

Univerzitet u Novom Sadu  
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA  
Industrijsko inženjerstvo  
Predmet: Reverzibilni inženjerski dizajn i 3D štampa

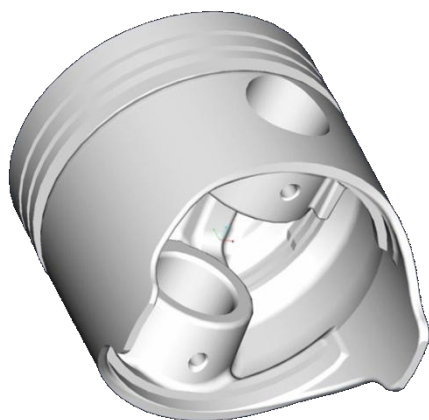
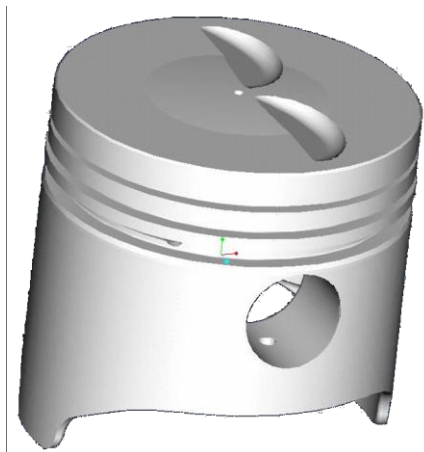
---

# **REKONSTRUKCIJA POVRŠI (3D MODELOVANJE i CAD INSPEKCIJA)**

*Predavanje 7*

## Uvodne napomene

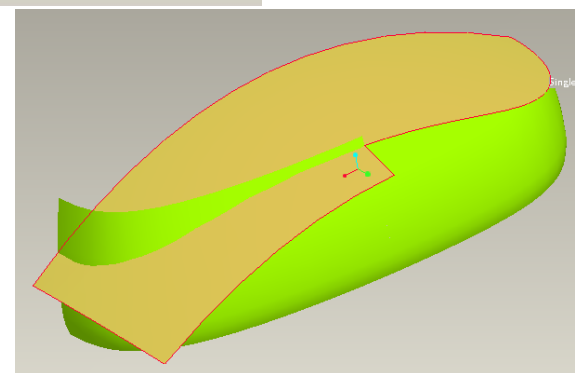
Cilj faze rekonstrukcije površina je generisanje površinskog, a zatim i solid modela, a na osnovu preprocesiranog rezultata 3D digitalizacije oblaka tačaka, poligonalne mreže ili vokseli.



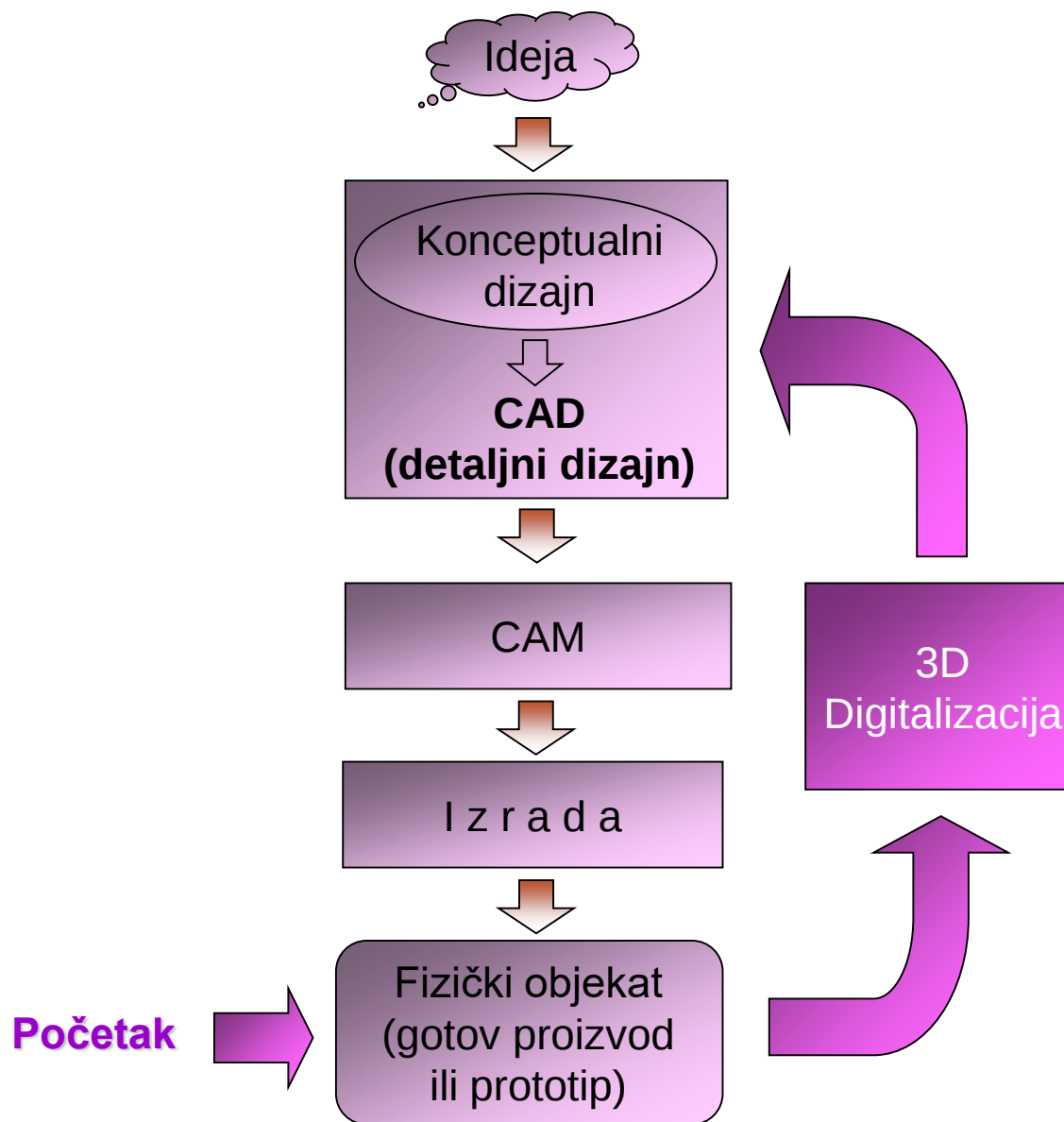
Zapreminski (solid) model



Površinski  
modeli



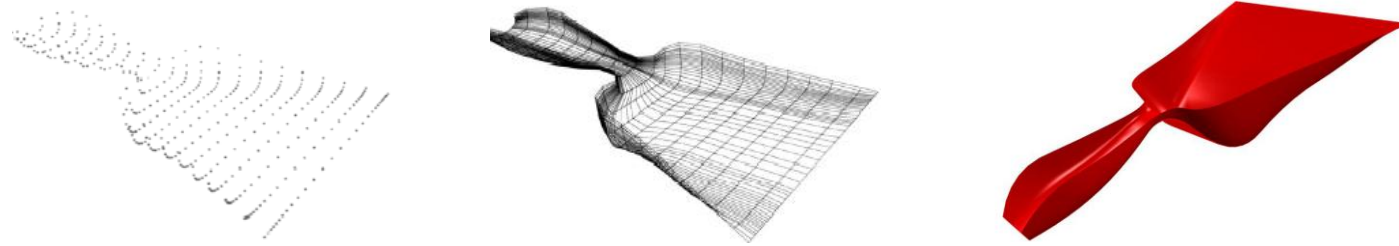
Tok operacija kod **reverzibilnog inženjerskog dizajna**  
(ili **povratnog inženjerstva**)



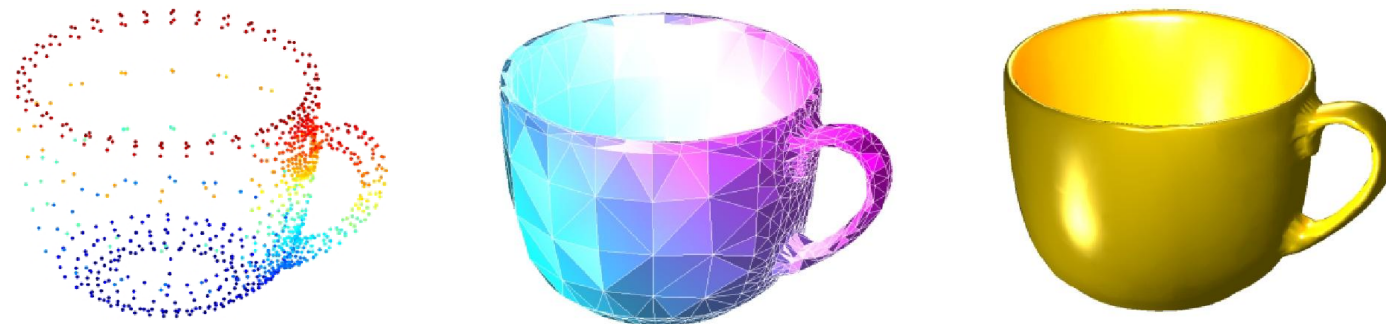
# Metode rekonstrukcije površi

Razlikuju se dve osnovne metode:

**1) Metoda poprečnih-presečnih krivih**

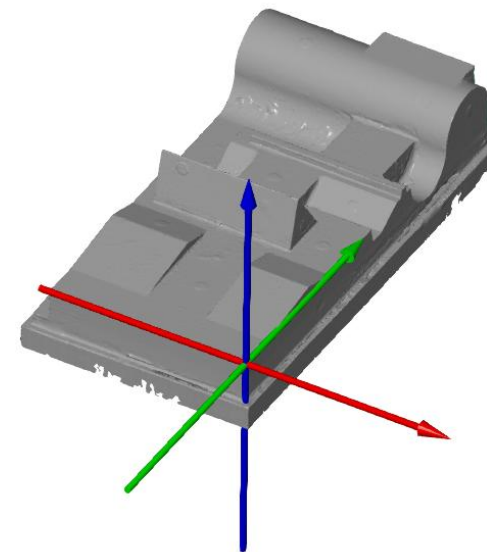
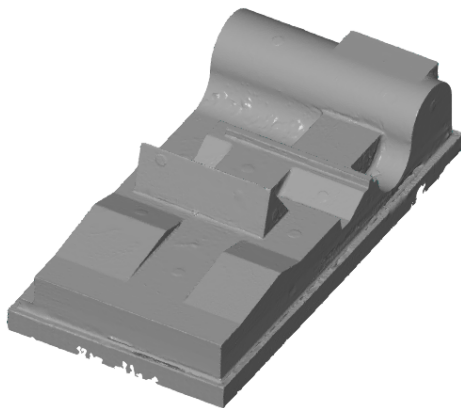
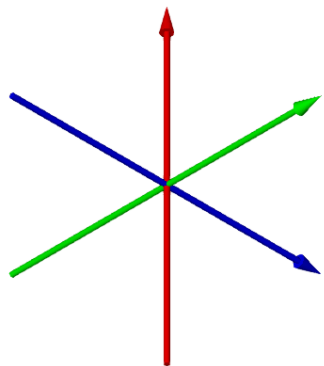


**2) Metoda poligonalne aproksimacije**



## Poravnavanje koordinatnog sistema

Inicijalni koordinatni sistem koji se dobija skeniranjem razlikuje od koordinatnog sistema proizvoda. Da bi se izvršilo 3D modelovanje i kasnija izrada predmeta potrebno je izvršiti transformaciju koordinatnog sistema u odgovarajući položaj.



Inicijalni koordinatni sistem

Transformisani koordinatni sistem

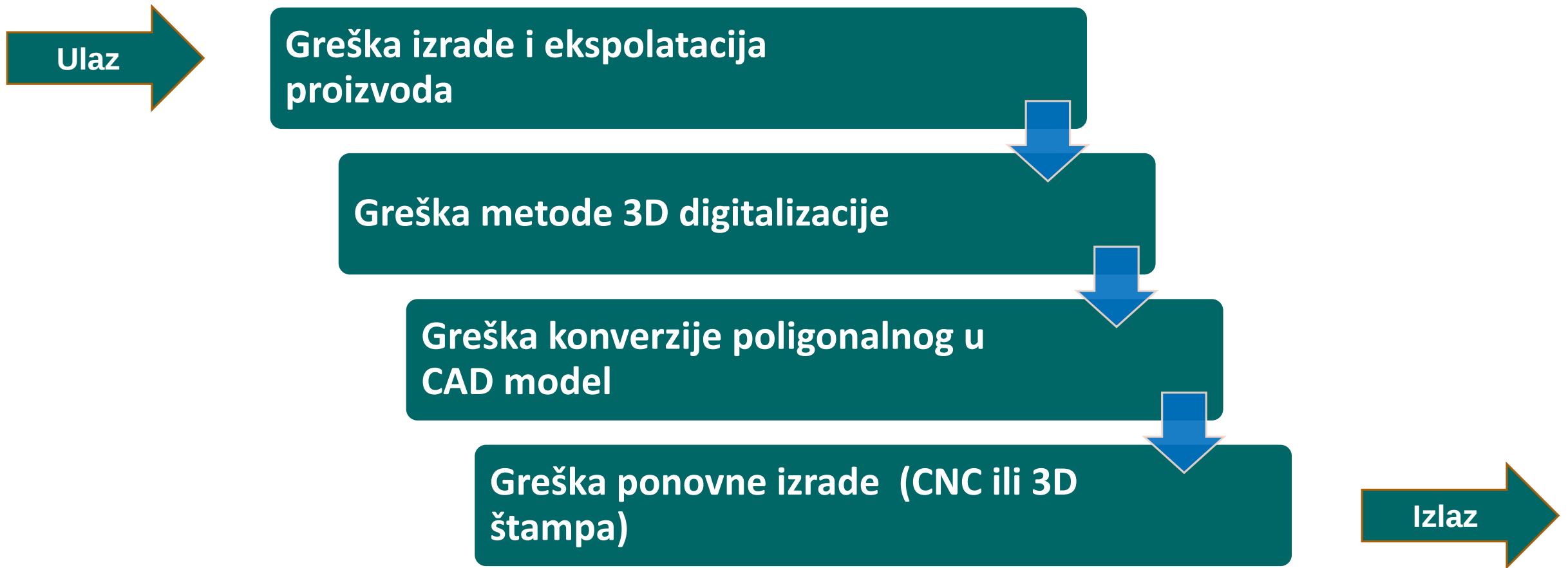
## Poravnavanje koordinatnog sistema

Transformacija koordinatnog sistema poligonalnog 3D modela u koordinatni sistem CAD softvera u kome se vrši 2D umnogome olakšava manipulaciju sa 3D modelom i olakšava kreiranje neophodnih obeležja u postupku 3D modeliranja.

Za usaglašavanje koordinatnog sistema poligonalnog 3D modela i CAD softvera najčešće se koriste supstitutivni geometrijski oblici: ravan, cilindar, konus ili izvedeni 2D linija, ravan simetrije, presek ravni, krug, itd.

**Metoda koja se najčešće koristi za poravnavanje (transformaciju koordinatnog sistema) je metoda 3 - 2 – 1. (ravan – prava – tačka )**

# Propagacija grešaka kod reverzibilnog inženjerskog dizajna

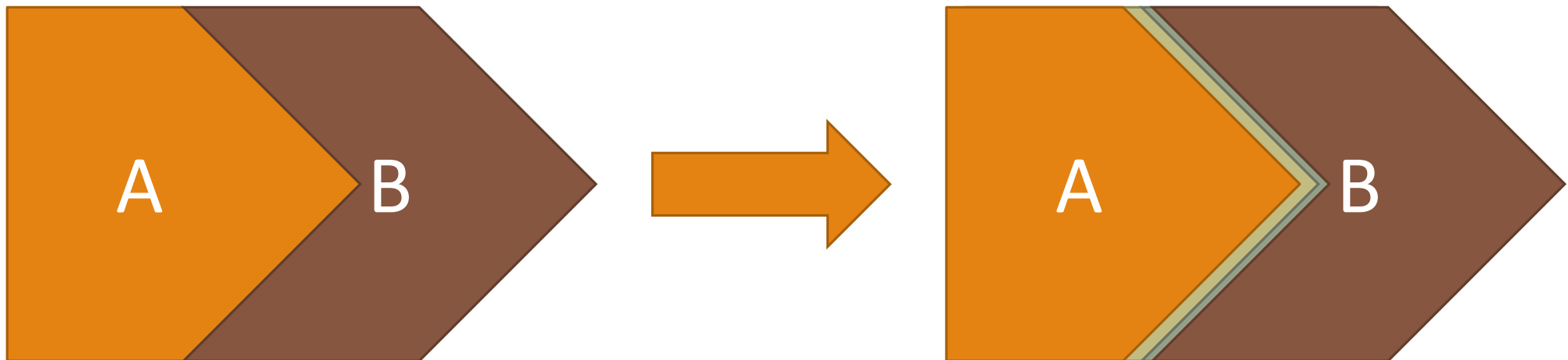


## Greška izrade i eksploatacija proizvoda

Greške su sastavni deo procesa proizvodnje. Pošto se ne može izraditi idealan proizvod, potrebno je obezbediti određeni nivo kvaliteta u skladu sa namenom i funkcijom proizvoda.

**Svaki “dobro” izrađeni proizvod u sebi nosi određeni nivo greške koja je prihvatljiva i nalazi se u propisanim tolerancijama.**

Tokom eksploatacije proizvoda i njegovog životnog ciklusa mogu se javiti gometrijske i dimenzione promene usled kojih proizvod više ne obavlja prvobitnu funkciju ili je došlo do određenog nivoa oštećenja, te je potrebno proizvod zameniti.



# Greška metode 3D digitalizacije

Veliki broj metoda 3D digitalizacije je razvijen iz razloga što ne postoji univerzalna ili najbolja metoda, sve one imaju svoje prednosti i nedostatke.

Metode 3D digitalizacije generišu određeni nivo greške koji utiče na finalnu tačnost 3D digitalizovanog poligonalnog modela.

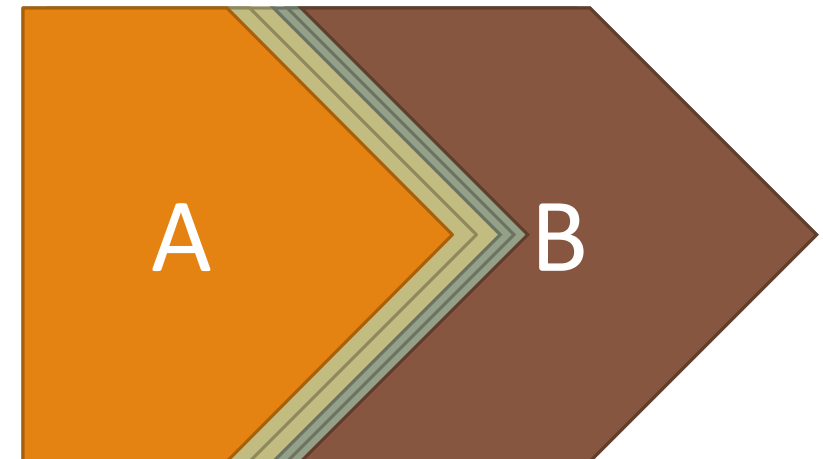
Greške 3D digitalizacije mogu biti :

**-Greške vezane za uređaj 3D digitalizacije:**

- tačnosti izrade uređaja,
- rezolucija senzora,
- radni opseg
- konverzija oblaka tačaka u poligonalni 3D model

**-Greške operatera tokom 3D digitalizacije:**

- Izbor neadekvatne metode 3D digitalizacije
- Izbor neodgovarajućih parametara 3D digitalizacije
- Slučajne greške

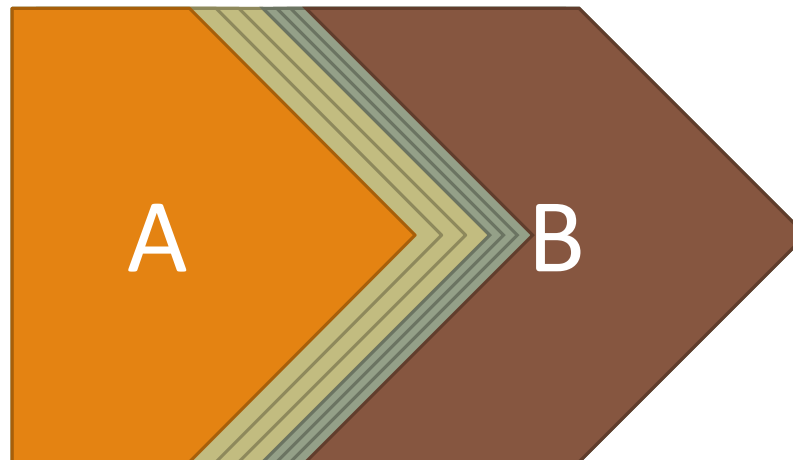


## Greška kod konverzije stl u CAD fajl

Konverzija stl poligonalnog 3D modela u CAD model nosi određenu grešku usled drugačijeg matematičkog opisivanja geometrije.

Prilikom konverzije stl u CAD fajl dolazi do aproksimacije, pa tako sitni detalji koji se mogu uočiti na poligonalnoj mreži često budu izgubljeni.

Ukoliko će se novi proizvod izrađivati aditivnim tehnologijama poput 3D štampe onda ova konverzija nije neophodna jer je stl standardni format koji podržavaju 3D štampači.



# Greška ponovne izrade proizvoda (CNC ili 3D štampa)

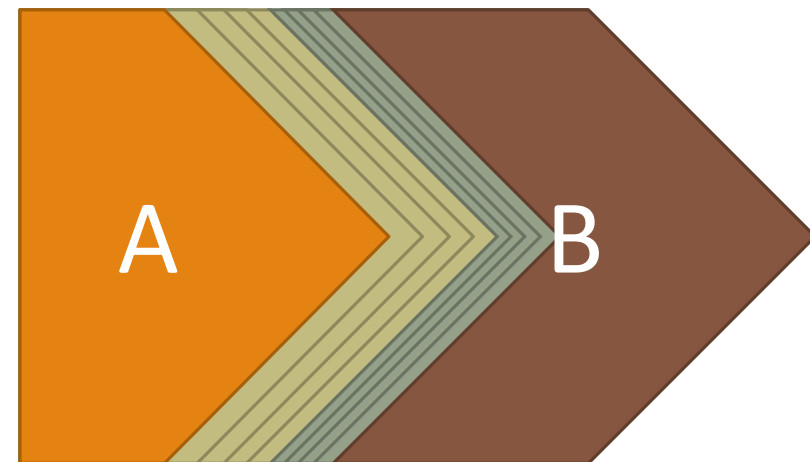
Na osnovu kreiranog CAD modela pristupa se ponovnoj izradi proizvoda.

## **Prednost izrade na CNC mašinama je:**

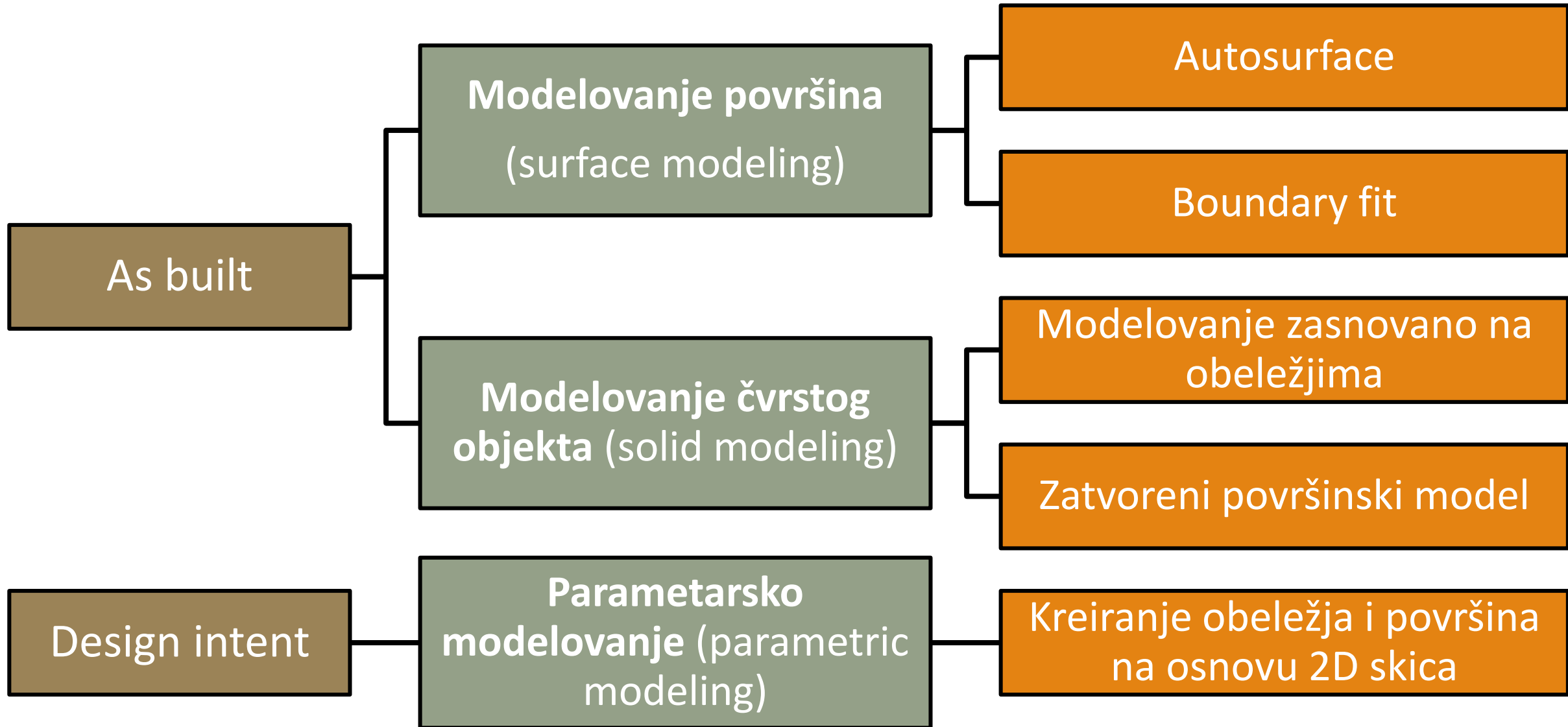
- veća tačnosti u odnosu na 3D štampu,
- efikasnija ukoliko se radi o većim serijama proizvoda,
- veći izbor materijala za izradu.

