STAREA DE EFORTURI ȘI DEFORMAȚII ÎN STRUCTURA RUTIERĂ FLEXIBILĂ, SEMIRIGIDĂ ȘI RIGIDĂ STUDII DE CAZ ÎNCĂRCAREA CU OSIA STANDARD DE 11.5 T, OSIA TANDEM DE 20 T, OSIA TRIDEM DE 24T ȘI CAZUL PARTICULAR – ÎNCĂRCAREA CU UN AUTOVEHICUL CU SEMIREMORCĂ – STRUCTURA RUTIERĂ FLEXIBILĂ ȘI STRUCTURA RUTIERĂ SEMIRIGIDĂ

Ing. Liviu – Doru Rey [1]
Dr. ing. Ștefan Ioniță[1]
Drd. ing. Sorin Pâtiu[1]

Progresul sistemelor de calcul și dezvoltarea capabilităților software moderne permit o analiză mult mai detaliată a problematicii aferente dimensionării structurilor rutiere. Prezenta lucrare își propune să investigheze durabilitatea structurilor rutiere prin efectuarea unei analize comparative asupra stării de eforturi în structurile rutiere flexibile, semirigide și rigide, supuse încărcărilor generate de osia standard de 11,5 t, osia tandem de 20 t și osia tridem de 24 t. Pentru realizarea calculelor a fost utilizat software-ul CESAR–LCPC (3D), un instrument de modelare numerică bazat pe Metoda Elementelor Finite (MEF), care permite reprezentarea interacțiunii dintre straturile structurii rutiere și determinarea câmpurilor de eforturi și deplasări corespunzătoare.

Advances in computational systems and modern software capabilities enable a considerably more detailed analysis of issues related to pavement structural design. The present study investigates the durability of pavement structures by performing a comparative assessment of stress states within flexible, semi-rigid, and rigid pavement systems subjected to loading from the standard 11.5 t axle, the 20 t tandem axle, and the 24 t tridem axle. Numerical analyses were conducted using the CESAR–LCPC (3D) software, a finite element–based modeling tool that facilitates the simulation of layer interaction and the evaluation of stress and displacement fields throughout the pavement structure.

Cuvinte cheie: METODA ELEMENTELOR FINITE (MEF), STRUCTURĂ RUTIERĂ FLEXIBILĂ, STRUCTURĂ RUTIERĂ SEMIRIGIDĂ, OSIA STANDARD 11.5 T, OSIA TANDEM 20 T, OSIA TRIDEM 24 T.

1. INTRODUCERE

Obiectivul dimensionării structurii rutiere este alegerea materialelor adecvate, împreună cu grosimile corespunzătoare, pentru stabilirea unei structuri rutiere optime. Aceasta trebuie să asigure preluarea încărcărilor din trafic pe perioada de perspectivă stabilită, la un cost de execuție și întreținere minim. Structurile rutiere uzuale pot fi flexibile, semirigide sau rigide. Alegerea structurii rutiere optime se realizează printr-o analiză economică, care ia în considerare costurile de execuție, avantajele din perioada de exploatare, costurile de întreținere și frecvența lucrărilor de intervenție.

1) Centrul de Studii Tehnice Rutiere și Informatică (tel. 021.317.11.20, e-mail. office@cestrin.ro)

2. STRUCTURI RUTIERE ANALIZATE

În conformitate cu structurile rutiere uzuale, au fost analizate trei structuri rutiere pentru care s-a urmărit obținerea unei capacități portante similare, caracterizate prin deflexiunea calculată cu ajutorul software-ului ALIZE-LCPC, având următoarele alcătuiri:

Tabelul 1 – Structura rutieră flexibilă

Nr. Crt.	Denumire strat	Grosime [cm]	Modul de elasticitate dinamic [MPa]	Coeficientul lui Poisson
1	strat de uzură	4	3300	0.35
2	binder	6	3000	0.35
3	strat de bază	15	5000	0.35
4	strat superior de fundație din piartă spartă	35	500	0.27
5	strat inferior de fundație din balast	30	182*	0.27
6	teren de fundare P5	semifinit	70	0.42

* – modulul de elasticitate dinamic a fost calculat conform punctului 6.3. din normativul PD177-2001. $E_{bal}=0.20 \times h_{bal}^{0,45} \times E_p = 0.20 \times 300^{0.45} \times 70 = 182$ MPa [1]

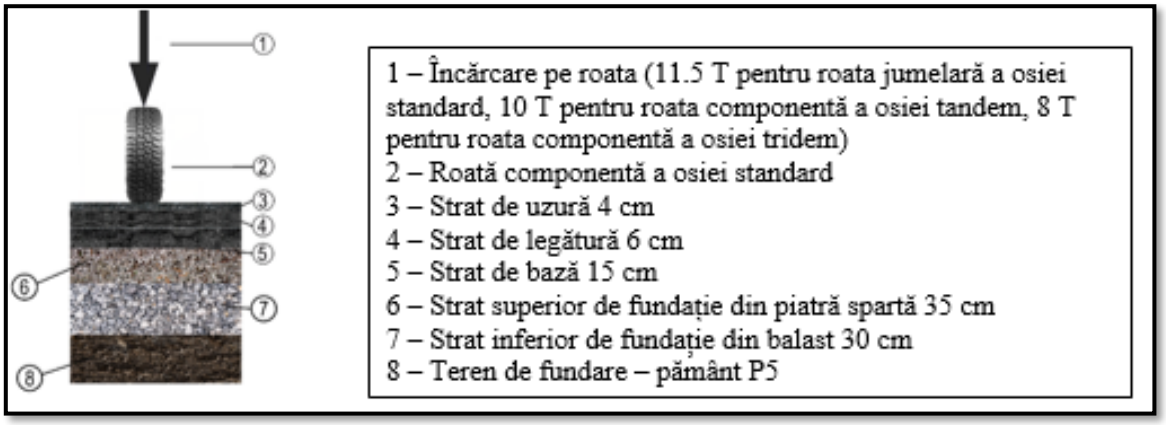


Figura 1 – Structura rutieră flexibilă analizată

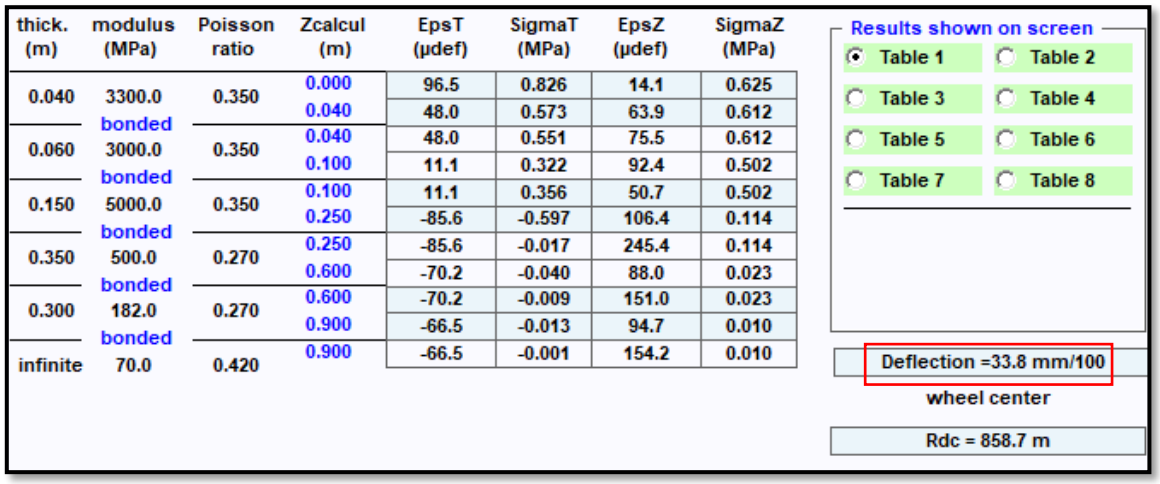


Figura 2 – Rezultatul deflexiunii pentru structura rutieră flexibilă analizată [2]

Tabelul 2 – Structura rutieră semirigidă

Nr. Crt.	Denumire strat	Grosime [cm]	Modul de elasticitate dinamic [MPa]	Coeficientul lui Poisson
1	strat de uzură	4	3300	0.35
2	binder	6	3000	0.35
3	strat de bază	9	5000	0.35
4	strat superior de fundație din balast stabilizat cu lianți hidraulici	34	1000	0.25
5	strat inferior de fundație din balast	30	182*	0.27
6	teren de fundare P5	semifinit	70	0.42

* – modulul de elasticitate dinamic a fost calculat conform punctului 6.3. din normativul PD177-2001. $E_{bal}=0.20 \times h_{bal}^{0,45} \times E_p = 0.20 \times 300^{0.45} \times 70 = 182$ MPa [1]

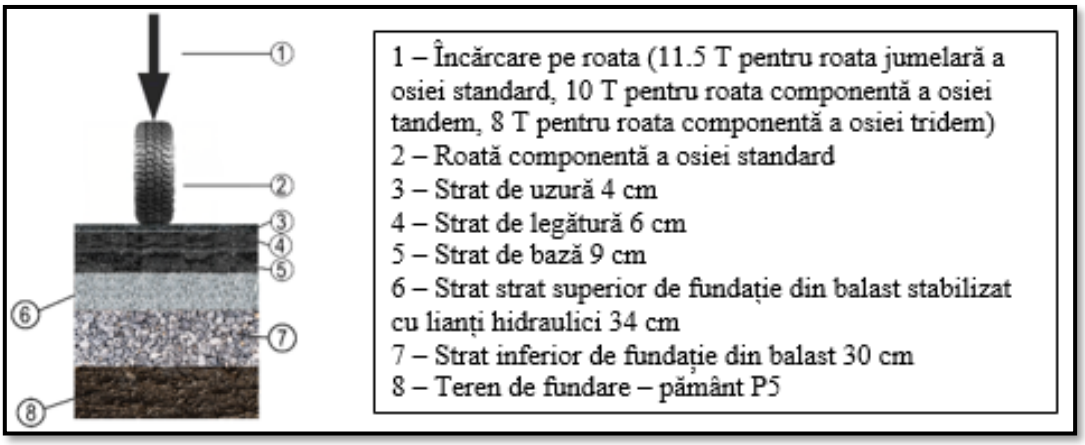


Figura 3 – Structura rutieră semirigidă analizată

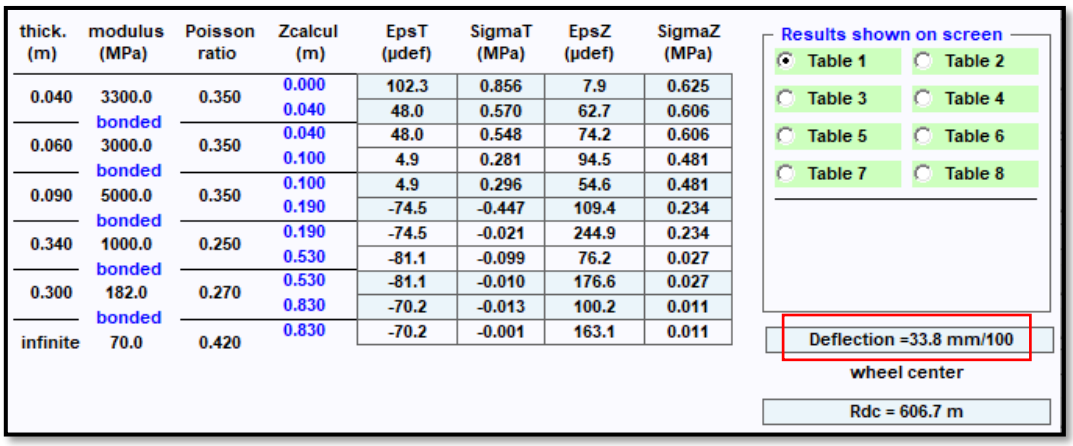


Figura 4 – Rezultatul deflexiunii pentru structura rutieră semirigidă analizată [2]

