

# **RAPORTARE ȘTIINȚIFICĂ**

**FAZA DE EXECUȚIE NR. 2**

**CU TITLUL**

***OPTIMIZAREA DESIGNULUI ȘI FABRICAREA DE  
PROTOTIPURI DE STRUCTURI DE METAMATERIALE ASAMBLABILE***

**DIN CADRUL PROIECTULUI**

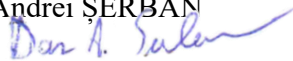
***FABRICAREA DE PANOURI DE TIP SANDWICH CU MIEZ DIN STRUCTURI DE METAMATERIALE  
FOLOSIND TEHNOLOGII CONVENȚIONALE, PRETABILE UNOR PROCESE DE PRODUCȚIE PE  
SCARĂ LARGĂ***

**Numărul 586 PED/2022**

**Cod proiect PN-III-P2-2.1-PED-2021-1134**

**Director Proiect**

Prof. Dr. Ing. Dan-Andrei ȘERBAN



# Fabricarea de panouri de tip sandwich cu miez din structuri de metamateriale folosind tehnologii convenționale, pretabile unor procese de producție pe scară largă

Perioada de implementare: 28.06.2022 – 27.06.2024

## Cuprins

1.	Rezumatul Fazei de execuție numărul 2 .....	3
2.	Descrierea științifică și tehnică .....	4
2.1.	Introducere .....	4
2.2.	Optimizarea geometriilor componentelor utilizând metode asistate de calculator .....	4
2.3.	Separarea ansamblelor în componente în scopul facilitării fabricației.....	11
2.4.	Optimizarea parametrilor de asamblare .....	12
2.5.	Fabricarea componentelor și a ansamblelor .....	13
2.6.	Concluzii .....	15
3.	Bibliografie .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>

## 1. Rezumatul Fazei de execuție numărul 2

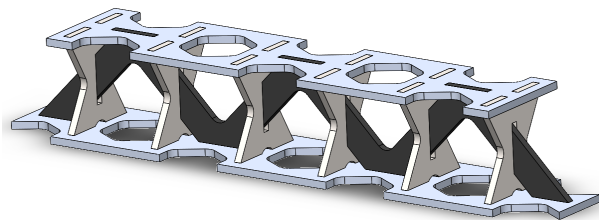
Faza de execuție numărul 2 intitulată *Optimizarea design-ului și fabricarea de structuri de metamateriale asamblabile* a avut următoarele obiective

- Determinarea parametrilor structurali optimi pentru structurile selectate în faza precedentă, astfel încât să prezinte cele mai bune proprietăți mecanice;
- Aplicarea tehnicilor DFM (Design For Manufacturing) în scopul separării structurilor în componente care pot fi asamblate cu ușurință;
- Investigarea celor mai bune metode de fabricație, din punct de vedere al calității componentelor/ansamblurilor și a productivității.

În prima activitate a acestei faze de execuție a fost studiată influența caracteristicile geometrice ale structurilor prin modificarea ponderilor volumice ale componentelor și modificarea dimensiunilor caracteristice ale secțiunilor componentelor la arie constantă. Astfel, s-au ales mai multe intervale de variație și au fost efectuate analize numerice pentru fiecare versiune, în scopul determinării configurației care să redea o rigiditate maximă.

În a doua activitate a acestei faze, structurile optime rezultate au fost separate în componente cu geometrii cât mai simple în scopul fabricării lor prin metode convenționale.

În ultima etapă a acestei faze s-au investigat diverse tehnologii de fabricație pentru a determina varianta care determină cea mai mare productivitate și cea mai bună calitate a componentelor. Ținându-se seama că geometriile componentelor rezultate din a doua activitate sunt plane, s-a stabilit că se vor utiliza trei procese tehnologice: tăiere cu jet de apă, așchiere și sudare.



a)



b)

Modelul CAD al structurii Kagome asamblabile (a) respectiv structura fabricată (b)

## 2. Descrierea științifică și tehnică

### 2.1. Introducere

Pe baza rezultatelor obținute în etapa precedentă, s-au identificat patru tipuri de structuri pretabile pentru a fi dezvoltate în următoarele activități ale proiectului: structura cubică cu fețe centrate, structura cubică cu volum centrat, structura de tip Kagome respectiv structura auxetică. În această etapă au fost investigate aceste tipuri de structuri, cele mai relevante rezultate fiind obținute pentru structura de tip Kelvin, pentru care procesele de optimizare și fabricare vor fi prezentate în detaliu în cele ce urmează.

Toate structurile și elementele structurale prezentate în acest raport au fost dezvoltate în programul comercial *SolidWorks*<sup>TM</sup> iar toate analizele numerice au fost efectuate utilizând pachetul comercial *Abaqus Simulation Suite*<sup>TM</sup>.