## **Prednosti izrade putem 3D štampe:**

- efikasnija ako se radi pojedinačna proizvodnja,
- lakše uočavanje grešaka prilikom izrade,
- izrada prototipa.



# Tipovi 3D modelovanja na osnovu poligonalne mreže



# Modelovanje površina

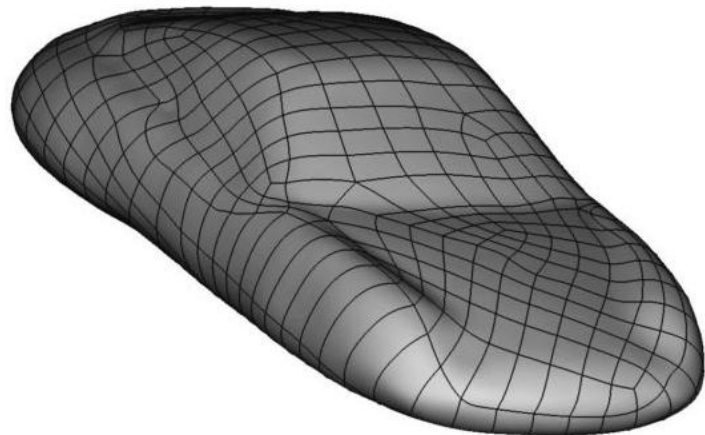
---

- Konverzija 3D poligonalnog modela u površinski
- Izvoz u neutralne CAD formate (.step .iges)
- Idealno za free form geometriju
- Nije za modele sa puno otvora i sitrnih detalja
- Rezultat je samo školjka
- Moguća je konverzija u čvrsti (solid) CAD model ukoliko je školjka potpuno zatvorena.

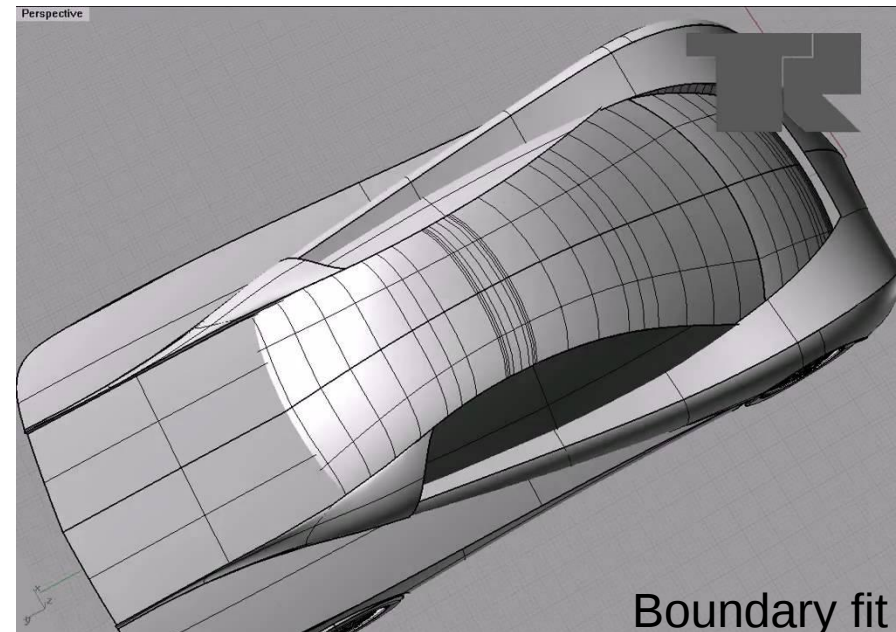
# Modelovanje površina

---

- Auto surface (avtomatsko kreiranje površina)
- Boundary fit (ručno kreiranje granica površina)



Auto surface



Boundary fit

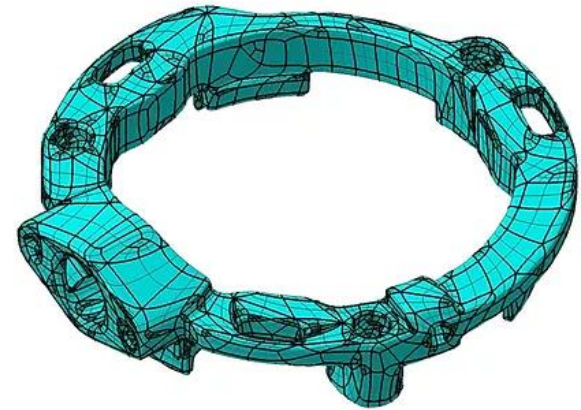
# Automatsko modelovanje površina (Auto surface)

## Prednosti autosurface:

- Brzina
- Potpuno automatski process
- Odstupanja između skeniranog modela i kreirane površine su mala oko 0.05mm.

## Nedostaci autosurface:

- Delovi površina ne prate u potpunosti oblike na 3D skenu
- Potpuno nasumično kreirane površine
- Veliki broj malih površina (utiče na veličinu kreiranog fajla)
- Potrebna jača hardverska struktura računara
- Postoji mogućnost da se neki delovi površine ne rekonstruišu, pa se na modelu javljaju otvori
- Konverzija autosurface modela u solid često nije moguća



# Ručno kreiranje granica površina (Boundary fit)

---

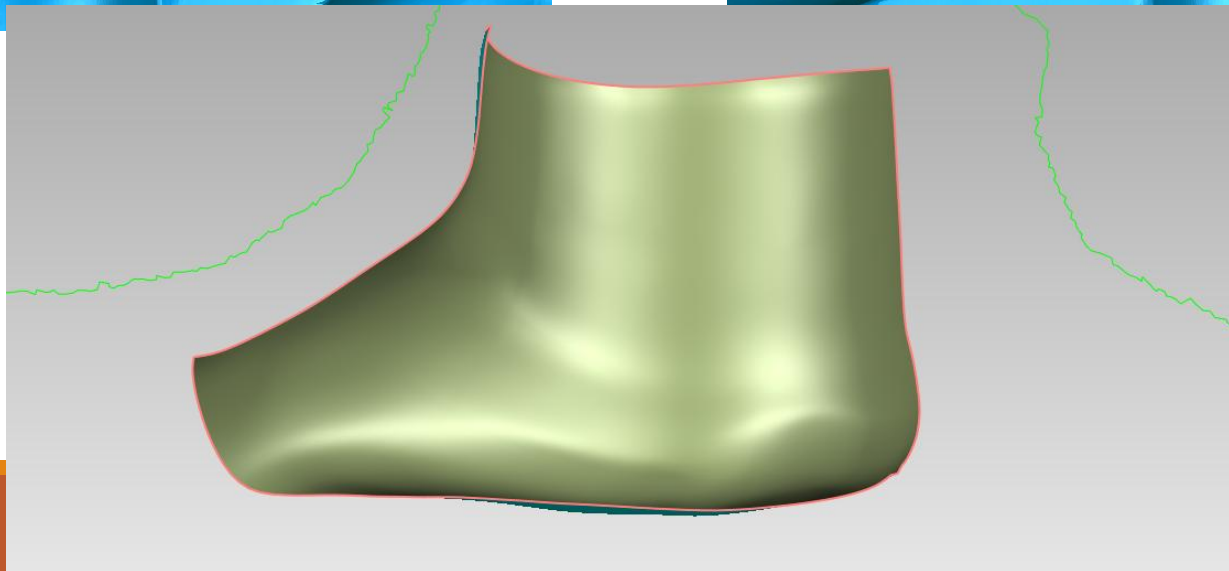
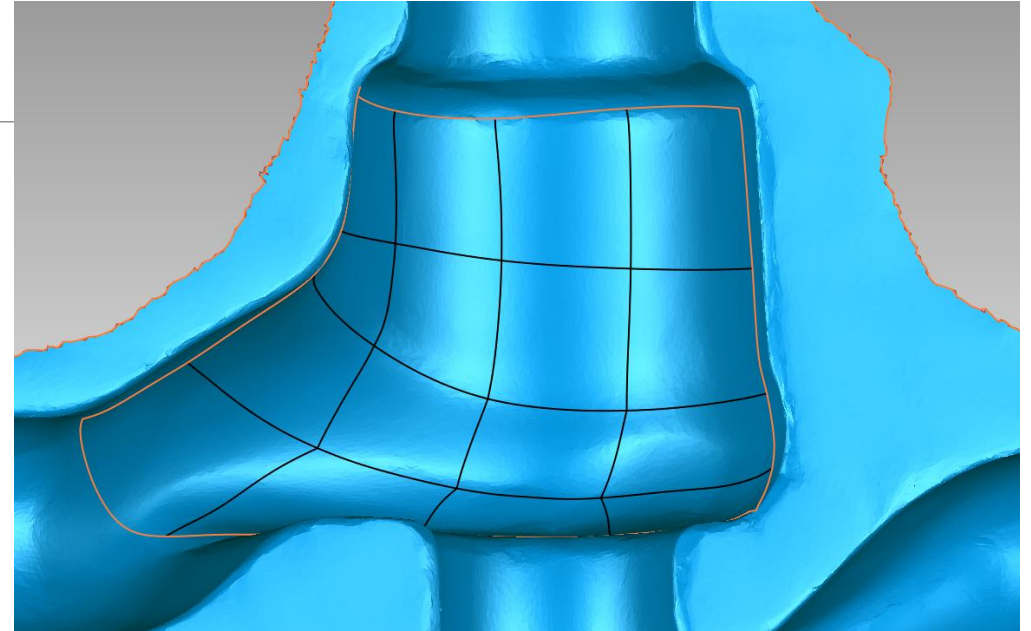
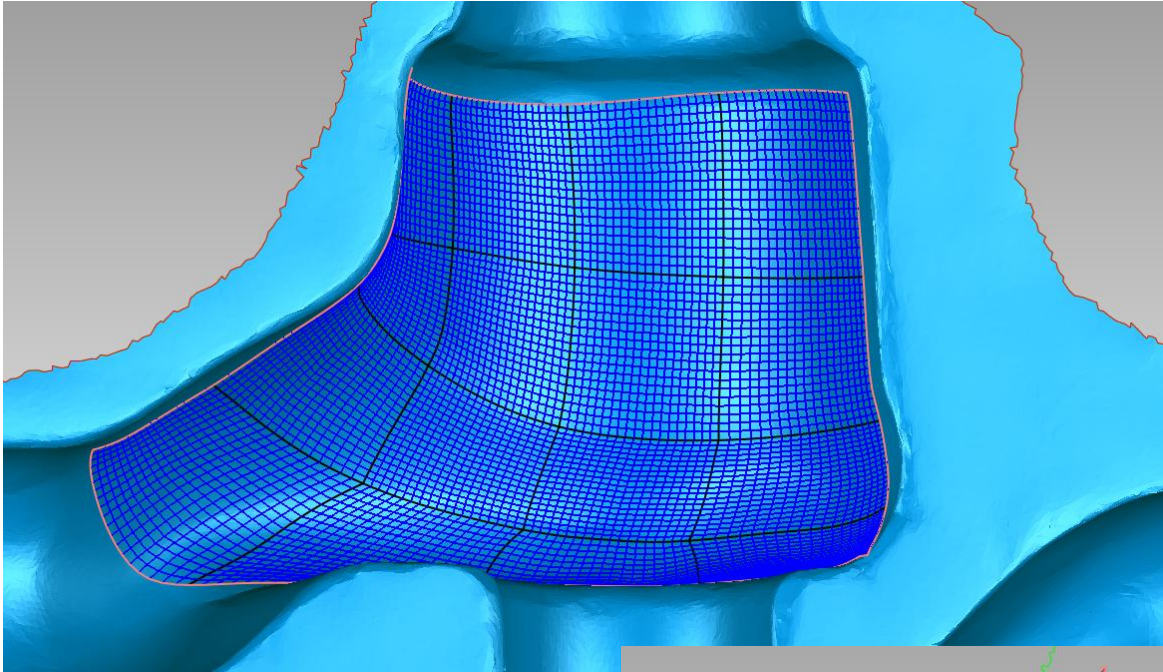
## **Prednosti Boundary fit :**

- Krive razdvajanja površina prate skenirani model zato što su ručno kreirane
- Manji broj kreiranih površina
- Zatvaranje površina i kreiranje solid modela je uvek moguće

## **Nedostaci Boundary fit :**

- Zahtevnija je u smislu rada i vremena
- Manje je tačna u odnosu na autosurface odstupanja idu do 0.1mm

# Ručno kreiranje granica površina (Boundary fit)

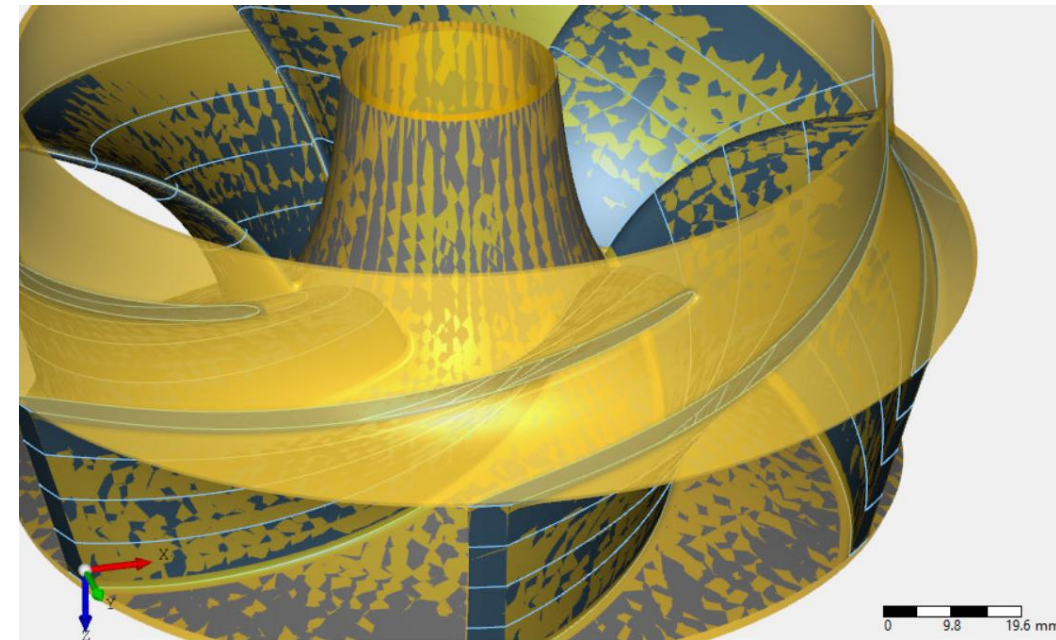


# Modelovanje čvrstog objekta (solid)

---

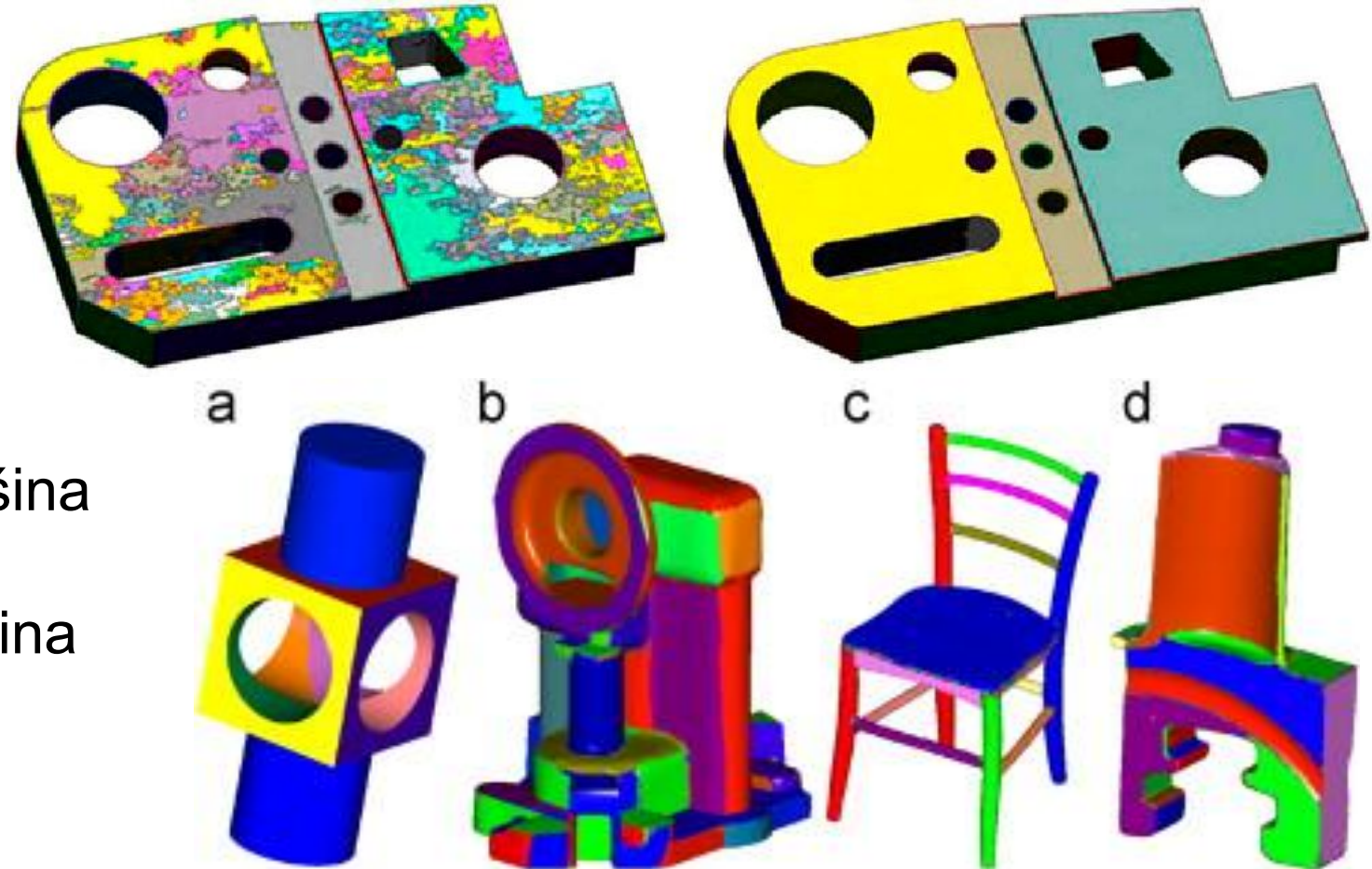
U konvencionalnom dizajnu, CAD model se stvara sklapanjem niza osnovnih geometrijskih oblika.

Da bi se rekonstruisao geometrijski CAD model sa visokom preciznošću i sačuvala informacije na visokom nivou, površinski poligonalni model treba da bude segmentiran (uprošćen) u manje površine, od kojih svaka segmentirana površina odgovara površini nekog geometrijskog primitiva ili manje složenoj free-form površini.



# Segmentacija površina

- Ravanska segmentacija
- Segmentacija kvadratnih površina
- Segmentacija Free-form površina

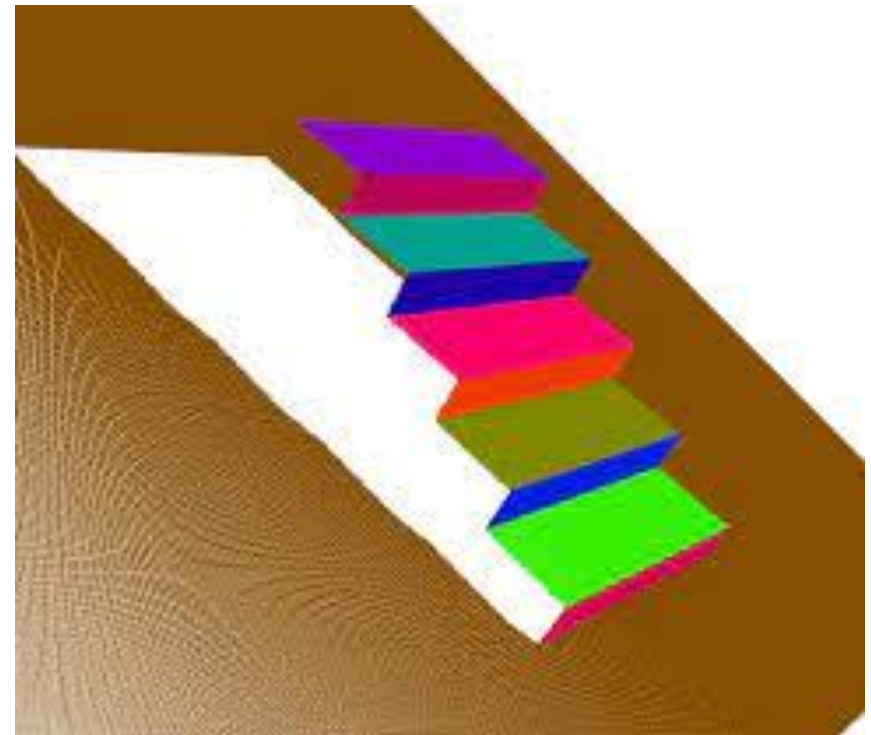


# Segmentacija površina - ravanska segmentacija

---

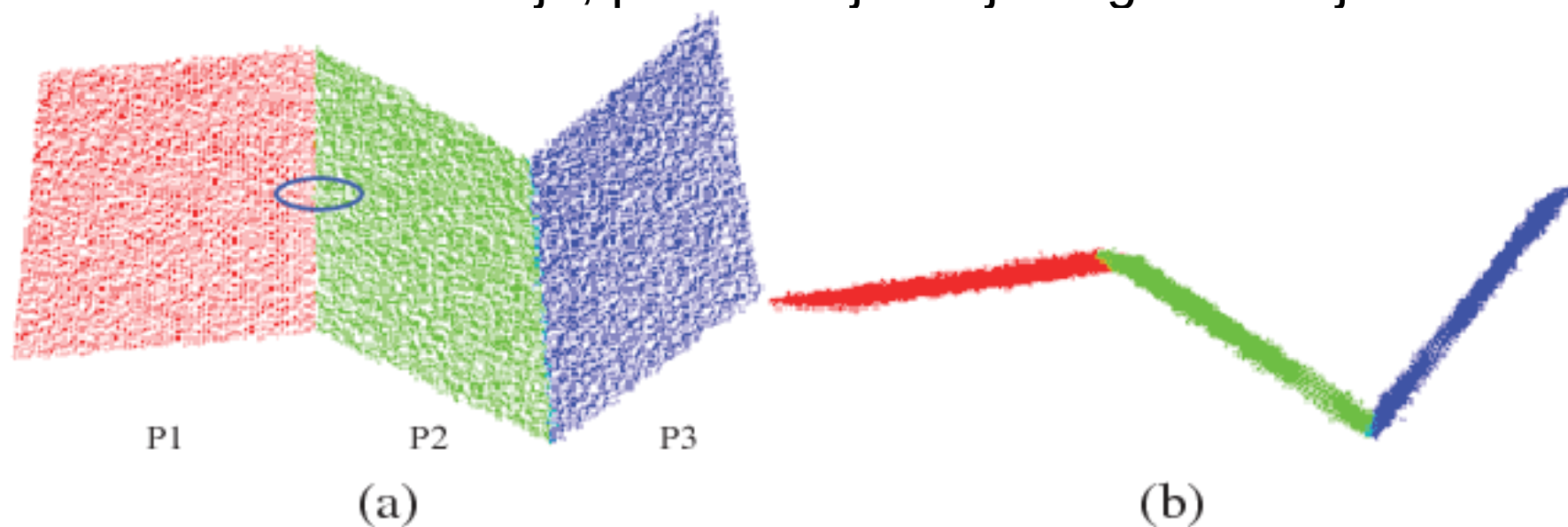
Najčešće se koristi tehnika rasta regiona, odabirom proizvoljnog, nesegmentiranog trouglastog poligona kao prvog semena.

Region raste dodavanjem jednog od tri susedna poligona čija je normala najbliža normalni početnog poligona, a proces se ponavlja iterativno sve dok se više ne može dodati u trenutni region.



# Segmentacija površina - ravanska segmentacija

Ovaj region se naziva segmentom. Ponavljanjem pomenutog procesa vrši se sve dok se sve strane mreže ne segmentiraju. Za svaki segment se koristi standardna devijacija svih normala poligona da bi se utvrdilo da li je segment ravan ili ne. Ako nije, potrebna je dalja segmentacija.

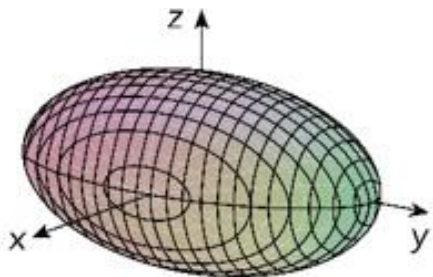


# Segmentacija kvadratnih površina

Kvadratne površine su površine definisane kvadratnim jednačinama drugog reda koje imaju tri promenljive  $x$ ,  $y$  i  $z$ .