Tabelul 3 – Structura rutieră rigidă

Nr. Crt.	Denumire strat	Grosime [cm]	Modul de elasticitate dinamic [MPa]	Coeficientul lui Poisson
1	dala din beton de ciment	18	30000	0.15
2	strat de fundație din balast	30	182	0.27
3	teren de fundare P5	semifinit	70	0.42

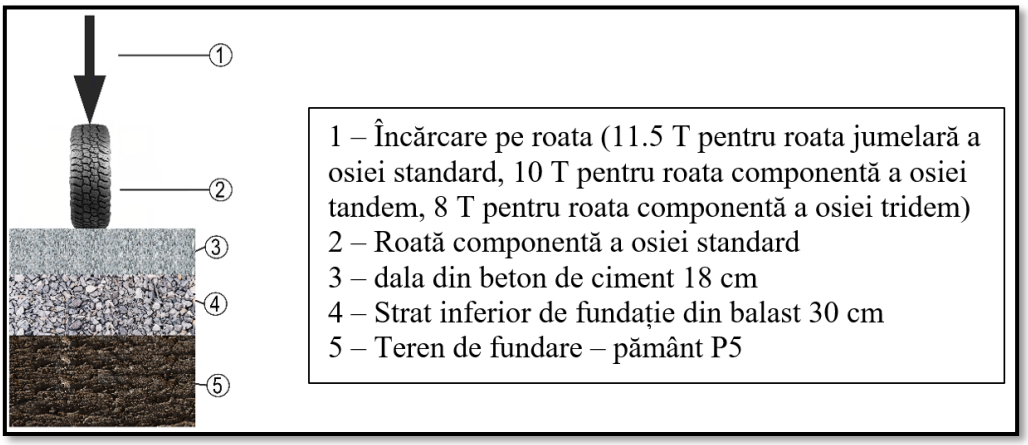


Figura 5 – Structura rutieră rigidă analizată

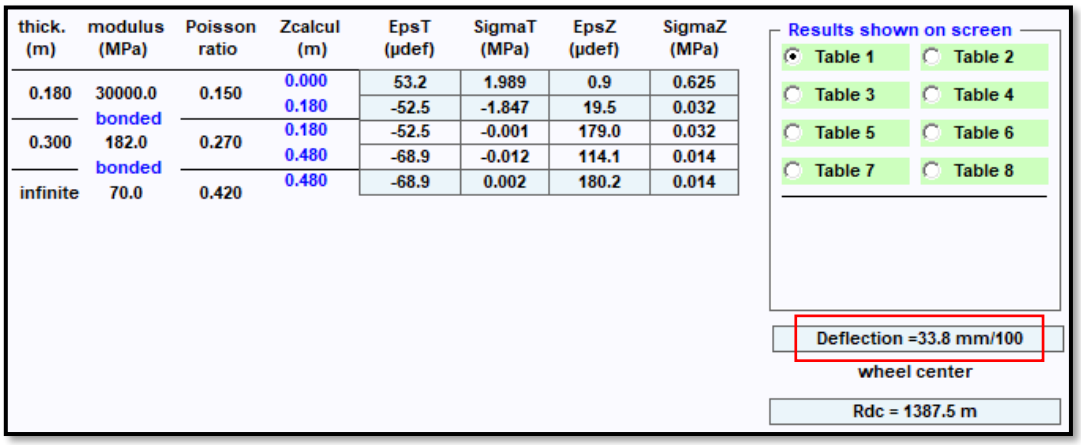


Figura 6 – Rezultatul deflexiunii pentru structura rutieră rigidă analizată [2]

Software utilizat:
Au fost realizate calcule utilizând software-ul CESAR – LCPC (3D), care este bazat pe Metoda Elementelor Finite (MEF). Acest software permite modelarea interacțiunii dintre straturile structurii rutiere, inclusiv în zona de contact dintre acestea, prin considerarea aderenței interstrat.

3. ELEMENTE PRIVIND GRADUL DE DETALIERE AL ANALIZEI

Pentru structura rutieră flexibilă și cea semirigidă a fost utilizat următorul model:
Dimensiunile modelului în plan sunt de 10,6 m lungime și 4,0 m lățime (o bandă carosabilă marginală). A fost considerată o lățime de 4,0 m, deoarece peste 90% din rețeaua de

drumuri din România este reprezentată de drumuri cu o bandă de circulație pe sens. Pentru discretizarea cu elemente finite au fost utilizate elemente finite de volum tetraedrice, cu interpolare cuadratică între noduri.

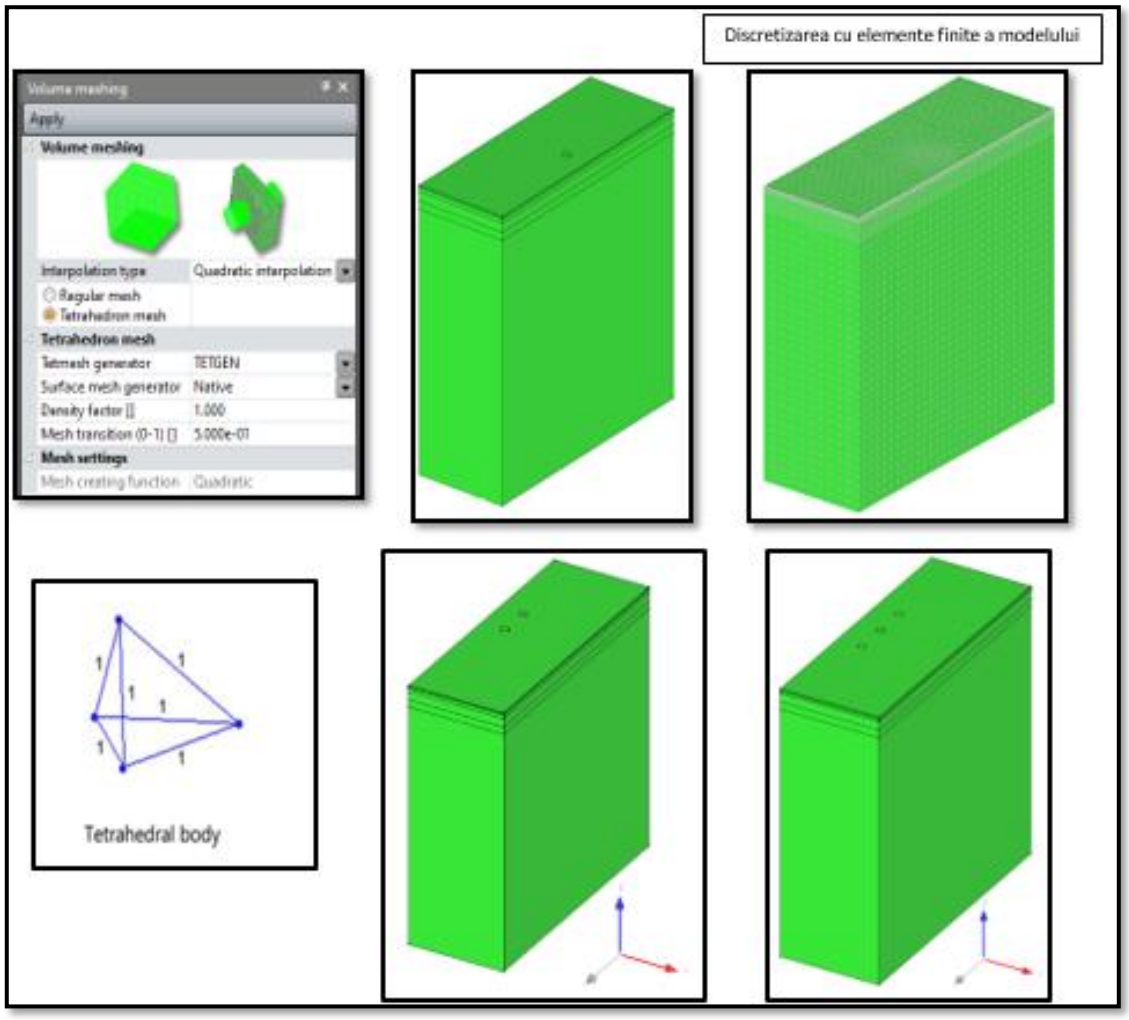


Figura 7 – Model utilizat pentru discretizarea structurilor rutiere flexibile și semirigide

Încărcări considerate la nivelul structurii rutiere:

- sarcina pe osie: 115 kN (osia standard), 200 kN (osia tandem), repectiv 240 kN (osia tridem). Se aplică la 1m distanță de margine;
- presiunea de contact: 0.625 MPa pentru toate tipurile de osii;
- raza suprafeței de contact: 17,1 cm (osia standard), 15,96 cm (osia tandem), 14,27 cm (osia tridem).

Condițiile de rezemare

- ✓ Stratul din pământ - are blocat la bază/la partea inferioară deplasările pe axa z.
- ✓ Stratul de pământ are blocate prin condițiile de rezemare pe contur deplasările după x și y.

Pentru structura rutieră rigidă a fost utilizat următorul model:
Dimensiunile modelului în plan, pentru dala de beton și fundația din balast, sunt de 6,0 m lungime și 3,6 m lățime (o bandă carosabilă marginală).