### 2.2. Optimizarea geometriilor componentelor utilizând metode asistate de calculator

În prima fază a acestui obiectiv, celulele reprezentative ale structurilor studiate au fost divizate în mai multe componente. În cazul structurii Kagome, celula a fost împărțită în două componente: una corespunzând membrilor verticale (notate cu "X" datorită formei) respectiv membrele înclinate (notate cu "R"). Pentru început, s-a investigat influența caracteristicilor geometrice ale componentelor X. Astfel, volumul acestor componente, ca funcție de lățimea  $t_X$ , lungimea  $l_X$  respectiv grosimea  $b_X$  componentelor este:

$$V_X = \left[ 2 \cdot t_X \cdot l_X - \frac{t_X^2}{\sin(120^\circ)} \right] \cdot b_X \quad (1)$$

Lățimea și grosimea membrilor au fost conectate prin intermediul unui factor de formă  $k_X$ , definit prin raportul grosimii la lățime. Considerând aria secțiunii constante, relațiile dintre dimensiunile membrilor X sunt

$$k_X = \frac{b_X}{t_X}; \quad A_X = t_X \cdot b_X; \quad t_X = \sqrt{\frac{A_X}{k_X}}; \quad b_X = k_X \sqrt{\frac{A_X}{k_X}}; \quad (2)$$

Parametrul  $k_X$  a căpătat valori între 0.25 și 4 în 25 de incremente, două exemple de geometrii rezultate fiind prezentate în Fig. 1.

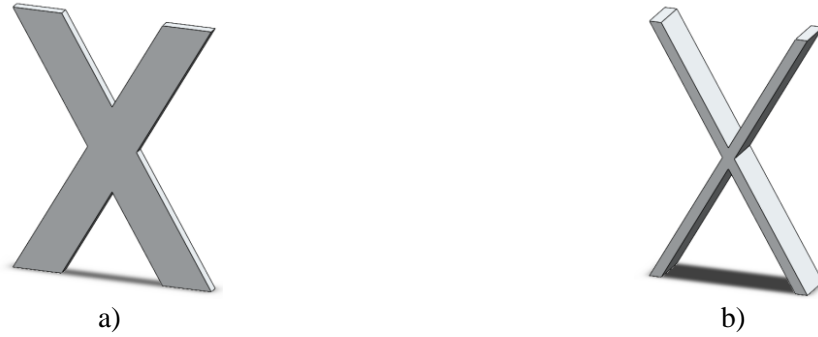


Fig. 1. Geometria membrilor X pentru  $k_x = 0.25$  (a) respectiv  $k_x = 4$  (b)

Cele 25 de structuri rezultate au fost supuse unor analize numerice utilizând metoda elementului finit, constând în compresiune cauzată de o deplasare a suprafețelor superioare, rigiditatea fiind estimată din reacțiunile înregistrate în zonele inferioare ale structurii. Valoarea rigidității normalizate (raportul valorii curente la valoarea maximă) înregistrate cu parametrul  $k_x$  este prezentată în Fig. 2. În urma analizelor s-a putut observa o scădere a rigidității cu creșterea valorii parametrului  $k_x$ , această variație fiind relativ redusă, valoarea minimă fiind cu 6,6% mai mică decât valoarea maximă.

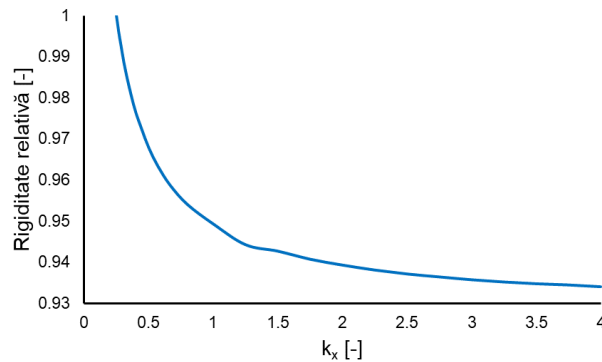


Fig. 2. Variația rigidității relative cu parametrul  $k_x$

În cazul membrului R, volumul acestuia  $V_R$  a fost evaluat cu relația

$$V_R = [t_R \cdot l_R - b_X t_R \sqrt{2}] \cdot b_R \quad (3)$$

unde  $t_R$  este lățimea,  $l_R = l_X \sqrt{1.5}$  este lungimea iar  $b_R$  este grosimea membrului.

În mod similar membrilor X, caracteristicile geometrice ale secțiunii membrului R au fost conectate prin intermediul unui factor de formă  $k_R$ , pentru o arie a suprafeței constantă  $A_R$  relațiile fiind:

$$k_R = \frac{b_R}{t_R}; \quad A_R = t_R \cdot b_R; \quad t_R = \sqrt{\frac{A_R}{k_R}}; \quad b_R = k_R \sqrt{\frac{A_R}{k_R}}; \quad (4)$$

Analizele numerice efectuate în scopul determinării influenței parametrului  $k_R$  au inclus și membrele X, având o valoare constantă a parametrului  $k_X = 0.25$ . În mod similar, parametrul  $k_R$  a fost variat între 0.25 și 4 în 25 de incremente, două exemple fiind prezentate în Fig. 3.

