

POLITECNICO DI TORINO
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Dimensionamento di Giunti Saldati per Componenti di Macchine Telescopiche



Relatore

Prof. Aurelio Somà

Correlatore

Ing. Nicolò Zampieri

Candidato

Alessandro Chiavassa

SETTEMBRE 2018

Sommario

Questo documento di Tesi tratta del dimensionamento di giunti saldati. Si sono presi in considerazione i giunti saldati tra testata e braccio delle macchine sollevatrici di tipo telescopico progettate dall'azienda in cui si è svolta l'attività di Tesi. L'azienda in questione è la Merlo Project S.r.l., la quale svolge tra le altre l'attività di progettazione tecnica per la Merlo S.p.A. Per quanto concerne le attività che non è stato possibile svolgere in azienda si sono utilizzati gli strumenti informatici presenti presso al Politecnico di Torino.

L'obiettivo della Tesi è quello di definire come poter migliorare la resistenza dei giunti saldati che verranno presi in esame, senza stravolgere il processo produttivo attuale. Questi miglioramenti sono auspicabili nell'ottica di migliorare i prodotti. Il caso di carico studiato, su cui si punta a migliorare le prestazioni, è quello in cui si utilizzano le macchine telescopiche in questione per scavare con una pala.

Per poter ottenere delle simulazioni numeriche con risultati affidabili inizialmente si sono presi in considerazione dei provini di geometria semplificata, con 4 differenti geometrie di saldatura. Di questi si sono effettuati 4 modelli per le simulazioni FEM con ANSYS. Le simulazioni in campo elastico inizialmente si sono ripetute anche con una release del programma più completa, utilizzata in ambito accademico con lo scopo di comprendere come sfruttare completamente le potenzialità del software presente in azienda. Tarato lo strumento numerico si sono effettuate delle prove sperimentali al Reparto Ricerche utilizzando provini realizzati ad oc e saldati in linea di produzione, con lo scopo di verificare giunti saldati della stessa qualità di quelli poi presenti sui prodotti venduti. Una volta analizzate le prove di trazione con ANSYS si è verificato il comportamento elasto-plastico dei provini validando quindi la bontà dei modelli e l'accuratezza dei risultati.

Mentre si sono svolte queste prime analisi è stato possibile un confronto tra i due diversi pacchetti di ANSYS: Mechanical APLD (utilizzato presso il Politecnico di Torino) e Workbench in termini di risultati ottenuti e attenzioni da porre durante la fase di preparazione della simulazione.

Si sono quindi svolte analisi in campo plastico poi verificate sperimentalmente per validare i modelli.

Si è potuto procedere con le simulazioni in azienda in campo lineare elastico con le geometrie reali di testata e braccio, simulando l'introduzione di bisello, piastre di rinforzo, collari di rinforzo osservandone gli effetti sul cordone di saldatura ed in prossimità a quest'ultimo. Si sono differenziati i casi in cui la pala viene a contatto con la massa da caricare in differenti posizioni. Anche i vincoli si differenziano, sono presenti due condizioni corrispondenti a due soluzioni costruttive dei bracci telescopici: braccio a 2 sezioni e braccio a 3 sezioni.

Al termine delle analisi svolte si è quindi potuta determinare la soluzione tecnica che potrebbe rappresentare il miglior compromesso tra esigenze produttive ed esigenze tecniche.

Indice

1. Introduzione.....	1
1.1. Riferimenti Normativi.....	4
1.2. Tensione effettiva dell'intaglio (Effective notch stress)	6
2. Modello base.....	9
2.1. Confronto tra APDL e Workbench	9
2.1.1. Definizione del modello base	9
2.1.2. Analisi preliminare su Workbench	10
2.1.3. Analisi preliminare su APDL.....	14
2.1.4. Confronto.....	23
2.2. Confronto tra Workbench e normative	25
3. Provini.....	27
3.1. Definizione dei tipi di saldatura.....	27
3.2. Criteri per la progettazione dei provini per le prove sperimentali.....	28
3.3. Modello lineare elastico	31
3.3.1. Provino 1.....	31
3.3.2. Provino 2.....	33
3.3.3. Provino 3.....	34
3.3.4. Provino 4.....	36
3.4. Tensione effettiva dell'intaglio.....	38
3.4.1. Provino 1.....	38
3.4.2. Provino 2.....	39
3.4.3. Provino 3.....	40
3.4.4. Provino 4.....	41
3.4.5. Confronto.....	42
3.5. Prove sperimentali	43
3.5.1. Provino 1.....	45
3.5.2. Provino 2.....	47
3.5.3. Provino 3 e Provino 4	50
3.6. Modello elasto-plastico.....	53