Pentru terenul de fundare, modelul a fost extins cu 5,0 m în toate direcțiile față de conturul dalei, fiind considerată o grosime de 10,0 m. Acest model are la bază o serie de calcule proprii, inclusiv calcule privind determinarea zonei de influență a încărcărilor.
Pentru discretizarea cu elemente finite au fost utilizate elemente finite de volum tetraedrice, cu interpolare cuadratică între noduri. [3]

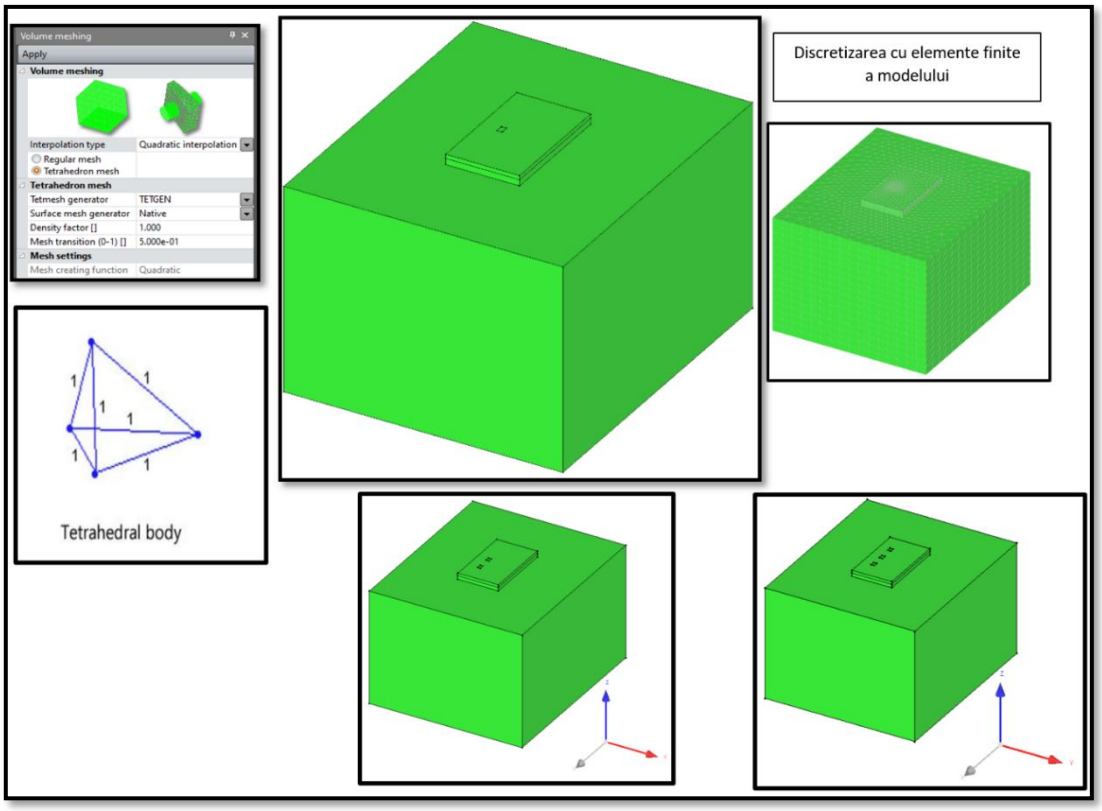


Figura 8 – Model utilizat pentru discretizarea structurii rutiere rigide

Încărcări considerate la nivelul structurii rutiere:

- sarcina pe osie: 115 kN (osia standard), 200 kN (osia tandem), respectiv 240 kN (osia tridem). Încărcările sunt aplicate la o distanță de 1 m față de marginea structurii;
- presiunea aplicată pe amprentă: 0,746 MPa (osia standard), 0,649 MPa (osia tandem), respectiv 0,519 MPa (osia tridem);
- suprafața de contact: un dreptunghi de 37 cm × 25 cm (osia standard), două dreptunghiuri de 37 cm × 25 cm (osia tandem), trei dreptunghiuri de 37 cm × 25 cm (osia tridem).

Condiții de rezemare

✓ Stratul din pământ are blocate la bază (partea inferioară) deplasările pe direcția axei z.

✓ Stratul de pământ are blocate, prin condițiile de rezemare impuse pe contur, deplasările pe direcțiile x și y.

4. REZULTATE OBȚINUTE

Urmare a realizării calculelor cu software-ul CESAR LCPC au fost obținute următoarele rezultate:
Structura rutieră flexibilă încărcată cu osia standard 11.5T:

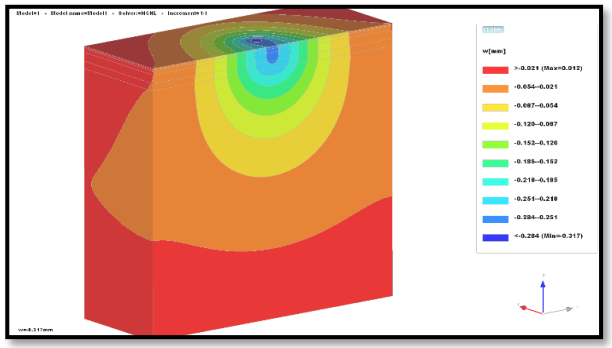


Figura 9 – deplasare verticală

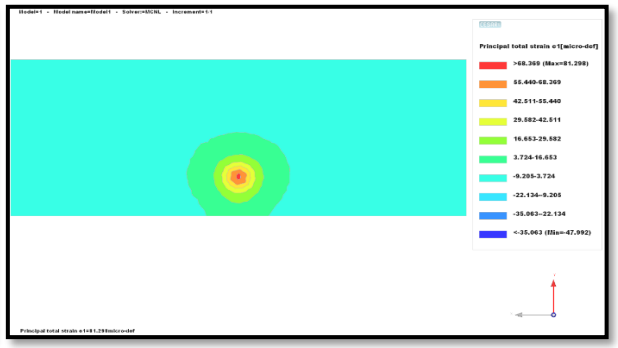


Figura 10 – deformația specifică orizontală de întindere ε_r, la partea inferioară a stratului de bază

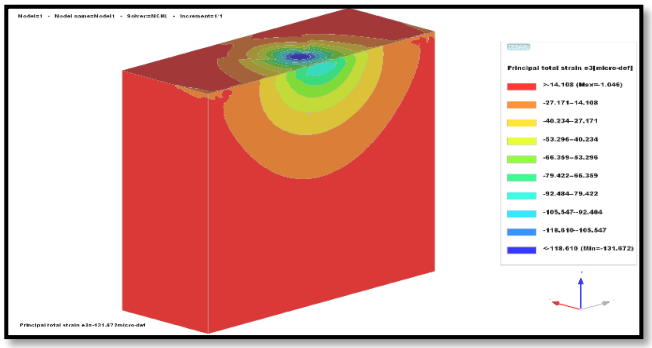


Figura 11 – deformația specifică verticală ε_z, la nivelul terenului de fundare

Structura rutieră flexibilă încărcată cu osia tandem 20T (distanța între axe 1.30 m):

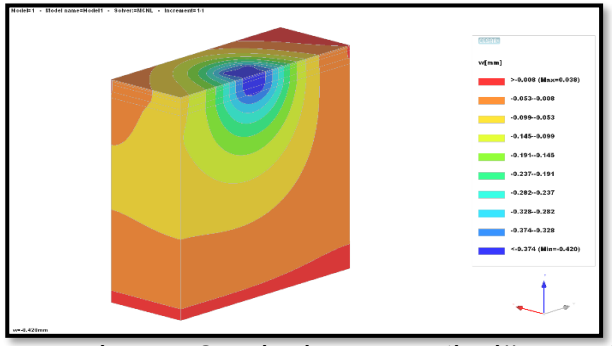


Figura 12 – deplasare verticală

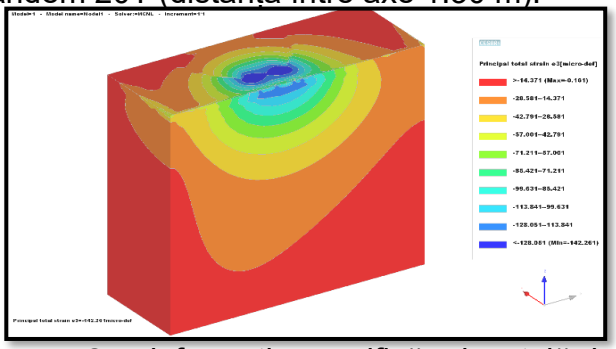


Figura 13 – deformația specifică orizontală de întindere ε_r, la partea inferioară a stratului de bază

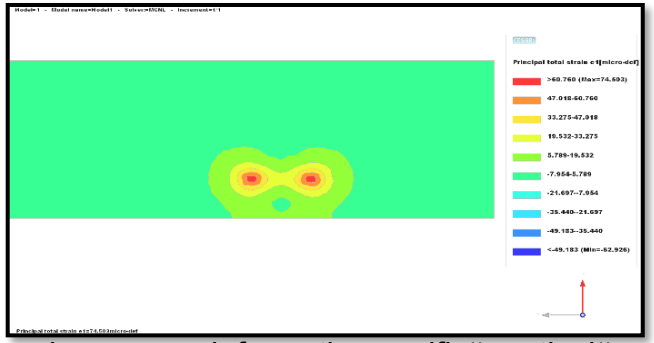


Figura 14 – deformația specifică verticală ε_z, la nivelul terenului de fundare

Structura rutieră flexibilă încărcată cu osia tridem 24T (distanța între axe 1.30 m):

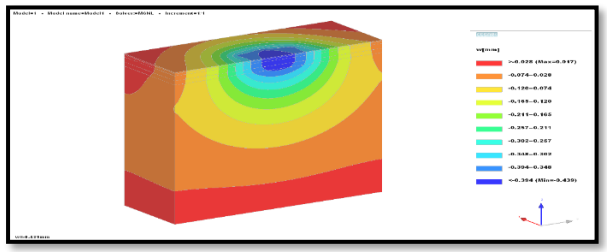


Figura 15 – deplasare verticală

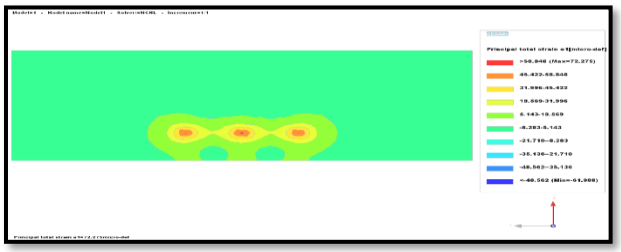


Figura 16 – deformația specifică orizontală de întindere ε_r, la partea inferioară a stratului de bază

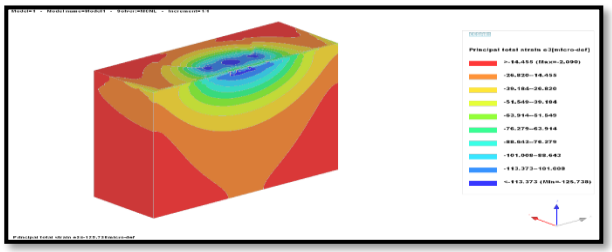


Figura 17 – deformația specifică verticală ε_z, la nivelul terenului de fundare

Structura rutieră semirigidă încărcată cu osia standard 11.5T:

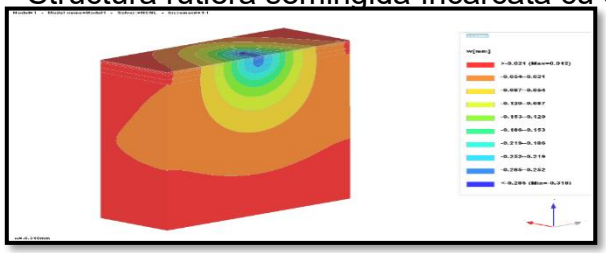


Figura 18 – deplasare verticală

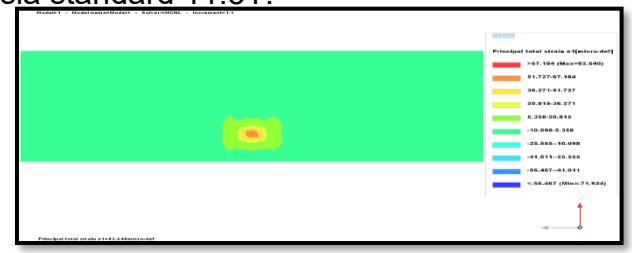


Figura 19 – deformația specifică orizontală de întindere ε_r, la partea inferioară a stratului de bază

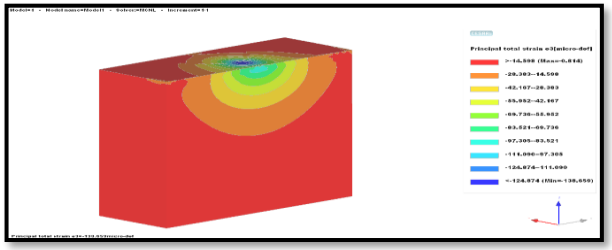


Figura 20 – deformația specifică verticală ε_z, la nivelul terenului de fundare

Structura rutieră semirigidă încărcată cu osia tandem 20T (distanța între axe 1.30m):