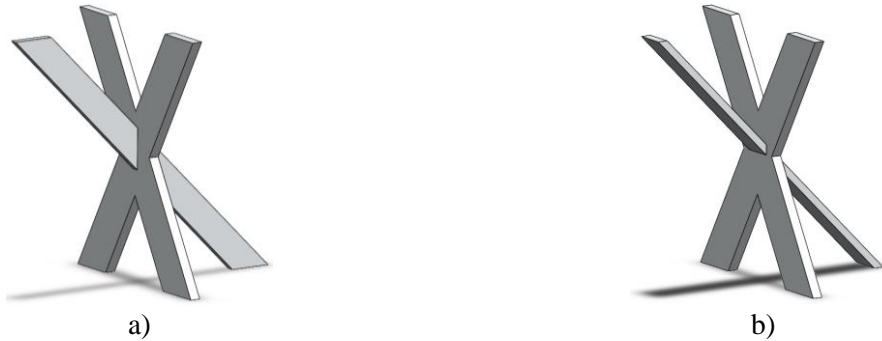


Fig. 3. Geometria celulei Kelvin cu  $k_R = 0.25$  (a) respectiv  $k_R = 4$  (b)

Analizele numerice au avut aceleași caracteristici ca și în cazul precedent, variația rigidității relative a structurii cu parametrul  $k_R$  fiind prezentată în Fig. 4

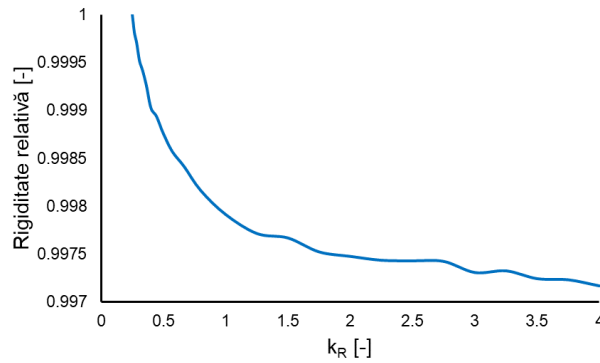


Fig. 4. Variația rigidității relative a structurii cu parametrul  $k_R$

Așa cum era de așteptat, influența variației factorului  $k_R$  este nesemnificativă (variație de 0.3% între valoarea maximă și minimă), capacitatea portantă a structurii fiind dată predominant de membrele X. Cu toate acestea, influența membrilor R este semnificativă la solicitările de încovoiere.

În următorul pas a fost evaluată influența ponderii volumice a celor două componente asupra proprietăților mecanice. Acest lucru s-a realizat prin menținerea constantă a volumului total  $V_{tot}$  și variația volumelor celor două componente ( $V_X$  respectiv  $V_R$ ).

$$V_{tot} = V_X + V_R = \left[ 2 \cdot t_X \cdot l_X - \frac{t_X^2}{\sin(120^\circ)} \right] \cdot b_X + [t_R \cdot l_R - b_X t_R \sqrt{2}] \cdot b_R \quad (5)$$

Numărul de variabile se poate reduce prin menținerea constantă a lungimii membrilor ( $l_X$  și, în consecință  $l_R$ ) și stabilirea unei valori de 0.25 pentru factorii k ( $k_X = k_R = 0.25$ ). Astfel, ecuația (5) se poate reduce la 2 variabile, varianta aleasă în acest studiu fiind variația grosimii membrilor R ca funcție de grosimea membrilor X, menținând volumul constant

$$b_R(b_X) = \sqrt{\frac{k_R \left\{ V_{tot} - \left[ 2 \cdot \frac{b_X^2}{k_X} \cdot l_X - \frac{b_X^3}{k_X^2 \cdot \sin(120^\circ)} \right] \right\}}{l_R - b_X \sqrt{2}}} \quad (6)$$

În generarea modelelor, s-a observat că pentru valori ale raportului  $b_X/b_R < 0.82$ , s-au generat structuri nevalide (Fig. 5 a). Valoarea maximă a raportului  $b_X/b_R$  a fost aleasă 2.07, două exemple pentru structurile rezultate fiind prezentate în Fig. 5 b) respectiv c). Variația raportului  $b_X/b_R$  de la 0.82 la 2.07 a determinat o variație a raportului ariilor secțiunilor  $A_X/A_R$  între 0.68 și 4.27.

