

RAPORTARE ȘTIINȚIFICĂ

FAZA DE EXECUȚIE NR. 1

CU TITLUL

STUDIU DE DESIGN PENTRU 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

Activitățile fazei de execuție:	2
1. Rezumatul Fazei de execuție numărul 1	3
2. Descrierea științifică și tehnică	4
2.1. Introducere	4
2.2. A1.1. Studiu preliminar de determinare a structurilor de metamateriale optime	5
2.3. A1.2. Proiectarea componentelor structurilor de metamateriale asamblabile	10
2.4. Concluzii	15
3. Bibliografie	16

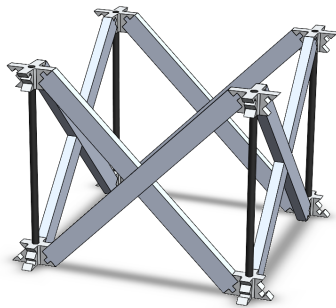
Activitățile fazei de execuție:

A1.1. Studiu preliminar de determinare a structurilor de metamateriale optime

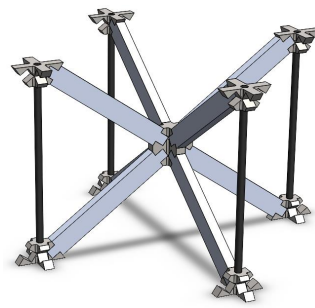
A1.2. Proiectarea componentelor ce vor alcătui structuri de metamateriale asamblabile

1. Rezumatul Fazei de execuție numărul 1

Faza de execuție numărul 1 intitulată *Studiu de design pentru structuri de metamateriale asamblabile* a avut ca scop determinarea unor tipuri de structuri de metamateriale care se pretează a fi folosite ca modele de bază în dezvoltarea unor structuri similare asamblabile, alcătuite din componente cu geometrii simple. În prima activitate a acestei faze de execuție au fost studiate șapte tipuri de structuri de metamateriale descrise în literatură: structura bazată pe modelul cristalin cubic cu fețe centrate, structura bazată pe modelul cristalin cubic cu volum centrat, structura bazată pe modelul cristalin cubic diamant, structura cubică de tip grinzi octet, structura de tip Kagome, structura de tip Kelvin respectiv un model de structură auxetică. În funcție de complexitatea structurilor investigate, au fost selectate patru tipuri de modele care să stea la baza structurilor ce vor fi dezvoltate în acest studiu: structura cubică cu fețe centrate, structura cubică cu volum centrat, structura Kagome respectiv structura auxetică. Elementele componente ale acestor structuri au fost proiectate în așa fel încât să prezinte o geometrie cât mai simplă, pretabilă fabricării prin metode convenționale (așchiere respectiv ștanțare).



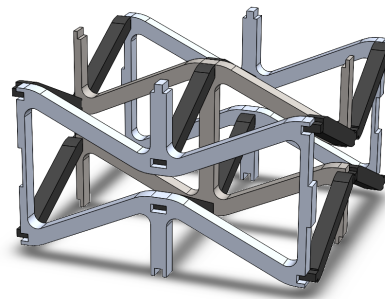
a)



b)



c)



d)

Celulele de bază ale structurilor asamblabile bazate pe modelul cubic cu fețe centrate (a), modelul cubic cu volum centrat (b), modelul Kagome (c) respectiv pe modelul auxetic (d)

2. Descrierea științifică și tehnică

2.1. Introducere

În cadrul primei activități au fost investigate o serie de structuri de metamateriale în scopul evaluării fezabilității transformării lor în structuri asamblabile. Ca și criteriu de selecție, s-a considerat în principal complexitatea structurii, în detrimentul proprietăților mecanice evaluate în studii precedente [1, 2, 3]. Astfel, s-a luat în calcul numărul de grinzi al fiecărui tip de structură, ordonarea spațială a lor (favorizându-se structurile care prezintă grinzi orientate după direcțiile sistemului cartezian, sau situate în planele definite de axele carteziene) și complexitatea nodurilor de intersecție.

Structurile luate în calcul se pot împărți în patru categorii: structuri bazate pe rețelele cristaline, structuri de tip Kagome, structuri de tip Kelvin și structuri auxetice [4]. Structurile bazate pe rețelele cristaline au fost concepute plecând de la aranjarea ordonată a atomilor observată în cazul diverselor materiale. Legăturile atomice au fost înlocuite de grinzi iar atomii au constituit nodurile rețelei (sau punctele de intersecție ale grinzilor). Din această categorie, au fost investigate patru tipuri de structuri: structura bazată pe rețeaua cubică cu fețe centrate, structura bazată pe rețeaua cubică cu volum centrat, structura bazată pe rețeaua cubică diamant și structura de tip grinzi octet.

În a doua parte a acestei faze de execuție, s-au investigat oportunitățile de generare de structuri asamblabile, plecând de la principiul de a dezvolta elemente cu geometrii cât mai simple, care să se preteze fabricării prin metode convenționale, în scopul determinării unei productivități cât mai ridicate. Pentru fiecare tip de structură au fost evaluate mai multe variante constructive, în acest raport prezentându-se variantele optime.

Toate structurile și elementele structurale prezentate în acest raport au fost dezvoltate în programul comercial *SolidWorks*TM.

2.2. A1.1. Studiu preliminar de determinare a structurilor de metamateriale optime

2.2.1. Structura cubică cu volum centrat

Celula de bază a structurii cubice cu volum centrat (CVC) are un număr de 16 grinzi, modelul geometric fiind prezentat în Fig. 1 a), iar un exemplu de structură teselată alcătuită din 8 celule este prezentată în Fig. 1 b).