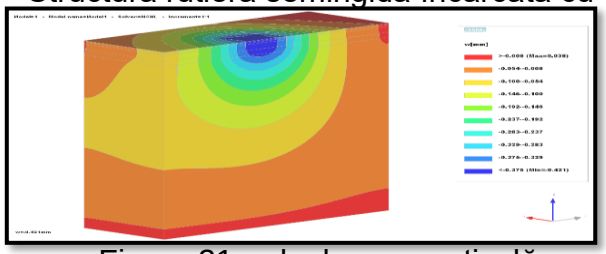


Figura 21 – deplasare verticală

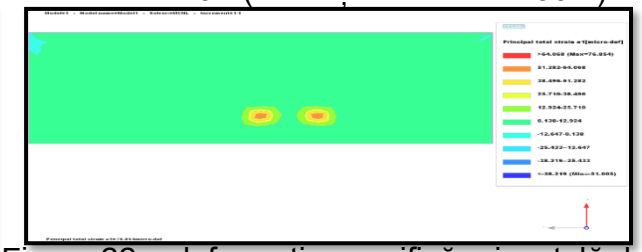


Figura 22 – deformația specifică orizontală de întindere ε_r, la partea inferioară a stratului de bază

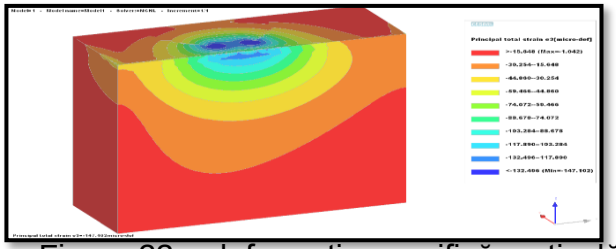


Figura 23 – deformația specifică verticală ε_z, la nivelul terenului de fundare

Structura rutieră semirigidă încărcată cu osia tandem 24T (distanța între axe 1.30m):

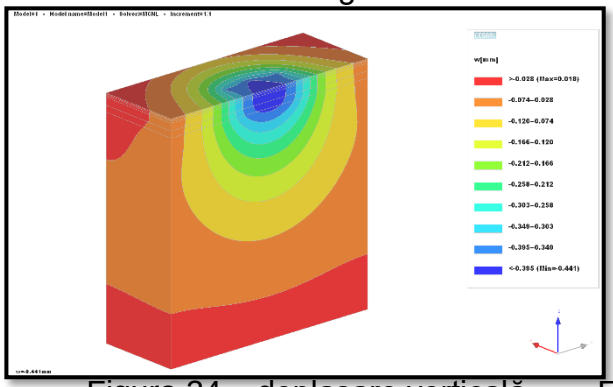


Figura 24 – deplasare verticală

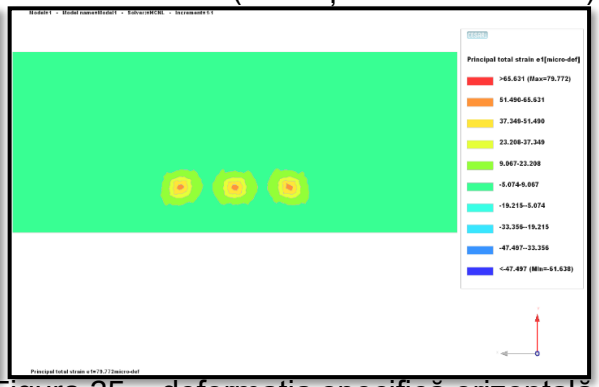


Figura 25 – deformația specifică orizontală de întindere ε_r, la partea inferioară a stratului de bază

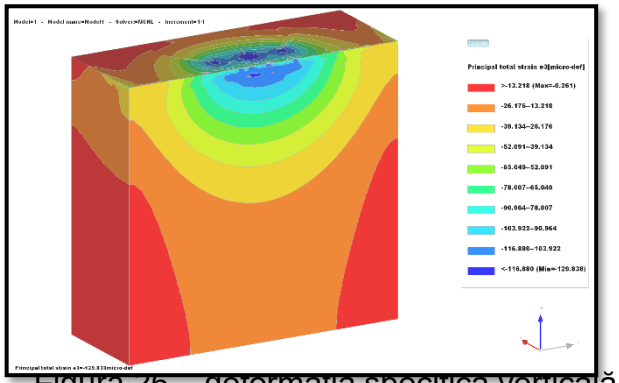


Figura 26 – deformația specifică verticală ε_z, la nivelul terenului de fundare

Structura rutieră rigidă încărcată cu osia standard 11.5T:

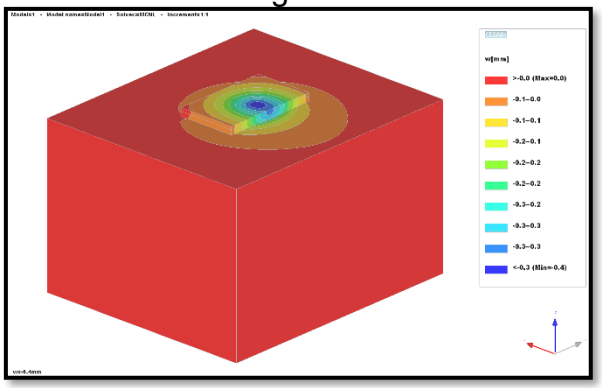


Figura 27 – deplasare verticală

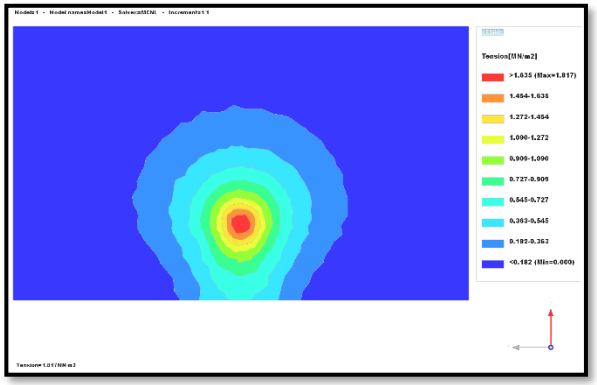


Figura 28 – Efort de întindere la partea inferioară în dala de beton

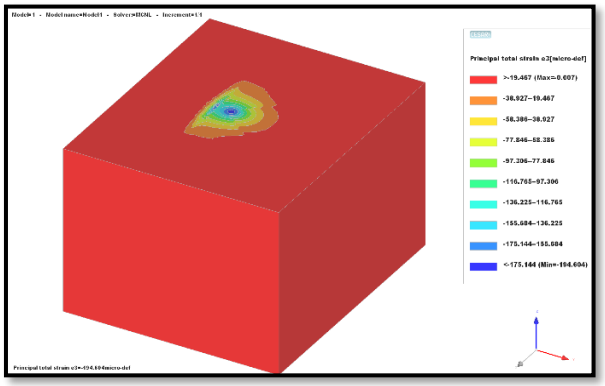


Figura 29 – deformația specifică verticală ε_z, la nivelul terenului de fundare

Structura rutieră rigidă încărcată cu osia tandem 20T (distanța între axe 1.30m):

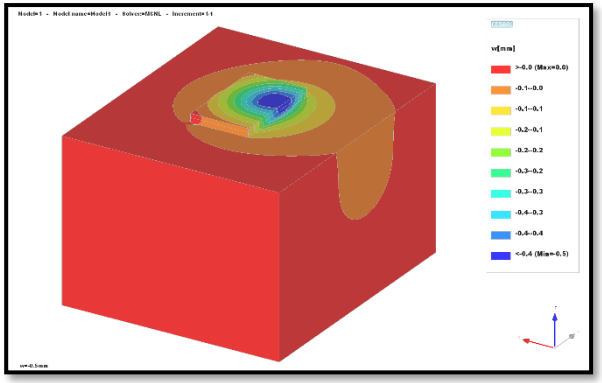


Figura 30 – deplasare verticală

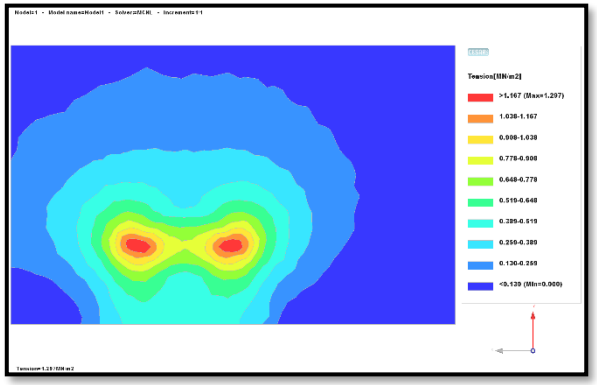


Figura 31 – Efort de întindere la partea inferioară în dala de beton

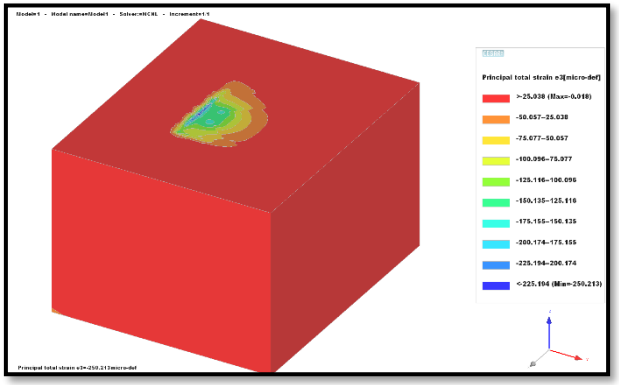


Figura 32 – deformația specifică verticală ε_z, la nivelul terenului de fundare

Structura rutieră semirigidă încărcată cu osia tandem 24T (distanța între axe 1.30m):

