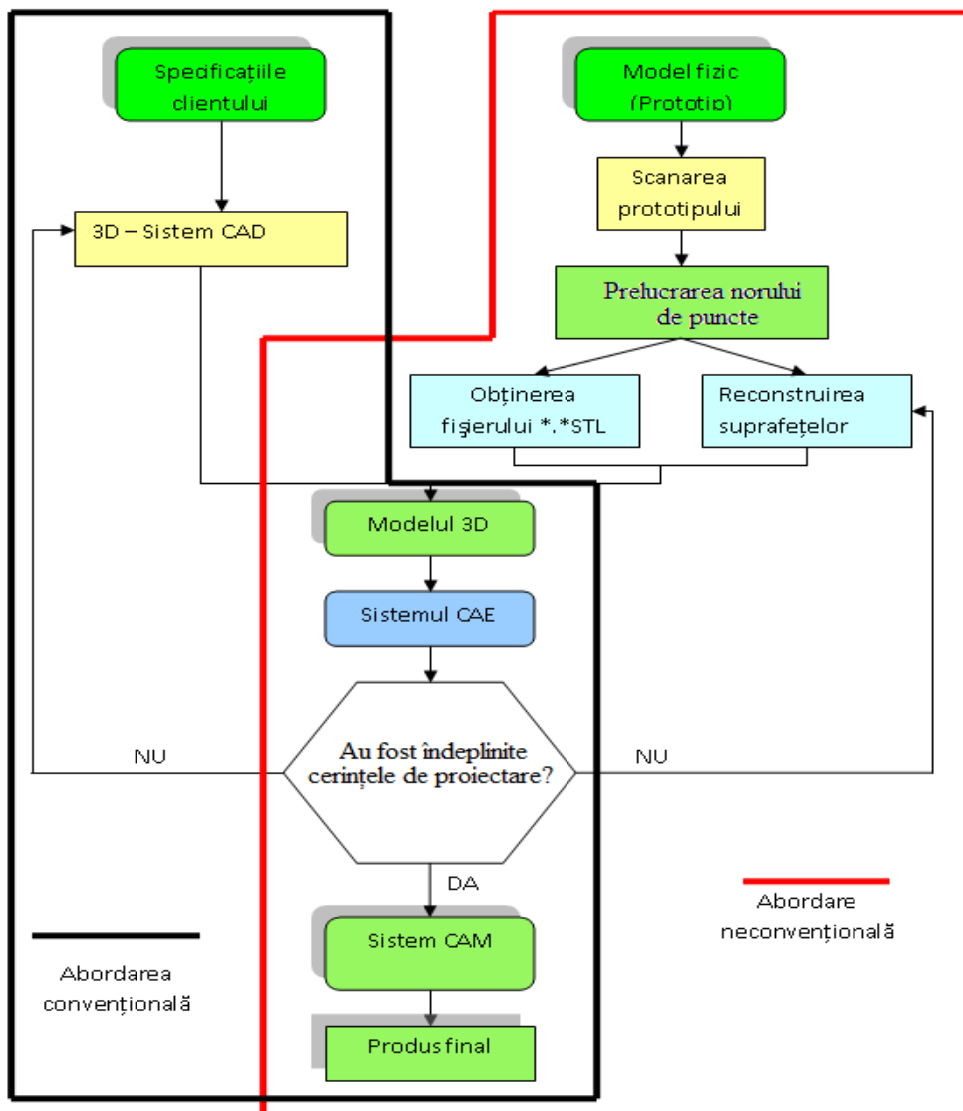


Fig. 1.3 Diferențe dintre cele două abordări de proiectare [Sokovic, 2006]

„Originea tehnicii Reverse Engineering provine din industria japoneză, care folosea acest proces pentru creșterea producției în condițiile unei concurențe mari a produselor, evitând astfel efortul întâmpinat la design-ul original. Folosit la început de toți cei care au pierdut proiectul de concepție originală, a devenit azi o știință inginerască.” [Cosma, 2008.a] Ingeria Inversă își are originea în analiza pieselor în scopul obținerii de avantaje comerciale și militare. Obiectivul este de a lua decizii de proiectare de la produse finite. Aceeași tehnică a început să fie cercetată pentru aplicații în domeniul sistemelor soft.

*Definiții:*

„Reverse Engineering ... broadly speaking, is the process of extracting know-how or knowledge from a human made artifact.” – sau tradus în română: Reverse Engineering ... în general, este procesul de extragere a cunoștințelor dintr-un artefact făcut de om [Samuelson, 2002].

O altă definiție mai completă și mai corectă: *Reverse Engineering* este procesul de analizare a unui sistem în vederea identificării componentelor sale precum și a interacțiunilor dintre acestea și crearea unei reprezentări a sistemului într-o altă formă sau la un nivel ridicat de abstractizare [Chikofsky, 1990].

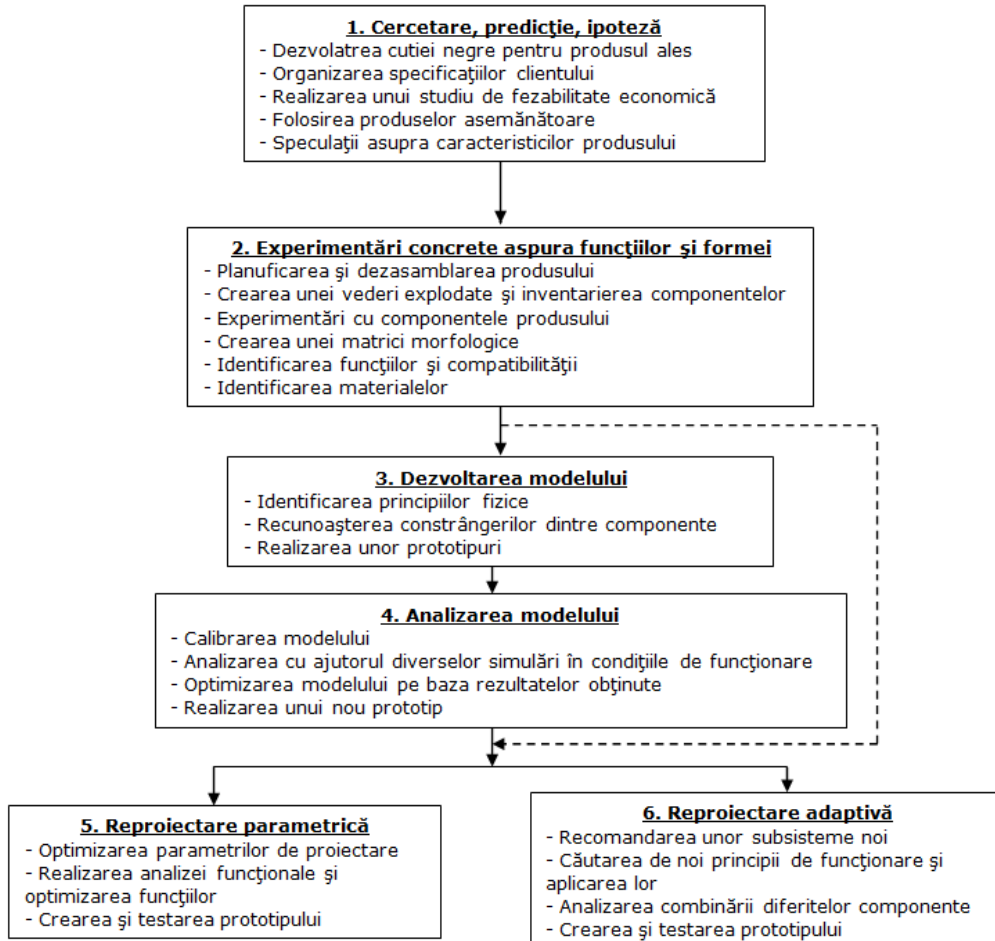


Fig. 1.4 Reverse Engineering ca proces de analiză și reproiectare [Otto, 1996]

*Reverse Engineering* este procesul de descoperire a principiilor de funcționare a unui dispozitiv sau sistem prin analiza structurii, funcției și operațiilor acestuia (fig.1.4). De obicei, ingineria inversă implică dezasamblarea sau descompunerea sistemului și analizarea în detaliu a funcționării sale, cu scopul de a realiza un nou sistem similar, care nu copiază nimic din cel original [Encarta, 2007].

*Reverse Engineering* este procesul de duplicare a unei piese sau al unui produs a cărei documentație tehnică lipsește [Venish, 2008].

*Reverse Engineering* mai este definit ca fiind procesul de obținere a unui model geometric CAD din puncte 3D achiziționate prin scanarea sau digitizarea obiectelor/produselor [Motavalli & Shamsaasef 1996].

*Reverse Engineering* este conceptul de realizarea a unei piese bazat pe un obiect fizic, fără folosirea documentației tehnice ale acestuia [Abella, 1994].

*Reverse Engineering* este procesul de obținere a unei noi piese prin digitizarea și modificarea modelului CAD [Yau, 1995].

Definiția procesului *Reverse Engineering* (fig.1.5) ce se potrivește cercetărilor prezentate în această teză constă în parcurgerea unor etape de la obținerea norului de puncte prin diferite metode de înregistrarea formei unui obiect fizic (măsurare 3D, scanare, digitizare, etc.), transformarea norului în mesh, reconstruirea și optimizarea mesh-ului, potrivirea suprafețelor poligonale, până la obținerea unui model virtual care poate fi folosit în diverse soft-uri CAD.

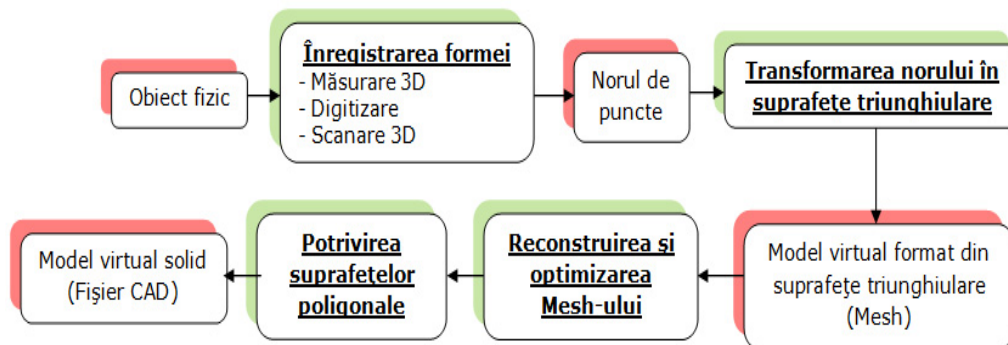


Fig. 1.5 Etapele tehnicii Reverse Engineering

„Succesul japonezilor în ceea ce privește noile produse a condus de la început la considerarea RE ca proces de design. Multe colegii americane au cursuri despre ingineria inversă bazate pe redesign [Choa, 2004] în loc de designul original. Procesul de redesign a fost inițiat prin observarea și testarea produsului. Ulterior, produsul a fost dezasamblat și fiecare componentă a fost analizată în funcție de forma sa, rolul funcțional, toleranțe de asamblare și proces de fabricație. În anii ce au urmat, europenii și americanii au realizat instrumente puternice care conduc astfel al reducerea ciclului de obținere a produselor. Soft-urile oferă noi semnificații tehnicii Reverse Engineering. Calculatoarele pot fi folosite acum pentru vizualizarea 3D a piesei, realizarea schimbărilor de formă și dimensiuni (*redesign*), testarea și simularea măsurării.” [Cosma, 2008.a]

*Soluția:* Realizarea unei mașini de măsurare tridimensională pentru palparea suprafeței care trebuie copiată, însoțită permanent de un software de prelucrare a informațiilor/ datelor.

Nevoia procesului Reverse Engineering în domeniul Ingineriei Industriale devine din ce în ce mai mare. Câteva motive pentru integrarea acestei tehnici sunt:

- Proiectanții din industria automobilelor sculptează modelele mașinilor din lut, le scanează/digitizează pentru a obține modelul CAD, ce va fi folosit pentru producerea pieselor finale;
- Piese de schimb sunt necesare, dar nu mai există modelul virtual sau orice tip de documentație, datorită vechimii pieselor;
- Modelul virtual nu mai seamănă cu piesa originală datorită modificărilor nedocumentate ce au fost aduse cu timpul direct în atelierul fabricii;
- Îmbunătățirea calităților unui produs supus utilizării pe termen lung [Cosma, 2008.a];
- Pentru a asimila metode competitive [Chaneski, 2005] de referință, pentru a înțelege produsele competitorilor și pentru a dezvolta produse mai bune [Cosma, 2008.a].

În general, întreprinderile au investit în CAD/CAM, prototipare rapidă și în noile tehnologii care aduc beneficii în afaceri. Reverse Engineering este considerată una din tehnologiile de vârf care aduce beneficii prin reducerea timpului ciclului de dezvoltare a produsului.

*Exemple de aplicare:* În **industria auto** atunci când o mașină nouă este lansată pe piață, fabricanții concurenți pot cumpăra un model, să-l dezmembreze pentru a afla cum a fost construit și cum funcționează.

Tot în industria auto, proiectanții își exprimă ideile formând un prototip din lut, ipsos, lemn, cauciuc, spumă, etc., dar un model virtual este necesar pentru a putea realiza partea tehnologică a proiectului.

*Caz concret:* Studiul realizat de studenții Universității Huddersfield [Ertu, 2006] demonstrează utilitatea tehnicii Reverse Engineering prin realizarea unui model din lut (fig.1.6), scanarea acestuia pentru obținerea modelului virtual și prezentarea acestuia într-un mod realist.

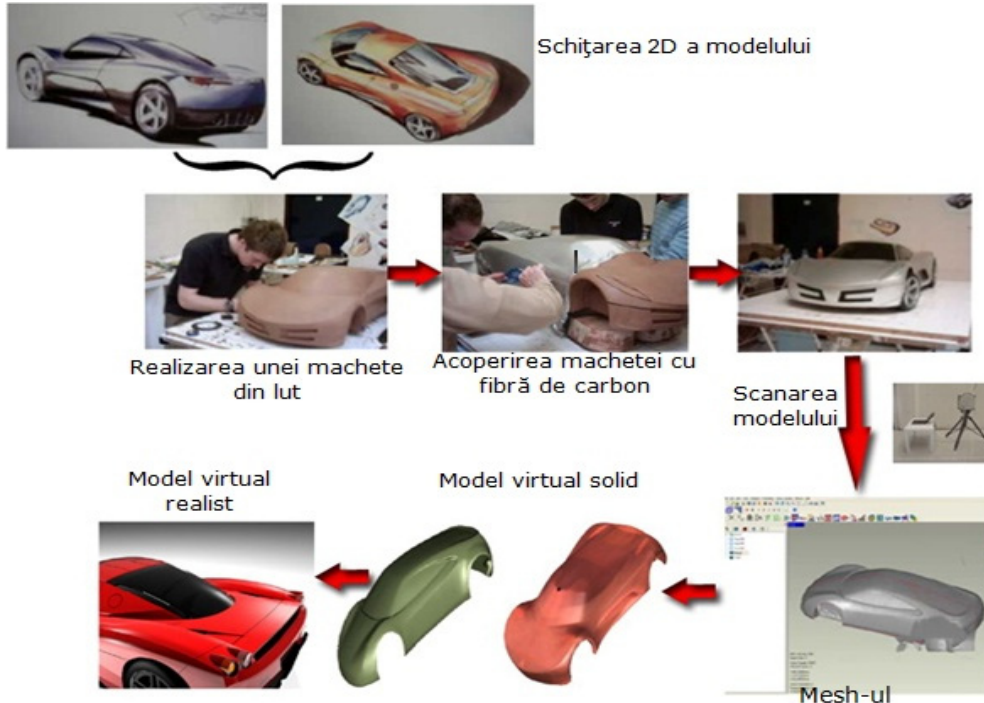


Fig. 1.6 Aplicarea tehnicii Reverse Engineering pe o machetă din lut [Ertu, 2006]



În **IT** codul sursă este adesea adesea o variantă îmbunătățită a unui alt cod.

În **ingineria medicală** tehnica Reverse Engineering ajută la îmbunătățirea traiului oamenilor cu dizabilități. Toți ne naștem cu forme diferite ale dinților ce nu pot fi reprezentate prin modele geometrice normale, cu ajutorul tehnicii Reverse Engineering dantura poate fi scanată pentru obținerea modelului virtual ce poate deveni o proteză ce corectează în timp alinierea incorectă a dinților.

*Caz concret:* Împreună cu câțiva colegi din departamentul **Ingineria Materialelor și Fabricației** [Răduță, et al. 2010] s-a scanat o coroană dentară și folosind analiză cu element finit (FEA) s-a supus modelul virtual unor solicitări pentru a verifica integritatea structurală (fig.1.7).

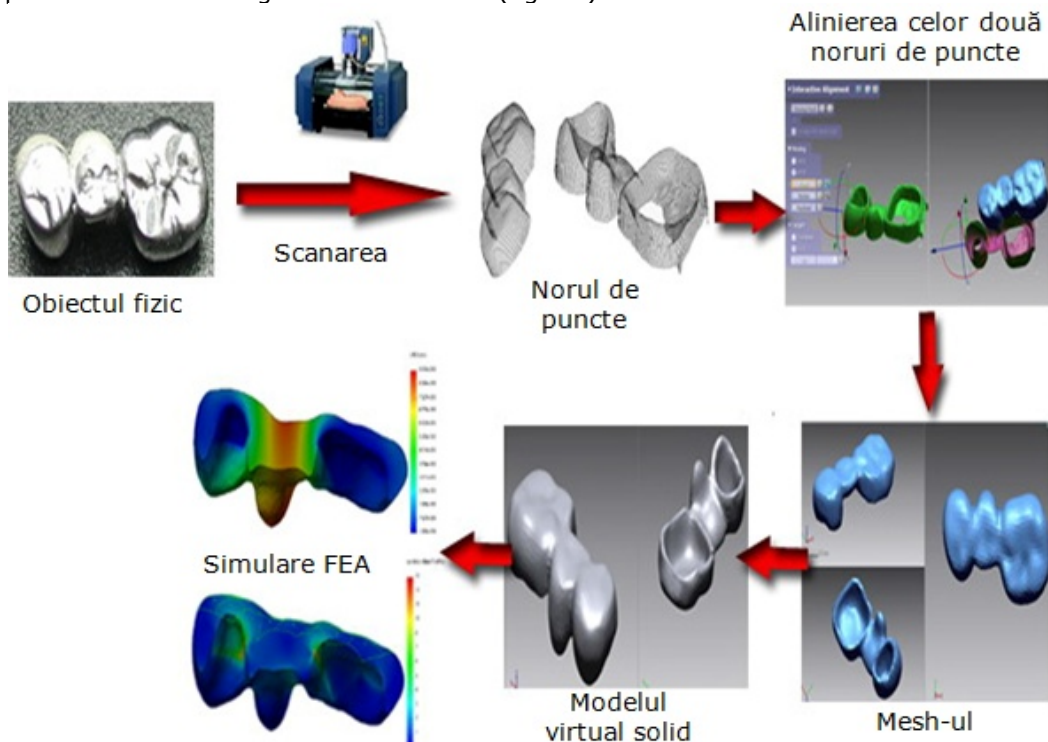


Fig. 1.7 Pașii parcurși pentru realizarea studiului de caz [Răduță, ș.a 2010]

În **industria aerospațială** tehnica Reverse Engineering este folosită pentru crearea bazelor de date virtuale pentru componente folosite în trecut la alte nave, pentru a rezolva sau corecta probleme sau discrepanțe dintre modelul CAD și piesa fabricată.

*Caz concret:* GOM Optical Measuring Techniques este o firmă din Germania care dezvoltă și produce echipamente optice de măsurare. Consiliul Național de Cercetare - Institutul de Cercetări Aerospațiale a cerut realizarea unui model virtual cât mai precis pentru avionul Falcon 20, modelul virtual servind diferitor simulări. Sistemele de scanat folosite au fost TRITOP Digital pentru a captura puncte de referință de pe avion, iar apoi folosind sistemul de scanat ATOS II și fișierul generat de TRITOP s-a obținut norul de puncte ce a fost transformat în mesh. Ambele sisteme necesită pregătirea avionului cu marcatori pentru a captura puncte X,Y și Z [GOM, 2008]. Procesul și rezultatele obținute sunt prezentate în fig.1.8.

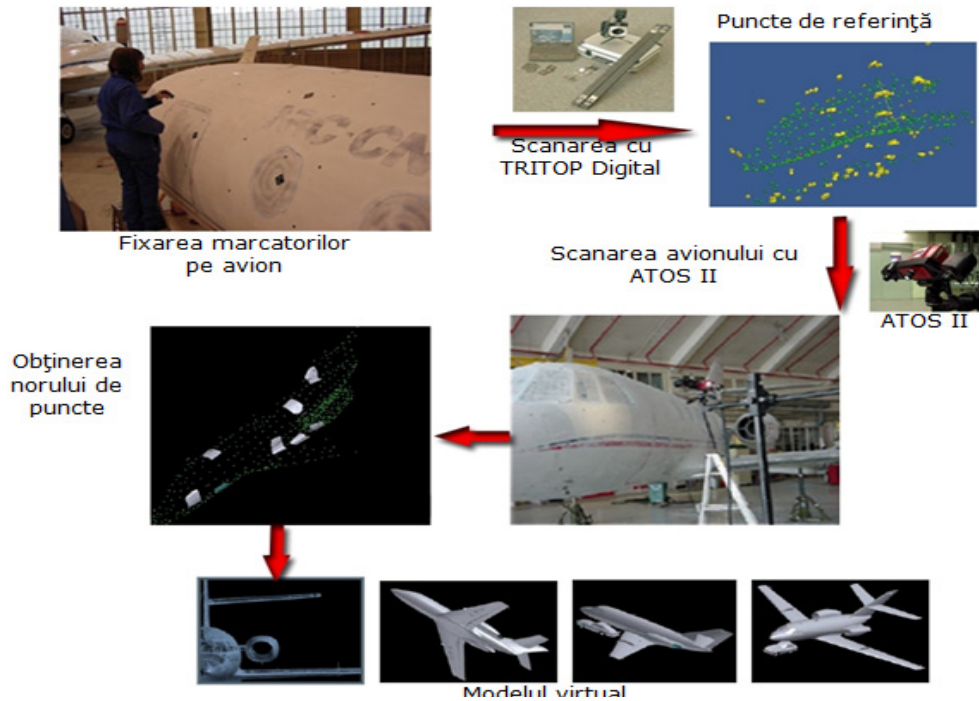


Fig. 1.8 Pașii parcurși pentru scanarea avionului Falcon 20 [GOM, 2008]

În momentul de față Reverse Engineering are o aplicabilitate în foarte multe domenii cum ar fi industria automobilelor, industria aeronautică, industria cinematografică, în medicină și multe altele, utilizându-se de altfel și în design-ul industrial, design-ul de bijuterii.

## 1.2. Etapele tehnicii Reverse Engineering

În industrie se utilizează tehnicile Reverse Engineering împreună cu tehnici de prototipare rapidă pentru abilitățile acestora de a produce prototipuri rapide și cu precizie ridicată. Cele mai multe procese RE pot fi folosite fără realizarea propriu-zisă a unui prototip. Scopul aplicării RE unui obiect este acela de a genera cu succes un model 3D care poate fi utilizat pentru modelarea unor piese. În urma aplicării RE se dorește generarea unui model 3D curat, neted, fără găuri sau suprafețe neregulate sau distorsionate. Pentru a obține un model cât mai clar avem nevoie de echipamente de achiziție cu un nivel ridicat de precizie, dar și de soft-uri speciale pentru prelucrarea datelor. O soluție este folosirea unei mașini de măsurat tridimensională pentru a palpa suprafața părții ce trebuie copiată. Datele digitale obținute pot fi apoi prelucrate prin soft - uri speciale. Cele mai multe companii au astăzi două componente de bază necesare pentru realizarea reverse engineering-ului: o mașină de măsurare tridimensională și softul pentru prelucrarea datelor.

Tehnica Reverse Engineering este împărțită în trei etape importante:

- **Prima etapă** implică folosirea unui echipament sau tehnică pentru *colectarea datelor* geometrice care formează obiectele. Datele sunt de obicei sub formă de puncte în planele XY, ZX și ZY, relativ cu sistemul local de coordonate;

- **A doua etapă** implică folosirea unui soft specializat în citirea și interpretarea datelor. Această etapă permite transformarea norului de puncte în suprafețe triunghiulare și permite optimizarea mesh-ului rezultat;
- **A treia etapă** constă în transformarea *mesh-ului* [Duruapt, 2008] prin potrivirea unor suprafețe poligonale ce vor forma *modelul virtual solid*.

În subcapitolele următoare vor fi explicate în detaliu cele trei etape ale procesului Reverse Engineering, definind termenii tehnici (*nor de puncte, mesh, suprafețe poligonale, model virtual solid*).

### 1.2.1. Colectarea datelor

Această etapă presupune caracterizarea obiectului, acumulând toate datele tehnice și constructive despre produs și felul de funcționare. O parte importantă a procesului Reverse Engineering este achiziția datelor. Detaliile modelului virtual, ce este rezultatul procesului Reverse Engineering, depind de sistemul de achiziție folosit.

Cel mai simplu proces de reverse engineering este măsurarea manuală a dimensiunilor unui model fizic. În acest proces instrumente manuale precum micrometrele și șublerile sunt folosite pentru înregistrarea dimensiunilor critice necesare pentru generarea desenului de execuție al unei piese.

O abordare mai sofisticată este de a folosi un palpator [Vosniakos, 2003] și o mașină de măsurat în coordonate manuală. Operatorul mașinii de măsurare în coordonate (MMC) menține contactul dintre palpator și suprafață, aceasta fiind înregistrată prin cât mai multe puncte. Cea mai eficientă tehnică de Reverse Engineering minimizează erorile de măsurare prin adunarea și procesarea datelor electronic. Într-un asemenea proces un model fizic este măsurat și dimensiunile sunt imediat procesate și colectate într-o bază de date.

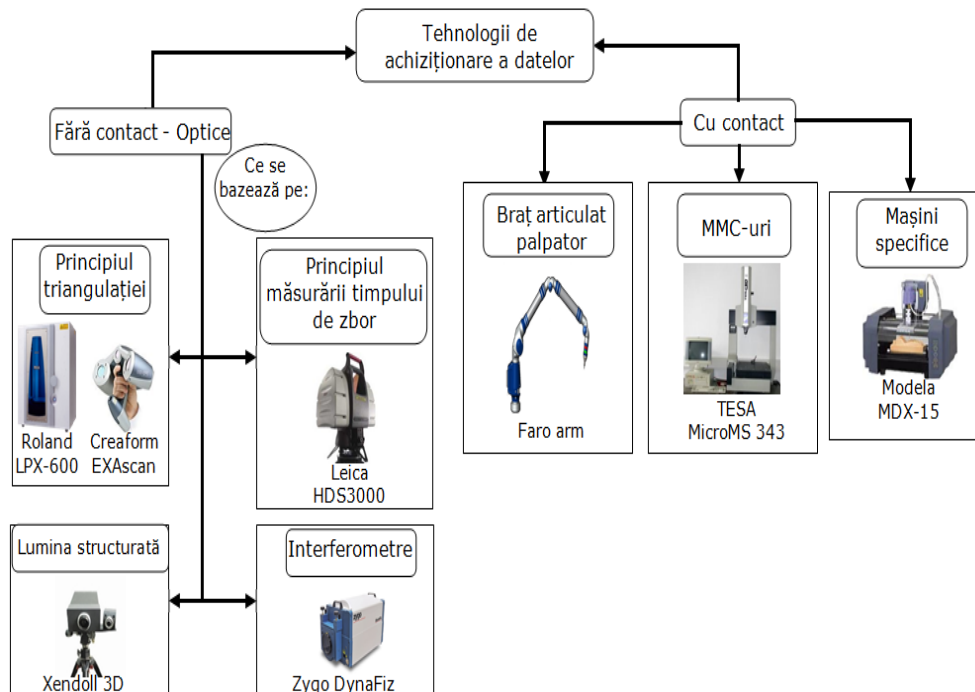


Fig. 1.9 Tehnologii de achiziționare a datelor: cu contact și fără contact [Ngozi, 2005]

O dată cu dezvoltările tehnologice au apărut echipamente speciale care pot fi adaptate pentru achiziția datelor. Studiind literatura de specialitate și ofertele firmelor de profil s-a realizat o clasificare a sistemelor de achiziție prezentată în fig.1.9. În această clasificare nu s-au evidențiat intenționat metodele de achiziție care se bazează pe rezonanță magnetică și acustică, deoarece nu am avut ocazia de a lucra cu astfel de echipamente.

Companiile caută echipamente de achiziție ca un potențial instrument de creștere a productivității și pentru rezolvarea unor chestiuni în legătură cu nevoia de a crea un model virtual. Reverse Engineering este o tehnică care se bazează pe crearea de modele virtuale pornind de la produse existente, este utilizată pentru a îmbunătăți sau reproduce aspectul/funcția/rolul piesei originale. Timp de mulți ani au fost folosite dispozitive de achiziție de contact din cauza capacității lor de a colecta date cu mare precizie, dar aceste dispozitive sunt lente în timpul procesului de achiziție și constrânse în digitizarea obiectelor de dimensiuni mici. Datorită dezvoltării industriei IT și îmbunătățirilor din domeniul tehnologiei laser în ultimii ani au apărut dispozitive și mașini de scanat care au un timp scurt de achiziție a datelor și sunt capabile de a scana o mare varietate de obiecte indiferent de mărime, formă sau material. Firmele caută echipamente care să reducă timpul de achiziție dar și care să aibă o acuratețe bună (fig.1.10). O altă utilizare a echipamentelor de achiziție a datelor este inspecția periodică a unor piese pentru a analiza cât de apropiat este produsul față de original. Aceasta îngăduie un control al calității îmbunătățit și ajută la detectarea greșelilor din procesul de fabricație.

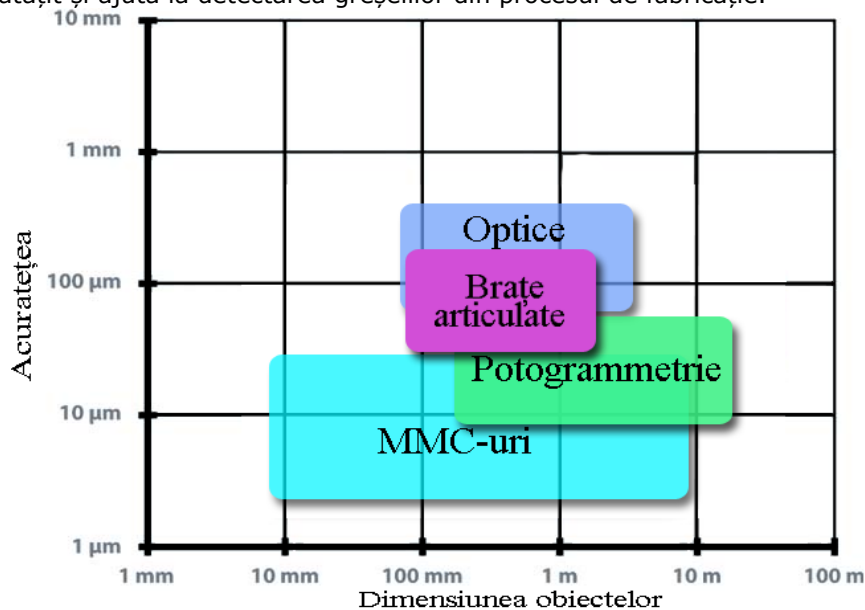


Fig. 1.10 Acuratețea echipamentelor de scanat [Sniderman, 2011]

În literatura de specialitate se întâlnesc doi termeni ce descriu același proces, dar sunt totuși diferiți: *digitizare* și *scanare*. Termenii se referă la procesul de acumulare de puncte ce definesc suprafața unui obiect, dar se realizează cu tehnologii diferite. Astfel, termenul de **digitizare** se referă la procesul de colectare datelor folosind tehnologii *cu contact* (fig.1.9). Termenul de **scanare** este folosit atunci când pentru colectarea datelor se folosesc tehnologii *fără contact* (fig.1.9).

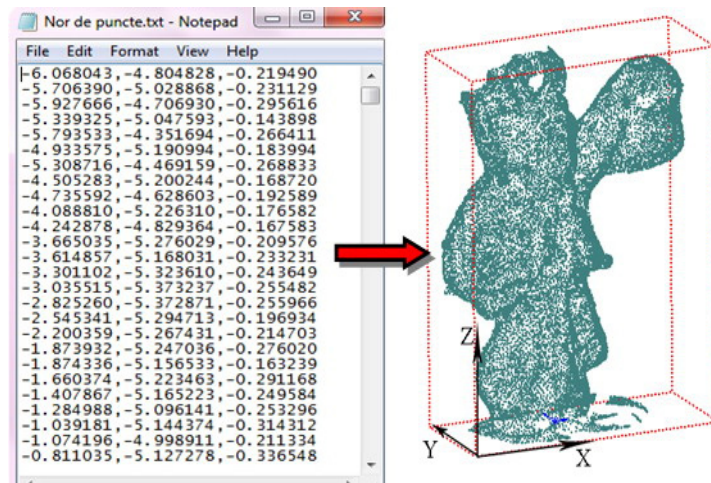


Fig. 1.11 Norul de puncte

Datele generate în urma acestei etape sunt puncte virtuale în planele XY, ZX și ZY ale obiectului scanat/digitizat, relative cu un sistemul local de coordonate. Punctele virtuale achiziționate sunt grupate și formează *norul de puncte* (fig.1.11). Punctele sunt stocate în fișiere .txt, fiecare rând conținând coordonatele pe X,Y,Z. Fișierele pot ocupa de la câțiva Mb până la câteva sute de Mb, acest lucru depinde de mărimea și complexitatea obiectului.

Uneori aceste puncte sunt menționate ca „*noduri*” în literatura de specialitate, – atunci când urmează să fie folosite în colțurile unei rețele poligonale. De obicei norii de puncte nu sunt folosiți în mod direct în aplicații, aceștia fiind convertiți în suprafețe triunghiulare sau poligonale, dar permit colorarea (eng.: *render*) pentru a reprezenta o imagine cât mai realistă a obiectului scanat.

### 1.2.2. Procesarea datelor obținute (norului de puncte)

În urma etapei de colectare a datelor obținem fișierul \*.txt cu care nu putem face prea multe, astfel avem nevoie de programe specifice procesului Reverse Engineering: Rapidform, Geomagic, 3Dresaper, Rhino, Meshlab, etc.. Aceste programe permit manipularea norului de puncte și transformarea acestuia în suprafețe poligonale sau triunghiulare.

În această etapă ne confruntăm cu două faze:

- procesarea norului de puncte,
- crearea Mesh-ului și optimizarea acestuia.

#### A) Procesarea norului de puncte

Programele menționate sunt folosite pentru a procesa și optimiza norul de puncte, ele permit reducerea **zgomotului** în datele colectate precum și reducerea numărului de puncte.

Este numit *zgomot* (fig.1.12) o variație aleatorie de particule nedorite ce sunt produse de senzorul digital. *Zgomotul* este nedorit deoarece pot apărea suprafețe ce reduc acuratețea modelului virtual. *Zgomotul* este omniprezent în datele scanate/digitizate. Pentru a elimina zgomotul au fost dezvoltați numeroși algoritmi. În evaluarea eficacității acestor algoritmi au fost realizate comparații atât vizuale și cât și numerice [Sun, 2008].

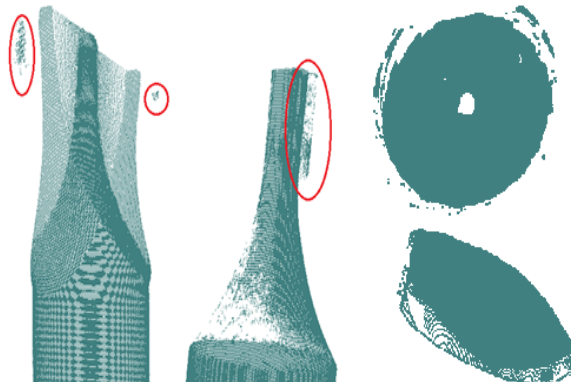


Fig. 1.12 Zgomotul apărut în urma scanării

*Funcția de reducere a zgomotului* înlătură erorile de scanare prin mutarea cu ajutorul algoritmilor statistici în locațiile corecte. Zgomotul poate realiza muchiile ascuțite sau rotunjite ca fiind teșite.

*Funcția de reducere a numărului de puncte* [Lee, 2001] este realizată folosind o gama de filtre predefinite. Filtrele utilizate creează un nor de puncte bine structurat și ușor de manevrat. Există trei filtre de reducere a numărului de puncte: după *zonele curbate*, *aleatoriu* și *uniform*. Funcția de reducere pe *zone curbate* elimină mai puține puncte pe acestea decât pe alte suprafețe pentru a menține precizia pe curbură. Reducerea punctelor într-un mod *aleatoriu* se face pe o anumită regiune sau pe întreg norul de puncte și este bazată pe un procentaj din totalul punctelor care trebuie să fie reduce. Reducerea *uniformă* a punctelor împarte spațiul modelului în celule egale de dimensiunea unui cub și șterge toate punctele dintr-o celulă în afară de unul. [Venish, 2008].

În cazul pieselor complexe sau a căror gabarit depășește masa mașinii de scanat este necesară realizarea unor scanări multiple. Aceasta fază permite îmbinarea mai multor seturi de date scanate prin alinierea lor în aceeași origine. În urma fazei de procesare a norului de puncte acesta va fi curat iar datele sunt îmbinate. Astfel, în urma fazei de transformare în suprafețe triunghiulare, vor fi distorsiuni minime de la forma reală.

### B) Crearea Mesh-ului și optimizarea acestuia

Odată ce norul de puncte a fost optimizat, următoarea fază va fi de a crea o conexiune între puncte. Acest lucru este realizat prin asocierea de poligoane cu punctele obținute. Acest proces se bazează pe algoritmi care, în funcție de eficiența lor, vor crea un **Mesh** fără goluri, cu o topologie poligonală corectă și fără anomalii.

Este numit *Mesh* structura obținută din norul de puncte prin discretizare. Modelul poligonal obținut reprezintă o rețea de noduri și elemente și este reprezentat ca o *coajă*. Există mai mulți algoritmi dezvoltați pentru conversia unui nor de puncte în Mesh dar vor fi amintiți doar doi care redau o suprafața cât mai exactă în comparație cu obiectul scanat.

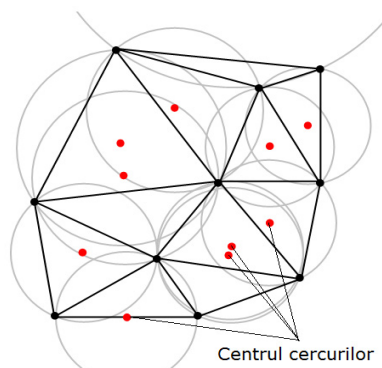


Fig. 1.13 Triangulația Delaunay

1. Algoritm dezvoltat în 1934 de *Boris Delaunay* arată că o *triangulație* pentru un set de puncte  $P$  într-un plan este o triangulație  $DT(P)$  astfel încât nici un punct din  $P$  nu se află în interiorul circumscris de orice triunghi în  $DT(P)$  (fig.1.13). Triangulația Delaunay maximizează unghiul minim al unghiurilor ce formează un triunghi, evitând astfel unghiurile ascuțite.

2. Algoritm *Ball-Pivoting (Sferă pivotantă)*: trei puncte formează un triunghi în cazul în care o sferă de o rază specificată  $R$  le atinge fără să conțină nici un alt punct. Începând cu un triunghi, sfera pivotază în jurul unei muchii (adică se învârtă în jurul muchiei păstrând în același timp contactul cu capetele muchiei) până când aceasta atinge un alt punct, formând un alt triunghi. Procesul continuă până când toate muchiile accesibile s-au încercat și apoi se pornește de la un alt triunghi, până când toate punctele au fost luate în considerare.

În fig.1.14.a este prezentat algoritmul *Ball-Pivoting* în 2D, un cerc de rază  $R$  pivotază de la punct la punct conectându-le prin muchii. În fig.1.14.b densitatea punctelor este scăzută, astfel unele muchii nu vor fi create rezultând găuri. Atunci când raza de curbură a unei depresiuni este mai mare de  $1/R$  (fig.1.14.c), unele puncte nu vor fi atinse de sfera pivotantă rezultând pierderea unor detalii [Bernadini, et al.1999].

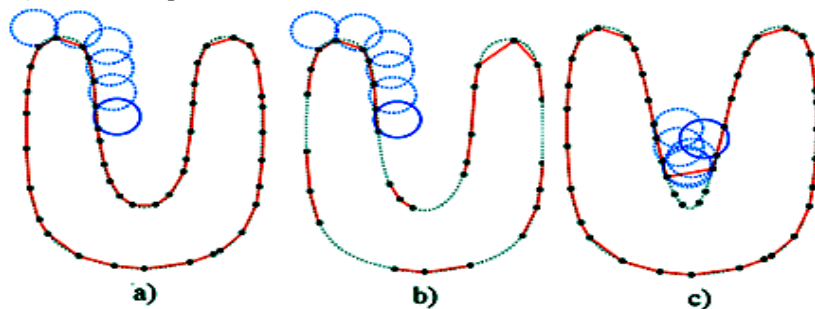


Fig. 1.14 Algoritmul *Ball-Pivoting* în 2D [Bernadini, et al.1999], [Hammerquist, 2003]

În urma generării mesh-ului acesta poate avea o topologie poligonală incorectă, cu suprafețe numite „anomalii” și găuri. Pentru a îmbunătăți calitatea modelului poligonal se folosesc o serie de filtre care sunt comune în majoritatea programelor specifice, dar au la bază algoritmi matematici diferiți. Cele mai întâlnite filtre sunt: reducerea zgomotului, repararea muchiilor, curățarea mesh-ului, eliminarea suprafețelor „anomalii”, decimarea mesh-ului, umplerea găurilor. Aceste filtre sunt disponibile în toate programele de RE amintite mai sus.

**1. Filtul de eliminare a zgomotului** – funcționează pe același concept ca și în cazul fazei de optimizare a norului de puncte, dar zgomotul ce nu a fost îndepărtat în acea fază este acum prezent în modelul poligonal (fig.1.15) și trebuie îndepărtat. Filtul reduce zgomotul respectând curbura suprafețelor și îmbunătățește calitatea muchiilor sau unghiurilor ascuțite. Filtul folosește statistici de măsurare a distanței pentru a calcula deviația punctelor de la poziția originală. Sunt înlăturate suprafețele ce se intersectează una cu alta sau sunt în exces.



Fig. 1.15 Zgomot în modelul poligonal [Rapidform, 2007]

**2. Filtrul de relaxare a modelului poligonal** - mută nodurile din rețeaua poligonală pentru a reduce rugozitatea mesh-ului. Acesta poate fi aplicat la întreg mesh-ul sau doar pe regiunea selectată. Filtrul înlătură adânciturile, relaxează secțiunile cilindrice/conice și muchiile ascuțite, dar și realizează un mesh relaxat (fig.1.16).

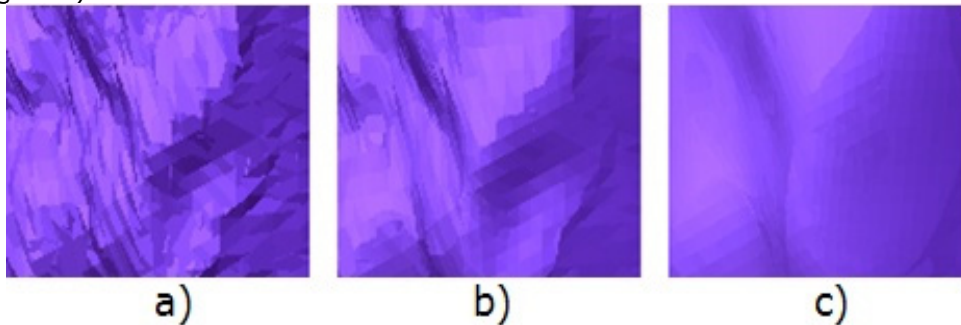


Fig. 1.16 Diferite grade de relaxare a mesh-ului [Rapidform, 2007]  
a - relaxare minimă, b - relaxare medie, c - relaxare maximă

**3. Filtrul de reducere/creștere a numărului de triunghiuri** ce compun modelul poligonal - operația reduce sau mărește numărul de triunghiuri fără a compromite integritatea modelului. *Reducerea* triunghiurilor se face prin unirea mai multor triunghiuri într-unul mai mare. Se realizează indicând numărul de triunghiuri care dorește a fi atins sau prin reducerea procentuală a numărului de triunghiuri (fig.1.17).

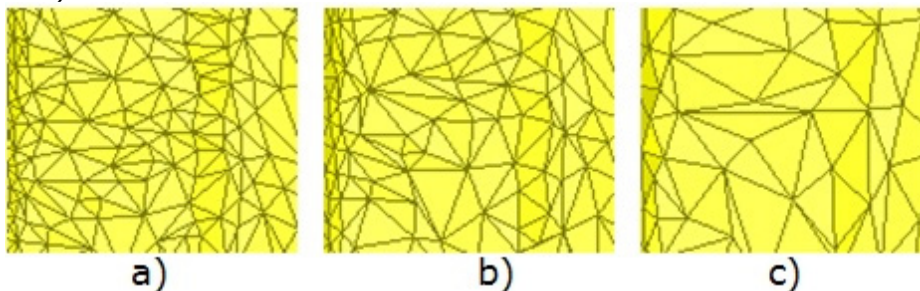


Fig. 1.17 Reducerea procentuală a mesh-ului [Rapidform, 2007]  
a - mesh-ul original, b - reducere cu 30%, c - reducere cu 70%

Reducerea triunghiurilor se realizează cu scopul de a ușura manipularea modelului poligonal dar și pentru micșorarea mărimei fișierului. Se utilizează atunci când se dorește modificarea mesh-ului. *Creșterea* numărului de triunghiuri este operația opusă celei de reducere, adică divide un triunghi în 4 sau 3 triunghiuri. Rezultatul este îmbunătățirea calității pe zonele de curbură și creșterea gradului detaliilor, rezultând totodată creșterea fișierului. Se utilizează atunci când modelul trece direct în faza de prototipare rapidă.

**4. Filtrul de umplere a golurilor** - acționează asupra golurilor formate datorită erorilor de scanare sau celor apărute în urma convertirii norului de puncte în mesh. O rețea poligonală este folosită pentru a umple găurile. Atât noua rețea, cât și regiunea din jurul ei sunt relaxate, astfel încât aspectul poligonal este organizat și continuu (fig.1.18).



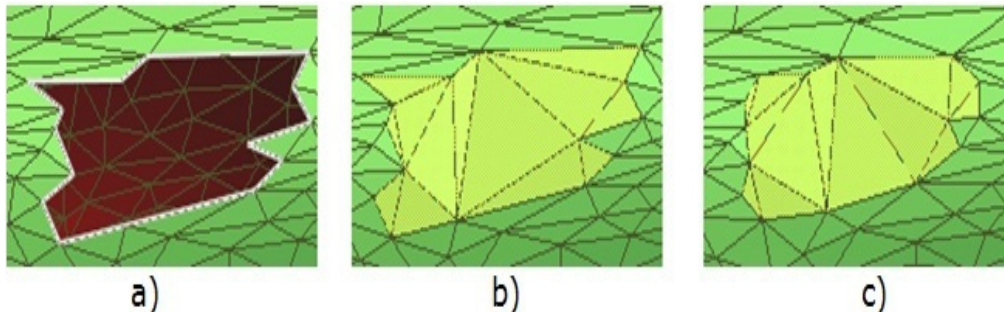


Fig. 1.18 Umplerea găurilor din modelul poligonal [Rapidform, 2007]  
 a – gaura din modelul poligonal, b – umplerea găurii folosind o rețea poligonală,  
 c – relaxarea rețelei poligonale

**5. Filtrul de editare a muchiiilor** – este necesar atunci când se lucrează cu modele poligonale deschise. Se folosește pentru repararea muchiiilor modelului, acestea sunt înregistrate și sunt create triunghiuri ce vor forma noi muchii mai apropiate de realitatea obiectului fizic (fig.1.19).

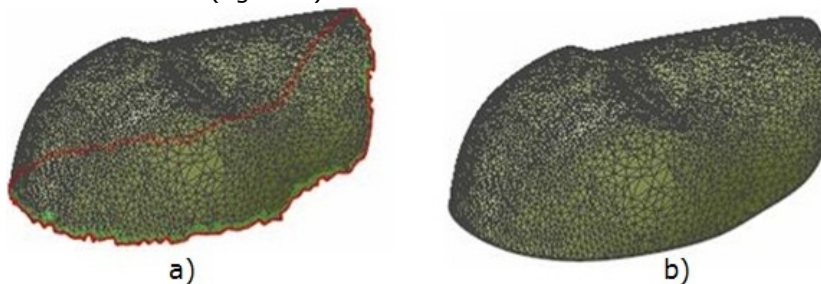


Fig. 1.19 Filtrul de editare a muchiiilor [Rapidform, 2007]  
 a – modelul poligonal inițial, b – modelul poligonal după aplicarea filtrului

Filtrele aplicate creează deviații dimensionale între norul de puncte și modelul poligonal. Pentru a vedea dacă deviația se încadrează în limitele de toleranță programele specifice Reverse Engineering-ului permit compararea norului cu mesh-ul.

**6. Funcția de evaluare a deviației** permite introducerea câmpului de toleranță și redă în formă gradată abaterile dimensionale dintre mesh și norul de puncte (fig.1.20).

După ce s-a realizat optimizarea mesh-ului și se dorește *prototiparea rapidă* a modelului acesta poate fi exportat într-un fișier specific tehnologiei, **\*.STL**. Fișierul cu extensia **\*.STL** [Chen, 2009] este unul nativ creat de firma 3D Systems destinat soft-urilor adiacente procesului de stereolitografie. Fișierele descriu geometria suprafeței unui obiect tridimensional, fără a reprezenta textura sau culoare acestuia.

