

MECCANICA COMPUTAZIONALE DEI TESSUTI E BIOMATERIALI

Risposta strutturale di elementi strutturali laminati

Mastrofini Alessandro

alessandro.mastrofini@alumni.uniroma2.eu

Abstract

Nel seguente report sono state condotte diverse campagne di simulazione per analizzare la risposta strutturale di un composito laminato CF/PEEK che mostra grandi potenzialità di applicazione nel campo biomedicale.

Background, in un composito laminato il comportamento strutturale dipende dalla disposizione dei singoli strati, in queste analisi viene indagato come i differenti layouts influenzano la risposta di alcuni elementi strutturali;

Results, the main findings;

Conclusions, brief summary and potential implications.

Key words: laminates; CF/PEEK; laminates composites mechanics ;

1 Introduzione

Lo scopo della seguente analisi è quello di indagare il comportamento di differenti layouts di un composito laminato.

Viene analizzato un composito laminato CF/PEEK, ovvero un PEEK rinforzato a fibre di carbonio che mostra grandi potenzialità per le applicazioni biomedicali. Vengono considerati due elementi strutturali fondamentali, un cilindro e una piastra, e viene analizzato come la variazione del layout porta ad una differente risposta meccanica.

Viene fatto anche uno studio approfondito andando ad analizzare la distribuzione delle tensioni a livello dei singoli strati.

La conoscenza e la possibilità di prevedere il comportamento strutturale a partire dalla disposizione dei layer risulta fondamentale sia per la simulazione che per la produzione di dispositivi ed oggetti con composti laminati.

2 Laminati CF/PEEK

I recenti progressi nei materiali composti, in particolare a matrice PEEK, ovvero una matrice polimerica di poli-eter-eter chetone. Questo polimero, viste le sue proprietà, si pone tra i polimeri più importanti in ambito ingegneristico. Ha delle proprietà eccellenti quali un'alta resistenza meccanica, ottima stabilità termica, resistenza chimica e un comportamento resistente an-

che in ambienti chimicamente ostili. Presenta anche una natura anticorrosiva e una buona resistenza alla degradazione, proprietà che lo rendono ottimo per le applicazioni in campo biomedicale.

In tali applicazioni sono state migliorate anche alcune proprietà superficiali combinando il PEEK con particelle bioattive come l'idrossiapatite. Questo ha permesso di far fronte ad alcune problematiche come la limitata efficienza nel far aderire cellule e nell'integrazione con l'osso. Chiaramente l'integrazione di fibre di rinforzo ne ha permesso anche il miglioramento delle proprietà meccaniche.

Uno dei rinforzi più importanti è quello a fibre di carbonio unidirezionali. Indicato come CF/PEEK è stato introdotto intorno al 1980 e negli ultimi anni si è mostrato essere un ottimo biomateriali con grandi potenzialità di applicazione negli impianti biomedicali [1].

Il PEEK trova grandi applicazioni nel campo medicale sia in impianti personalizzati realizzati con stampa 2D sia nell'ortodonzistica. Inoltre, il CF/PEEK trova grandi applicazioni in ortopedia. È bene sottolineare anche che questo il CF/PEEK con fibre continue mostra proprietà meccaniche migliori ma richiede metodi di produzione avanzati come l'Additive Manufacturing e la stampa 3D.

Tipicamente in ortopedia sono utilizzati impianti metallici con una rigidezza di circa un ordine di grandezza più elevata di quella dell'osso fisiologico e questo può portare a problematiche legate al riasorbimento osseo. Inoltre, possono esserci problematiche legate all'imaging diagnostico CT o a raggi X [2].