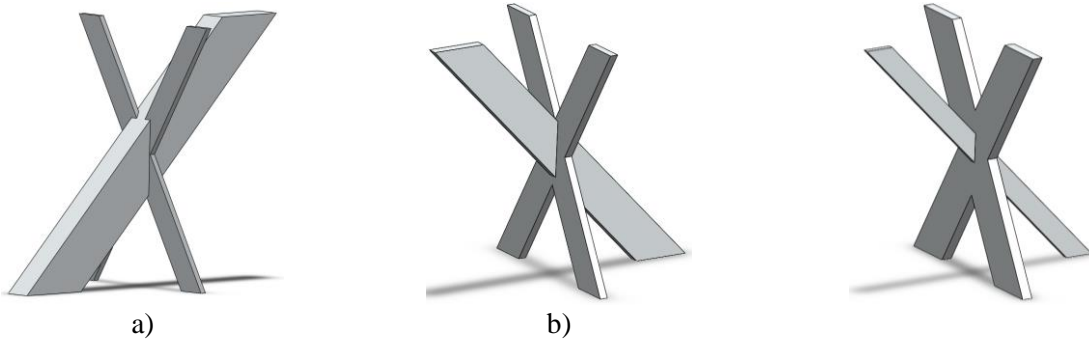


Fig. 5. Celula Kagome pentru  $b_X/b_R = 0.55$  (a),  $b_X/b_R = 0.82$  (b) respectiv  $b_X/b_R = 2.07$  (c)

Rigiditatea la compresiune a acestor structuri a fost determinată pe structuri teselate care conțin patru celule și fețe de grosimi constante, prezentate în Fig. 6.

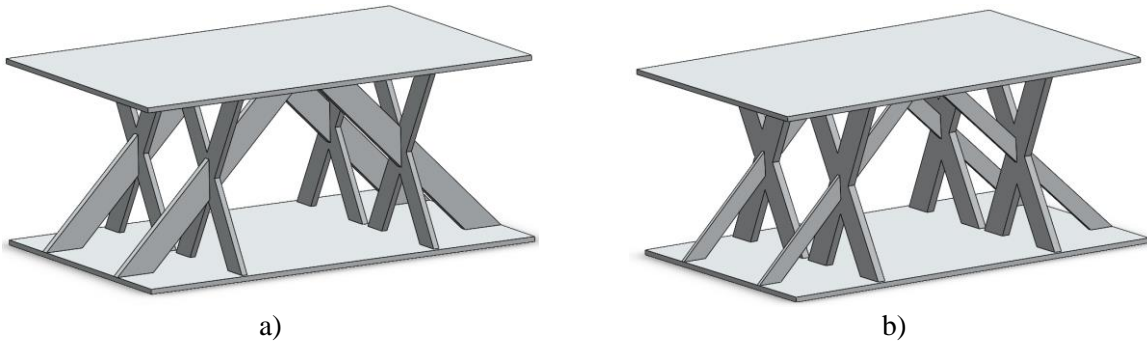


Fig. 6. Structuri Kagome utilizate în analize de compresiune pentru  $b_X/b_R = 0.82$  (a) respectiv  $b_X/b_R = 2.07$  (b)

Analizele de compresiune au constat în aplicarea unei deplasări asupra feței superioare cu înregistrarea reacțiunilor din fața inferioară.

Influența ponderii volumice ale celor două componente asupra proprietăților la încovoiere s-a realizat prin efectuarea de analize numerice de încovoiere în trei puncte pe structuri teselate alcătuite din 6 celule, prezentate în Fig. 7.

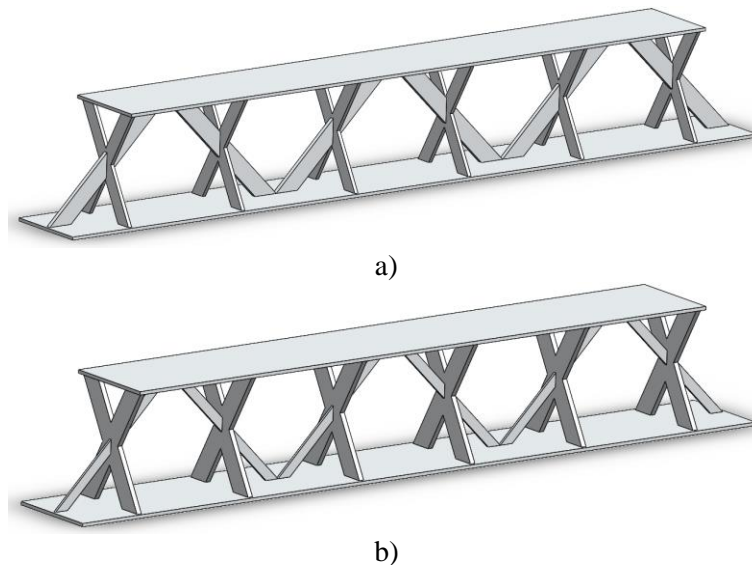


Fig. 7. Structuri Kagome utilizate în analize de încovoiere pentru  $b_X/b_R = 0.82$  (a) respectiv  $b_X/b_R = 2.07$  (b)

Analizele de încovoiere în trei puncte au inclus 3 corpuri rigide având rol de reazeme respectiv indnetor. Distanța de rezemare  $L$  a fost modificată pentru fiecare structură, astfel încât rezemele să se situeze în dreptul membrilor X (Fig. 8).