3.6.1.	Mechanical APDL.....	53
3.6.2.	Workbench.....	56
3.6.3.	Confronto tra Mechanical APDL e Workbench	59
3.6.4.	Confronto con i risultati sperimentali	60
4.	Giunti reali tra testata e braccio	61
4.1.	Modello base	61
4.2.	Carichi e Vincoli	66
4.3.	Tipologie di saldatura	68
4.4.	Analisi preliminare dei rinforzi.....	73
4.4.1.	Confronto generale.....	73
4.4.2.	Tensioni lungo il cordone di saldatura ad angolo.....	80
4.4.3.	Approfondimento lungo lo spessore della lamiera del braccio	84
4.5.	Analisi con i contatti di tipo <i>frictionless</i> attivati	85
4.5.1.	Confronto con le simulazioni del paragrafo 4.4.....	85
4.5.2.	Confronto tra i vari sistemi di rinforzo	89
4.5.3.	Tensioni lungo il cordone di saldatura ad angolo.....	91
5.	Osservazioni e Conclusioni finali	95
	Riferimenti Bibliografici.....	I
	Appendice A.....	I
A.1.	Braccio a tre sezioni con il carico centrato sulla pala	II
A.2.	Braccio a tre sezioni con il carico sullo spigolo X positivo della pala.....	IV
A.3.	Braccio a due sezioni con il carico centrato sulla pala	VI
A.4.	Braccio a due sezioni con il carico sullo spigolo X positivo della pala	VIII
	Appendice B.....	I
B.1.	Braccio a due sezioni punto A.....	II
B.2.	Braccio a due sezioni punto B.....	IV
B.3.	Braccio a due sezioni punto C.....	VI
B.4.	Braccio a due sezioni punto D	VIII
B.5.	Braccio a due sezioni punto E.....	X
B.5.	Braccio a due sezioni punto F	XII
B.6.	Braccio a due sezioni punto G.....	XIV
B.7.	Braccio a tre sezioni punto A	XVI
B.8.	Braccio a tre sezioni punto B	XVIII
B.9.	Braccio a tre sezioni punto C.....	XX
B.10.	Braccio a tre sezioni punto D	XXII
B.11.	Braccio a tre sezioni punto E.....	XXIV

B.12. Braccio a tre sezioni punto F.....	XXVI
B.13. Braccio a tre sezioni punto G	XXVIII
Appendice C.....	I
C.1. Braccio a tre sezioni con il carico centrato sulla pala	II
C.2. Braccio a tre sezioni con il carico sullo spigolo a X positivo della pala	III
Appendice D	I
D.1. Braccio a due sezioni nessun sistema di rinforzo.....	II
D.2. Braccio a tre sezioni nessun sistema di rinforzo	V
D.3. Braccio a due sezioni bisello di rinforzo	VIII
D.4. Braccio a tre sezioni bisello di rinforzo	XI
D.5. Braccio a due sezioni, colare di rinforzo nella zona inferiore	XIV
D.6. Braccio a tre sezioni colare di rinforzo nella zona inferiore.....	XVII
D.7. Braccio a due sezioni colare di rinforzo nella zona superiore	XX
D.8. Braccio a tre sezioni colare di rinforzo nella zona superiore	XXIII
D.9. Braccio a due sezioni due colari di rinforzo.....	XXVI
D.10. Braccio a due sezioni due colari di rinforzo.....	XXIX
Appendice E.....	I
E.1. Braccio a due sezioni con il carico centrato sulla pala	II
E.2. Braccio a due sezioni con il carico sullo spigolo X positivo della pala	IV
E.3. Braccio a tre sezioni con il carico centrato sulla pala	VI
E.3. Braccio a tre sezioni con il carico sullo spigolo X positivo della pala.....	VIII
Appendice F.....	I
F.1. Braccio a due sezioni punto A.....	II
F.2. Braccio a due sezioni punto B.....	IV
F.3. Braccio a due sezioni punto C.....	VI
F.4. Braccio a due sezioni punto D	VIII
F.5. Braccio a due sezioni punto E.....	X
F.6. Braccio a due sezioni punto F	XII
F.7. Braccio a due sezioni punto G.....	XIV
F.8. Braccio a tre sezioni punto A	XVI
F.9. Braccio a tre sezioni punto B	XVIII
F.10. Braccio a tre sezioni punto C.....	XX
F.11. Braccio a tre sezioni punto D	XXII
F.12. Braccio a tre sezioni punto E.....	XXIV
F.13. Braccio a tre sezioni punto F.....	XXVI