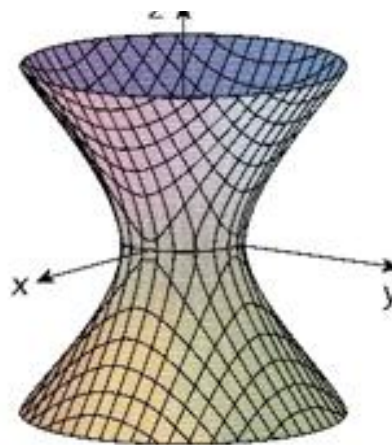
Osnovne kvadratne površine:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$



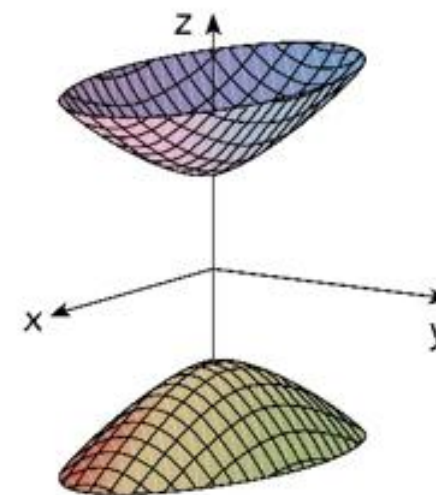
Elipsoid / Lopta  
(Lopta je specijalna slučaj)

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$$



Jednokrilni hiperboloid

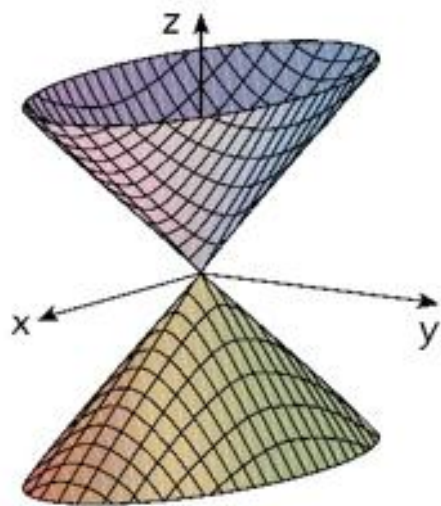
$$-\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$



Dvokrilni hiperboloid

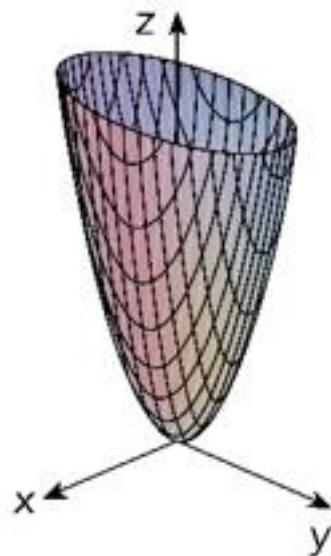
# Segmentacija kvadratnih površina

$$\frac{z^2}{c^2} = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$$



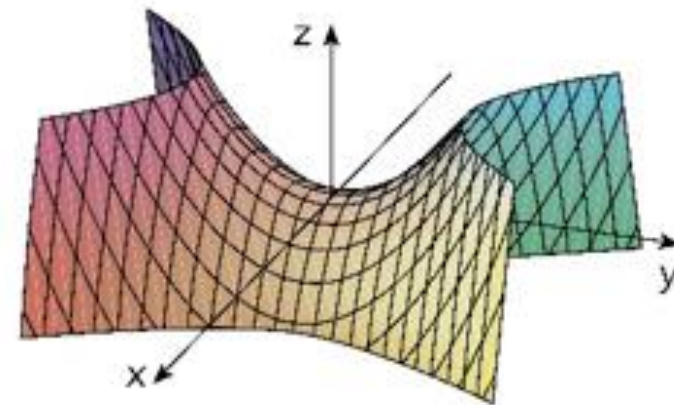
Kupa (konus)

$$\frac{z}{c} = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}$$



Eliptični paraboloid

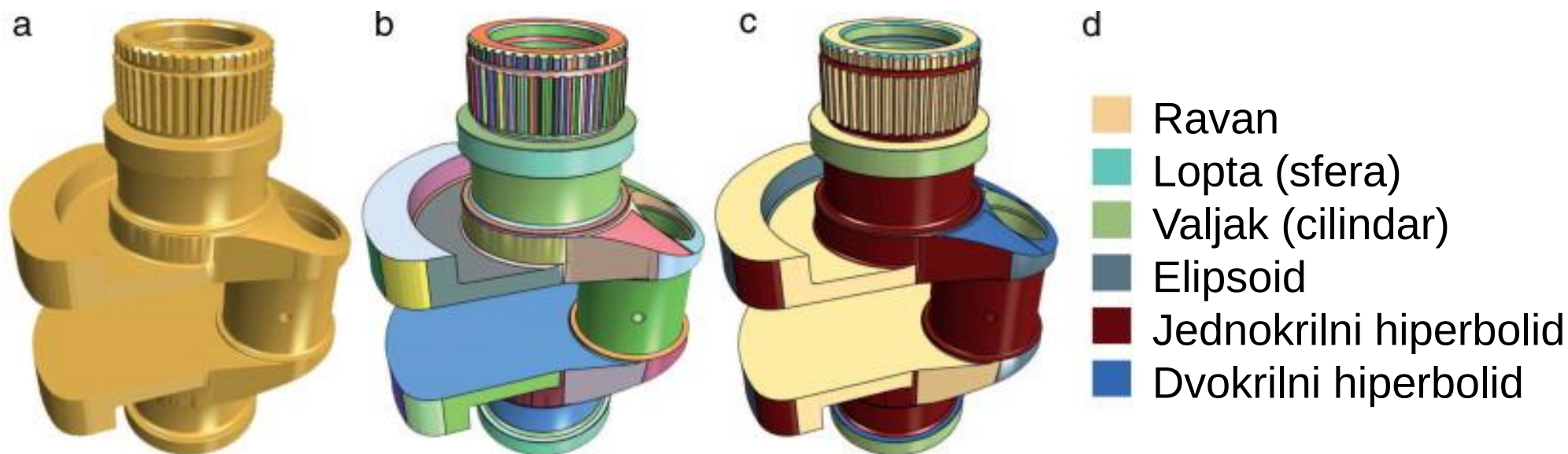
$$\frac{z}{c} = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}$$



Hiperbolički paraboloid

# Segmentacija kvadratnih površina

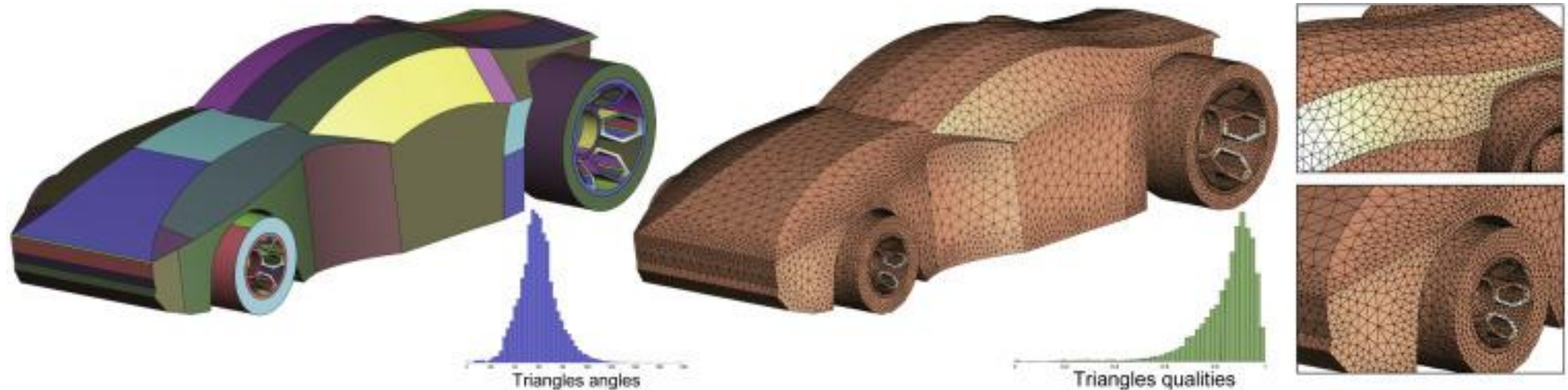
Za segmentaciju kvadratnih površina koriste se statističke metode i tehnologija Gaussovog mapiranja sa korišćenjem metode rasta regiona, nakon čega sledi prepoznavanje cilindra, sfere i konusa itd.



# Segmentacija kvadratnih površina

---

Kao rezultat toga, kvadratna površina se može prepoznati i dekomponovati nakon izvođenja procesa rasta regiona na svim neplanarnim segmentima od početne segmentacije.

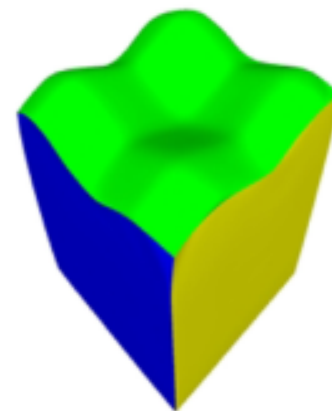


# Segmentacija free-form površina

---

Free-form površine predstavljaju se pomoću B-spline površina tzv. NURBS površinama. Za segmentaciju se koristi metoda bikubičnog B-spline površinskog uklapanja.

Prvo se izabere nekoliko povezanih trouglastih poligona unutar slobodnog segmenata površine kao semenski region (početak rasta segmentacije) nakon čega se uklapaju temena poligona sa bikubičnom B-spline površinom.



# Segmentacija free-form površina

Uzimajući označenu B-spline površinu kao ulaz, region raste dodavanjem temena poligona koji nisu uključeni.

Svaki dodati vrh treba da zadovolji tri kompatibilna uslova sa regionom:

- rastojanje projekcije temena na postavljen poligon je manje od zadate vrednosti;
- vektor normale tačke projekcije na postavljenoj površini treba da bude blizak vektoru temena i
- glavne krivine tačke projekcije takođe treba da budu bliske temena.

Proces rasta regiona se završava kada se više ne mogu dodati temena u region, nakon čega sledi postavljanje nove B-spline površine na region.

# Ekstrakcija geometrijskih oblika i Booleove operacije

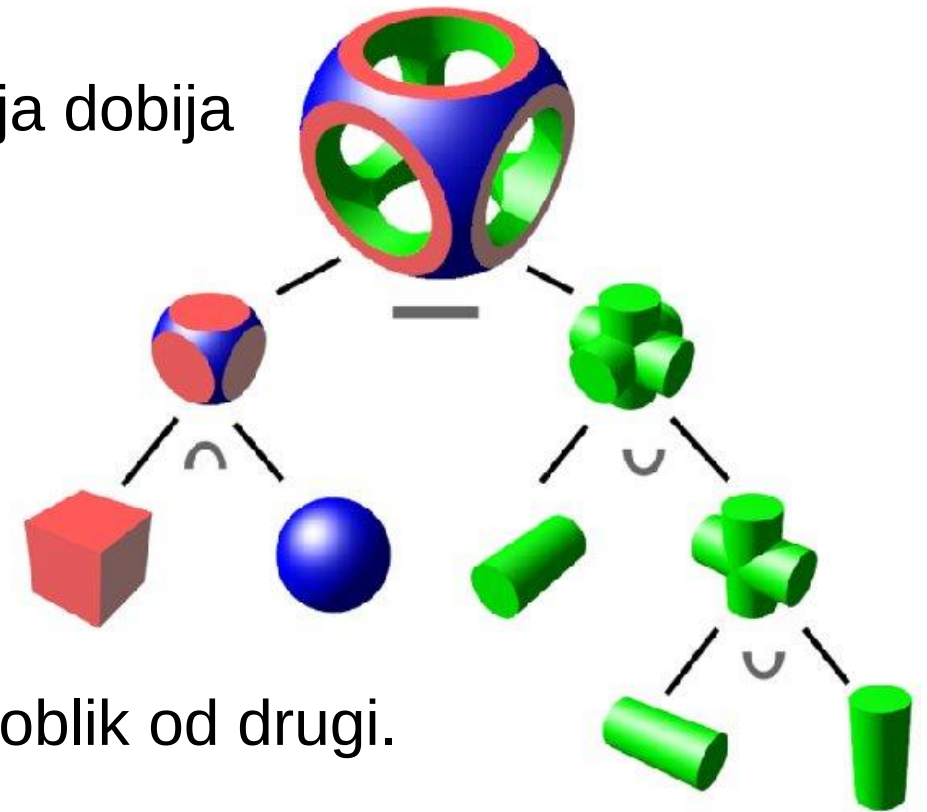
---

Segmentirane površine se prevode u površinske geometrijske oblike, gde se finalna složena geometrija dobija korišćenjem Booleovih (Boolean) operacija:

Unija (Union – Join) spaja dva geometrijska oblika.

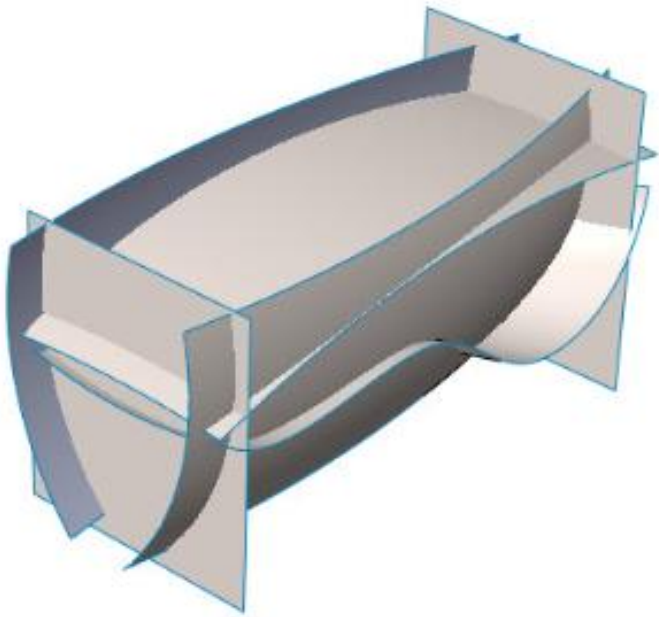
Presek (Intersection) zadržava samo zajedničke delove geometrijska oblika.

Razlika (Subtract – Cut) oduzima jedan geometrijski oblik od drugog.

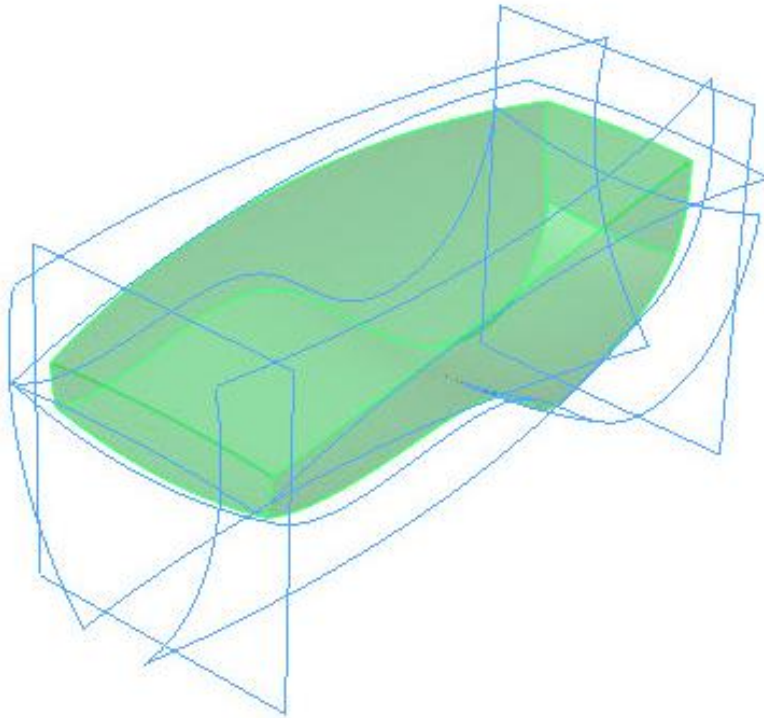


# Ekstrakcija geometrijskih oblika i Booleove operacije

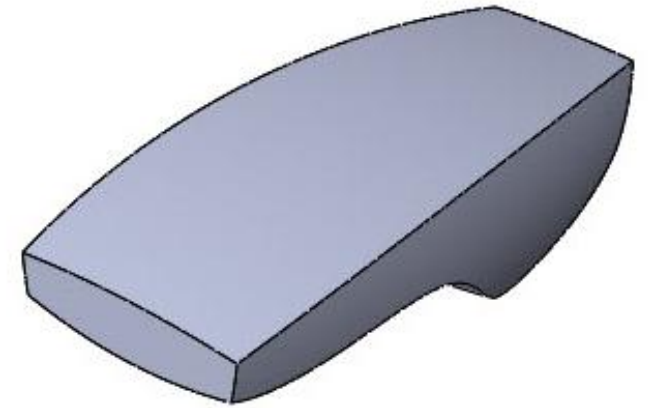
---



Ekstrakovane površine



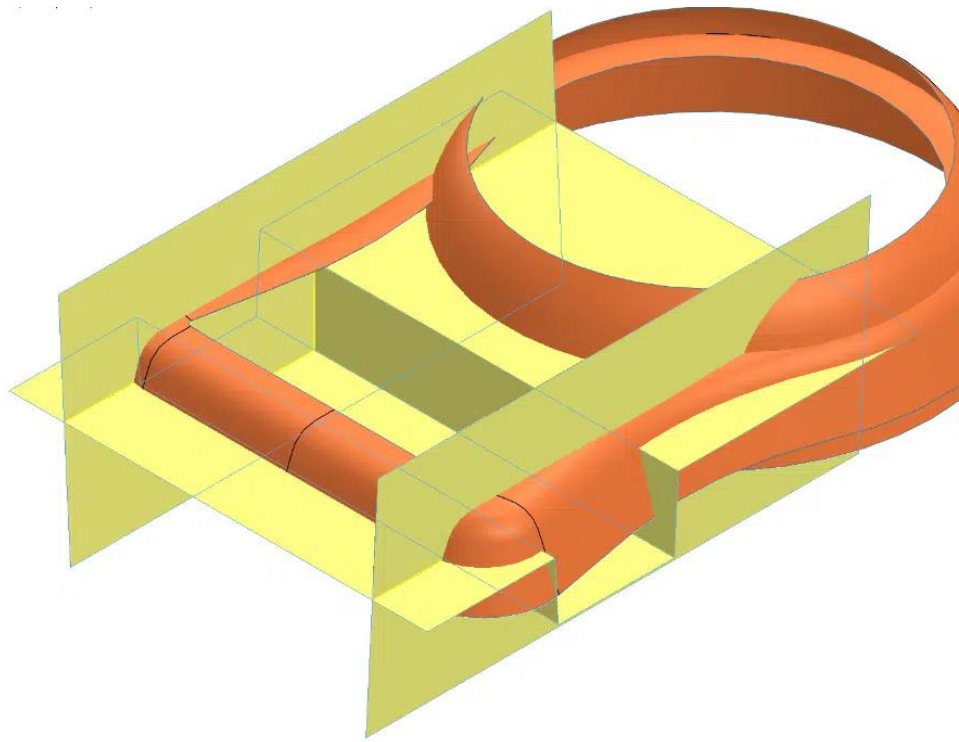
Primena Buleovih operacija  
(surface trim / surface cut)



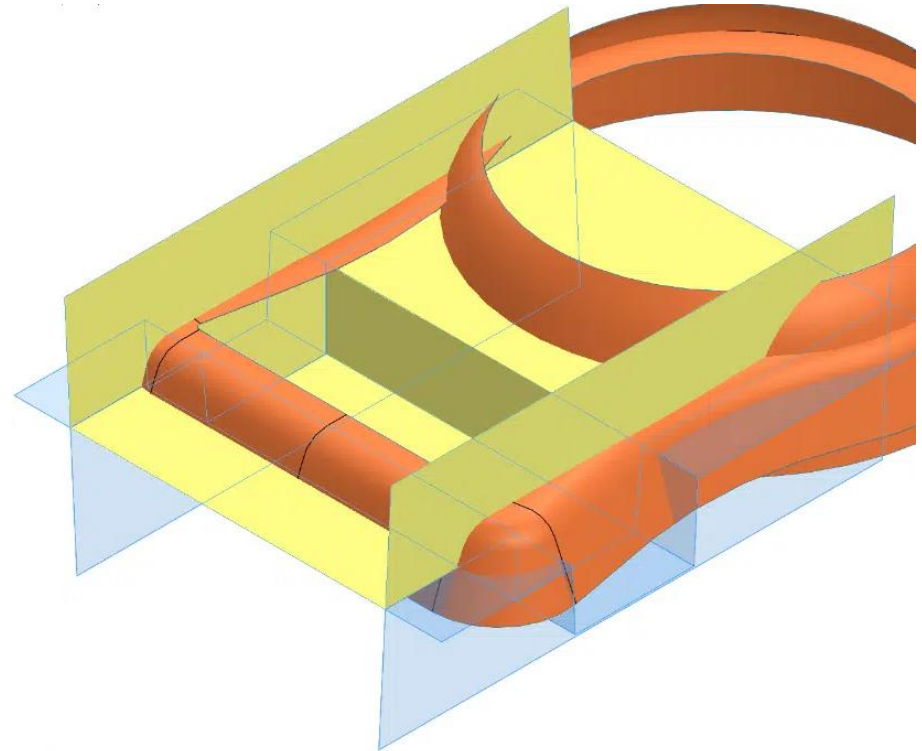
Kreiranje solid modela

# Ekstrakcija geometrijskih oblika i Booleove operacije

---



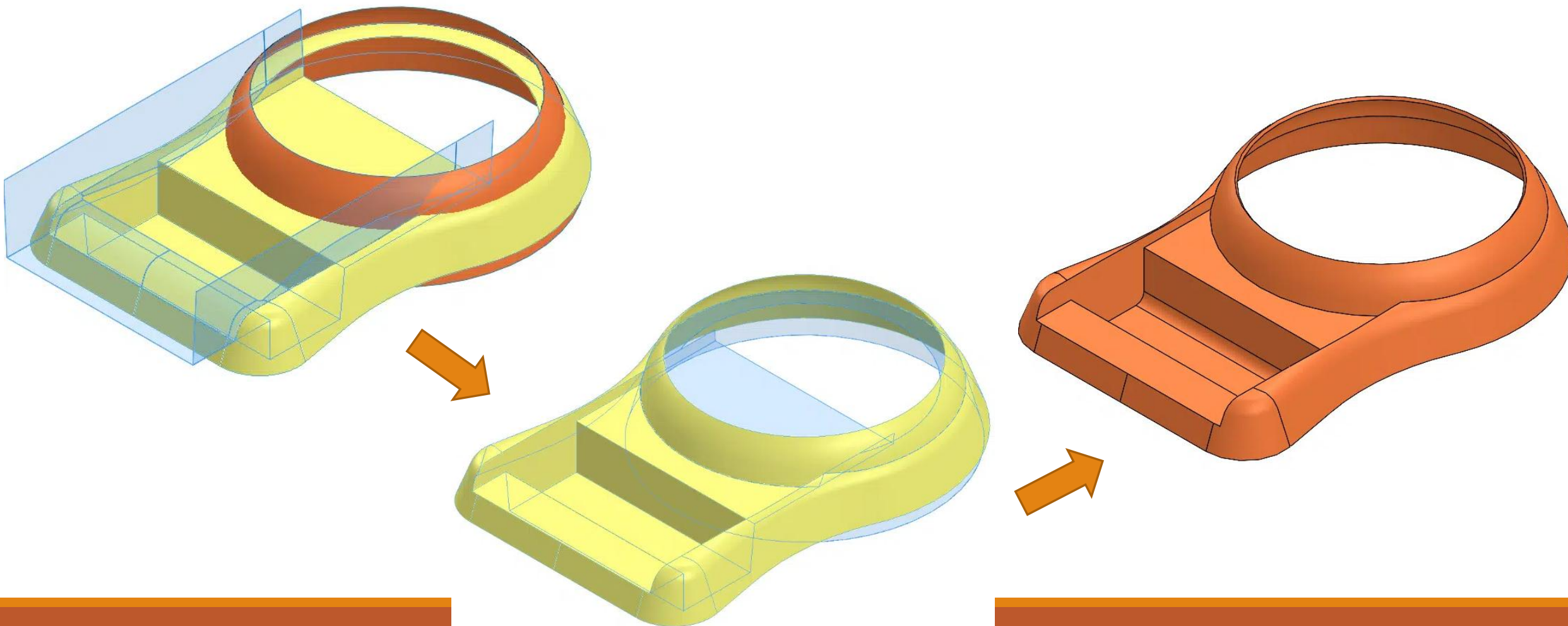
Ekstrakovane površine



Primena Buleovih operacija  
(surface trim / surface cut)

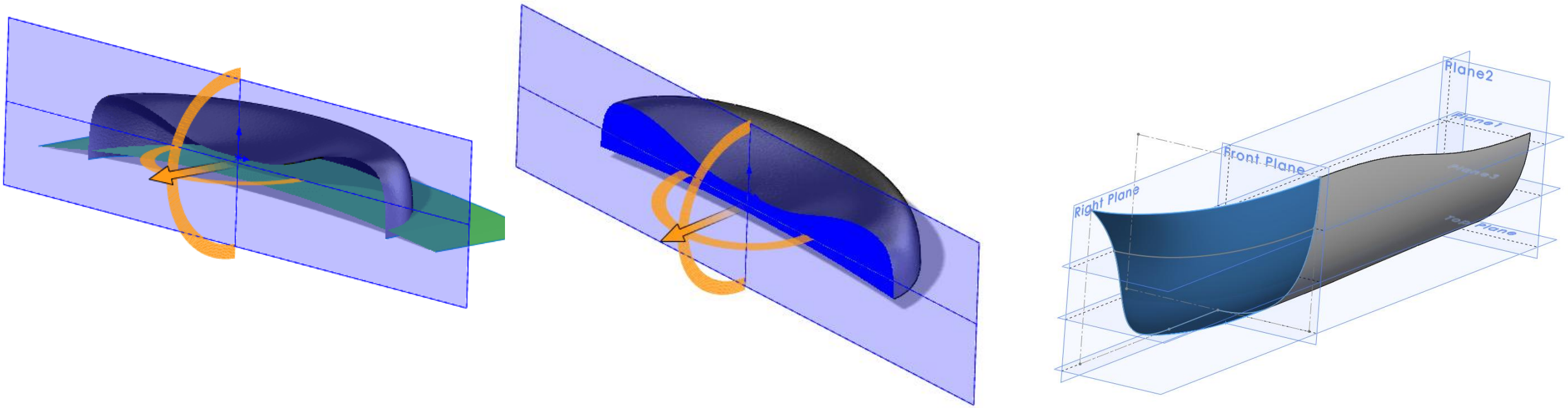
# Ekstrakcija geometrijskih oblika i Booleove operacije