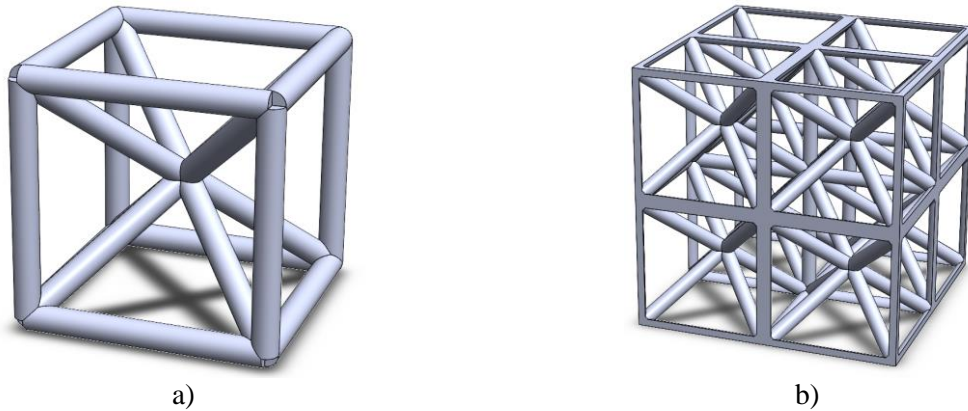


Fig. 1. Celula de bază a structurii CVC (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

Ca oportunitate de simplificare a acestei structuri, grinzile aflate în planuri orizontale ar putea fi înlocuite de elemente constructive plane, precum componente fabricate din tablă sau alt tip de plăci.

Elementul cu cel mai mare grad de complexitate al acestei structuri îl reprezintă intersecția celor patru grinzi, corespunzător atomului din centrul volumului. Datorită faptului că axele mediane ale celor patru grinzi se află în plane diferite, un element de conexiune între aceste elemente ar prezenta o geometrie complexă. Un alt factor influențat de situarea axelor grinzilor în plane diferite este dificultatea sporită de asamblare. Astfel, structura cubică cu volum centrat va fi catalogată drept o structură cu complexitate ridicată.

2.2.2. Structura cubică cu fețe centrate

Celula de bază a structurii cubice cu fețe centrate (CFC) are un număr de 24 grinzi, modelul geometric fiind prezentat în Fig. 2 a), iar un exemplu de structură teselată alcătuită din 8 celule este prezentată în Fig. 2 b).

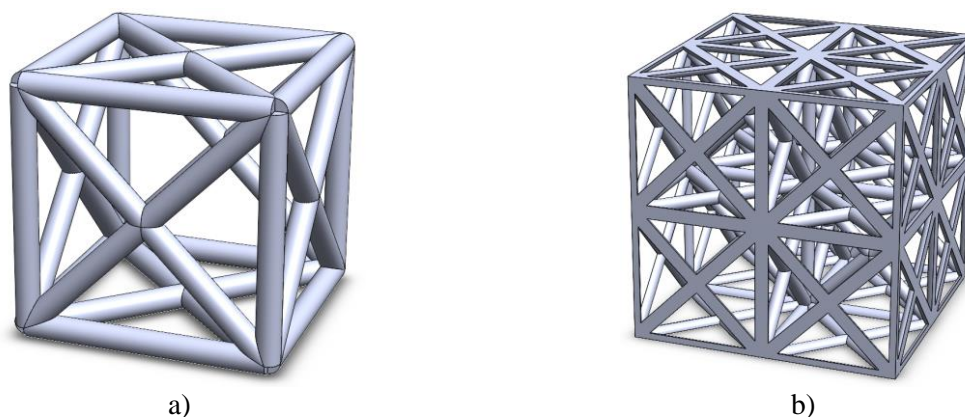


Fig. 2. Celula de bază a structurii CFC (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

În mod similar structurii cubice cu volum centrat, această structură se poate simplifica prin înlocuirea grinzilor aflate în plante orizontale cu elemente constructive plane.

În acest caz, elementul cu cel mai mare grad de complexitate îl reprezintă intersecțiile grinzilor din colțurile structurii cubice, fiind necesară definirea unui element specific sau a unor geometrii de grinzi care să permită intersecția a 5 elemente structurale. Datorită faptului că grinzile sunt dispuse în planele sistemului cartezian, asamblarea va fi mai facilă. Astfel, structura cubică cu fețe centrate primește un calificativ de complexitate medie.

2.2.3. Structura cubică diamant

Celula de bază a structurii cubice diamant are un număr de 32 grinzi, modelul geometric fiind prezentat în Fig. 3 a), iar un exemplu de structură teselată alcătuită din 8 celule este prezentată în Fig. 3 b).

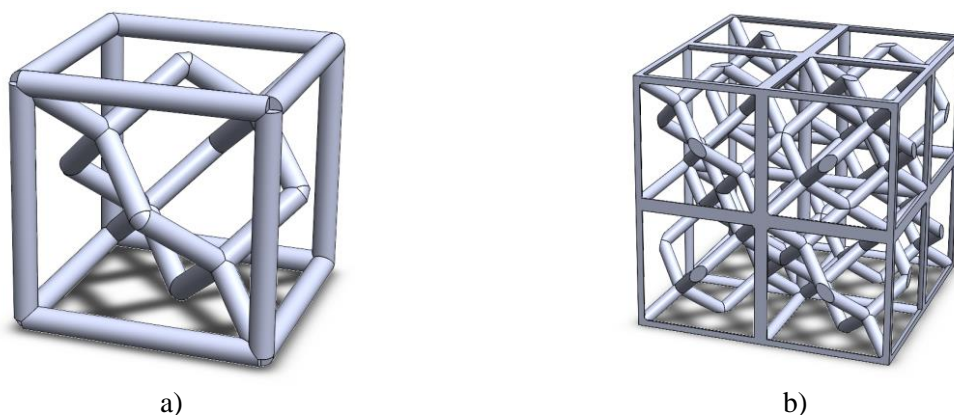


Fig. 3. Celula de bază a structurii cubice diamant (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

Datorită numărului mare de grinzi componente și dispunerea lor spațială, acest tip de structură nu se pretează a fi transformată în structură asamblabilă, primind un calificativ de structură foarte complexă.