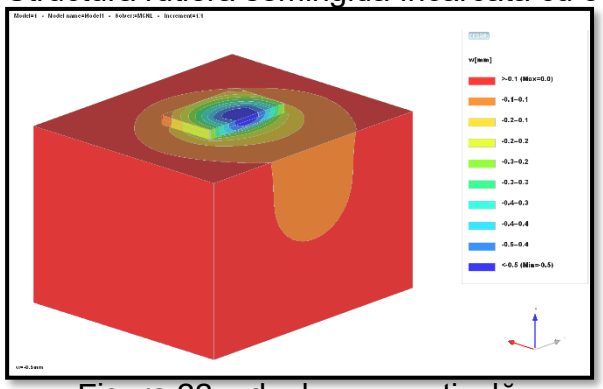


Figura 33 – deplasare verticală

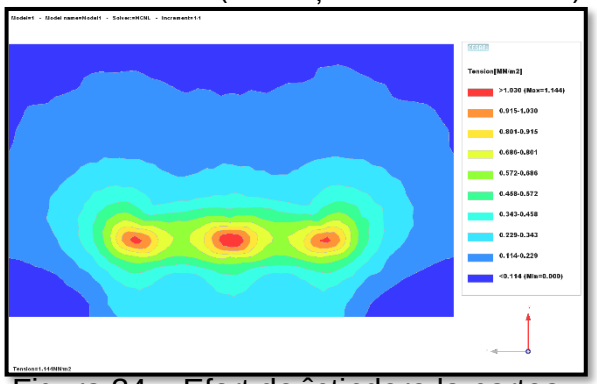


Figura 34 – Efort de întindere la partea inferioară în dala de beton

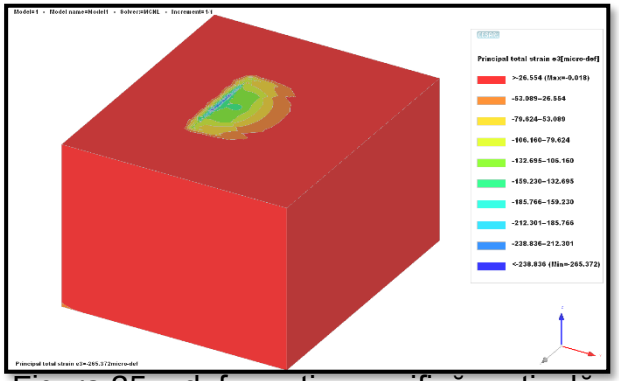


Figura 35 – deformația specifică verticală ε_z, la nivelul terenului de fundare

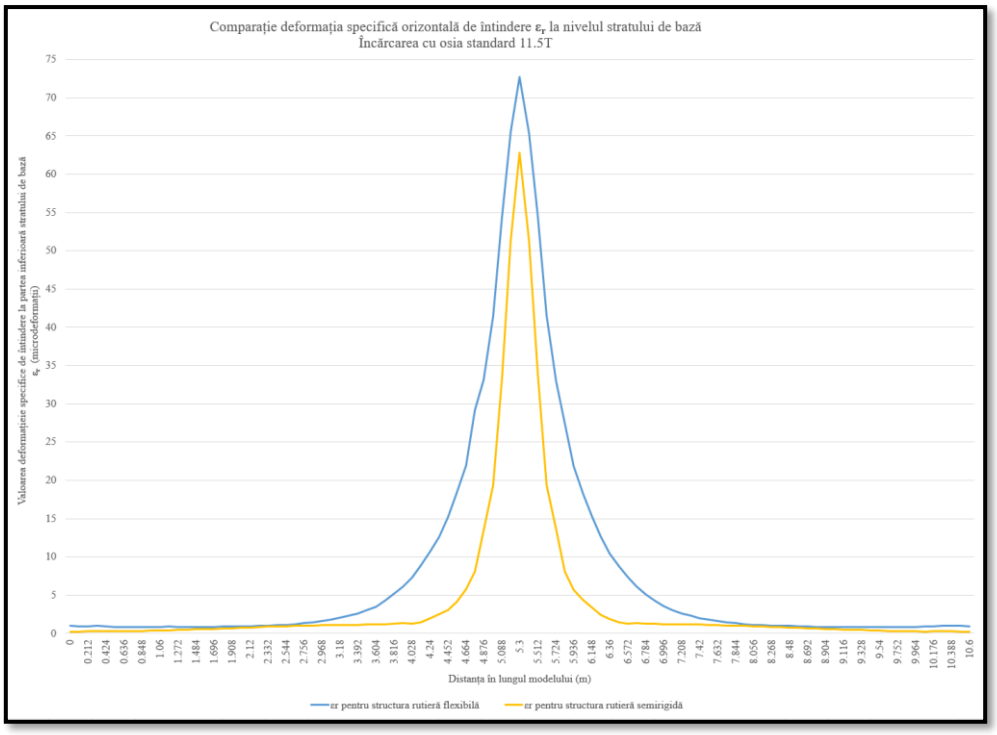


Figura 36 – Comparație deformația specifică orizontală de întindere ε_r, la nivelul stratului de bază încărcarea cu osia standard 11,5 T

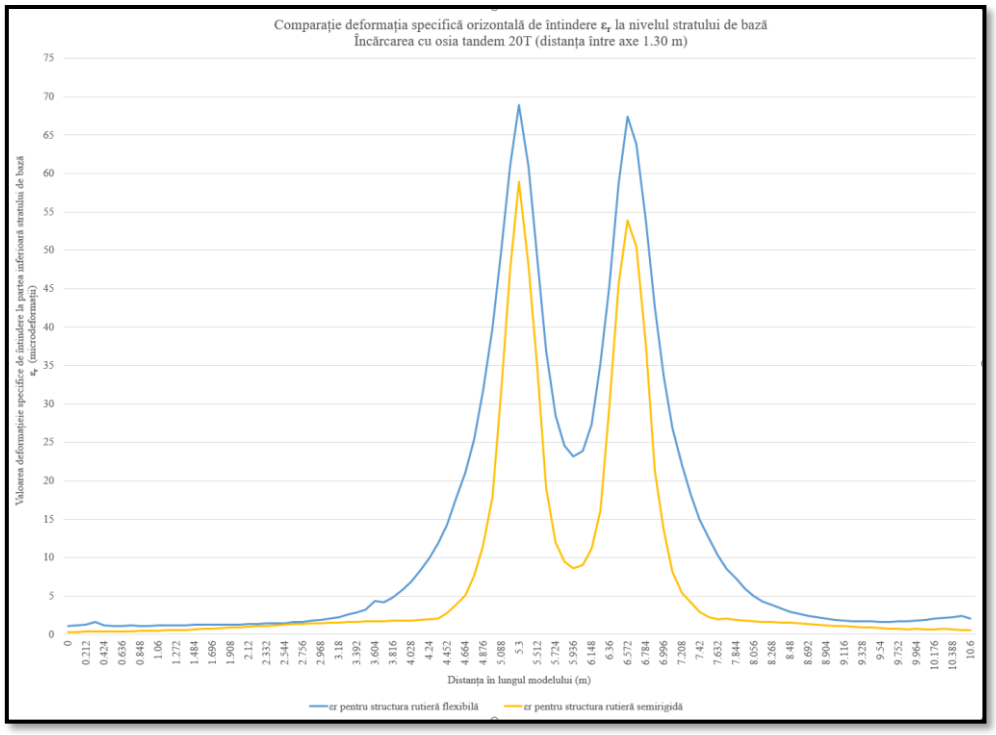


Figura 37 – Comparație deformația specifică orizontală de întindere ε_r, la nivelul stratului de bază încărcarea cu osia tandem 20 T (distanța între axe 1.30 m)

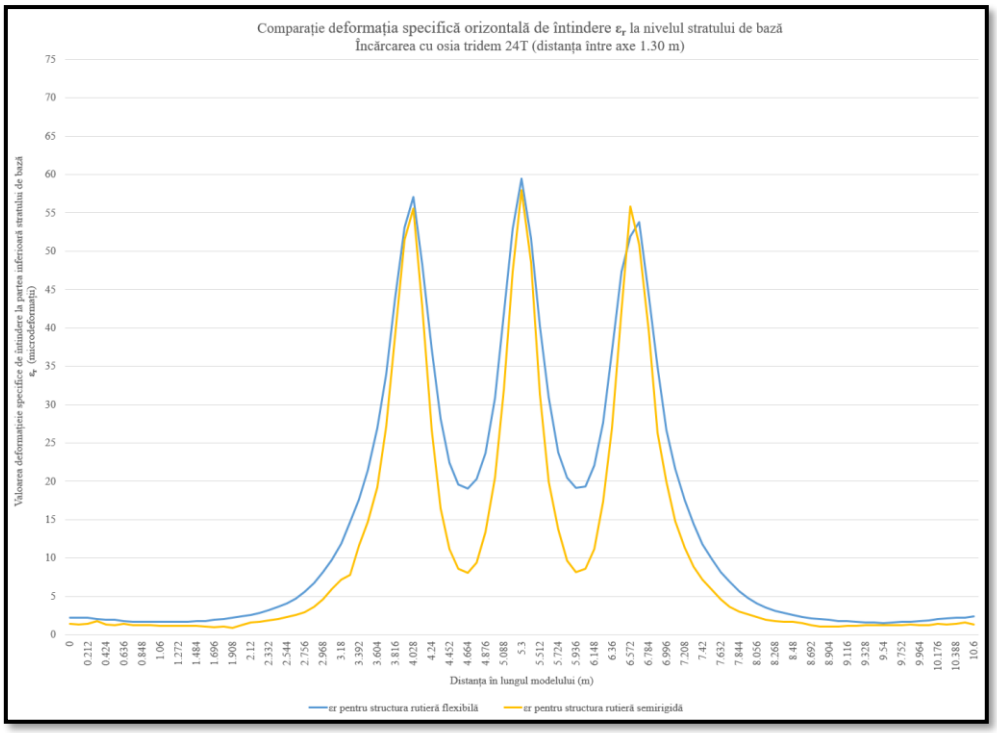


Figura 38 – Comparație deformația specifică orizontală de întindere ε_r, la nivelul stratului de bază încărcarea cu osia tridem 24 T (distanța între axe 1.30 m)

Se observă că pentru toate tipurile de osii (osia standard 115 kN, osia tandem 200 kN, respectiv osia tridem 240 kN), în cazul structurii rutiere semirigide, valoarea deformației specifice orizontale de întindere ε_r la nivelul stratului de bază scade față de cazul structurii rutiere flexibile și astfel putem concluziona că, în cazul structurii semirigide, vom avea o comportare mai bună a straturilor de mixtură, cu condiția ca stratul superior de fundație din balast stabilizat să fie corect executat.

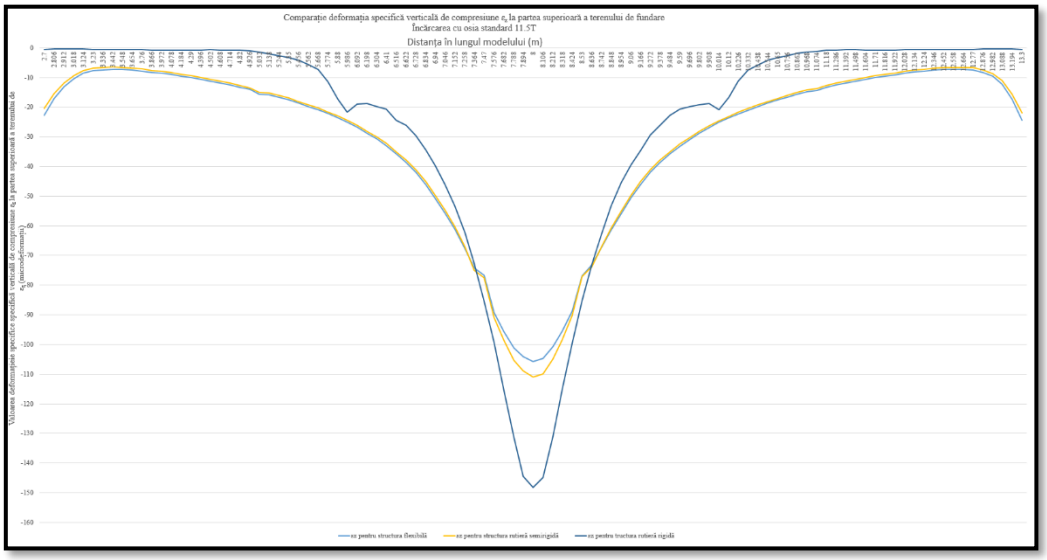


Figura 39 – Comparație deformația specifică verticală ε_z, la partea superioară a terenului de fundare încărcarea cu osia standard 11,5 T