---

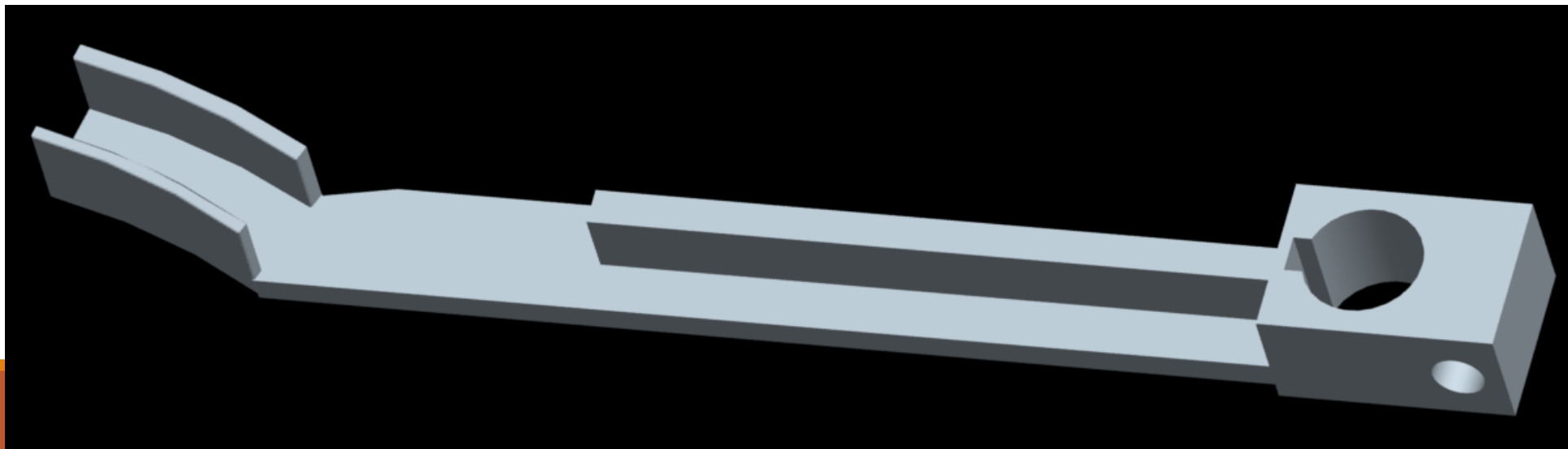
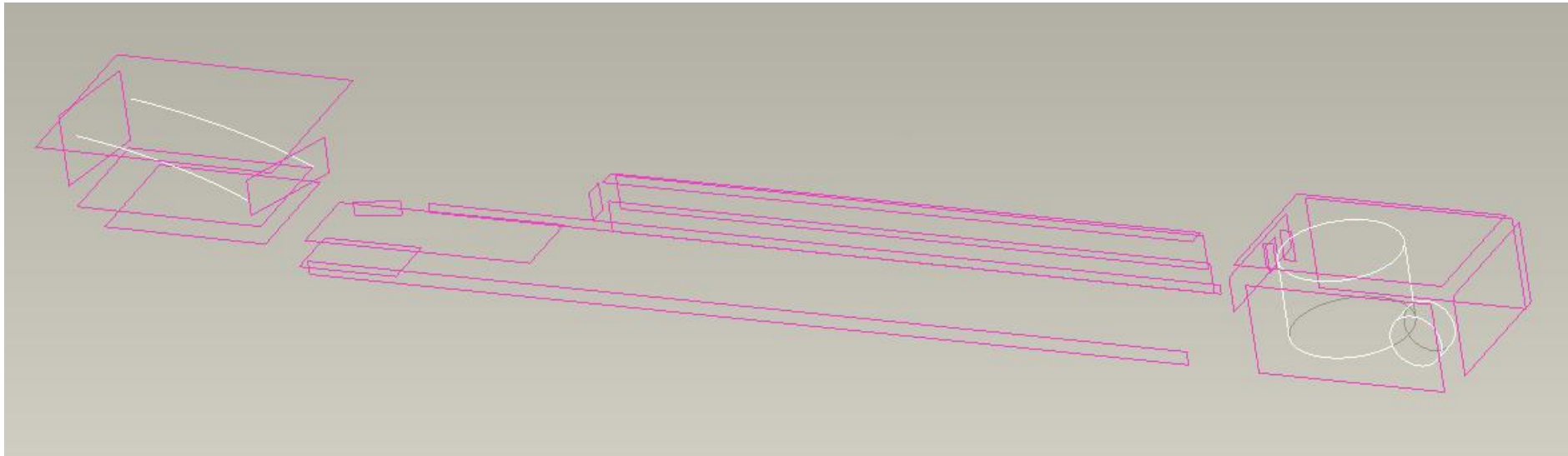


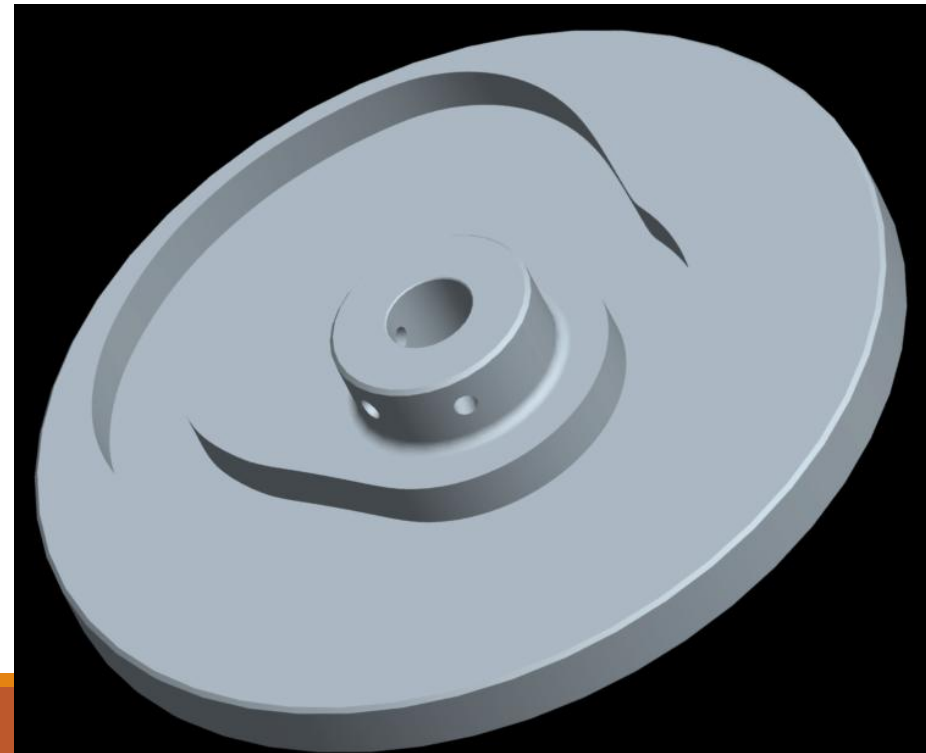
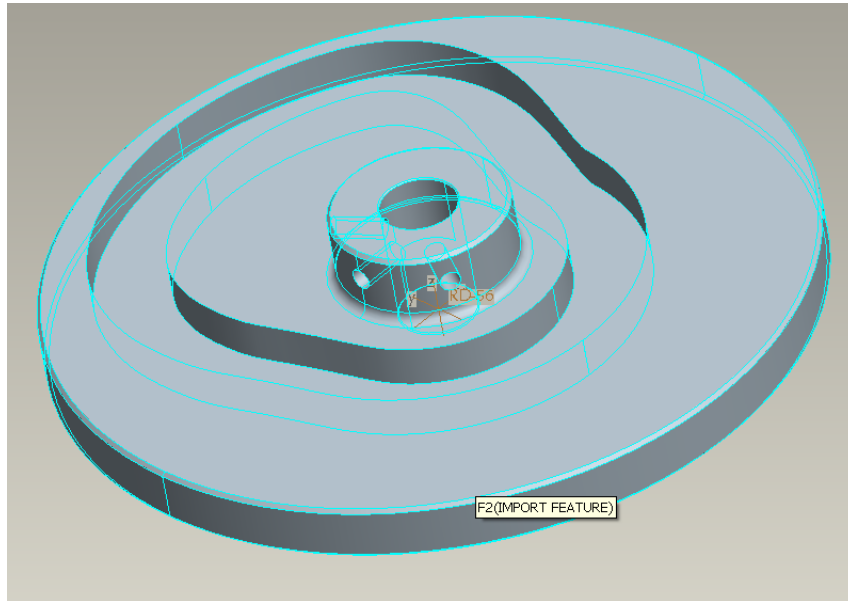
# Alati za kreiranje čvrstog modela

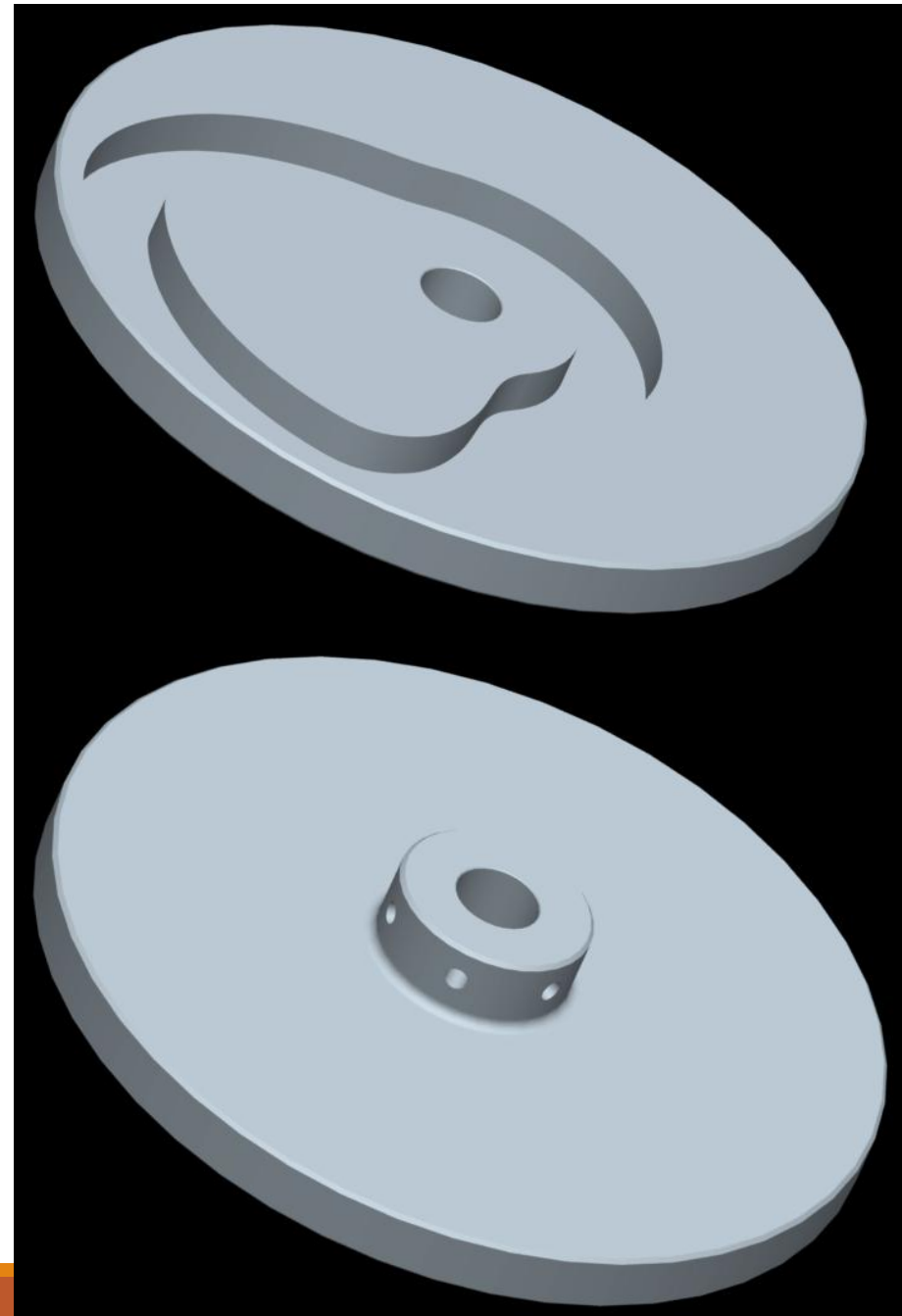
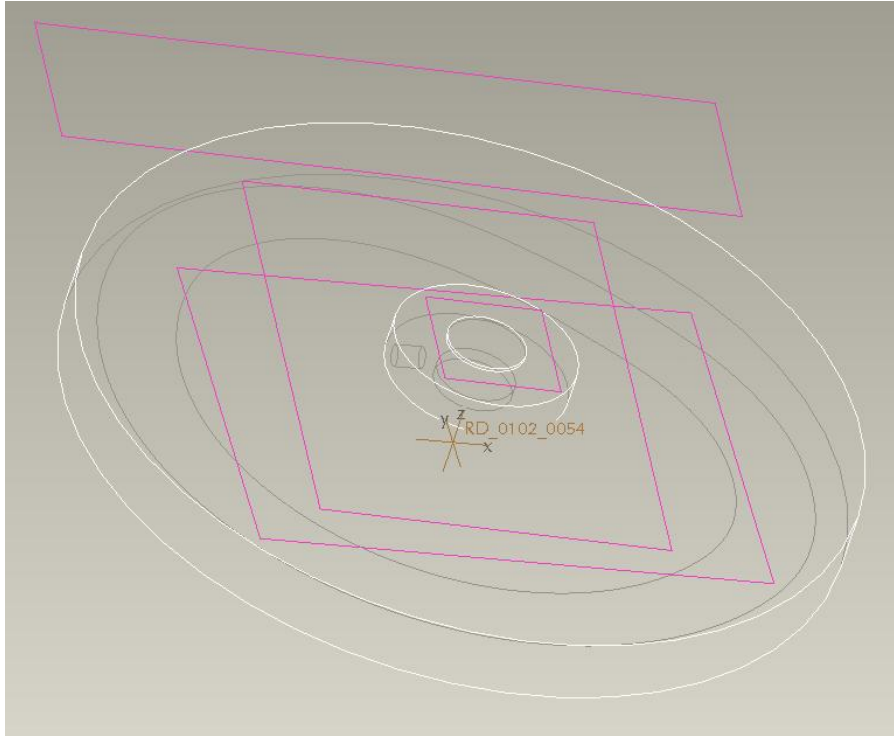
Skup površina koje čine zatvorenu celinu (zapreminu) mogu se proglastiti čvrstim objektom ili im dodeliti debljinu.

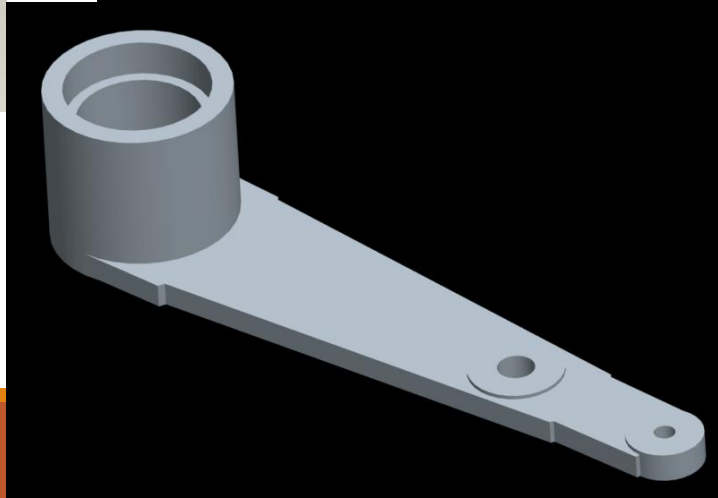
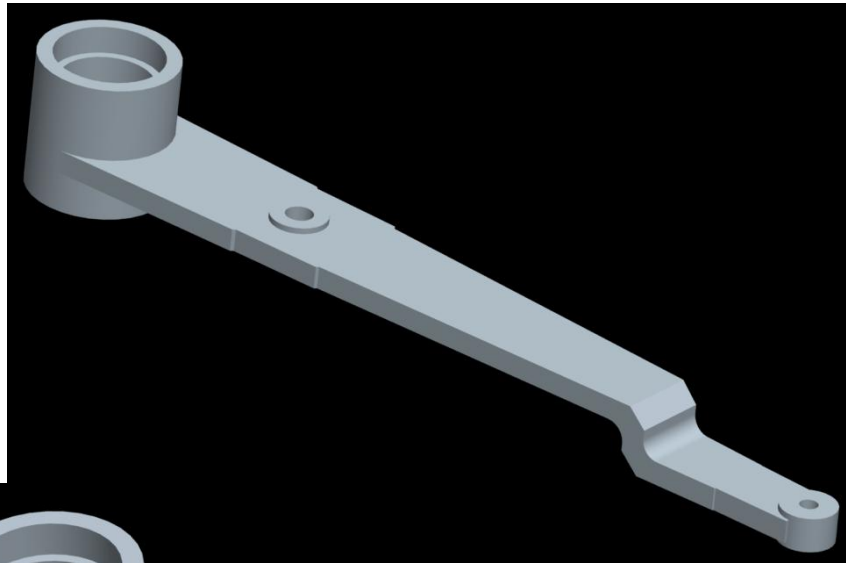
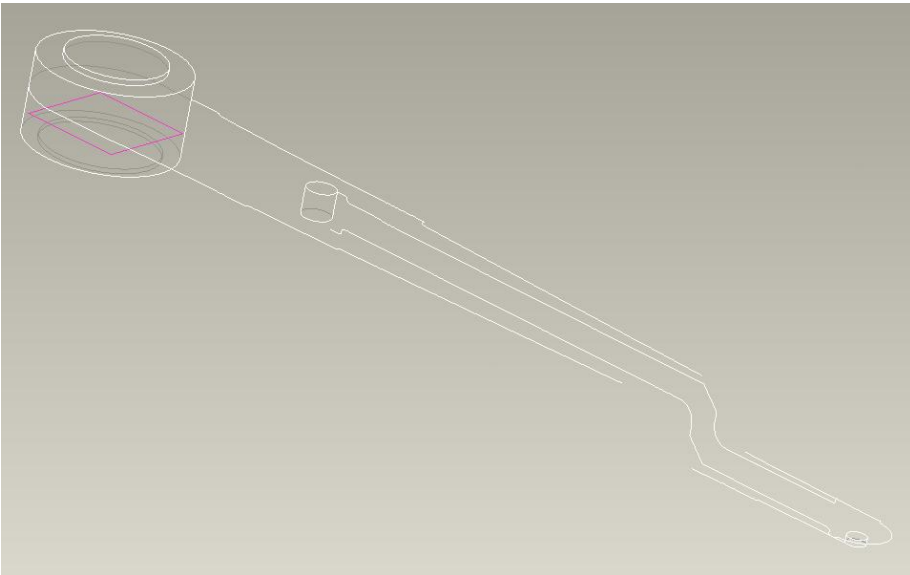
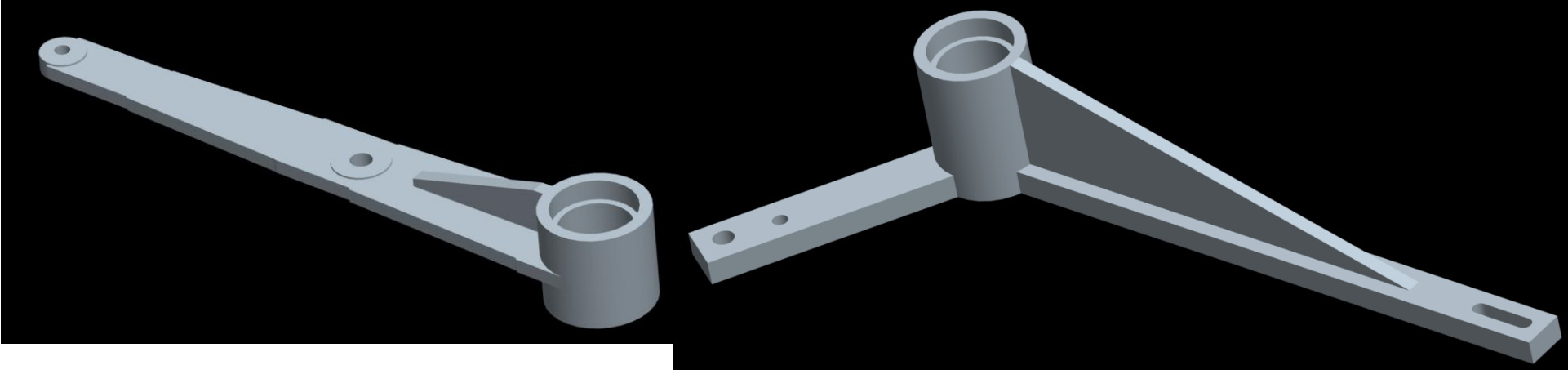


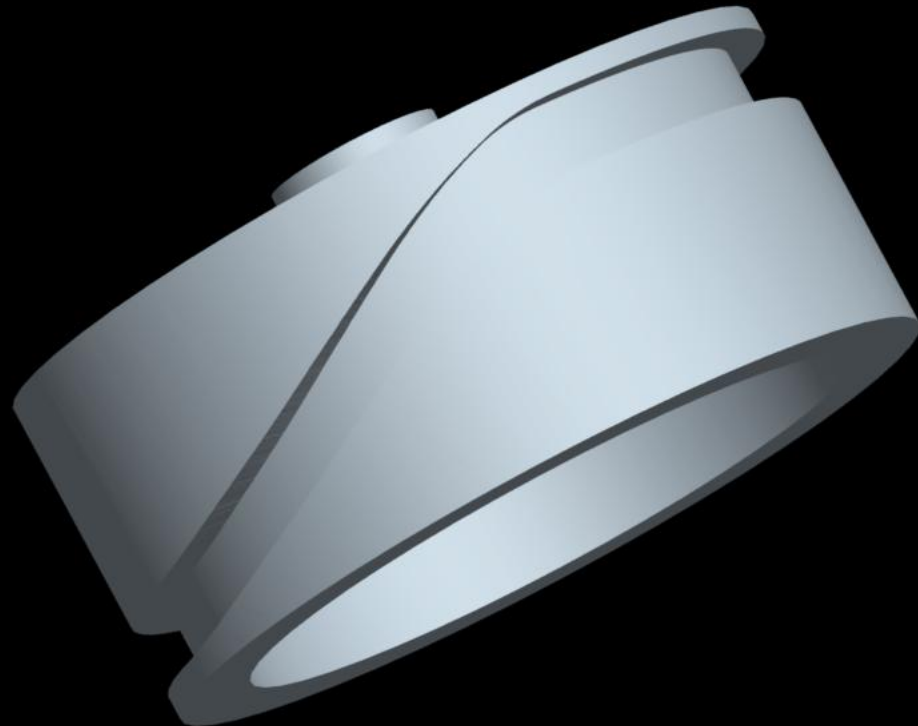
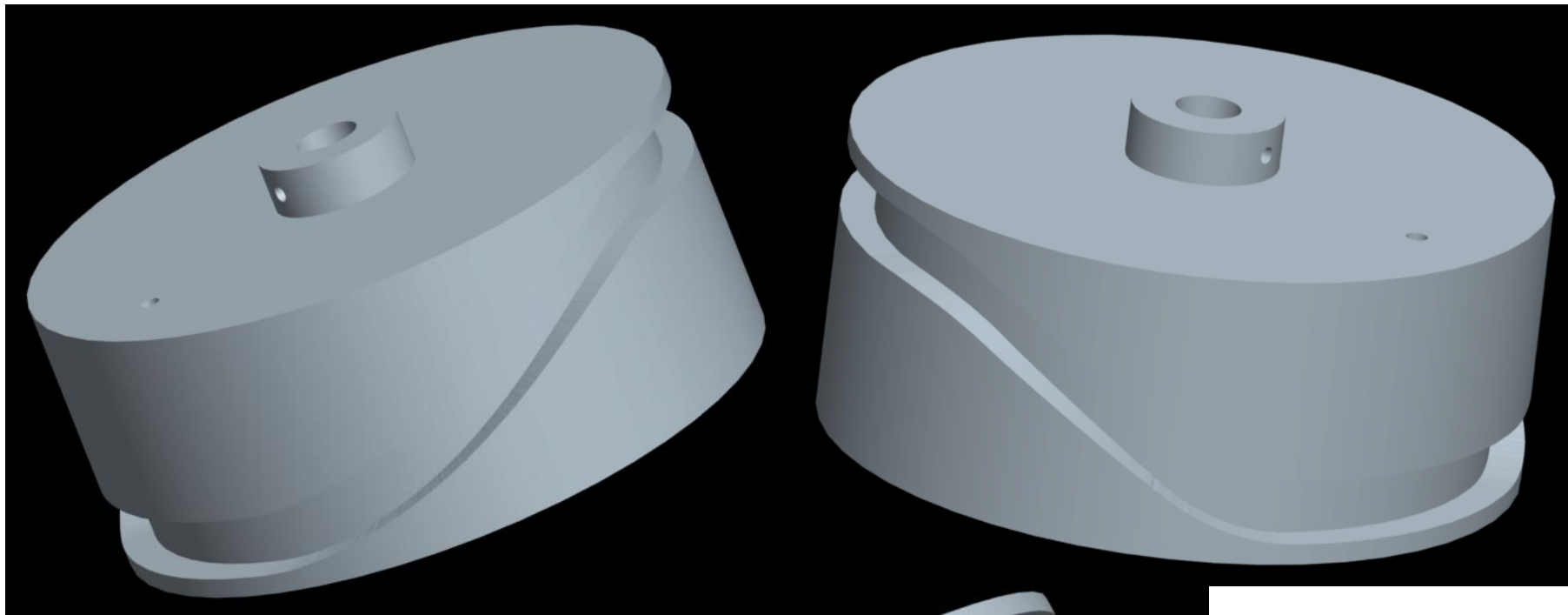
# Primeri RE modeliranja zasnovanog na obeležjima