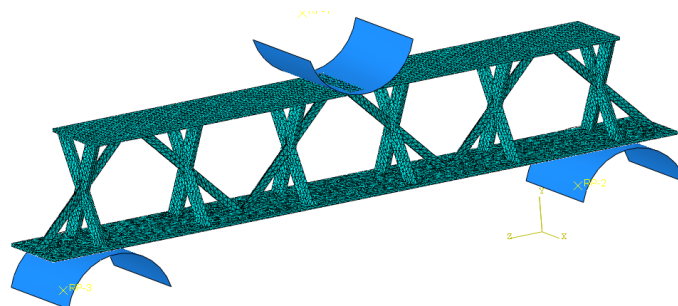


Fig. 8. Modelul de analiză numerică pentru solicitarea de încovoiere în trei puncte

Corpurile rigide aferente reazemelor au fost încastrate, iar indnetorului i s-a atribuit o deplasare. Din forțele  $L$  și deplasările  $u$  înregistrate s-au determinat deformațiile  $\varepsilon$ , tensiunile  $\sigma$  și modulul de elasticitate  $E$ .



$$\varepsilon = \frac{6 \cdot u \cdot h}{L^2}; \quad \sigma = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot h^2 \cdot w}; \quad E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

Variația rigidității normalizate rezultate în urma analizelor de compresiune și încovoiere este prezentată în Fig. 9. Din rezultate se poate observa că odată cu creșterea raportului ariilor secțiunilor celor două membre s-a înregistrat o creștere a rigidității la compresiune și o scădere a rigidității la încovoiere. Astfel, este necesară considerarea unui compromis. Ținând cont de faptul că o creștere a ponderii ariei membrului X determină o scădere mai drastică a rigidității la încovoiere față de scăderea rigidității la compresiune cauzată de creșterea ponderii membrului R, și ținând cont de aspecte tehnologice, s-a ales ca valoarea optimă a raportului ariilor secțiunilor să fie 1, astfel, considerând valoarea constantă a parametrului k, grosimile celor două componente vor fi egale.

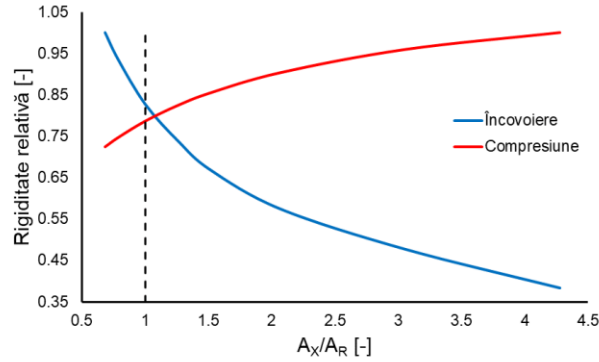
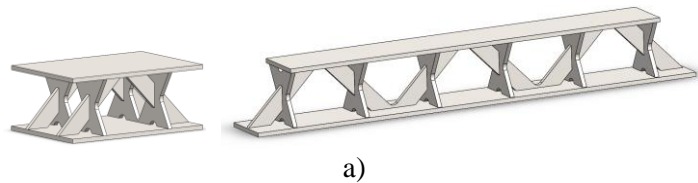


Fig. 9. Variația rigidității relative cu raportul  $A_X/A_R$  pentru solicitările de compresiune respectiv încovoiere

Următoarea etapă în obținerea parametrilor optimi ai structurilor este determinarea lungimii optime a membrilor  $l_X$  respectiv  $l_R$ . Considerând grosimea componentelor  $b_x = b_R = b$ , variația volumului total  $V_{tot}$  cu lungimea  $l_X$  este

$$V_{tot}(l_X) = b^2 \frac{l_X(2 + \sqrt{1.5})}{k} - b^3 \left( \frac{1 + k\sqrt{2} \sin(120^\circ)}{k^2 \cdot \sin(120^\circ)} \right) \quad (8)$$

Pentru acest studiu, parametrul variabil este raportul dintre lungimea membrului X la aria suprafeței A, parametrul  $l_X/A$  variind între 1.875 și 4.375, două exemple fiind prezentate în Fig. 10.