F.14. Braccio a tre sezioni punto G XXVIII

1. Introduzione

Nella costruzione di strutture meccaniche una delle questioni più complesse per i progettisti è il dimensionamento dei giunti saldati. I giunti saldati permettono la creazione di collegamenti stabili e permanenti tra componenti differenti introducendo una continuità di materiale. Si tratteranno connessioni saldate che rispettano la definizione data nella normativa europea riguardante gli apparecchi di sollevamento [1], quindi connessioni tra componenti con spessore maggiore o uguale a 3mm ottenute tramite processi di saldatura a fusione. Esistono molte tipologie di giunto saldato, di cui le principali sono state studiate a fondo con il fine di ottenere una progettazione sicura e senza sovradimensionare i cordoni. La maggior parte di esse si può dividere in due grandi famiglie, come viene fatto dalla normativa europea generica per le strutture meccaniche [2], *butt welds* e *fillet welds*. *Butt welds* sono i giunti saldati a completa penetrazione, mentre *fillet welds* sono i giunti saldati con cordoni ad angolo e senza la completa penetrazione. Due esempi di queste categorie sono osservabili nella figura 1.1. I giunti con cordoni ad angolo sono una tipologia di saldatura molto diffusa nelle applicazioni industriali per la maggior rapidità del processo di preparazione dei pezzi da saldare e dell'esecuzione della saldatura stessa.

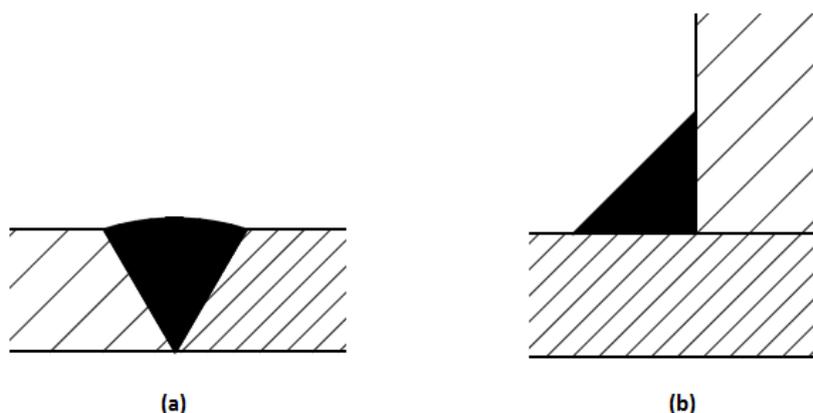


Figura 1.1 Illustrazioni delle due principali tipologie di giunto saldato: a completa penetrazione (a), con cordone ad angolo (b).

Questa Tesi di Laurea Magistrale è stata sviluppata all'interno dell'azienda Merlo Project S.r.l. Lo scopo è quello di studiare quantitativamente gli effetti benefici di rinforzo che si possono ottenere cambiando le tipologie di saldatura tra due componenti in acciaio di Classe di Rischio 1. Queste proposte di variazione devono essere compatibili con lo stato dell'arte attuale del processo produttivo della Merlo S.p.a. La classe di rischio è definita nella normativa europea [3] e la classe di rischio 1 identifica i particolari che se vanno a rottura possono causare gravi danni a beni e a persone, all'interno della loro area di lavoro. I due componenti osservabili in figura 1.2 sono la testata e il braccio di alcune delle macchine telescopiche di sollevamento prodotte dall'azienda. A causa di geometria dei componenti, di tempi e di metodi di produzione si adotta