2.2.4. Structura cubică de grinzi octet

Celula de bază a structurii de grinzi octet are la bază dispunerea atomică a structurii cubice cu fețe centrate, atomii situați în centrul fețelor cubului fiind conectați prin intermediul a 8 grinzi. Această structură are un număr de 20 grinzi, modelul geometric fiind prezentat în Fig. 4 a), iar un exemplu de structură teselată alcătuită din 8 celule este prezentată în Fig. 4 b).

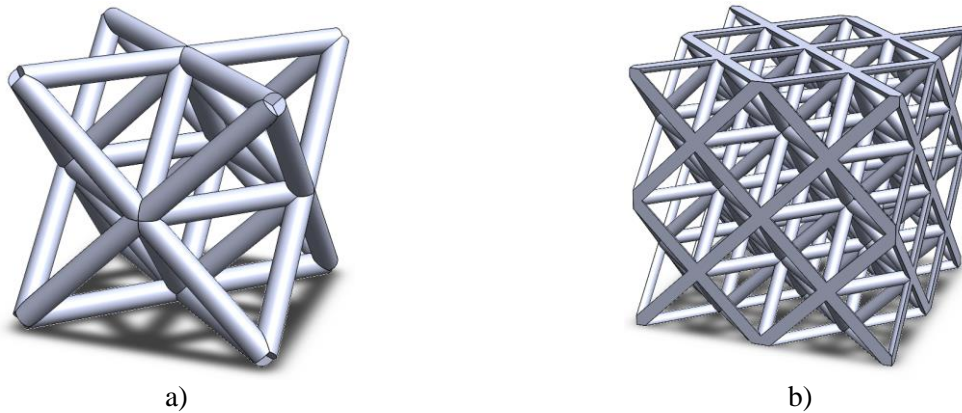


Fig. 4. Celula de bază a structurii cubice diamant (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

Deși prezintă un număr relativ redus de grinzi, această structură prezintă 6 conexiuni de câte 6 grinzi. Totodată, dispunerea spațială a celor 8 grinzi din interiorul cubului determină o dificultate mărită în asamblare. Astfel, și această structură primește un calificativ de complexitate foarte ridicată.

2.2.5. Structura de tip Kagome

Structura spațială de tip Kagome are la bază modele bidimensionale dezvoltate pe baza modelelor de împletituri japoneze ale coșurilor de bambus. Această structură are un număr de 9 grinzi, modelul geometric fiind prezentat în Fig. 5 a), iar un exemplu de structură teselată alcătuită din 8 celule este prezentată în Fig. 5 b).

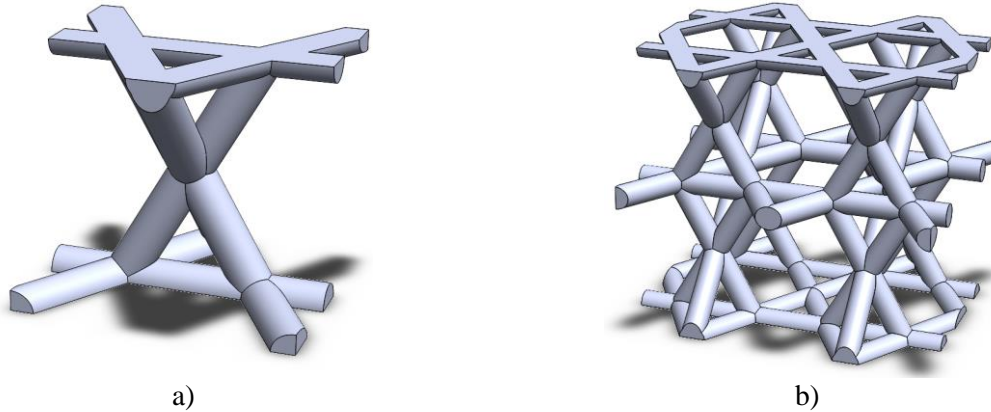


Fig. 5. Celula de bază a structurii Kagome (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

Din structurile analizate, modelul Kagome prezintă cel mai redus număr de grinzi. În cazul în care grinzile aflate în planele orizontale sunt înlocuite cu elemente structurale plane, va rezulta un număr de 3 grinzi conectate într-un nod. Astfel, structura de tip Kagome prezintă o complexitate scăzută.

2.2.6. Structura de tip Kelvin

Structura de tip Kelvin are la bază modelul geometric propus de fizicianul britanic, în încercarea de a descoperi ce structură prezintă volum minim raportat la suprafața exterioară, pentru corpuri de volum egal care să ocupe în întregime un volum. Această structură are un număr de 36 grinzi, modelul geometric fiind prezentat în Fig. 6 a), iar un exemplu de structură teselată alcătuită din 8 celule este prezentată în Fig. 6 b) [5, 6].