În esență, o reprezentare **\*.STL** este o aproximare a unui model geometric printr-o colecție de triunghiuri. Cu alte cuvinte, frontierele modelului sunt „pavate”

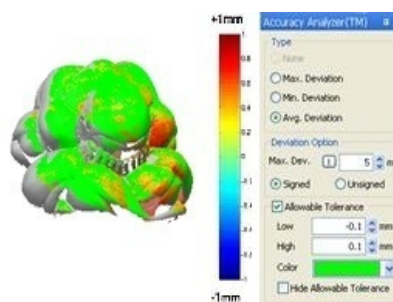


Fig. 1.20 Rezultatele evaluării deviației [Rapidform, 2007]

(peticite) cu suprafețe triunghiulare. Fișierele \*.STL sunt de două feluri: fișiere de tip binar (mărimea în octeți a unui fișier \*.STL binar trebuie să se termine în 84 sau 34 ca acesta să fie valid) și fișier ASCII (American Standard Code for Information Interchange) [Brătian, 2008].

Dacă se dorește *modificarea modelului în soft-uri CAD* atunci va fi necesară efectuarea următoarei etape.

### 1.2.3. Adaptarea datelor pentru CAD

Pentru a crea un model solid din modelul poligonal este mai întâi necesară crearea unei suprafețe care să aproximeze mesh-ul. Pentru reprezentarea corectă a acestei *suprafețe de tranziție mesh->solid* nu sunt suficiente reprezentările parametrice ale curbelor prin entitățile lini, arc de cerc sau conice. În aceste cazuri se folosesc *curbe sintetice* care sunt de fapt reprezentări aproximative ale unor curbe de „sinteză” care se sprijină pe anumite puncte de control sau pe un cadru, sau trec prin anumite puncte sau în vecinătatea lor, controlându-se panta curbei pe punctele extreme. Pentru reprezentările 3D se folosesc suprafețe care sunt descrise prin astfel de curbe. Din punct de vedere matematic o curbă sintetică reprezintă o problemă de „potrivire” a unei suprafețe curbe continue și netede care să treacă prin puncte de sprijin date sau în cazul unei curbe complexe să se sprijine pe un lanț de segmente [Seiculescu, 2007].

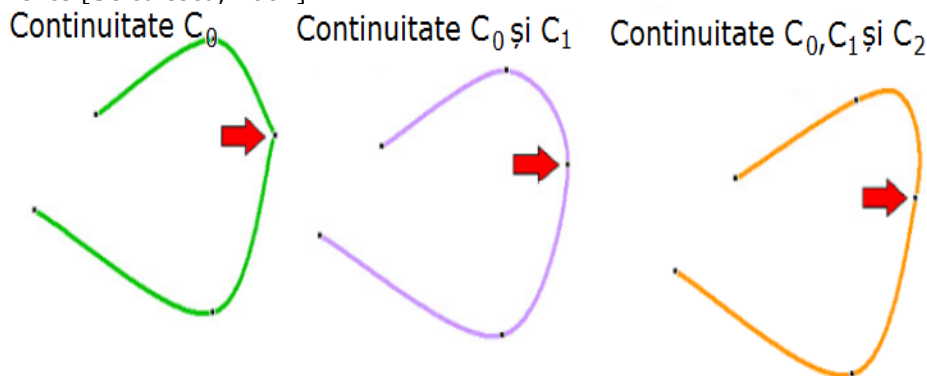


Fig. 1.21 Gradele de continuitate ale curbelor sintetice [Seiculescu, 2007]

Problema continuității acestor curbe (fig.1.21) se pune atunci când curba complexă formează un lanț cap la cap de curbe sintetice. Astfel, gradul de continuitate „zero” ( $C_0$ ) leagă numai curbele (tangentele în punctul de continuitate sunt diferite, respectiv centrele de curbură au poziții neconfundate pentru raze de curbură diferite). Gradul „unu” de continuitate ( $C_1$ ), leagă curbele având aceeași pantă (tangentă comună) pentru curburi diferite, respectiv gradul „trei” ( $C_3$ ) asigură continuitatea pantei și a curburii [Seiculescu, 2007].

Entitățile sintetice cunoscute sunt: *curbe spline*, *curbe Bézier*, *curbe B-spline* (*NURBS – Nonuniform Rational B-spline*).

**Curbele spline** – sunt curbe de interpolare prin punctele de control care respectă condiția de continuitate și curbură. Controlul formei fiind făcut prin punctele de control și schimbarea unghiului de tangentă, le face dificil de manevrat pentru crearea așa ziselor suprafețe libere (Freeform). Condiția asigurării continuității și curburii în punctele intermediare pentru primele două segmente, din mulțimea punctelor  $P_0, P_1, \dots, P_{n-1}$  și vectorii de tangentă  $P'_0$  și  $P'_{n-1}$  (fig.1.22), [Seiculescu, 2007] este:

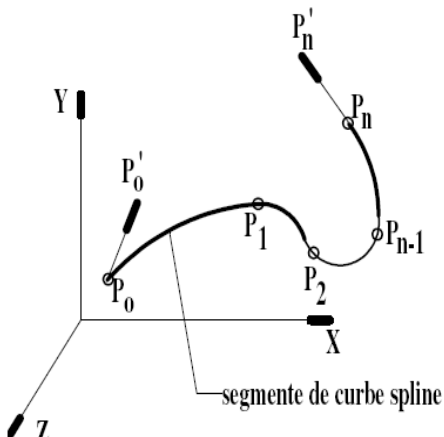


Fig. 1.22 Modelul pentru definirea unei curbe spline [Seiculescu, 2007]

$$P''(u_1 = 1) = P''(u_2 = 0) \quad (1.1)$$

adică:

$$P' = -1/4(3P_0 + P'_0 - 3P_2 + P'_0) \quad (1.2)$$

**Curbele Bézier** – spre deosebire de curbele spline, utilizează curbe de aproximare care nu trebuie să treacă prin toate punctele de control. Curba Bézier este definită prin locația a  $(n+1)$  puncte care formează nodurile sau vârfurile unui poligon numit poligon de control, curba fiind întotdeauna tangentă la primul și la ultimul segment al poligonului. Curba încearcă să urmărească forma poligonului așa cum rezultă din fig.1.23 [Seiculescu, 2007].

Matematic pentru  $(n+1)$  puncte de control, curba este definită printr-un polinom de gradul  $n$ :

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(u) \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (1.3)$$

Unde  $B_{i,n}$  sunt polinoamele lui Bernstein având forma:

$$B_{i,n}(u) = C(n, i)u^i(1-u)^{n-i} \quad (1.4)$$

iar coeficientul  $C(n, i)$  este coeficientul binomial:

$$C(n, i) = \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad (1.5)$$

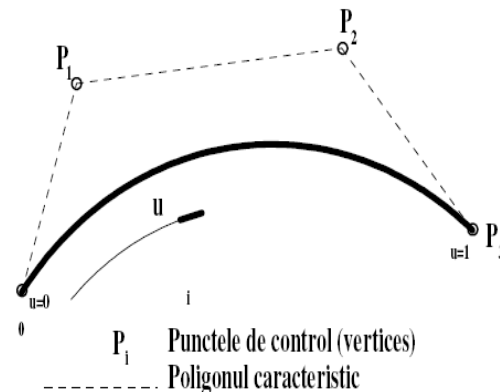


Fig. 1.23 Model pentru definirea unei curbe Bézier [Seiculescu, 2007]

Pentru ca și curba Bézier să treacă prin punctele  $P_0$  și  $P_n$  trebuie să se îndeplinească condiția:

$$C(n,0)=C(n,n)=1 \quad (1.6)$$

de unde se obține ecuația parametrică a curbei Bézier:

$$P(u) = P_0(1-u)^n + P_1C(n,1)u(1-u)^{n-1} + P_2C(n,2)u^2(1-u)^{n-2} + \dots + P_{n-1}C(n,n-1)u^{n-1}(1-u) + P_nu^n \quad (1.7)$$

**Curbele B-spline (NURBS-Nonuniform Rational B-spline)** – reprezintă standardul industrial de modelare a curbelor sintetice pentru descrierea formelor libere (Freeform) [Galletto, 2005]. Dacă pentru curbele Bézier numărul punctelor de control determină împreună cu gradul polinomului de interpolare forma curbei, în cazul NURBS [Ming, 2009] curba este generată vectorial, pentru un număr de puncte de control independente de gradul funcției de interpolare. Funcția are valori nenule pentru punctele de control și valori nule pentru restul punctelor din spațiul de reprezentare. Curbele NURBS combină rigurozitatea curbelor spline (sprijinirea pe punctele de control) cu suplețea curbelor Bézier [Seiculescu, 2007].

În grafica pe calculator curbele trebuie să îndeplinească o serie de condiții. Este de dorit ca acestea să aibă un aspect regulat, neted, fără discontinuități, oscilații sau bucle între punctele de control. Totodată, influența punctelor asupra aspectului general al curbei trebuie să fie limitată în sensul că modificarea poziției unui punct de control trebuie să aibă un efect local, schimbând aspectul curbei numai într-o vecinătate restrânsă a punctului respectiv. Aceasta permite proiectarea interactivă a formelor obiectelor prin încercări repetate. Totodată, este de dorit ca ecuațiile analitice ale curbelor să fie cât mai simple. În general se utilizează curbe descrise prin funcții polinomiale de grad redus (2 sau 3). O astfel de curbă nu va putea acoperi întregul set de puncte de control. Soluția constă în separarea setului de puncte de control în subgrupe de puncte și construirea unor curbe de grad redus pentru fiecare subgrupă. Curba căutată va rezulta din asamblarea acestor curbe elementare (porțiuni de curba) și deci ea nu va fi descrisă de o ecuație unică pe întregul domeniu de definiție. Aspectul neted al curbei rezultate va fi obținut prin impunerea condițiilor de continuitate și derivabilitate funcției asociate, în punctele de joncțiune a două porțiuni de curba [Babii, 2000].

Construind în acest mod curbe de interpolare, utilizând curbe descrise de funcții polinomiale de grad 3 se obține curba spline cubică naturală. Dezavantajul acestora este controlul global pe care îl exercită fiecare punct de control asupra curbei. Determinarea acestei curbe având  $n+1$  puncte de control necesită rezolvarea unui sistem liniar de  $4 \cdot n$  ecuații cu  $4 \cdot n$  necunoscute. Acest sistem furnizează coeficienții funcțiilor polinomiale de grad 3 asociate celor  $n$  porțiuni de curba care definesc curba de interpolare [Babii, 2000].

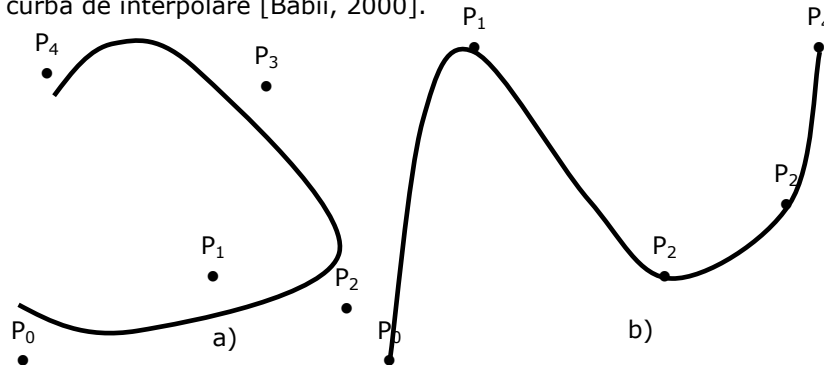


Fig. 1.24 Curbe B-spline

a – curbe spline cubice, b – curba de interpolare de tip Romm-Catmull [Babii, 2000]

O altă metodă pentru construcția unei curbe de interpolare spline cubică utilizează un set de curbe *spline de bază*. Curba de interpolare se obține ca o combinație liniară (suma ponderată) a acestora. Și în acest caz se obține o curbă de interpolare asupra căreia fiecare punct de control exercită o influență globală. Asigurarea controlului local asupra unei curbe spline cubice de interpolare nu pot poate fi obținută decât renunțând la unele condiții asupra curbei. Renunțând la cerința ca, curba să treacă prin punctele de control conduce la obținerea unor curbe de aproximare numite *curbe b-spline cubice* (fig.1.24.a). Renunțând la cerința de derivabilitate de ordin II a curbei, se va obține o *curba de interpolare de tip Romm-Catmull* (fig.1.24.b) [Babii, 2000]. Curbele B-Spline cubice sunt formate prin combinații liniare ale unor curbe spline numite B-Spline sau baze. Curba B-Spline cubică este în general și ea o curbă spline.

Pentru reprezentarea acestui tip de curbă se utilizează o formă parametrică. Fiind date  $n+1$  puncte de control,  $P_0, \dots, P_n$ , vom diviza intervalul  $[0, n]$  al parametrului  $u$  în  $n$  subintervale  $[u_i, u_{i+1}]$ , cu  $0 \leq t \leq 1$  și  $t(0)=u_i$  și  $t(1)=u_{i+1}$ . Pentru fiecare subinterval avem, în expresia matriceală:

$$C_i(t) = \frac{1}{6} [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \end{bmatrix} \quad t \in [0,1] \quad (1.8)$$

pentru curbele B-Spline cubice, respectiv:

$$C_i(t) = \frac{1}{6} [t^3 \ t^2 \ t \ 1] \begin{bmatrix} -3 & 9 & -9 & 3 \\ 3 & -15 & 12 & -3 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 6 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \end{bmatrix} \quad t \in [0,1] \quad (1.9)$$

pentru *curbele Romm-Catmull*.

Un punct al curbei va avea coordonatele  $[cx(t), cy(t)]$ , obținute aplicând formula de mai sus și înlocuind vectorul  $P$  cu coordonatele  $x$  respectiv  $y$  ale punctelor de control [Babii, 2000].

Proprietățile curbei B-Spline cubice:

- curba nu este o curbă de interpolare ci una de aproximare;
- specificând un punct de control de două ori, curba este atrasă mai aproape de acel punct;
- specificând un punct de control de trei ori, curba trece prin acel punct.

Pentru a crea suprafața ce va aproxima mesh-ul programele specifice procesului de RE (amintite anterior) folosesc **suprafețe B-Spline** ce au ca schelet curbele „sintetice” B-Spline.

**Suprafețele B-Spline** – reprezintă o extensie a două curbe parametriche B-Spline după direcțiile  $u$  și  $v$ , suprafața fiind controlată printr-un set de puncte care construiesc o suprafață de sprijin formată din petice rectangulare. Aceste puncte formează vârfurile poliedrului de control care aproximează suprafața asociată curbei rezultate. În fig.1.25 se prezintă schema de construire a suprafețelor B-spline [Seiculescu, 2007].

Suprafața B-spline definită prin vectorizarea a  $(n+1) \times (m+1)$  puncte de control pentru o ecuație extinsă după două direcții de vectorizare are forma:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,k}(v) \quad 0 \leq u \leq 1, \quad 0 \leq v \leq 1 \quad (1.10)$$

În cazul suprafețelor B-Spline nodurile de control  $k$  care realizează segmentarea curbelor B-Spline nu trebuie să fie după cele două direcții. Avantajul major al curbelor B-Spline față de curbele Bézier este dată de controlul local mult mai ușor și riguros al suprafeței. În cazul în care  $k > n+1$  sau  $k > m+1$  suprafața este de fapt o suprafață Bézier [Seiculescu, 2007].

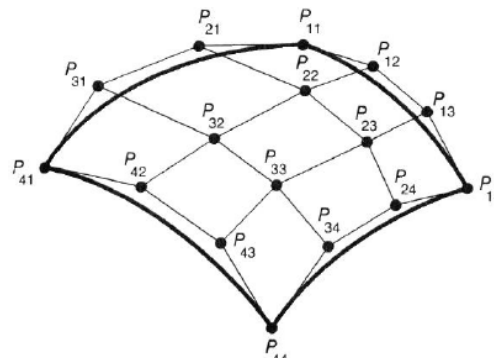


Fig. 1.25 Exemplu de suprafață B-spline [Seiculescu, 2007]

Suprafețele B-spline sunt o formă precisă de a defini curbe și suprafețe nedefinite (freeform). Suprafețele B-spline, datorită algoritmilor matematici din care sunt compuse oferă o flexibilitate în proiectarea diferitelor forme, reducând spațiul de stocare față de fișierele mesh.

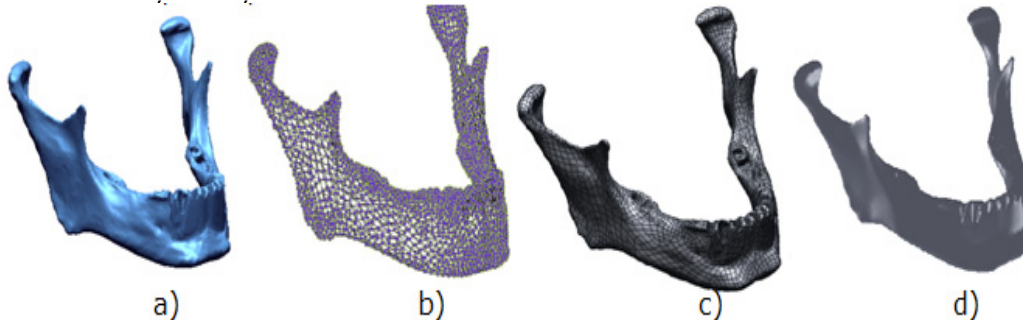


Fig. 1.26 Etapele de transformare a mesh-ului în corp solid  
a – mesh-ul, b – aproximarea curbilor B-spline, c – potrivirea suprafețelor B-spline,  
d – modelul solid

Fig.1.26 prezintă etapele de transformare a mesh-ului în corp solid ce poate fi modificat în programe CAD. Transformarea automată a mesh-ului se face prin aproximarea curbilor B-spline (fig.1.26.b) și potrivirea suprafețelor B-spline (fig.1.26.c) pe mesh-ul creat anterior. Calitatea suprafețelor NURBS depinde de amplasarea curbilor și de numărul punctelor de control în direcțiile  $u$  și  $v$ . Până în momentul de față modelul virtual este tot sub formă de coajă, fără grosime. Dacă suprafețele NURBS sunt unite și nu se intersectează atunci se pot uni într-o singură suprafață închisă considerată solid (fig.1.26.d).

### 1.3. Utilizarea tehnicii RE

Avem următoarele motive pentru aplicarea tehnicii RE pe o piesă sau pe un produs:

- Nu există documentație adecvată a desenului original [Cosma, 2008.a];
- Producătorul original nu mai există, dar cerințele clienților rămân [Cosma, 2008.a];
- Designul original și documentația sau pierdut ori nu au existat niciodată [Cosma, 2008.a];
- Câteva caracteristici negative ale produsului trebuie remediate [Cosma, 2008.a];
- Uzura excesivă poate indica locul unde un produs trebuie îmbunătățit [Cosma, 2008.a];
- Analiza caracteristicilor pozitive și negative ale produsului competitor [Cosma, 2008.a];
- Explorarea unor noi metode de a îmbunătății performanțele și caracteristicile [Cosma, 2008.a];
- Pentru a asimila metode competitive de referință, pentru a înțelege produsele competitorilor și pentru a dezvolta produse mai bune [Cosma, 2008.a];
- Modelul CAD original nu este suficient pentru a susține modificările sau metodele curente de fabricare [Cosma, 2008.a];
- Furnizorul original nu este capabil sau nu dorește să ofere piese adiționale (de schimb) [Cosma, 2008.a];

- Fabricanții care oferă produsul original nu doresc, ori nu pot să ofere piese de schimb sau cer costuri exagerate pentru piese de bază [Cosma, 2008.a];
- Pentru a îmbunătăți materialele uzate moral sau procesele de fabricare învechite cu tehnologii curente și mai puțin costisitoare [Cosma, 2008.a].

Din multitudinea aplicațiilor enumerate mai sus am concentrat cercetările asupra următoarelor aplicații:

1. Prototiparea Rapidă de noi produse;
2. Remodelarea pieselor în soft-uri CAD;
3. Controlul calității și inspecția pieselor.

### 1.3.1. Reverse Engineering integrat în Prototiparea Rapidă

În ultimii ani tehnicile de obținere a unui model virtual din cadrul procesului RE au evoluat foarte mult și au fost integrate în diferite etape și procese din viața produselor. Modelele virtuale obținute prin metode de scanare sau digitizare sunt folosite în fabricarea obiectelor fizice prin procese convenționale bazate pe îndepărtarea materialului (frezare), sau prin metode moderne de adăugare de material (prototipare rapidă). **Prototiparea Rapidă** este o metodă neconvențională de fabricație ce a evoluat foarte mult în ultimul deceniu datorită capacității de a crea piese cu geometrii complexe. Sistemele de prototipare rapidă 3D reprezintă o soluție revoluționară prin care se pot realiza în câteva ore obiectele sau modelele fizice tridimensionale ale obiectelor proiectate pornind direct de la modelul virtual.

*Definiție:*

*Prototiparea rapidă* este procesul care creează automat prototipul fizic pornind de la un model 3D, într-o scurtă perioadă de timp [Lennings, 2000].

*Prototiparea rapidă* se referă la o anumită clasă de tehnologii care sunt folosite la fabricarea obiectelor prin depunere strat cu strat pornind direct de la modelul virtual [Venish, 2008].

Prototiparea Rapidă [Guangchun, 2004] este folosită în mai multe domenii de activitate (fig.1.27) oferind o mulțime de avantaje:

- Crearea rapidă a prototipului gândit, proiectat, dorit;
- Vizualizare rapidă și ușoară a produsului gândit, imaginat;
- Luarea unor decizii mai rapide și mai ușoare de a corecta sau lansa un produs pe piață;
- Identificarea formei, funcționării și eventualelor erori de concepție sau proiectare;
- Creșterea clarității comunicării cu furnizorii, clienții sau serviciul de marketing [Bibus, 2011].

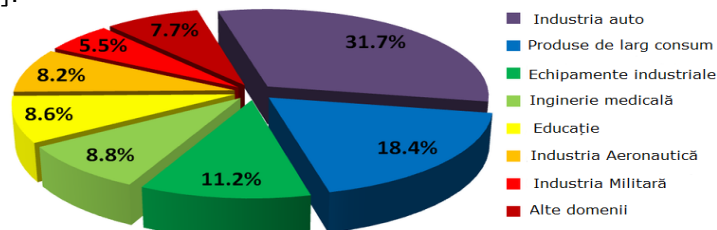


Fig. 1.27 Gradul de folosire a tehnicilor de Prototipare Rapidă.

„Această tehnologie azi este capabilă să producă structuri 3D foarte complexe cu o foarte mică sau chiar deloc contribuție umană. Apărând aproape în paralel cu progresul, stereolitografia a fost sistemul alternativ pentru fabricarea stratificată oferită de mai multe companii americane. Sunt incluse sisteme care construiesc obiecte stratificate prin laminarea straturilor de materiale (Helisys) și

prin fuziunea stratificată sau legarea materialelor pulverulente (DTM, Soligen) sau extrudarea firelor de sârmă (StratoDsys).” [Cosma, 2008.a]

Studiind literatura de specialitate și ofertele firmelor de profil s-a realizat o clasificare a tehnologiilor de Prototipare Rapidă prezentată în fig.1.28.

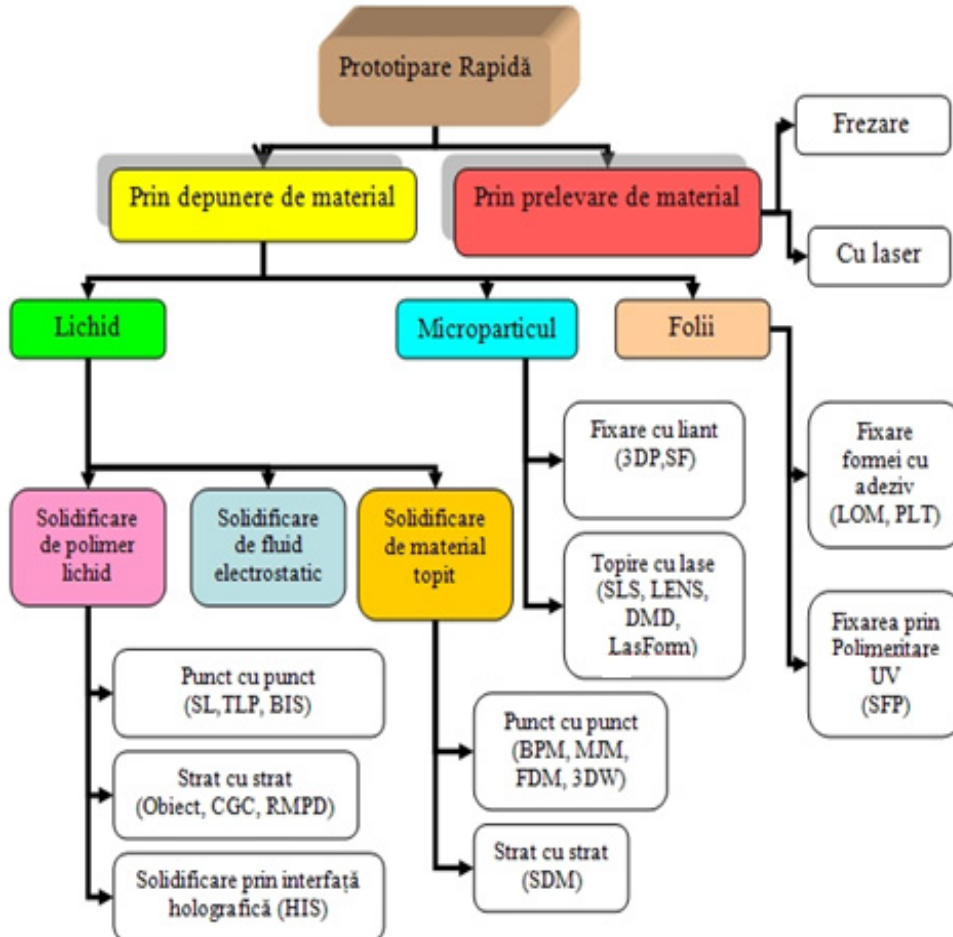


Fig. 1.28 Clasificarea tehnologiilor de Prototipare Rapidă [Iclănzan, 2006]

În continuare se vor prezenta câteva exemple mai relevante ce evidențiază rolul RE în procesul de Prototipare Rapidă.

*Exemplul 1:* Utilizând echipamente de colectare a datelor prin contact (mașina Modela MDX-15) și de prototipare rapidă prin prelevare de material (ISEL GFM 4433) colegii din departamentul Ingineria Materialelor și Fabricație, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, propun o metodă de obținere a părților active ale matritelor [Cosma, 2009.a]. Originalitatea cercetărilor realizate constau în faptul că realizarea elementelor active se face plecând de la repere (piese) pentru care lipsește documentație tehnică. Pentru îndeplinirea obiectivelor propuse s-au folosit procedee de Reverse Engineering (digitizare și reconstrucție) aplicate pieselor din material polimeric și procedee de Prototipare Rapidă prin prelevare de material. Metoda propusă și rezultatele cercetării sunt prezentate în fig.1.29.



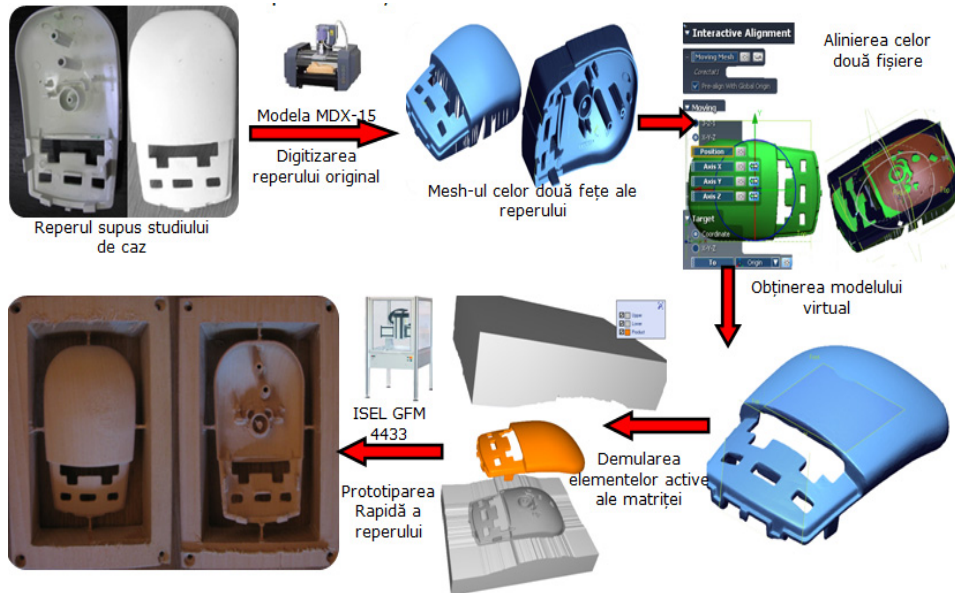


Fig. 1.29 Metoda propusă în cadrul cercetării [Cosma, 2009.a]

*Exemplul 2:* Cercetările prezentate în următoarele rânduri sunt un exemplu sugestiv al rolului ce îl are RE în RP. Studiul de caz prezentat în articol [Sansoni, 2004] constă în scanarea unui Ferrari 250 Millie Miglia cu ajutorul unui echipament OPL-3D, crearea mesh-ului, transformarea în STL și prototiparea rapidă prin depunere de material strat cu strat a unui model micșorat - scara 1:10 (fig.1.30). Procesul demonstrează ușurința aplicării unui sistem optic de măsurare pe suprafețe mari cu acuratețe și detalii ridicate, reducând timpul de proiectare și realizare a unei machete.

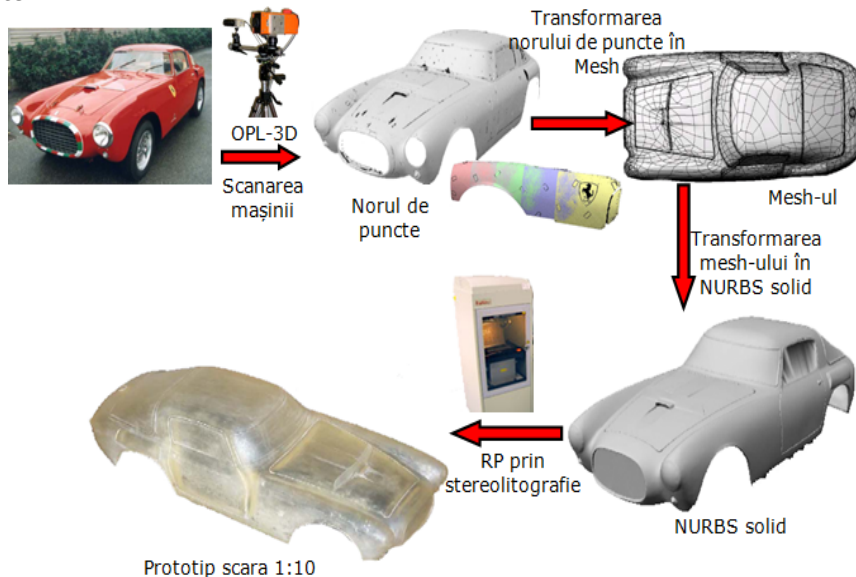


Fig. 1.30 Pașii parcurși în cadrul cercetării [Sansoni, 2004]

*Exemplul 3:* Obiectele realizate pentru diverse industrii au toleranțe foarte precise, în special piesele de natură mecanică realizate în 2,5 axe. H. James de la Universitatea Utah [James, 2002] prezintă cercetările sale în domeniul RE și RP punând în evidență necesitatea realizării unor modele virtuale precise care să îndeplinească cerințele riguroase impuse de industria auto. În lucrare este prezentată o tehnică de obținere a unui model virtual pe baza modelului fizic. Folosind un sistem de achiziție a datelor fără contact (laser) – Digibot II, s-a supus studiului de caz o piesă din industria auto cu precizie ridicată, s-au adus modificări de formă și dimensionale. În final s-a realizat piesa folosind procesul de Prototipare Rapidă prin prelevare de material. Metoda propusă și rezultatele cercetării sunt prezentate în fig.1.31.

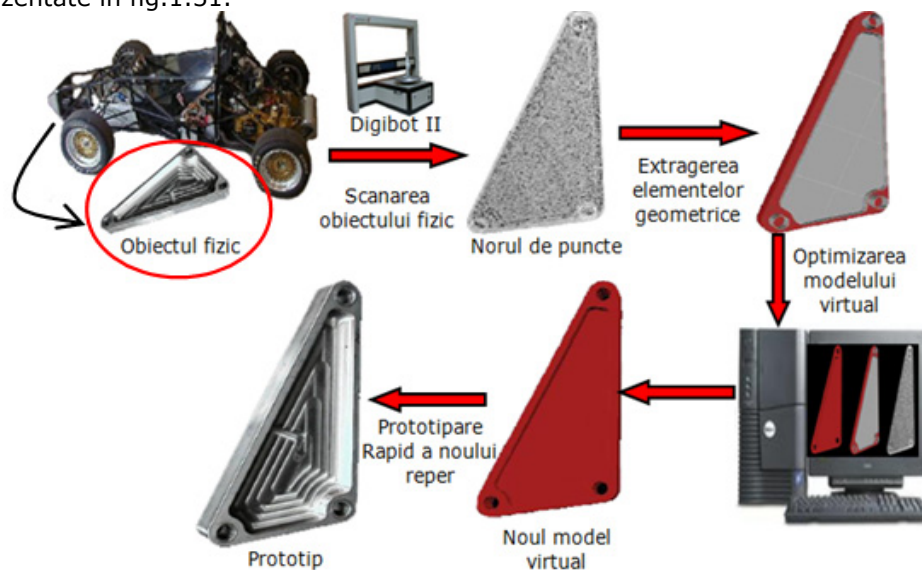


Fig. 1.31 Pașii parcurși în cadrul cercetării [James, 2002]

O dată cu diversificarea nevoilor consumatorilor, a tehnologiei moderne și a concurenței, inovația sau crearea de produse noi a devenit vitală pentru orice companie. Firma trebuie să știe cum să administreze produsele pe parcursul ciclului lor de viață, de la creare, creștere până la maturitate și declin atunci când apar produse noi care satisfac mai bine nevoile clienților.

### 1.3.2. Reverse Engineering utilizat în procesul de proiectare

Toate eforturile activității de proiectare de produse ce se materializează apoi în urma unor procese de producție complexe, au la bază secole de dezvoltare tehnologică și științifică și dau naștere obiectelor pe care le folosim în viața de zi cu zi. Complexitatea în continuă creștere a produselor conduce la unele dificultăți în proiectare și fabricație. Există mai multe soluții la această caracteristică a producției moderne, cea mai utilizată fiind realizarea de noi instrumente și tehnologii care să sprijine abordarea proiectului fără a afecta semnificativ timpul de realizare sau calitatea obținută. Astfel, se impun îmbunătățiri în procesele de proiectare, de calcul și de optimizare, de simulare a fabricației, sau în modul de gestionare a informațiilor. Între toate acestea, proiectarea asistată reprezintă o verigă hotărâtoare.

Când se pune problema pentru a proiecta un nou produs de multe ori se apelează la unele deja existente, oarecum similare. Prin urmare, procesul de proiectare este de multe ori un redesign. Refolosirea unui anumit proiect poate fi o modalitate bună de a dezvolta un nou produs. Termenul *refolosire* se referă la cunoștințe referitoare la produs (timpuri de proiectare și fabricare, materiale folosite, ergonomicitate, estetic, fiabilitate, costuri, impactul asupra pieței, etc.), sculele și dispozitivele folosite în procesul de fabricare, etc.. Astfel *redesign* poate fi văzut ca o bună abordare de scădere a costurilor și de creștere a eficienței.

În cazul în care au apărut noi cerințe de la consumatorii unui anumit tip de produs, care-și doresc ceva nou, tentativa de a adapta un produs existent la cerințele pieței este o pierdere de timp și implică costuri mari, la această problemă este necesară găsirea unei soluții pentru diminuarea timpului și cost de redesign. Avantajele reproiectării sunt că o parte din noul produs este cunoscută dinainte, ceea ce trebuie stabilite sunt părțile ce necesită adaptări.

Una din tehnicile moderne folosite în procesul de redesign este *Reverse Engineering*, termenul fiind aplicat procesului general de remodelare a unui obiect cu ajutorul calculatorului. Reverse Engineering poate fi folosit în procesul de redesign ca și în introducerea noilor produse pe piață. În unele cazuri poate fi mai ușor să dezvolti și să modifichi modelul geometric al unui produs într-un sistem CAD decât să-l crezi de la început. Acest lucru este foarte folositor pentru forme complexe care sunt dificil de conceptualizat.

În continuare se vor prezenta câteva exemple mai relevante ce evidențiază rolul RE în procesul de proiectare.

*Exemplul 1:* Utilizând tehnici moderne de Reverse Engineering, proiectare asistată (CAD) și simulări asistate (CAE) colegii din departamentul Ingineria Materialelor și Fabricație, Universitatea „Politehnica” din Timișoara, propun o metodă de obținere a unui nou model [Cosma, 2008.b], pentru un produs existent folosind tehnicile menționate mai sus. Cu aceste tehnici au redus timpul destinat proceselor de proiectare și de fabricație. Spre exemplificare au folosi un capsator, pentru care nu exista nici un fel de documentație tehnică. Tehnica Reverse Engineering a fost aplicată întregului produs prin descompunerea componentă cu componentă, analizarea rolului funcțional și estetic al pieselor, iar pentru digitizarea pieselor din plastic s-a folosit mașina Modela MDX-15 [Dume, 2007]. Metoda propusă și rezultatele cercetării sunt prezentate în fig.1.32.

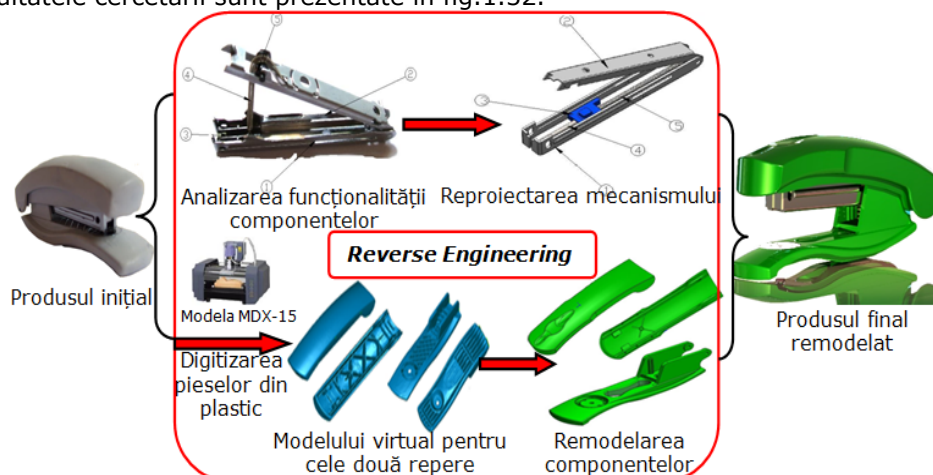


Fig. 1.32 Pașii parcurși în cadrul cercetării [Cosma, 2008.b]

*Exemplul 2:* Cercetarea prezentată în lucrarea [Solaberrieta, 2009] are ca obiectiv îmbunătățirea procesului de proiectare a protezelor dentare, adăugând în procesul de proiectare și o analiză cinematică. Modelul din ghips ce reprezintă un prototip al protezei este scanat, modelul virtual fiind folosit în programe CAD pentru a analiza cinematic dacă există coliziuni interdentale. În cazul în care acestea apar se va trece la remodelarea dinților pentru a înlătura orice inconveniențe după fabricarea protezei. Metoda propusă și rezultatele cercetării sunt prezentate în fig.1.33.

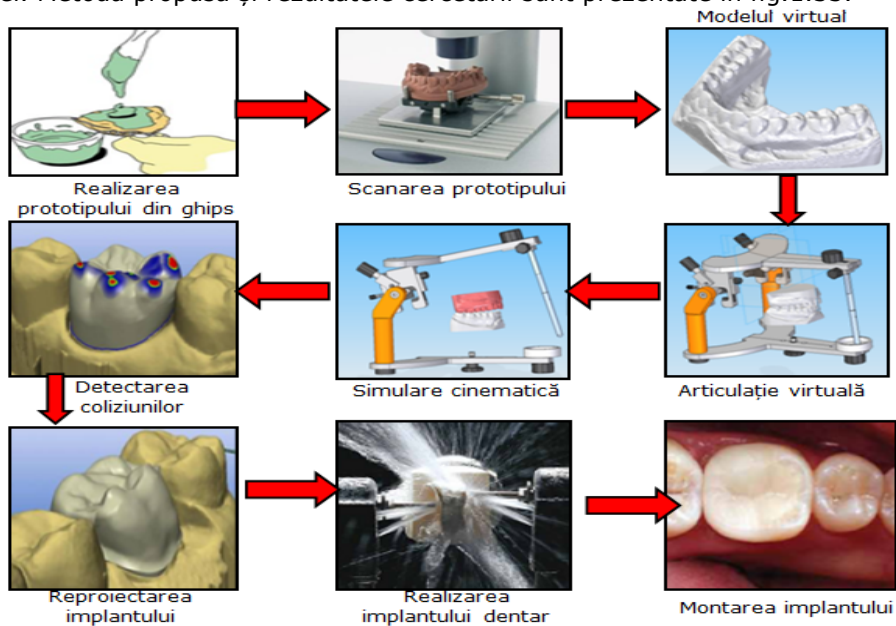


Fig. 1.33 Pași parcurși în cadrul cercetării [Solaberrieta, 2009]

În zilele noastre procesul de reproiectare este ajutat de tehnici și practici noi care reduc costurile și timpul de realizare a produselor, acestea fiind din ce în ce mai complexe.

Reverse Engineering ca metodă, nu este limitată pentru un anumit scop, dar joacă deseori un rol important în dezvoltarea tehnologică. Procesul de dezasamblare a unui obiect și dezvăluirea funcționalității, este deseori un procedeu eficient pentru a înțelege cum funcționează și pentru a-l putea îmbunătăți.

În construirea unui nou produs, producătorii dezvoltă noi tehnologii implementând concepte ingineresti și abstracte. Managementul proiectării de produse, poate fi realizat bazându-ne pe două metode convenționale și respectiv neconvenționale.

### 1.3.3. Rolul tehnicilor RE în inspectarea pieselor

*Calitatea unui produs* reprezintă ansamblul de caracteristici ale produsului care îi conferă acestuia capacitatea de a satisface cerințele și dorințele clienților. Pe baza acestei definiții, un produs va fi „de calitate” în măsura în care ansamblul de caracteristici va satisface cerințele clienților (sau ale consumatorilor, ale pieței); în alți termeni, satisfacția clienților este o măsură a calității produselor.

*Calitatea bazată pe fabricație* se referă în esență la proiectarea, ingineria produsului și procesele de fabricație implicate în fabricarea acestuia. Calitatea se măsoară prin gradul de conformitate cu specificațiile și cerințele predeterminate și

abaterile identificate față de aceste cerințe. Prin măsurare este identificată calitatea de conformitate care se realizează în procesul de producție și care este determinată de starea proceselor tehnologice, de calitatea utilajelor, dispozitivelor, sculelor, activitățile de urmărire și control.

Asigurarea *calității asistată de calculator* (CAQ) este o aplicație inginerescă a calculatoarelor și mașinilor comandate de calculator pentru definirea și inspecția calității produselor. Acest concept include: analiza toleranțelor dimensionale, utilizând informațiile despre produse și fabricație (PMI) asupra modelelor CAD (Computer Aided Design), inspecția asistată de calculator cu mașini de măsurat în coordonate, compararea datelor obținute prin intermediul tehnologiilor de scanare 3D a pieselor fizice față de modele CAD, FMEA, Controlul Statistic al Proceselor.

*Exemplul 1:* Cercetarea prezentată în articolul [Pahole, 2003] are ca obiectiv îmbunătățirea procesului de fabricație al matrițelor destinate deformării plastice. În timpul procesului de testare, matrița necesită ajustări dimensionale care pot fi realizate manual sau mecanic. Pentru a îmbunătăți procesul de fabricație al matriței și pentru a realiza o documentație tehnică completă, echipa de cercetare a introdus în proces tehnica Reverse Engineering. În fig.1.34 se pot observa diferențele dimensionale ce le-a suferit matrița de deformare plastică în urma procesului de testare. Matrița de rezervă va fi realizată corect, cu tot cu micile ajustări ce au fost făcute matriței primare.

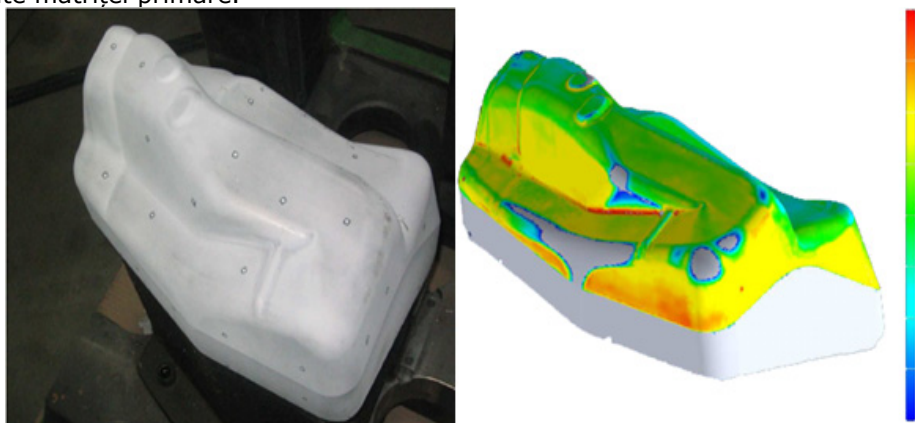


Fig. 1.34 Deviația dimensională a matriței ajustate [Pahole, 2003]

*Exemplul 2:* Firma GFMesstechnik [GFM, 2011.a] dezvoltă și produce sisteme de scanare optice destinate măsurătorilor 3D și inspecția diferitelor tipuri de piese. Tehnologiile produse de firma GFM sunt foarte precise și foarte rapide. Cercetătorii firmei au dezvoltat echipamente capabile de scanarea unor piese de dimensiuni foarte mici (plăcuțe de scule așchietoare) cu acuratețe mare caz [GFM, 2011.b] ce va fi rezumat în fig.1.35.

Uneori este necesară compararea unei componente fizice, reală și originală cu un model virtual CAD, model ce stă la baza procesului de fabricație pentru piesa verificată. Folosind tehnicile RE de digitizare sau scanare obținem norul de puncte ce poate fi aliniat cu modelul virtual. Alinierea este făcută fie ținând cont de minim trei puncte de referință, sau folosind un algoritm ce va poziționa norul de puncte astfel să se obțină o eroare minimă față de modelul virtual. Odată ce alinierea a fost făcută se pot inspecta abaterile dimensionale și de formă, fiind generate rapoarte ale acestei operații. Secțiuni transversale ale norului de puncte și ale modelului virtual pot fi create și comparate pentru a vizualiza deviațiile dimensionale. În cazul

sculelor (matrițe, ștanțe) prototip ce au fost modificate în timpul testării lor, programele permit modificarea automată a modelului virtual original astfel încât sculele ce vor fi realizate de acum în colo să aibă incluse toate modificările suferite de prototip. Rapoartele pot fi salvate în diferite formate ce pot fi deschise cu programe folosite în majoritatea companiilor; Microsoft Word, Excel, Acrobat Reader, HTML, etc.. De altfel programele folosite oferă posibilitatea de a importa formate neutre STEP, IGS, STL [Venish, 2008].

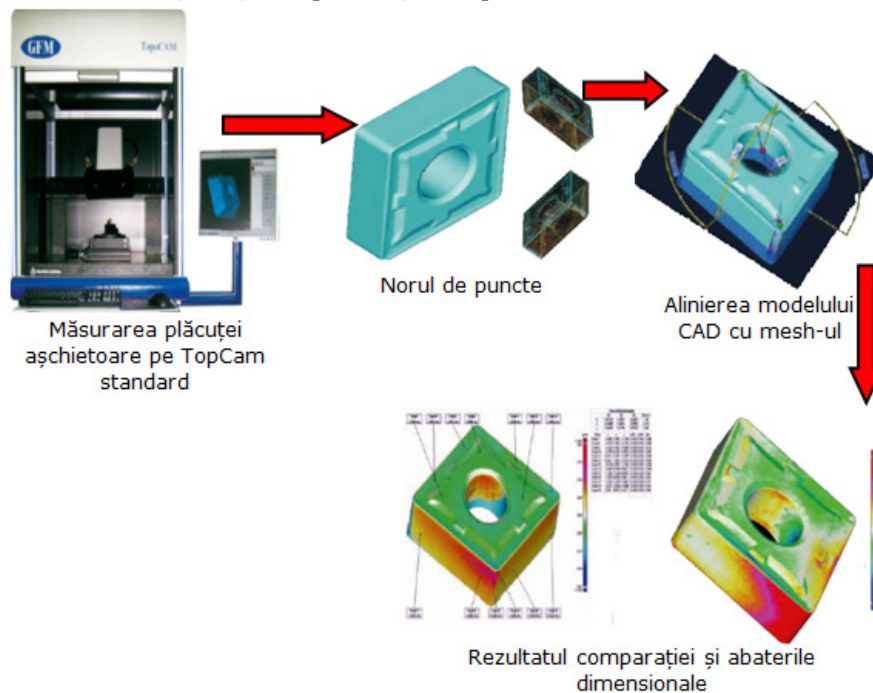


Fig. 1.35 Pașii parcurși în cadrul cercetării [GFM, 2011.a]

#### 1.4. Concluzii

Acest capitol s-a realizat studiind literatura de specialitate ce apărut în ultimii ani, accesând diverse baze de date internaționale și prezintă conștiințele acumulate despre tehnica Reverse Engineering. Este prezentată trecerea de la procesul tradițional de proiectare spre această nouă metodă ce folosește noile tehnologii în materie de echipamente și soft, cu scopul de a reduce timpul și costul de dezvoltare a unui produs. Din multitudinea de definiții, ce au fost enunțate de-a lungul ultimului deceniu, s-a enunțat o nouă definiție care se potrivește cu cercetările realizate în prezenta teză.