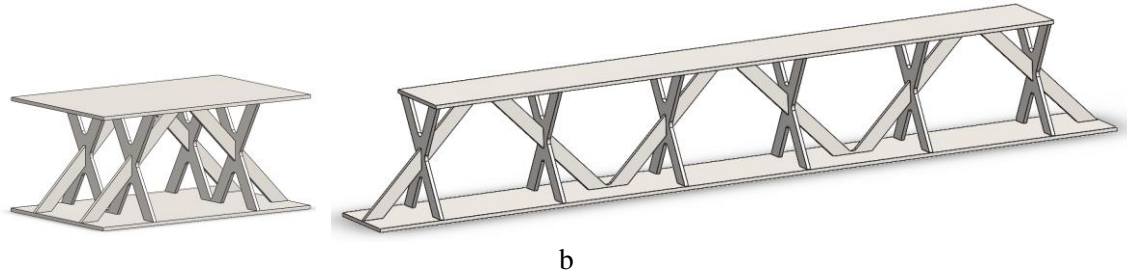


Fig. 10. Structurile Kagome utilizate în analize pentru  $l_x/A = 1.875$  (a) și  $l_x/A = 4.375$  (b)

Analizele numerice au fost efectuate cu parametrii identici analizelor precedente, variația rigidității relative normalizate la masa structurii cu parametrul  $l_x/A$  fiind prezentată în Fig. 11

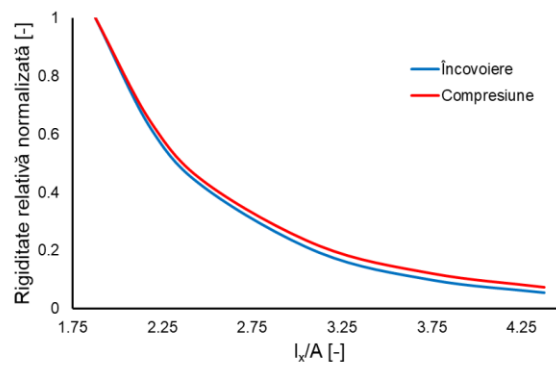


Fig. 11. Variația raportului  $E/m$  cu parametrul  $l_x/A$

Din rezultate se poate observa că, pentru a obține o rigiditate maximă atât la compresiune cât și la încovoiere, parametrul  $l_x/A$  trebuie să fie minim. Pentru acest studiu, valoarea minimă a parametrului care determină geometrii valide este 1.875.

Ultima etapă acestui studiu a constat în optimizarea fețelor structurii în scopul reducerii masei, cu o influență minimă asupra rigidității. În acest scop au fost generate grinzi de grosime  $b$  și o lățime  $t = b/k$ , rezultatul fiind prezentat în Fig. 12.



Fig. 12. Structura Kagome pentru compresiune (a) respectiv încovoiere (b) cu noile fețe

### 2.3. Separarea ansamblului în componente în scopul facilitării fabricației

În urma analizei geometriei finale a grinzii s-a ales împărțirea ansamblului în 4 componente: componente corespunzătoare membrilor X, componente corespunzătoare membrilor R și componente aferente celor două fețe.

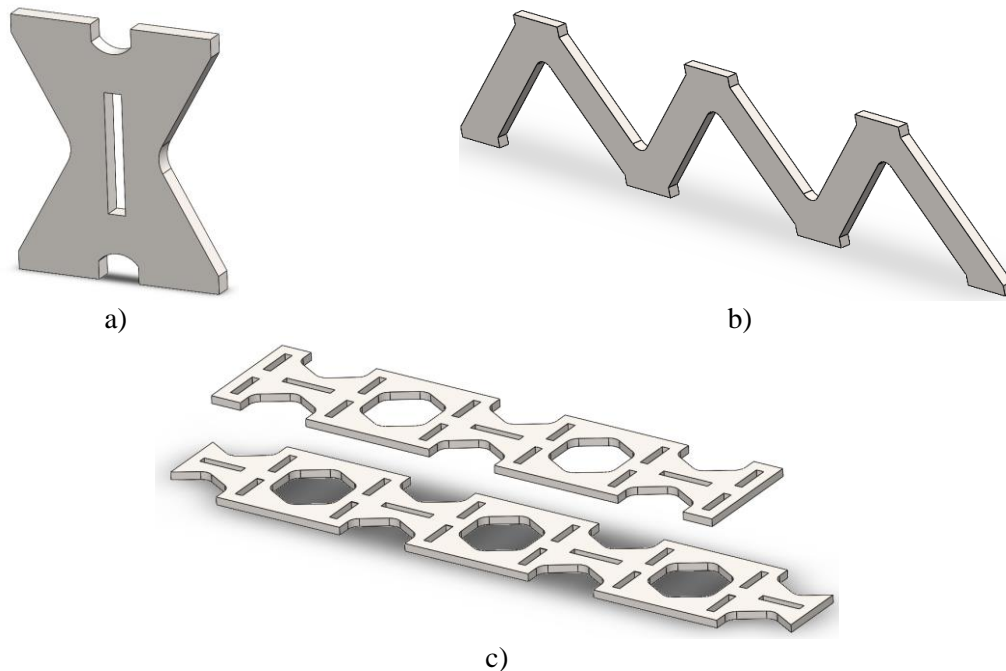


Fig. 13. Componentele ansamblului: membrele X (a), membrele R (b) și fețele (c)

Componentelor corespunzătoare membrilor X (Fig. 13 a) li s-au atribuit raze de racord în scopul reducerii concentrării de tensiune, un orificiu central care să permită inserarea membrilor R și flanșe prismatice pe suprafețele superioare și inferioare care au rol de asamblare în fețele structurii.