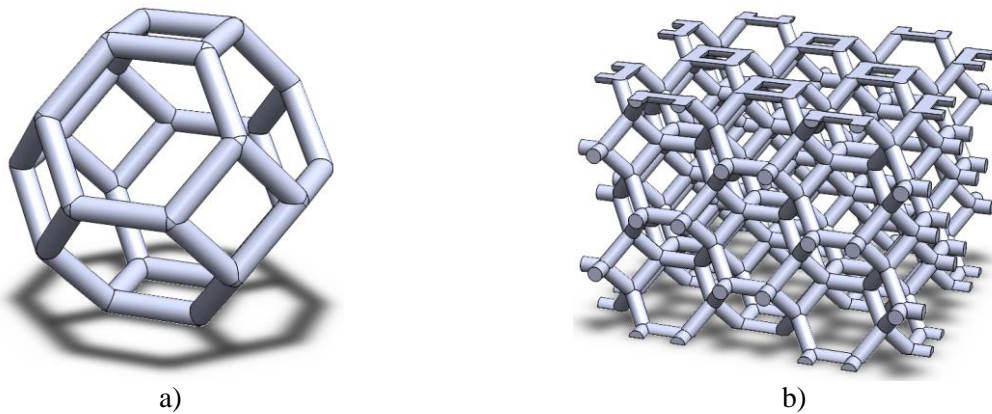


Fig. 6. Celula de bază a structurii Kelvin (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

În mod similar structurii cubice diamant, numărului mare de grinzi și dispunerea lor spațială, determină un calificativ de structură foarte complexă.

2.2.7. Structura auxetică

Structurile auxetice au ca principală caracteristică o valoare negativă a coeficientului lui Poisson. Acest lucru se realizează prin geometriile specifice ale celulelor de bază, care determină o contractare a celulei în timpul compresiunii respectiv o expansiune în timpul tracțiunii [7, 8, 9]. Structura investigată în acest studiu este prezentată în Fig. 7 a), diversele valori ale coeficientului lui Poisson putându-se obține prin modificarea unghiului dintre grinzile celulei [10]. În Fig. 7 b) este prezentată o structură alcătuită din 8 celule.

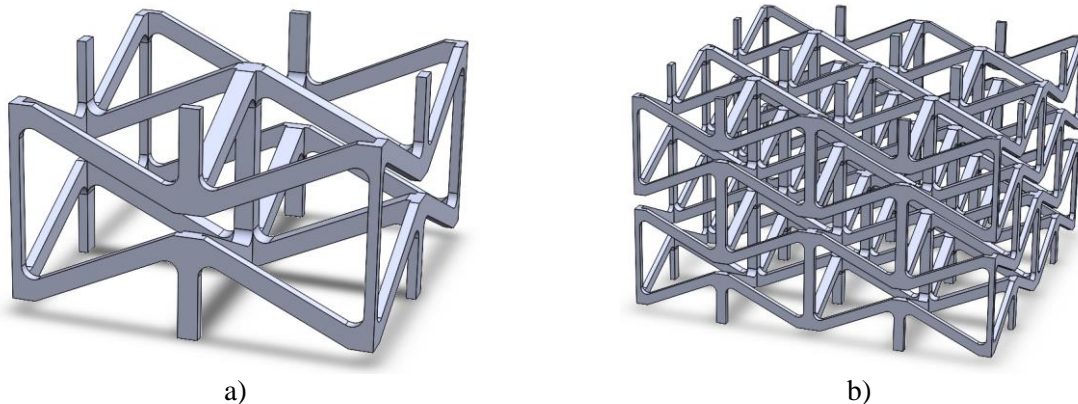


Fig. 7. Celula de bază a structurii auxetice (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

Această structură se poate diviza în componente plane cu geometrii specifice, respectiv un număr de grinzi identice utilizate în conectarea celor două tipuri de componente. În consecință, structura auxetică prezintă o complexitate scăzută.

În urma evaluării oportunităților generare a unor structuri asamblabile similare cu cele prezentate în acest capitol, în acest proiect se vor considera următoarele patru tipuri de structuri: structura bazată pe modelul cubic cu fețe centrate, structura bazată pe modelul cubic cu volum centrat, structura bazată pe modelul Kagome și structura bazată pe modelul auxetic.

2.3. A1.2. Proiectarea componentelor structurilor de metamateriale asamblabile

2.3.1. Structura bazată pe modelul cubic cu fețe centrate (CFC)

În urma analizelor mai multor variante constructive, s-a ales ca structura asamblabilă pe baza modelului CFC să aibă elemente diagonale fabricate din tablă metalică sau plăci metalice, în funcție de grosimea necesară. În cazul grosimilor reduse, componentele se pot fabrica prin ștanțare, determinând o productivitate foarte mare. Componentele verticale vor fi fabricate din bare cu secțiune circulară, fabricate prin tăierea unor semifabricate lungi. Componentele aflate în planul orizontal vor fi înlocuite din semifabricate plane, precum tabla metalică sau materiale compozite pe bază de polimeri ranforșați cu fibre. Conexiunea dintre aceste elemente se va realiza prin componente cu geometrii specifice, care vor putea fi fabricate doar prin frezare, componentă care ar determina cea mai mică productivitate, reprezentând un potențial de gâtuire în linia de producție.