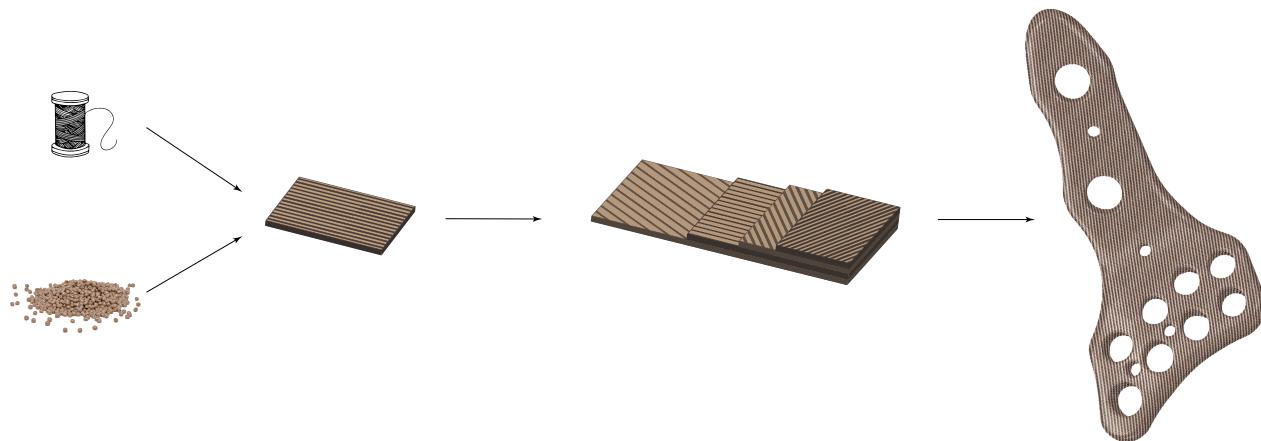


Figure 1. Il comportamento meccanico della struttura finale alla macroscale è fortemente influenzato dai singoli componenti in cascata. Da sinistra: fibre continue di carbonio e pellet di polimero; singola lamina; piastra multi layer; placca ortopedica di fissaggio per il radio distale [4].

L'utilizzo di materiali compositi può fornire diversi vantaggi quali la presenza di proprietà anisotrope, radio-trasparenza, elevata resistenza a fatica ed un elevato rapporto resistenza/peso. Attualmente sono ancora pochi i compositi laminati effettivamente usati nelle applicazioni ortopediche. Un esempio di tale materiale è un PEEK rinforzato a fibra di carbonio continua, noto come PEEK-OPTIMA™ Ultra-Reinforced, ed è stato approvato per l'impianto anche negli esseri umani dalla Food and Drug Administration americana [3].

La campagna di simulazioni seguente fa riferimento ad un composito laminato con strati di CF/PEEK con frazione volumetrica di fibre del 62 % e ne considera diversi layouts laminati analizzando le performance meccaniche e la risposta strutturale.

3 Background

I compositi moderni si basano sull'utilizzo di una fase di rinforzo, tipicamente sotto forma di fibra, immersa in una matrice. Solitamente si utilizza una matrice polimerica e come fibre di rinforzo si possono usare vetro, carbonio, aramide ed altri. Esistono diversi metodi per disporre le fibre e la loro distribuzione influenza il comportamento globale.

Mettendo insieme più strati di materiale composito si ottiene un pacchetto che prende il nome di composito laminato.

Il problema può essere diviso su tre scale di grandezza differenti: il comportamento della struttura finale (macroscale) dipende dal laminato che a sua volta è influenzato dalle singole lame (mesoscale). A loro volta il comportamento è determinato dai singoli costituenti e dalla loro composizione (microscala). Una rappresentazione schematica è data in fig. 1.

3.1 Regola delle miscele

La singola lamina è composta da una matrice e dalle fibre di rinforzo con una frazione volumetrica precisa. Il primo passo è quello di omogenizzare le proprietà materiali del singolo strato. Consideriamo una fibratura tale

da garantire una simmetria trasversalmente isotropa e con direzione di isotropia l'asse della fibra.

Per arrivare alle proprietà omogeneizzate del singolo layer è possibile applicare la regola delle miscele [5].

Considerando un volume globale del composito dato dalla somma del volume della matrice e di quello del rinforzo e assumendo un'adesione corretta tra i due è possibile calcolare analiticamente i moduli risultanti. Valgono le frazioni volumetriche:

$$v_m + f_f = 1 \quad (1)$$

Ed è possibile esprimere le proprietà materiali risultanti in funzione della frazione volumetrica di fibre (f_f) e delle proprietà materiali dei singoli costituenti, come espresso nelle eqs. (2) a (6).

$$E_1 = f_f E_f + (1 - f_f) E_m \quad (2)$$

$$E_2 = E_3 = \left(\frac{1 - f_f}{E_m} + \frac{f_f}{E_f} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$G_{12} = \left(\frac{v_m}{G_m} + \frac{v_f}{G_f} \right)^{-1} \quad (4)$$

$$\nu_{12} = v_f \nu_f + v_m \nu_m \quad (5)$$

$$\nu_{23} = \frac{E_2}{2G_{23}} - 1 = \frac{E_2}{2G_{12}} - 1 \quad (6)$$

È possibile considerare una matrice di cedevolezza del tipo in eq. (7)

Table 1. Parametri materiali [6]

CF	PEEK
$E_f = 236 \text{ GPa}$	$E_m = 4 \text{ GPa}$
$\nu_f = 0.2$	$\nu_m = 0.36$
$G_f = 27.6 \text{ GPa}$	$G_m = 1.47 \text{ GPa}$

Table 2. Risultati applicando la regola delle miscele

ff	0.62
E_1	147.96 GPa
E_2	10.83 GPa
ν_{12}	0.26
G_{12}	4.24 GPa

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

In particolare, è possibile osservare l'andamento dei moduli tipo Young nella figura COMPLETA + CONSIDERAZIONI

3.2 Teoria dei laminati sottili ??

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

4 Proprietà dei costituenti

Introduci REGOLA DELLE MISCELE

Fissata una fiber fraction di $ff = 0.62$.