Sunt prezentate domeniile în care această nouă tehnică este aplicată, utilizarea ei, evidențiindu-se rolul tehnicii Reverse Engineering prin prezentarea unor articole mai concludente din literatura de specialitate. S-a constatat că pe tema re-proiectării produselor folosind tehnica RE și integrarea acestora în procesul de control al calității produselor din materiale plastice nu s-au făcut cercetări. S-a considerat importantă continuarea cercetărilor pe aceste două teme, reprezentând și baza de pornire a acestei teze de doctorat.

## 2. OBIECTIVELE CERCETĂRII DOCTORALE ȘI PREZENTAREA PLATFORMEI OPERAȚIONALE

### 2.1. Definirea obiectivelor cercetării doctorale

Obiectele pe care le folosim în viața de zi cu zi sunt produsul a secole de dezvoltare tehnologică și științifică. Activitatea inginerescă, în general, are ca finalitate realizarea de obiecte tehnice, care se materializează în urma unor procese de producție complexe. Etapele principale ale realizării unui produs sunt: definirea unui concept general al produsului, realizarea proiectului tehnic, stabilirea tehnologiei de fabricație, realizarea modelului experimental și omologarea produsului, fabricația propriu-zisă și controlul calității.

Competiția conduce la necesitatea de accelerare a procesului de creare a unui produs complet nou sau bazat pe experiența anterioară. Încă din primele etape de dezvoltare ale produsului munca nu este ușurată de soft - urile CAD/CAM/CAE. Capacitatea unui producător de a răspunde rapid cerințelor pieței a devenit principalul factor de succes, fiind mult mai important decât existența unei capacități mari de prelucrare sau a unei forțe de muncă ieftine.

Cu ajutorul noilor tehnici moderne (*Reverse Engineering, Rapid Prototyping, Digital prototyping, Rapid Tooling*) sunt eliminate anumite inconveniente: procesul de proiectare durează mai puțin datorită existenței bazelor de date cu componente standardizate internațional, calitatea produsului este definită încă din etapele de proiectare, scade costul produsului odată cu reducerea timpului de proiectare.

În momentul de față *Reverse Engineering* are aplicabilitate în foarte multe domenii: industria automobilelor, industria aeronautică, industria cinematografică [Haar, 2005], în medicină [Etxaniz, 2008], arhitectură și multe altele, utilizându-se de altfel în proiectarea industrială, dar și în proiectarea bijuteriilor.

În contextul și problematica de mai sus, obiectivele asumate ale prezentei teze de doctorat având titlul **Metode de integrare a tehnicii Reverse Engineering în concepția, fabricația și controlul dimensional al pieselor injectate din materiale polimerice** sunt definite astfel:

- 1) analiza metodelor și tehnicilor moderne de obținere a modelului virtual pornind de la un obiect fizic;
- 2) implementarea unei noi metode de obținere a modelului virtual folosind informațiile primite de la un program NC;
- 3) stabilirea incertitudinii de scanare/digitizare și integrarea mașinilor în procesul de control dimensional al pieselor din materiale polimerice;
- 4) integrarea tehnicilor moderne RE în concepția, fabricația și controlul calității unui nou produs.

Pentru realizarea obiectivelor cercetării doctorale descrise mai sus s-a asigurat o bază de cunoaștere teoretică prezentată în capitolul introductiv ale tezei (**cap.1**). Cunoașterea teoretică a fost consolidată de studiul amănunțit al concepției și proceselor de fabricație care servesc la crearea produselor din materiale polimerice. Informațiile de natură teoretică ajută studiului și asimilării unor soluții tehnice cu potențial de implementare industrială, dar și integrării acestora în procesul controlului calității.

## 2.2. Prezentarea platformei operaționale

Existența la Universitatea Politehnică din Timișoara a unei baze experimentale adecvate (fig.2.1) - mașina de digitizat Modela MDX-15, mașina de scanat cu laser Roland LPX-600, mașina de măsurat tridimensional TESA MicroMs 343, precum și dotările altor laboratoare - fac posibilă abordarea tehnicii Reverse Engineering și implementarea sa în procesul de concepție și control a calității produselor din materiale polimerice.

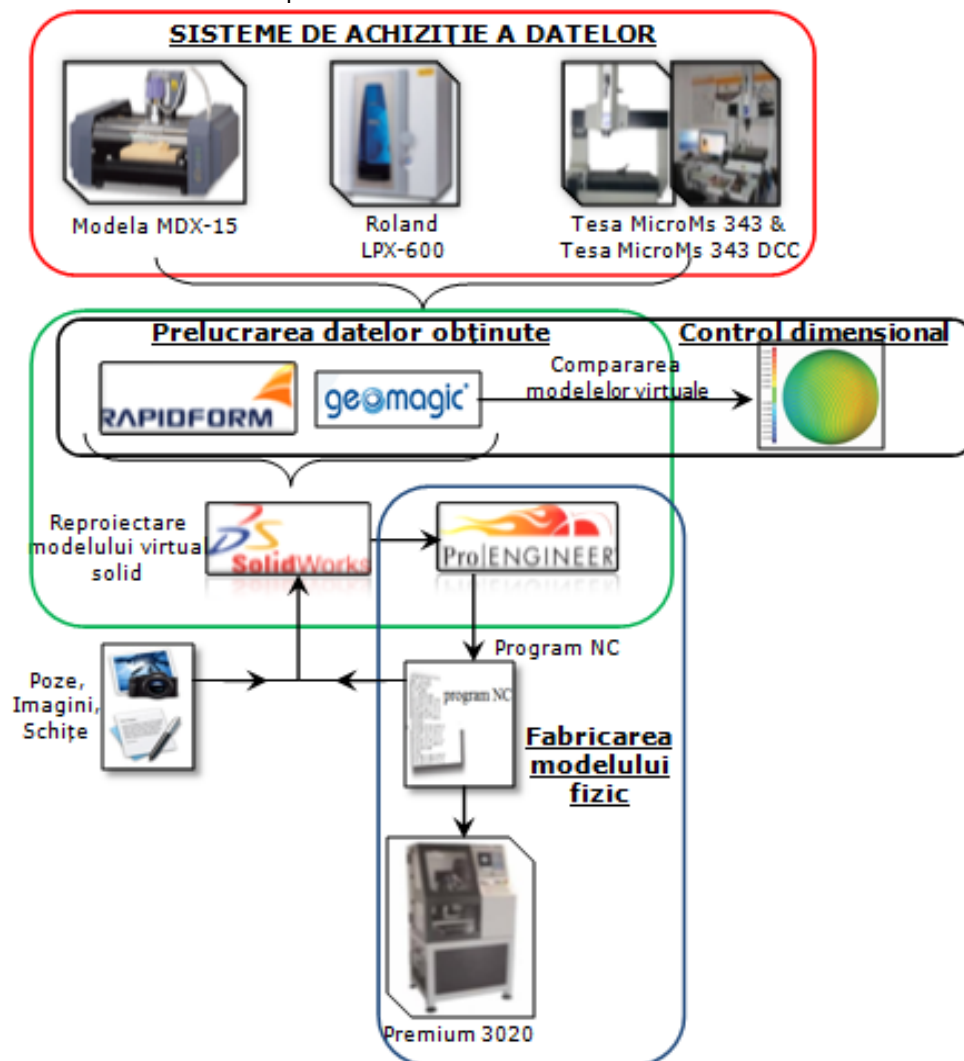


Fig. 2.1 Platforma experimentală folosită

### A) Mașina de digitizat Modela MDX-15

Mașina de digitizat Modela MDX-15 (fig.2.2) este capabilă să capteze informații despre o gamă largă de obiecte care pot fi dificil de scanat pe mașinile convenționale de măsurat cu palpator. Mașina folosește un *senzor piezo-electric*.



**Senzorii piezo-electrici** sunt senzori de precizie ridicată, sensibili la șoc și la frecvențe ridicate. Când senzorului intră în contact cu piesa (fixată), este supus unei ciocniri în sens mecanic. Această ciocnire se traduce printr-un impuls de contact asupra senzorului, unda de șoc fiind transmisă la platoul cu trei brațe din cadrul mecanismului cu suport izostatic (fig.2.3). Unda de șoc datorită ciocnirii senzorului cu piesa este detectată de o pastilă piezo-ceramică care transformă în impuls electric proporțional cu forța de contact  $F_c$ . Acest impuls electric va fi verificat de partea electronică a mașinii care trebuie să facă deosebirea între un impuls care nu este de contact și un adevărat impuls de contact.

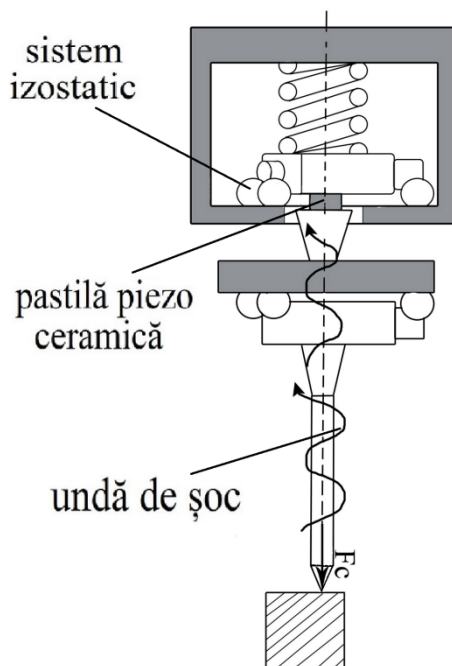


Fig. 2.3 Principiul constructiv al unui sensor piezo-electric

Aspectul plăcut al mașinii de scanat Modela MDX-15, la care se mai adaugă înălțimea mică și structura compactă o face deosebit de atractivă pentru așa numitele aplicații de "birou". Ideal pentru bijutieri și proiectanții de produs.

Mașina de scanat Modela MDX 15 are următoarele caracteristici:

- Zona de lucru (X,Y,Z in mm): 150x100x60;
- Dimensiunile mesei de lucru (X,Y in mm): 170x110mm;
- Greutatea maximă aplicată pe masa de lucru: 0.5Kg;
- Dimensiunile exterioare (X,Y,Z in mm): 426x280x305mm;
- Greutate: 9.6Kg;



Fig. 2.2 Mașina de digitizat Modela MDX-15

Principalele caracteristici ale senzorilor piezo-electrici constau în:

- caracteristici metrologice foarte bune, în comparație cu senzori rezistivi și tensometrici,
- posibilitatea palpării punctelor după toate direcțiile,
- posibilitatea montării senzorului direct în pinola mașinii,
- precizie ridicată.

Poate digitiza obiecte din sticlă ce sunt imposibil de scanat pe mașinile cu laser. Modela MDX-15 oferă performanțe ridicate atât ca o mașină de digitizat, cât și ca o mașină de prototipare rapidă prin prelevare de material. Ca scanner, mașina este condusă de un calculator prin softul Dr. Picza. Acest soft permite setarea ariei ce se dorește a fi scanată și rezoluția (pasul) ce va fi folosită. Restul se face automat, incluzând chiar și conversia punctelor scanate într-un fișier CAD. Exportarea acestor puncte se poate face în formatele STL, DXF și VRML.

- Senzor: piezo-electric;
- Rezoluția: 0.05 la 5.00 mm pentru X și Y;
- Export fișier: STL, DXF, VRML;
- Tipul motorului: pas cu pas.

Masa de lucru a mașinii poate fi ușor dată jos, pentru a putea fi montat modelul ce urmează a fi scanat prin folosirea unui adeziv sau plastilină. Capul de scanat este conectat la mașină printr-un simplu cablu. Deplasarea după cele 3 axe se face cu ajutorul unui motor pas cu pas. Capul de frezat este prevăzut cu un motor (10 W, 6500 rpm) ce poate fi folosit numai pentru prelucrarea spumelor și a materialelor mai ușoare. [Roland, 2006]

### B) Mașini de măsurat tridimensional

Laboratorul de Măsurări Tridimensionale din cadrul catedrei TCM dispune de două mașini de măsurat tridimensional pe care au fost instalate soft-uri performante în domeniul controlului calității și accesoriile aferente.

**B1) Mașina de măsurat tridimensional TESA 3D MicroMS 343 cu acțiune manuală** (fig.2.4.a) are următoarele caracteristici :

- Precizie:  $E=4\div 5L/400$  ( $\mu\text{m}$ );
- Cap de măsurat Renishaw PH1, senzor TP2 și bilă de rubin;
- Volum de măsurare: X=350mm, Y=400mm, Z=300mm;
- Soft de măsurare Quindos v3.3/2002 (pachet complet);
- sistemul de acțiune tip bara Uhing.

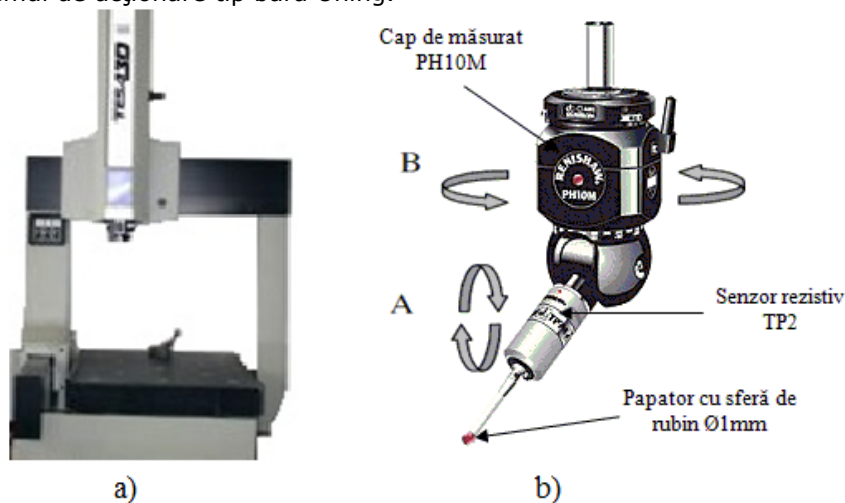


Fig. 2.4 Echipamente de măsurat manuale [Tulcan, 2006]  
a - Mașina TESA MicroMS 343, b - cap de măsurare orientabil manual

Capul de măsurat utilizat (PH10M-Renishaw) este unul orientabil manual (fig.2.4.b) și permite poziționarea în spațiu a elementului de palpăre prin rotirea manuală în plan orizontal (unghiul  $A=\pm 180^{\circ}$ ), respectiv în plan vertical ( $B=0\dots 105^{\circ}$ ), cu un increment de  $15^{\circ}$ . Pentru fiecare poziție în spațiu a palpatorului este necesară calibrarea acestuia [Tulcan, 2006].

**B2) Mașina de măsurat tridimensional TESA 3D MicroMS 343 DCC** (fig.2.5.a) are următoarele caracteristici:

- Precizie:  $E=3\div 5L/400$  ( $\mu\text{m}$ );
- Cap de măsurat Renishaw MH20i, senzor TP2;

- Volum de măsurare:  $X=350\text{mm}$ ,  $Y=400\text{mm}$ ,  $Z=300\text{mm}$ ;
- Soft de măsurare Quindos v3.3/2002 (pachet complet) cu posibilitate de utilizare fișiere CAD;

Capul de măsurat utilizat (MH20i-Renishaw) este unul orientabil automat (fig.2.5.b) și permite poziționarea în spațiu a elementului de palpăre prin rotirea automată în plan orizontal (unghiul  $A=\pm 180^{\circ}$ ), respectiv în plan vertical ( $B=0\dots 105^{\circ}$ ), cu un increment de  $7,5^{\circ}$ . Pentru fiecare poziție în spațiu a palpatorului este necesară calibrarea acestuia. În timpul măsurării piesei, sistemul trece de la o poziție la alta (unghiurile A și B sunt înregistrate) fără să trebuiască să recalibreze pozițiile deja calibrate datorită factorului de repetabilitate ridicată a poziționării ( $\pm 0,5\mu\text{m}$ ). Acest nivel ridicat de repetabilitate este valabil chiar când senzorul sau diferite combinații de extensii ale acestuia sunt schimbate automat în timpul procedurii de măsurare [Tulcan, 2006].

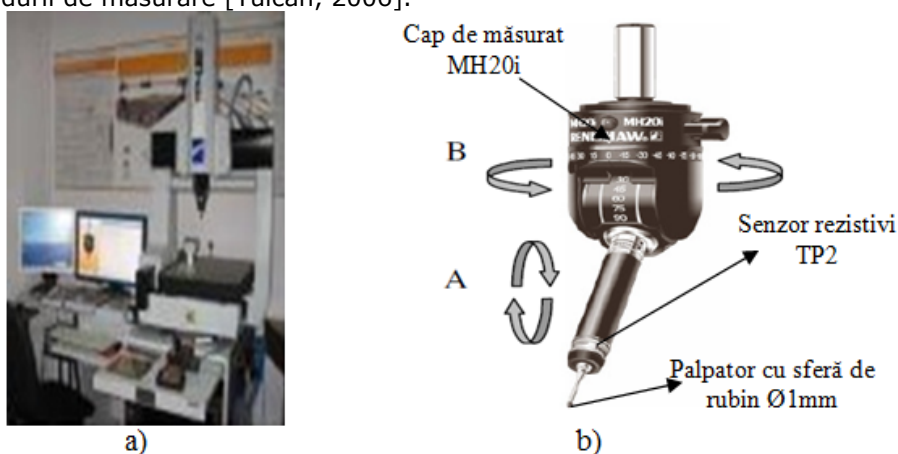


Fig. 2.5 Echipamente de măsurat automate [Tulcan, 2006]  
a - Mașina TESA MicroMS 343 DCC, b - cap de măsurare orientabil automat

### C) Mașina de scanat cu laser Roland LPX-600

Laserul este un dispozitiv optic care generează un fascicul coerent de lumină. Fasciculele laser au mai multe proprietăți care le diferențiază de lumina incoerentă produsă de exemplu de Soare sau de becul cu incandescență:

- monocromaticitate — un spectru în general foarte îngust de lungimi de undă;
- direcționalitate — proprietatea de a se propaga pe distanțe mari cu o divergență foarte mică și, ca urmare, capacitatea de a fi focalizate pe o arie foarte mică;
- intensitate — unii laseri sunt suficient de puternici pentru a fi folosiți la tăierea metalelor.

Mașina de scanat cu laser Roland LPX-600 (fig.2.6) este un scanner tridimensional care folosește o metodă non-contact de scanare a formei suprafețelor solide și are la bază *principiul triangulației*.

**Principiul triangulației** se utilizează la măsurarea precisă a distanței, utilizând senzori de triangulație laser. Denumirea procedurii vine de la faptul că raza emisă, raza reflectată și distanța între emițătorul laser și camera (*senzorul*) CCD formează un triunghi (fig.2.7). Presupune emiterea unui fascicul laser de la



Fig. 2.6 Mașina de scanat cu laser Roland LPX-600

instrument și reflexia acestuia de pe suprafața obiectului (de măsurat) spre o lentilă colectoare situată pe instrument, la o distanță cunoscută față de emițător. Lentila focusează imaginea spotului laser reflectat, care este detectată și colectată de o cameră (senzor) CCD. Poziția spotului imagine pe pixelii camerei este apoi procesată pentru a determina distanța până la obiect. Unghiul fascicului laser emis este înregistrat de aparat iar distanța între sursa laser și camera CCD este cunoscută de la calibrarea instrumentului. Distanța se la instrument până la obiect ( $D$ ) este determinată geometric din lungimea bazei ( $b$ ) și unghiurile înregistrate ( $\alpha$  și  $\beta$ ) [Savu, 2010].

$$D = \frac{b \cdot \sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{b \cdot \sin \alpha}{\sin (\alpha + \beta)} \quad (2.1)$$

Folosirea programul inclus Dr.Picza 3 oferă posibilitatea scanării în una din cele două variante: plană sau cu rotație. Se poate alege varianta cea mai potrivită formei obiectului de scanat. Prin combinarea celor două metode, se pot scana obiecte cu forme complexe. În plus față de cele două moduri de bază de scanare, sunt furnizate și funcțiile de line-segment și scanare punctuală. Folosind Dr.Picza 3, se pot extrage date pentru liniile de contur și punctele obiectelor. Folosind aceste date pentru operații de modelare tridimensională cu ajutorul CAD sau altor programe de grafică computerizată face posibilă reducerea timpului și efortului operațiilor de modelare.

Scannerul laser Roland LPX-600 are următoarele caracteristici [Roland, 2005]:

- Dimensiunea mesei: Ø254mm
- Suprafața maximă de scanare:
  - scanare rotativă: Ø254mm, h=406,4mm
  - scanare plană: 230mm, h=406,4mm
- Parametrii de scanare: - scanare rotativă: circumferință de 0,18 ÷ 0,9mm
  - scanare plană: Px= 0,2÷254mm, Pz= 0,2÷406,4mm
- Capacitate maximă de încărcare: 5 kg
- Laser: - lungimea undei 645-650 nm,
  - producția maximă: mai puțin de 0,39μW
- Metodă de scanare: triangulație cu rază spot
- Viteza de operare: - viteza de rotație a mesei 9rpm
  - viteza de rotație cap de scanat 4,48rpm
  - viteza de mișcare cap de scanat 37mm/s
- Temperatura de operare: 10-40°C
- Repetabilitatea scanării: ±0,05mm

Unele obiecte pot fi greu de scanat datorită materialului din care sunt făcute sau din cauza culorii ori a altor proprietăți. Se pot scana obiecte care sunt: opace, colorate, din materiale ca lemn, ghips, argilă, lut etc. Nu se pot scana obiecte transparente, colorate în culori închise, lucioase și cu suprafețe puternic

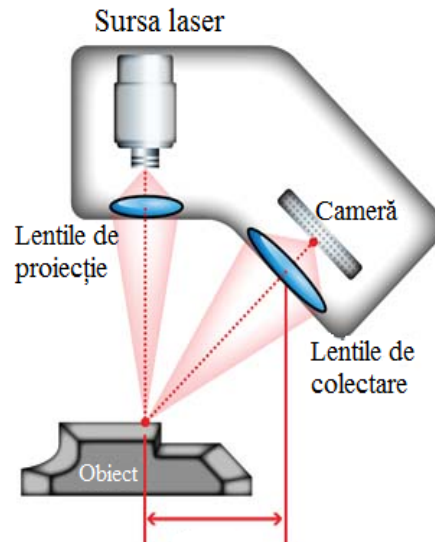


Fig. 2.7 Principiul triangulației laser [Sniderman, 2010]

reflectorizante. În aceste cazuri se aplică un strat de vopsea sau pudră pe suprafața piesei pentru a face scanarea posibilă.

**D) Mașina CNC de frezat cu viteze ridicate Premium 3020**

Mașina CNC Premium 3020 (fig.2.8) este realizată de firma I-MES, fiind destinată frezării, gravării sau măsurărilor la precizie ridicată și are următoarele caracteristici:

- Gabarit: 1400x1700x800mm;
- Masa de lucru: 320x250mm;
- Cursa de lucru: 250x190x180mm;
- Turația max.: 40000rot/min;
- Repetabilitate: <0,005mm;
- Precizia: 0,001mm;
- Materiale prelucrate: aluminiu, oțel, titan, plastic, cupru, aur. [I-mes, 2012]



Fig. 2.8 Mașina de frezat cu viteze ridicate Premium

**E) Mașina de prototipare rapidă ISEL GFM 4433**

Mașina CNC GFM 4433 (fig.2.9) este o mașina CNC simplă [Iliescu M., 2009], echipată cu motoare pas cu pas și o carcasa mare de protecție. În această mașina este integrat un controller CNC pentru 3 axe. Mașina este ideală procesului de prototipare rapidă prin prelevare de material.

Freza GFM 4433 are următoarele caracteristici:

- Gabarit: 780x1010x1740 mm;
- Cursa de lucru: 430x330x160 mm;
- Turația: 11000 – 25000 rot/min;
- Materiale prelucrate: spume, lemn, plastic, aluminiu. [Isel, 2012]



Fig. 2.9 Mașina de prototipare rapidă ISEL GFM 4433

### 3. CERCETĂRI PRIVIND METODE DE OBTINERE A MODELULUI VIRTUAL

„Datorită evoluțiilor rapide și a necesității aducerii pe piață a produselor noi într-un timp cât mai rapid, tehnologiile de proiectare și producție au evoluat în ultimii ani într-un ritm extrem de rapid. Dintre elementele de bază ce permit reducerea acestui timp, pot fi menționate ingineria simultană (Concurrent Engineering), proiectarea asistată de calculator (Computer Aided Design – CAD), ingineria asistată de calculator (Computer Aided Engineering – CAE), fabricația asistată de calculator (Computer Aided Manufacturing – CAM), prototiparea rapidă (Rapid Prototyping – RP) și prototiparea virtuală (Virtual Prototyping – VP). Aceste tehnici permit concomitent și introducerea pe piață a unor produse tot mai apropiate de cerințele consumatorilor, reducerea costurilor de producție, paralel cu îmbunătățirea permanentă a calității produselor.”[Tamaș, 2008]

La ora actuală elementele hard necesare captării formei (camere video, laser, calculatoare performante) sunt tot mai accesibile, iar algoritmi necesari achiziționării datelor sunt tot mai evoluți și performanți. Scanarea și digitizarea sunt tehnicile principale utilizate în momentul actual în vederea introducerii formei modelului fizic în calculator. Metodele simple, cum ar fi măsurarea poziției punctelor caracteristice unei piese, urmată de introducerea lor manuală în programele CAD sunt de asemenea posibile și deseori utilizate. În cazul obiectelor fizice cu forme complexe modelarea fără utilizarea scanerelor și digitizoarelor specializate este de neconceput.

**Obiectivul acestui capitol** este cel de a cerceta și evalua noi metode de introducere a formei unui obiect fizic într-un mediu virtual evitând folosirea metodelor prezentate anterior. Vor fi analizate și testate două metode ce nu implică cumpărarea unor echipamente relativ scumpe.

#### 3.1. Metoda Sketch based 3D modeling

##### 3.1.1. Introducere

Soft-urile pentru modelare 3D permit crearea și manipularea de obiecte geometrice extrem de sofisticate și au fost adoptate pe scară largă de către inginerii specialiști în industrie. Abilitățile ingineresti, artistice, arhitecturale își au rolul lor în metodologia de lucru, dar un nou set de abilități trebuie să fie dezvoltat pentru a lucra cu instrumente digitale. În fază incipientă de proiectare a unui model 3D, hârtia și creionul sunt de obicei folosite pentru a crea rapid și modifica pe conceptul schițelor. Cu toate acestea, nu există în prezent nici un mecanism pentru integrarea cu ușurință a schițelor într-un concept digital 3D. În prezent, schițele nu sunt folosite pentru nimic mai mult decât puncte vizuale de referință în faza de proiectare, dar pot fi transformate în modele 3D de către artiști [Tsang, 2004], [Kara, 2007].

Desenele 2D [Aberdeen, 2006], [Mengoni, 2009] au fost documentele primare a procesului de proiectare/fabricație, caz în care principiile de proiectare și geometrie descriptivă au fost dezvoltate și aplicate la probleme de inginerie. Desenele 2D joacă încă un rol important în ingineria practică și în multe cazuri

servesc ca documentația finală care ghidează producția, fabricarea și asamblarea produselor. Cu toate acestea, desenele 2D sunt limitate, tind să extindă în mod inutil timpul ciclului de proiectare, ceea ce compromite calitatea produselor și pot crește costurile de fabricație. Aceste puncte slabe sunt reprezentate de dificultatea inspectării desenelor 2D pentru a le verifica corectitudinea, fără a crea prototipuri fizice și folosirea în mod direct a lor în procesele următoare. Astfel este uneori necesară transformarea desenelor 2D în desene 3D și astfel îndepărtând dezavantajele menționate mai sus.

Recente cercetări au căutat să îmbunătățească această situație, prin crearea unei interfețe care permite utilizatorilor să schițeze rapid și direct modelul digital [Curless, 1997]. În timp ce aceste eforturi sunt un mare pas înainte, aceste interfețe nu sunt încă un mod adecvat de înlocuire a neprețuitului creion și hârtie.

Se va prezenta în continuare un stil de modelare 3D, care include integrarea imaginilor scanate, schițe. Aceste imagini servesc ca un ghid pentru utilizator, atunci când modelează obiectul virtual. Metoda se numește **Sketch based 3D modeling** și putem spune că face parte din metodologia **Top-Down** [Hanimn, 2005]. Se poate spune acest lucru pentru că proiectantul se folosește de schițele desenate pentru a-și face o imagine mai amplă asupra noului produs.

Această metodă are la bază crearea modelelor 3D desenând curbele importante ale produsului, alcătuind astfel scheletul acestuia. Curbele ce alcătuiesc scheletul sunt trasate în funcție de schițele 2D, acestea reprezintă principalele vederi ale produsului: vederea de sus, vederea din față și respectiv o vedere din lateral. În fig.3.1 este prezentată metodologia acestei abordări.

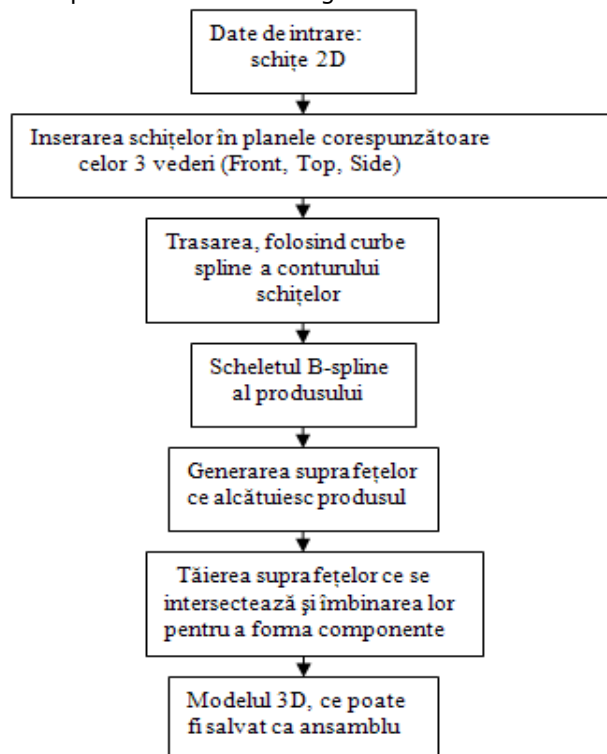


Fig. 3.1 Etapele metodei Sketch based 3D modeling

Modelarea cu ajutorul suprafețelor (Surface modeling) definește nu numai marginile obiectului 3D, dar și suprafețele sale. În modelarea cu suprafețe pot fi generate două tipuri de suprafețe: suprafețe B-spline și respectiv Bezier. Suprafețele cu formă liberă (Freeform) nu au puncte fixe, acestea își pot schimba forma după placul proiectantului rezultând astfel noi modele. Proiectantul poate modifica forma suprafeței modificând poziția punctelor în spațiu (fig.3.2). Suprafețele pot reprezenta o gamă largă de forme care nu pot fi măsurate, doar approximate. Modelele formate din suprafețe nu au proprietatea de a li se calcula volumul sau greutatea.

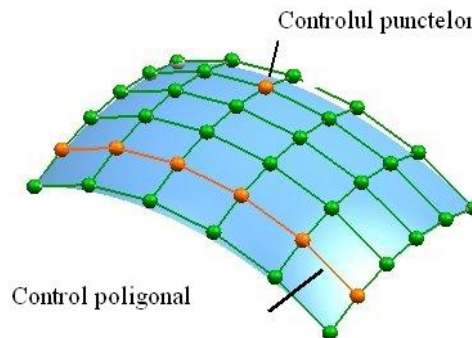


Fig. 3.2 Surface modeling

### 3.1.2. Studiu de caz

**Obiectivul propus:** În acest subcapitol folosind metoda *Sketch based 3D modeling* s-a conceput modelul virtual al unui mouse, pornind de la poze ale acestuia. **Obiectivul studiului de caz** a fost de a obține modelul virtual al mouse-ului, urmărindu-se precizia dimensională ci doar de a obține o formă cât mai apropiată cu modelul fizic. Mouse – ul propus pentru modelare este prezentat în fig.3.3.



Fig. 3.3 Mouse –ul Dell

Modelarea a fost realizată în SolidWorks 2008, soft ce a devenit un standard în proiectarea 3D, fiind folosit de 75% din utilizatorii. Pentru a asigura o mai mare productivitate, SolidWorks oferă unelte speciale pentru proiectarea de zi cu zi. Astfel există aplicații specifice pentru proiectanții de mașini și utilaje, matrițe, tablă îndoită și bunuri de larg consum, oferind metodologii și cicluri de proiectare familiare pentru aceste domenii. SolidWorks permite importul de fișiere în 23 de formate distincte (native ca: ProE, UG, DWG, ș.a., și neutre ca: IGES, STEP, ACIS, STL, VDA, etc.).

În modulul Surface se pot edita suprafețe folosind opțiunile din bara de comenzi (fig.3.4). Aceste comenzi au fost explicate și detaliate în cartea d-lui Conf.dr. ing. Valentin Seiculescu.





Fig. 3.4 Bara de instrumente ale modulului Surface [Seiculescu, 2007]

1. Suprafață extrudată – (Extrude Surface): creează o suprafață extrudată,
2. Suprafață de revoluție – (Revolve Surface): creează o suprafață de revoluție prin rotirea unei curbe deschise sau închise, în jurul unei axe,
3. Suprafață maturată – (Swept Surface): creează o suprafață „măturată” prin translatarea unei curbe deschise sau închise în lungul unei curbe directoare,
4. Suprafață de potrivire – (Lofted Surface): creează o suprafață de potrivire pe două sau mai multe profile închise sau deschise,
5. Suprafață plană – (Planar Surface): creează o suprafață plană în interiorul unui set de muchii,
6. Petec de suprafață – (Filled Surface): creează un petec de suprafață mărginită pe un set de muchii, schițe sau curbe,
7. Suprafață decalată – (Offset Surface): creează suprafețe decalate pornind de la una sau a mai multe suprafețe alăturate continue,
8. Suprafață mediană – (Mid Surface): creează o suprafață mediană între două suprafețe decalate,
9. Suprafață riglată – (Ruled Surface): creează o suprafață riglată pe două curbe necoplanare,
10. Șterge fețe – (Delete Faces): șterge fețe dintr-un solid pentru a crea suprafețe pe muchii, sau șterge suprafețe dintr-un model de tip suprafață,
11. Înlocuiește fețe – (Replace Faces): înlocuiește o față într-un solid sau model de tip suprafață,
12. Suprafață de separație – (Parting Surface): creează o suprafață de separație între miez și cavitate, definite prin model de tip suprafață,
13. Suprafață de legătură – (Knit Surface): creează o suprafață de legătură între două suprafețe adiacente neintersectate,
14. Move/Copy – copiază sau mută suprafețe îmbinate,
15. Extinde o suprafață – (Extended Surface): extinde o muchie, sau muchii multiple, sau o suprafață a unei suprafețe, bazat pe condiții de frontieră și tipul extensiei,
16. Tăiere suprafață – (Trim Surface): taie o suprafață la intersecția cu o altă, cu un plan, sau o schiță,
17. Anulează o tăiere a unei suprafețe – (Untrim Surface): extinde o suprafață pe baza extinderii unui petec de suprafață sau a unei muchii,
18. Racordare – (Fillet): creează racorduri interne sau externe la muchia de intersecție a două suprafețe,
19. Îngroșă – (Thicken): creează un solid prin asocierea grosimii la o suprafață sau mai multe suprafețe adiacente cu condiția ca acestea să fie legate. [Seiculescu, 2007]

#### Pașii parcurși în procesul de modelare:

**1. Introducerea fișierelor \*.jpg** (fig.3.5) – S-au făcut poze din cele trei vederi esențiale (Front, Bottom, Top, Side), urmând măsurarea gabaritului mouse-ului. Având aceste informații pozele au fost introduse în schițe folosind funcția *Insert Image*. Imaginile au fost dimensionate pentru a se încadra în gabaritul piesei.

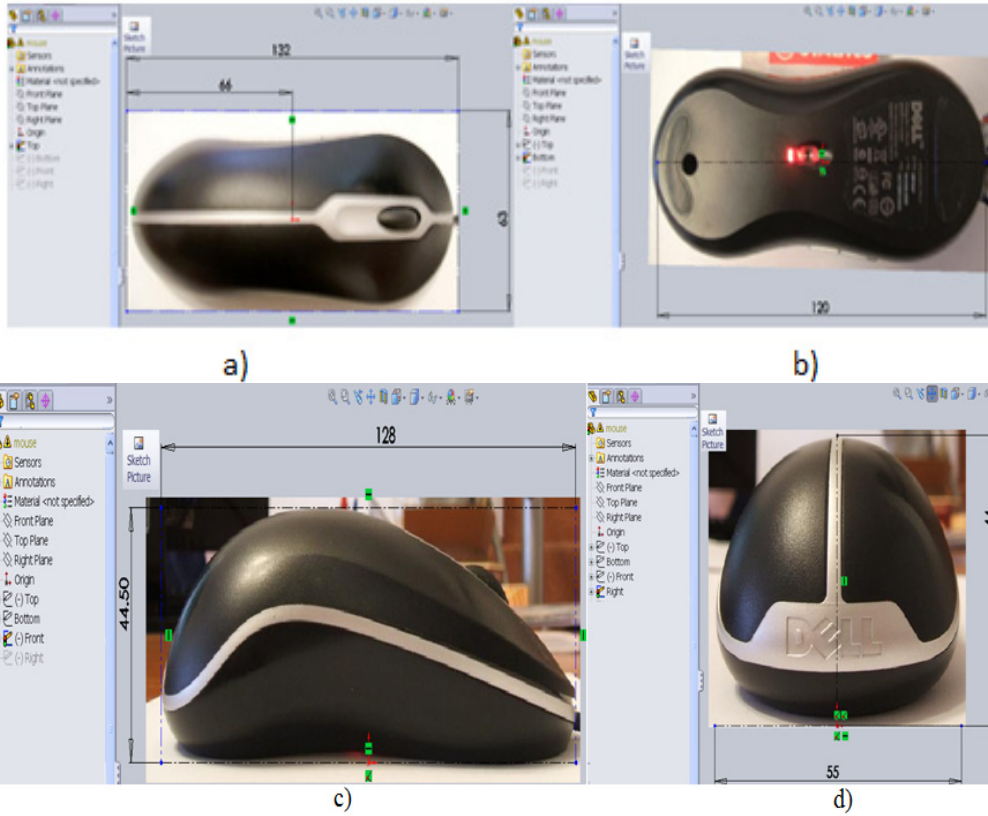


Fig. 3.5 Inserarea imaginilor în schițe  
a - schița Top, b - schița Bottom, c - schița Front, d - schița Right

După inserarea schițelor, folosind vederea izometrică vom avea următoarea imagine a ecranului (fig.3.6), ce ne oferă o vedere de ansamblu asupra mediului de lucru.

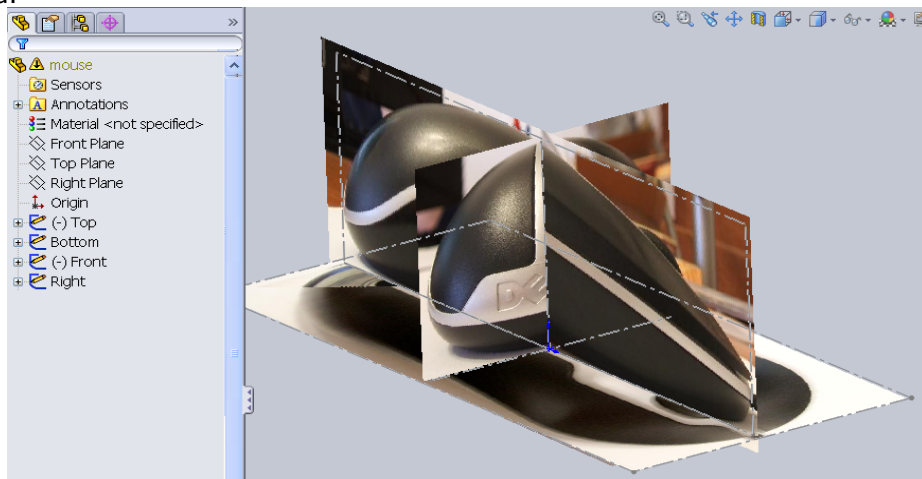


Fig. 3.6 Vederea izometrică

**2. Trasarea și formarea scheletului piesei** - În etapele ce urmează s-a lucrat cu ecranul împărțit în două, folosindu-se în același timp vederea de sus (Top View) și de vederea din față (Front View). Se creează mai multe schițe ce copiază cât mai exact liniile ce definesc conturul produsului, obținându-se în final scheletul modelului virtual. În fig.3.7.a este prezentat modul de trasare a unei curbe B-spline, obținând conturul dorit prin modificarea poziției punctelor ce-o compun. Scheletul (fig.3.7.b) este compus atât din schițe transpuse în plane, dar și din schițe 3D, toate având ca elemente curbele B-spline. Se lucrează inițial doar pe o jumătate a modelului virtual, piesa fiind simetrică în raport cu planul *Front*. S-a apelat la funcția *Mirror* pentru a crea partea simetrică și astfel obținându-se într-un mod elegant modelul de bază.

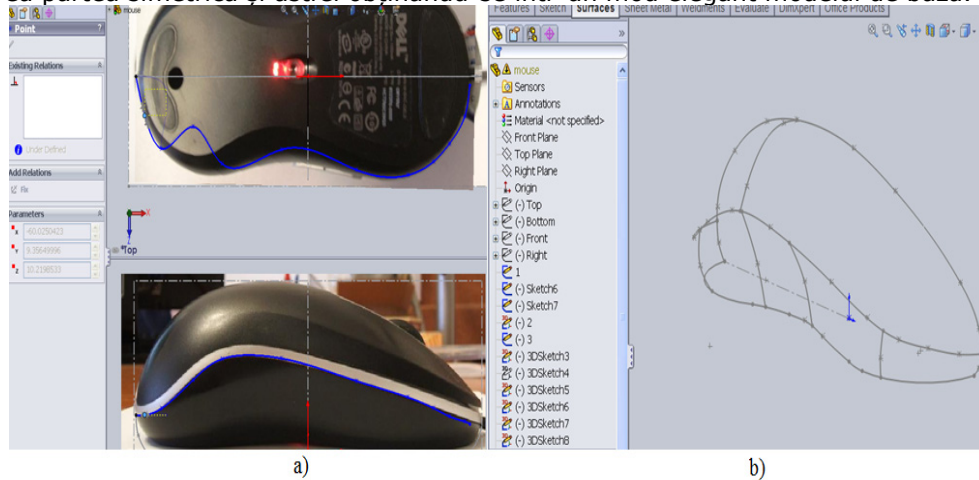


Fig. 3.7 Construirea scheletului B-spline

a - aranjarea punctelor ce compun curba spline după conturul pozei,  
b - scheletul mouse-ului

**3. Crearea suprafețelor** - Principalele funcții folosite au fost cele de *Loft* (fig.3.8.a) și *Sweep Surface* urmând folosirea funcțiilor *Mirror* și *Planar surface* pentru a crea un contur închis format din suprafețe (fig.3.8.b).

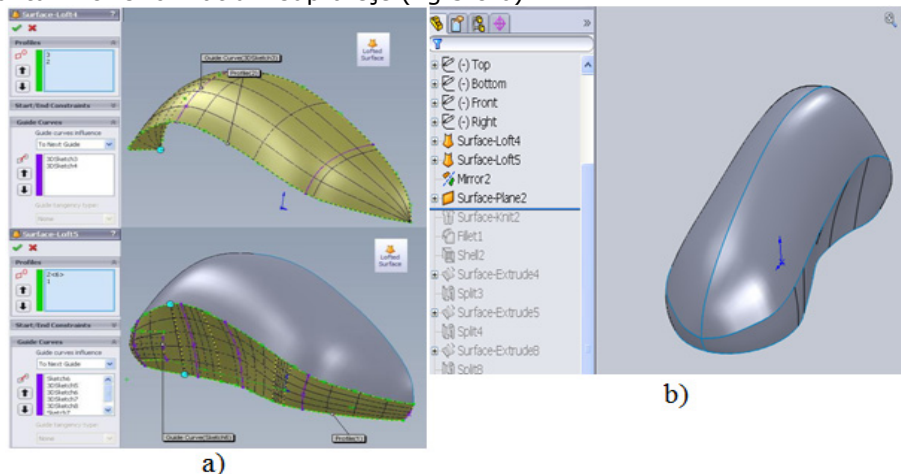


Fig. 3.8 Modelarea folosind suprafețe

a - crearea suprafețelor, b - modelul virtual format din suprafețe

În **Capitolul 1** au fost definite două metodologii de proiectare *Top-Down* și *Bottom-Up*, reprezentând o introducere pentru a înțelege eficiența etapelor ce urmează. Din acest moment se face observată metodologia *Top-Down*, deoarece acum avem ansamblul (nu este pe deplin detaliat) și vom extrage, folosindu-ne de suprafețe de separație și apoi de funcția *Split*, (fig.3.9) componentele acestui produs, urmând a fi luate apoi fiecare în parte și detaliate pentru a le face fabricabile.

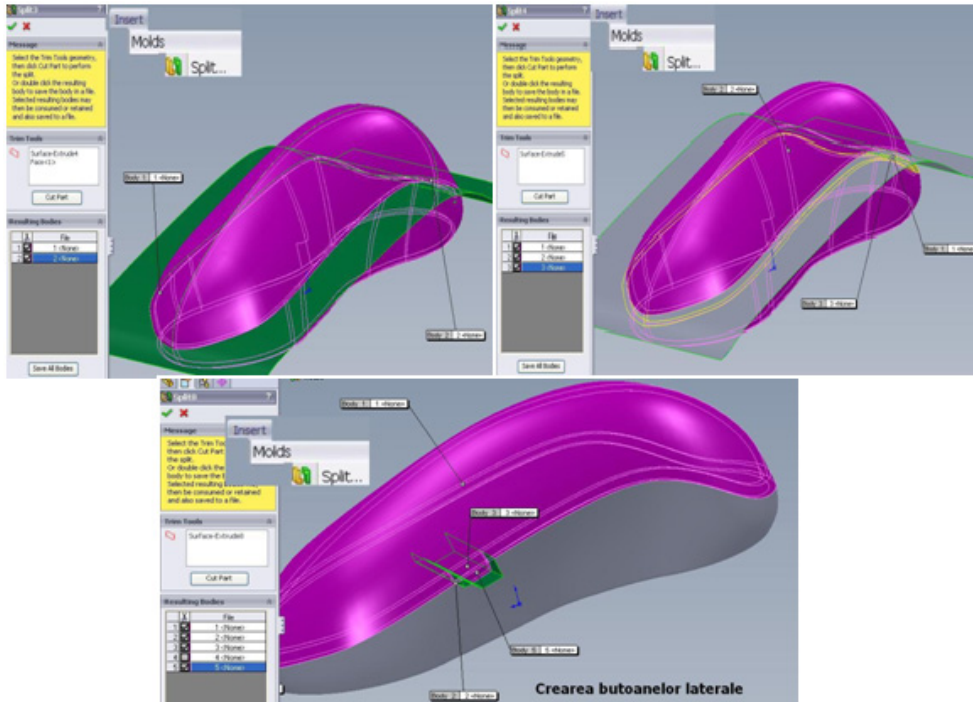


Fig. 3.9 Definirea componentelor modelului virtual

După ce au fost scoase toate componentele necesare, acestea se pot salva separat de ansamblu și se poate începe procesul de proiectare a lor din punct de vedere tehnologic (fig.3.10).

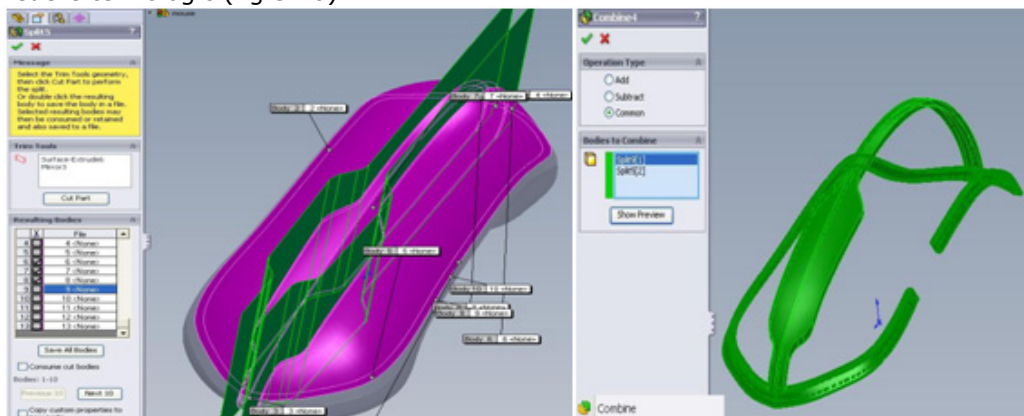


Fig. 3.10 Extragerea componentelor și începerea procesului de detaliere tehnologică

Aceasta metoda este folosită pentru a construi modele cu forme complicate care sunt greu de proiectat direct din curbe spline. În general, o schiță este o modalitate rapidă de a înregistra o idee pentru o utilizare ulterioară. Schițele unui artist pot servii ca o modalitate de a încerca idei diferite și de a stabili noi concepte, mai ales atunci când procesul de proiectare este unul costisitor și consumator de timp. Finalizarea acestei metode constă în obținerea unui nou produs asemănător cu cel de la care s-a pornit (fig.3.11).

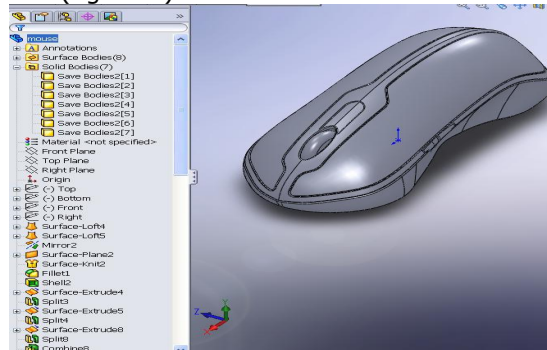


Fig. 3.11 Ansamblul final

### 3.1.3. Cercetări privind acuratețea metodei

*Obiectivul propus:* Acest subcapitol urmărește realizarea unui model virtual folosind metoda *Sketch based 3D modeling* și compararea acestuia cu rezultate obținute prin digitizare și măsurători tridimensionale. Pașii parcurși în procesul de modelare folosind metoda *Sketch based 3D modeling* sunt asemănători cu cei prezentați în studiu de caz anterior, dar datorită complexității piesei au fost folosite alte funcții de modelare.