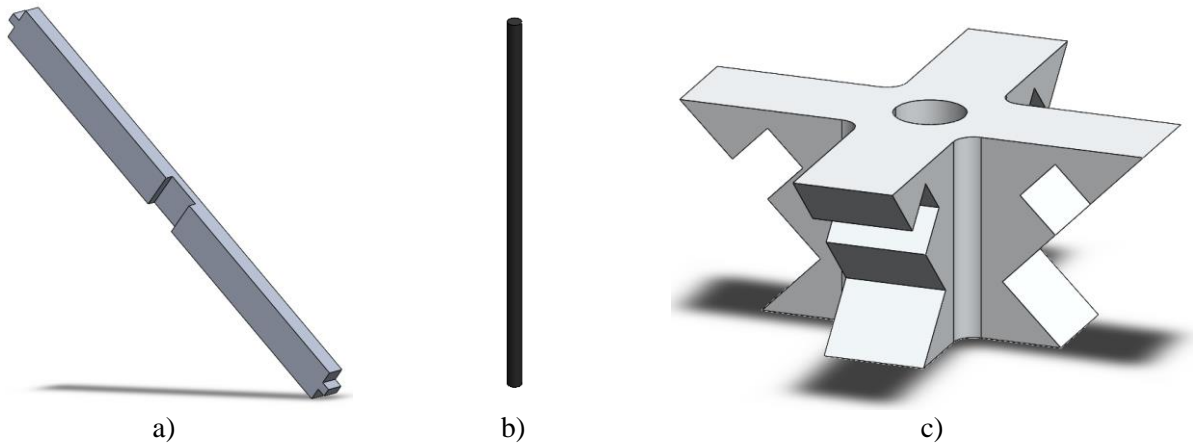


Fig. 8. Componentele structurii bazate pe modelul CFC

Astfel, această structură va avea patru tipuri de semifabricate: semifabricatele plane (exemplu prezentat în Fig. 8 a), semifabricate cilindrice (exemplu prezentat în Fig. 8 b) și elemente de conexiune între componente (exemplu prezentat în Fig. 8 c). Semifabricatele plane vor fi prevăzute cu flanșe la capete și o degajare în zona mediană, în scopul asamblării preliminare prin formă. Elementele de conexiune vor avea o secțiune în formă de cruce, brațele având profilul negativ al flanșelor elementelor plane diagonale. Totodată, aceste elemente vor fi prevăzute cu un orificiu în centrul profilului, pentru asamblarea semifabricatelor cilindrice.

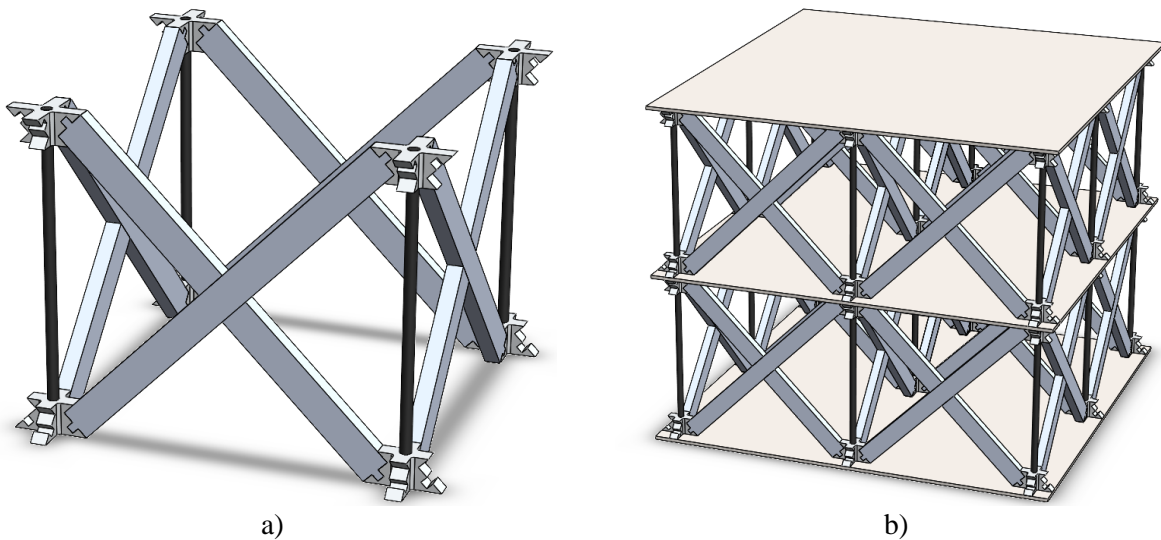


Fig. 9. Celula de bază a structurii asamblabile CFC (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

Asamblarea inițială se va realiza prin poziționarea reciprocă specifică a elementelor și montarea temporară prin formă. Ulterior, zonele de conexiune între elemente vor fi solidarizate prin procedee de sudare. Un exemplu de celulă de bază este prezentat în Fig. 9 a) (fără elementele plane horizontale), iar o structură alcătuită din 8 astfel de celule este prezentată în Fig. 9 b).

2.3.2. Structura bazată pe modelul cubic cu volum centrat (CVC)

Structura asamblabilă pe baza modelului CVC va avea o construcție asemănătoare cu cea bazată pe structura CFC. Astfel elementele diagonale vor fi fabricate din tablă metalică sau plăci metalice prevăzute cu flanșe pentru a facilita montajul (exemplu prezentat în Fig. 10 a), componentele verticale vor fi fabricate din bare (Fig. 10 b) iar componentele aflate în planul orizontal vor fi înlocuite din semifabricate plane. Datorită specificului constructiv, această structură va avea două tipuri de elemente de conexiune cu secțiune în formă de cruce, un tip fiind destinat conectării componentelor din colțurile cubului (exemplu prezentat în Fig. 10 c) iar celălalt destinat conectării elementelor din centrul volumului. (exemplu prezentat în Fig. 10 d).

În mod similar structurii asamblabile de tip CFC, structura pe baza modelului CVC se va asambla prin poziționarea reciprocă specifică a elementelor și montarea temporară prin formă, zonele de conexiune între elemente vor fi solidarizate prin suduri. Un exemplu de celulă de bază este prezentat în Fig. 11 a) (fără elementele plane horizontale), iar o structură alcătuită din 8 astfel de celule este prezentată în Fig. 11 b).