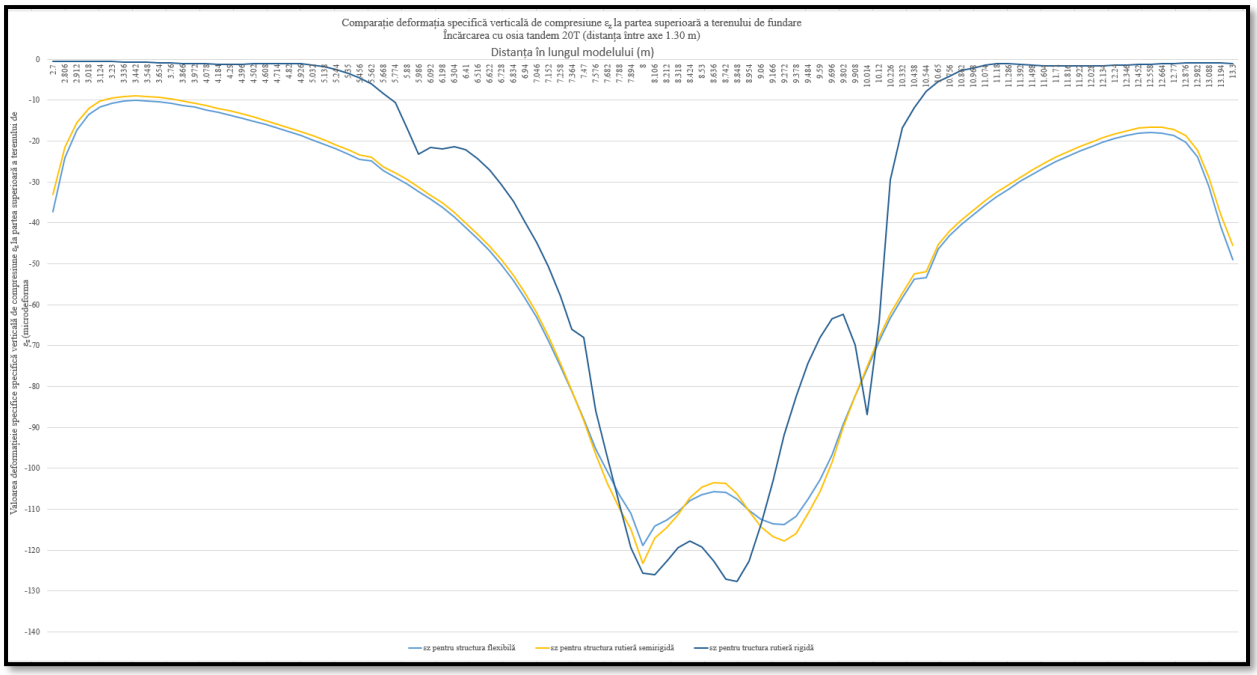


Figura 40 – Comparație deformația specifică verticală ε_z, la partea superioară a terenului de fundare încărcarea cu osia tandem 20 T (distanța între axe 1.30 m)

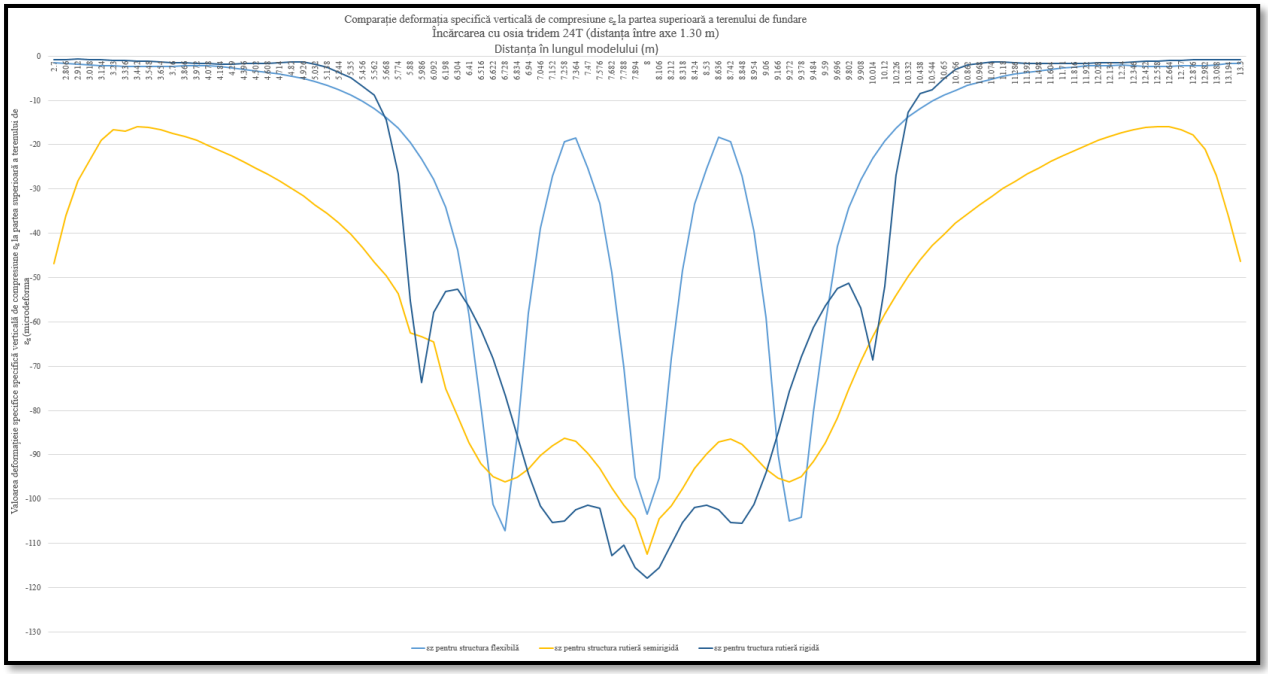
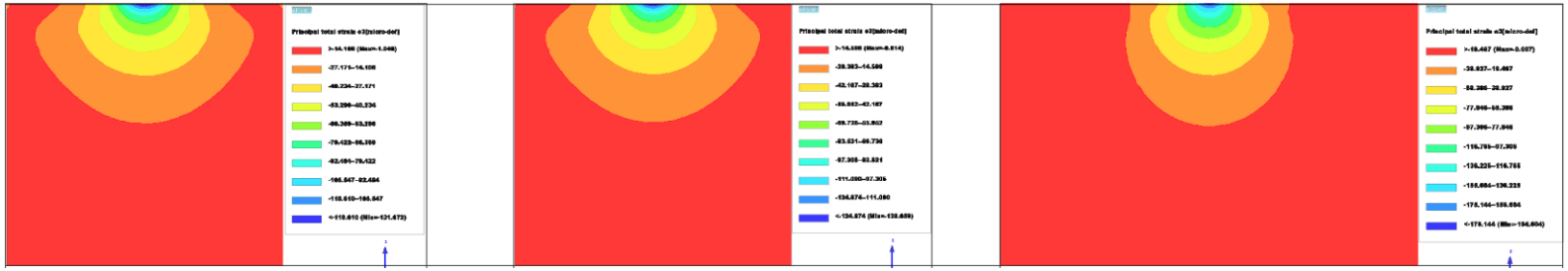


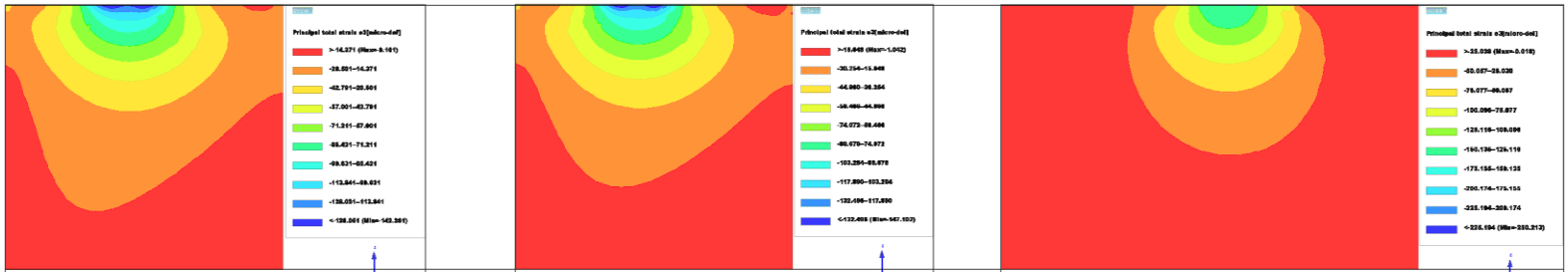
Figura 41 – Comparație deformația specifică verticală ε_z, la partea superioară a terenului de fundare încărcarea cu osia tridem 24 T (distanța între axe 1.30 m)

Deformația specifică verticală εz, la nivelul terenului de fundare – secțiune longitudinală prin mijlocul amprentei încărcării – Încărcare cu osia standard 11.5T



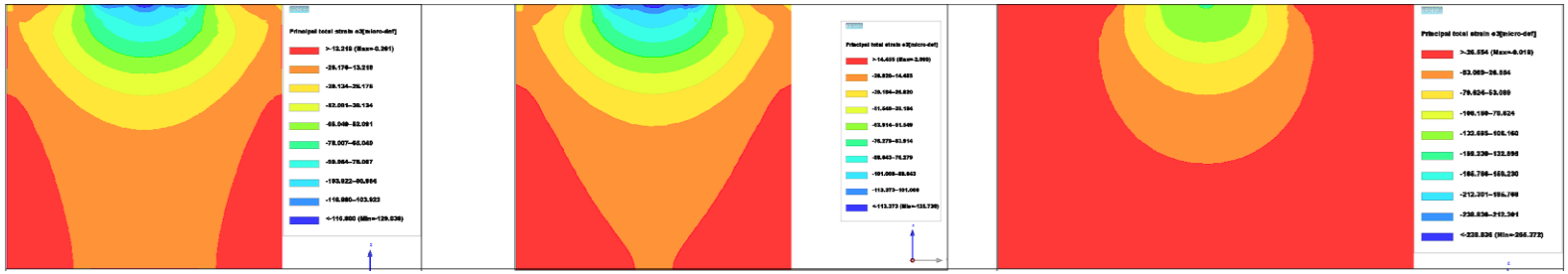
Structura rutieră Flexibilă Structura rutieră Semirigidă Structura rutieră Rigidă

Deformația specifică verticală εz, la nivelul terenului de fundare – secțiune longitudinală prin mijlocul amprentei încărcării – Încărcare cu osia tandem 20T



Structura rutieră Flexibilă Structura rutieră Semirigidă Structura rutieră Rigidă

Deformația specifică verticală εz, la nivelul terenului de fundare – secțiune longitudinală prin mijlocul amprentei încărcării – Încărcare cu osia tridem 24T



Structura rutieră Flexibilă Structura rutieră Semirigidă Structura rutieră Rigidă

Se observă că pentru toate tipurile de osii (osia standard 115 kN, osia tandem 200 kN, respectiv osia tridem 240 kN), în cazul structurii rutiere semirigide, respectiv rigide, valoarea deformației specifice verticale de compresiune ε_z la partea superioară a terenului de fundare crește.
Având în vedere că s-a pornit de la trei structuri rutiere caracterizate prin deflexiuni similare, iar grosimile straturilor din mixturi asfaltice sunt considerabile în cazul structurilor rutiere semirigide și rigide, se poate concluziona că, pentru valori foarte mari ale traficului, este recomandată adoptarea unei structuri rutiere rigide. O structură rutieră cu performanțe similare, realizată integral din mixturi asfaltice, necesită grosimi mai mari ale straturilor și, implicit, costuri de execuție mai ridicate.
Alegerea unei structuri rutiere optime pleacă de la obiectivul dimensionării structurii rutiere, respectiv de a alege materialele potrivite cu grosimile corespunzătoare pentru stabilirea alcătuirii unei structuri rutiere optime (la un cost de execuție și întreținere minim), care să poată prelua încărcările din trafic pe perioada de perspectivă stabilită.