După ce s-au obținut pozele mouse-ului care să reprezinte cele patru vederi (Front, Bottom, Top, Side) și s-a măsurat gabaritul lui, s-au introdus imaginile în schițe folosind funcția *Insert Image*. Imaginile au fost dimensionate pentru a se încadra în gabaritul piesei (fig.3.12).

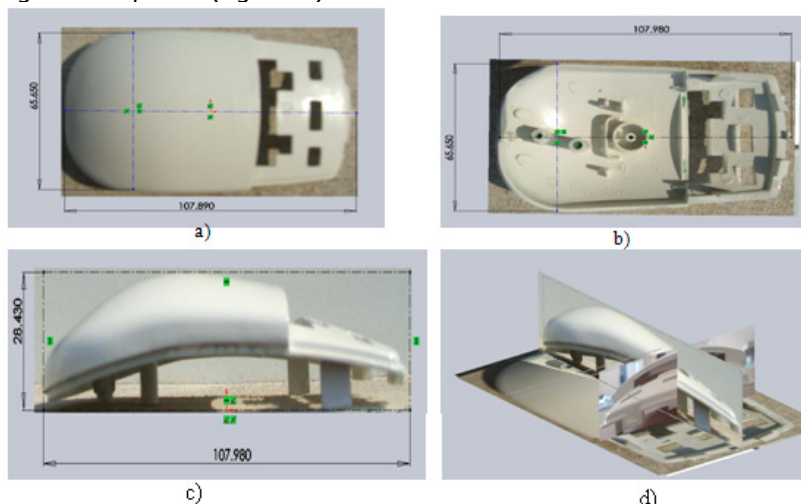


Fig. 3.12 Inserarea imaginilor în schițe  
a - schița Top, b - schița Bottom, c - schița Front, d - vederea izometrică

Se creează mai multe schițe ce copiază cât mai exact liniile ce definesc conturul produsului obținând în final scheletul B-spline (fig.3.13).

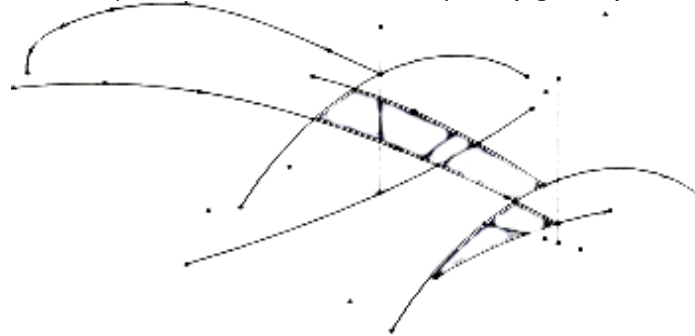


Fig. 3.13 Scheletul mouse-ului

Principalele funcții folosite au fost cele de *Sweep*, *Planar Surface* și *Surface Extrude*. În fig.3.14 se observă folosirea schițelor 3D create anterior și obținerea unui model virtual compus din suprafețe.

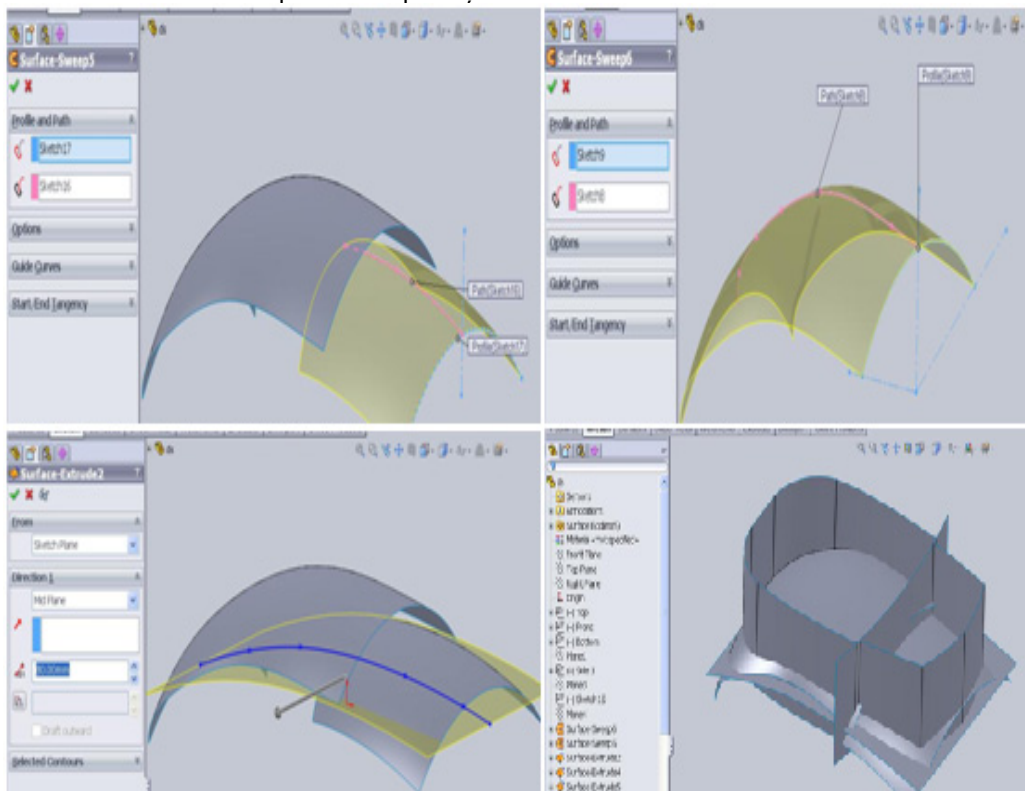


Fig. 3.14 Obținerea suprafețelor ce vor crea modelul virtual

După o serie de cosmetizări și realizarea detaliilor tehnologice s-a obținut modelul din fig.3.15.

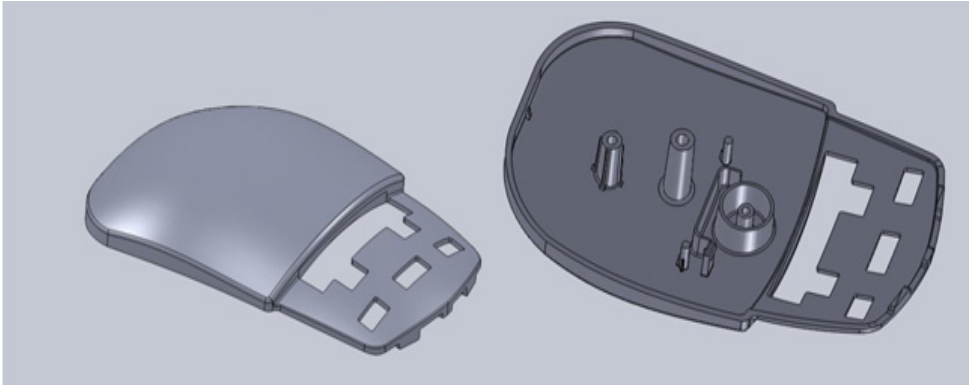


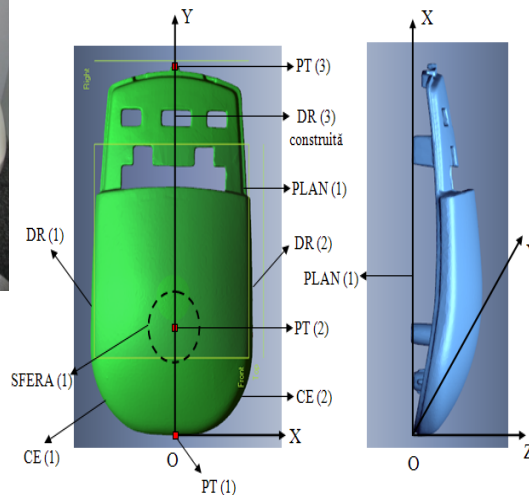
Fig. 3.15 Modelul virtual obținut în urma folosirii metodei Sketch based 3D modeling

A doua metodă folosită este cea prin măsurare tridimensională pe mașina TESA 3D MicroMS 343 DCC. Procedura constă în instalarea piesei pe masa mașinii de măsurat și măsurarea unor elemente geometrice necesare pentru alinierea piesei și pentru determinarea sistemului de referință al acesteia (fig.3.16). Au fost măsurate elementele ce definesc gabaritul piesei și înregistrate poziția unor detalii tehnologice (nervuri, bosaje, etc.)



Fig. 3.16 Măsurarea piesei cu mașina TESA 3D MicroMS 343 DCC [Cosma, 2008.a]

DIST(1) = PT(1) - PT(3);  
 DIST(2) = CE(1) - CE(2);  
 DIST(3) = max [CE(1) - CE(2)];  
 DIST(4) = PLAN(1) - PT(2);  
 DIST(5) = PT(3) - max CE(3);  
 DIST(6) = PT(3) - max CE(2);  
 DIST(7) = PLAN(1) - SFERA(1).



Ultima metodă folosită a fost cea de digitizare a piesei pe mașina Modela MDX-15, mașină ce captează puncte prin contactul unui senzor piezoelectric cu piesa și convertirea punctelor (cu ajutorul soft-ului Dr. Picza) în suprafețe triunghiulare ce se asociază cu formatul unui fișier destinat prototipării rapide (\*.STL).

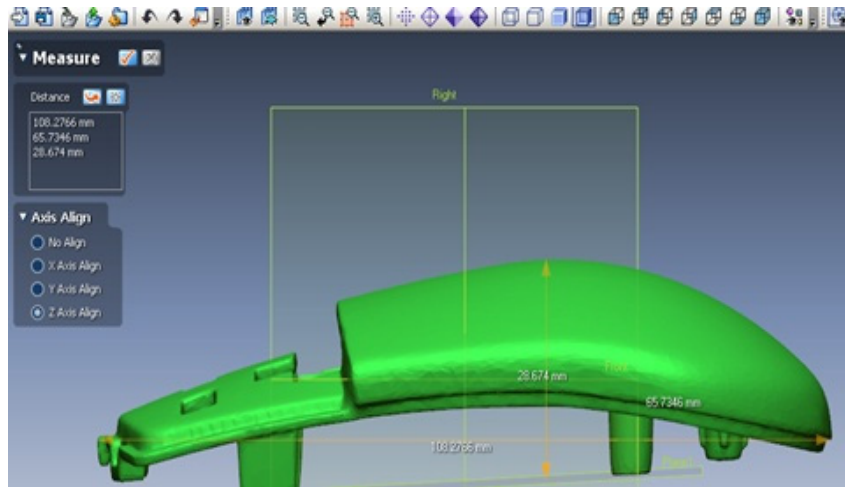


Fig. 3.17 Dimensiunile modelului virtual (digitizat) [Cosma, 2008.a]

Efectuând măsurători pe modelul obținut prin digitizarea celui fizic și respectiv pe modelul virtual rezultat din reconstrucție pe bază de poze, s-au obținut următoarele rezultate. (fig.3.17 și fig.3.18).

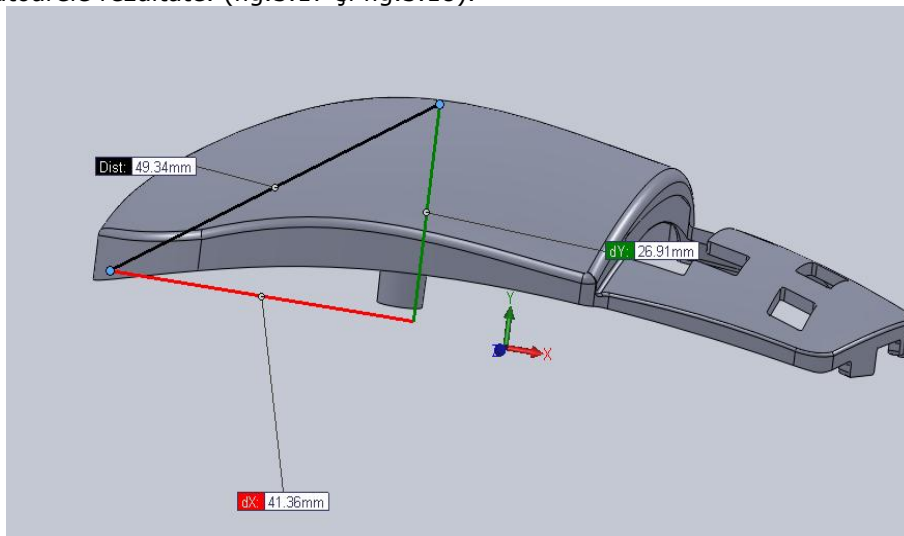


Fig. 3.18 Dimensiunile modelului virtual reconstruit pe baza pozelor

Au fost puse în aplicație trei metode de obținere de informații asupra unei componente a cărei documentație lipsește. Una din metode se rezumă la măsurarea obiectului folosind o platformă operațională destul de scumpă și ce necesită un mediu de lucru controlat și studii calificate pentru a o folosi. Rezultatele sunt cele mai precise din punct de vedere dimensional. Rezultatele obținute reprezintă valorile de referință cu care vor fi comparate celelalte metode. A treia metoda presupune obținerea modelului virtual prin digitizarea obiectului fizic, aceasta fiind o metodă simplă de folosit, dar relativ scumpă.

Comparația dimensiunilor obținute prin cele trei metode este prezentată în Tabel 3.1.



Tabel 3.1 Compararea rezultatelor

Axa	Valoare măsurată [mm] – referință	Valoare digitizată [mm]	Valoare model CAD construit cu metoda Sketch based 3D modeling [mm]
X	107,9875	108.037	107.24
Y	65.6573	65.697	64.36
Z	28.4314	28.481	26.91

Datorită formei nedefinite a componentei nu poate fi măsurată și reconstruită virtual forma exactă și nu avem prea multe valori pentru a verifica precizia dimensională a metodei *Sketch based 3D modeling*. Astfel am considerat ca valoare de referință (fiind cea mai apropiată de realitate) cu o precizie de  $\approx \pm 0,05\text{mm}$  este modelul virtual obținut prin digitizare. Acest model a fost comparat cu cel obținut prin metoda Sketch based 3D modeling, rezultatele fiind prezentate în fig.3.19. Pot fi observate deplasări dimensionale de **+2,5mm** și respectiv **-1,5mm**. Rezultatele prezintă o hartă tridimensională cu coduri de culori a diferențelor dimensionale dintre obiecte.

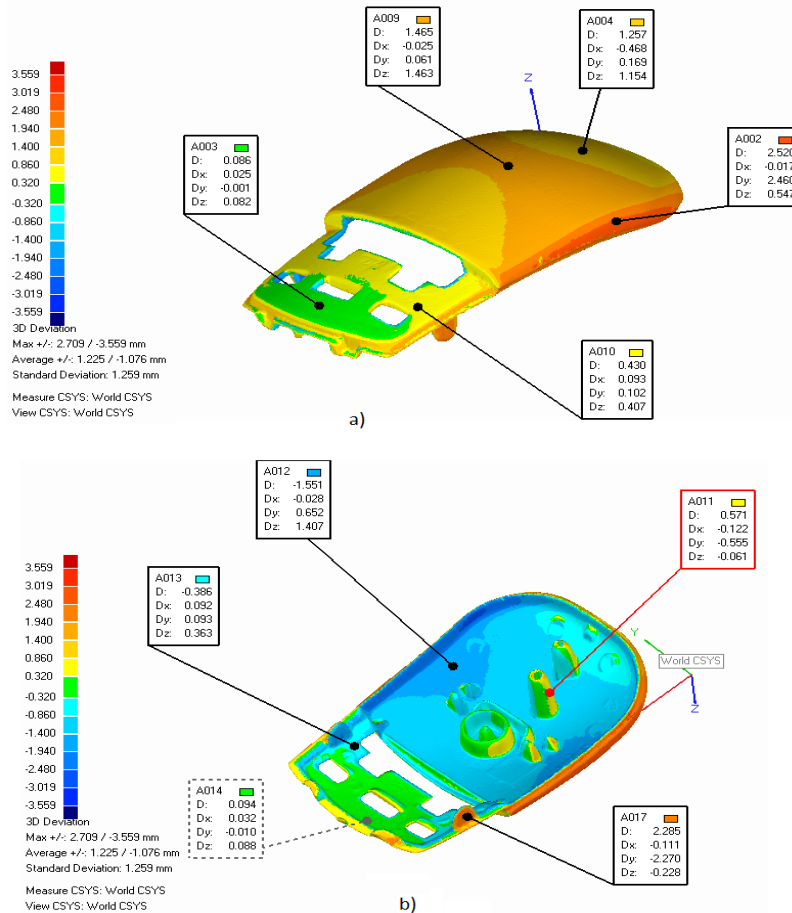


Fig. 3.19 Rezultatele comparației 3D

Din cele două comparații dimensionale prezentate putem spune că metoda Sketch based 3D modeling se bazează foarte mult pe priceperea proiectantului în folosirea suprafețelor și combinarea schițelor cu imagini ale unui obiect fizic. Nu este o metodă precisă din punct de vedere dimensional, dar poate fi integrată în procesul de proiectare pentru a aproxima forma unei piese/componente.

### **3.2. Dezvoltarea obiectelor virtuale folosind programe NC**

În acest subcapitol este prezentată o metodă de modelare a unui obiect virtual care poate fi folosită în tehnica Reverse Engineering, în sensul că modelul parametric se va face cu ajutorul informațiilor primite de la un program NC. Programul NC conține informații despre strategiile utilizate pentru crearea piesei, parametrii tehnologici de aşchiere, (viteza și avansul de aşchiere) tipul și caracteristicile sculei aşchietoare și cel mai important lucru în rezolvarea problemei – traiectoria sculei. Toate aceste informații sunt utile pentru operatorul unei mașini unelte în etapa de producție, dar vom folosi unele dintre ele pentru a recrea un model virtual.

*Obiectivul acestui subcapitol* este de a demonstra că, cu o înțelegere corectă a unui program NC și unele cunoștințe într-un soft CAD este posibil să se creeze un model virtual. Codurile G și coordonatele pe X, Y și Z formează traiectoria de deplasare a sculei și împreună cu informații referitoare despre tipul și caracteristicile sculei aşchietoare, vor ghida proiectantul în crearea modelului virtual 3D.

#### **3.2.1. Introducere**

Introducerea controlului numeric cu calculator (CNC) a schimbat radical mașinile unelte și implicit industria prelucrătoare datorită avantajelor sale principale: producție mai rapidă, precizie ridicată și repetabilitate. Cu această tehnologie este posibilă proiectarea și fabricarea produselor care acum câțiva ani părea imposibilă. Datorită dezvoltării tehnologiei, mașinile CNC sunt controlate cu fișiere create de soft-uri CAD/CAM astfel încât un model virtual poate parcurge drumul „proiectare → producție” fără a pierde mult timp. [Vinoda, 2006]

Odată cu dezvoltarea sistemelor CAD au devenit disponibile interfețe pentru schimbul de date geometrice cum ar fi IGES, STEP sau VDA-FS, care au simplificat și mai mult procesul de prelucrare a geometriei. Calculatoarele joacă acum un rol important în acest proces, în special în cazul în care există mai multe precedente accesibile proiectantului pentru a fi utilizate în dezvoltarea de noi produse și existența unei mari colecții de standarde care pot fi accesate din memoria calculatorului.

În fabricile moderne din zilele noastre se folosesc mașini CNC. Proiectarea unei componente este automatizată folosind programe CAD. Soft-urile produc fișiere care pot fi interpretate de alte sisteme ce aparțin unor mașini unelte automatizate pentru a trece la etapa de producție. Funcționarea unei mașini-unelte CNC este controlată de un program NC scris într-un anumit limbaj [Omiroua, 2007]. Un program NC conține o secvență ordonată de blocuri, fiind în esență comenzi specificând în detaliu mișcările sculei aşchietoare ce urmează a fi executate, precum și operațiunile auxiliare (Ex.: rotirea axului on/off, turația și avansul de aşchiere ales) care vor fi realizate de către mașina uneltă. Când un program este executat procesorul mașinii va întâlni prima comandă din program, o va executa și apoi trece la a doua comandă. Procesorul va executa fiecare comandă în aceeași ordine întâlnită. Funcțiile G și M îndeplinesc mai multe roluri în funcție de cele două cifre

care le însoțesc. Aceste funcții au fost standardizate și sunt de obicei cunoscute sub numele de coduri „G și M”. În general *codurile G*, numite *codurile funcției de pregătire*, definește un tip de mișcare sau un mod de funcționare. *Codurile M* numite *coduri de funcții diverse*, pornesc/opresc diverse operații (lichidul de răcire, rotirea axului, etc.) [Smid, 2003].

Elementele de bază ale programului NC sunt:

- a. *funcțiile pregătitoare*: unități de măsură, interpolări, programare absolută sau incrementală, compensare sculă așchietoare, etc.,
- b. *coordonate*: trei translații și trei axe de rotație,
- c. *parametri de așchiere*: avansul și turația,
- d. *instrumente de control*: diametrul sculei, aranjarea în magazia de scule, operația de schimbare a sculei,
- e. *funcții de așchiere*: cicluri de găurire, cicluri de frezare, cicluri de filetare, cicluri de alezare și planul de siguranță,
- f. *controlul agentului de răcire*: răcire pornit/oprit, inundație, pulverizare,
- g. *diverse funcții de control*: rotire ax on/off, schimbarea sensului de rotație, controlul clemelor elastice pentru prinderea sculei, etc..

Primul pas în crearea unui program NC este de a planifica toate punctele prin care va trebui să treacă scula așchietoare în vederea creării formei dorite. Dezvoltarea și încorporarea de postprocesoare capabile să genereze traiectoria sculei în sisteme CNC este un obiectiv important în domeniul de producție asistată de calculator. Postprocesoarele se bazează pe eficiența și precizia de urmărire a traiectoriei, capabile să satisfacă cererea tot mai mare a nevoii industriale pentru prelucrarea pieselor de formă complexă. În modelarea solidă marginile generate ce devin traiectoria sculei sunt de fapt curbe tridimensionale (3D). În etapa de prelucrare interpolări eficiente sunt necesare pentru a conduce scula de tăiat de-a lungul traiectoriei generate [Omiroua, 2005].

În zilele noastre, pentru fabricarea unui model fizic pe o mașină CNC vom începe construirea modelului virtual folosind un soft CAD și prelucrarea datelor într-un soft CAM vom obține programul NC scris în limbaj de programare *G-code* (fig.3.20).

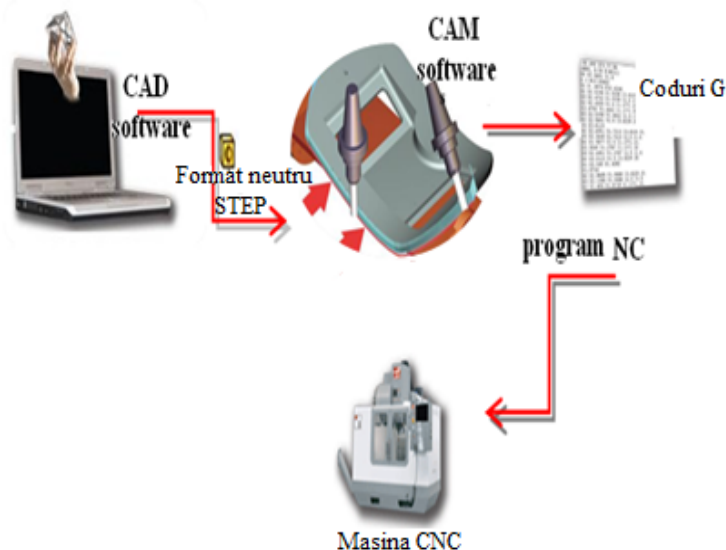


Fig. 3.20 Calea de la un model virtual la unul fizic folosind soft-uri CAD/CAM

*NC Import* destinat programului SolidWorks este un program ce permite importarea de programe destinate mașinilor unelte CNC, adică fișiere cu format *\*.nc*. Acest program adițional oferă posibilitatea de a importa traiectoria sculei în SolidWorks. Mașini CNC în toată lumea folosesc postprocesoare numerice pentru a converti instrucțiunile sculei programate, în fișiere ce poartă diferite extensii (.tap, .nc, .ncc sau .cnc). Programele NC constau dintr-o secvență de coduri cu date parametrice pentru a ajunge la o descriere exactă a traiectoriei. Mișcările programate destinate sculei așchietoare din fișiere NC sunt convertite în curbe spline, arc sau cerc și adăugate la documentul activ ca o schiță 3D într-o componentă sau în ansamblu.

### 3.2.2. Metoda propusă

Ceea ce urmează este interpretarea mea de folosire a programului *NC Import* folosit într-un soft CAD (SolidWorks). Scopul aplicației suplimentare nu este specificat de proprietari, numai ceea ce se poate face cu el [Sycode, 2010]. Lucrând în domeniul RE propun o cale de a obține modele virtuale folosind programe NC importate în soft CAD (fig.3.21).

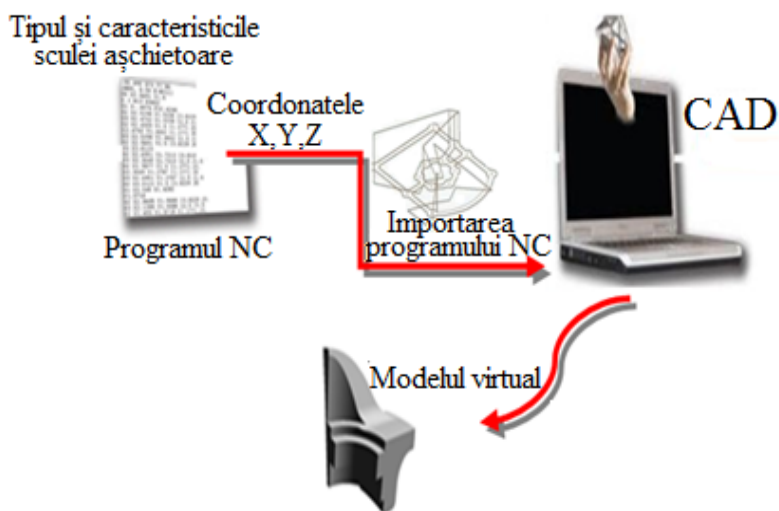


Fig. 3.21 Traseul propus pentru a obținere modelul virtual

Pentru crearea modelului virtual trebuie să știm tipul și diametrul sculei așchietoare, informații furnizate de programul NC. În cele ce urmează vor fi prezentate o serie de piese care conțin buzunare, insule extrudate, forme freeform și găuri. În fig.3.22.a este prezentată traiectoria creată cu ajutorul fișierului NC, în forma unei schițe 3D ce conține curbe spline. Din program putem vedea că faza de finisare a operației de frezat se face utilizând o freză cilindro-frontală de 6 mm și nu există funcția de compensare (G41 sau G42), ceea ce înseamnă că axa frezei este perpendiculară pe traiectorie. Pentru crearea conturului real al modelului virtual trebuie să facem o decalare de 3 mm față de liniile importate. Se observă că importând fișierul NC planele principale (Front - Față, Top - Deasupra și Right - Dreapta) sunt așezate în originea aleasă de către tehnolog în momentul conceperii tehnologiei de fabricație.

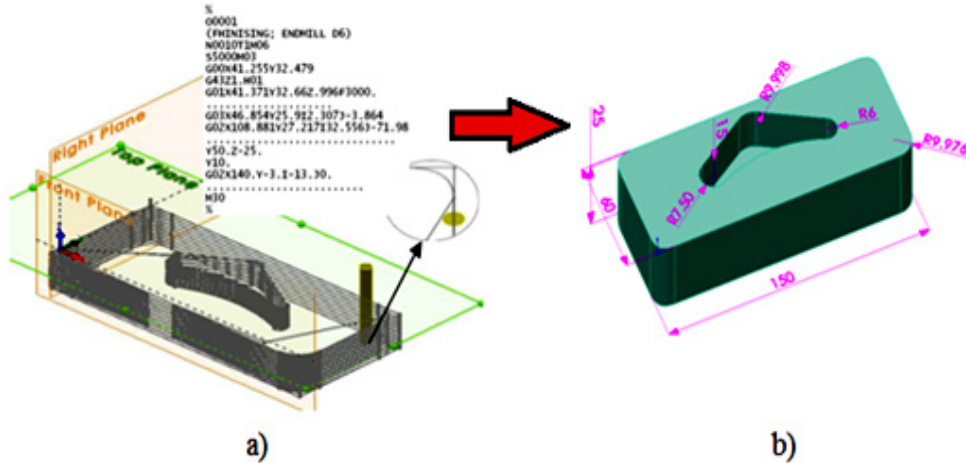


Fig. 3.22 Formarea modelului virtual

a - programul NC importat în soft CAD, b - modelul virtual cu dimensiunile rezultate

Modelul 3D a fost creat folosind planul din față (Top) pentru schițarea conturului real. Crearea corpului principal a fost făcută prin extrudarea schiței până la un punct (funcția - *Up to vertex*), astfel aflând grosimea piesei. În același fel a fost făcut și buzunarul rezultând în cele din urmă model virtual (fig.3.22.b).

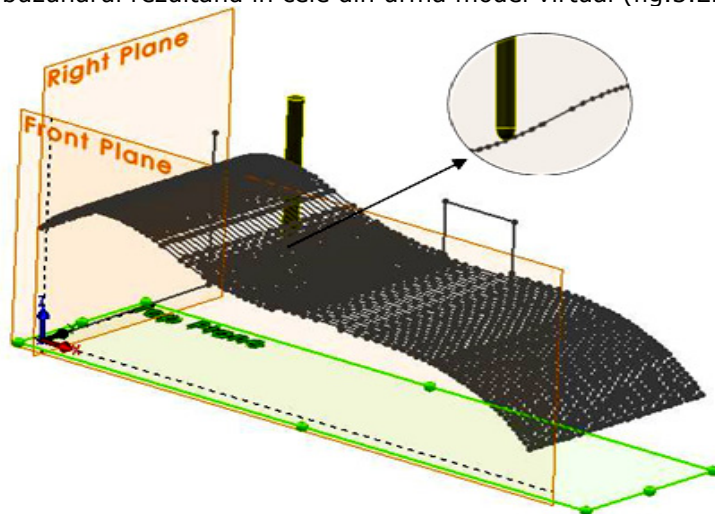


Fig. 3.23 Traectoria rezultată în urma folosirii strategiei surface milling

Următoarea etapă a fost să se realizeze modelul virtual al unei forme libere (freeform) pornind de la un program care utilizează strategia de frezare pe suprafață (*surface milling*). Programul NC ne oferă tipul și caracteristicile sculei așchietoare – freza sferică de 6 mm (fig.3.23). În acest caz, modelul 3D a fost creat folosind suprafețe deoarece schițele conținând curbe spline deschise nu pot fi extrudate cu funcția *Extrude Boss*. După crearea suprafețelor ce formează corpul s-a aplicat funcția de *Knit Surface* pentru îmbinarea suprafețelor și transforma în solid modelul 3D.

S-a testat dacă programul înțelege ciclul G81 de găurire. Programul NC folosit execută corect faza de finisare și găurirea a șase găuri de  $\varnothing 5,4$  mm străpunse și șase găuri de  $\varnothing 4,2$  mm pe o adâncime 7 mm (fig.3.24.a.).

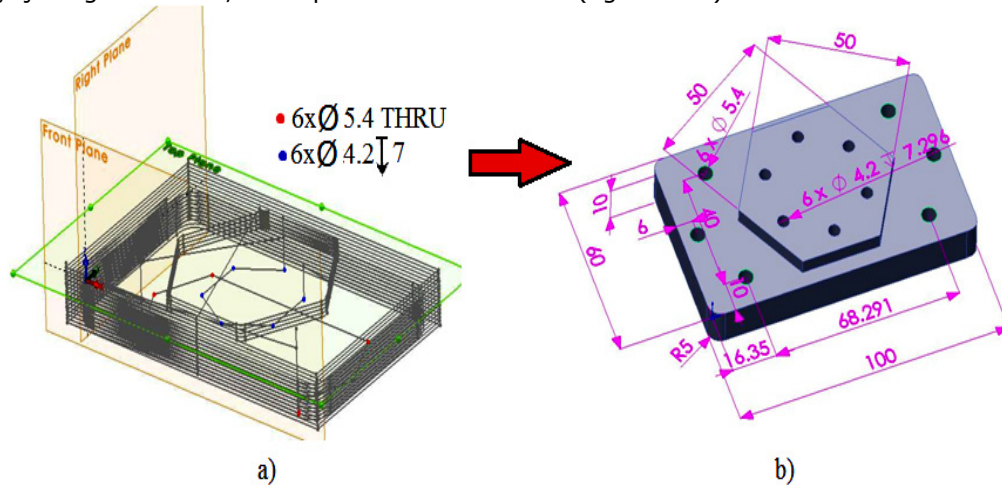


Fig. 3.24 Formarea modelului virtual  
 a - traiectoria rezultată în urma fazei de finisare și 2 cicluri de găurire,  
 b - modelul virtual cu dimensiunile rezultate

Dacă aruncăm o privire la dimensiunile rezultate putem vedea unele probleme ce au apărut la razele de colț, adică una din ele este R9.976 mm. De ce a apărut această problemă? În timpul operației de frezare, freza are o abordare tangențială față de semifabricat, atunci când este importat programul NC această mișcare apare ca o curbă B-spline cu mai multe puncte de control (fig.3.25) în loc de o rază normală. Din cauza acestei aproximări vom avea dimensiune menționată mai sus.

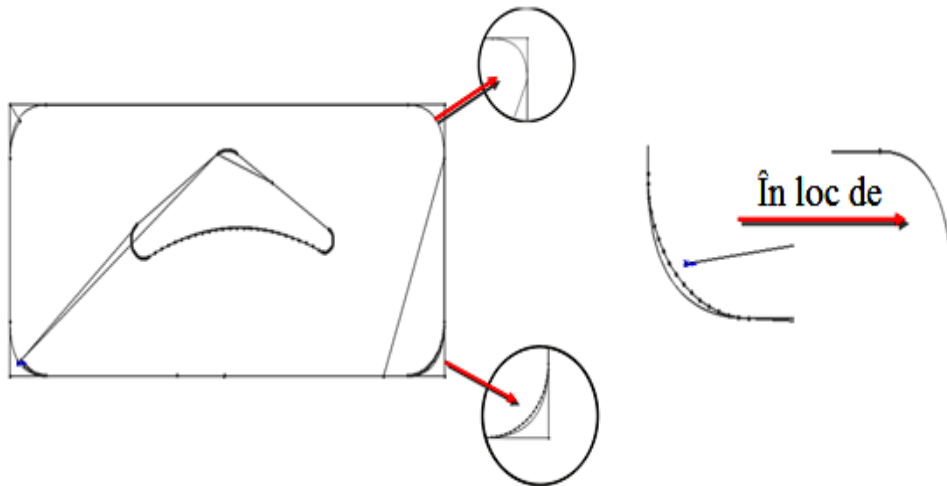


Fig. 3.25 Aproximarea razelor folosind curbe spline

### 3.3. Concluzii

Per-ansamblu în acest capitol s-a prezentat o metodă (Top-Down) folosită în mai multe domenii de activitate: auto, aeronautică, programare, management și organizare, arhitectură, etc. În domeniul mecanic, după ce proiectantul este informat de nevoile clientului, specialiștii din echipa lui fac un studiu al produselor asemănătoare. Un plan de proiectare este făcut și desene preliminare ale produsului sunt apoi schițate pe baza planului întocmit. Schițe mai concludente sunt alese pentru a fi îmbunătățite și studiate, iar apoi clientului i se prezintă studiul făcut până în prezent. Clientul alege designul favorit, iar apoi proiectantul se ocupă de alegerea materialului și specificațiile de finisare și preparare a ansamblului. Folosind metoda Sketch based 3D modeling proiectantul începe crearea ansamblului folosind în mod direct schițele create anterior, modelând întreg ansamblul și apoi subansamblele și componentele ce-l compun. Din cele două comparații dimensionale prezentate putem spune că metoda Sketch based 3D modeling se bazează foarte mult pe priceperea proiectantului în folosirea suprafețelor și combinarea schițelor cu imagini ale unui obiect fizic. Nu este o metodă precisă din punct de vedere dimensional, dar poate fi integrată în procesul de proiectare pentru a aproxima forma unei piese/ componente.

A doua metodă de modelare poate fi folosită ca metodă de reproducere a unui model virtual în cadrul procesului RE. Modelul parametric poate fi reconstruit folosind informațiile primite de la un program NC. În crearea tehnologiei de fabricație, tehnologul va alege sculele ce se potrivesc pentru realizarea piesei, va aplica corecțiile necesare și va decide strategia cea mai potrivită care va determina traiectoria sculei așchietoare. Proiectantul ar putea acum: să-nceapă proiectarea de la zero, sau să caute un model apropiat și fișierele asociate – programe NC. Acestea ar putea conține informații valoroase despre strategiile utilizate în fabricația piesei, parametrii tehnologici (viteza și avansul de așchiere), tipul de instrument și caracteristici și cel mai important lucru în această metodă – traiectoria sculei așchietoare.

## 4. CERCETĂRI PRIVIND PERFORMANȚELE MAȘINILOR DE SCANAT/DIGITIZAT

**Obiectivul acestui capitol** este de a testa capacitățile echipamentelor de captare a formei și de a determina factorii ce influențează procesul de scanare și digitizare. Vor fi determinați factorii ce influențează calitatea suprafețelor virtuale captate de mașina Roland LPX-600, se va cerceta capacitatea captării detaliilor de formă pe ambele echipamente și cel mai important se va afla precizia mașinilor de captare a formei și abaterile dimensionale ce pot apărea în urma procesului de cosmetizare sau a procesului de îmbinare a mai multor scanări.

### 4.1. Scanarea pe mașina Roland LPX-600

Obținerea unui model virtual cât mai precis în comparație cu modelul fizic de la care s-a pornit, a fost mult timp de domeniul dispozitivelor de achiziție prin contact. Aceste sisteme au fost puternic apreciate deoarece se bazează pe tehnologia de măsurat în coordonate ce este bine cunoscută și care oferă garanția unei achiziții precise. Cu toate acestea, sistemele de achiziție prin contact sunt criticate datorită timpului îndelungat necesar achiziției și datorită constrângerilor de digitizare a obiectelor de dimensiuni mici. Necesitatea de a schimba tehnologia de achiziție se justifică și datorită lucrului cu obiecte din materiale fragile sau moi. Aceste inconveniente justifică investiția puternică în dezvoltarea scanării cu laser [Tornincosa, 2005].

Tehnologia de scanare cu laser permite achiziționarea norului de puncte, ce reprezintă descrierea digitală a unui obiect fizic. Fiecare punct este descris printr-o poziție spațială în coordonate X, Y, Z, față de originea scannerului [Sternberg, 1997]. Fiecare sistem de scanare cu laser este prevăzut cu un soft specific pentru gestionarea și analiza datelor, capabil să transforme datele în formate de fișier specifice domeniului. Această tehnologie este folosită în numeroase domenii: construcții civile, arheologie, arte plastice, aeronautică, etc. [Reznicek, 2008].

Laboratorul de Măsurări Tridimensionale din cadrul UPT dispune de un sistem de scanat cu laser 3D (Roland PICZA LPX-600) ce folosește o metodă fără contact pentru a genera modele 3D. LPX-600 scanează obiecte folosind lumina laser. Scanarea se face prin rotirea obiectului și prin deplasarea pe verticală a laserului și a camerei de captare.

Soft-ul, care reprezintă puntea de legătură între mașina de scanat și calculator este Dr. PICZA 3. Acesta permite scanarea folosind două strategii diferite:

- *Scanare rotativă* (fig.4.1.a): este ideală pentru scanarea rapidă a obiectelor cilindrice sau sferice. În cazul în care obiectul are suprafețe plane cu detalii de formă ce nu pot fi captate prin această strategie, se va folosi funcția *Rescan* numai pe suprafața dorită.
- *Scanare plană* (fig.4.1.b): este ideală pentru scanarea obiectelor plane, goale, cu suprafețe înclinate sau detalii mari. Este posibilă scanarea din maxim 6 plane și unghiuri diferite.



Strategia de scanare este selectată în funcție de obiectul ce trebuie scanat. Prin combinarea ambelor strategii de scanare este posibilă scanarea obiectelor complexe.

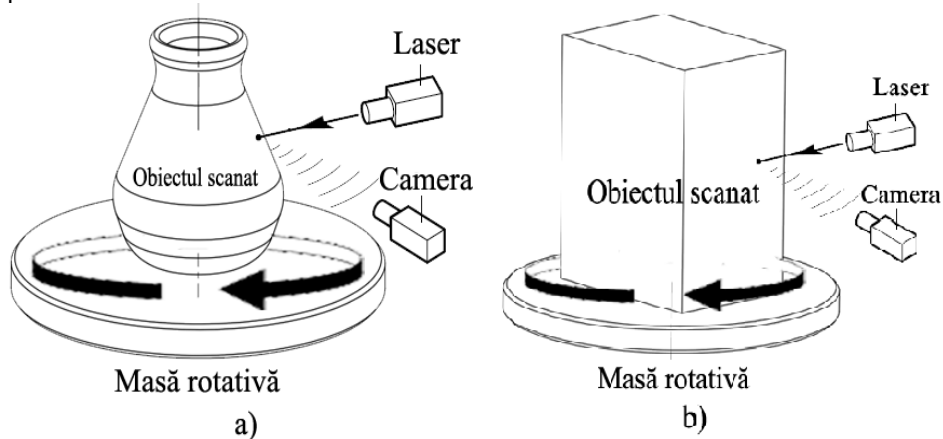


Fig. 4.1 Strategii de scanare  
a - Scanare rotativă, b - Scanare plană

### Metodologia de lucru pe mașina de scanat

#### 1. Pregătirea obiectului pentru scanare și așezarea lui pe aparat

Nu se poate scana orice obiect. Unele pot fi imposibil de scanat din cauza compoziției sau formei. Pe mașina LPX-600 nu pot fi scanate suprafețe unde raza laser atinge un unghi superficial mai mic sau egal cu  $20^{\circ}$  (fig.4.2). În cazul unei sfere (minge de ping-pong) scanarea rotativă a fost reușită, dar lipsește partea de sus și de jos.

**Not OK**

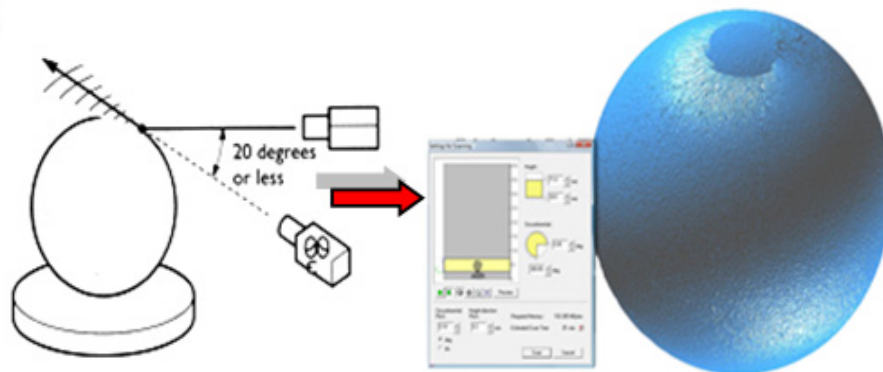


Fig. 4.2 Unghiul superficial minim [Roland, 2005]

**Mărimea obiectelor** - nu se pot scana obiecte care depășesc prin lățime sau înălțime suprafața de scanat ( $H=406,4\text{mm}$  și  $L=254\text{mm}$ ). În acest caz se poate lua în calcul separarea obiectului în mai multe părți.

**Materialul** - se pot scana obiecte care sunt: opace, colorate, din materiale ca lemn, ghips, argilă, lut etc.. Nu se pot scana obiecte transparente, colorate în culori închise, lucioase și cu suprafețe puternic reflectorizante (fig.4.3). Suprafața materialului afectează datele scanate - cu cât suprafața este mai fină cu atât rezultatele vor fi mai bune.

O suprafață nefinisată, sau cu rugozitate ridicată va genera imagini neclare (cu goluri). Unele obiecte pot fi greu de scanat datorită materialului din care sunt făcute sau din cauza culorii ori a altor proprietăți, în aceste cazuri se aplică un strat de suprafață pentru a face scanarea posibilă.

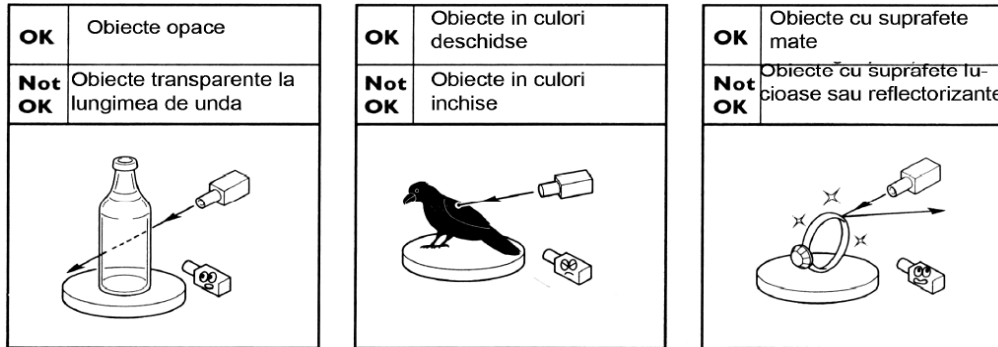


Fig. 4.3 Tipuri de piese ce pot fi/nu pot fi scanate [Roland, 2005]

*Poziționarea pe masa mașinii* - modul de fixare, poziționare pe masa mașinii și strategia de scanare a obiectului sunt selectate de operator pentru a obține un rezultat bun într-un timp cât mai scurt. Poziționarea se referă la distanța între suprafața exterioară a piesei și axa mesei scannerului precum și distanța de la nivelul 0 al mesei până în zona de scanare pe verticală. Dacă grupul laser-senzor se afla în nordul mesei atunci raza efectivă de scanare se află până la 10mm în sudul axei mesei, iar pe verticală scanarea este posibilă începând cu 3mm deasupra mesei (fig.4.4).

Prinderea se face în general cu plastilină asigurându-se că plastilina nu afectează forma obiectului scanat. În cazul în care acest lucru nu este posibil va trebui aplicată prin lipire o nouă componentă ce va fi dintr-un material lucios sau de culoare închisă (pentru a nu fi scanat). Poziționarea obiectului trebuie să fie perpendiculară pe masa mașinii, iar fața ce se dorește a fi scanată să fie astfel poziționată încât raza laserului să pice perpendicular pe ea.

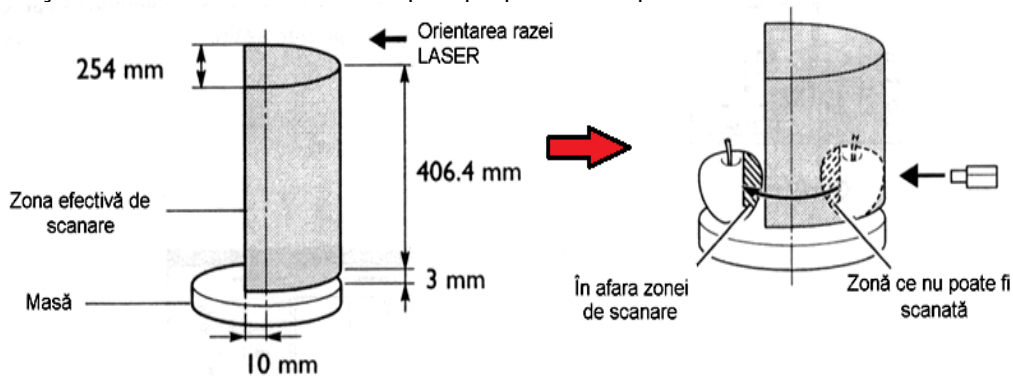


Fig. 4.4 Montarea obiectului de scanat [Roland, 2005]

**2. Scanarea** - se folosește soft-ul Dr.Picza 3, iar în funcție de forma piesei se alege una din cele două strategii de scanare. După o primă scanare se pot selecta zone ce nu au fost scanate complet și porni o operație de rescanner.

**3. Înregistrarea datelor** - se creează rețeaua poligonală, soft-ul permițând folosirea unor funcții elementare de ștergere sau umplere cu suprafețe triunghiulare.

**4. Salvarea datelor** - Soft-ul Dr. Picza 3 oferă o gamă largă de unelte pentru prelucrarea, optimizarea și exportarea datelor în formate neutre cu care se poate lucra (STL, IGES, etc.).

#### 4.1.1. Cercetări privind performanțele de scanare pe mașina Roland LPX-600

Experimentul constă în determinarea factorilor ce influențează calitatea suprafețelor rezultate în urma scanării unor piese (fig.4.5). Pentru acest experiment s-au folosit piese din plastic și aluminiu, având forme cilindrice și prismatice, strategiile de scanare fiind rotativă și plană, parametrii de scanare Px și Pz (pasul pe X și respectiv Z). Datele obținute au fost prelucrate cu soft-ul Minitab.