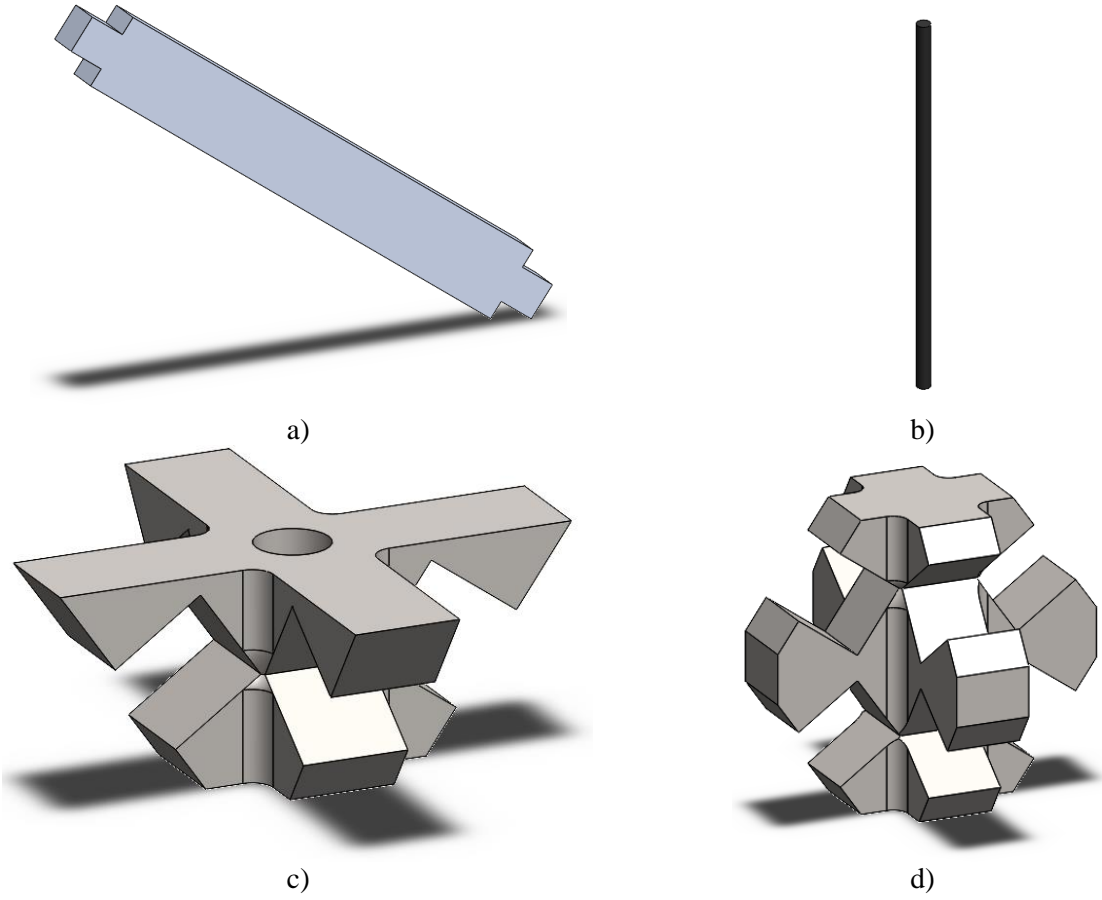


Fig. 10. Componentele structurii bazate pe modelul CFC

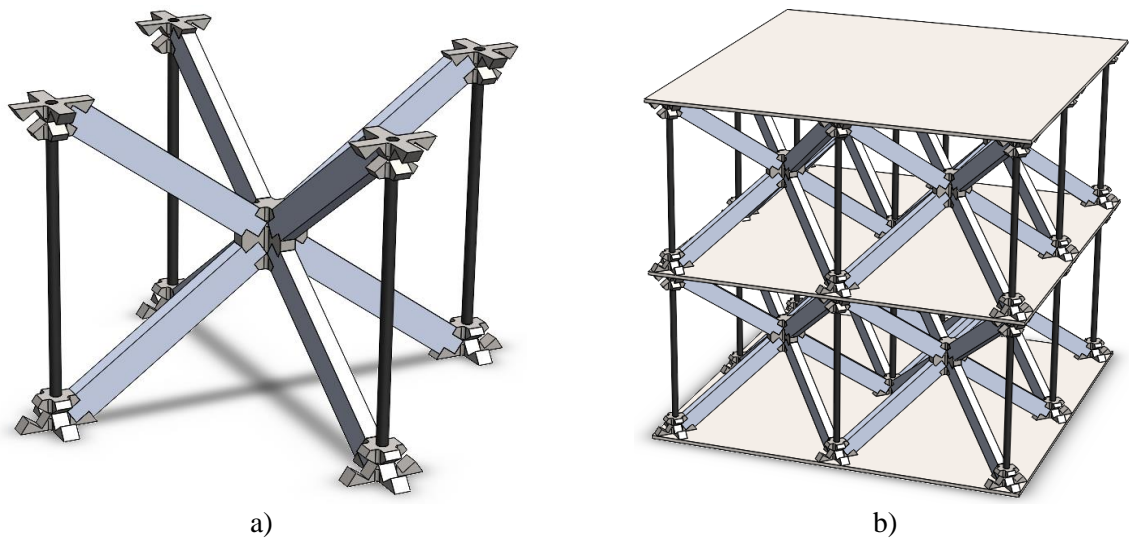


Fig. 11. Celula de bază a structurii asamblabile CVC (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

2.3.3. Structura bazată pe modelul Kagome

Structura asamblabilă Kagome va fi constituită din două elemente plane și un element de secțiune circulară, elementele din planele orizontale fiind înlocuite și în acest caz de către plăci sau table metalice. În acest caz, este posibilă asamblarea elementelor fără utilizarea unor elemente de conexiune. Datorită conexiunii celor trei grinzi într-un singur punct, geometria elementelor plane trebuie să aibă o complexitate relativ ridicată, astfel că fabricarea acestor elemente se poate realiza doar prin procese de așchiere. Elementele plane (Fig. 12 a) vor fi prevăzute o flanșă la un capăt respectiv un orificiu, reprezentând negativul flanșei la celălalt capăt. În zona mediană, aceste elemente vor fi prevăzute cu o degajare (pentru asamblarea elementelor plane pereche) și cu un orificiu executat la un unghi (pentru asamblarea elementelor cilindrice, prezentate în Fig. 12 b).