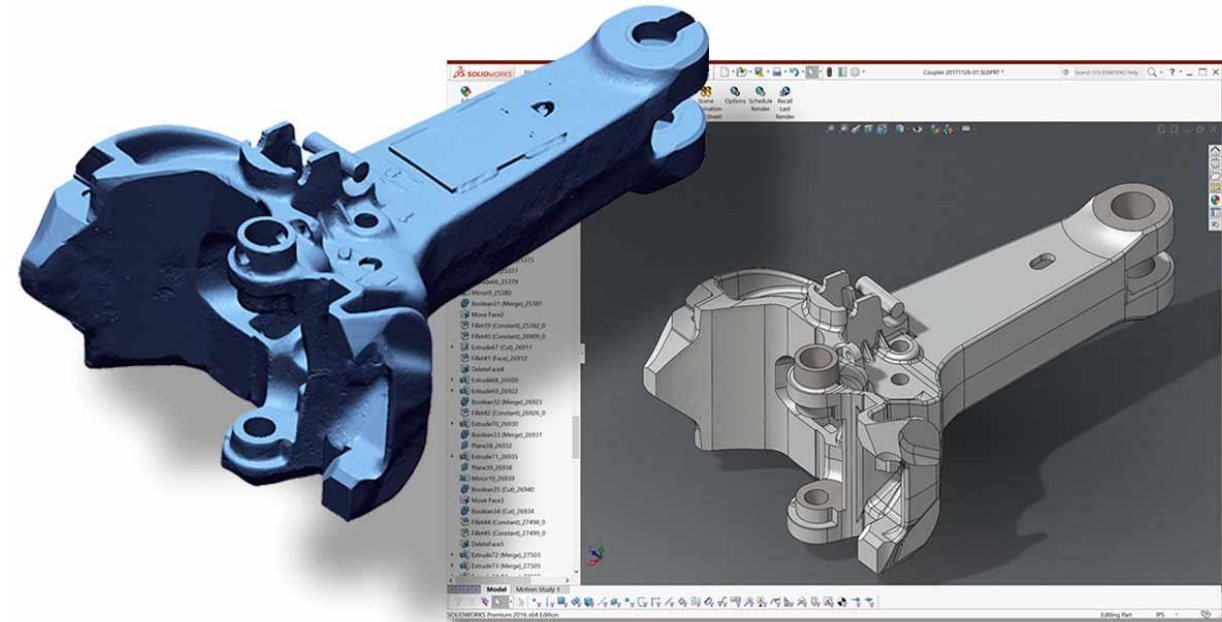






# Parametarsko modelovanje (Design intent)

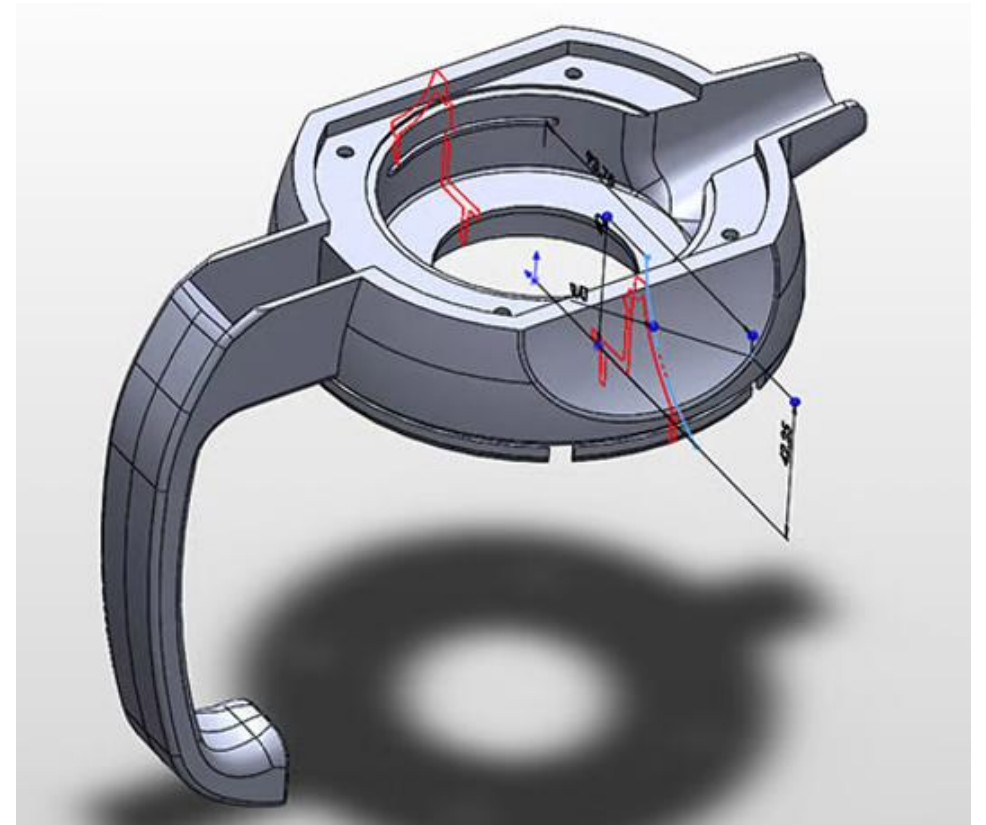
- Parametarsko modelovanje na osnovu 2D skica pomoću kojih se kreiraju površine i 3D obeležja sa mogućnošću naknadnih izmena.
- Smatra se da je parametarsko modelovanje izvorni tip reverzibilnog inženjerskog dizajna.
- Zasniva se na idealizovanju 3D poligonalne mreže, što predstavlja veoma veliki izazov u pogledu tačnosti, pošto je potrebno pogoditi originalni dizajn.



# Parametarsko modelovanje (Design intent)

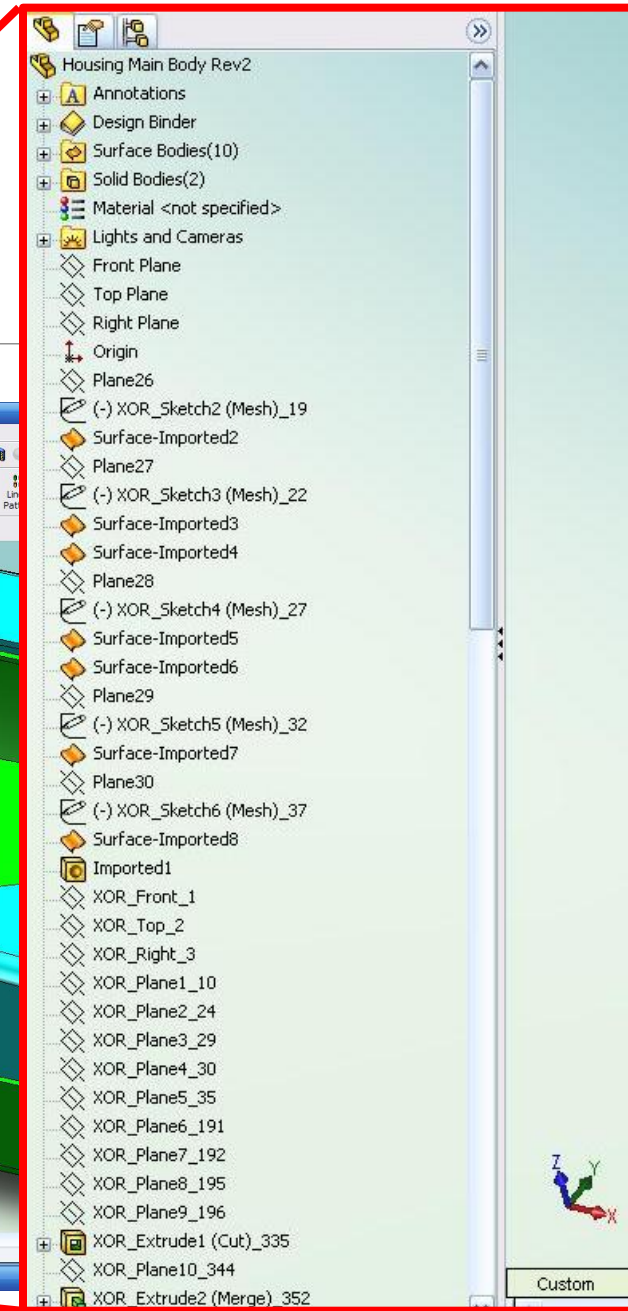
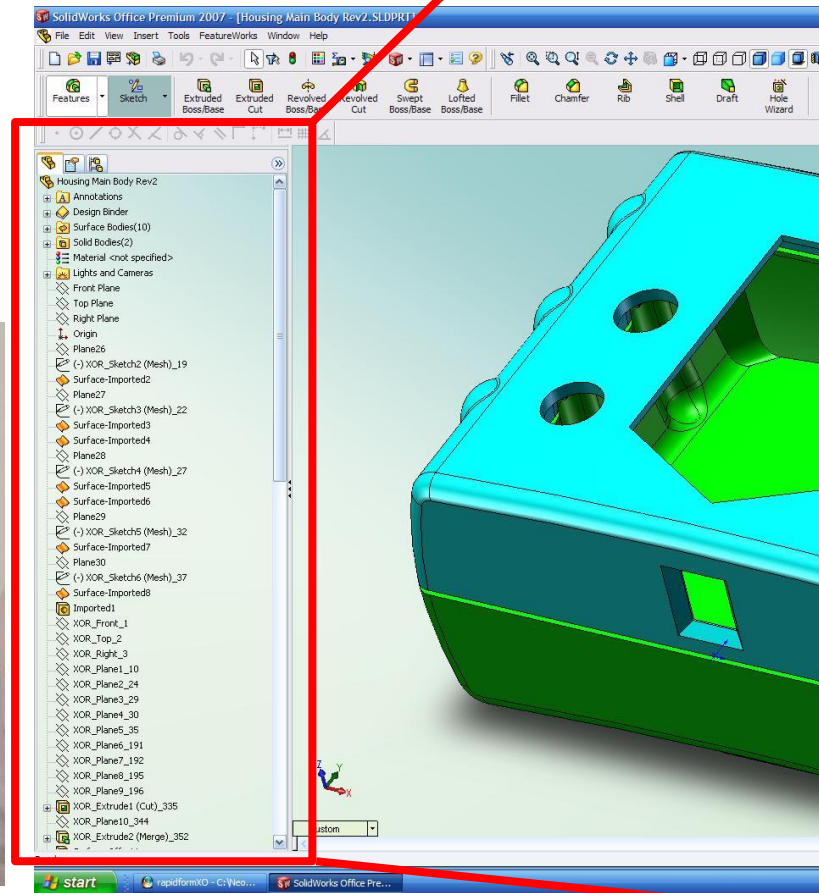
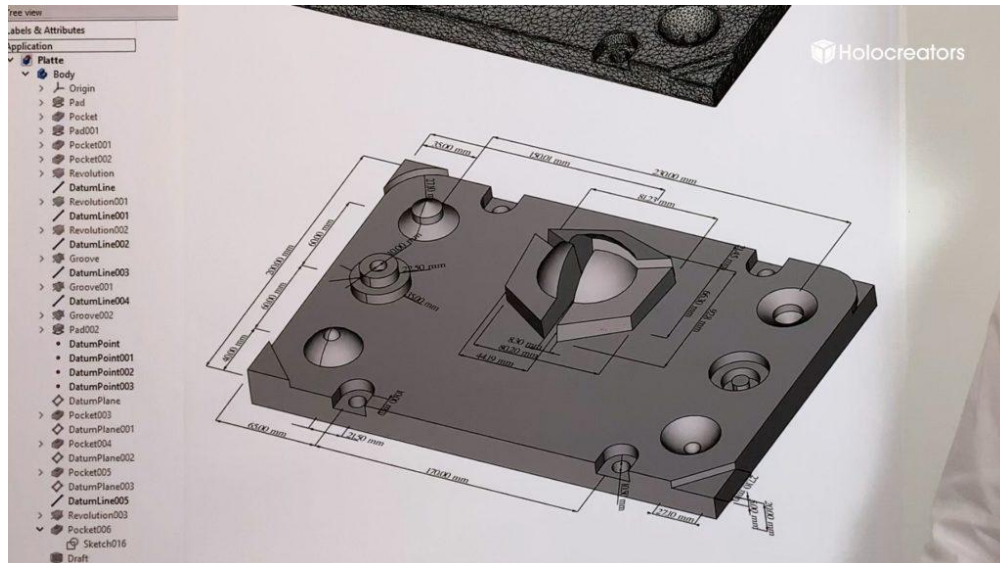
---

- Parametarsko modelovanje proces redizajna proizvoda čini veoma jednostavanim.
- Zahteva odlično poznavanje svih alata za reverzibilni inženjerski dizajn od 3D digitalizacije do gotovog CAD modela.
- Optimizacija 3D modela.
- Kreiranje tehničke dokumentacije.



# Parametarsko modelovanje (Design intent)

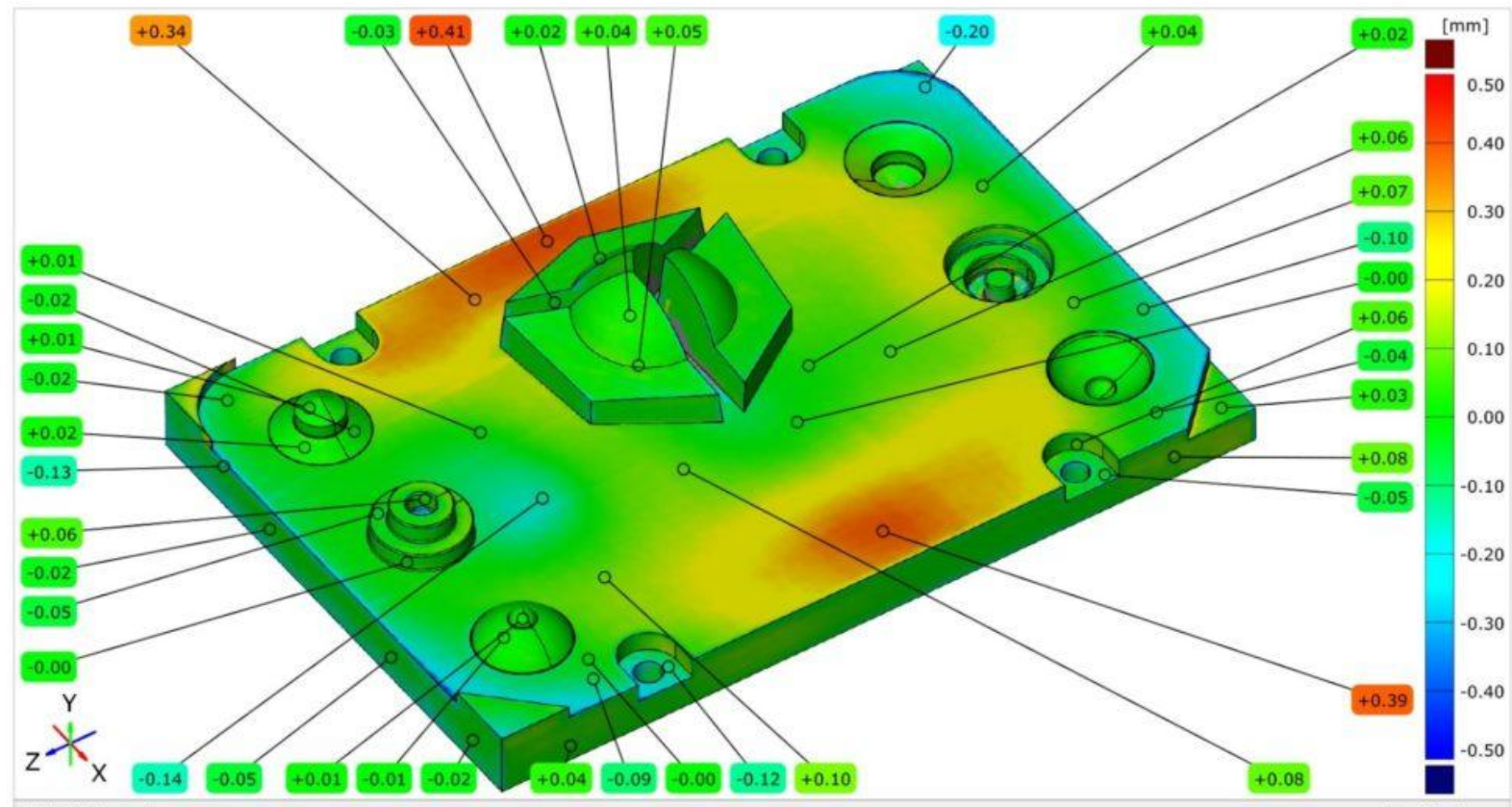
Parametarskim modelovanjem omogućava se čuvanje istorije modelovanja.



# Parametarsko modelovanje (Design intent)

Odstupanja od poligonalnog modela su veća nego kod “*as built*” pristupa.

3D Comparison Point Inspection 1

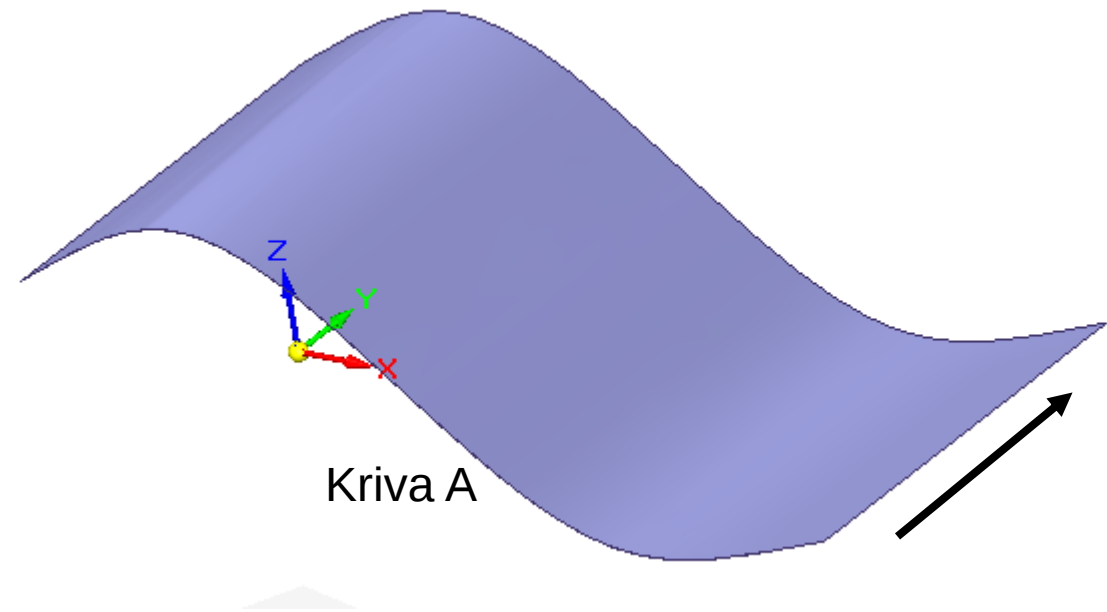


# Softverski alati za kreiranje površina

---

## Extrude

Extrude je opcija za kreiranje površine “izvlačenjem” krive u određenom pravcu.

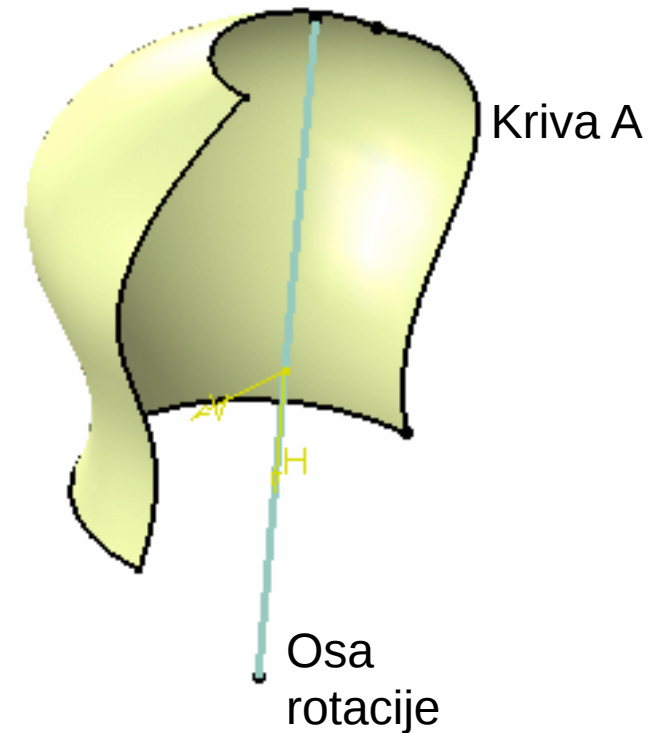


# Softverski alati za kreiranje površina

---

## Revolve

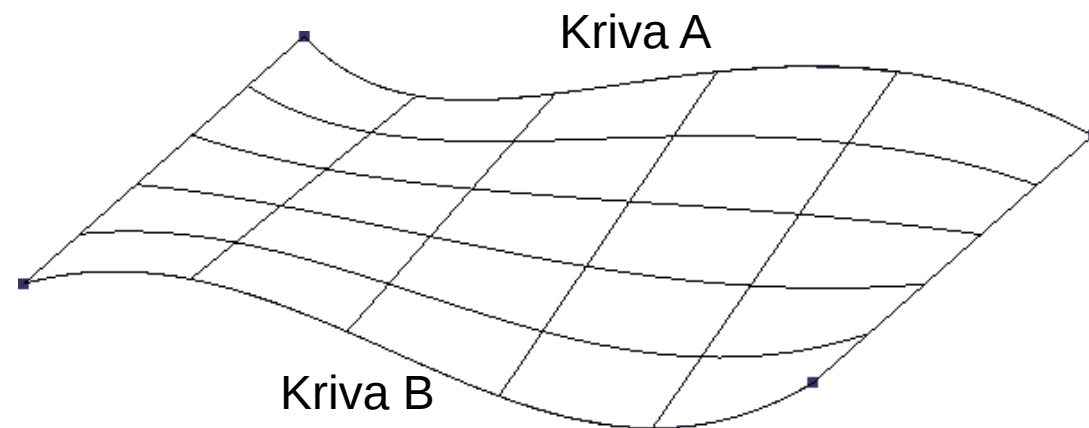
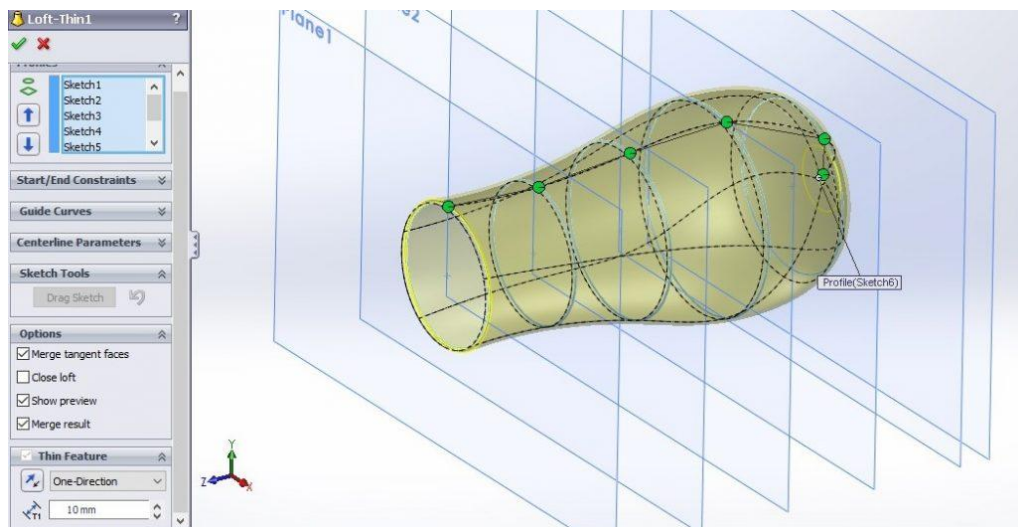
Revolve je opcija za kreiranje površine “rotiranjem” krive u oko definisane ose rotacije.



# Softverski alati za kreiranje površina

## Loft

Loft je opcija za kreiranje složene površine između dve ili više složenih krivih koje mogu biti otvorene ili zatvorene sa mogućnošću kontrole tangentnosti početnih profila.

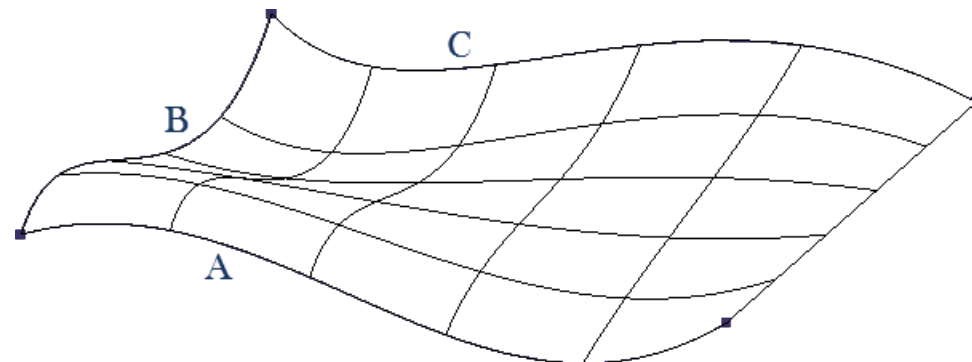
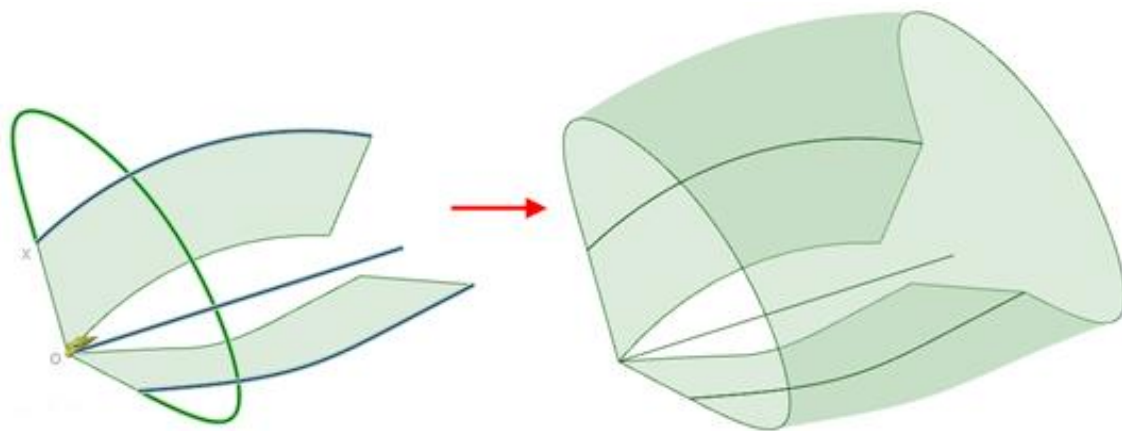


# Softverski alati za kreiranje površina

---

## Sweep

Sweep je opcija za kreiranje segmenta površine na osnovu složene krive (otvorene ili zatvorene) koja se prostire duž druge krive koja predstavlja trajektoriju.