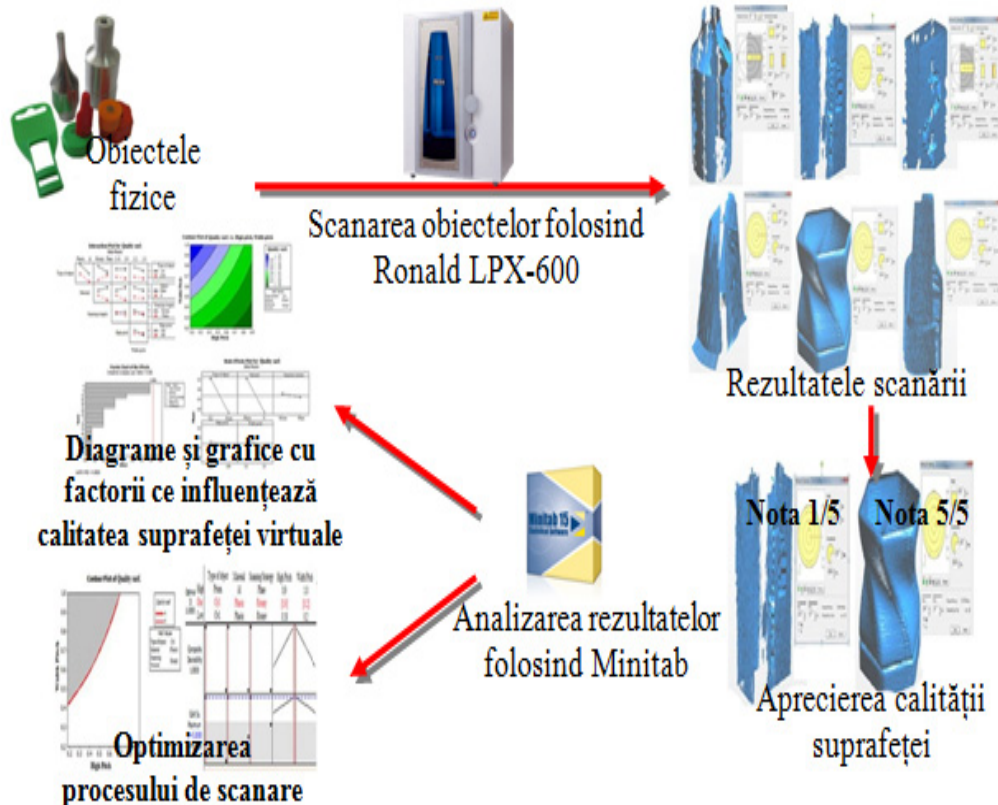


Fig. 4.5 Pașii parcurși în cadrul experimentului

Pașii parcurși:

**1. Planificarea experimentului** (DOE – Design of Experiments) – oferă o metodă pentru a investiga simultan efectele mai multor factori asupra unei valori de răspuns.

Astfel, experimentul constă în scanarea a 16 obiecte, iar valoarea de răspuns este calitatea suprafeței obiectului scanat.

Au fost aleși 5 factori ce pot influența rezultatul scanării:

1 – tipul piesei: cilindrică sau prismatică

- 2 - materialul: plastic sau aluminiu  
 3 - strategia de scanare: rotativă sau plană  
 4 - parametrii de scanare: pasul pe axa X ( $P_x=0,18 \div 0,9$  mm)  
 5 - parametrii de scanare: pasul pe axa Z ( $P_z = 0,2 \div 1$  mm)

Fractional Factorial Design				Alias Structure	
Factors:	5	Base Design:	5, 16	Resolution:	V
Runs:	16	Replicates:	1	Fraction:	1/2
Blocks:	1	Center pts (total):	0		
Design Generators: E = ABCD					
I + ABCDE					
A + BCDE					
B + ACDE					
C + ABDE					
D + ABCE					
E + ABCD					
AB + CDE					
AC + BDE					
AD + BCE					
AE + BCD					
BC + ADE					
BD + ACE					
BE + ACD					
CD + ABE					
CE + ABD					
DE + ABC					

Fig. 4.6 Planificarea experimentului

Tabel 4.1 Planificarea experimentului factorial

Std. Order	Run Order	CenterPt	Blocks	Tip piesa	Material	Strateg. Scan.	Pz [mm]	Px [mm]	Calit. Supraf.
1	1	1	1	cil	Plastic	Rotativa	0.18	1	3
4	2	1	1	prism	Al	Rotativa	0.18	1	1
9	3	1	1	cil	Plastic	Rotativa	0.9	0.2	5
8	4	1	1	prism	Al	Plana	0.18	0.2	2
16	5	1	1	prism	Al	Plana	0.9	1	1
11	6	1	1	cil	Al	Rotativa	0.9	1	3
5	7	1	1	cil	Plastic	Plana	0.18	0.2	4
6	8	1	1	prism	Plastic	Plana	0.18	1	3
14	9	1	1	prism	Plastic	Plana	0.9	0.2	3
10	10	1	1	prism	Plastic	Rotativa	0.9	1	2
3	11	1	1	cil	Al	Rotativa	0.18	0.2	4
12	12	1	1	prism	Al	Rotativa	0.9	0.2	1
15	13	1	1	cil	Al	Plana	0.9	0.2	1
13	14	1	1	cil	Plastic	Plana	0.9	1	4
2	15	1	1	prism	Plastic	Rotativa	0.18	0.2	2
7	16	1	1	cil	Al	Plana	0.18	1	2

Pentru a se putea observa modul de comportare al sistemelor sau proceselor sunt efectuate experimente în toate domeniile de cercetare. Planificarea experimentelor (fig.4.6) reprezintă de fapt o serie de teste al căror scop este

modificarea variabilelor procesului. Oferă o metodă de investigare a efectele mai multor variabile, asupra unei variabile de ieșire (de răspuns). Profesioniștii din procesul controlului calității utilizează DOE pentru a identifica condițiile în care rulează procesul de fabricație, identifică componentele sau parametrii care influențează calitatea produselor și apoi stabilesc variabilele de intrare (factori de control). Factorii de control pot avea un efect direct asupra răspunsului sistemului, dar pot apărea și interacțiuni între aceștia. Minitab oferă patru tipuri de experimente: factoriale, suprafață de răspuns, mixte, și Taguchi (robust). A fost creat un experiment factorial  $2^{5-1}$ , ordinea scanărilor executate sunt prezentate în Tabel 4.1.

Prin *experiment factorial* se înțelege o serie de încercări (teste) complete în care se fac toate combinațiile posibile ale nivelurilor de setare a factorilor de control urmăriți (parametrii).

## 2. Scanarea pieselor

Scanarea a respectat întocmai planificarea experimentului factorial, au fost alese piese de formă cilindrică și prismatică, din aluminiu și plastic, scanate cu strategia și parametrii din planificare. După scanare s-au dat note de la 1-5:

1 – reprezentând o calitate slabă a suprafețelor, o piesă scanată cu multe suprafețe lipsă, apariția neregularităților, triunghiurile ce compun Mesh-ul sunt mari și distorsionate, lipsa anumitor detalii, etc. (fig.4.7.a);

5 – reprezentând suprafața unui corp îmbinat, neted, fără neregularități, detaliile au fost bine scanate, etc. (fig.4.7.b).

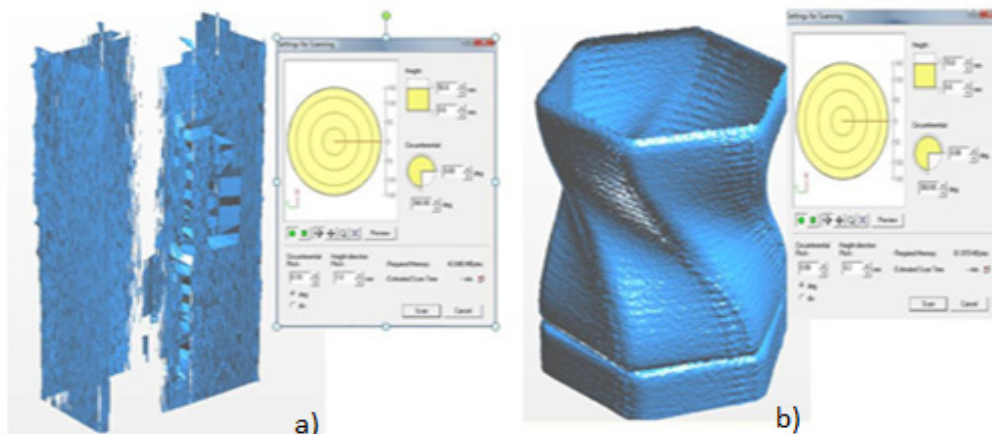


Fig. 4.7 Rezultate obținute în urma scanării  
a - piesă ce a primit calificativul 1, b - piesă ce a primit calificativul 5

## 3. Interpretarea rezultatelor cu ajutorul soft-ului Minitab

Minitab oferă mai multe instrumente analitice și grafice pentru a ajuta la înțelegerea rezultatelor. După introducerea datelor obținute în urma experimentului, s-a ales un model matematic și s-au generat grafice pentru a evalua efectele parametrilor asupra valorii de răspuns.

În fig.4.8 și fig.4.9 este prezentat un grafic ce exprimă efectul fiecărui factor asupra valorii de răspuns (calitatea suprafeței). Se observă că ponderea cea mai mare și în egală măsură o are tipul piesei și materialul acesteia, dar se pare că nu într-o măsură semnificativă, deoarece valorile nu depășesc linia de 1,446.

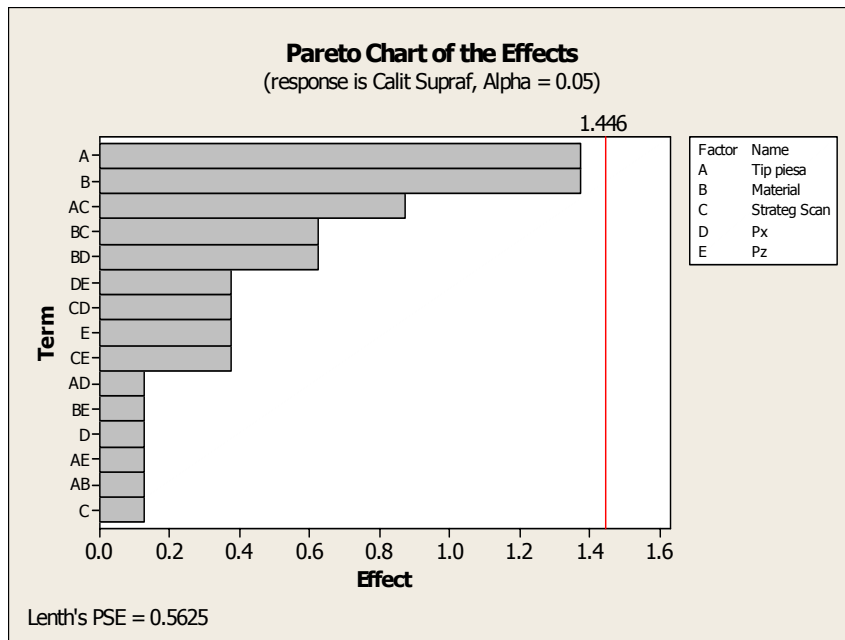


Fig. 4.8 Graficul efectelor factorilor asupra calității suprafeței

Din fig.4.9 se poate observă efectul negativ al mediei pentru Px și Pz, dar panta fiind mică – influența este nesemnificativă.

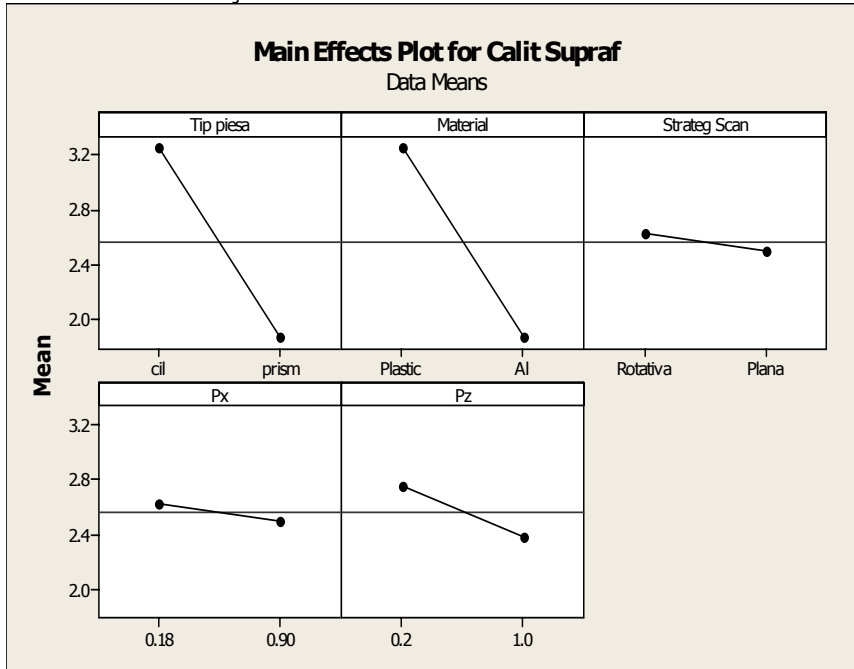


Fig. 4.9 Graficul efectelor factorilor asupra calității suprafeței

Graficul din fig.4.10 prezintă existența interacțiunilor. Dacă dreptele sunt aproximativ paralele nu există interacțiuni, dacă deviația de la paralelism este mare există interacțiuni, adică orice tip de piesă am alege nu va fi influențat factorul Pz sau Px.

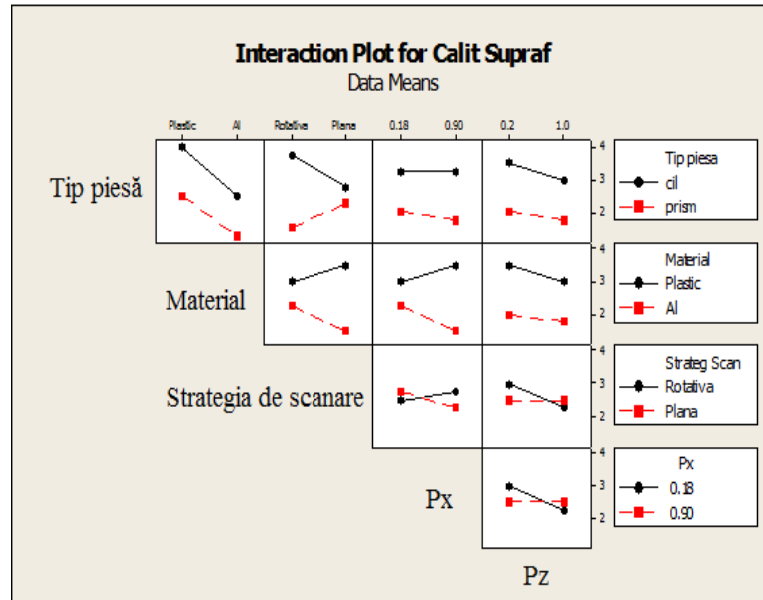


Fig. 4.10 Interacțiunea factorilor

Se observă în fig.4.11 că pentru a obține o valoare maximă a valorii de răspuns este recomandat alegerea parametrilor de scanare  $P_x=(0,68-0,9)$  mm și  $P_z=(0,2-0,45)$  mm.

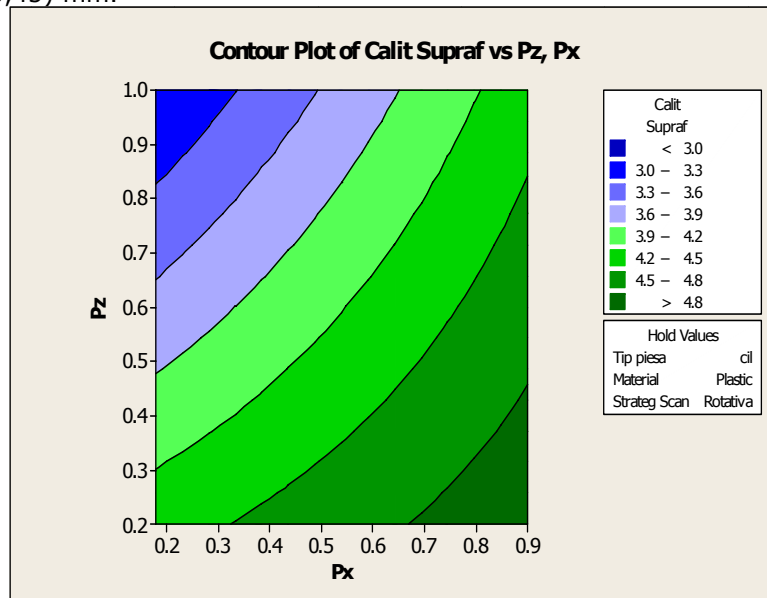


Fig. 4.11 Alegerea parametrilor Pz și Px de scanare pentru a obține rezultate maxime

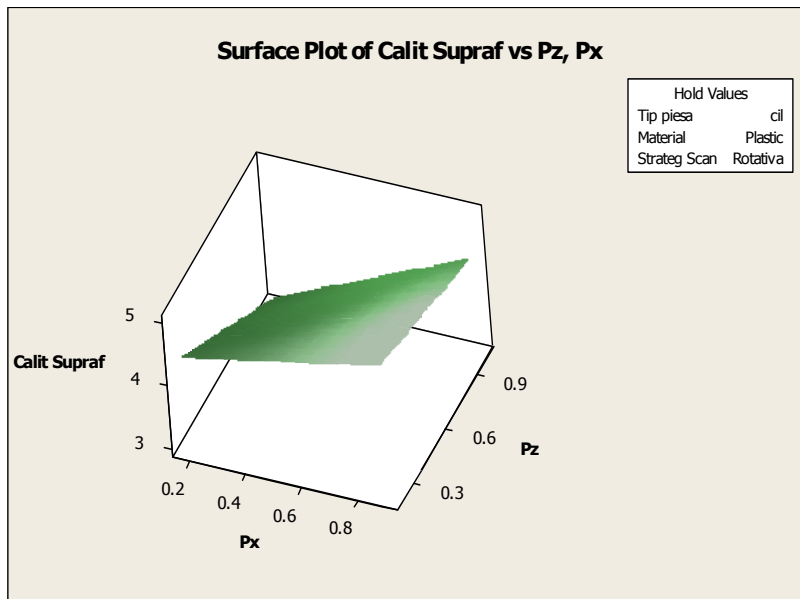


Fig. 4.12 Suprafața valorii de răspuns în funcție de parametrii de scanare Pz și Px

#### 4. Optimizarea procesului cu ajutorul soft-ului Minitab

În caracterizarea unui proces s-a urmărit în general care variabile ale procesului influențează răspunsul acestuia. Optimizarea procesului determină zona de setare a factorilor de control care oferă cel mai bun răspuns al sistemului. În aceste cazuri se utilizează experimente neliniare numite **Response Surface Design**, folosite pentru a examina relația dintre una sau mai multe variabile de răspuns și un set de variabile cantitative experimentale sau factori de control.

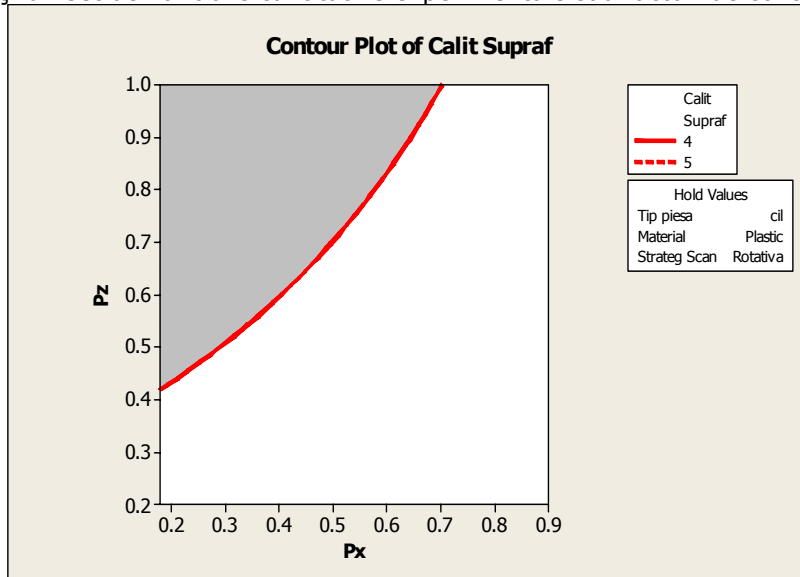


Fig. 4.13 Domeniu optim pentru parametrii de scanare Pz și Px pentru a obține un maxim la valoarea de răspuns



Am folosit graficele (fig.4.13), pentru a arăta modul în care variabila de răspuns (calitatea suprafeței) se raportează la doi factori ( $P_x$  și  $P_z$ ) pe baza unui model de ecuație. Astfel, putem spune că pentru a obține o valoare de răspuns maximă trebuie aleși ca parametrii de scanare să aparțină intervalelor:  $P_x \in (0,2 \div 0,7)$  și  $P_z \in (0,4 \div 1)$ .

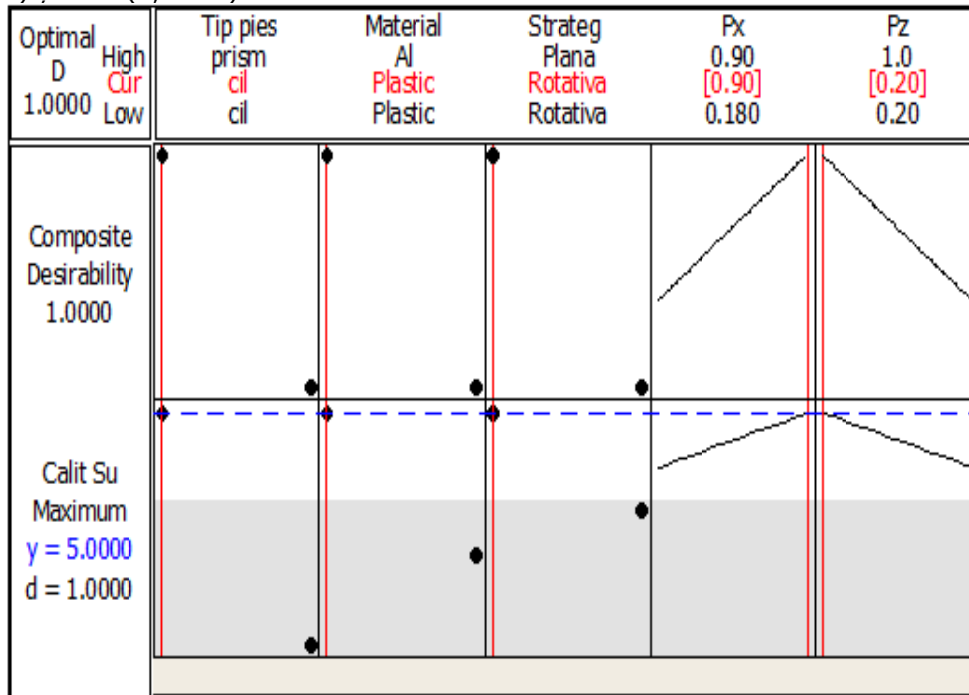


Fig. 4.14 Grafic ce reprezintă factorii optimi pentru a obține o valoare de răspuns maximă

Fig.4.14 reprezintă valorile optime ale factorilor de control pentru a avea un răspuns maxim în procesul de scanare. Graficul ne arată că pentru a obține o valoare de răspuns (calitatea suprafeței) trebuie folosită o strategie rotativă în cazul pieselor de formă cilindrică. Materialul optim este plasticul și parametrii de scanare sunt  $P_x = 0,9$  mm și  $P_z = 0,2$  mm.

*Concluzii:* Experimentul realizat pe mașina de scanat cu laser Roland LPX-600 este pentru a determina factorii ce influențează calitatea suprafețelor rezultate în urma scanării unor piese. În urma experimentului s-a constatat că o alegere bună a strategiilor de scanare este mult mai importantă decât alegerea parametrilor de scanare minimi. Astfel este redus timpul de scanare și calitatea suprafeței nu este influențată.

#### 4.1.2. Cercetări privind scanarea detaliilor de formă

S-au realizat o serie de teste pentru a analiza eficiența scanării detaliilor de formă pe mașina Roland LPX-600. Rezultatele au fost comparate cu unele obținute prin digitizare pe Modela MDX-15. Piesele testate aparțin industriei de jucării (fig.4.15), fiind alese pentru detaliile de formă amănunțite folosite la realizarea cât mai realistă a jucăriilor.

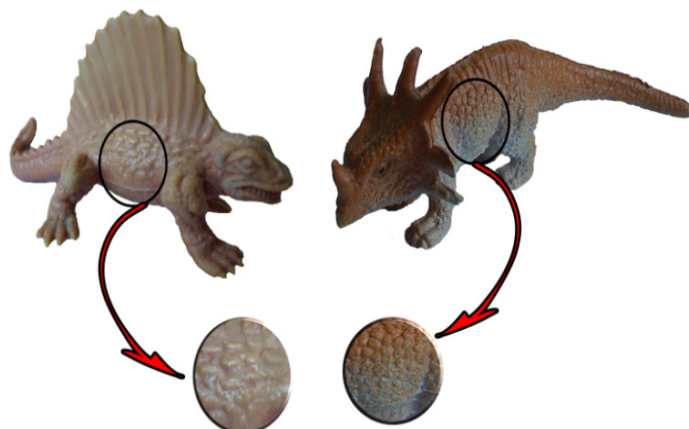
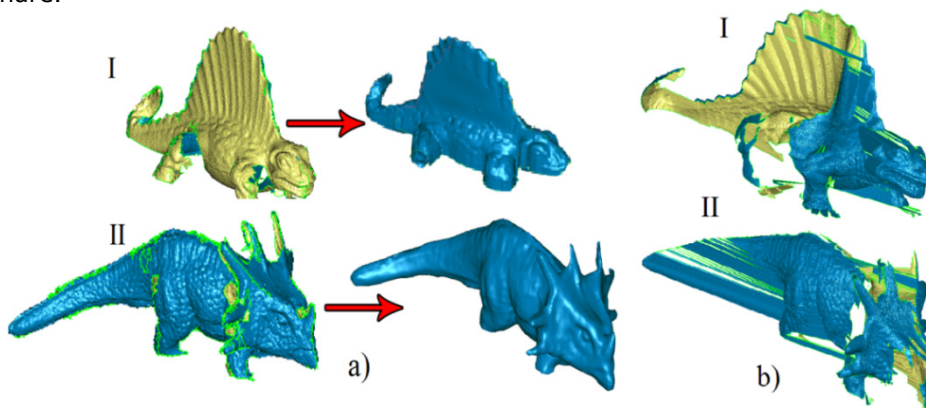


Fig. 4.15 Piesele testate din industria de jucării și detaliile urmărite

Mașina de scanat laser Roland LPX-600 oferă o rezoluție de scanare pentru strategia scanare rotativă de 0,18 – 0,9 mm și 0,2 – 0,9 mm pentru strategia de scanare plană. Ambele piese au fost scanate folosind cele două strategii de scanare și parametrii de scanare au setați la rezoluția cea mai mică. În fig.4.16.a sunt prezentate rezultatele obținute folosind strategia de scanare plană pe 4 direcții, forma inițială a datelor obținute și forma finală după aplicarea filtrelor de relaxare a mesh-ului și umplerii „spărturilor”. În fig.4.16.b se pot observa rezultatele scanării rotative, observându-se suprafețele lipsă și anomaliile ce au apărut în urma scanării. Astfel de date nu mai pot fi prelucrate pentru a obține modele virtuale corecte. Timpul necesar scanării a fost aproximativ 60 min. pentru ambele strategii de scanare.

Fig. 4.16 Rezultatele scanării  
a – scanare plană pe 4 direcții, b – scanare rotativă

Pentru a putea compara rezultatele, piesele au fost digitizate și pe mașina Modela MDX-15. Etapele necesare procesului de captare a formei pe Modela MDX-15 sunt: alegerea volumului în care se încadrează obiectul fizic și alegerea parametrilor de digitizare. Obiectul fizic este fixat cu plastilină sau bandă dublă adezivă pe masa mașinii, ce este gradată din 10 în 10 mm.

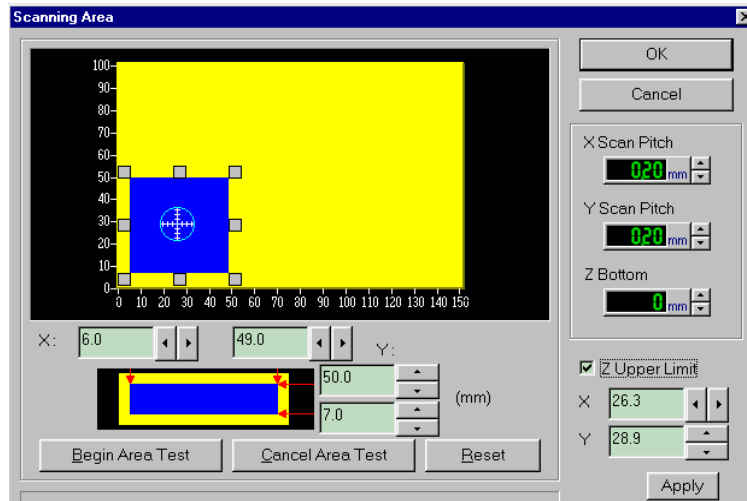


Fig. 4.17 Alegerea volumului și a parametrilor

Soft-ul Dr. Picza permite alegerea volumului de digitizat prin stabilirea ariei și înălțimii în care se încadrează obiectul (fig.4.17). Parametrii de digitizare sunt pasul pe axa X și pasul pe axa Y ce pot fi stabiliți între 0,05 și 5 mm (fig.4.17).

Sistemul de coordonate față de care soft-ul mașinii va înregistra punctele este definit de volumul ales, ce definește obiectul fizic. Sistemul de coordonate este fixat întotdeauna colțul din stânga jos (fig.4.18).

**Limitările procesului de digitizare** se datorează formei senzorului piezoelectric și procesului de captare a formei pe Modela MDX-15, dar și materialul și forma piesei fizice influențează datele obținute.

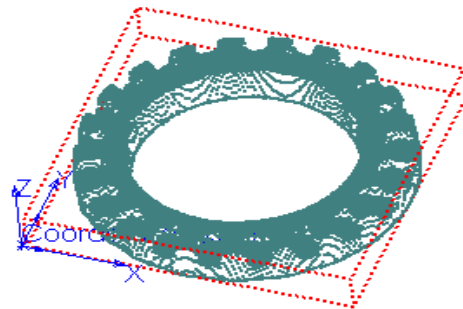


Fig. 4.18 Sistemul de coordonate

Modela MDX-15 captează forma unei piese prin intermediul unei tije de  $\varnothing 1$  mm cu vârf sferic de  $\varnothing 0.08$  mm, ce palpează obiectul respectând parametrii de digitizare. Când tija intră în contact cu piesa, este supusă unei ciocniri în sens mecanic. Această ciocnire se traduce printr-un impuls de contact asupra senzorului, unda de șoc este detectată de o pastilă piezo-ceramică și transformată într-un impuls electric. În cazul frezării pe mașini CNC, pentru ca freza să urmeze corect o traiectorie trebuie introdus diametrul și înălțimea frezei. La fel este și în cazul mașinii de digitizat, soft-ul cunoaște forma exactă și lungimea tije, iar când primește impulsul electric de la senzor va înregistra ca un punct în spațiu vârful tije. Aceasta este cauza apariției erorilor de digitizare, unda de șoc poate fi produsă de orice contact al tije cu obiectul (nu neapărat vârful tije), dar soft-ul va înregistra întotdeauna poziția vârfului.

Un exemplu concret al acestui inconvenient este imposibilitatea captării pieselor cu pereți drepecți sau a găurilor. În cazul unui perete vertical mișcările efectuate sunt pe X și Z. Soft-ul transformă orice impuls electric într-un punct asociat cu vârful tije (**punctul 1**). Peretele vertical este atins cu corpul tije (fig.4.19.a), aceasta se deformează și este înregistrat **punctul 1'**. Mișcarea pe Z

face ca tija să-și modifice punctul de contact cu muchia peretelui, rezultând o deviație mai mare cu fiecare coborâre pe verticală a tijei. Astfel, punctele înregistrate vor defini o suprafață înclinată (fig.4.19.b).

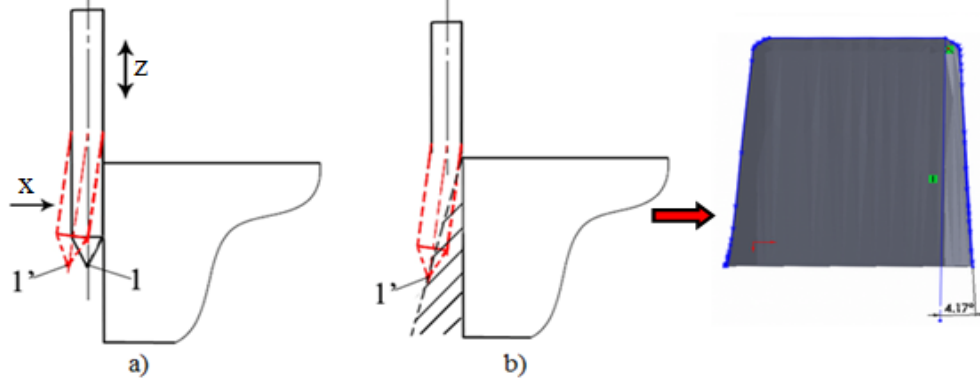


Fig. 4.19 Digitizarea unui perete vertical  
a - mișcările procesului de digitizare, b - suprafața înregistrată

Datorită formei pieselor acestea au fost amplasate pe masa mașinii în poziție orizontală, fiind posibilă captarea doar a unei jumătăți. Digitizarea a fost realizată alegând parametri de scanare minimi (0,05 mm), acest lucru mărind durata de scanare la 7-8 h. Rezultatele sunt prezentate în fig. 4.20, deși s-a obținut doar jumătate din piesă în figură se pot observa detaliile de formă.

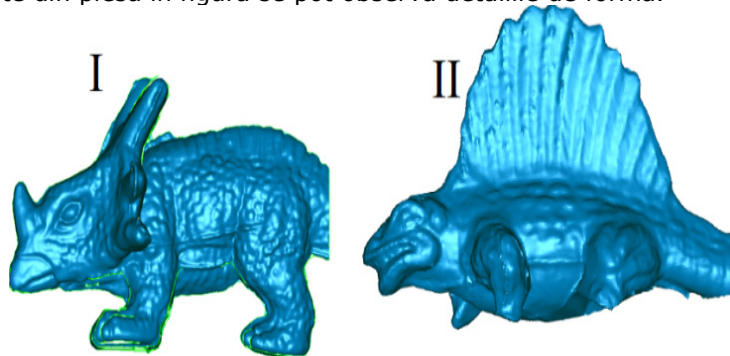


Fig. 4.20 Rezultatele digitizării

În urma experimentării cu cele două metode de captare a formei pot fi deduse următoarele avantaje și dezavantaje (Tabelul 4.2).

*Avantajele digitizării:* precizie mare de captare a formei, costuri mai scăzute pentru echipamente, pot fi captate găuri adânci, insensibilitate la culori sau transparentă.

*Dezavantajele digitizării:* timp îndelungat de colectare a datelor, nu se pot palpa obiecte din material moale.

*Avantajele scanării laser:* nu există contact fizic - este permisă scanarea obiectelor din materiale fragile sau moi, scanarea rapidă a obiectelor cu un gabarit mare, pot fi detectate culorile.

*Dezavantajele scanării laser:* precizia dimensională este scăzută dar acceptabilă pentru aplicațiile uzuale, nu pot fi scanate suprafețe paralele cu axa laserului, apare fenomenul de „auto-umbrire”.

Tabel 4.2 Analizarea rezultatelor

	<b>Roland LPX-600</b>	<b>Modela MDX-15</b>
Timpul de captare a formei	Scăzut (<60 min.)	Ridicat (>7 h/parte)
Calitatea suprafețelor	Ridicată	Ridicată
Captarea detaliilor de formă	Scăzută (fig.4.21.a)	Ridicată (fig.4.21.b)
Obținerea modelului virtual	Ușoară	Complicată – datorită nevoii de scanare a celeilalte jumătăți și îmbinarea lor

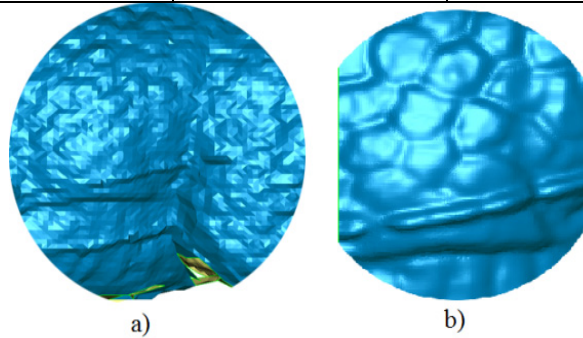


Fig. 4.21 Rezultatele scanării și digitizării  
a – detaliul scanat, b – detaliul digitizat

*Concluzii:* Din tabelul de mai sus se poate deduce că scanarea este mai avantajoasă decât digitizarea și că mai bine s-ar investi în astfel de echipamente, dar ar fi o decizie pripită. Procesul de proiectare al unui produs este unul îndelungat și uneori calitatea, precizia dimensională și detaliile de formă sunt mai importante decât timpul scurt de obținere a unor rezultate.

#### 4.1.3. Cercetări privind obținerea unui model virtual printr-o metodă hibridă

Testând echipamentele platformei experimentale s-a constatat timpul îndelungat de digitizare pe mașina Modela MDX-15, dar și rezoluția scăzută de digitizare (0,05 – 5 mm). Mașina de scanat Roland LPX-600 oferă o durată cu 70% mai scurtă de scanare și o rezoluție mai mare de scanare (0,18 – 0,9 mm). Unul din dezavantajele mașinii de scanat este că nu poate scana suprafețele paralele cu axa laserului (fig.4.22).

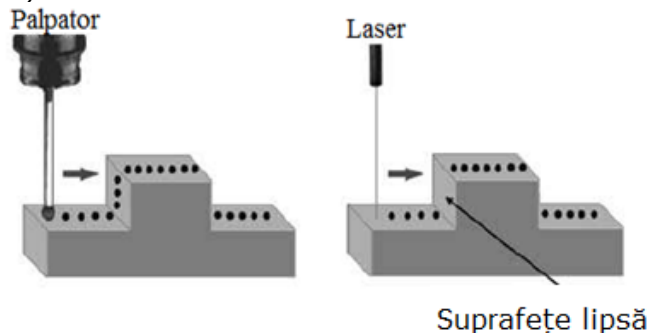


Fig. 4.22 Diferențe de captare a suprafețelor prin cele două metode [Venish, 2008]

Una din problemele întâmpinate în timpul scanării piesele este captarea suprafețelor „auto-umbrite”. Acest fenomen este întâlnit la echipamentele ce folosesc principiul triangulației. Camera digitală poate avea acces la o anumită zonă, dar laserul datorită poziției sale nu o poate lumina (fig.4.23.a), rezultând astfel lipsa acelei suprafețe pe modelul virtual. Același lucru se întâmplă când laserul luminează o suprafață, dar camera digitală nu poate capta datele (fig.4.23.b) [Venish, 2008].

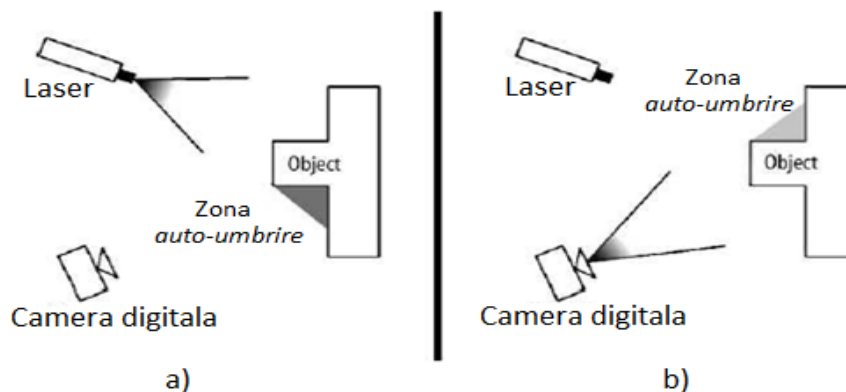


Fig. 4.23 Fenomenul de „auto-umbrire” întâlnit în timpul scanării [Venish, 2008]

Datorită avantajelor și dezavantajelor pe care le oferă ambele mașini când m-am confruntat cu piese de dimensiuni mai mari și cu anumite detalii de formă, s-a crezut de cuviință încercarea unei metode hibride. Metoda constă în scanarea pieselor pe mașina Roland LPX-600, iar detaliile necaptate au fost digitizate pe Modela MDX-15. Soft-urile ce au apărut în ultimii zece ani oferă posibilitatea alinierii și combinării a mai mulți nori de puncte, formând un singur fișier pe care se poate lucra.

Studiul de caz a fost realizat pe un *maxilar*. Pașii parcurși și rezultatele obținute vor fi prezentate în cele ce urmează.

### 1. Scanarea maxilarului pe mașina Roland LPX-600

Datorită dimensiunilor mari pe care le are piesa, digitizarea pe mașina Modela MDX-15 ar fi durat cel puțin 48h/parte.

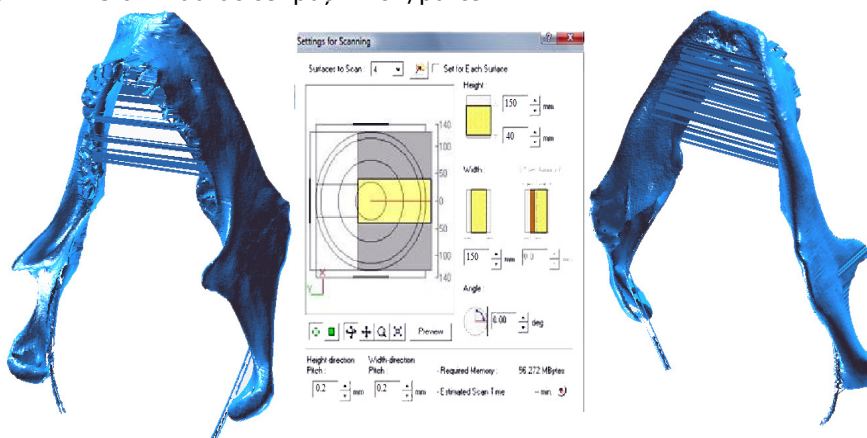


Fig. 4.24 Rezultatele scanării pe Roland LPX-600

Mașina nu permite digitizarea completă a pieselor acest lucru însemnând dublarea timpului de captare a formei, la care se adaugă timpul necesar alinierii celor două jumătăți. Datorită timpului îndelungat de digitizare s-a hotărât scanarea piesei pe mașina Roland LPX-600. Prinderea a fost realizată cu ajutorul unei sârme lipite de piesa și fixată în plastilină, respectând paralelismul și perpendicularitatea față de masa mașinii și axa laserului. Pe aceasta mașină scanarea a fost făcută printr-o singură prindere. S-a folosit strategia de scanare plană pe 4 direcții și parametrii de scanare:  $P_x=0,2$  mm și  $P_z=0,2$  mm obținându-se rezultatele prezentate în fig.4.24. Timpul total de scanare a fost de  $\approx 3$ h. Se pot observa suprafețele anomaliilor și lipsa detaliilor în zona dinților.

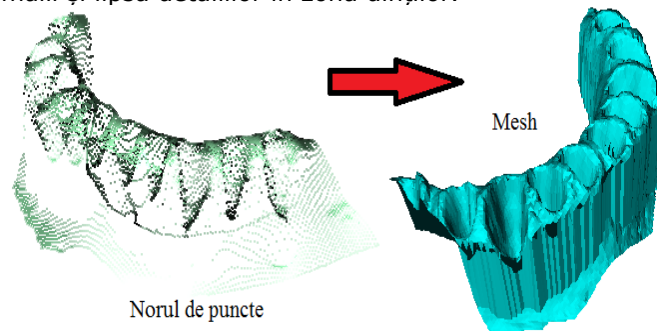


Fig. 4.25 Rezultatele digitizării pe Modela MDX-15

## 2. Digitizarea maxilarului pe mașina Modela MDX-15

Pentru a obține o copie fidelă a maxilarului este necesară digitizarea zonei dinților pe mașina Modela MDX-15. Cu ajutorul soft-ului Dr. Picza s-a setat aria și pasul de digitizare ( $P_x=0,2$  mm și  $P_y=0,2$  mm). Timpul total de digitizare a fost  $\approx 4$ h, rezultatele fiind prezentate în fig.4.25.

Se poate observa calitate superioară a suprafețelor, a detaliilor și lipsa anomaliilor. Rezultatele obținute au fost exportate în format \*.\* STL urmând a fi prelucrate în softul Rapidform.

## 3. Importarea și prelucrarea datelor

### A) Alinierea datelor obținute

Entitățile obținute în urma celor două metode de captare a formei au fost importate în soft-ul Rapidform XOR2 pentru a fi unite într-un singur model. Urmează fixarea celor două fișiere în aceeași origine și poziționarea celor două părți una deasupra celeilalte. Alinierea se face prin rotirea/translatarea unei entități în jurul axelor X, Y, Z (fig.4.26).

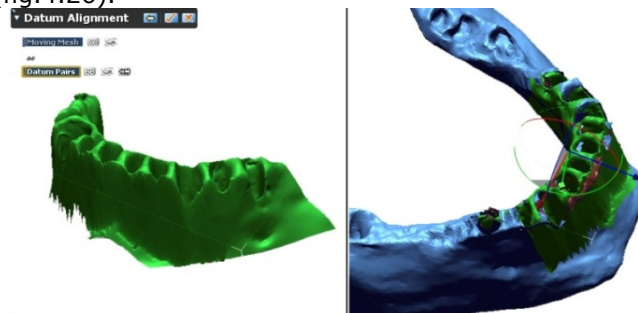


Fig. 4.26 Alinierea celor două entități

Odată terminată alinierea, se realizează operația booleană de intersecție a celor două bucăți obținând un singur model (fig.4.27).

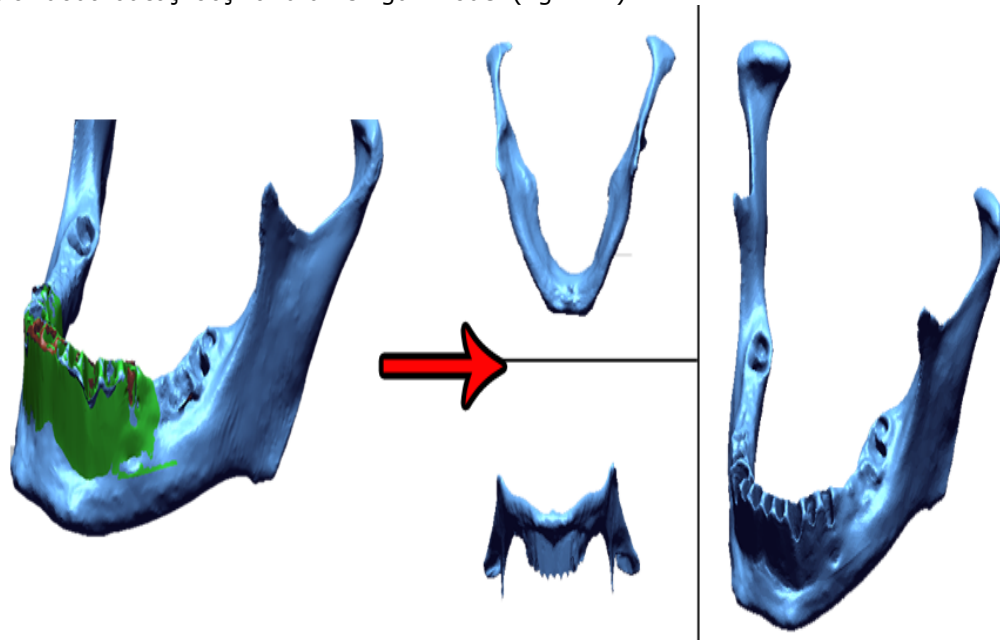


Fig. 4.27 Modelul obținut în urma unirii celor două entități

### B) Prelucrarea datelor

Următoarea etapă este una de cosmetizare a modelului obținut. În urma scanării pe model apar defecte. S-a folosit opțiunea *Healing Wizard* pentru a înlătura/repara suprafețe „anormale”. Suprafețele lipsă ne vor împiedica să transformăm modelul în solid, astfel ele trebuie umplute folosind funcția *Fill Holes*.

Opțiunea *Decimate* reduce numărul de poligoane, mărindu-le prin îmbinare una cu alta. S-a ales reducerea numărul de triunghiuri cu 50% pentru a aduce modelul de la 12Mb, cât avea la importare, la 2,4Mb (fig.4.28).

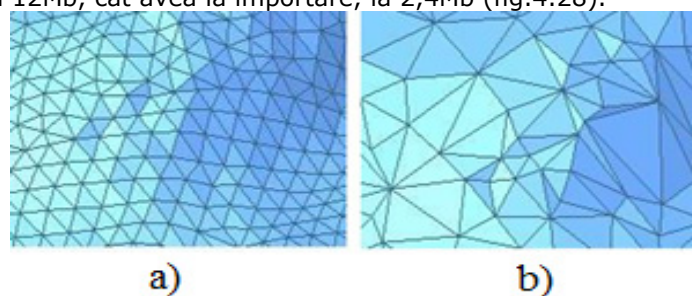


Fig. 4.28 Calitatea suprafeței înainte/după funcția *Decimate* [Rapidform, 2007]

Este adevărat că micșorând numărul de triunghiuri aspectul modelului este mai „zgrunțuros”, dar următoarea opțiune va finisa suprafețele. Opțiunea *Global Remesh* reorientează triunghiurile ce formează modelul și astfel se îmbunătățește calitatea sa (fig.4.29).



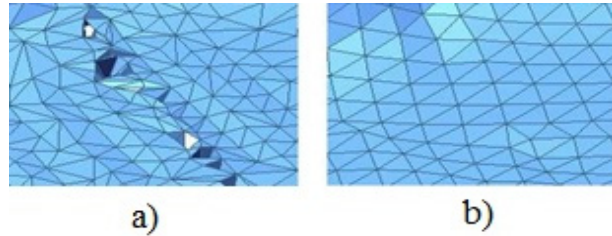


Fig. 4.29 Calitatea suprafeței înainte/după funcția Global Remesh [Rapidform, 2007]

Tot pentru îmbunătățirea suprafeței este și opțiunea *Enhance*, înlăturând orice urme de pe suprafețe (fig.4.30).