PLOTTA E1 ed E2 rispetto alla variazione del fiber fraction ??

TEST SU LAMINATI CON DIFFERENTI PROPRIETÀ ??
EVENTUALMENTE USA IL CASO SPECIALE DELLE TENSIONI NELLO SPESORE

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing

elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5 Layout del laminato

Vengono affrontati 4 casi:

- (a) $[\alpha / -\alpha / 30 / -30 / 0_2]_s$ con $\alpha \in [0^\circ; 90^\circ]$
- (b) $[-45 / 45 / -45 / 45]$
- (c) $[\pm 45^\circ / \pm 45^\circ]$
- (d) $[-30 / -45 / -30 / -45]$

Un'illustrazione rappresentativa dei differenti layout è presente in fig. 2.

Vengono affrontati anche due elementi strutturali differenti:

- Elemento tipo piastra
- Elemento tipo cilindro

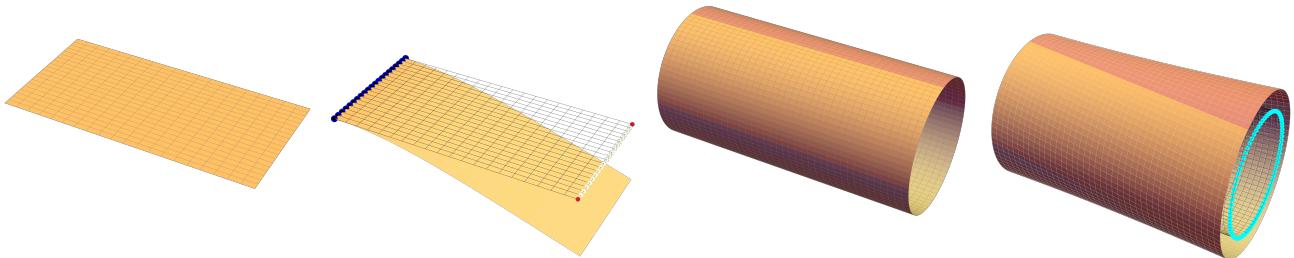
COMPLETA CON ELENCO PUNTATO E DIFFERENTI CASI

PRESENTA I DUE DIFFERENTI ELEMENTI STRUTTURALI Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras



(a) $[\alpha / -\alpha / 30 / -30 / 0_2]_S$ (b) $[-45/45 / -45/45]$ (c) $[\pm 45^f / \pm 45^f]$ (d) $[-30 / -45 / -30 / -45]$

Figure 2. Differenti layout di laminato



(a) Elemento tipo piastra

(b) Elemento tipo piastra de-
formato (caso §5.1.1 con $\alpha = 40^\circ$)

(c) Elemento tipo cilindro

(d) Elemento tipo cilindro de-
formato (caso §5.2.4)

Figure 3. Elementi strutturali

viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, telus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.1 Elemento tipo piastra

5.1.1 Caso (a)

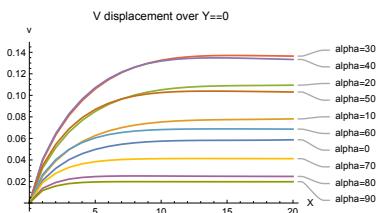
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

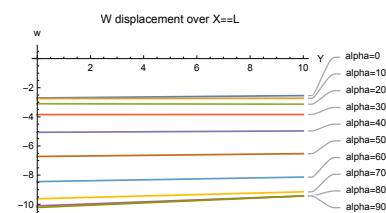
Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, telus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.1.2 Caso (b)

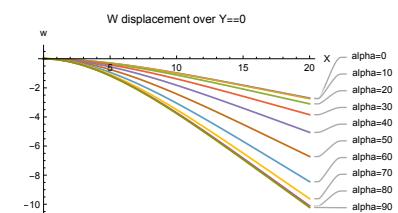
Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.