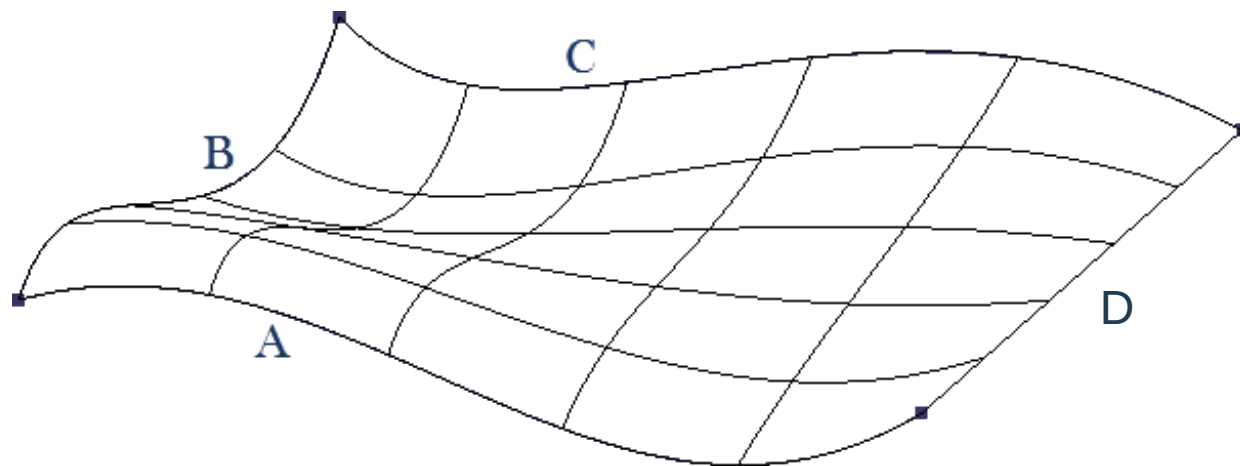
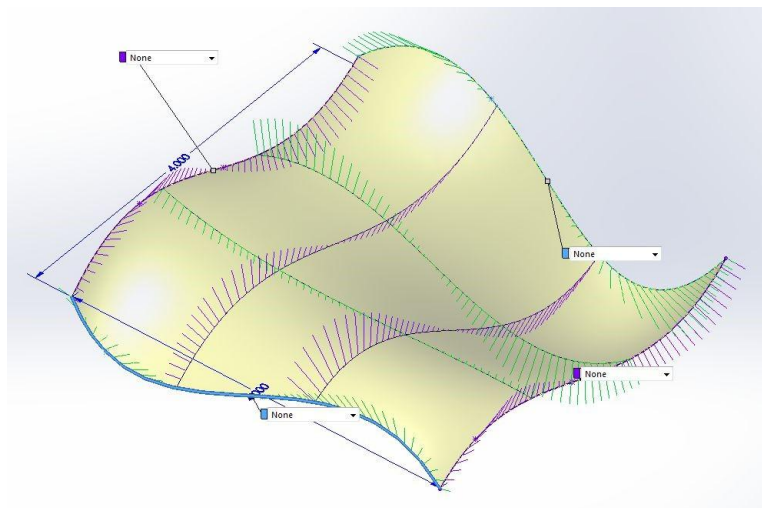


# Softverski alati za kreiranje površina

---

## Boundary surface

Boundary surface je opcija za kreiranje segmenta površine na osnovu četiri krive koje predstavljaju granice površine, a mogu imati i dodatne kontrolne krive.



# RAČUNAROM PODRŽANA INSPEKCIJA

Razvoj i primena CAD-modela u inženjerskim oblastima implicirala je razvoj ideja za iskorišćavanjem najpre određenih parametara, a zatim i celokupnih 3D modela i za potrebe verifikacije tj. inspekcije proizvoda.

- ❑ Preduslov za dobar inženjerski proces razvoja i izrade proizvoda jeste sprovođenje kontrole/verifikacije tokom njegovog odvijanja.
- ❑ Savremeni pristup kontroli danas podrazumeva **računarom podržanu inspekciju (computer-aided inspection CAI)**.
- ❑ Računarom podržana inspekcija (CAI) obuhvata veći broj različitih metoda koje se primenjuju sa ciljem proveriti različitih aspekata kvaliteta izrade delova u oblasti mašinskog i industrijskog inženjerstva.

# CAD-INSPEKCIJA

- ❑ Metoda koja se razvila za potreba analize geometrije delova kompleksnih oblika je poznata pod nazivom CAD-inspekcija.
- ❑ CAD inspekcija podrazumeva komparativnu (uporednu) analizu oblaka tačaka ili poligonalnog modela, dobijenog 3D digitalizacijom izrađenog dela, u odnosu na referentni CAD model.
- ❑ Rezultat analize tj. odgovor na pitanje: “Koliko oblak tačaka ili poligonalni model odstupa od CAD modela?” je mapa u boji ili kolor mapa kod koje svaka boja predstavlja određeni nivo odstupanja.
- ❑ Ova metoda je danas prihvaćena kao brz, efikasan i kredibilan način provere kvaliteta izrade delova različitim tehnologijama (3D štampa, rezanje, plastično deformisanje, injekciono brizganje plastike itd.)

# CAD-INSPEKCIJA

Termini, sinonimi, koji se upotrebljavaju za opis ovog procesa su:

- ❑ **Rapid 3D Inspection**
- ❑ **računarom podržana verifikacija (computer-aided verification CAV)**
- ❑ **3D color comparison-to-CAD**
- ❑ **CAD-to-part inspection.**

CAD-inspekcija je, prateći razvoj CAD modeliranja, najpre bila zasnovana na 2D podacima, da bi se zatim sa pojavom solid modela razvila i 3D CAD-inspekcija, jedno vreme poznata i pod nazivom “CAD-to-part” inspekcija.

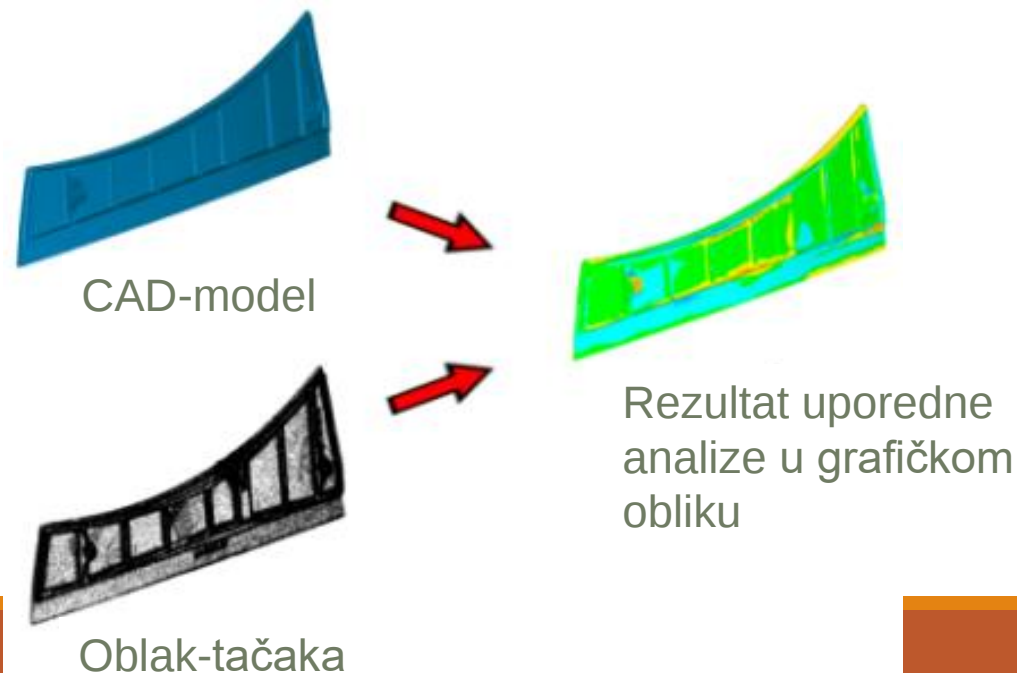
Zahvaljujući zasnovanosti na CAD-modelu, kao i da je 3D CAD-model standard danas, ova metoda inspekcije je najšire poznata pod nazivom CAD-inspekcija.

# CAD-INSPEKCIJA

## Metodologija

CAD-inspekcija podrazumeva korišćenje CAD-modela proizvoda, odnosno njegovih parametara (kao nominalne geometrije), sa ciljem provere geometrijskih i dimenzionalnih odstupanja izrađenog dela (ili drugog virtuelnog modela) na bazi rezultata njegove 3D digitalizacije.

Informacija o nivou odstupanja se dobija u grafičkom i numeričkom obliku.



# CAD-INSPEKCIJA

## Metodologija

Dva osnovna segmenta *CAD*-inspekcije su:

- ❑ **3D-digitalizacija i**

(dominantno hardverski proces) i

- ❑ **provera odstupanja**

(dominantno softverski proces),

# CAD-INSPEKCIJA

## Metodologija

*CAD*-inspekcija obuhvata sledeće korake:

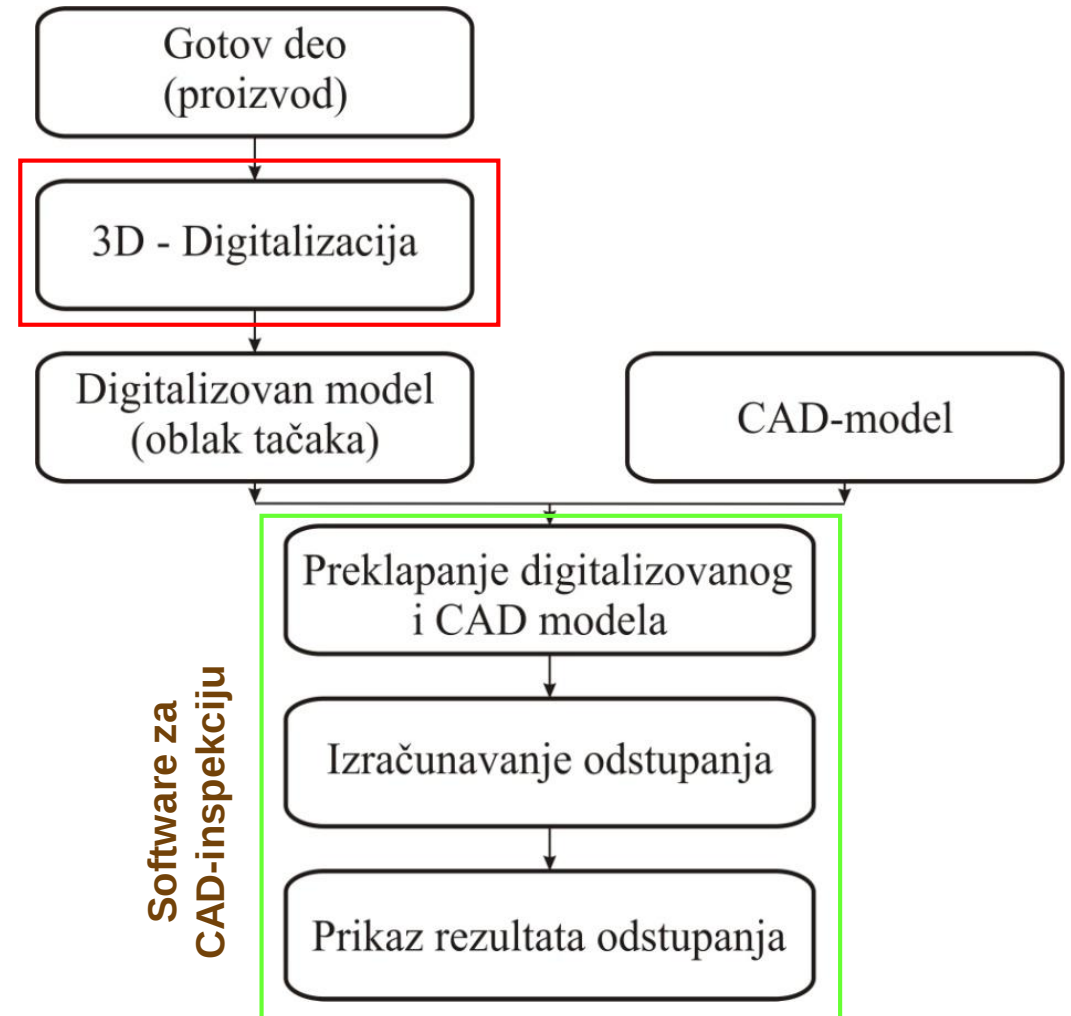
- 1.** 3D digitalizacija izrađenog dela
- 2.** Generisanje 3D modela na bazi dobijenog oblaka tačaka (opciono korak)
- 3.** Izbor površi na referentnom CAD-modelu na kojima se želi sprovesti analiza
- 4.** Komparacija oblaka tačaka (ili 3D modela) sa referentnim CAD-modelom
- 5.** Prikaz rezultata u željenom obliku

# CAD-INSPEKCIJA

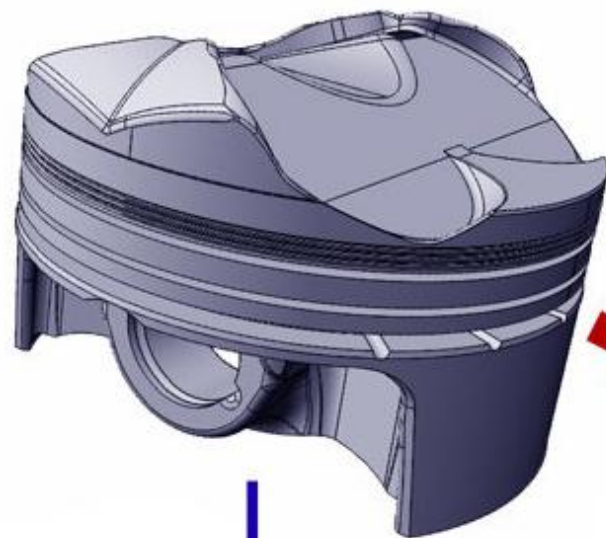
## Procedura

Procedura se sastoji u sledećem:

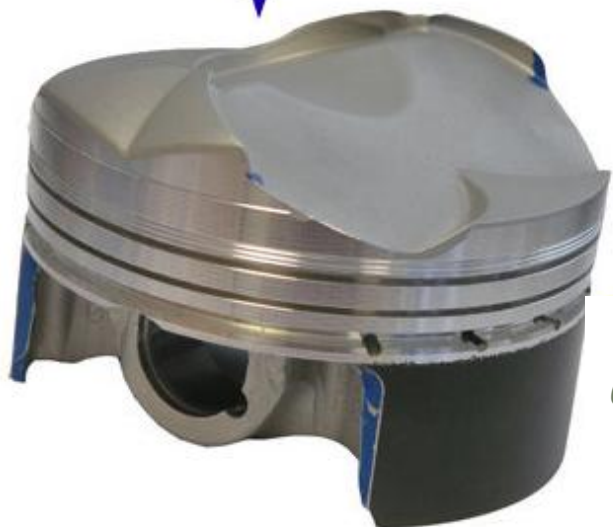
- izrađen deo se 3D digitalizuje;
- (kreira se 3D model na bazi oblaka tačaka) opciono
- oblak tačaka (ili opcioni 3D model) i referentni CAD model se uvoze u specijalizovani softver za CAD-inspekciju;
- oblak tačaka se orijentiše u odnosu na CAD model u cilju njihovog međusobnog potpunog preklapanja;
- pokreće se izračunavanje nivoa odstupanja oblaka tačaka u odnosu na CAD model;
- prikaz rezultata odstupanja (po pravilu je u grafičkom obliku radi lakše preglednosti, a može se biti i u numeričkom po potrebi).



**CAD-model**

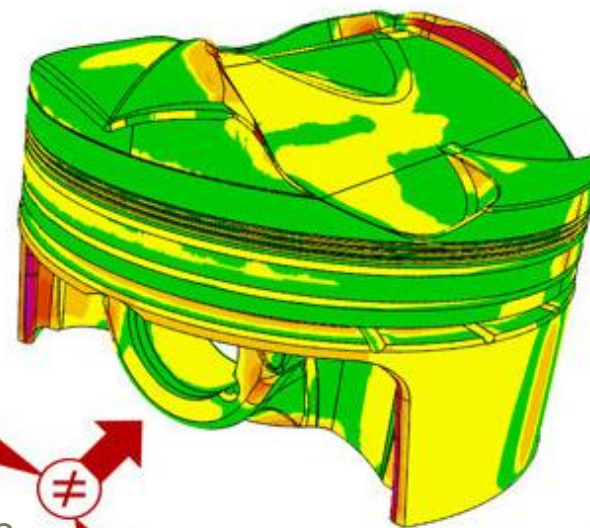


*izrada*



**Izrađeni deo**

**Rezultat CAD-inspekcije u grafičkom obliku (color mapa)**



*skala  
odstupanja*

*Komparacija*

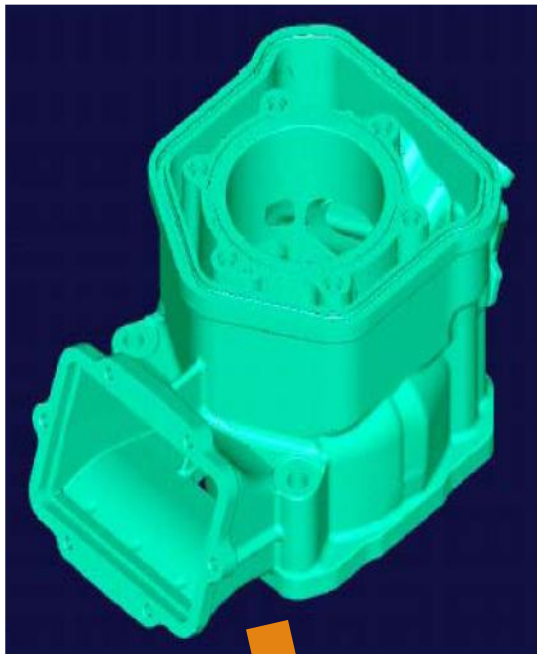


*3D  
digitalizacija*

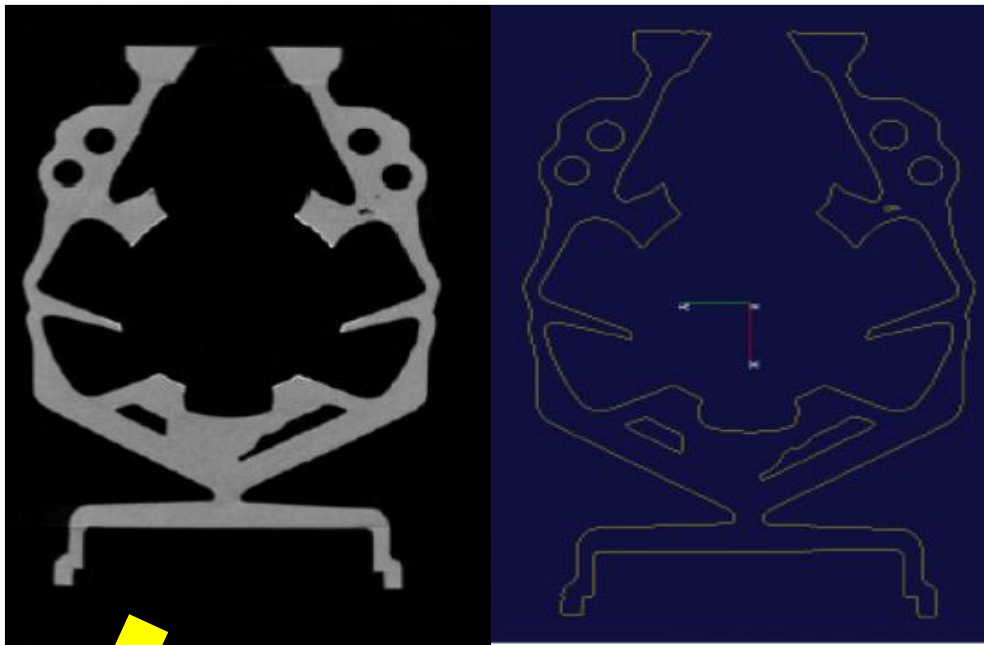


**Oblak tačaka (3D model)**

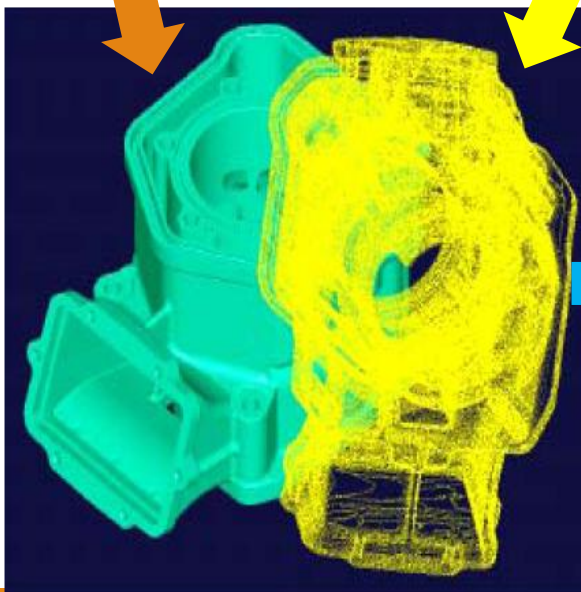
CAD-model



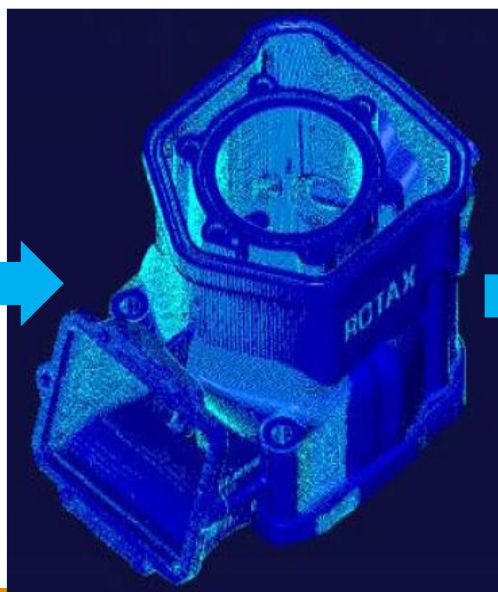
3D digitalizacija izrađenog dela (primenom CT-a)



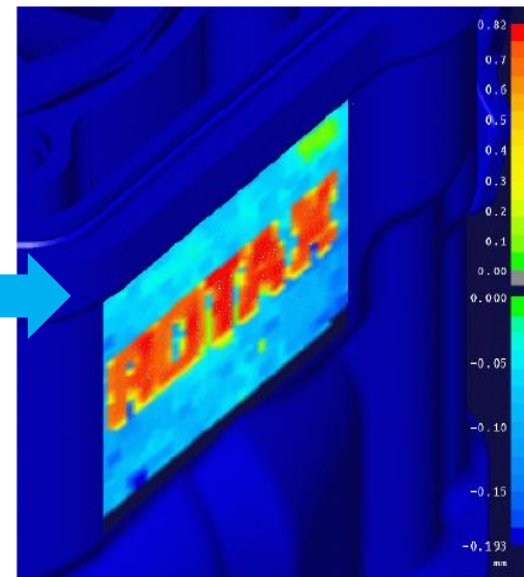
Prikaz  
procedurę  
CAD inspekcije  
na delu 3D  
digitalizovanom  
primenom CT-a



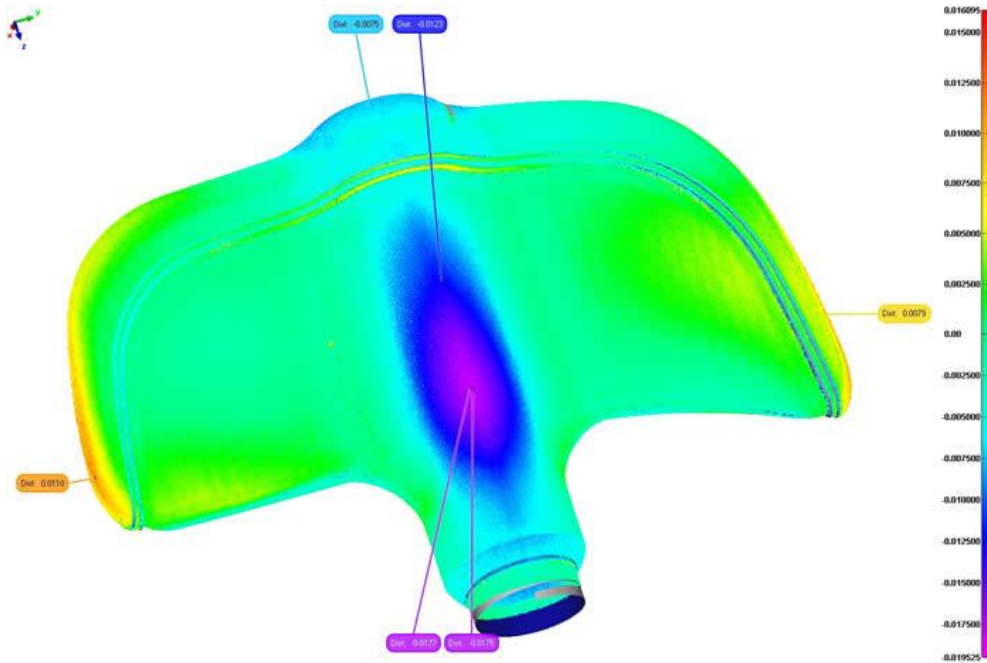
Uvoz CAD modela i oblaka tačaka  
u softver za CAD-inspekciju