Fig. 12. Componentele structurii bazate pe modelul Kagome

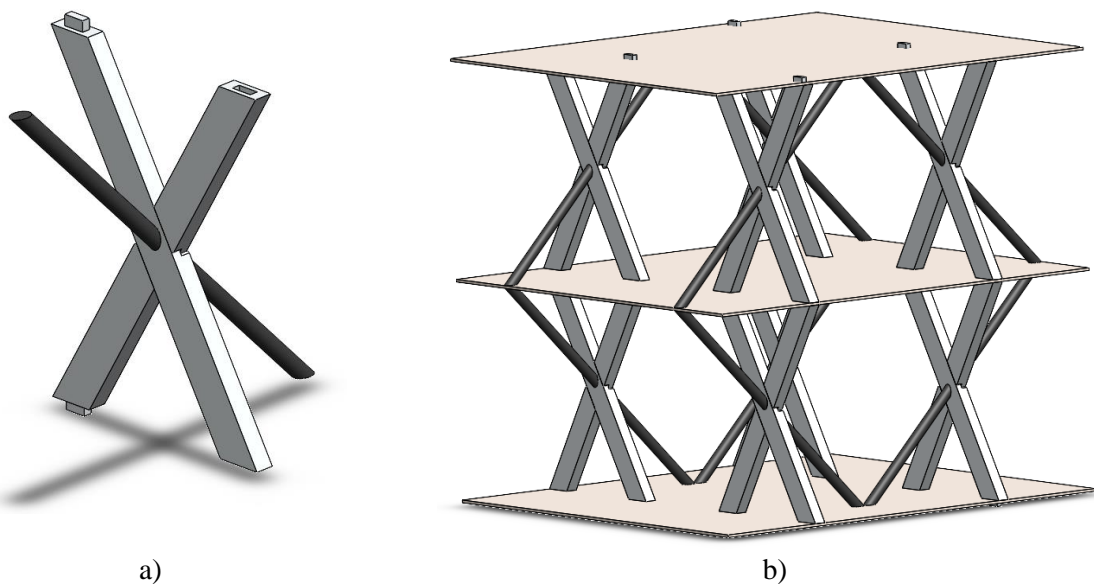


Fig. 13. Celula de bază a structurii asamblabile de tip Kagome (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

În mod similar, această structură va fi asamblată prin poziționarea reciprocă a elementelor, zonele de conexiune fiind solidarizate prin suduri. Un exemplu de celulă asamblată este prezentat în Fig. 13 a), iar un ansamblu format din 8 celule este prezentat în Fig. 13 b).

2.3.4. Structura bazată pe modelul auxetic

Structura asamblabilă bazată pe modelul auxetic va avea în componență doar elemente plane. Depinzând de grosimea acestora, elementele se pot fabrica prin ștanțare sau prin frezare. Acest tip de structură va avea în componență trei tipuri de elemente, prezentate în Fig. 14. Elementele vor fi prevăzute cu flanșe, degajări sau orificii care să faciliteze asamblarea lor prin formă.

La fel ca în exemplele precedente, asamblarea se va realiza prin poziționarea corespunzătoare a elementelor urmată de o solidarizare a conexiunilor prin suduri. Un exemplu de celulă de bază este prezentată în Fig. 14 a), iar un exemplu de structură formată din 8 celule este prezentată în Fig. 14 b).