un giunto saldato con cordone ad angolo sulla sola superficie esterna del braccio. Il cordone si estende lungo tutto il perimetro dello stesso. Questo giunto viene sollecitato in particolare modo quando alla zattera agganciata alla testata viene montata una pala e quest'ultima viene utilizzata per scavare. Questo non è il classico utilizzo di attrezzature per il sollevamento ma le macchine telescopiche spesso sono utilizzate dai clienti in questo modo e quindi è un'esigenza dell'azienda quella di mantenere elevati livelli di qualità e sicurezza dei componenti anche in questo caso. Questa è la peggior condizione di carico in cui si possa far lavorare testate e bracci dei sollevatori telescopici. Condizione di carico che quindi verrà utilizzata in questo documento per analizzare gli stati di tensione. Per aumentare i margini di durata e sicurezza del giunto saldato mentre si utilizza la pala per lo scavo si vuole studiare se è possibile introdurre sistemi di rinforzo senza travolgere il processo produttivo. Quindi i componenti di base, la loro numerosità ed in generale il processo produttivo non potrà variare di molto. Questi sistemi di rinforzo verranno poi paragonati tra loro e con lo stato attuale dell'arte per capire se introducono benefici apprezzabili o meno. Inoltre, tra i sistemi di rinforzo che portano vantaggi a livello strutturale si vuole capire quali sono i più efficaci.

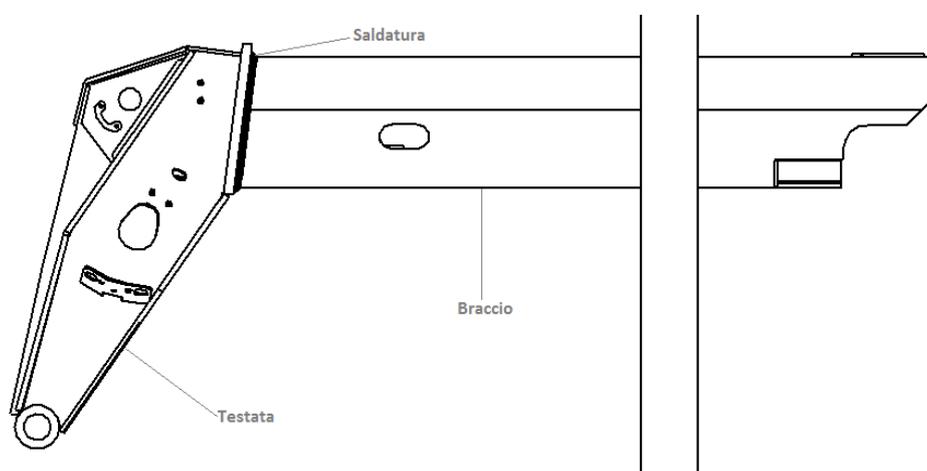


Figura 1.2 Ultima sezione del braccio di sollevamento del MF 34.7 finito.

Come primo passo si sono definiti dei provini di geometria semplificata. Su questi si è potuta sviluppare un'approfondita analisi di alcuni sistemi di rinforzo, sia attraverso dei modelli FEM che sperimentalmente. I modelli FEM si sono realizzati su due differenti piattaforme di Ansys: Mechanical APDL e Workbench. Si sono paragonati i risultati ottenuti dalle stesse in maniera tale da poter modellare nel miglior modo possibile la geometria reale dei componenti e dei possibili sistemi di rinforzo su Workbench. Workbench utilizza lo stesso solutore di Mechanical APDL ma ha un'interfaccia grafica più agevole per gli utenti inesperti che permette di effettuare un processo di preparazione del modello e consultazione dei risultati più rapidi. Con la licenza presente in azienda questa maggior rapidità si paga con l'impossibilità di controllare per esempio nella realizzazione della mesh con la stessa accuratezza di Mechanical APDL.

Il provino con il cordone di saldatura ad angolo su un solo lato è stato oggetto di analisi più approfondite perché quello con la geometria meno complessa e rappresentante la saldatura che si effettua in produzione attualmente. La caratteristica di minor complessità geometrica lo ha reso ideale per verificare l'applicazione delle normative europee [1] e [2], il confronto tra i modelli FEM e i dati sperimentali.