5. CAZUL PARTICULAR – ÎNCĂRCAREA CU UN AUTOVEHICUL CU SEMIREMORCĂ – STRUCTURA RUTIERĂ FLEXIBILĂ ȘI STRUCTURA RUTIERĂ SEMIRIGIDĂ

Acest studiu de caz prezintă efectul încărcării asupra structurii rutiere produs de un autovehicul cu semiremorcă, alcătuit dintr-un cap tractor cu 3 osii, având masa totală de 21 t, și o semiremorcă cu 3 osii, având masa totală de 23 t. Pentru realizarea calculului a fost utilizat software-ul CESAR–LCPC (3D), care permite modelarea interacțiunii dintre straturi și determinarea eforturilor și deplasărilor cu ajutorul metodei elementelor finite.
Caracteristicile structurilor rutiere utilizate sunt prezentate în Tabelul 4 pentru structura rutieră flexibilă, respectiv în Tabelul 5 pentru structura rutieră semirigidă.
Tabelul 4 – Structură rutieră flexibilă pentru care au fost realizate calcule

Nr. crt.	Denumire strat	Grosime [cm]	Modul de elasticitate dinamic [MPa]	Coeficientul lui Poisson
1	strat de uzură	4	3300	0.35
2	strat de legătură	6	3000	0.35
3	strat de bază	8	5000	0.35
4	strat superior de fundație din piatră spartă	25	500	0.27
5	strat inferior de fundație din balast	30	182*	0.27
6	Teren de fundare – pământ P5	100	70	0.42

* – modulul de elasticitate dinamic a fost calculat conform punctului 6.3. din normativul PD177-2001. $E_{bal}=0.20 \times h_{bal}^{0,45} \times E_p=0.20 \times 300^{0.45} \times 70=182$ MPa [1]

Tabelul 5 – Structură rutieră semirigidă pentru care au fost realizate calcule

Nr. crt.	Denumire strat	Grosime [cm]	Modul de elasticitate dinamic [MPa]	Coeficientul lui Poisson
1	strat de uzură	4	3300	0.35
2	strat de legătură	6	3000	0.35
3	strat de bază	8	5000	0.35
4	strat superior de fundație din agregate naturale stabilizate cu liant hidraulic	25	1000	0.25
5	strat inferior de fundație din balast	30	182*	0.27
6	Teren de fundare – pământ P5	100	70	0.42

* – modulul de elasticitate dinamic a fost calculat conform punctului 6.3. din normativul PD177-2001. $E_{bal}=0.20 \times h_{bal}^{0,45} \times E_p=0.20 \times 300^{0.45} \times 70=182$ MPa [1]

Pentru modelarea solicitării roții există patru parametri importanți care influențează rezultatele obținute. Acești parametri sunt: încărcarea pe osie/roată, presiunea de contact (presiunea de umflare), raza amprentei suprafeței echivalente de contact și distanța dintre roți.

Presiunea de contact (presiunea de umflare) diferă în funcție de tipul și dimensiunile pneului. Pentru calcul a fost considerată o presiune medie de 0,625 MN/m², rezultând, în funcție de încărcare, o amprentă circulară cu raza de 0,1345 m pentru roata simplă a capului tractor, o amprentă circulară cu raza de 0,1326 m pentru roțile jumelate ce alcătuiesc osia tandem a capului tractor, respectiv o amprentă circulară cu raza de 0,1357 m pentru roțile simple ce alcătuiesc osia tridem a semiremorcii.

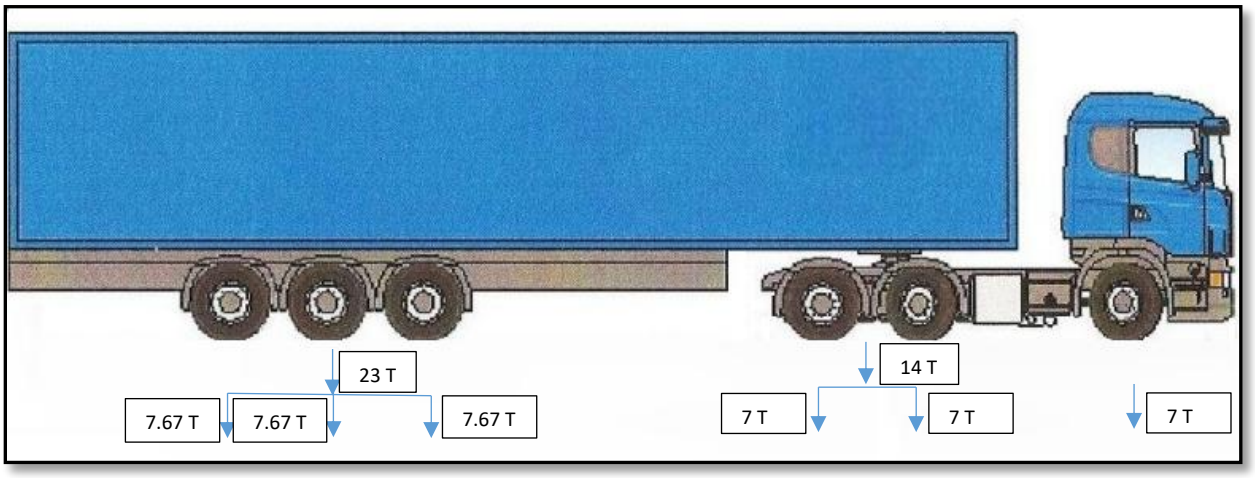


Figura 42 – Autovehicul cu semiremorcă considerat pentru studiu

Pentru realizarea calculului a fost utilizat un model care constă în reprezentarea structurii rutiere sub forma unui paralelipiped, având la bază un dreptunghi cu dimensiunile 18,65 m × 7,00 m și o înălțime de 10,00 m pentru terenul de fundare. Peste acesta au fost așezate paralelipipede cu înălțimi corespunzătoare grosimii fiecărui strat din alcătuirea structurii.

Încărcarea a fost aplicată static, sub forma unei presiuni uniform distribuite pe amprenta roții, cu valoarea de 0,625 MPa. Primul șir de roți a fost amplasat la 1,00 m de marginea modelului, iar cel de-al doilea la o distanță corespunzătoare, conform caracteristicilor autovehiculului.
Pentru discretizarea structurii au fost utilizate elemente finite de tip tetraedru, rezultând un număr de 204.709 noduri și 147.992 elemente de volum de tip tetraedru. [3]

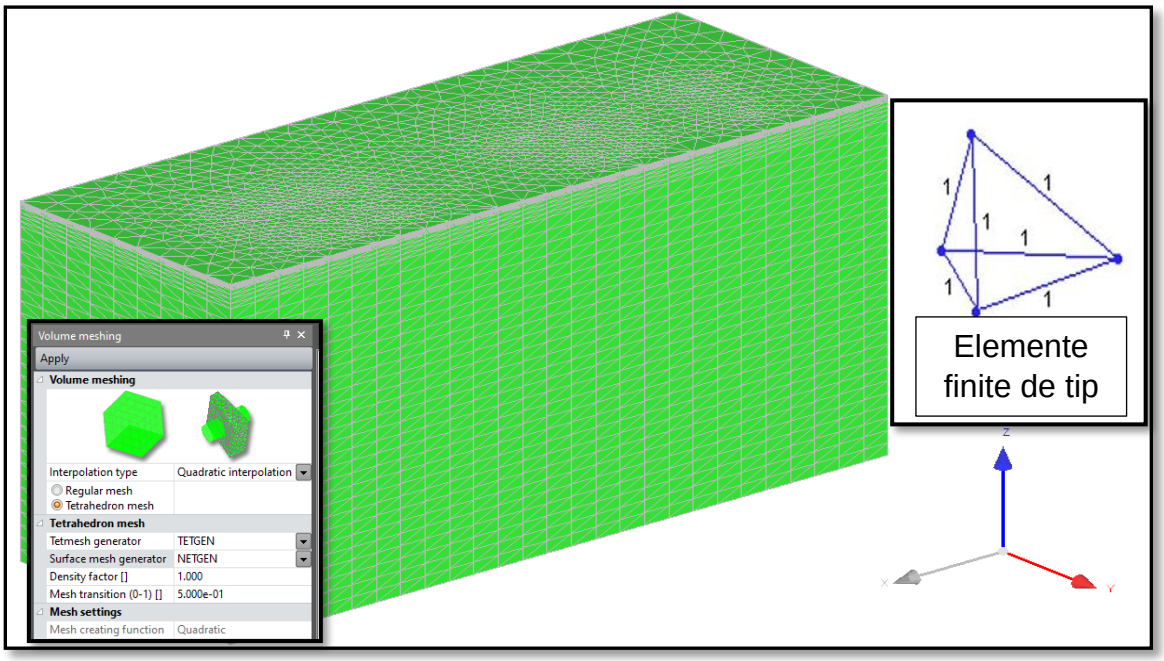


Figura 43 – Model 3D utilizat pentru studiu

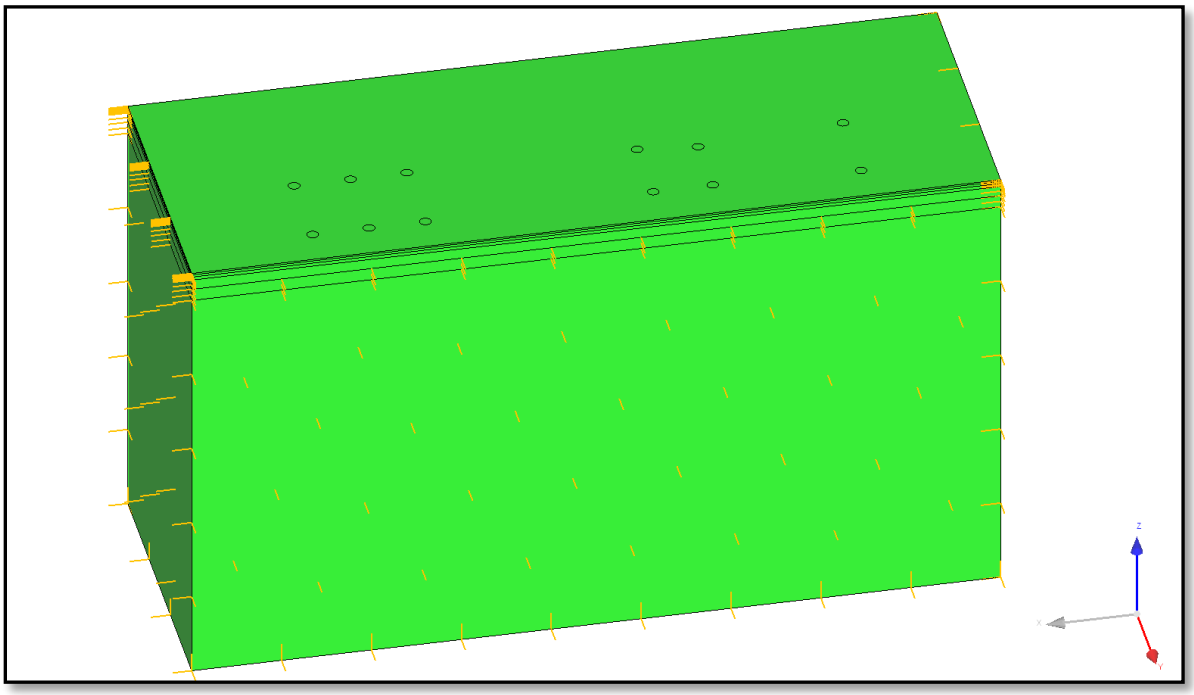


Figura 44 – Condiții de rezemare utilizat pentru studiu

Condițiile de rezemare aplicate au constat în blocarea deplasărilor perpendiculare pe planurile laterale, inclusiv la baza stratului de pământ, cu excepția straturilor de mixturi asfaltice și a stratului superior de fundație pe latura pe care roțile sunt amplasate la 1,0 m de margine.
Au fost rulate în software-ul CESAR–LCPC (3D) cele două modele, pentru structura rutieră flexibilă și pentru cea semirigidă.
Rezultate obținute:

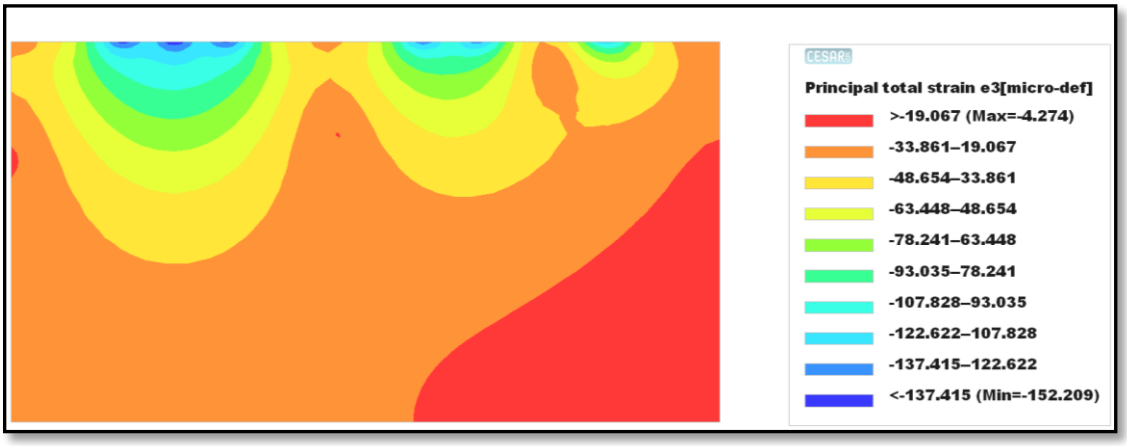


Figura 45 – Deformația specifică verticală de compresiune ε_z a terenului de fundare – model aferent structurii rutiere flexibilă
(secțiune longitudinală prin roțile dinspre acostament)

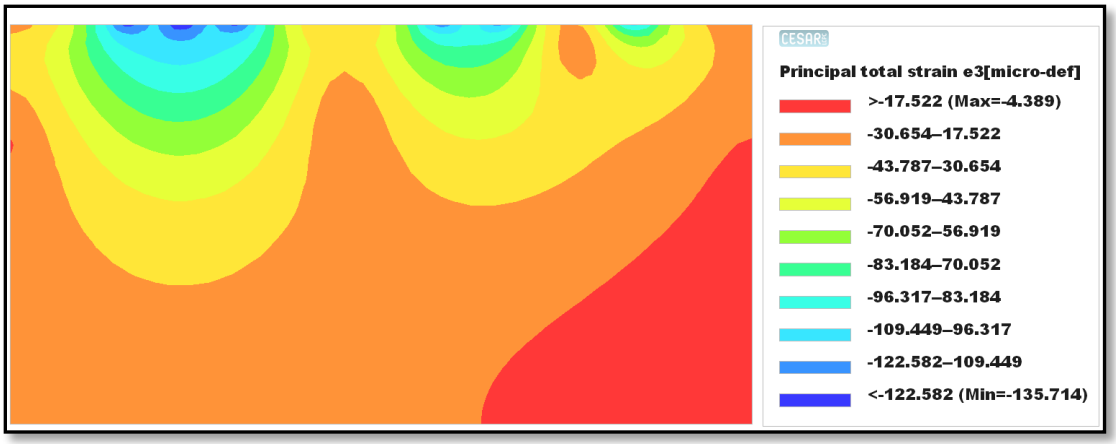


Figura 46 – Deformația specifică verticală de compresiune ε_z a terenului de fundare – model aferent structurii rutiere semirigidă
(secțiune longitudinală prin roțile dinspre acostament)

Din analiza diagramelor de deformație specifică verticală de compresiune ε_z a terenului de fundare, în secțiune longitudinală prin roțile dinspre acostament, se poate trage concluzia că efectul osiei tridem se transmite pe o adâncime mai mare decât în cazul osiei tandem, pentru ambele structuri rutiere analizate.
Pentru structura rutieră semirigidă se observă o reducere a deformației specifice verticale de compresiune ε_z la nivelul terenului de fundare, precum și o reducere a valorilor deformației specifice orizontale de întindere ε_r la nivelul inferior al stratului de bază.

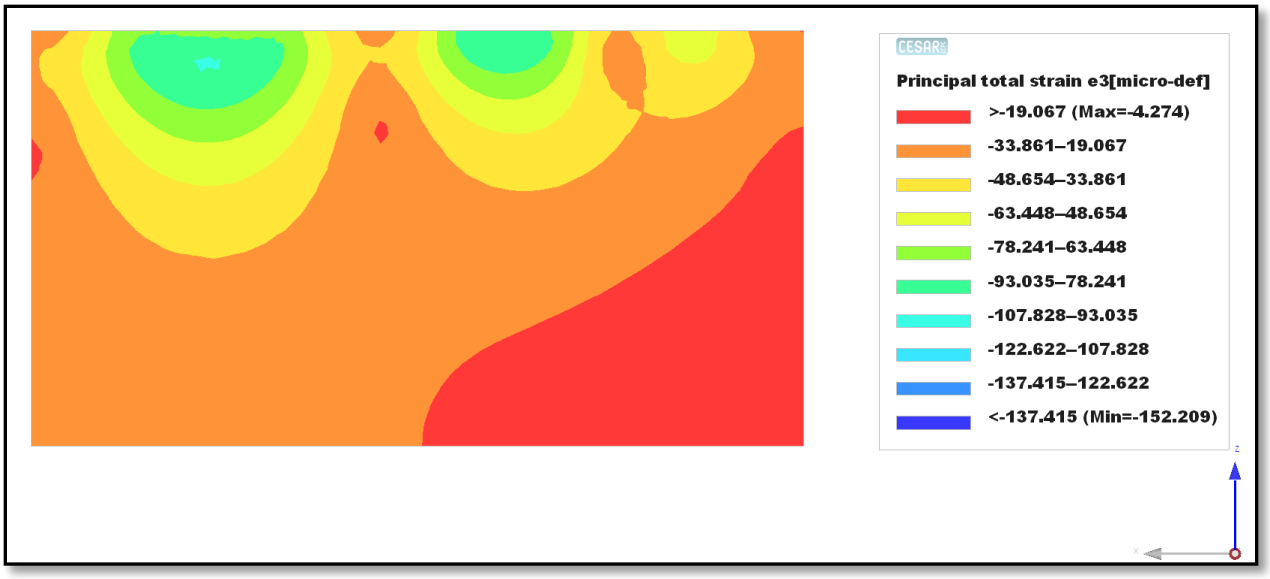


Figura 47 – Deformația specifică verticală de compresiune εz a terenului de fundare – model aferent structurii rutiere flexibilă (secțiune longitudinală prin axa autovehiculului)

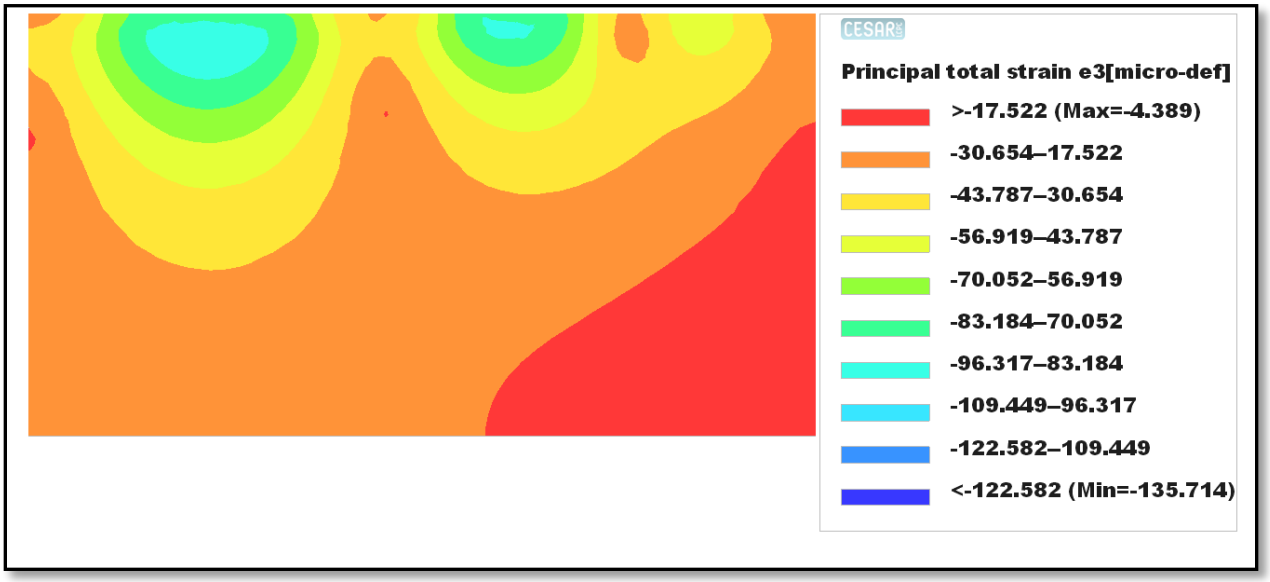


Figura 48 – Deformația specifică verticală de compresiune ε_z a terenului de fundare – model aferent structurii rutiere semirigidă (secțiune longitudinală prin axa autovehiculului)

Analizând rezultatele prezentate, se poate observa modul diferit în care cele două structuri rutiere răspund la încărcarea produsă de un autovehicul cu semiremorcă. Diferențele apar datorită rigidității mai mari a stratului de agregate naturale stabilizate cu lianți hidraulici, ceea ce conduce la creșterea suprafeței pe care se transmit încărcările către terenul de fundare și, implicit, la reducerea deformației specifice verticale de compresiune ε_z la nivelul acestuia, precum și la reducerea valorilor deformației specifice orizontale de întindere ε_r la nivelul inferior al stratului de bază.

REFERINȚE

[1] Normativ pentru dimensionarea sistemelor rutiere suple și semirigide (metoda analitică) Indicativ PD 177-2001

[2] ALIZE LCPC 3D Reference manual

[3] CESAR LCPC 3D Reference manual