(a) Spostamento lungo \hat{y} del bordo con $y = 0$ della piastra

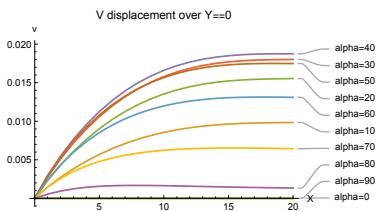


(b) Effetto torsionale, spostamento lungo \hat{z} del bordo estremale della piastra ($x = L$)

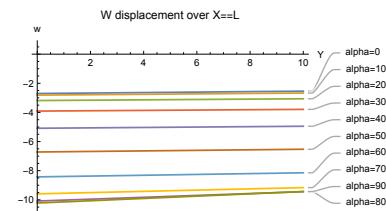


(c) Effetto flessionale, spostamento lungo z del bordo $y = 0$ della piastra

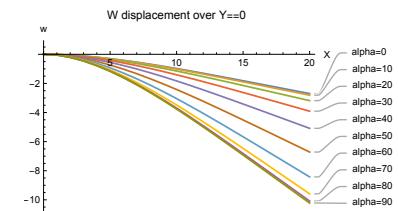
Figure 4. Risultati caso (a) per un elemento strutturale tipo piastra con entrambi i carichi (§5.1.1)



(a) Spostamento lungo \hat{y} del bordo con $y = 0$ della piastra

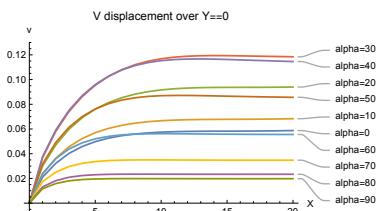


(b) Effetto torsionale, spostamento lungo \hat{z} del bordo estremale della piastra ($x = L$)

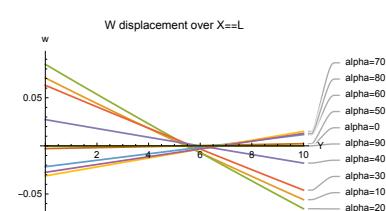


(c) Effetto flessionale, spostamento lungo z del bordo $y = 0$ della piastra

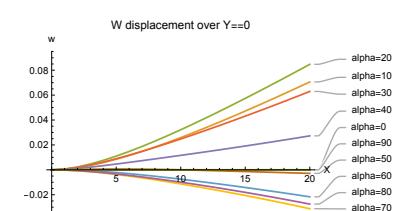
Figure 5. Risultati caso (a) per un elemento strutturale tipo piastra con carichi tipo trasversale (§5.1.1)



(a) Spostamento lungo \hat{y} del bordo con $y = 0$ della piastra



(b) Effetto torsionale, spostamento lungo \hat{z} del bordo estremale della piastra ($x = L$)



(c) Effetto flessionale, spostamento lungo z del bordo $y = 0$ della piastra

Figure 6. Risultati caso (a) per un elemento strutturale tipo piastra con carichi tipo assiale (§5.1.1)

amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.1.3 Caso (c)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla

ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placemat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.1.4 Caso (d)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.2 Elemento tipo cilindro

5.2.1 Caso (a)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.2.2 Caso (b)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

5.2.3 Caso (c)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.



Figure 7. DESCRIZIONE

5.2.4 Caso (d)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, telus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

6 Spessore della piastra

Consideriamo un ulteriore caso con un layout $[10/ - 10/30/ - 30/0_2]_s$ illustrato in fig. 7a.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, telus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

7 Conclusioni

CMPOMPLETA

Conoscere la risposta di elementi strutturali può essere utile per modellare correttamente una determinata struttura protesica e per fare studi dettagliati di danno.

textcolorblueLorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, telus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

tus mauris.

8 Metodi

Lore ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, telus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

9 Disponibilità del codice e materiale aggiuntivo

Tutto il codice, le immagini, file di processamento e risultati ottenuti sono disponibili alla repository online al link: <https://github.com/mastroalex/comp-lam>.

Il codice

9.1 Lista delle abbreviazioni

- CF, carbon fiber

References

1. Verma S, Sharma N, Kango S, Sharma S. Developments of PEEK (Polyetheretherketone) as a biomedical material: A focused review. European Polymer Journal 2021;147:110295. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110295>.
2. Rohner B, Wieling R, Magerl F, Schneider E, Steiner A. Performance of a composite flow moulded carbon fibre reinforced osteosynthesis plate. Veterinary and comparative orthopaedics and traumatology 2005;18:175–182. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16594449/>.
3. Invibio, solutions B. High performance PEEK-OPTIMA™ polymers;<https://invibio.com/>.
4. Mugnai R, Tarallo L, Capra F, Catani F. Biomechanical comparison between stainless steel, titanium and carbon-fiber reinforced polyetheretherketone volar locking plates for distal radius fractures. Orthopaedics and Traumatology: Surgery and Research 2018;104(6):877–882. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877056818301440>.
5. Kollar LP, Springer GS. Mechanics of Composite Structures. Cambridge UniversityPress; 2009.
6. Gallagher EA, Lamorinière S, McGarry P. Finite element investigation into the use of carbon fibre reinforced PEEK laminated composites for distal radius fracture fixation implants. Medical engineering & physics 2019;67:22–32. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2019.03.006>.