Membrele R au fost unite într-o singură componentă (Fig. 13 b), căreia i s-au atribuit raze de racord și flanșe pe suprafețele superioare și inferioare. Orificiile din componentele X au o dimensiune suficient de mare astfel încât să permită inserarea lor pe componenta R.

Fețele superioare și inferioare au o celulă de bază identică, numărul tesărilor fiind diferit pentru fiecare componentă în funcție de caracteristicile structurii. Pentru ambele componente s-au generat raze de racord și orificii pentru flanșele celorlalte componente. În plus, în scopul simplificării geometriei și facilitării procesului de fabricație, orificiile triunghiulare rezultate datorită metodei de generare a componentelor au fost eliminate.

Ansamblul format din cele patru tipuri de componente este prezentat în Fig. 14

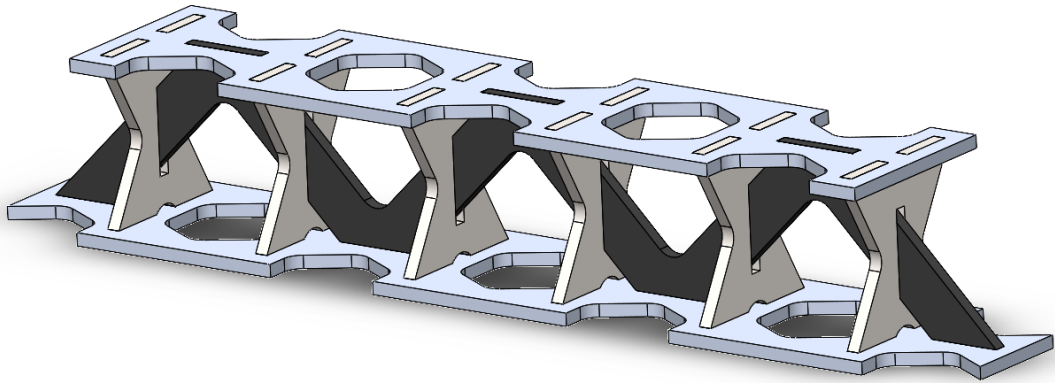


Fig. 14. Ansamblul grinzii Kelvin

#### 2.4. Optimizarea parametrilor de asamblare

Modelul geometric optimizat în activitatea anterioară a fost modificat prin generarea unor interstiții de 0,1mm între zonele de contact ale componentelor, în scopul simulării eventualelor jocuri care pot să apară în urma procesului de fabricație. Ținând seama de faptul că aceste structuri vor fi asamblate nedemontabil, punctele de sudare aferente au fost simplificate prin generarea unor sfere în diverse zone de intersecție ale componentelor (Fig. 15).

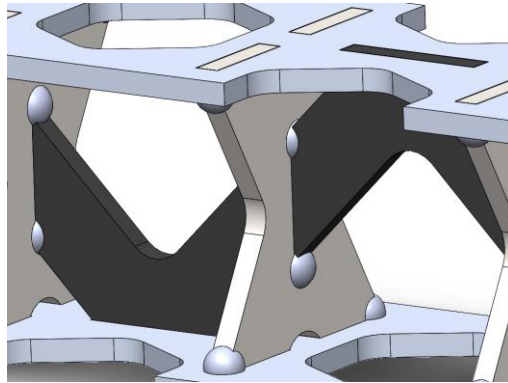


Fig. 15. Detaliu cu sferile inserate, cu rol de a replica punctele de sudare

Pentru a determina configurația optimă din punct de vedere al rigidității, s-au generat 5 variante ale structurii, cu poziționări diferite ale punctelor de sudură/sferelor din modelul geometric. Aceste structuri au fost supuse unor analize numerice prin metoda elementului finit, având configurații similare celor utilizate în analizele precedente.

Analiza rezultatelor a determinat pe de o parte evidențierea zonelor de concentrare a tensiunii ca urmare a factorilor de formă ai componentelor (Fig. 16), precum și a contactului dintre acestea, precum

și o estimare cantitativă a rigidității, prin înregistrarea variației forței de reacțiune din reazem cu deplasarea indenterului (Fig. 17).