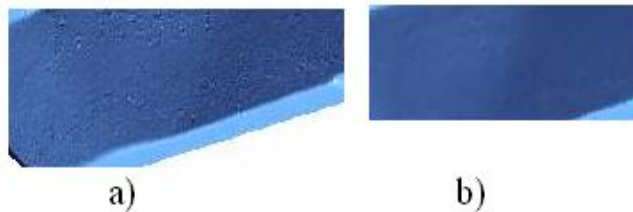


Fig. 4.30 Calitatea suprafeței înainte/după funcția Enhance [Rapidform, 2007]

Ultima etapă de optimizare a suprafeței este dată de funcția *Optimize Mesh*, care prelucrează suprafețele mărindu-le calitatea. Modelul final este cel din fig.4.31.a.

### C) Transformarea Mesh-ului în suprafețe B-spline

Acest lucru se realizează folosind funcția *Auto Surfacing*, funcție ce „îmbracă” modelul format în momentul actual din mii de triunghiuri, în suprafețe poligonale (suprafețe B-spline) (fig.4.31.b). Această etapă transformă modelul în solid urmând exportarea într-un format neutru \*.\* STEP sau \*.\*IGS și importarea ca solid în softuri CAD.

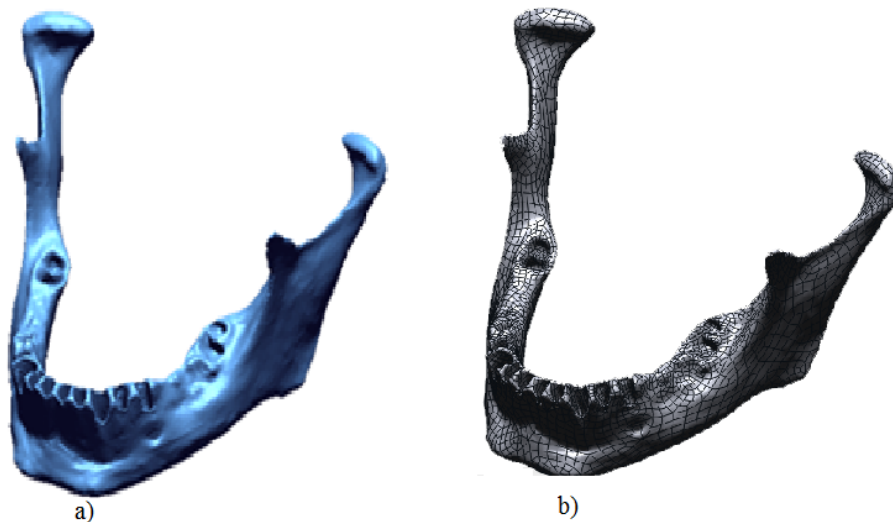


Fig. 4.31 Transformarea meshului  
a - modelul după etapa de optimizare, b - modelul format din suprafețe B-spline

Programele destinate procesului RE permit compararea obiectelor virtuale ce pot fi în formă de nor de puncte, mesh sau solid. Programul generează o hartă tridimensională cu coduri de culori a diferențelor dimensionale dintre obiecte. Obiectul de referință este în cazul nostru modelul obținut prin scanare fără adăugarea detaliilor obținute prin digitizare și fără optimizare și va fi comparat cu modelul final. Programele detectează abateri ca distanța cea mai scurtă de la obiectul testat la orice punct de pe obiectul de referință.

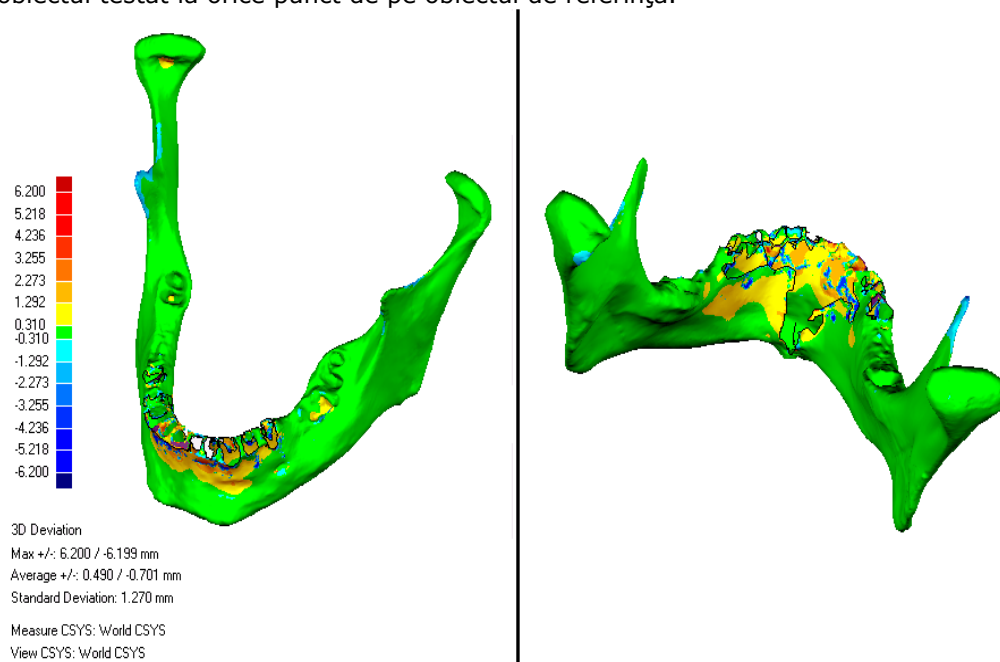


Fig. 4.32 Rezultatul comparației

Obiectivul acestei comparații este de a vedea eroarea de aliniere a celor două entități și care sunt abaterile dimensionale după etapa de optimizare. În fig.4.32 sunt prezentate rezultatele obținute în urma comparării celor două modele virtuale. Se observă că **72%** din suprafețe au o abatere de  **$\pm 0,310$  mm** față de modelul de referință.

*Concluzii:* Schimbarea de la digitizare folosind senzori piezoelectrice la scanarea cu laser a redus timpul de obținere a norului de puncte cu 70%, reducând astfel costul procesului de obținere a modelului virtual.

## 4.2. Cercetări privind precizia de captare a formei

Piața sistemelor optice s-a dezvoltat în ultimii ani cu un real succes și în privința aplicațiilor de precizie. În **Capitolul 1** s-a realizat o clasificare a sistemelor optice fiind prezentate principalele principii de funcționare. În fig.4.33 este prezentată precizia sistemelor optice în funcție de principiile de funcționare și se poate observa că domeniul preciziei de scanare a mașinii Roland LPX-600 este între 0,01 mm și 0,1mm.

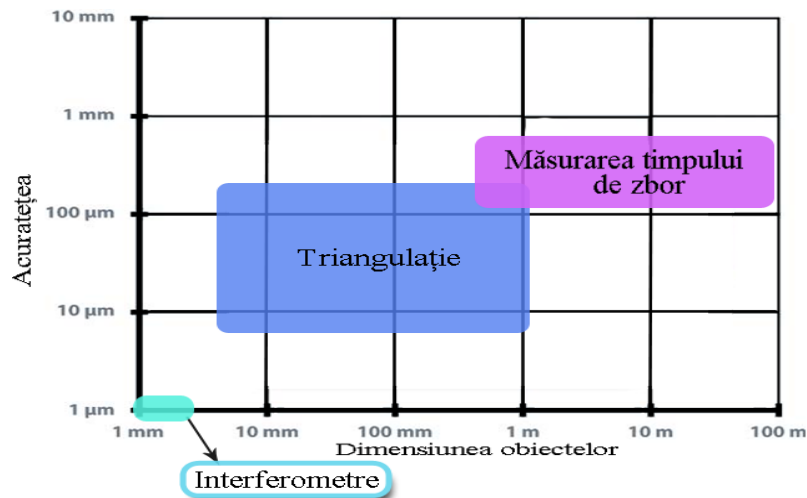


Fig. 4.33 Precizia sistemelor optice [Sniderman, 2011]

În documentația tehnică a mașinilor de scanat și digitizat nu este prezentată precizia dimensională de captare a formei, se fac referiri concrete la rezoluția echipamentelor, dar din acest lucru nu se poate stabili precizia de captare. În continuare se vor stabili prin teste precizia dimensională de captare a norului de puncte pentru mașina de scanat Roland LPX-600 și pentru mașina de specială de digitizat Modela MDX-15. **Capitolul 1** prezintă etapele parcurse pentru a transforma norul de puncte într-un model virtual solid. În studiul preciziei dimensionale trebuie luat în calcul și abaterile dimensionale ce pot apărea în timpul aproximării suprafețelor triunghiulare (formarea mesh-ului) și în urma optimizării mesh-ului.

#### 4.2.1. Cercetări privind precizia dimensională a mesh-ului

În **Capitolul 1** au fost prezentate diferite funcții de optimizare a mesh-ului, dar nu sunt făcute referiri la efectelor negative ce le au asupra modificării preciziei dimensionale. Una dintre provocările tehnicii Reverse Engineering este producerea modelelor virtuale precise. În cele ce urmează va fi prezentată influența aplicării diferitelor funcții asupra preciziei dimensionale.

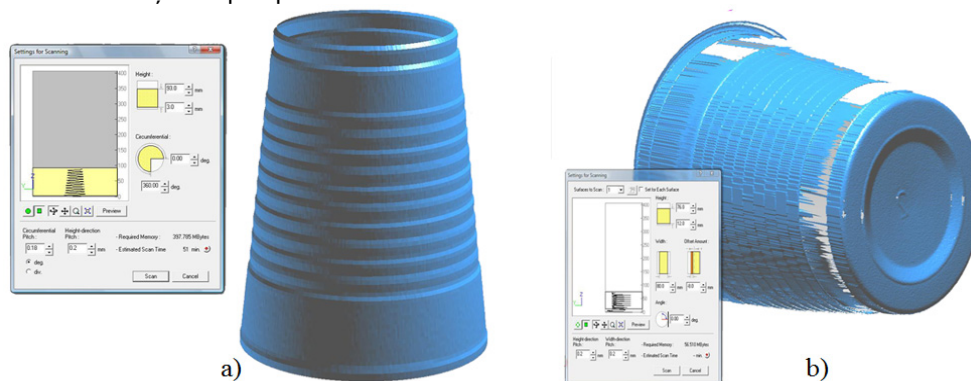


Fig. 4.34 Captarea formei paharului  
a – captarea formei cilindrice, b – captarea fundului obiectului

Studiul de caz a fost realizat pe un pahar de culoare albă ce a fost scanat pe mașina Roland LPX-600 din două poziții pentru a captura întreaga formă a obiectului. S-au folosit ambele strategii de scanare pentru a capta corect forma paharului. Pentru a captura forma cilindrică s-a folosit strategia rotativă (fig.4.34.a), iar pentru a captura fundul paharului s-a folosit strategia de scanare plană (fig.4.34.b).

Datele au fost prelucrate folosind soft-ul Rapidform. S-a început prin a alinia cele două fișiere obținute în urma scanării prin fixarea lor în aceeași origine și poziționarea celor două părți una deasupra celeilalte. Alinierea se face prin rotirea/translatarea unei entități în jurul axelor X, Y, Z .

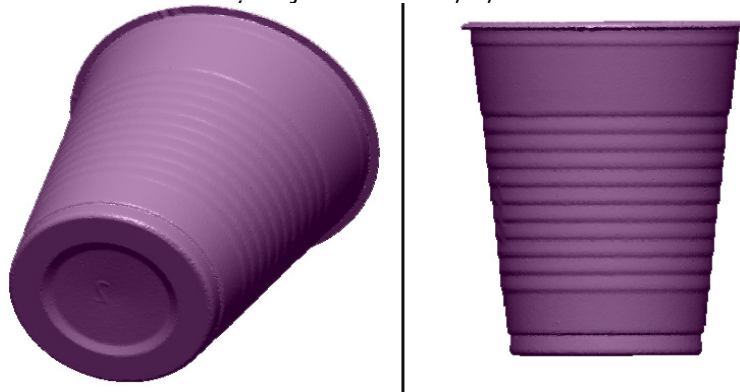
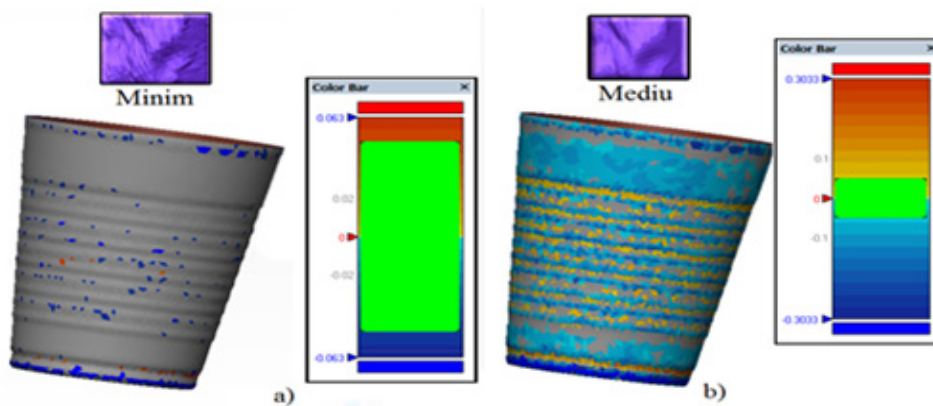


Fig. 4.35 Modelul obținut în urma unirii celor două entități

Următoarea etapă este una de cosmetizare a modelului obținut (fig.4.35). În urma scanării pe model apar urmele lăstate de extractoare, numărul de identificare al piesei, precum și alte defecte de scanare. În urma fiecărei funcții de cosmetizare folosite s-a comparat modelul obținut cu norul de puncte inițial pentru a vedea dacă acestea influențează precizia dimensională a modelului virtual. Funcțiile de cosmetizare folosite sunt cele prezentate în capitolul introductiv, dar și alte funcții specifice soft-ului Rapidform.

### 1. Filtrul de relaxare a mesh-ului (Smooth)

Acest filtru modifică poziția nodurilor din rețeaua poligonală pentru a reduce rugozitatea mesh-ului. Acesta poate fi aplicat la întreg mesh-ul sau doar pe regiunea selectată.



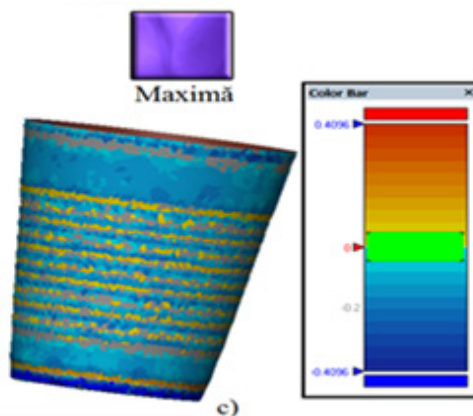


Fig. 4.36 Efectele relaxării mesh-ului  
a – relaxare minimă, b – relaxare medie, c - relaxare maximă

Folosind funcția *Accuracy Analyser* se poate observa influența funcției *Smooth* asupra preciziei dimensionale. *Accuracy Analyser* compară modelul obținut în urma aplicării unei funcții de cosmetizare, cu norul de puncte inițial pentru a vedea dacă acestea influențează precizia dimensională a modelului virtual. Cu cât relaxarea mesh-ului este mai accentuată cu atât precizia dimensională scade. Precizia dimensională a mesh-ului scade mai mult în zonele de curbură sau cu raze, zone unde relaxarea este mai accentuată. Abaterile dimensionale depind de gradul de relaxare ales (fig.4.36.a,b,c). Astfel, abaterile variază pe unele zone de la  $\pm 0,063$  mm și pot ajunge la  $\pm 0,4096$  mm.

## 2. Filtrul de reducere a numărului de triunghiuri (*Decimate*)

Operația reduce numărul de triunghiuri fără a compromite integritatea modelului. Reducerea triunghiurilor se face prin unirea mai multor triunghiuri într-unul mai mare. Se realizează indicând numărul de triunghiuri care dorește a fi atins sau prin reducerea procentuală a numărului de triunghiuri.

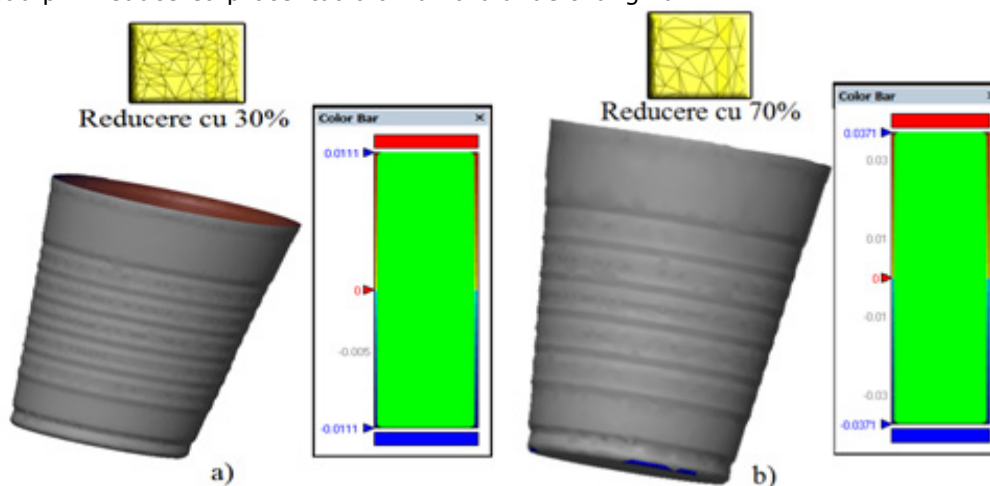


Fig. 4.37 Efectele reducerii procentuale a mesh-ului  
a – reducere cu 30%, b – reducere cu 70%

Se poate observa (fig.4.37.a,b) că această funcție nu influențează deloc dimensiunile mesh-ului. Pot apărea abateri dimensionale, datorită reducerii numărului de triunghiuri, în zonele cu detalii de formă foarte mici.

### 3. Filtrul de optimizare a mesh-ului (Optimize mesh)

Această funcție (fig.4.38.a,b) îmbunătățește calitatea mesh-ului, prin mărirea numărului de triunghiuri în zonele de curbura ridicată și reduce numărul triunghiurilor în restul mesh-ului. Este o funcție aplicată global, se aplică uneori în locul funcției Decimate – atunci când mesh-ul prezintă detalii de formă.

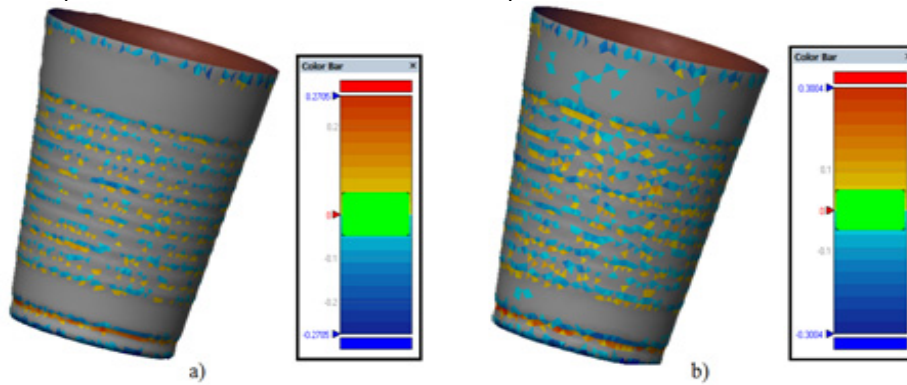


Fig. 4.38 Efectele optimizării mesh-ului  
a – optimizare minimă b – optimizare maximă

Pe lângă efectul de reducere, funcția aplică în zonele speciale și efectele funcției Smooth, astfel după cum era anticipat abaterile dimensionale apar doar în aceste zone, dar sunt mai mici decât în cazul prezentat anterior.

Softul Rapidform permite două modalități de transformare a mesh-ului în solid; aplicarea mesh-ului unei grosimi alese de operator (*Thicken*) sau transformarea mes-ului în suprafețe NURBS și apoi într-un soft CAD aplicând funcția *Offset surface* și *Knit surfaces*, se poate transforma într-un model virtual solid. Ne-am propus să testăm ambele metode și să vedem care sunt abaterile dimensionale.

### 4. Funcția Thicken

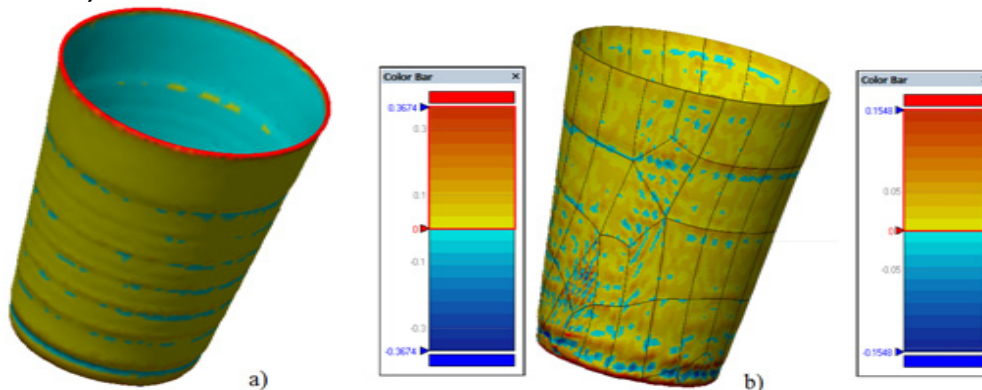


Fig. 4.39 Deviația dimensională a modelului solid obținut  
a – deviația dimensională obținută cu funcția Thicken, b – deviația dimensională obținută cu funcția Auto Surface

Transformă mesh-ul într-un volum cu grosimea pereților constantă. S-a ales o grosime a pereților paharului de 1 mm, obținându-se un model virtual solid. S-a comparat modelul cu norul de puncte și s-a observat o deviație dimensională (fig.4.39.a) constantă de +0,1 mm.

### **5. Funcția Auto Surface**

Transformarea automată a mesh-ului se face prin aproximarea curbelor B-spline și potrivirea suprafețelor B-spline pe mesh-ul creat anterior (fig.39.b). Până în momentul de față modelul virtual este sub formă de coajă, fără grosime. Se observă că s-a obținut o deviație dimensională de +0,05 mm pe 90% din suprafața și -0,05 mm pe aproximativ 8%. Precizia dimensională este mai bună în cazul folosirii funcției Auto Surface, dar se observă că s-au pierdut complet detaliile de formă.

*Concluzii:* Etapa de cosmetizare este una de îmbunătățire a calității mesh-ului, dar fiecare funcție aplicată poate influența precizia dimensională. În urma fiecărei funcții de cosmetizare folosite s-a comparat modelul obținut cu norul de puncte inițial pentru a vedea dacă acestea influențează precizia dimensională a modelului virtual. Fiecare funcție poate influența negativ precizia dimensională în funcție de gradul de aplicare. Trebuie ales cu grijă gradul de cosmetizare atunci când se face setarea funcției, dar este importantă și ordinea de aplicare a funcțiilor. Aplicate cu grijă funcțiile de cosmetizare vor influența cât mai puțin precizia dimensională. Nu pot fi recomandate gradele de aplicare a funcțiilor de cosmetizare care vor oferi întotdeauna cea bună calitate a suprafeței mesh-ului și cu cea mai mică abatere dimensională pe suprafețe. Aplicarea funcțiilor de cosmetizare diferă de la un obiect la altul și depinde și de precizia dimensională dorită.

### **4.2.2. Cercetări privind precizia dimensională a mașinilor de captare a formei**

Pentru a integra echipamentele de captare a formei în procesul de controlare a calității produselor din materiale polimerice, trebuie cunoscută precizia acestora [Brajliș, 2011].

„Verificarea preciziei mașinilor de măsurat în coordonate se face în conformitate cu unele norme naționale (ex. VDI/VDE 2617 – Germania, ANSI/ASME B89-SUA, etc.) sau în conformitate cu normele ISO 10360. Există trei tipuri de specificații conform standardului ISO 10360:

E – incertitudinea de măsurare a lungimii volumetrică

P – incertitudinea de palpate volumetrică

THP – incertitudinea de palpate în regim de scanare” [Tulcan, 2006]

„Pentru a afla precizia echipamentelor de captare a formei ne vom baza pe același principiu aplicat mașinilor la măsurat în coordonate, domeniu unde avem mai multă experiență. Incertitudinea de scanare volumetrică se referă la eroarea mașinii atunci când se măsoară forma piesei, de exemplu: rectilinitate, planeitate, circularitate, cilindricitate sau curbe oarecare. La determinarea incertitudinii de scanare volumetrică se va scana o sferă de referință de  $\varnothing 25,0002$  mm. Rezultatul scanării va fi comparat cu un model CAD precis și se calculează abaterea de formă a sferei etalon ( $R_{max} - R_{min}$ ) ce reprezintă incertitudinea de scanare volumetrică (P).” [Tulcan, 2006]

Programele destinate procesului RE permit compararea obiectelor virtuale ce pot fi în formă de nor de puncte, mesh sau solid. Programul generează o hartă tridimensională cu coduri de culori a diferențelor dimensionale dintre obiecte. Obiectul de referință, în cazul nostru modelul virtual va fi comparat cu mesh-ul ce

reprezintă obiectul testat. Programul detectează abateri ca distanța cea mai scurtă de la obiectul testat la orice punct de pe obiectul de referință (fig.4.40).

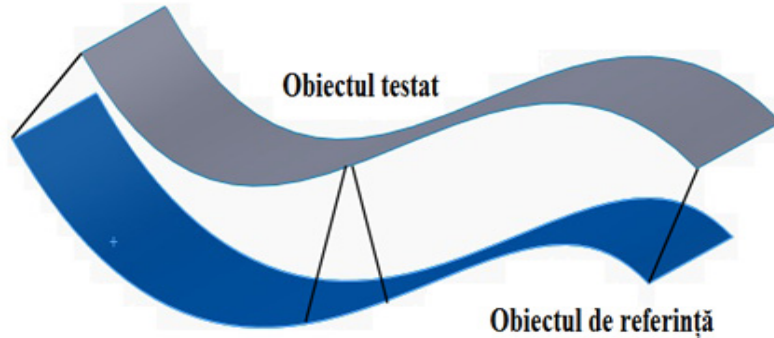


Fig.4.40 Deviația tridimensională

Programul folosește un algoritm statistic pentru a interpreta și a afișa rezultatele comparației:

- *Distanța maximă* - indică cele mai mari abateri între cele două modele comparate. Nici una dintre aceste valori nu vor depăși vreodată Distanța Maximă ce poate fi setată manual.

- *Distanța maximă pozitivă* - este cea mai mare diferență pozitivă între obiectul testat și cel de referință; *distanța maximă negativă* - este cea mai mare diferență negativă între obiect testat și cel de referință;

- *Distanța medie* - indică abaterea medie care se găsește între cele două modele comparate. *Distanța medie pozitivă* - este media diferențelor pozitive între obiectul testat și cel de referință; *distanța medie negativă* - este media diferențelor negative între obiectul testat și cel de referință.

S-a început prin a scana sfera din granit pe mașina Roland LPX-600, ce oferă o rezoluție de scanare pentru strategia scanare rotativă de 0,18 - 0,9 mm. S-a folosit cea mai mică rezoluție de scanare, dar datorită suprafeței lucioase modelul virtual rezultat a fost unul incomplet și cu multe defecte sau anomalii (fig.4.41). Fiind o sferă ce servește la calibrarea palpatoarelor pe mașinile de măsurat, nu s-a putut vopsi (stratul de vopsea ar fi afectat dimensiunile sferei) și de aceea modelul virtual este incomplet. Datorită preciziei ridicate a sferei nu s-a digitizat pe mașina Modela MDX-15, existând riscul zgârierii suprafeței.

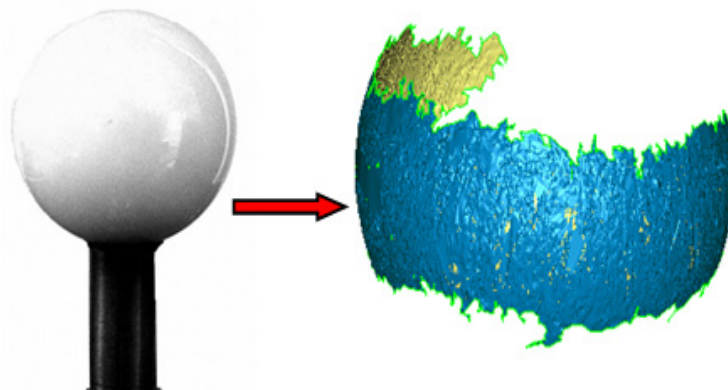


Fig.4.41 Rezultatul scanării sferei de  $\varnothing 25,0002$  mm



Funcțiile de cosmetizare s-au aplicat în așa fel încât să nu apară abateri dimensionale. S-a folosit opțiunea *Optimize mesh* la valoarea minimă pentru a înlătura/repara suprafețele „anormale” și astfel îmbunătății calitatea mesh-ului. Funcția *Fill Holes* a fost aplicată pentru a repara găurile prezente în mesh. Modelul rezultat în urma operației de cosmetizare are o deviație de  $\pm 9\mu\text{m}$  (fig.4.42).

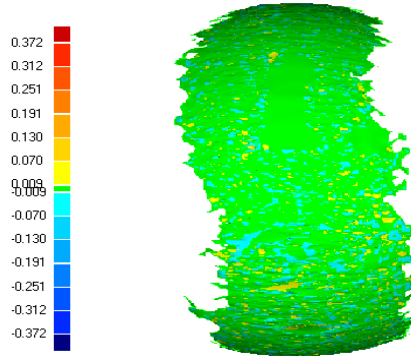


Fig.4.42 Abaterile dimensionale în urma operației de cosmetizare

Pentru a afla abaterile dimensionale rezultate în urma scanării, se va compara mesh-ul cu modelul virtual al sferei etalon. Programul va detecta abateri de la obiectul testat la orice punct de pe obiectul de referință și va genera o hartă tridimensională cu coduri de culori a diferențelor dimensionale dintre obiecte (fig.4.43.a). Creând o secțiune transversală prin cele două modele aliniate se poate vedea mai bine deviația dimensională. Programul poate compara secțiunea transversală a mesh-ului cu secțiunea obiectului de referință, rezultând abaterile dimensionale pozitive și negative (fig.4.43.b).

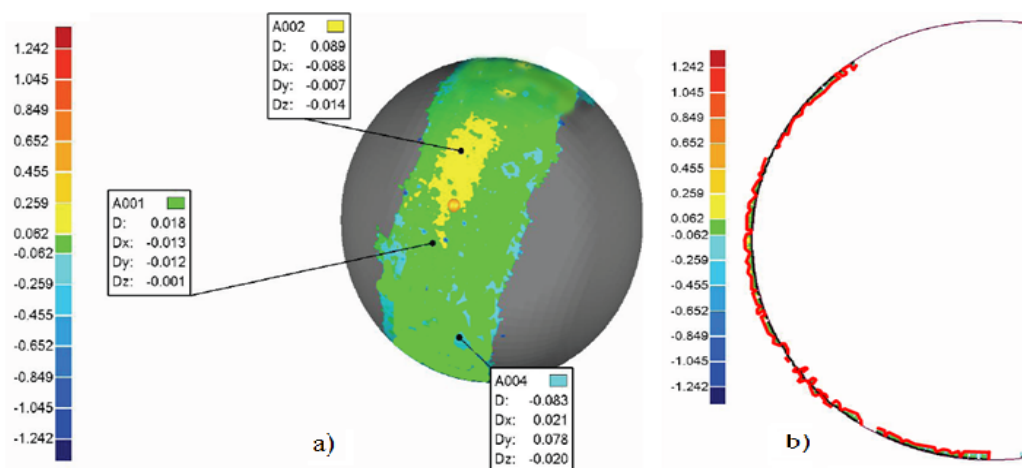


Fig.4.43 Rezultatul comparației

a – harta tridimensională a comparației 3D, b – deviația dimensională în secțiunea transversală

Distribuția punctelor modelului testat față de obiectul de referință este prezentată în Tabel 4.3 acompaniat de graficul din fig.4.44. Se poate observa că aproape 90% din puncte au o abatere de  $\pm 0,062$  mm, 5% din puncte au o abatere de  $-0,259/-0,062$  mm și  $\approx 4\%$  din puncte au o abatere de  $-0,455/-0,259$  mm. Putem concluda că incertitudinea volumetrică este de **0,06** mm.

Tabel 4.3 Distribuția deviației dimensionale

>=Min	<Max	Puncte	%
-1.242	-1.045	18	0.037
-1.045	-0.849	18	0.037
-0.849	-0.652	11	0.022
-0.652	-0.455	556	1.128
-0.455	-0,259	1860	3.775
-0.259	-0,062	2560	5.195
-0.062	0,062	44227	89.75
0.259	0.455	3	0.006
0.455	0.652	3	0.006
0.652	0.849	0	0
0.849	1.045	0	0
1.045	1.242	0	0

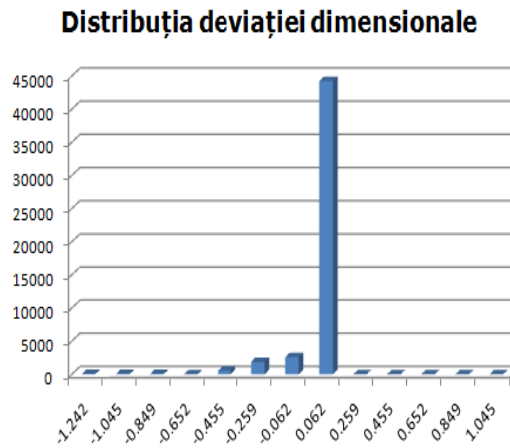


Fig.4.44 Distribuția deviației dimensionale

Se observă că mesh-ul obținut nu este complet, dar programul Geomagic permite generarea unei sfere (fig.4.45) pe baza punctelor obținute în urma scanării. Diametrul nominal al sferei este  $\varnothing 25.0002$  mm iar a sferei generate este  $\varnothing 24,678$  mm. Rezultând o incertitudine volumetrică  $P=(25,0002 - 24,943)=0,0572$  mm, ceea ce confirmă rezultatele prezentate mai sus.

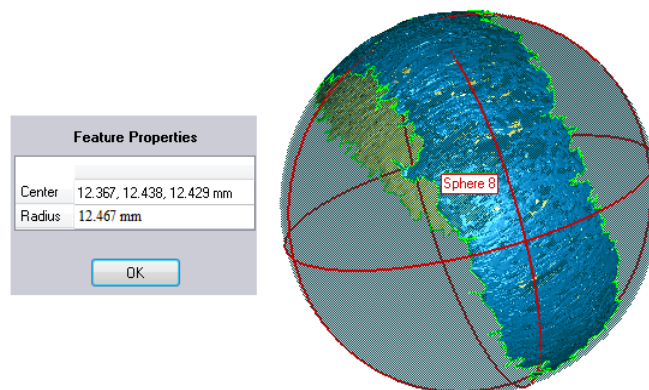


Fig.4.45 Dimensiunea sferei generate de soft

Datorită suprafeței lucioase mesh-ul obținut este incomplet și s-ar putea ca rezultatele obținute să nu fie convingătoare. S-a hotărât refacerea testelor având ca obiect de referință o bilă de rulment cu diametrul nominal de  $\varnothing 45$  mm. Pentru a verifica acuratețea bilei de rulment, aceasta a fost măsurată pe mașina de măsurat în coordonate TESA 3D MicroMS 343 CCD. Cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate se determină centrul sferei. Pentru fiecare dintre cele 15 puncte palpate se determină raza R, ca și distanță radială dintre punctul palpat și centrul sferei. Diametrul efectiv al sferei măsurate este de  $\varnothing 45.0062$  mm.

Problemele la scanarea pieselor cu suprafețe reflectorizante sau de culoare închisă sunt adesea rezolvate prin pulverizarea suprafețelor cu un spray de culoare albă. Grosimea stratului de vopsea inevitabil contribuie la abaterea dimensională a

bilei, astfel după vopsire s-a remăsurat diametrul bilei. Diametrul efectiv al sferei vopsite este de **Ø45.0426** mm. Cu condiția pulverizării unui strat uniform de vopsea, în urma măsurătorilor s-a dedus că grosimea este de **≈0.037** mm. Acest test ne va ajuta pe viitor pentru a ști exact grosimea stratului de vopsea aplicată pieselor.

Cunoscând mărimea precisă a bilei putem face teste pe ambele mașini de captare a formei și compara rezultatele cu cele rezultate în urma măsurării pe mașina TESA 3D MicroMS 343 CCD. Digitizarea realizată pe Modela MDX-15, ce oferă o rezoluție de scanare de 0,05 – 2 mm, a rezultat într-un model virtual reprezentând o jumătate de sferă (fig.4.46.a). Rezultatele scanării pe mașina Roland LPX-600 sunt prezentate în fig.4.46.b.

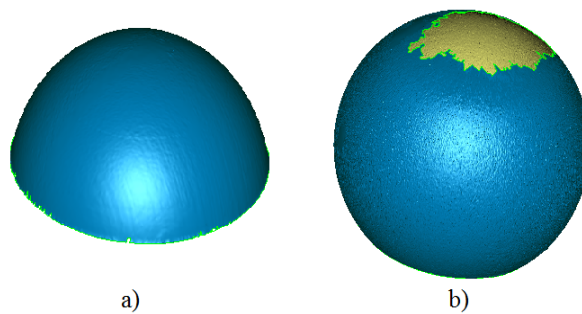


Fig.4.46 Modelul virtual al bilei de rulment  
a – modelul obținut prin digitizare, b – modelul obținut prin scanare

Se consideră bila de rulment vopsită, cu diametrul de Ø45,043 mm, calibru pentru aflarea preciziei ambelor mașini de captare a formei. Alinierea mesh-urilor constă în suprapunerea exactă a unui număr cât mai mare de puncte din fiecare componentă. Pentru a realiza acest lucru este necesar ca ambele mesh-uri să aibă același număr de puncte. Acest lucru se realizează folosind funcția de reducere/ creștere a numărului de puncte (filtrul Decimate). Folosind această metodă alinierea este precisă și erorile de aliniere sunt foarte mici.

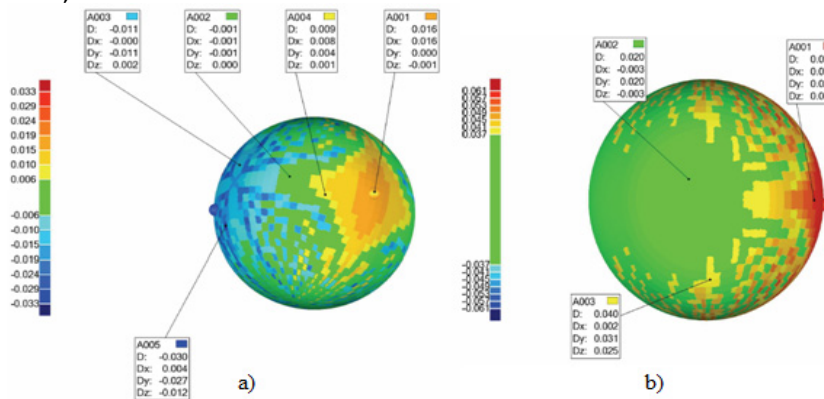


Fig.4.47 Rezultatul comparației  
a – bila CAD și bila digitizată, b – bila CAD și bila scanată

Bila de rulment vopsită cu diametrul efectiv de Ø45.0426 mm va fi obiectul de referință, iar mesh-ul rezultat în urma procesului de scanare și digitizare vor fi

obiectele testate. Rezultatele comparației tridimensionale pot fi văzute în fig.4.47.a și fig.4.47.b. Distribuția punctelor **modelului digitizat** față de obiectul de referință este prezentată în Tabel 4.4 acompaniat de graficul din fig.4.48. Se poate observa că aproape 83% din puncte au o abatere de  $\pm 0,037$  mm și 9,2% din puncte au o abatere de  $+0,037/+0,041$  mm. Putem concluda că incertitudinea volumetrică, în acest caz este de **0,037** mm.

Tabel 4.4 Distribuția punctelor modelului digitizat

>=Min	<Max	Puncte	%
-0.049	-0.045	0	0.000
-0.045	-0.041	0	0.000
-0.041	-0.037	0	0.000
-0.037	0.037	1850	83.071
0.037	0.041	205	9.205
0.041	0.045	56	2.515
0.045	0.049	43	1.931
0.049	0.053	35	1.572
0.053	0.057	20	0.898
0.057	0.061	18	0.808

**Distribuția deviației dimensionale a obiectului digitizat**

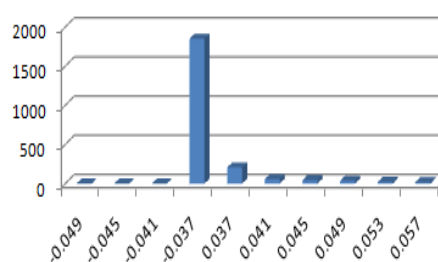


Fig.4.48 Distribuția punctelor modelului digitizat

Distribuția punctelor modelului scanat față de obiectul de referință este prezentată în Tabel 4.5 acompaniat de graficul din fig.4.49. Se poate observa că aproape 82% din puncte au o abatere de  $\pm 0,062$  mm, 10,42% din puncte au o abatere de  $-0,45/-0,259$  mm. Putem concluda că incertitudinea volumetrică, în acest caz este de **0,06** mm.

Tabel 4.5 Distribuția punctelor modelului scanat

>=Min	<Max	Puncte	%
-0.849	-0.652	20	0.461
-0.652	-0.45	18	0.415
-0.45	-0.259	452	10.429
-0.259	-0.062	112	2.853
-0.062	0.062	3562	82.149
0.259	0.45	56	1.292
0.45	0.652	43	0,992
0.652	0.849	35	0.811
0.849	1.045	20	0.463

**Distribuția deviației dimensionale a obiectului scanat**

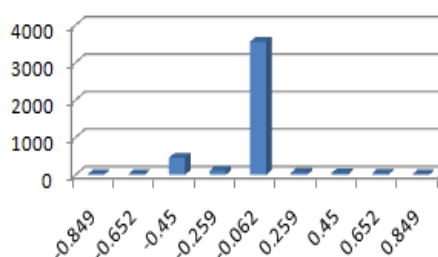


Fig.4.49 Distribuția punctelor modelului scanat

Sferele generate de soft-ul Geomagic, pe baza datelor scanate și digitizate, au diametrele de **Ø44.982** mm (fig.4.50.a) și **Ø45.072** mm (fig.4.50.b). Rezultând o incertitudine volumetrică la scanare de **P=(45.0426 - 44.982)=0,0606** mm,

respectiv incertitudinea volumetrică la digitizare este  $P=(45.0426 - 45.072)=-0,0294$  mm

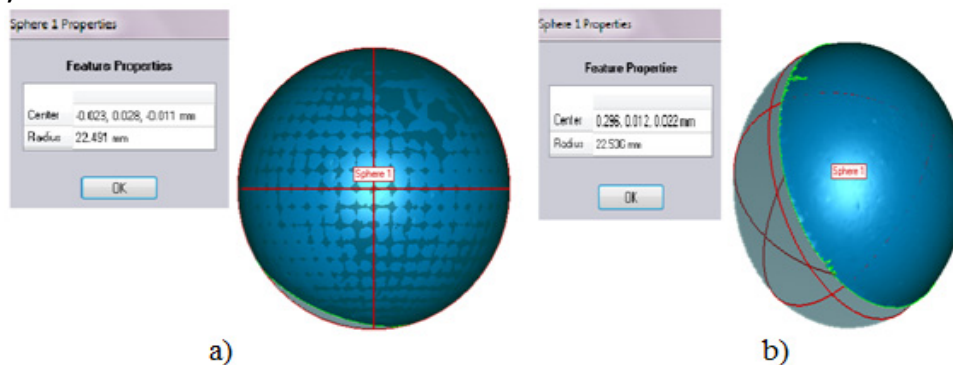


Fig.4.50 Dimensiunea sferelor generate de soft  
a – sfera generată din datele scanate, b – sfera generată din datele digitizate

*Concluzii:* Forma produselor din materiale plastice a evoluat foarte mult în ultimele două decenii, acest lucru făcând dificilă inspecția, din cadrul procesului de control al calității, pe MMC-uri. Noile tehnologii de captare a formei prin scanare și digitizare pot fi integrate în procesul de inspecție, dar mai întâi trebuie stabilită precizia acestor echipamente. Obiectivul acestui subcapitol a fost de a identifica incertitudinea volumetrică de scanare/ digitizare. În urma testelor putem conchide că incertitudinea de scanare a mașinii Roland LPX-600 este  $P \approx 0,06$  mm, iar incertitudinea de digitizare a mașinii Modela MDX-15 este  $P \approx 0,04$  mm. Ținând cont de aceste date, mașinile se pot integra în procesul controlului calității.

### 4.3. Integrarea mașinii Modela MDX-15 în procesul de control dimensional

Pentru o companie europeană<sup>2</sup> din industria auto tehnica RE este un instrument important în îmbunătățirea continuă a motorului mașinilor. Compania utilizează tehnicile RE pentru a pune în aplicare un nou proces de inspecție asistată de calculator (CAI – Computer Aided Inspection). Fabrica realizează aproape 600.000 de motoare pe an. Mai mult de 900 de specialiști asigură calitatea pe liniile de producție ale fabricii. Componente importante ale motorului, cum ar fi: arborele cotit, biele și cilindrii, sunt verificate în laboratorul de măsurare al companiei fiind verificate cote și toleranțe cu precizia micronilor [Venish, 2008]. Confruntată cu aceste cerințe riguroase de calitate compania a dorit să se mute dincolo de procesele tradiționale de control folosind mașini de măsurat în coordonate (MMC-uri). MMC-urile operează cu date numerice în coordonate rectangulare (sau polare). Sistemul de palpate realizează palpatarea tactilă a suprafeței piesei, iar datele numerice furnizate de mașină arată dacă piesa respectă sau nu condițiile prescrise de proiectant [Tulcan, 2006]. Procesul este lent și nu abordează în mod corespunzător piesele formate din tablă îndoită sau cele cu suprafețe nedefinite (freeform) [Cheung, 2005].

<sup>2</sup> Companie europeană – este termen generic desemnând o întreprindere din spațiul european care adoptă un anumit comportament în raport cu inovarea.

Noul proces implementat de compania europeană utilizează echipamente non-contact pentru a colecta milioane de puncte în câteva secunde cu precizie dimensională de micron. Soft-uri specializate procesează informațiile și compară punctele cu modelul virtual (obținut cu CAD). Procesul creează o buclă interactivă între proiectarea, fabricarea și diviziile de control al calității. Primul pas în procesul CAI este de a capta geometria și dimensiunile exacte ale piesei. Norul de puncte este transformat în suprafețe poligonale. Soft-ul cosmetizează automat modelul poligonal. Fișierul rezultat este salvat în format \*.STL. CAI implică compararea unei componente fizice cu modelul virtual (de la care obiectul fizic a fost creat) urmărindu-se precizia dimensională de fabricație și aspecte privind deformarea componentelor. Punctul de plecare este norul de puncte, compus dintr-o singură scanare sau mai multe (în funcție de complexitatea piesei și sistemul de achiziție) Norul de puncte va trebui apoi să fie aliniat cu modelul virtual. Alinierea este făcută fie ținând cont de minim trei puncte de referință sau folosind un algoritm ce va poziționa norul de puncte astfel să se obțină o eroare minimă față de modelul virtual. Odată ce alinierea a fost făcută se pot inspecta abaterile dimensionale și de formă fiind generate rapoarte ale acestei operații. Precizia geometrică este reprezentată de planeitate, circularitate, cilindricitate și concentricitate. Programele destinate procesului RE permit compararea obiectelor virtuale ce pot fi în formă de nor de puncte, mesh sau solid. Programul generează o hartă tridimensională cu coduri de culori a diferențelor dimensionale dintre obiecte [Venish, 2008].

**Obiectivul acestui subcapitol** este de a implementa conceptul CAI pe piese injectate din materiale polimerice folosind mașina Modela MDX-15 aflată în dotarea Fac. de Mecanică. Pe parcursul acestui subcapitol vom numi *model virtual* – modelul 3D obținut în urma măsurătorilor tridimensionale ale pieselor polimerice sau modelul virtual original ; și *mesh* – modelul 3D obținut în urma digitizării pieselor polimerice.

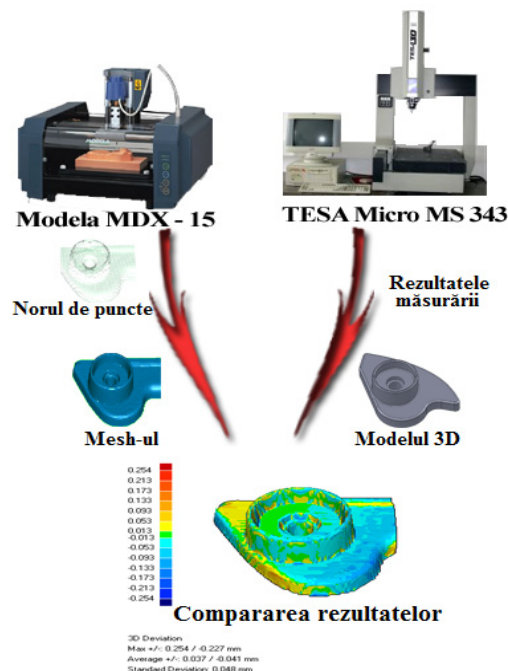


Fig. 4.51 Metoda propusă de inspectare a pieselor

Pentru îndeplinirea obiectivului propus s-a realizat un studiu de caz ce pune în evidență importanța controlului calității asistată de noile tehnici de scanare/digitizare. Studiul de caz prezintă două metode de control al calității pentru piese din materiale polimerice. În primul rând piesele vor măsurate pe o MMC cu un palpator de contact și apoi modelul virtual rezultat va fi comparat cu unul obținut din procesul de digitizare. Subcapitolul propune o metodă de inspecție a erorilor care pot apărea ca urmare a procesului de injectare în matriță cu cavități multiple (fig.4.51).

Scopul este de a verifica acuratețea dimensională a pieselor ce depinde de precizia de fabricație a fiecărei cavități, contractia și deformarea care apar după procesul de injectare. Testul se face pe piese care provin de la două injectări consecutive dintr-o matriță cu patru cuiburi, reprezentând un total de opt piese. Legătura ce permite compararea digitală a modelelor 3D cu piese fabricate, o face Reverse Engineering [Menna, 2010] prin folosirea unui sistem de digitizare sau scanare pentru a culege norul de puncte și folosirea unui soft dedicat [Ferreira, 2006].