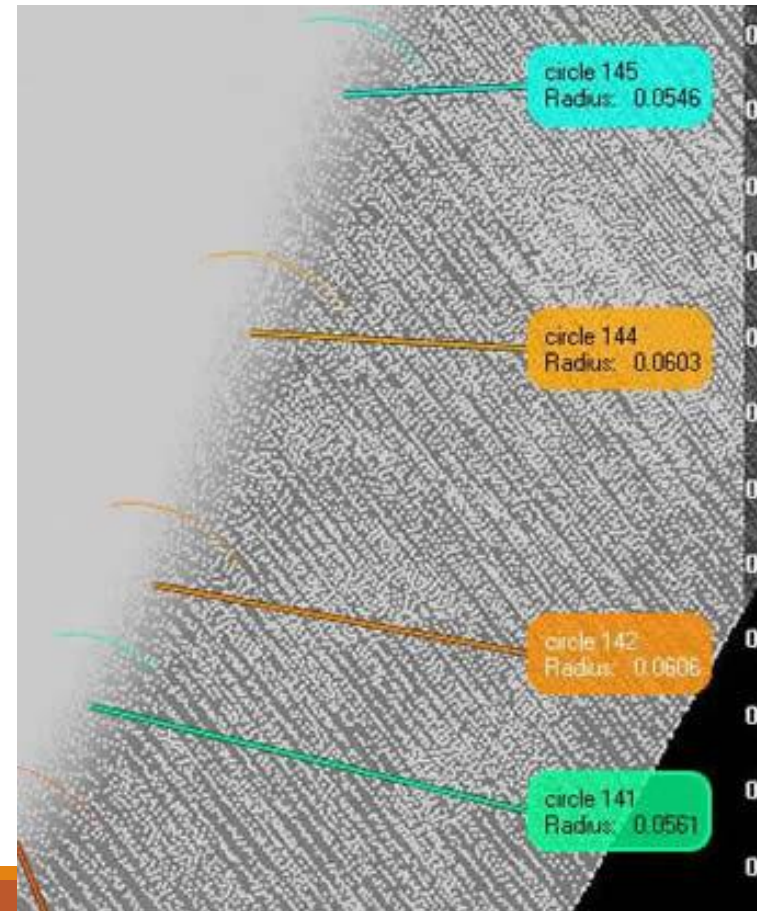
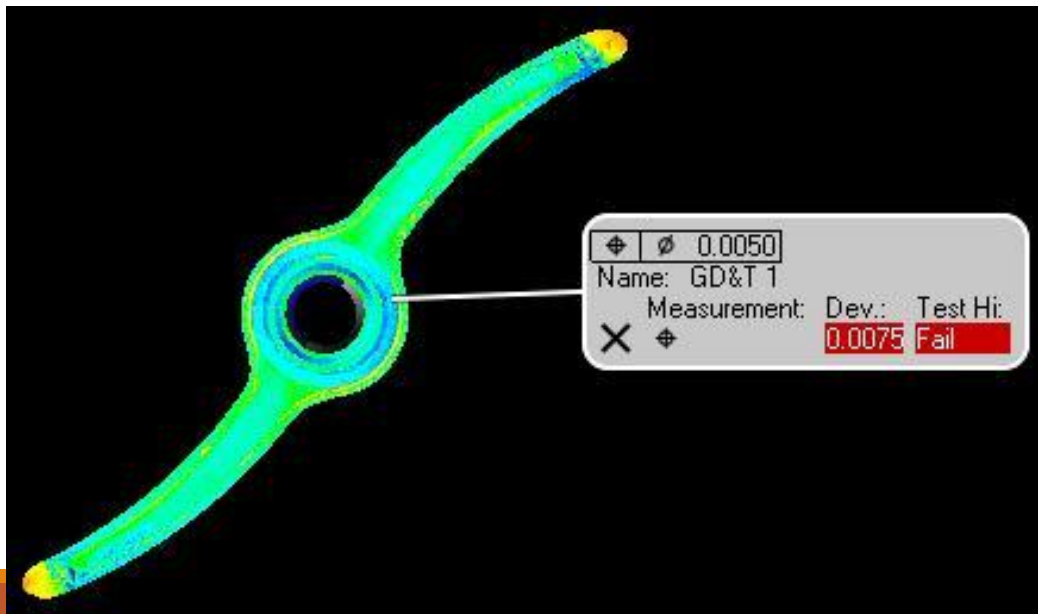
Preklapljeni CAD model  
i oblak tačaka

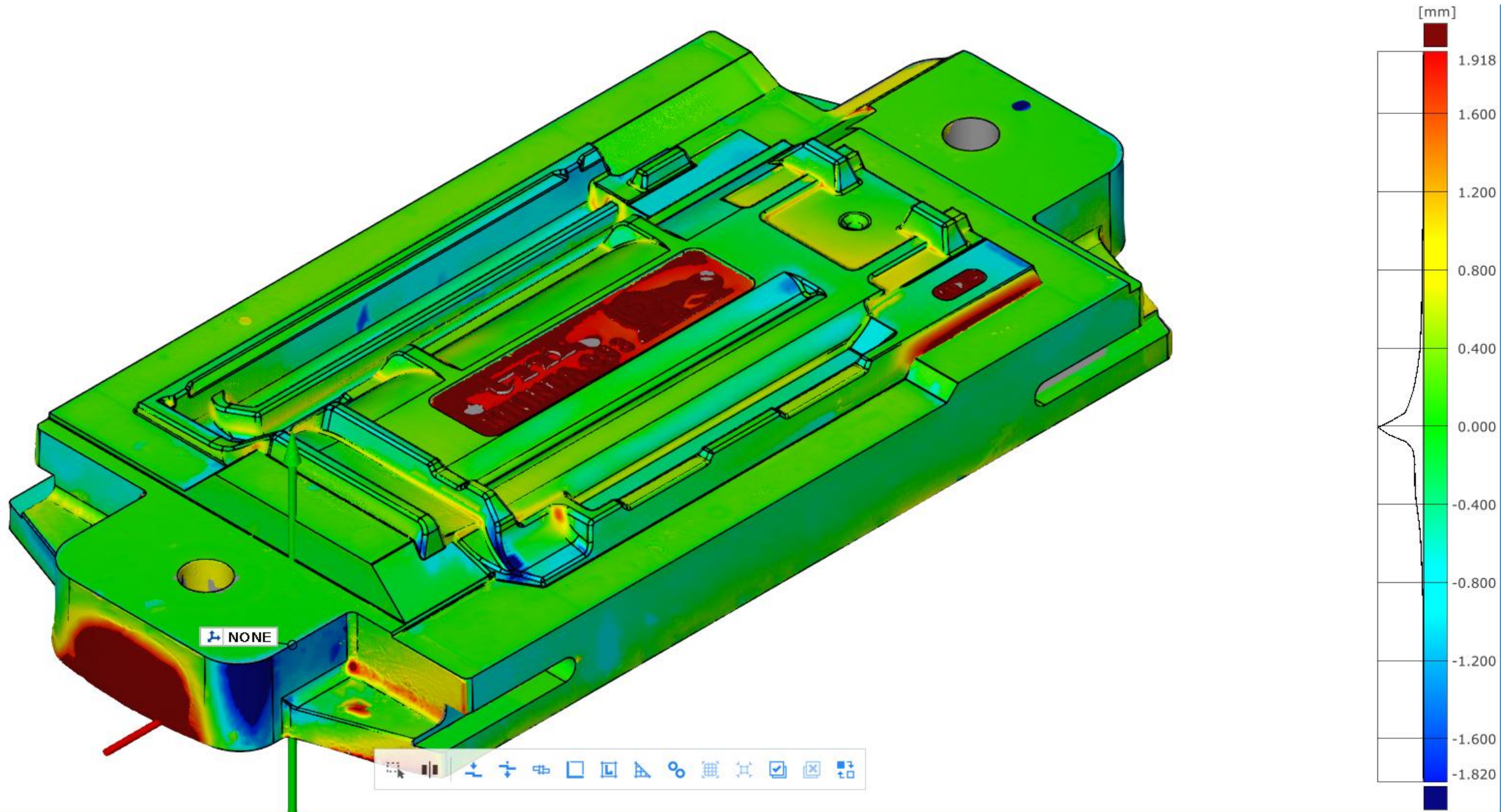


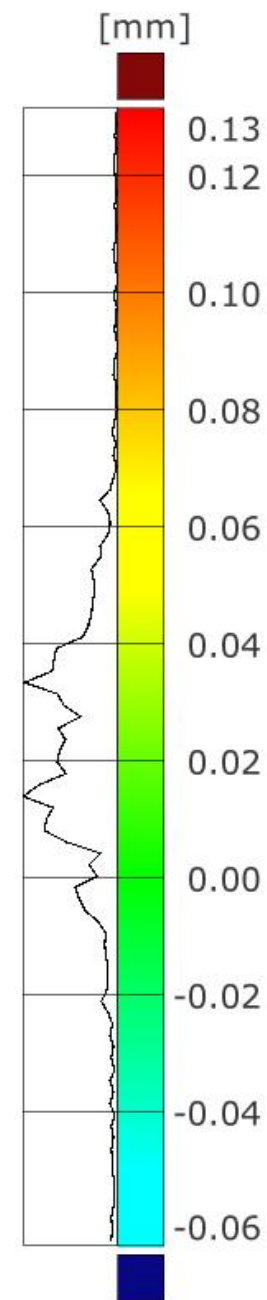
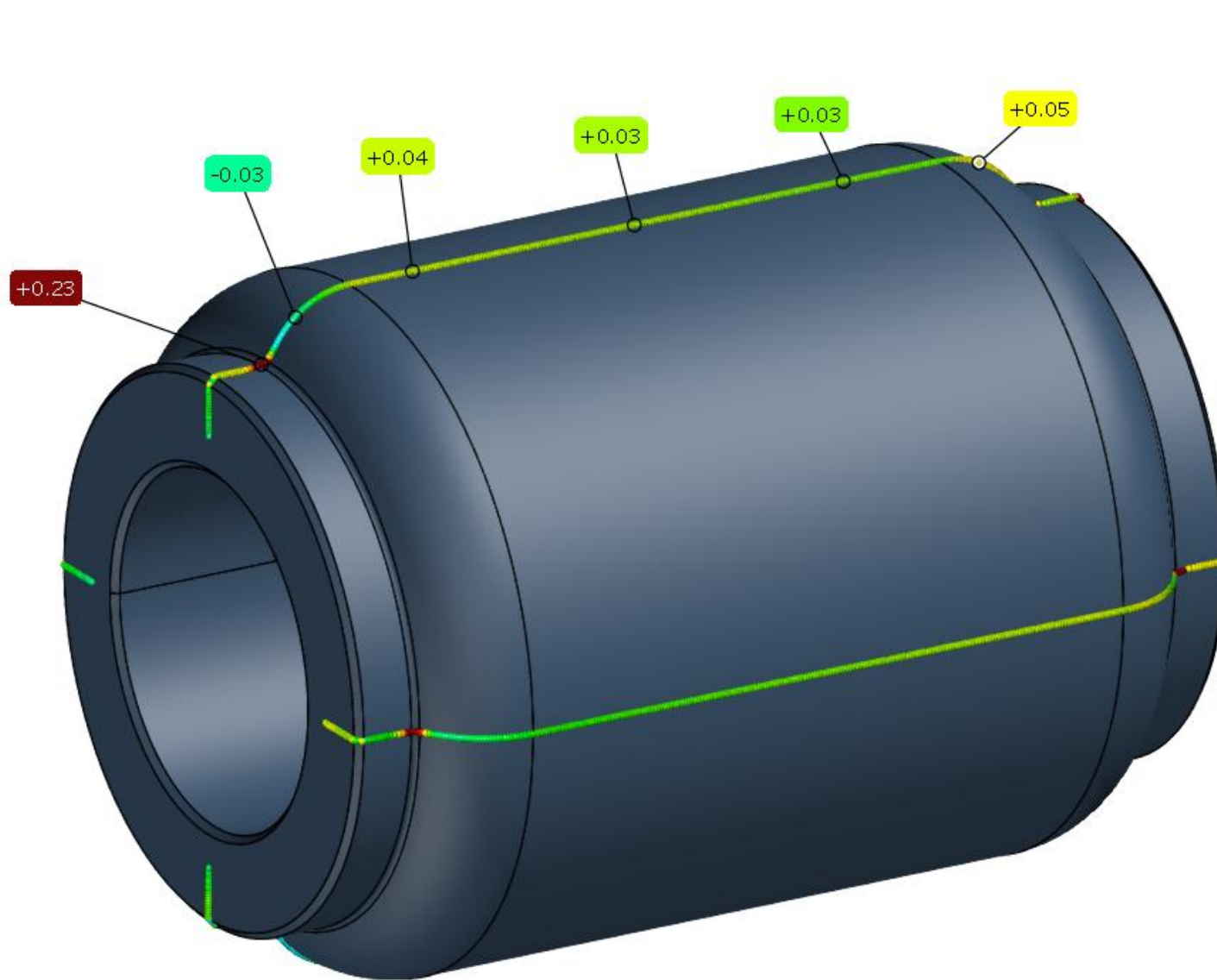
Rezultat CAD-inspekcije u  
grafičkom obliku (color mapa)

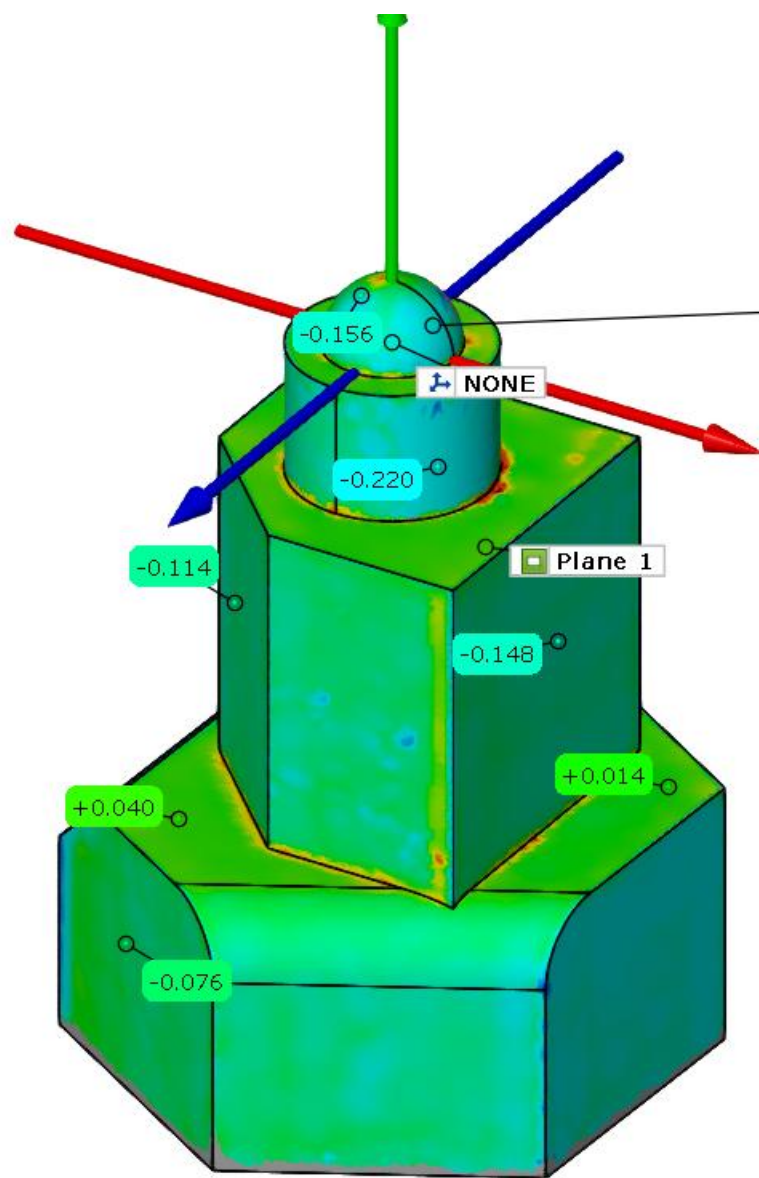


Primer rezultata  
CAD-inspekcije u  
grafičkom obliku (color  
mapa) sa dodatnim  
numeričkim podacima

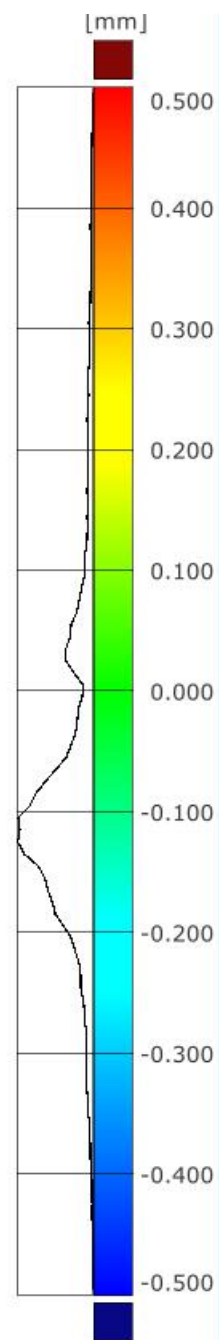








| Surface comparison 1    |          |          |
|-------------------------|----------|----------|
|                         | All      | Selected |
| Max distance            | +1.696   | ???      |
| Min distance            | -1.978   | ???      |
| Mean distance           | -0.075   | ???      |
| Distance std deviation  | +0.176   | ???      |
| Area of valid distance  | +6763.45 | ???      |
| Integrated distance     | -628.71  | ???      |
| Integrated abs distance | +783.49  | ???      |



## Qualify Report

Title: Injector Plate Inspection Report

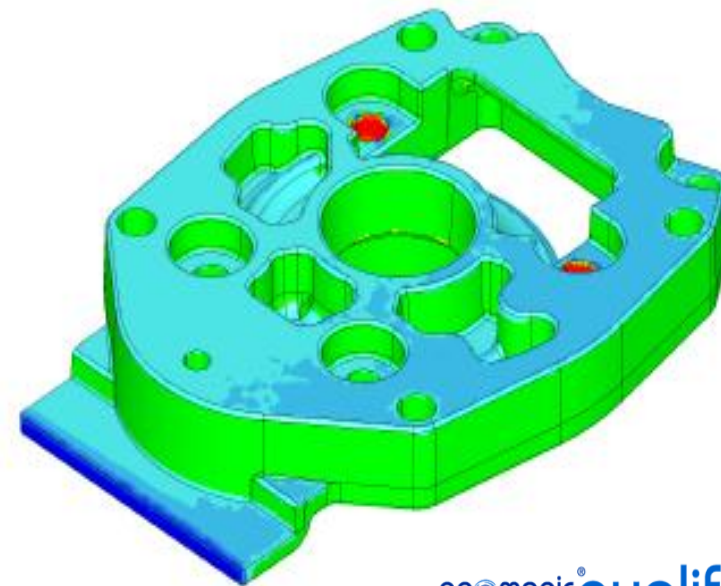
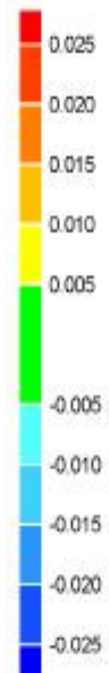
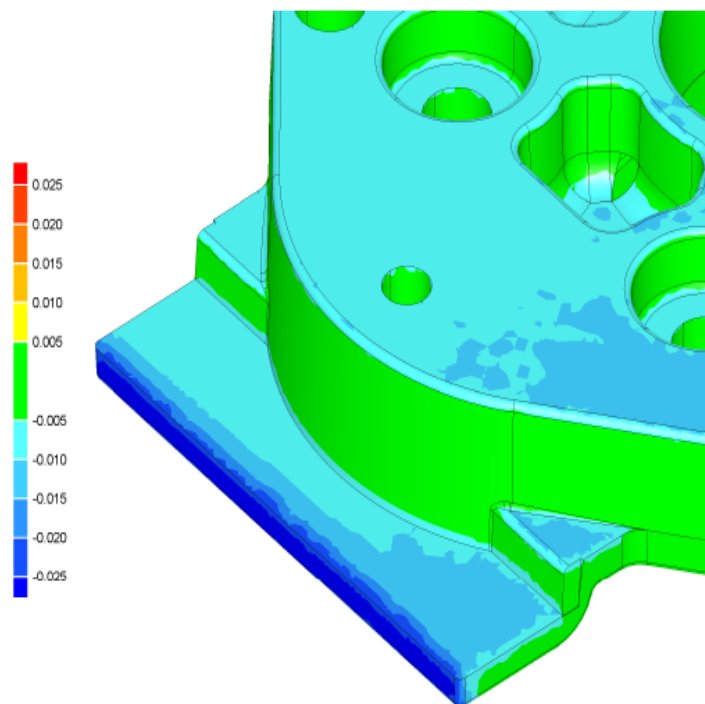
Author: Kevin Scofield

Client: ACME Manufacturing

Part: No. GP-5634 (AL 7075)

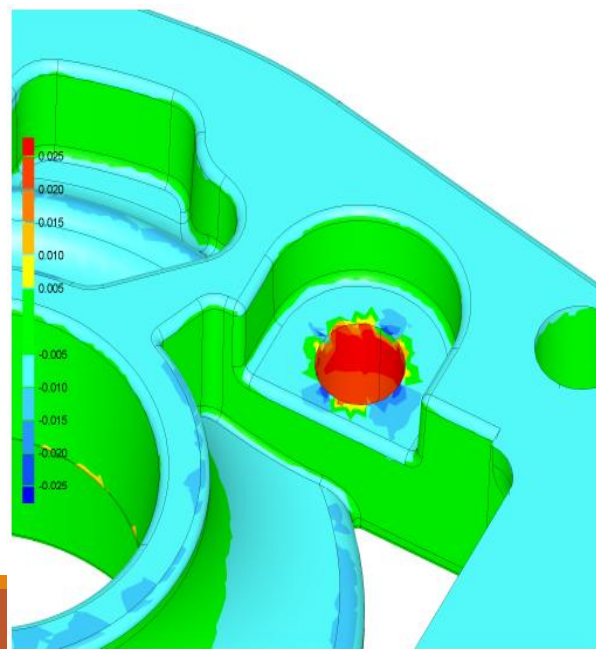
Test: Injector\_plate-SCAN

8/13/2002

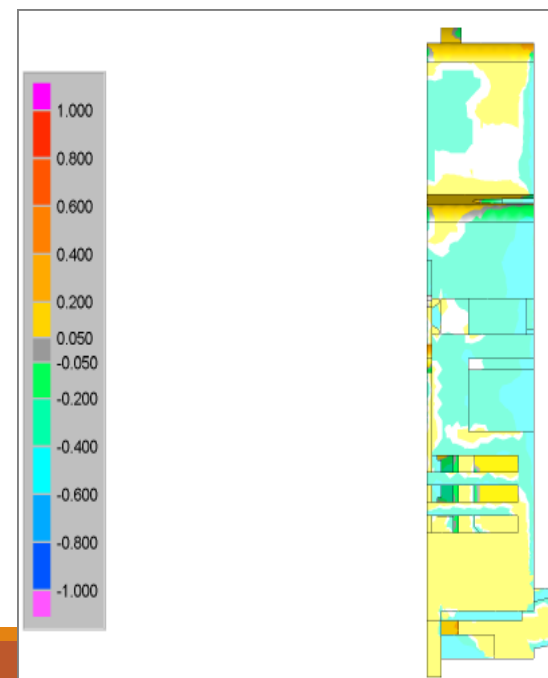
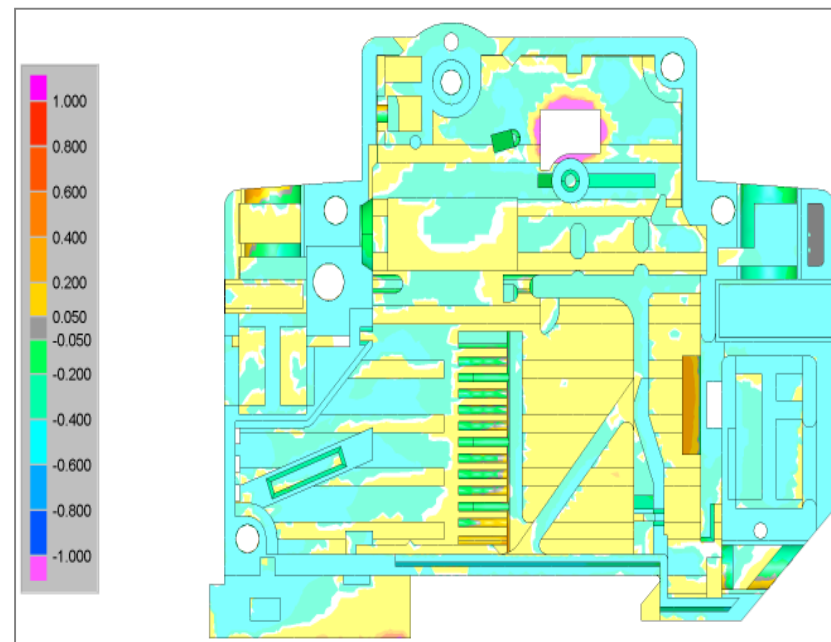
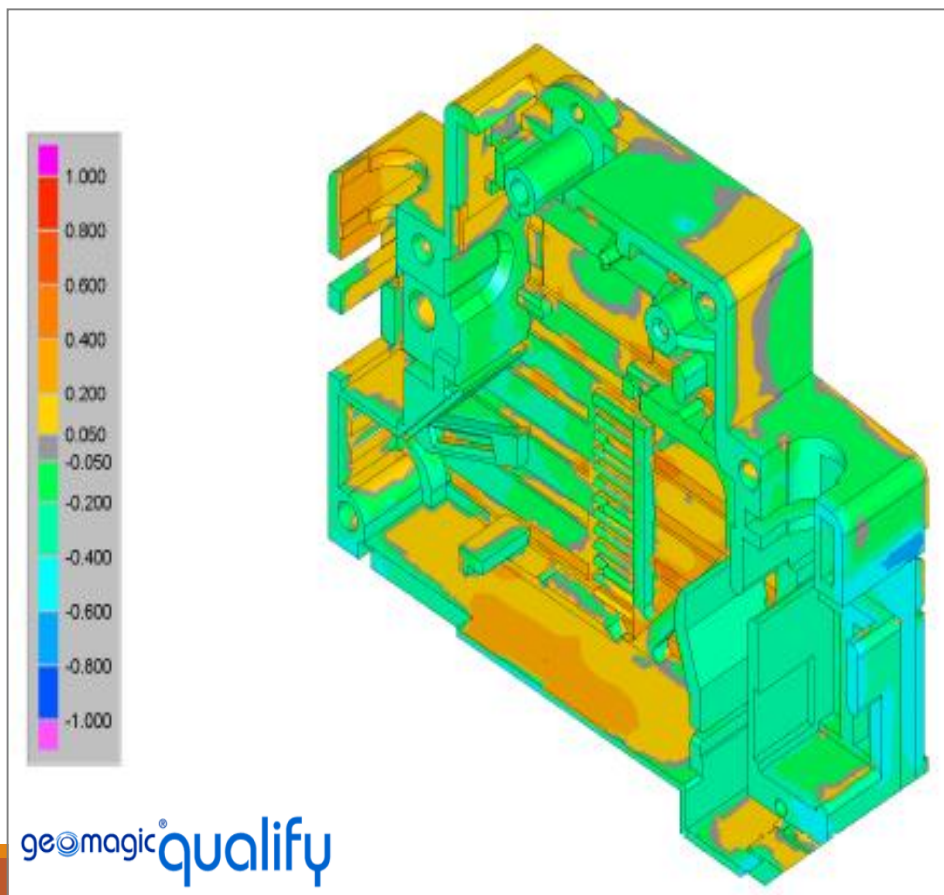