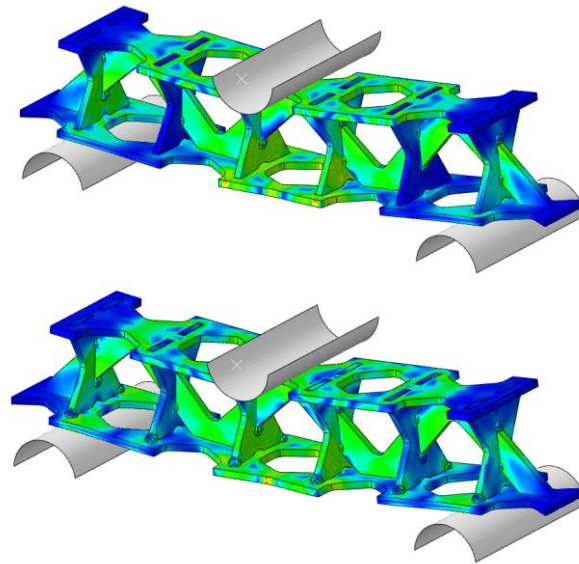


Fig. 16. Diferențe între variația tensiunilor echivalente și localizarea tensiunilor maxime pentru două configurații ale structurii

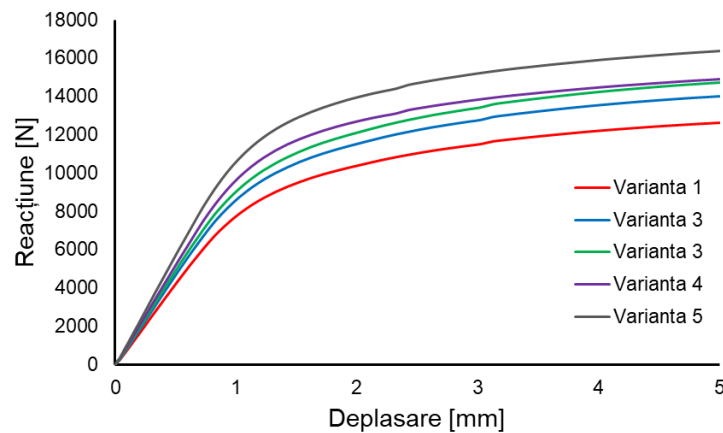


Fig. 17. Graficul forță-deplasare pentru cele cinci variante

## 2.5. Fabricarea componentelor și a ansamblurilor

Pentru fabricarea componentelor s-au considerat mai multe tipuri de tehnologii. Ținând seama de faptul că fiecare componentă a ansamblului are la bază o geometrie plană, semifabricatele alese au fost table metalice, iar ca proces de fabricație s-au considerat așchieria și debitarea cu jet de apă. Ținând cont de productivitatea și calitatea prelucrărilor, s-a decis ca procesul de fabricație să conștea

în debitarea formelor specifice componentelor utilizând tăierea cu jet de apă, urmată de o finisare a suprafețelor prin frezare.



Fig. 18. Componentele grinzii asamblate temporar după fabricare

În urma fabricației componentelor, acestea au fost asamblate (Fig. 18), observându-se că structura finală prezintă caracteristici de autoblocare, determinând o rigiditate semnificativă. Cu toate acestea, componentele au fost solidarizate prin intermediul sudurilor cu electrod acoperit, rezultatul fiind prezentat în Fig. 19.



Fig. 19. Varianta finală a grinzii



## 2.6. Concluzii

În faza de execuție numărul 2 intitulată *Optimizarea design-ului și fabricarea de structuri de metamateriale asamblabile* s-au realizat activități corespunzătoare obiectivelor O2 și O3 prezentate în propunerea de proiect. Această fază de execuție a cuprins trei activități, în speță *Optimizarea geometriilor componentelor utilizând metode asistate de calculator*, *Fabricarea componentelor și a ansamblelor* respectiv *Optimizarea parametrilor de asamblare*.

În prima activitate au fost investigate proprietățile mecanice ale mai multor configurații ale structurilor, ținându-se seama de caracteristicile geometrice ale secțiunii componentelor, influența ponderii volumice ale componentelor și dimensiunile acestora. Varianta optimă rezultată în urma acestor analize a determinat geometrii ale componentelor pretabile a fi fabricate din semifabricate plane de tip tablă metalică. A doua parte a acestei etape a constat în separarea grinzilor în componente care pot fi fabricate prin metode convenționale și modificarea acestora în scopul facilitării procesului de asamblare.

Optimizarea parametrilor de asamblare s-a realizat prin intermediul analizelor numerice, evaluându-se diferite modalități de solidarizare a componentelor, prin plasarea punctelor de sudare în diverse regiuni ale structurii. Pe baza rezultatelor, s-a selectat varianta optimă, urmând ca încercările experimentale să fie efectuate pe componentele cu configurația respectivă.

Fabricarea componentelor s-a realizat prin debitarea lor din table de oțel prin intermediul tăierii cu jet de apă, acestea urmând a fi finisate prin intermediul frezării. Componentele au fost asamblate prin poziționarea reciprocă corespunzătoare și solidarizate prin intermediul sudării cu electrod acoperit.

În următoarea etapă a proiectului, structurile fabricate vor fi supuse unor încercări mecanice de compresiune respectiv încovoiere în trei puncte. Rezultatele încercărilor vor fi comparate cu rezultatele analizelor numerice, se va investiga modalitatea de cedare, iar structurile vor fi optimizate suplimentar în scopul creșterii rigidității și a rezistenței mecanice.