A fost digitizată doar o parte din piesă cu importanță mai mare și toleranțe geometrice strânse (fig.4.52). Pentru colectarea norului de puncte s-a folosit mașina de digitizat Modela MDX-15 ce folosește un palpator (ac, pin) mecanic. Soft-ul mașinii permite setarea zonei și a parametrilor de scanare: pasul de scanare pe X (distanța dintre punctele adiacente de scanare de-a lungul axei X,  $P_x = 0.3$  mm) și pasul de scanare pe Y (distanța dintre punctele adiacente de scanare de-a lungul axei Y,  $P_y = 0.3$  mm). De asemenea, soft-ul permite selectarea unei strategii de scanare:

- *Fine Scanning* (scanare fină) - scanare unidirecțională,
- *Draft scanning* (scanare groasă) - scanare bidirecțională,
- *Smart scanning* (scanare inteligentă) - scanează doar zona minimă din jurul obiectului.

Rezultatul digitizării este norul de puncte, care constă din mii de puncte situate în sistemul de coordonate X, Y, Z; puncte care vor forma mesh-ul. După crearea mesh-ului urmează faza de optimizare care este necesară din cauza numeroaselor găuri și anomalii ce apar în urma scanării. Filtrele aplicate mesh-ului de puncte și care au fost prezentate în Capitolul 1 sunt: umplerea găurilor, reducerea numărului de triunghiuri și relaxarea mesh-ului, cu scopul creării unei „suprafețe etanșe” (fig.4.53).

În scopul de a compara în mod corespunzător mesh-urile rezultate în urma digitizării au fost create două plane și o axă; care vor reprezenta mai târziu sistemul de coordonate față de care se

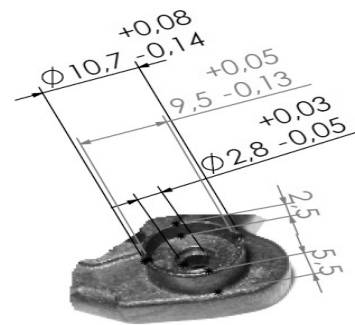


Fig. 4.52 Porțiunea scanată

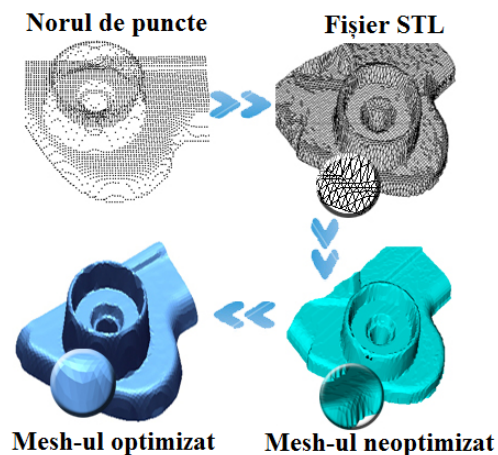


Fig. 4.53 Optimizarea norului de puncte

va face compararea cu modelul virtual creat în urma măsurărilor tridimensionale (fig.4.54)

Datorită preciziei ridicate de măsurare, senzorii de contact sunt cei mai utilizați pe sisteme de măsurare și sunt potriviți pentru o gamă largă de aplicații. Pentru a obține punctele măsurate este necesar contactul între sfera de rubin și o suprafață de pe piesă. Inspekția tridimensională a pieselor din mase polimerice injectate este realizată în cele mai multe cazuri pe MMC-uri [Xie et al., 2005] cu senzori de contact, excepție făcând piesele cu caracteristici interne, sau piese injectate din material polimeric moale [Tulcan et al., 2007].

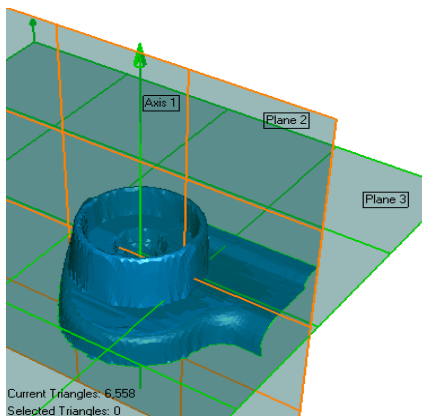
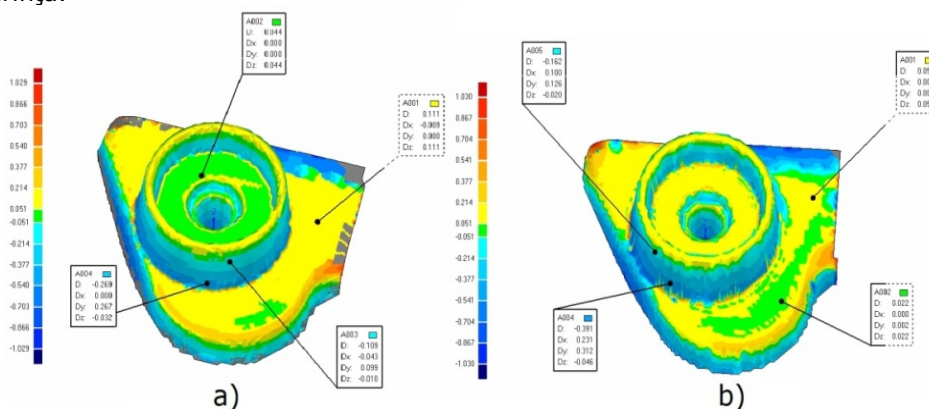


Fig. 4.54 Crearea planelor și axei

Pentru obținerea modelelor virtuale s-a folosit mașina de măsurat Tesa Micro MS343 și capul de măsurare orientabil MF20i de la Renishaw, ce permite poziționarea în spațiu a elementului de palpate prin rotirea manuală în plan orizontal (unghiul  $A = \pm 180^\circ$ ), respectiv în plan vertical (unghiul  $B = 0 \dots 105^\circ$ ) și cu un increment de  $15^\circ$  [Tulcan, 2006]. Pentru fiecare poziție în spațiu a palpatorului, este necesară calibrarea acestuia. Pe capul de măsurat a fost montat un senzor rezistiv TP20 și o bilă de rubin cu diametrul de  $\varnothing 1$  mm. Pentru a măsura dimensiunile și forma pieselor din plastic pe o MMC, acestea trebuie să fie fixate pe masa de măsurare fără a le deforma.

Al doilea pas este de a măsura anumite caracteristici necesare pentru alinierea virtuală a modelelor și pentru obținerea sistemului de coordonate. Față de sistemul de referință au fost măsurate printr-un anumit număr de puncte caracteristice ce ne interesează, obținând un raport pe baza căruia s-au realizat opt modele virtuale precise.

Principiul de comparare a modelelor virtuale cu mesh-ul a fost prezentat în **Capitolul 4**. Programele destinate procesului RE permit compararea obiectelor virtuale [Yao, 2004] ce pot fi în formă de nor de puncte, mesh sau solid. Programul generează o hartă tridimensională cu coduri de culori a diferențelor dimensionale dintre obiecte. Obiectul de referință, în cazul nostru modelul virtual, va fi comparat cu mesh-ul care reprezintă obiectul testat. Programele detectează abateri ca distanța cea mai scurtă de la obiectul testat la orice punct de pe obiectul de referință.





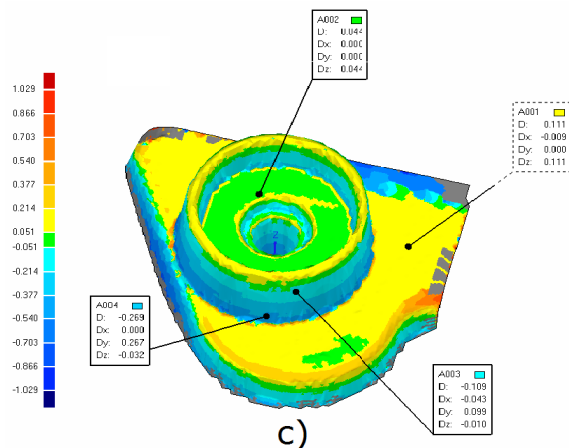


Fig. 4.55 Rezultatul comparației

- a - Model virtual → mesh-ul piesei din cuibul nr.1 (prima injectare),  
 b - Model virtual → mesh-ul piesei din cuibul nr.1 (a doua injectare),  
 c - cuibul nr.1 (prima injectare) → cuibul nr.1 (a doua injectare)

Ținându-se cont de incertitudinea de digitizare a echipamentului de captare a formei (Modela MDX-15), în fig.4.55 sunt prezentate rezultatele obținute în urma comparării modelului virtual cu mesh-ul, ambele aparținând pieselor provenite din cuibul nr.1 al matriței de injectat după două injectări consecutive.

Rezultatele comparației modelului virtual cu piesele din cuiburile 1→4 obținute în urma celor două injectări consecutive sunt prezentate în Tabel 4.6 Din tabel se poate observa că nu sunt abateri dimensionale majore, acestea fiind acceptabile.

Tabel 4.6 Rezultatele comparației modelului virtual cu piesele din cuiburile 1→4

Piesa	Distanța maximă		Distanța medie		Deviația standard
	poz.	neg.	poz.	neg.	
Cav. 1_1	0,289	0,325	0,025	0,03	0,034
Cav. 1_2	0,254	0,227	0,013	0,041	0,048
Cav. 2_1	0,287	0,25	0,09	0,071	0,097
Cav. 2_2	0,29	0,242	0,058	0,043	0,063
Cav. 3_1	0,299	0,263	0,047	0,061	0,062
Cav. 3_2	0,306	0,543	0,069	0,057	0,079
Cav. 4_1	0,38	0,332	0,092	0,068	0,095
Cav. 4_2	0,384	0,368	0,084	0,085	0,107

\* Cav. – prescurtare de la cuiburile, 1\_1→4\_1 – piesele injectate în cuiburile 1→4 (prima injectare), 1\_2→4\_2 - piesele injectate în cuiburile 1→4 (a doua injectare)

Rezultatele comparației mesh-ului pieselor obținute din prima injectare cu mesh-ul pieselor obținute din a doua injectare sunt prezentate în Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Rezultatele comparației

Piesa comparate	Distanța maximă		Distanța medie		Deviația standard
	poz.	neg.	poz.	neg.	
Cav. 1_1->1_2	0,12	0,11	0,023	0,042	0,032
Cav. 2_1->2_2	0,15	0,163	0,024	0,056	0,04
Cav. 3_1->3_2	0,24	0,26	0,09	0,071	0,0805
Cav. 4_1->4_2	0,124	0,189	0,021	0,038	0,0295

*Concluzii:* Dezavantajul sistemului de digitizare este reprezentat de timpul de achiziție lung, dar cantitatea de date măsurate și utilizarea flexibilă a sistemului îl fac să fie bun pentru controlul calității la un lot mic de piese. Avantajul folosirii echipamentului de digitizare permite generarea unei hați tridimensionale cu coduri de culori, astfel încât să se poată observa abaterile dimensionale pe întreaga forma a piesei. Folosind această metodă de control dimensional pot fi controlate piese cu formă nedefinită (freeform), iar pe baza rezultatelor provenite din compararea datelor se poate lua decizia în ceea ce privește calitatea produselor injectate.

#### 4.4. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-au realizat teste pe mașina de scanat cu laser Roland LPX-600, unul din acestea este pentru a determina factorii ce influențează calitatea suprafețelor rezultate în urma scanării unor piese. În urma experimentului s-a constatat că o alegere bună a strategiilor de scanare este mult mai importantă decât alegerea parametrilor de scanare minimi. Astfel este redus timpul de scanare și calitatea suprafeței nu este influențată.

Un alt exemplu de test efectuat a fost pentru a analiza eficiența scanării detaliilor de formă. Rezultatele sunt fost comparate cu unele obținute prin digitizare pe Modela MDX-15, constatându-se eficiența digitizării în captarea detaliilor de formă. Dezavantajul obținerii unor detalii de formă ridicate este timpul ridicat al procesului de captare a formei, de aceea pasul următor a fost acela de a combina cele două metode de captare pentru a obține modelul.

Datorită avantajelor și dezavantajelor ce le oferă ambele mașini când ne-am confruntat cu piese de dimensiuni mai mari și anumite detalii de formă, s-a crezut de cuviință încercarea unei metode hibride. Testul realizat pe un obiect fizic cu formă nedefinită ne-a demonstrat că putem folosi ambele mașini pentru a obține forma unui model fizic. Îmbinând norul de puncte rezultat în urma captării formei pe

cele două mașini s-a obținut un model cu o abatere de  $\pm 0,310$  mm față de modelul de referință. Datorită abaterii dimensionale mari această metodă nu poate fi folosită în controlul calității dimensionale a unor piese, dar este eficientă în cazul pieselor mai puțin importante din punct de vedere dimensional.

Tot în acest capitol s-a testat precizia mașinilor de captare a formei și abaterile dimensionale care pot apărea în urma procesului de cosmetizare sau a procesului de îmbinare a mai multor scanări. Etapa de cosmetizare este una de îmbunătățire a calității mesh-ului, dar fiecare funcție aplicată poate influența precizia dimensională. În urma fiecărei funcții de cosmetizare folosite s-a comparat modelul obținut cu norul de puncte inițial pentru a vedea dacă acestea influențează precizia dimensională a modelului virtual. Fiecare funcție poate influența negativ precizia dimensională în funcție de gradul de aplicare. Trebuie ales cu grijă gradul de cosmetizare atunci când se face setarea funcției, dar este importantă și ordinea de aplicare a funcțiilor. Aplicate cu grijă funcțiile dimensionale vor influența cât mai puțin precizia dimensională. Obiectivul acestui capitol a fost de a identifica incertitudinea volumetrică de scanare/digitizare. În urma testelor putem concluda că incertitudinea de scanare a mașinii **Roland LPX-600** este  **$P \approx 0,06$  mm**, iar incertitudinea de digitizare a mașinii **Modela MDX-15** este  **$P \approx 0,04$  mm**. Ținând cont de aceste date, mașina Modela MDX-15 a fost integrată cu succes în procesul controlului calității dimensionale.

## 5. REPROIECTAREA UNUI PRODUS ȘI VERIFICAREA PRECIZIEI DIMENSIONALE

Apărută în anii '90 tehnica RE s-a extins cu succes asupra tuturor domeniilor de activitate. Tehnologiile și mijloacele Reverse Engineering există atât în domeniul ingineriei mecanice cât și în chimie, electrotehnică și electronică, precum și în informatică, unde dezvoltarea de programe fără metode de prototipare rapidă nu mai este de conceput. În principal tehnica RE este rezultatul dezvoltării explozive a sistemelor de calcul și a tehnologiilor care permit desfășurarea interdisciplinară a activităților de producție. Ținând cont de faptul că pretențiile pieței sunt într-o creștere continuă, în primul rând de preț și calitate și sloganul ce reprezintă cel mai concret realitatea este „change or die”, întreprinderile timpurilor noastre sunt practic obligate să se adapteze metodelor tehnologice noi. O parte din metodele noi prezentate vor fi implementate în acest capitol

Industria aerospațială, auto și cea de echipamente electrocasnice se confruntă adesea cu situații care necesită modificarea produselor existente, scule speciale sau doar componente din produse mai complexe. În multe situații piesele ce se doresc a fi modificate nu au model virtual sau o bază de date a producției pentru a identifica parametrii necesari la modificarea și prefabricarea lor. Unele piese au fost fabricate cu mult timp în urmă și modelele lor virtuale, în cazul în care au fost vreodată produse, s-au pierdut. Dezvoltarea modelelor virtuale pentru piese existente intră în domeniul tehnicii RE și presupune captarea coordonatelor pentru diferite puncte de pe suprafața unui obiect și apoi modelarea modelului virtual [Motavelli, 1998].

Deoarece aplicațiile privind tehnica Reverse Engineering au mai fost prezentate [Ferreira, 2007], [Vezzetti, 2007], [Carbone, 2001], [Hanmin, 2005], [Zheinkai 2006] se vor prezenta anumite aspecte legate de partea de prototipare virtuală (digitală). Studiile arată că prin folosirea prototipării virtuale (digitale) se pot identifica probleme înainte de lansarea în producție. Utilizarea prototipurilor virtuale, în special în fazele de dezvoltare /proiectare a sistemelor mecanice, permite luarea unor decizii cu efecte de cost eficiente, deoarece producția costisitoare a prototipurilor fizice devine inutilizabilă [Alexandru, 2002]. Deoarece geometria prototipului digital este foarte exactă, se pot verifica interferențele ce pot apărea la asamblarea acestora, probleme care pot schimba ordinea dintre fazele de dezvoltare și producție. Se poate de asemenea simula produsul în stadii incipiente ale ciclului de dezvoltare ca să se evite probleme la faza de testare sau fabricare [Aberdeen, 2006].

În legătură cu procesul de injectare au fost publicate lucrări care se referă la parametrii procesului de injectare în vederea obținerii unui produs [Mărieș, 2009], [Fetcău, 2007], [Sereș, 1993], [Iliescu, 2009], [Postalache, 2009] simulări cu element finit [Tabacu, 2009], [Todici, 2008], aspecte legate de fabricația matrițelor [Sereș, 2001], dar și de tehnici moderne de realizare a produselor din material polimerice [Tulcan, 2007], [Cosma, 2009.a].

Spre deosebire de acestea, acest *capitol reprezintă* o continuare a cercetărilor începute de colegii din Universitatea „Politehnica” din Timișoara [Cosma, 2008.b], fiind realizat în colaborare cu ing. Groza Elisabeta (absolventă catedrei

Tehnologia Construcțiilor de Mașini). Capitolul folosește raționamentul metodei *Model-based* pentru rezolvarea problemelor apărute în proiectarea unui produs (telecomandă destinată deschiderii barierei de parcare). Ideea este de a privi noile cerințe care trebuie soluționate ca și constrângeri sau observații și în același timp să demonstrăm eficiența integrării tehnicii Reverse Engineering în procesul de reproiectare și în controlul preciziei dimensionale a pieselor fabricate. În urma procesului de reproiectare a rezultat un produs diferit atât din punct de vedere funcțional, cât și estetic. Componentele din material polimeric au fost injectate folosindu-se două tipuri de materiale: polistiren cu colorant alb și polipropilenă cu colorant verde și roșu. Vom verifica precizia dimensională a unui lot de 10 produse din fiecare material prin compararea modelului virtual 3D cu mesh-ul obținut în urma procesului de scanare.

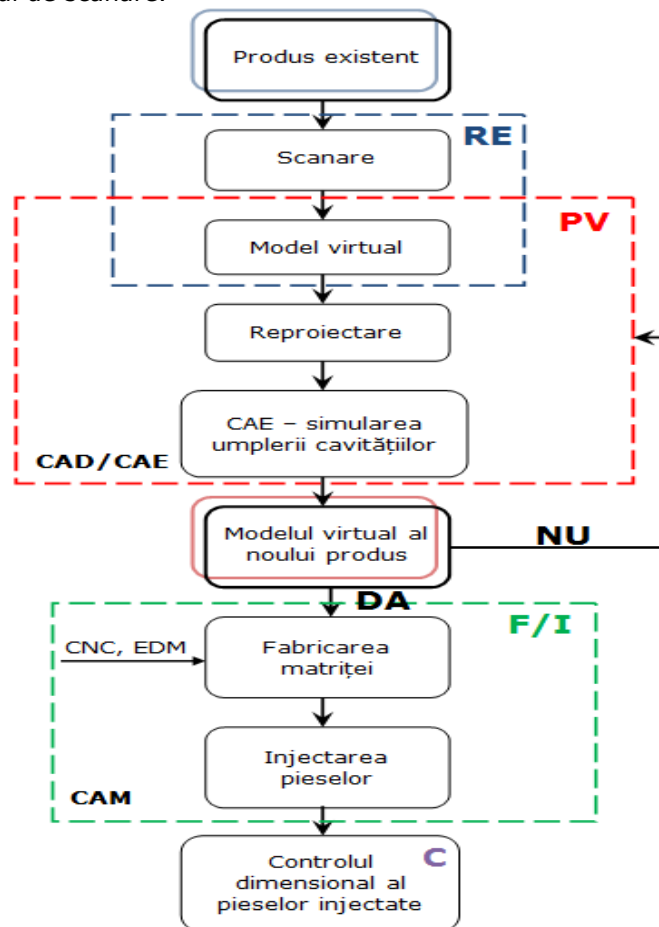


Fig. 5.1 Metoda propusă

Metoda propusă (fig.5.1) cuprinde patru faze distincte:

- tehnica reverse engineering (RE);
- reproiectare și simulare umplerii cavităților matriței de injectare (PV – Proiectare virtuală);

- fabricarea matriței și injectarea pieselor (F/I)
- controlul dimensional al pieselor injectate (C).

### 5.1. Aplicarea tehnicii Reverse Engineering

Primul pas este cel de a experimenta funcționalitatea și forma produsului. Această fază include demontarea în întregime a produsului, scanarea componentelor posibile și obținerea modelelor geometrice ale pieselor. Aspectele care au condus la reproiectarea produsului (telecomanda pentru barieră) au fost atât de ordin funcțional (distrugerea rapidă a butoanelor de comandă – fig.5.2) dar și cele de ordin ergonomic și cost (s-a dorit folosirea unei alte plăci electronice de dimensiuni mai mici).

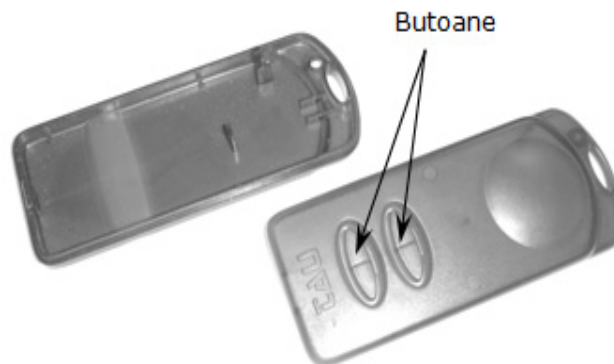


Fig. 5.2 Produsul inițial

Relevarea plăcuței cu componentele electrice a fost simplă pentru acest lucru folosindu-se un șubler, rezultatul fiind cel din fig.5.3 de mai jos.

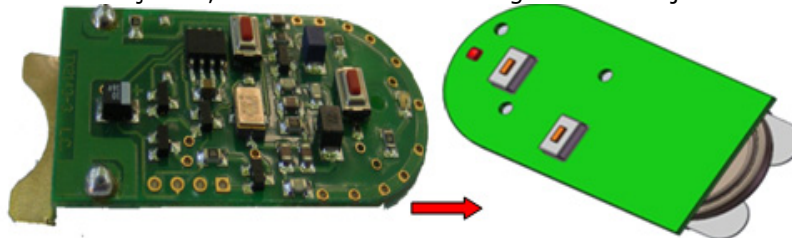


Fig. 5.3 Modelul 3D al plăcuței cu componente electrice

Butoanele injectate direct în carcasă s-au dorit a fi înlocuite cu unele din silicon. Pentru aflarea dimensiunilor geometrice a noilor butoane s-a aplicat tehnica *Reverse Engineering*. Inițial pentru a reduce timpul de achiziție a datelor s-a aplicat o scanare fără contact de tip laser, dar datorită transparenței materialului pe anumite sectoare rezultatele au fost neconcludente. S-a încercat digitizarea pe mașina Modela MDX-15 rezultatul fiind cel din fig.5.4. După cum se observă chiar și după cosmetizare și transformarea în \*.\*STL este greu de lucrat cu modelul obținut, dar pe baza lui se poate reconstrui altul.

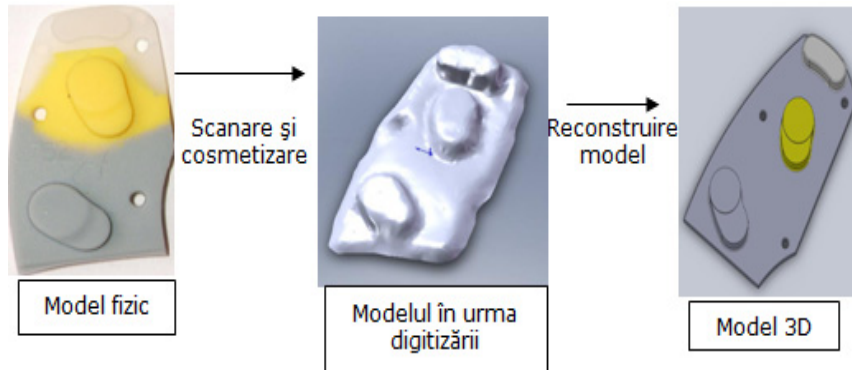


Fig. 5.4 Aplicarea tehnicii Reverse Engineering pentru relevarea butoanelor

Tot prin digitizare au fost obținute modelele geometrice ale componentelor din plastic. Precizăm că datorită interstițiului foarte mic dintre butoane și restul carcasei a fost necesară eliminarea butoanelor (pentru a preîntâmpina distrugerea acului mașinii de scanat). Prelucrarea entităților obținute în urma scanării s-a făcut într-un soft destinat manipulării mesh-urilor (Rapidform). Deoarece punctele sunt prelevate la o densitate mult mai mare decât este necesar, se va aplica filtrului *Decimate*, făcând astfel mai ușoară manipularea modelului virtual. Mesh-ul oferă o reprezentare discretă a unui obiect printr-un set de poligoane, care definește întregul obiect fără a se abate de la punctele colectate [Bradley & Bernadette, 2005]. În continuare modelele geometrice obținute au fost transformate din fișier \*. \* STL în solid, în scopul prelucrării lor ulterioare (reproiectare). În final s-au obținut modelele geometrice pentru produsul inițial (fig.5.5).

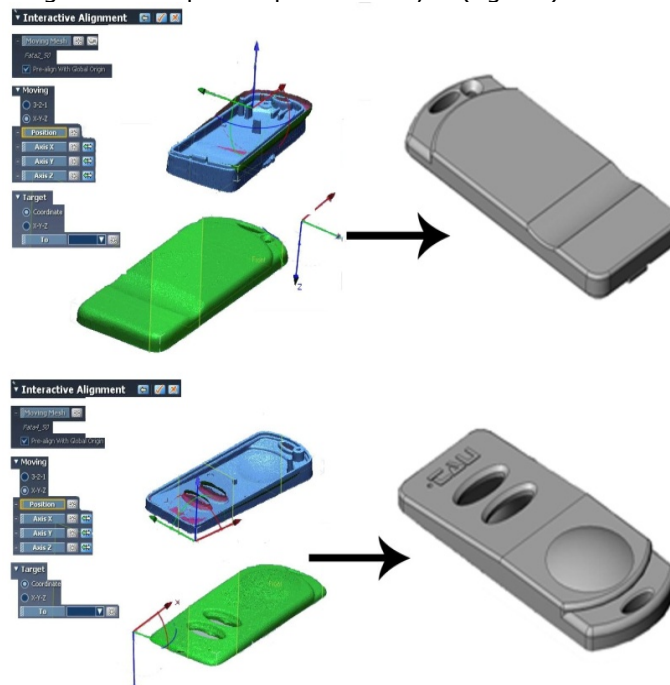


Fig. 5.5 Modelele geometrice pentru produsul inițial

## 5.2. Reproiectarea și simularea umplerii cavităților matriței de injectare

### A) Etapa de reproiectare

Al doilea pas este cel de a reproiecta produsul pe baza rezultatelor obținute anterior. Acest lucru se face ținând cont atât de aspecte ergonomice, cât și de aspecte funcționale.

Reproiectarea carcasei inferioare a presupus parcurgerea următoarelor etape:

- îndepărtarea elementelor de fixare ale plăcii de comandă și a nervurilor;
- reproiectarea elementelor de fixare pentru noua placă de comandă ce se dorește a fi instalată în carcasă;
- adâncirea fundului carcasei, placa de comandă fiind echipată cu o baterie de capacitate mai mare și implicit de dimensiuni mai mari;
- realizarea unui element de centrare și fixare a plăcii de comandă.

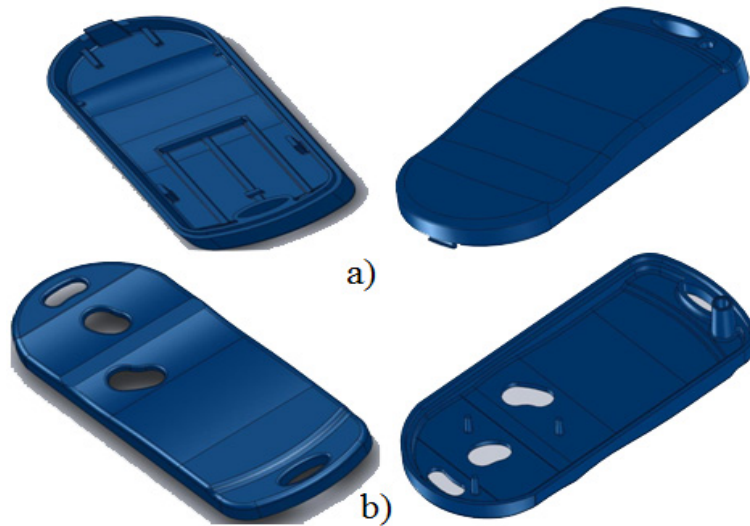


Fig. 5.6 Carcasa telecomenzii  
a – partea inferioară; b – partea superioară

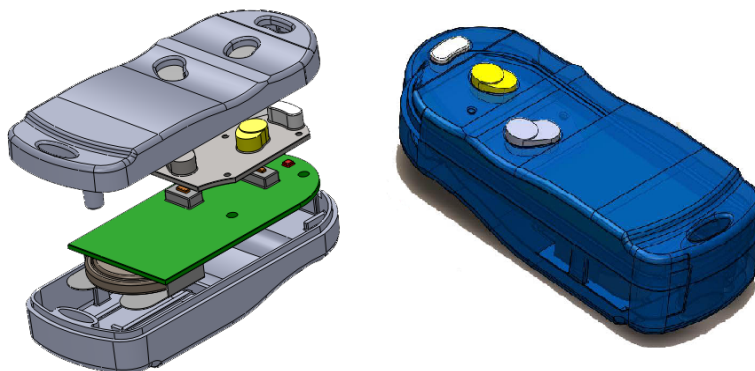


Fig. 5.7 Rezultatul randării ansamblului final



Pe baza celor două componente (butoanele și placa electronică) a fost modelată carcasa noii telecomenzi. Noua carcasa este compusă din două piese (fig.5.6) iar ansamblul final este prezentat în fig.5.7. Pe parcursul acestui subcapitol vom folosi următoarele prescurtări: *CS* – *carcasa superioară*, *CI* – *carcasa inferioară*. La final s-a făcut o verificare a asamblării, verificându-se eventualele probleme de asamblare: existența simetriei, coaxialitatea găurilor de șurub, inexistența coliziunilor.

### B) Etapa de simulare umplerii cavităților matriței de injectare

Carcasa telecomenzii va fi realizată prin procesul de injectare în matriță, fiind cea mai comună metodă de producție în masă pentru piese din materiale polimerice. Deși matrițele sunt foarte scumpe, costul per piesă este foarte scăzut. Geometriile complexe sunt posibile și limitate doar de tehnologiile de fabricație a matrițelor. Factorii de influență ce pot să aibă un impact direct la injectarea în matriță, respectiv la obținerea unei piese care să corespundă desenului de execuție sunt: geometria piesei, materialul ales, tipul matriței și tipul mașinii de injectare [Wu, 2011], [Mărieș, 2009]. În timpul umplerii matriței topitura se orientează după diferite direcții, astfel pot apărea probleme. Deformări de formă din cauza contracțiilor cauzate de răcirea mai rapidă a unor fronturi de curgere. La nivel local contracțiile variabile și deformările asociate pot fi cauzate și de asemenea prevenite de controlul variabil al temperaturii matriței și/sau de răcirea ei. Prin urmare, este important să se ia în considerare viteza de răcire a materialului din interiorul matriței în faza de proiectare și dezvoltare a produsului. După răcire piesele trebuie scoase din matriță. În acest scop aruncătoarele trebuie să fie amplasate în puncte adecvate, unghiurile de demulare trebuie să fie determinate, iar în cazul orificiilor laterale trebuie să se caute soluțiile acceptabile în ceea ce privește proiectarea și realizarea matriței. În funcție de proiectarea piesei pot apărea linii de sudură sau bule de aer.

În această etapă s-a realizat simularea umplerii cavităților matriței de injectare cu scopul estimării defectelor ce pot apărea în urma procesului de injectare. Adăugând nervuri de rigidizare grosimea pereților va varia, influențând calitatea piesei injectate. Grosimea pereților influențează multe dintre caracteristicile piesei: aspectul, rezistența mecanică, posibilitatea de injectare în matriță și costul final al produsului. În principiu, simularea în Moldflow [Hariyanto, 2006], [Balteș, 2009] [Postolache, 2009] urmărește studierea fenomenului de curgere turbulentă care conduce la formarea de *retasuri*, *goluri de aer*, *linii de sudură* și apariția tensiunilor interne în piesă [Chevaierl, 2004], [Zhang, 2007]. Simularea umplerii cavităților a fost realizată folosindu-se polipropilena (PP) cu calități excelente de rezistență mecanică și chimică, rigiditate și tenacitate. În această etapă s-a testat umplerea modelului virtual, pentru a descoperi defectele ce pot influența rezistența mecanică și estetica pieselor. Totodată s-a obținut timpul de umplere a pieselor (fig.5.8) și poziția frontului de curgere la intervale regulate.

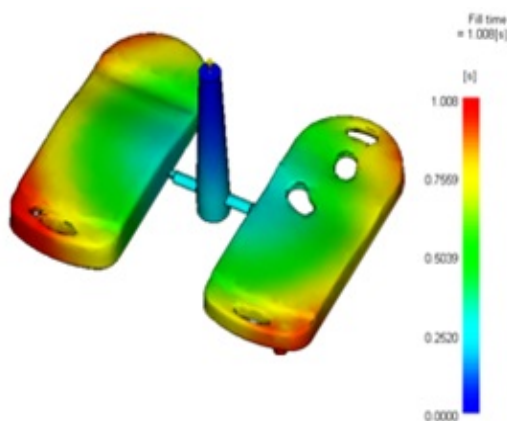


Fig. 5.8 Rezultatul simulării timpului umplerii pieselor

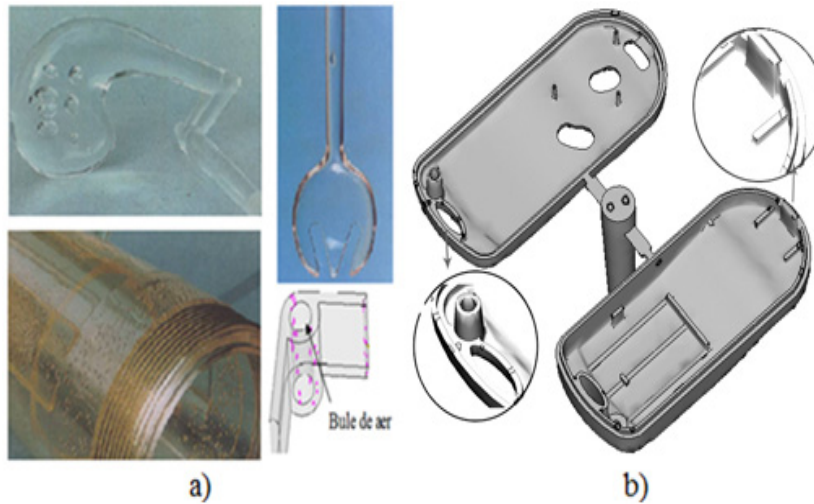


Fig. 5.9 Formarea golurilor de aer [Reina, 2009]  
 a – exemple de piese cu goluri de aer, b – rezultatele simulării

Rezultatele simulării curgerii evidențiază formarea *golurilor de aer interioare*. Acestea pot fi alcătuite dintr-o singură gaură sau dintr-un grup de găuri mici (fig.5.9). Golurile de aer pot avea un impact puternic asupra performanței structurale a pieselor. Acest defect are loc atunci când fluxurile de material plastic topit din zonele cu grosime de perete mai mare curg mai ușor decât cele din zonele cu grosime de perete mai subțire. Apar sub forma unor cavități goale, puțin adânci în peretele piesei, vizibile în special pe piesele translucide sau transparente [Moldflow, 2011].

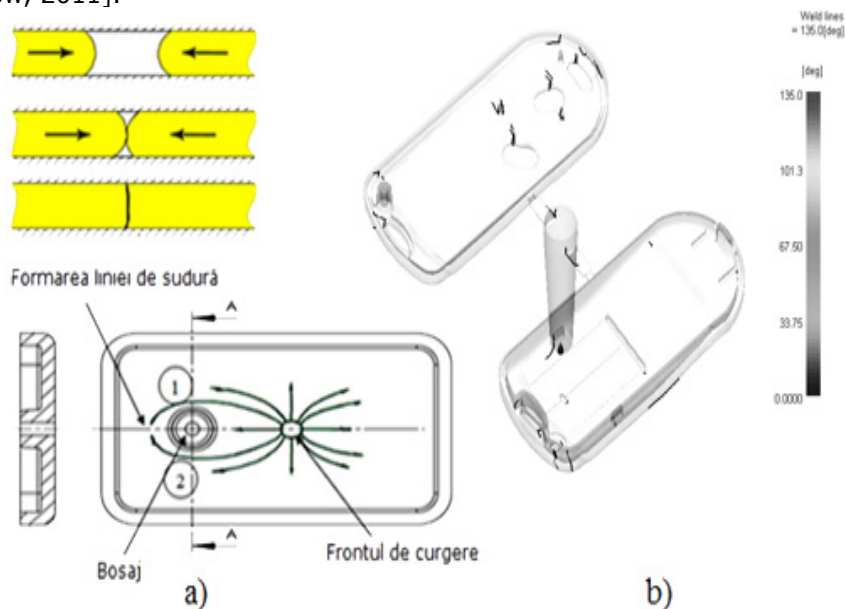


Fig. 5.10 Formarea liniilor de sudură [Chevaierl, 2004]  
 a – formarea liniilor de sudură, b – rezultatele simulării

*Linii de sudură* (fig.5.10) se formează în timpul procesului de umplere a cavității, atunci când frontul de curgere se separă și se întâlnesc într-un alt loc. Pot fi cauzate de orificii sau inserții în piese, apar la piese cu grosimea de perete variabilă. Ele pot cauza probleme structurale și estetice [Moldflow, 2011].

Există mai multe cauze care pot provoca defecte în produsele din materiale polimerice obținute prin procesul de injectare în matriță și, prin urmare, există multe metode pentru găsirea și eliminarea lor. Cele două etape prezentate anterior evidențiază importanța procesului de reproiectare asistat de tehnica RE și avantajele simulării FEM [Ghionea, 2007] [Demian, 2009] în detectarea unor defecte care pot apărea în timpul procesului de injectare în matriță. Decizii ce vor influența calitatea piesei injectate [Huang, 2011] pot fi luate încă din etapa de proiectare, astfel eliminând timpul pierdut în procesul de fabricație.

### 5.3. Fabricarea matriței și injectarea pieselor

A treia fază constă în obținerea cavităților de matriță pentru noul produs, injectarea acestuia și controlul dimensional al pieselor injectate. Aceasta etapă presupune mai multe faze necesitând cunoștințe atât din domeniul proiectării SDV-urilor, fabricării mecanice (mașini-unelte, scule, dispozitive), cât și noțiuni legate de procesul de injectare (materiale polimerice, parametrii de injectare). Obținerea modelului geometric al cavităților de matriță se poate realiza în orice soft de proiectare CAD prevăzut cu un asemenea modul.

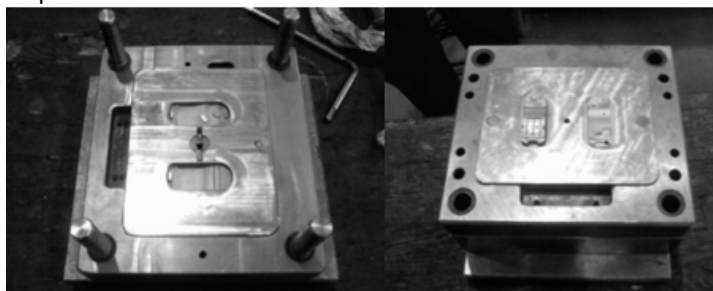


Fig. 5.11 Matrița de injectare

Fabricarea matriței s-a realizat la firma Plastique Forme, Timișoara. Pentru a reduce timpii de prelucrare și costul de fabricație s-a plecat de la o matriță existentă la care s-au adaptat plăcile de formare (fig.5.11) pentru a putea injecta reperului telecomandă. Încercările s-au realizat folosind trei materiale: polistiren cu colorant alb și polipropilenă cu colorant verde și roșu. Mașina de injectat folosită în procesul de injectare este ARBURG 75 (fig.5.12).



Fig. 5.12 Matrița montată pe mașina de injectat

Primul set de probe s-a făcut cu polipropilenă amestecată cu colorant verde. Rezultatul primei injectări a fost unul necorespunzător; piesa corespunzătoare unuia din cuiburi este incompletă și cealaltă este arsă (fig.5.13). Acest lucru s-a întâmplat din cauză că matrița încă nu ajunsese la o temperatură corespunzătoare, iar materialul s-a solidificat înainte să se umple cuibul. Ca rezultat la cele constatate la prima injectie s-a mărit viteza de dozare, iar matrița a ajuns la o temperatură optimă. Deoarece unul din cuiburi necesită pentru umplere mai mult material decât celălalt, iar canalele de pătrundere a materialului în pastile nu s-au făcut de dimensiuni diferite, una dintre piese a fost corespunzătoare, iar cealaltă a fost arsă. Pentru ca ambele piese să fie de bună calitate s-a redus timpul de menținere în matriță. Piese rezultate în urma acestui ultim reglaj nu au mai avut nici un defect (fig.5.14).

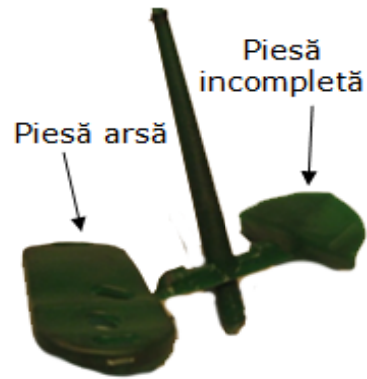


Fig. 5.13 Prima injectie

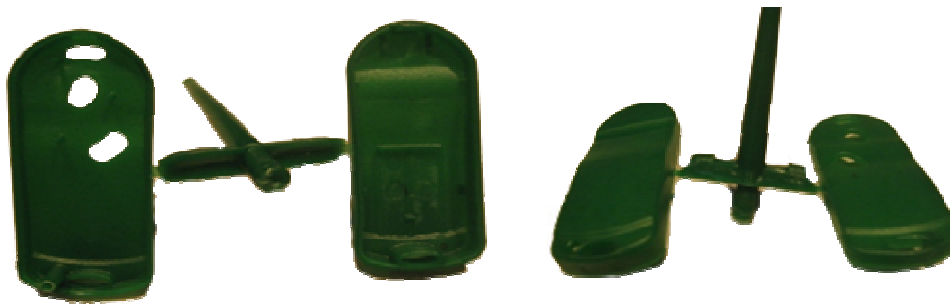


Fig. 5.14 Piese injectate din polipropilenă cu colorant verde fără defecte

Pentru al doilea set de probe s-a ales un polistiren amestecat cu colorant alb (fig.5.15). În urma probelor s-a constatat că indiferent de reglajul făcut, piesele se distrug din cauză că matrița nu are bacuri pe zona umbrită iar materialul este casant. În concluzie dacă se va dori polistirenul ca material de injectie, matrița trebuie echipată cu bac, lucru ce se poate realiza fără refacerea completă a matriței. Datorită proprietăților elastice în cazul polipropilenei matrița nu are nevoie de bacuri.



Fig. 5.15 Piese injectate din polistiren cu defecte

Al treilea set de probe s-a realizat cu polipropilena amestecată cu colorant roșu (fig.5.19). S-a încercat prima probă cu același reglaj folosit în cazul polipropilenei simple și s-a constatat că piesele au ieșit corespunzătoare. În urma acestor teste de injectare s-a hotărât crearea unui produs (telecomanda) cu două culori diferite (verde și roșu).



Fig. 5.16 Piese injectate din polipropilenă cu colorant roșu fără defecte

Integrarea tehnicii Reverse Engineering împreună cu soft-uri CAD/CAM/CAE în procesul complex de realizare a unui produs, a rezultat la micșorarea timpului de proiectare și fabricație cu aproximativ 25%. Acest lucru însemnând o reducere a costurilor de producție cu aproximativ 15%.

#### 5.4. Controlul dimensional al pieselor injectate

Ultima fază este reprezentată de controlul dimensional al pieselor injectate din polipropilenă. Din lotul de piese injectate s-au ales 20 de carcase din polipropilenă și au fost scanate pe Roland LPX-600. Piesele nu au necesitat acoperirea suprafețelor. A fost selectată strategia de scanare plană (*Plane scanning*), scanarea realizându-se din patru plane diferite. Au fost folosiți următorii parametri de scanare (fig.5.17): pasul de scanare pe X (distanța dintre punctele adiacente de scanare de-a lungul axei X,  $P_x = 0.2$  mm) și pasul de scanare pe Z (distanța dintre punctele adiacente de scanare de-a lungul axei Z,  $P_z = 0.2$  mm).

Acuratețea pieselor depinde de precizia de fabricație a cavităților, de contractia și deformarea ce apare după procesul de injectare. În acest studiu de caz comparația mesh-ului s-a realizat cu modelul virtual original, de la care s-a pornit proiectarea matriței de injectare. Alinierea celor două componente virtuale a fost realizată prin crearea unor plane de simetrie pe ambele componente. Programul (Geomagic) va detecta abateri de la obiectul testat la orice punct de pe

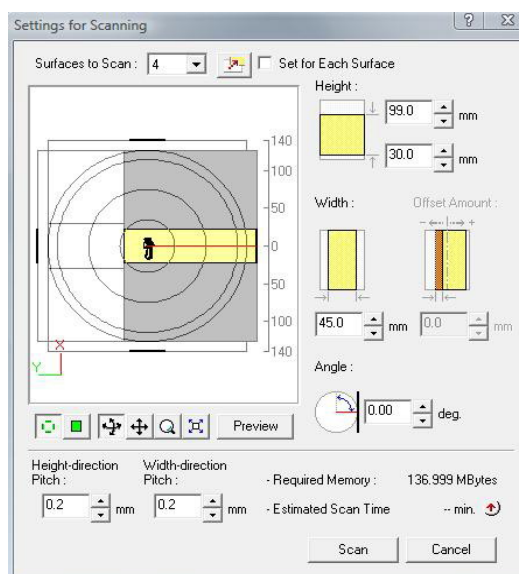


Fig. 5.17 Parametrii de scanare

obiectul de referință și va genera o hartă tridimensională cu coduri de culori a diferențelor dimensionale dintre obiecte.

Abaterile dimensionale rezultate pentru cele zece repere alese din lotul carcaselor superioare (CS) sunt prezentate în Tabel 5.1. Putem observa că primele patru repere au abateri dimensionale cuprinse între  $\pm 0,42$  și  $\pm 0,26$ , valori ridicate și inacceptabile pentru această piesă. Dar, după stabilizarea procesului de injecție: matrița a ajuns la temperatura necesară, parametrii de injecție au fost reglați, piesele se încadrează în limitele de toleranță impuse obținându-se abateri medii cuprinse între  $\pm 0,1$  și  $\pm 0,08$ .

Tabel 5.1 Rezultatele comparației carcasei superioare (CS)

Piesa	Distanța maximă		Distanța medie		Deviația standard
	poz.	neg.	poz.	neg.	
CS_1	0,425	0,42	0,189	0,156	0,172
CS_2	0,398	0,398	0,156	0,162	0,159
CS_3	0,343	0,353	0,142	0,137	0,139
CS_4	0,282	0,262	0,131	0,11	0,120
CS_5	0,189	0,289	0,122	0,1	0,11
CS_6	0,178	0,212	0,08	0,078	0,079
CS_7	0,168	0,289	0,092	0,068	0,095
CS_8	0,165	0,215	0,084	0,085	0,0845
CS_9	0,158	0,189	0,097	0,069	0,083
CS_10	0,154	0,146	0,089	0,075	0,082

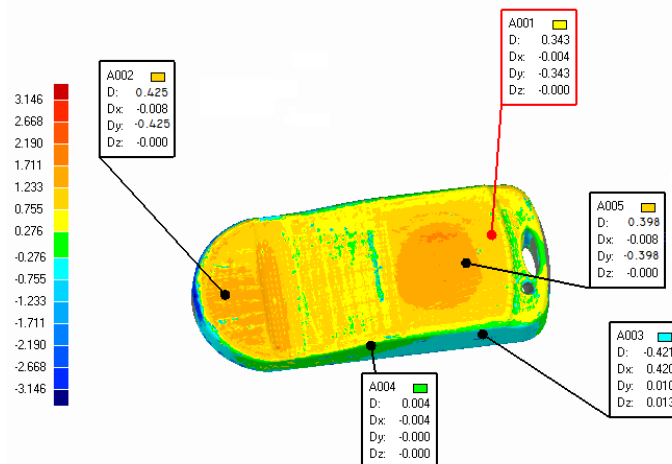


Fig. 5.18 Rezultatele comparației modelului virtual (CS) cu mesh-ul

Incertitudinea de scanare a mașinii Roland LPX-600 este de  $\pm 0,06$  mm și s-a ținut cont de acest lucru în interpretarea rezultatelor. Rezultatul comparației pentru o piesă ce a fost respinsă datorită abaterilor dimensionale ridicate, este prezentată în fig.5.18. Pentru piesa din figura precedentă s-a realizat distribuția

punctelor **mesh-ului** față de obiectul de referință fiind prezentată în Tabel 5.2 acompaniat de graficul din fig.5.19. Se poate observa că aproape 85% din puncte au o abatere de **-0,242/-0,128** mm și  $\approx 8\%$  din puncte au o abatere de **-0,128/-0,098** mm.