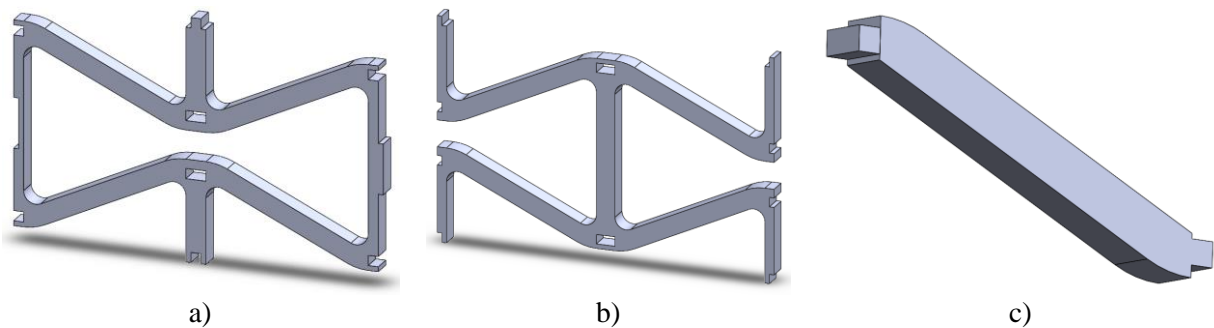


Fig. 14. Componentele structurii bazate pe modelul auxetic

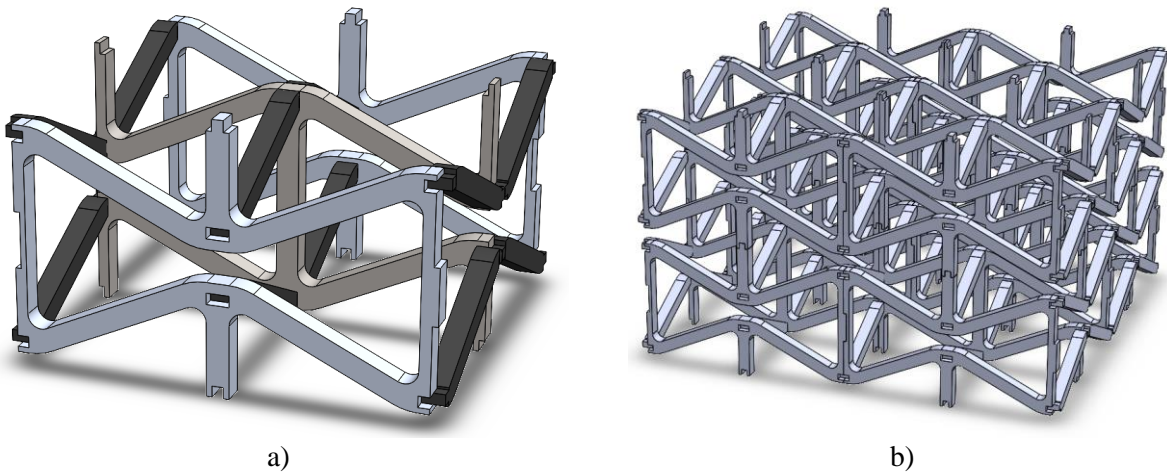


Fig. 15. Celula de bază a structurii auxetice asamblabile (a) și un exemplu de structură alcătuită din 8 celule (b)

2.4. Concluzii

În faza de execuție numărul 1 intitulată *Studiu de design pentru structuri de metamateriale asamblabile* s-au realizat activități corespunzătoare obiectivului O1 prezentat în propunerea de proiect. Această fază de execuție a cuprins două activități, în speță *Studiu preliminar de determinare a structurilor de metamateriale optime* respectiv *Proiectarea componentelor ce vor alcătui structuri de metamateriale asamblabile*.

În prima activitate au fost investigate șapte tipuri de structuri de metamateriale și a fost evaluată oportunitatea realizării de structuri similare asamblabile. Ca și criteriu de selecție, a fost considerată complexitatea fiecărei structuri, caracterizată de doi parametri: numărul de elemente conectate într-un singur nod respectiv orientarea spațială a componentelor. În urma acestei analize, au fost selectate patru tipuri de structuri 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 a doua activitate au fost proiectate componentele structurilor selectate, având ca și criteriu determinarea unor geometrii cât mai simple care să permită o asamblare preliminară prin geometrie și care să poată fi fabricate prin procedee convenționale. Astfel, au fost prezentate geometriile preliminare ale componentelor, precum și asamblarea lor în celule de bază respectiv în structuri alcătuite din opt astfel de celule.

În următoarea etapă a proiectului, structurile asamblabile prezentate în acest raport vor fi supuse unor analize numerice prin metoda elementului finit, pentru solicitări de compresiune respectiv încovoiere. Pe baza rezultatelor, se vor identifica zonele caracterizate de stări de tensiune cu valori ridicate, iar componentele vulnerabile vor fi optimizate în scopul reducerii fenomenului de concentrare a tensiunii.

3. Bibliografie

- [1] X. Zheng, H. Lee, T. Weisgraber, M. Shusteff, J. DeOtte, E. Duoss, J. Kuntz, M. Biener, Q. Ge, J. Jackson, S. Kucheyev și N. Fang, „Ultralight, Ultrastiff Mechanical Metamaterials,” *Science*, vol. 344, nr. 6190, pp. 1373-1377, 2014.
- [2] R. S. Kshetrimayum, „A brief intro to metamaterials,” *IEEE Potentials*, vol. 23, nr. 5, pp. 44 - 46, 2004.
- [3] X. Yu, J. Zhou, H. Liang, Z. Jiang și L. Wu, „Mechanical metamaterials associated with stiffness, rigidity and compressibility: A brief review,” *Progress in Materials Science*, vol. 94, p. 114–173, 2018.
- [4] C. M. Spadaccini, „Mechanical Metamaterials: Design, Fabrication, and Performance,” Lawrence Livermore National Laboratory, 2016.
- [5] D. Șerban, S. Sărăndan, R. Negru, G. Belgiu și L. Marșavina, „A Parametric Study of the Mechanical Properties of Open-Cell Kelvin Structures,” *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 416, 2018.
- [6] D. Șerban, R. Negru, S. Sărăndan, G. Belgiu și L. Marșavina, „Numerical and experimental investigations on the mechanical properties of cellular structures with open Kelvin cells,” *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, vol. 28, nr. 13, p. 1367–1376, 2021.
- [7] A. Spagnoli, R. Brighenti, M. Lanfranchi și F. Soncini, „On the auxetic behaviour of metamaterials with re-entrant cell structures,” *Procedia Engineering*, vol. 109, pp. 410-417, 2015.
- [8] T. Allen, N. Martinello, D. Zampieri, T. Hewage, T. Senior, L. Foster și A. Aldersona, „Auxetic Foams for Sport Safety Applications,” *Procedia Engineering*, vol. 112, pp. 104-109, 2005.
- [9] M. Eidini, „Zigzag-base folded sheet cellular mechanical metamaterials,” *Extreme Mechanics Letters*, vol. 6, p. 96–102, 2016.
- [10] D. Șerban, „Variation of Poisson’s Ratio with Axial Strain for Three-Dimensional Reentrant Auxetic Structures,” *Material Design & Processing Communications*, vol. 2022, p. 2623601, 2022.