geomagicqualify

**Primer: CAD-INSPEKCIJA**  
**dela izrađenog**  
**tehnologijom rezanja**



**Primer: CAD-INSPEKCIJA  
dela proizvedenog  
tehnologijom injekcionog  
brizganja plastike**



# Primer: CAD-INSPEKCIJA dela izrađenog tehnologijom plastičnog deformisanja

## Qualify Report

Title: Sheet Metal Example Report

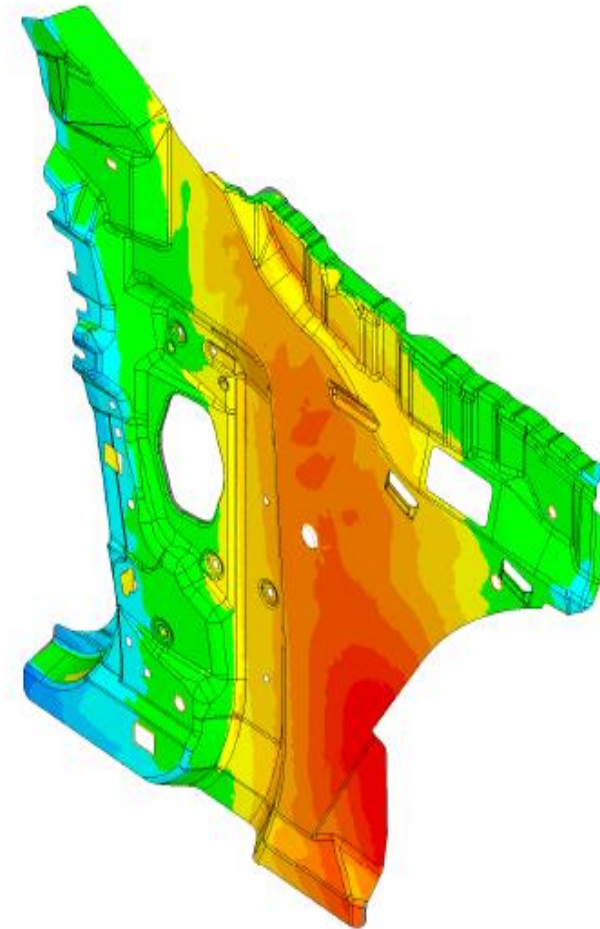
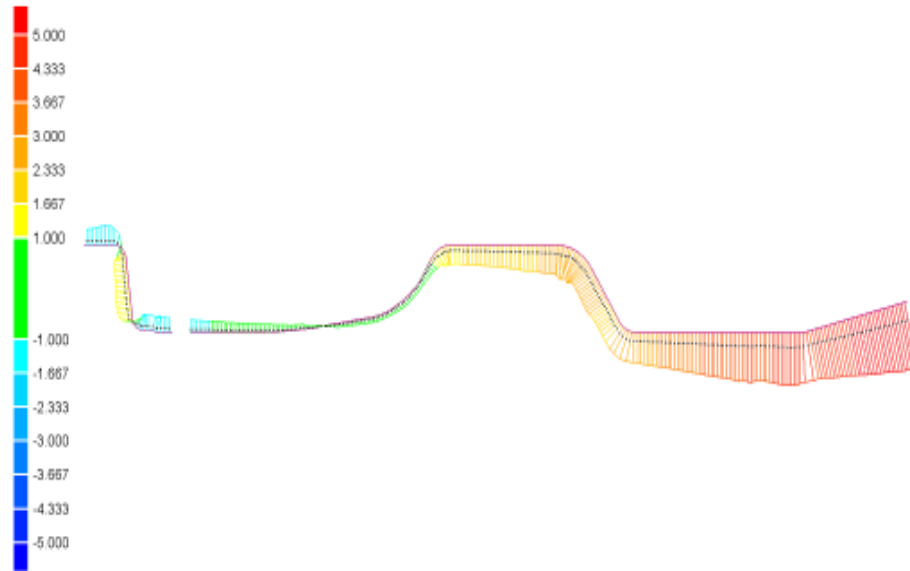
Author: John Smith

Client: Ford Motor Co.

Part: SM-56G

Test: Sheet Metal - Scan

4/30/2003, 5:44 pm

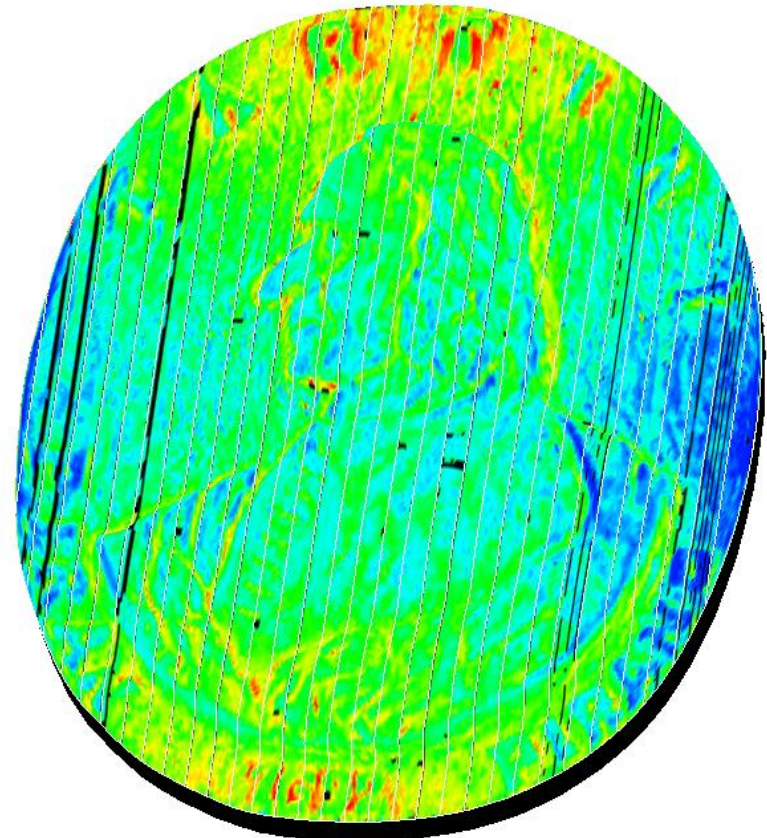
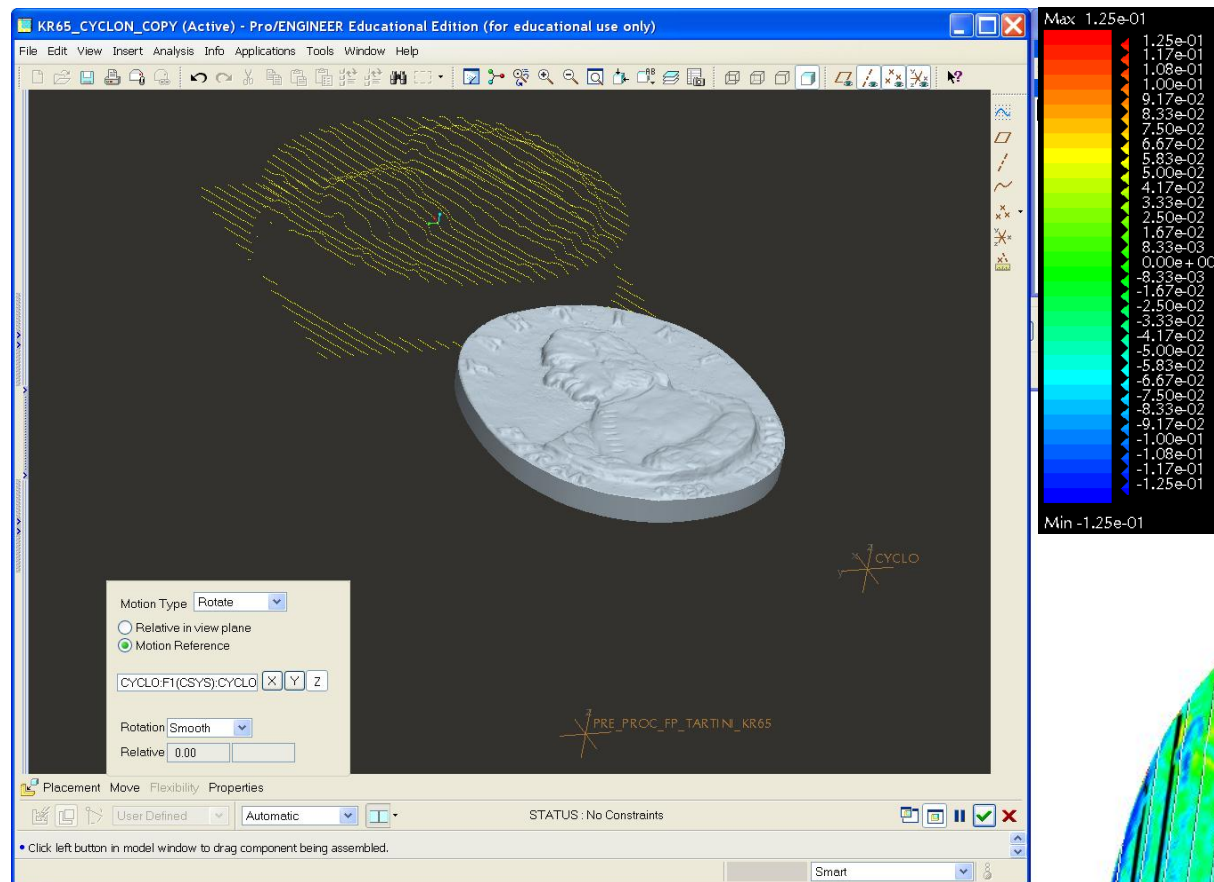


---

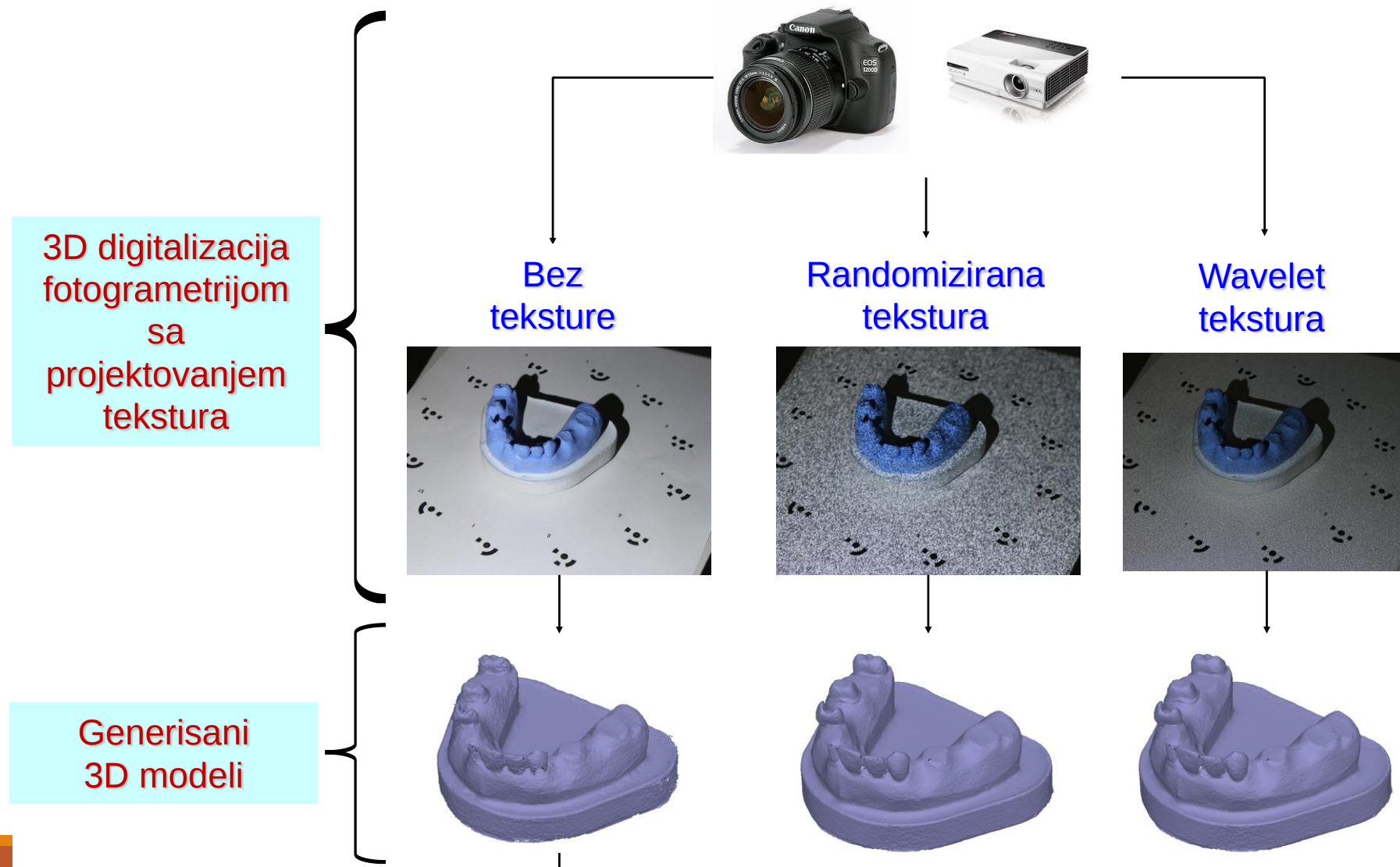
## **Primeri primene CAD inspekcije kod objekata iz ne-tehničkih oblasti**

**Primer: CAD-INSPEKCIJA replike plakete izrađene  
tehnologijom 3D štampe**





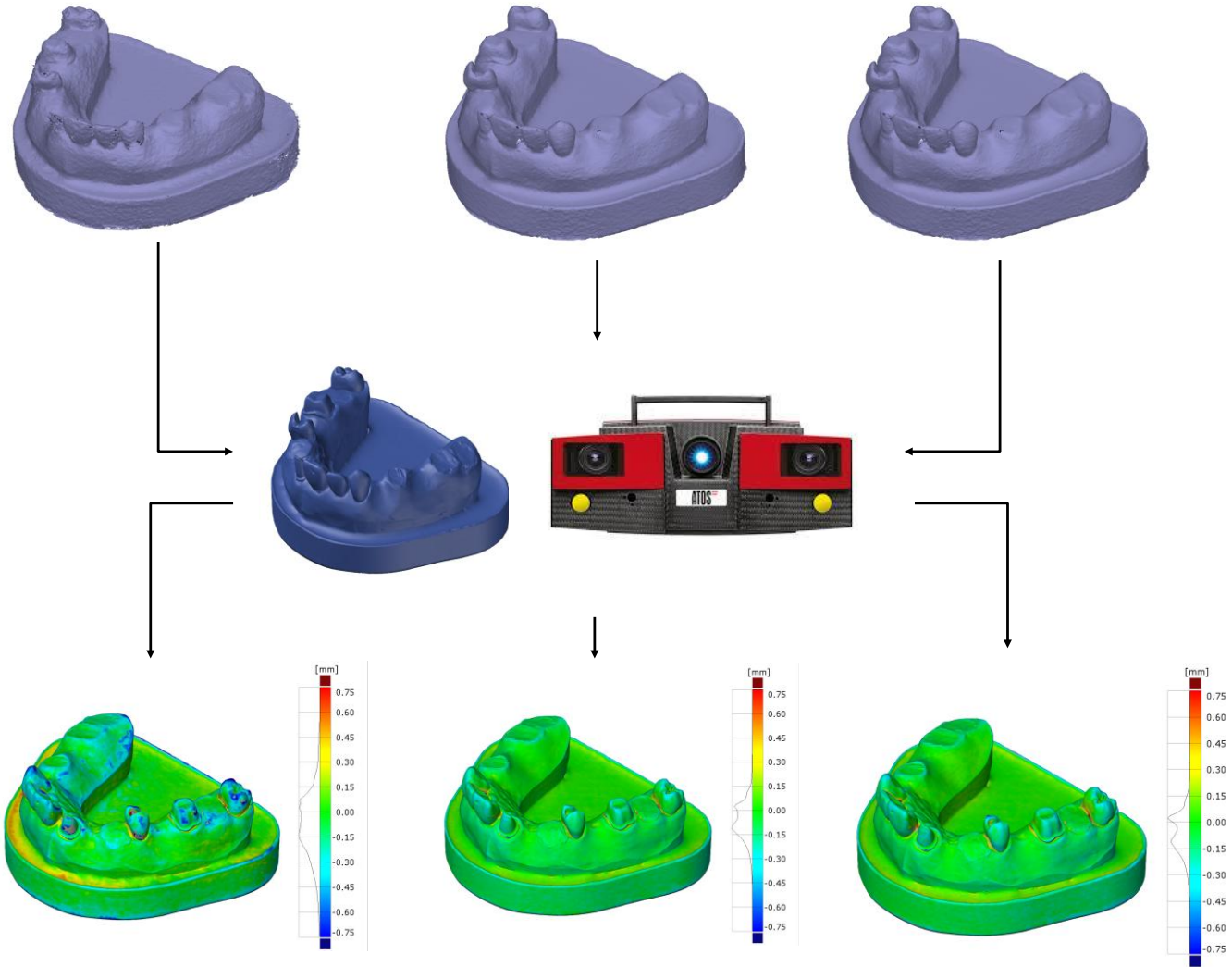
# Primer: CAD-INSPEKCIJA dentalnog gipsanog otiska donje vilice primenom fotogrametrijske 3D digitalizacije



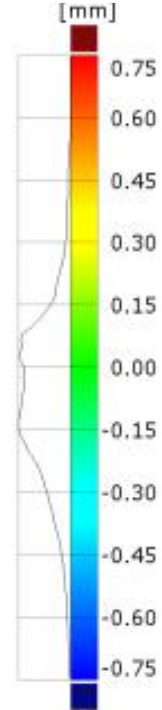
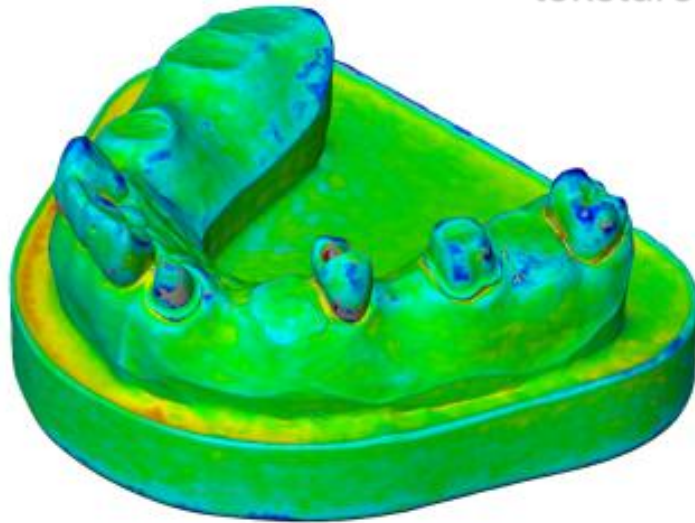
Generisani  
3D modeli

Referentni  
3D model dobijen  
3D digitalizacijom  
sistemom  
ATOS GOM

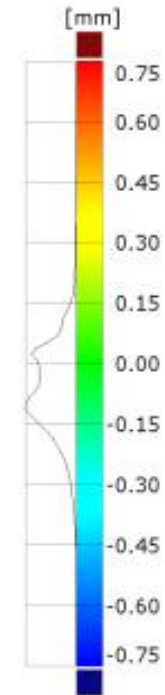
CAD-inspekcija  
(komparacija tri  
generisana  
3D modela sa  
referentnim)



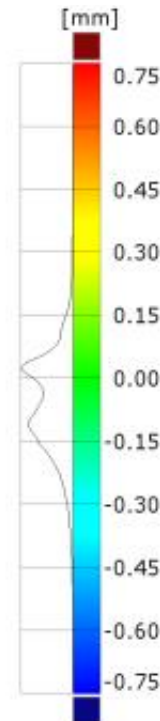
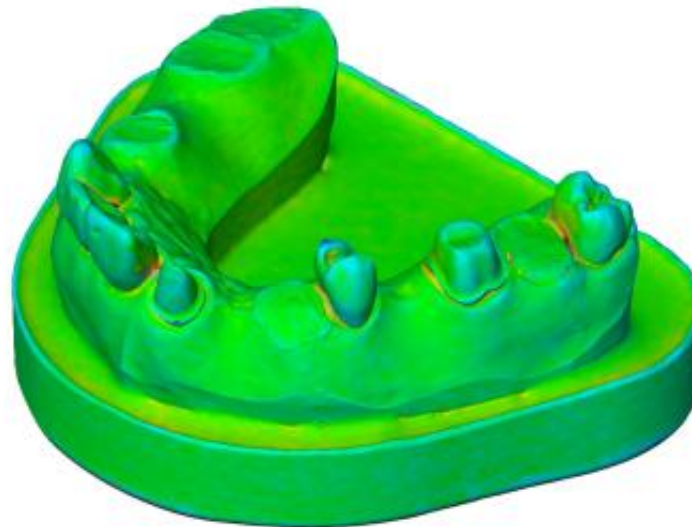
Bez  
teksture



Randomizirana  
tekstura

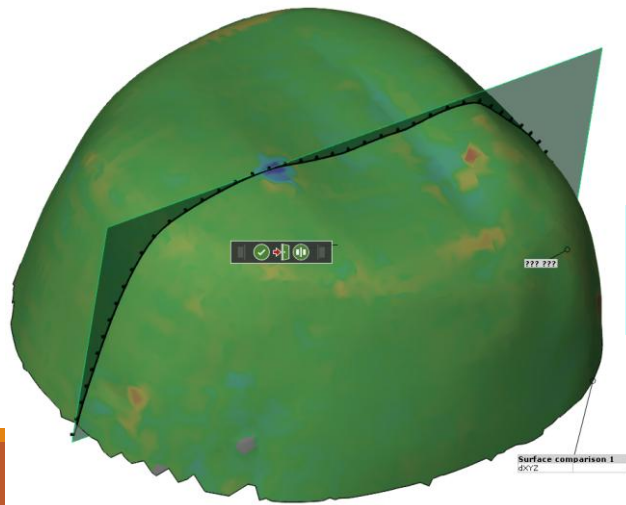
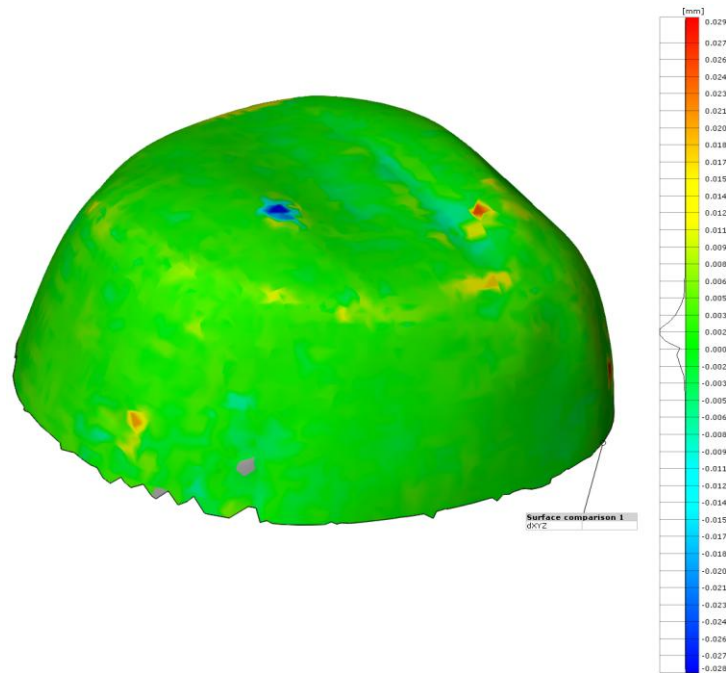


## Rezultati CAD-inspekcije



Wavelet  
tekstura

# Primer: CAD-INSPEKCIJA dentalne krunice zuba primenom 3DD KMM



Analiza  
2D preseka