Tabel 5.2 Distribuția punctelor modelului scanat

>=Min	<Max	Puncte	%
-0.146	-0.42	251	0.311
-0.138	-0.358	326	0.404
-0.358	-0.256	163	0.202
-0.256	-0.242	1286	1.593
-0.242	-0.128	68250	84.541
-0.128	-0.098	6250	7.742
-0.098	0.08	2541	3.148
0.08	0.124	556	0.689
0.124	0.139	289	0.358
0.139	0.133	146	0.181
0.133	0.136	288	0.357
0.136	0.145	259	0.321
0.154	0.425	125	0.155

Distribuția deviației dimensionale a obiectului scanat

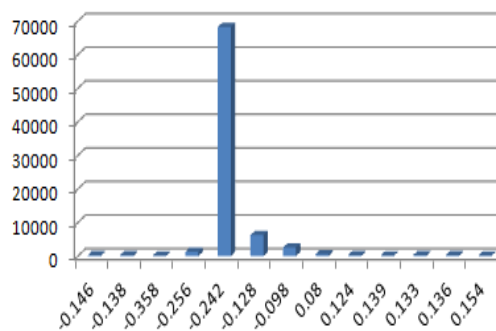


Fig. 5.19 Distribuția punctelor modelului scanat

Abaterile dimensionale rezultate pentru cele zece repere alese din lotul carcaselor inferioare (CI) sunt prezentate în Tabel 5.3. Ambele repere au fost injectate în aceeași matrită, astfel se observă că primele patru repere au abateri dimensionale cuprinse între  $\pm 0,5$  și  $\pm 0,2$ , valori ridicate și inacceptabile. La fel ca în cazul precedent, următoarele repere injectate se încadrează în limitele de toleranță impuse obținându-se abateri medii cuprinse între  $\pm 0,15$  și  $\pm 0,08$ .

Tabel 5.3 Rezultatele comparației carcasei inferioare (CI)

Piesa	Distanța maximă		Distanța medie		Deviația standard
	poz.	neg.	poz.	neg.	
CI_1	0,483	0,349	0,198	0,166	0,182
CI_2	0,412	0,412	0,173	0,154	0,163
CI_3	0,289	0,289	0,178	0,199	0,188
CI_4	0,256	0,242	0,17	0,152	0,161
CI_5	0,132	0,119	0,164	0,121	0,161
CI_6	0,119	0,11	0,121	0,111	0,171
CI_7	0,11	0,12	0,089	0,098	0,093
CI_8	0,12	0,112	0,079	0,062	0,07
CI_9	0,112	0,11	0,072	0,069	0,07
CI_10	0,11	0,120	0,064	0,055	0,059

Rezultatul comparației pentru o piesă ce a fost respinsă datorită abaterilor dimensionale ridicate, este prezentată în fig.5.20.

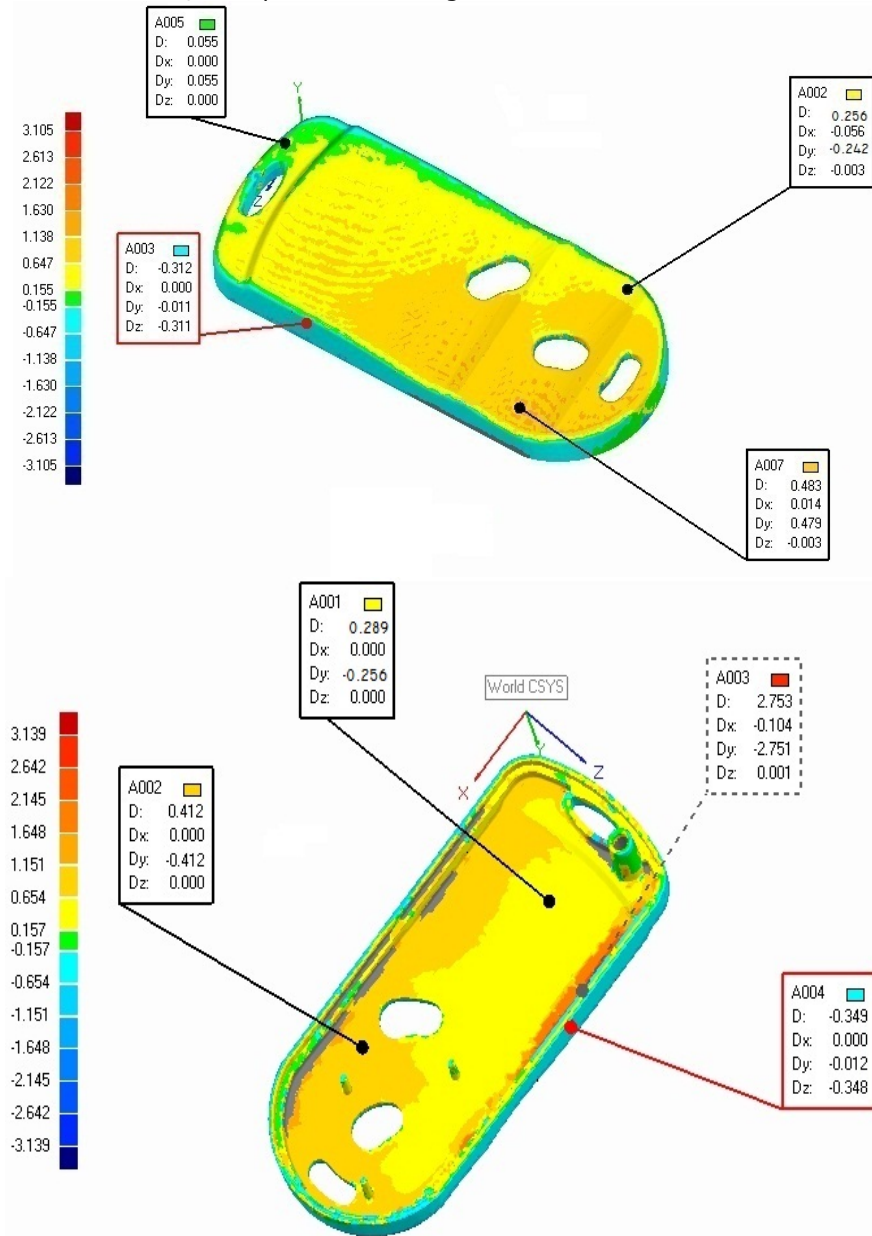


Fig. 5.20 Rezultatele comparației modelului virtual (CI) cu mesh-ul

Pentru piesa din figura precedentă s-a realizat distribuția punctelor **mesh-ului** față de obiectul de referință fiind prezentată în Tabel 5.4 acompaniat de graficul din fig.5.21. Se poate observa că aproape 88% din puncte au o abatere de - **0,197/-0,135** mm și  $\approx 6\%$  din puncte au o abatere de **-0,135/-0,121** mm.



Tabel 5.4 Distribuția punctelor modelului scanat

>=Min	<Max	Puncte	%
-0.242	-0.412	251	0.246
-0.22	-0.325	326	0.320
-0.325	-0.218	163	0.160
-0.218	-0.197	1286	1.261
-0.197	-0.135	89531	87.766
-0.135	-0.121	6250	6.127
-0.121	0.096	2541	2.491
0.096	0.122	556	0.545
0.122	0.139	289	0.283
0.139	0.145	146	0.143
0.145	0.25	288	0.282
0.25	0.268	259	0.254
0.268	0.389	125	0.123

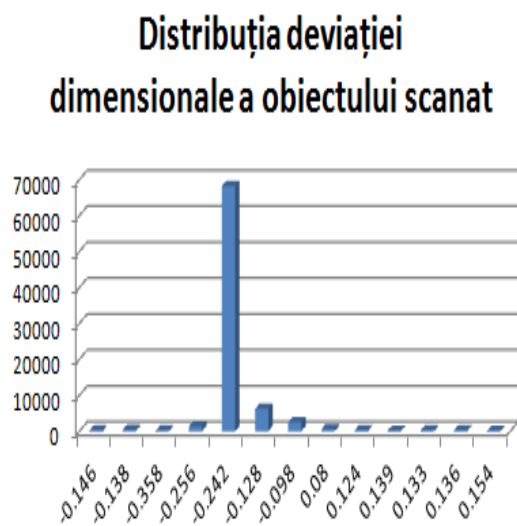


Fig. 5.21 Distribuția punctelor modelului scanat

Etapa de asamblare s-a produs fără a întâmpina erori de poziționare. Plăcuța electronică s-a încadrat în dimensiunile carcaselor și butoanele din silicon au fost fixate prin intermediul celor trei pini. Forma finală a produsului (după asamblare) este prezentată în fig.5.22.



Fig. 5.22 Produsul final

Parametrii de injectare optimi pentru obținerea unor piese ce se încadrează în câmpului de toleranță sunt prezentați în Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Parametrii de injectare pentru cazul polipropilenei

Injectie dozare					Timpi [s]	
Viteza de injectie .....2% din 2 m/s					Injectie .....2.2s	
Presiunea de injectie .....120 bar					Post-presiune .....2.4s	
Viteza de dozare .....3% din 2 m/s					Răcire in matrița .....23s	
Contrapresiune la dozare .....10 bar					Timp ciclu de injectie .....33s	
Cursa de recul a duzei .....24.5 mm						
Temperatura pe cilindru [°C]						
Duza	1	2	3	4		
	210	210	200	200		

## 5.5. Concluzii

Introducerea sistemelor de captare a formei în procesul controlului calității produselor din materiale plastice va îmbunătăți procesul de verificare dimensională a pieselor. Scanerile sunt capabile să capteze forma pieselor într-o formă rapidă și precisă. Acest studiu de caz a fost realizat pentru a pune în evidență metoda de obținere a unui nou produs folosind tehnicile Reverse Engineering și de Prototipare Virtuală. S-a plecat de la caracteristicile unui produs existent și în scurt timp și cu costuri mici a fost realizat un nou produs. Integrarea tehnicilor Reverse Engineering împreună cu procesele tradiționale de fabricație și folosind soft-uri de generare și prelucrare a condus la realizarea unui nou produs pentru care nu există documentație tehnică. În final s-a obținut un produs nou cu caracteristici superioare atât din punct de vedere estetic, cât și funcțional. Pentru produsul studiat s-au evidențiat următoarele:

- o reducere a timpului de proiectare și fabricație de aproximativ 20%;
- o reducere a costurilor de producție de aproximativ 15%;
- îmbunătățirea caracteristicilor ergonomice și estetice ale piesei.

Cu ajutorul echipamentului de scanare a fost redus timpul procesului de control dimensional pentru pieselor injectate din polipropilenă. Piese se regăsesc în câmpul de toleranță prescrise de proiectant. La finalul testelor se poate lua decizia de lansare pe piață a noilor produse.

## 6. CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

### 6.1. Concluzii

Tehnica Reverse Engineering, folosită pentru a obține modele virtuale pornind de la obiecte existente, evoluează foarte rapid. Integrarea echipamentelor de captare a formei și a soft-urilor specializate în zona industrială se face într-un ritm tot mai alert. Foarte multe centre de cercetare au dezvoltat pe parcursul anilor echipamente pentru captarea unei forme cât mai precise din punct de vedere dimensional, dar și programe specifice folosite pentru prelucrarea datelor captate. Rezultatele cercetărilor în acest domeniu au condus la apariția pe piață a unor echipamente ce au fost rapid integrate în procesele de proiectare din domeniul industrial, medical, cinematografic sau jocurilor pe calculator.

În această teză s-au îndeplinit cu succes obiectivele de cercetare propuse și prezentate în **Capitolul 2**. A fost prezentată și exemplificată prin studii de caz metoda **Sketch based 3D modeling**, concluzionându-se că metoda se bazează foarte mult pe priceperea proiectantului în folosirea suprafețelor și combinarea schițelor cu imagini ale unui obiect fizic. Nu este o metodă precisă din punct de vedere dimensional, dar poate fi integrată în procesul de proiectare pentru a aproxima forma unei piese/ componente. Este o metodă care folosește raționamentul metodologiei Top-Down folosită în mai multe domenii de activitate: auto, aeronautică, programare, management și organizare, arhitectură, etc. Folosind această metodă nu este pierdut timpul ce a fost investit în realizarea schițelor pe baza cărora s-a ales forma finală a unui produs. Folosind metoda Sketch based 3D modeling proiectantul începe crearea ansamblului folosind în mod direct schițele create anterior, modelând întreg ansamblul și apoi subansamblele și componentele ce-l compun.

S-a implementat cu succes pe modele virtuale simple, o nouă metodă de obținere a modelului virtual pornind de la programul NC destinat mașinilor cu comandă numerică. Modelele virtuale exemplificate în **Capitolul 3** au fost reconstruite folosindu-se informațiile primite de la un program NC. În crearea tehnologiei de fabricație, tehnologul va alege sculele care se potrivesc pentru realizarea piesei, va aplica corecțiile necesare și va decide strategia cea mai potrivită care va determina traiectoria sculei așchietoare. Proiectantului i se oferă posibilitatea de a refolosi informațiile create de tehnolog pentru a reconstrui modele virtuale, acolo unde acestea lipsesc. Programele NC conțin informații valoroase despre strategiile utilizate în fabricația piesei, parametrii tehnologici (viteza și avansul de așchiere), tipul de instrument și caracteristici și cel mai important lucru în această chestiune – traiectoria sculei așchietoare.

În urma studiului bibliografic realizat s-a găsit o nișă care nu a fost complet epuizată de către comunitatea științifică. Astfel, s-a dedicat un întreg capitol studierii echipamentelor de captare a formei ce se află în dotarea Facultății de Mecanică din cadrul UPT. S-a urmărit aflarea preciziei de captare a formei în scopul integrării echipamentelor în procesul de control a calității dimensionale pentru piese

injectate din materiale polimerice. A fost testată precizia mașinilor de captare a formei și abaterile dimensionale care pot apărea în urma procesului de cosmetizare sau a procesului de îmbinare a mai multor scanări. S-a identificat incertitudinea volumetrică de scanare/digitizare. În urma testelor putem concludem că incertitudinea de scanare a mașinii **Roland LPX-600** este  $P \approx 0,06$  mm, iar incertitudinea de digitizare a mașinii **Modela MDX-15** este  $P \approx 0,04$  mm. Dezavantajul sistemului de digitizare este timpul de achiziție lung, dar cantitatea de date măsurate și utilizarea flexibilă a sistemului îl face să fie bun pentru controlul calității la un lot mic de piese. Avantajul folosirii ambelor echipamente este permiterea generării unei harți tridimensionale cu coduri de culori, astfel se pot observa abaterile dimensionale pe întreaga formă a piesei. Folosind această metodă de control dimensional pot fi controlate piese cu formă nedefinită (freeform), iar pe baza rezultatelor provenite din compararea datelor se poate lua decizia în ceea ce privește calitatea produselor injectate.

Ținând cont de aceste date în **Capitolul 5** a fost ales un produs aplicându-se tehnici de RE/PV/CAI pentru a reduce timpul de proiectare, producție și control dimensional. Avantajul echipamentului de scanare este cel de a reduce timpul procesului de control dimensional pentru pieselor injectate din polipropilenă. La finalul testelor se poate lua decizia de lansare pe piață a noilor produse. Aplicații ale tehnicilor RE/PV/CAI se răspândesc din ce în ce în mai multe domenii industriale la nivel mondial. Aceste tehnici ajută la dezvoltarea rapidă a produselor cu formă complexă, reducând timpul de proiectare, producție și verificare a componentelor.

Dezvoltarea programelor de proiectare în ultimele două decenii a condus la comercializarea de produse cu forme complexe care nu ar putea fi materializate fără ajutorul calculatorului. Procesul de proiectare a unui nou produs a scăzut cu 50% trăgând în jos și prețul acestuia.

## 6.2. Contribuții personale

Rezultatele studiilor teoretice și ale cercetărilor experimentale efectuate în cadrul tezei permit stabilirea următoarelor contribuții originale:

- 1) Aplicarea și testarea unei noi metode de captare a formei unui obiect. Metoda se numește **Sketch based 3D modeling** și putem spune că face parte din metodologia **Top-Down**.
- 2) Dezvoltarea unei noi metode de realizare a modelelor virtuale pornind de la **programe NC**.
- 3) Determinarea experimentală a factorilor care influențează calitatea suprafețelor mesh-ului rezultat în urma scanării. Experimentul s-a realizat pe mașina **Roland LPX-600** constatându-se că o alegere bună a strategiilor de scanare este mult mai importantă decât alegerea parametrilor de scanare minimi. Astfel este redus timpul de scanare și calitatea suprafeței nu este influențată.
- 4) Cercetări privind influența echipamentelor de digitizat/scanat asupra captării detaliilor de formă.
- 5) Dezvoltarea unei metode hibride de captare a formei pieselor de dimensiuni mari ce prezintă mici detalii de formă. Metoda reduce timpul de achiziție oferind o precizie ridicată a modelului rezultat, comparat cu obiectul fizic.

- 6) Stabilirea abaterilor dimensionale ce apar în urma aplicării funcțiilor de cosmetizare
- 7) Stabilirea incertitudinii de scanare pe mașina Roland LPX-600 ( $P \approx 0,06 \text{ mm}$ ) și a incertitudinii de digitizare pe mașina Modela MDX-15 ( $P \approx 0,04 \text{ mm}$ ).
- 8) Integrarea echipamentului de digitizat în procesul de control dimensional al unor piese injectate din materiale polimerice.
- 9) Aplicarea tehnicilor RE și PV în procesul de reproiectare a unui produs.

### 6.3. Direcții viitoare de cercetare

- Realizarea unei mașini de digitizat și scanat care ar reduce timpul de captare a formei și ar elimina o parte din dezavantajele amintite în **Capitolul 3**. O schemă poate fi observată în fig.6.1.

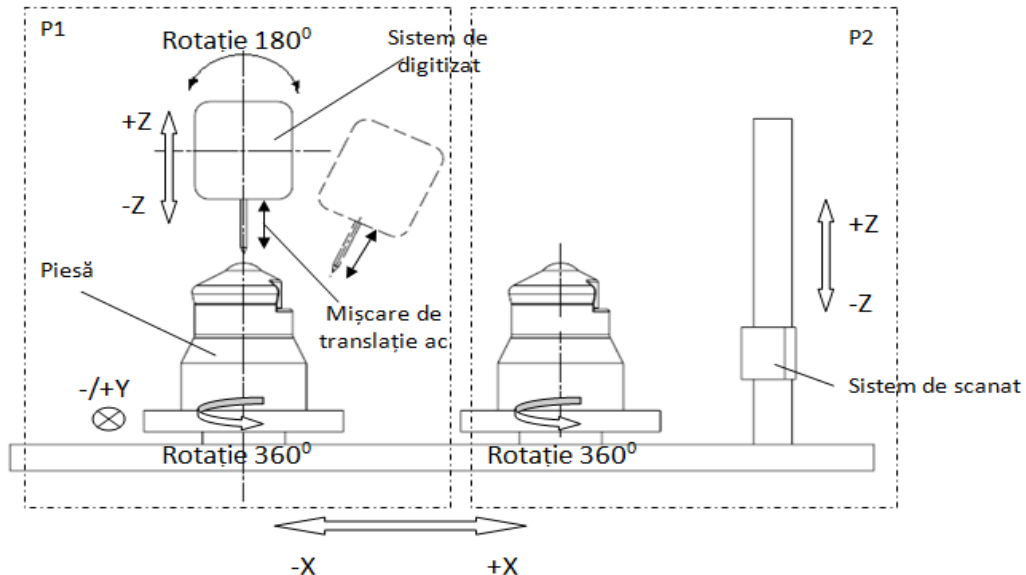


Fig. 6.1 Schema mașină de digitizat/scanat

- Automatizarea procesului de control dimensional prin scanare. Integrarea scanării pieselor și compararea într-un flux continuu de producție.

## 7. BIBLIOGRAFIE

1. Abella R., Daschbach J., McNichols R. (1994). *Reverse engineering industrial applications*, Computers & Industrial Engineering, Vol.26, Iss.2, Pg.381-385, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/036083529490071X](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/036083529490071X) (14.09.2011)
2. Aberdeen Group (2006). *The Transition from 2D Drafting to 3D Modeling Benchmark Report*, [http://images.autodesk.com/emea\\_s\\_main/files/aberdeen\\_3dmodeling\\_benchmark.pdf](http://images.autodesk.com/emea_s_main/files/aberdeen_3dmodeling_benchmark.pdf) (05.03.2012)
3. Brătian S. (2008). *Contribuții teoretice și experimentale privind optimizarea tehnologiilor de fabricare rapidă a prototipare*, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca (Teză de doctorat), Cluj-Napoca, Romania
4. Babii S. (2000). *Elemente de Grafică pe Calculator - Curbe de aproximare și interpolare: Curbe B-Spline cubice*, <http://labs.cs.upt.ro/labs/Graphics/html/EGC/Lucrarea8.html> (26.09.2011)
5. Balteș, L., Tiorean, M. (2009). *Influence of the part shape on the polymer flow inside mould and overall strength*, Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAM Symposium, Vol.20, Iss.1, Pg.1107-1108
6. Bernadini F., Mittleman J., Rushmeir H., Silva C., Taubin C. (1999). *The Ball-Pivoting algorithm for surface reconstruction*, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol.5, Iss.4, Pg.349-359, [www.research.ibm.com/vistechology/pdf/bpa\\_tvvcg.pdf](http://www.research.ibm.com/vistechology/pdf/bpa_tvvcg.pdf) (20.09.2011)
7. Bibus (2011). *Prototiparea Rapidă tehnologia viitorului* [www.bibus.ro/presa/Prototipare%20Rapida.pdf](http://www.bibus.ro/presa/Prototipare%20Rapida.pdf) (3.10.2011)
8. Bradley C., Bernadette C. (2005). *Advances in the Field of Reverse Engineering*, Computer-Aided Design & Applications, Vol.2, Iss.5, Pg.697-706, [www.cadanda.com/V2No5\\_13.pdf](http://www.cadanda.com/V2No5_13.pdf) (28.02.2012)
9. Brajlilih T., Tasic T., Drstvensek I. (2011). *Possibilities of Using Three-Dimensional Optical Scanning in Complex Geometrical Inspection*, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, Vol.57, Iss.11, Pg.826-833, [http://en.sv-jme.eu/data/upload/2011/11/05\\_2010\\_152\\_Brajlilih\\_05.pdf](http://en.sv-jme.eu/data/upload/2011/11/05_2010_152_Brajlilih_05.pdf) (22.01.2012)
10. **Cioană C.**, Stan D., Cosma C., Țuț V. (2010). *Development of virtual objects using NC programs*, 2nd International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, (MEQAPS'10), Pg.306-310
11. **Cioană C.**, Stan D., Cosma C., Tut V. (2010). *NC programs used in Reverse Engineering Technique*, North Atlantic University Union, International Journal of Mechanics, Vol.4, Iss.3, Pg.71-78
12. **Cioană C.**, Stan D., Cosma C., Tut V. (2011). *Flow simulation on a Reverse Engineered part*, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, Vol.1, Pg.217-220
13. **Cioană C.**, Tulcan A., Cosma C., Iclănzan T. (2011). *Reverse Engineering for quality control*, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, Vol.1, Pg.221-224
14. **Cioană C.**, Tulcan A., Cosma C., Grozav I. (2012). *Scanning Strategies for Aluminum and Plastic Parts*, Solid State Phenomena, Vol.188, Pg.406-411
15. Chikofsky E. J. and Cross J. H. (1990). *Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy*, IEEE Software, Vol.7, Iss.1, Pg.13-17, [www.weid-reaktenwald.at/swe/chikofsky90.pdf](http://www.weid-reaktenwald.at/swe/chikofsky90.pdf) (06.06.2011)

16. Cosma C. (2008). *Studii privind optimizarea tehnicii de Reverse Engineering la realizarea produselor injectate din materiale plastice*, Editura Politehnica (Teză de doctorat), Timișoara, Romania
17. Cosma C., Tulcan A., Dume A., Stan D., Iclănzan T. (2008). *A methodology for developing new products using Reverse Engineering and Digital Prototyping Techniques*, Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering (ICMEN), Pg.775-781, <http://ithaki.menq.auth.gr/data/ICMEN2008PDF/09-CAMA10.pdf> (5.10.2011)
18. Cosma C., Tulcan A., Dume A., Iclănzan T. (2009). *Reverse Engineering for Active Mould Parts*, Academic Journal of Manufacturing Engineering - AJME, Vol.7, Iss.1, Pg.12-18, [www.revistadechimie.ro/pdf/COSMA%20C..pdf](http://www.revistadechimie.ro/pdf/COSMA%20C..pdf) (3.10.2011)
19. Cosma C., **Cioană C.**, Stan D., Iclănzan T. (2009). *Technique of obtaining geometric model*, Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of 20th DAAAM International Symposium, Vol.20, Iss.1, Pg.0723 - 0724
20. Cosma C., Rotar D., **Cioană C.**, Stan D., Șerban I. (2011). *Redesigning plastic products*, Revista Materiale Plastice, Vol.48, Iss.3, Pg. 259-262
21. Cosma C., **Cioană C.**, Stan D. (2011). *Improvement of the quality for plastic parts. Reverse Engineering applications*, Buletinul Științific al Universității „Politehnica” din Timișoara, Seria Mecanică, Vol. 56(70), Iss.2, Pg.18-21
22. Chaneski W. (2005). *Competing Ideas Reverse Engineering-A Valuable Service*, MMS Online, [www.mmsonline.com/articles/0298ci.html](http://www.mmsonline.com/articles/0298ci.html) (27.05.2011)
23. Chevaierl A. (2004). *Guide du Dessignateur Industriel*, Editura Hachet Technic
24. Chen Y. H., Ng C. T., Wang Y. Z. (1999). *Generation of an STL File from 3D Measurement Data with User-Controlled Data Reduction*, Int J Adv Manuf Technol, Vol.15, Pg.127-131, [www.springerlink.com/content/w63y07apt405x6aq/](http://www.springerlink.com/content/w63y07apt405x6aq/) (27.05.2011)
25. Cheung C.F., Li H.F., Lee W.B., To S. & Kong L.B. (2007). *An integrated form characterization method for measuring ultra-precision freeform surfaces*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.41, Pg.81-91, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506000630](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506000630) (19.04.2012)
26. Choa F., Shueh C., Lai C. (2004). *Value Engineering in Product Renovation*, 6th Asian Design Conference [www.idemployee.id.tue.nl/g.w.m.rauterberg/conferences/CD\\_doNotOpen/ADC/final\\_paper/564.pdf](http://www.idemployee.id.tue.nl/g.w.m.rauterberg/conferences/CD_doNotOpen/ADC/final_paper/564.pdf) (25.05.201)
27. Creaform3d (2011). [www.creaform3d.com/en/products.aspx](http://www.creaform3d.com/en/products.aspx) (31.08.2011)
28. Curless B. (1997). *New methods for surface reconstruction from range images*, A dissertation submitted to the department of electrical engineering and the committee on graduate studies of Stanford University, [www.graphics.stanford.edu/papers/curless\\_thesis/thesis.pdf](http://www.graphics.stanford.edu/papers/curless_thesis/thesis.pdf) (5.05.2012)
29. Demian G., Demian M., Grecu V. (2009). *Simulation of Temperature Field on Steel During Laser Hardening*, Proceedings of the 2nd WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures and Engineering Geology (EMESG'09), Pg.214
30. Dume, A. I., Cosma C., Stan D., Iclănzan T. (2007). *The Machine Modela MDX-15 Integration in Manufacturing Proceeding and Rapid Prototyping*, Academic Journal of Manufacturing Engineering - AJME, Vol.5, Iss.4, Pg.34-40
31. Durupt A., Remy S., Duccellier G., Eynard B. (2008). *From a 3D point cloud to an engineering CAD model: a knowledge - product-based approach for reverse engineering*, Virtual and Physical Prototyping, Vol.3, Iss.2 Pg.51-59, [www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452750802047917](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452750802047917) (05.03.2011)
32. Encarta Premium (2007). *Full Enciclopedy*

33. Ertu U., Atkinson P., Tancock D. (2006). *Applying 3D Scanning and Modeling in Transport Design Education*, Computer-Aided Design & Applications, Vol.3, Iss.1-4, Pg.41-48, [www.cadanda.com/CAD\\_A\\_3\\_1-4\\_05.PDF](http://www.cadanda.com/CAD_A_3_1-4_05.PDF) (06.06.2011)
34. Etxaniz O., Solanberrieta E., Minguez R., Muniozguren J., Arias A. (2008). *Digital modeling of a human skull*, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 27, Iss. 1, Pg. 55-58, [www.journalamme.org/papers\\_vol27\\_1/27112.pdf](http://www.journalamme.org/papers_vol27_1/27112.pdf) (23.05.2012)
35. Faro (2011). [www.faro.com/content.aspx?ct=uk&content=pro&item=2](http://www.faro.com/content.aspx?ct=uk&content=pro&item=2) (31.08.2011)
36. Fetecău, C., Cosma, L., Stan, F. (2007). *Studiul timpului de racire la injectarea materialelor plastice*, *Revista Materiale Plastice*, Vol. 44, Iss.2, Pg.163-166, [www.revmaterialeplastice.ro](http://www.revmaterialeplastice.ro) (1.03.2012)
37. Ferreira J.C., Artur S. M. & Nuno F. A. (2006). *Rapid tooling aided by reverse engineering to manufacture EDM electrodes*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.34, Iss.11-12, Pg.1133-1143, [www.springerlink.com/content/k17157lm014g0561](http://www.springerlink.com/content/k17157lm014g0561) (21.04.2012)
38. Fischer A., Park S. (1999). *Reverse Engineering: Multilevel-of-Detail Models for Design and Manufacturing*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.15, Pg.566-572, [www.springerlink.com/content/vw89rayll4q0nkwm/](http://www.springerlink.com/content/vw89rayll4q0nkwm/) (04.05.2012)
39. Galetto M., Vezzetti E. (2006). *Reverse engineering of free-form surfaces: A methodology for threshold definition in selective sampling*, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.46, Pg. 1079-1086, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505002221](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505002221) (05.05.2012)
40. Ghionea I. G. (2007). *Proiectare asistată în Catia V5. Elemente teoretice și aplicații*, Editura Bren, București
41. GFMesstechnik (2011). <http://www.gfm3d.com/> (21.10.2011)
42. GFMesstechnik (2011). *Optical 3D-measurement of cutting tools* [www.hoskin.qc.ca/uploadpdf/Instrumentation/GFM/hoskin\\_TopoCAM\\_4e723a8e142a6.pdf](http://www.hoskin.qc.ca/uploadpdf/Instrumentation/GFM/hoskin_TopoCAM_4e723a8e142a6.pdf) (21.10.2011)
43. GOM Optical Measuring Techniques (2008). *Application Example: Reverse Engineering. Aerospace: Digitizing of a Full Scale Falcon 20 "Zero G" Jet Aircraft*, [www.gom.com/fileadmin/user\\_upload/industries/falcon\\_EN.pdf](http://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/falcon_EN.pdf) (15.06.2011)
44. Guangchun W., Huiping Li, Yanjin G., Guoqun Z. (2004). *A rapid design and manufacturing system for product development applications*, *Rapid Prototyping Journal*, Vol.10, Iss.3, Pg.200-206, [www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=877484&show=html](http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=877484&show=html) (03.05.2012)
45. Haar F. B., Cignoni P., Min P., Vetkamp R.C. (2005). *A Comparison of Systems and Tool for 3D Scanning*, *3D Digital Imaging and Modeling: Applications of Heritage, Industry, Medicine and Land*, <http://vcg.isti.cnr.it/Publications/2005/TCMV05/WSH2005-24240.pdf> (25.05.2012)
46. Hammerquist R. (2003). *Curve and Surface for Point Clouds: Important Reverse Engineering Techniques for Reconstruction of Physical Models*, <http://cadcam.eng.sunysb.edu/~purwar/Teaching/MECS72/Term Papers/Robert Term Paper.pdf> (7.10.2011)
47. Hanmin L., Soonhung H. (2005). *Reconstruction of 3D interacting solids of revolution from 3D orthographic views*, *Computer-Aided Design*, Vol. 37, Iss. 13, Pg.1388-1398, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448505000205](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448505000205) (11.11.2011)
48. Hariyanto G. & Willyanto A. (2006). *Improving quality of injection mold using moldflow software simulation case study: new design plastic cup*, *Proceeding of International seminar on Product Design and Development*, Yogyakarta, Indonesia, [http://portfolio.petra.ac.id/user\\_files/04-012/IPDD\\_I\\_2.pdf](http://portfolio.petra.ac.id/user_files/04-012/IPDD_I_2.pdf) (28.02.2012)



49. Huang C. Y., Chen W. L., Cheng C. M., Pan C. Y. (2011). *Product quality prognosis in plastic injection moulding*, Production Engineering Research and Development, Vol.5, Iss.1, Pg.59-71, [www.springerlink.com/content/v11n060176u76154/](http://www.springerlink.com/content/v11n060176u76154/) (05.05.2012)
50. Iclănzan Tudor Ion (2006). *Tehnologia prelucrării materialelor plastice*, Editura Politehnica, Timișoara
51. Iliescu, N., Hadăr, A., Pastrama, Ș.D. (2009). *Cercetări combinate pentru validarea unui nou tip de element finit*, Revista Materiale Plastice, Volum 46, nr.1, p.91-94, [www.revmaterialeplastice.ro/](http://www.revmaterialeplastice.ro/) (1.03.2012)
52. Iliescu M., Spanu P., Rosu M., Comascu B. (2009). *Simulation of Cylindrical-Face Milling and Modeling of Resulting Surface Roughness when Machining Polymeric Composites*, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation (ACMOS '09), Pg.219-224, [www.wseas.us/e-library/conferences/2009/istanbul/ACMOS/ACMOS-31.pdf](http://www.wseas.us/e-library/conferences/2009/istanbul/ACMOS/ACMOS-31.pdf) (25.05.2012)
53. I-mes (2012). [www.imes-icore.de/produkte/produkt.php?idprodukt=28](http://www.imes-icore.de/produkte/produkt.php?idprodukt=28) (23.01.2012)
54. Isel, (2012). [www.iselautomation.de/products/product.php?lang=en&ID=p90](http://www.iselautomation.de/products/product.php?lang=en&ID=p90) (23.01.2012)
55. James H. (2002). *Reverse Engineering utilizing domain specific knowledge*, The University of Utah, [www.cs.utah.edu/~germain/thesis.pdf](http://www.cs.utah.edu/~germain/thesis.pdf) (4.10.2011)
56. Kara, L.B., Shimada, K. & Marmalefsky S.D. (2007). *An evaluation of user experience with a sketch-based 3D modeling system*, Computers & Graphics, Vol.31, Iss.4, Pg.580-597, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849307000982](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0097849307000982) (11.05.2011)
57. Lambdaphoto (2011). [www.lambdaphoto.co.uk/products/140.110](http://www.lambdaphoto.co.uk/products/140.110) (31.08.2011)
58. Leica (2011). [www.leica-geosystems.com/en/5574.html](http://www.leica-geosystems.com/en/5574.html) (31.08.2011)
59. Lee K. H., Woo H., Suk T. (2001). *Data Reduction Methods for Reverse Engineering*, Int J Adv Manuf Technol, Vol.17, Pg. 723-743, [www.springerlink.com/content/pltl5yc7qynp2p49/](http://www.springerlink.com/content/pltl5yc7qynp2p49/) (25.05.2012)
60. Lennings L. (2000). *Selecting Either Layered Manufacturing or CNC Machining to Build Your Prototype*, Society of Manufacturing Engineers, [www.deskproto.com/files/cncvslmt.pdf](http://www.deskproto.com/files/cncvslmt.pdf) (3.10.2011)
61. Martins F. A. R., Garcia Bermejo J. G., Casanova E. Z. & Peran Gonzalez J. (2005). *Automated 3D surface scanning based on CAD model*, A Journal of IFAC, the International Federation of Automatic Control, Vol.15, Iss.7, Pg.837-857, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415805000371](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415805000371) (28.02.2012)
62. Mărieș Gh.R.E., Manoviciu I., Bandur G., Rusu G., Pode V. (2009). *Studiul unor caracteristici fizico-mecanice ale poliamidelor utilizate pentru fabricarea articolelor sportive de performanță prin metode termice*, Revista Materiale Plastice, Vol.46, Iss.1, Pg.58-61, [www.revmaterialeplastice.ro/](http://www.revmaterialeplastice.ro/) (1.03.2012)
63. Menna F., Troisi S. (2010). *Low cost reverse engineering techniques for 3d modelling of propellers*, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.XXXVIII, Iss. 5, Pg.452-457, [www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part5/papers/138.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part5/papers/138.pdf) (21.04.2012)
64. Mengoni M., Germani M. (2009). *Reverse Engineering and restyling of aesthetic based on sketches interpretation*, Research and Engineering design, Vol.20, Iss.2, Pg.79-96, [www.springerlink.com/content/p125887680812328/](http://www.springerlink.com/content/p125887680812328/) (28.04.2011)
65. Ming Z., Dong T., Xiaoshuan Z. (2009). *Geometry Modeing for Cotton Leaf Based on NURBS*, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation (ACMOS '09), Pg. 84, [www.wseas.us/e-library/transactions/information/2009/29-331.pdf](http://www.wseas.us/e-library/transactions/information/2009/29-331.pdf) (25.05.2012)

66. Motavalli S., Shamsaasef R. (1996). *Object-oriented modelling of a feature based reverse engineering system*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol.9, Iss.5, Pg.354-368, [www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/095119296131463](http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/095119296131463) (14.09.2011)
67. Moldflow - Benefits of Plastic Flow Analysis, [www.philonnet.gr/products/moldflow/index.html](http://www.philonnet.gr/products/moldflow/index.html) (28.03.2011)
68. Ngozi S. A. (2005). *Reverse Engineering of Automotive Parts Applying Laser Scanning and Structured Light Techniques*, Project in Lieu of Thesis presented for the Masters of Science Degree the University of Tennessee, Knoxville, [http://imaging.utk.edu/publications/papers/dissertation/Sherry\\_PILOT.pdf](http://imaging.utk.edu/publications/papers/dissertation/Sherry_PILOT.pdf) (28.08.2011)
69. Omiroua S. L., Nearchoub A. C. (2007). *A CNC machine tool interpolator for surfaces of cross-sectional design*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.23, Iss.2, Pg.257-264, [www.deepdyve.com/lp/elsevier/a-cnc-machine-tool-interpolator-for-surfaces-of-cross-sectional-design-KAf0MVfVIB](http://www.deepdyve.com/lp/elsevier/a-cnc-machine-tool-interpolator-for-surfaces-of-cross-sectional-design-KAf0MVfVIB) (23.11.2011)
70. Omiroua S. L., Barouni A. K. (2005). *Integration of new programming capabilities into a CNC milling system*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol.21, Iss.6, Pg.518-527, <http://wenku.baidu.com/view/a232082bbd64783e09122b97.html> (23.11.2011)
71. Otto K. N. & Kristin L. W. (1996). *Product Evolution: A Reverse Engineering and Redesign Methodology*, Proceedings of The 1996 ASME Design Engineering Technical Conferences and Design Theory and Methodology Conference August 18-22, Irvine, California, [http://cadcam.yonsei.ac.kr/abstract\\_system/09\\_Dtm1523.pdf](http://cadcam.yonsei.ac.kr/abstract_system/09_Dtm1523.pdf) (06.06.2011)
72. Postolache I., C. Fetecău, F. S. (2009). *Study of the polymer flow through tubular runner*, Materiale Plastice, Vol. 46, Iss.4, Pg.458-461, [www.revmaterialeplastice.ro/](http://www.revmaterialeplastice.ro/) (1.03.2012)
73. INUS Technology (Rapidform) - Help file - Mesh Tools, <http://rapidform.zendesk.com/forums> (21.09.2011)
74. Răduță A., Nicoară M., Tulcan A., Locovei C. (2010). *Numerical Techniques Used in Characterization of Biomaterials*, The 6th WSEAS International Conference on ENERGY, ENVIRONMENT, ECOSYSTEMS and SUSTAINABLE DEVELOPMENT (EEESD '10), October 21-23, Timișoara, Romania
75. Reina Pierino (2009). *Injectie asistată de gaz. Injectie asistată de abur. Defecte*, Training Assocomplast
76. Reznicek, J., Pavelka, K. (2008). *New low-cost 3D scanning techniques for cultural heritage documentation*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, China, Vol. XXXVII, Pg.237-240, [www.isprs.org/proceedings/xxxvii/congress/5\\_pdf/42.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/xxxvii/congress/5_pdf/42.pdf) (2.12.2011)
77. Roland DG Corporation (2005). *LXP-600 user's manual*
78. Roland Advanced Solutions (2006). *3D Workbench Solutions*, <http://brly.co.il/brochures/all-3d.pdf> (20.10.2011)
79. Pahole I., Drstvensek I., Balic J., Mikulan M. (2003). *Manufacturing of industrial tools for sheet-metal forming by use of Reverse Engineering*, 12th International Scientific Conference Achievements in Mechanical & Materials Engineering, Pg.719-722, [www.journalamme.org/papers\\_amme03/12145.pdf](http://www.journalamme.org/papers_amme03/12145.pdf) (10.10.2011)
80. Samuelson P., Scotchmer S. (2002). *The Law and Economics of Reverse Engineering*, <http://socrates.berkeley.edu/~scotch/re.pdf> (17.05.2011)
81. Sansoni G., Docchio F. (2004). *Three-dimensional optical measurements and reverse engineering for automotive applications*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 20, Iss.5, Pg.359-367, [www.optolabbs.it/Contenuti%20multimediali/Pubblicazioni/2004RCIM%203D%20optical%20measurements%20and%20reverse%20engineering%20for%20automotive%20applications.pdf](http://www.optolabbs.it/Contenuti%20multimediali/Pubblicazioni/2004RCIM%203D%20optical%20measurements%20and%20reverse%20engineering%20for%20automotive%20applications.pdf) (5.10.2011)
82. Seiculescu V. (2007). *Proiectare asistată de calculator*, Editura Politehnica Timișoara, Timișoara, Romania

83. Sereş I. (1993). *Fenomene la curgerea materialului termoplastice în matriță*, Revista Materiale Plastice, Vol.2, [www.revmaterialeplastice.ro/](http://www.revmaterialeplastice.ro/) (1.03.2012)
84. Sereş, I. (2001). *Fabricarea rapidă a prototipurilor și matrițelor*, Revista Materiale Plastice, Vol. 2, [www.revmaterialeplastice.ro/](http://www.revmaterialeplastice.ro/) (1.03.2012)
85. Smid P. (2003). *A Comprehensive Guide to Practical CNC Programming*, Industrial Press Inc., [http://books.google.com/books/about/CNC\\_programming\\_handbook.html?id=JNnO8r5merMC](http://books.google.com/books/about/CNC_programming_handbook.html?id=JNnO8r5merMC) (23.11.2011)
86. Sniderman D. (2010). *How to chose digitizing technologies*, [www.deskeng.com/articles/aaazje.html](http://www.deskeng.com/articles/aaazje.html) (1.11.2011)
87. Solaberrieta E., Exaniz O., Minguez R., Muniozguren J., Arias A. (2009). *Design of a Virtual Articulator for the Simulation and Analysis of Mandibular Movements in Dental CAD/CAM*, Proceedings of the 19th CIRP Design Conference – Competitive Design, Cranfield University, Pg.323-331, [https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/3724/3/Design\\_of\\_a\\_Virtual\\_Articulator\\_for\\_the\\_Simulation\\_and\\_Analysis\\_of\\_Mandibular\\_Movements\\_in\\_Dental\\_CAD.-CAM-2009.pdf](https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/3724/3/Design_of_a_Virtual_Articulator_for_the_Simulation_and_Analysis_of_Mandibular_Movements_in_Dental_CAD.-CAM-2009.pdf) (7.10.2011)
88. Sokovic M., Kopac J. (2006). *RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 175, Iss.1-3, Pg.398-403, [www.freewebs.com/sanayebetsa/reverse%20engineering/1\\_RE\\_rapid%20product.pdf](http://www.freewebs.com/sanayebetsa/reverse%20engineering/1_RE_rapid%20product.pdf) (06.06.2011)
89. Sternberg J. (1997). *Scanning and modeling of 3D objects*, [www.imm.dtu.dk/pubdb/views/edoc\\_download.php/1276/pdf/imm1276.pdf](http://www.imm.dtu.dk/pubdb/views/edoc_download.php/1276/pdf/imm1276.pdf) (8.04.2011)
90. Sun X., Rosin P.L., Martin R., Langbein F. (2008). *Noise in 3D Laser Range Scanner Data*, 2008 IEEE International Conference on Shape Modeling and Applications, Pg.37-45, <http://users.cs.cf.ac.uk/Paul.Rosin/resources/papers/noise-SMI.pdf> (19.09.2011)
91. Sycode (2010). *About NC Import for SolidWorks*, trial license, [www.sycode.com](http://www.sycode.com) (23.11.2011)
92. Tabacu, Ș., Hadăr, A., Marinescu, D., Ivănescu, M., Bălășoiu, V. (2009). *Procedee numerice pentru îmbunătățirea răspunsului structural al pieselor realizate din materiale termoplastice*, Revista Materiale Plastice ,Vol. 46, Iss.2, Pg.192-197, [www.revmaterialeplastice.ro/](http://www.revmaterialeplastice.ro/) (1.03.2012)
93. Tornincosa S., Verzzetti E. (2005). *Feasibility study of a reverse engineering system benchmarking*, [www.ingegraf.es/pdf/titulos/COMUNICACIONES%20ACEPTADAS/P12.pdf](http://www.ingegraf.es/pdf/titulos/COMUNICACIONES%20ACEPTADAS/P12.pdf) (5.04.2011)
94. Tsang S., Balakrishman B., Singh K., Ranjan A. (2004). *A suggestive Interface for Image Guided 3D Sketching*, Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, Vol. 6, Iss.1, Pg.591-596, [www.dgp.toronto.edu/~ravin/papers/chi2004\\_suggestivesketching.pdf](http://www.dgp.toronto.edu/~ravin/papers/chi2004_suggestivesketching.pdf) (11.11.2011)
95. Tulcan A.; Tulcan I. & Iclanzan T. (2006). *Sisteme de Control*, Editura Politehnica, Timișoara, Romania
96. Tulcan A., Tulcan L., Stan D., Iclanzan T. (2007). *3D measuring of injected plastic parts*, Revista Materiale Plastice, Vol.44, Iss.4, Pg.316-320, [www.revmaterialeplastice.ro](http://www.revmaterialeplastice.ro/) (1.03.2012)
97. Tulcan A., **Cioană C.**, Cosma C., Grozav I. (2012). *Coordinate measuring machine measurement uncertainty Study*, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, Vol. 2, Pg.1105-1108
98. Todici, V., Lukic, D., Stevic, M., Milosevic, M. (2008). *Sistem integrat CAPP pentru fabricarea formelor de injecție pentru materiale plastic*, Revista Materiale Plastice, Vol.45, Iss.4, Pg.381-389, [www.revmaterialeplastice.ro/](http://www.revmaterialeplastice.ro/) (1.03.2012)

99. Țuț V., Tulcan A., Cosma C., **Cioană C.** (2010). *The integration of RP and RE techniques in industrial field*, 2nd International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems, (MEQAPS'10), Pg. 302 – 306
100. Țuț V., Rotar D., Cosma C., **Cioană C.** (2010). *Obtaining mold inserts cavities using rapid prototyping technique*, Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of 21th DAAAM International Symposium, Vol.21, Iss.1, Pg.1269 – 1270
101. Țuț V., Cosma C., Stan D., **Cioană C.** (2011). *An expert system for making mold cavities*, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, Vadul lui Voda-Chisinau, Republic of Moldova, Vol.2, Pg.1113-1116
102. Venish R. and Fernandes K. J. (2008). *Reverse Engineering. An industrial Perspective*, Editura Springer-Verlag London, [www.slideshare.net/jk.kingsly/fernandes-reverse-engineering](http://www.slideshare.net/jk.kingsly/fernandes-reverse-engineering) (06.06.2011)
103. Vinoda V, Gurusamyb G., Sasikumara S. (2006). *Design and analysis of power failure detector module for control of axis runaway in CNC machines during unprecedented power failures*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, Pg.1610–1616, <http://infolib.hua.edu.vn/Fulltext/ChuyenDe2009/CD129/41.pdf> (14.11.2011)
104. Vosniakos G.C., Giannakakis T. (2003). *Reverse engineering of simple surfaces of unknown shape with touch probes: scanning and compensation issues*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol.4, Pg. 563- 568, <http://pib.sagepub.com/content/217/4/563.full.pdf+html> (21.08.2011)
105. Wu C.J., Ku C.C. & Pai H. (2011). *Injection molding optimization with weld line design constraint using distributed multi-population genetic algorithm*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 52, Iss. 1-4, Pg.134-141, [www.springerlink.com/content/e0652v5817m47844/fulltext.pdf](http://www.springerlink.com/content/e0652v5817m47844/fulltext.pdf) (28.02.2012)
106. Xie Z., Wang J., Zhang Q. (2005). *Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, Iss. 12-13, Pg.1474-1486, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505000374](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695505000374) (21.04.2012)
107. Xendoll (2011). [http://xendoll.en.alibaba.com/product/51179370-50216254/3D\\_Scanner.html](http://xendoll.en.alibaba.com/product/51179370-50216254/3D_Scanner.html) (31.08.2011)
108. Yao A.W.L. (2004). *Applications of 3D scanning and reverse engineering techniques for quality control of quick response products*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, London, United Kingdom, Vol. 26, Iss. 11-12, Pg.1284-1288,
109. Zheinkai L., Lihui W., Beingheng L. (2006). *Integrating cross-sectional imaging based reverse engineering with rapid prototyping*, Computers in Industry, Vol.57, Pg. 131–140, [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361505000874](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361505000874) (05.05.2012)
110. Zhang Z., Jiang B. (2007). *Optimal Process Design of Shrinkage and Sink Marks in Injection Molding*, Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, Vol.22, Iss.3, Pg.404-407, [www.springerlink.com/content/676231124641232j/](http://www.springerlink.com/content/676231124641232j/) (05.05.2012)