In letteratura si trovano normative, sperimentazioni e riferimenti molto chiari per quanto concerne le saldature ad angolo dei giunti a T, con i cordoni ad angolo su entrambi i lati. È quindi

molto interessante lo studio più approfondito dei giunti con il cordone situato solamente su di un lato. A causa dell'impossibilità di effettuare prove a fatica in azienda l'analisi si sono concentrate su prove di tipo statico a trazione. Le analisi a fatica dei giunti saldati sono un argomento complesso ma di estremo interesse per il mondo industriale che ho trovando un grande sviluppo recentemente, come descritto da Fricke [4]. Le prove con carico statico di trazione forniscono comunque delle indicazioni importanti sulla bontà dei modelli numerici e su come i sistemi di rinforzo differenti sono capaci di portare a differenti stati di tensione nel cordone di saldatura e nelle zone ad esso adiacenti.

L'analisi FEM statica del provino di riferimento è stata effettuata anche inserendo ipotesi di materiale elasto-plastico, al fine di verificare come variasse la distribuzione delle tensioni e capire se potessero coincidere con i risultati sperimentali ottenuti. Le stesse ipotesi sul materiale sono state impossibili da applicare sul modello realistico a causa della licenza limitata di Workbench presente in azienda e della potenza di calcolo limitata del PC utilizzato per le simulazioni esterne ad essa. Le analisi del modello di braccio e testata più simile alla realtà forniranno le indicazioni necessarie al fine di comprendere come rinforzare la saldatura studiata facendo riferimento a condizioni di vincolo corrispondenti a quelle dei bracci sulle macchine telescopiche. Le condizioni di carico sono invece quelle corrispondenti ai casi limite dell'applicazione delle macchine con una pala da scavo montata sulla zattera agganciata alla testata, utilizzata per scavare. Si applica quindi sulla pala la forza di tiraggio massima. Si otterranno allora delle indicazioni sui vantaggi nello stato delle tensioni che possono essere portati da un sistema di rinforzo rispetto ad un altro. Con queste informazioni sarà possibile determinare in azienda la soluzione ottimale mediando esigenze produttive e scelte tecniche.

Per i confronti tra tutte le simulazioni agli elementi finiti sono sempre state prese in considerazione le tensioni equivalenti calcolate con il criterio di Von Mises.

Si è anche intrapresa un'altra strada per determinare nella maniera più precisa possibile lo stato di tensione all'interno dei giunti saldati dei provini semplificati. In letteratura l'analisi del comportamento a fatica dei giunti saldati ha introdotto la necessità di ottenere con precisione lo stato di tensione nei punti dove potrebbe innescarsi una cricca, le zone più critiche del giunto saldato. Come descritto dall'International Institute of Welding [7] e nella figura 1.3 la tensione vicino ad un giunto saldato causata dall'intaglio è composta da:

- Tensione membranale: pari alla media delle tensioni calcolate lungo lo spessore della lamiera. σ_{mem}
- Tensione della piastra, del momento flettente: è distribuita linearmente lungo lo spessore della piastra. σ_{ben}
- Tensione non lineare di picco: formata dai rimanenti componenti di stress. σ_{nlp}

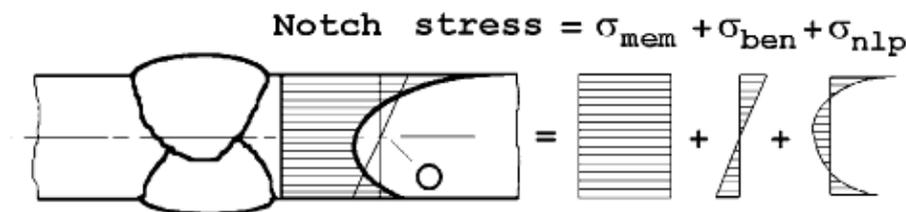


Figura 1.3 Figura 2.2-1a tratta da [7] che illustra le componenti della tensione nella zona d'intaglio.

Queste tre componenti sono ricavabili dalla distribuzione delle tensioni che si può ottenere con differenti metodi illustrati dalla tabella nella figura 1.4 a seconda dei differenti tipi di concentrazione degli sforzi considerati.

Type	Stress concentrations	Stress determined	Assessment procedure
A	None	Gross average stress from sectional forces, calculated using general theories, e.g. beam theory	Not applicable for fatigue analysis of joints, only for component testing
B	Macro-geometrical effects due to the design of the component, but excluding stress concentrations due to the welded joint itself.	Range of nominal stress (also modified or local nominal stress)	Nominal stress approach
C	B + structural discontinuities due to the structural detail of the welded joint, but excluding the notch effect of the weld toe transition	Range of structural hot-spot stress	Structural hot-spot stress approach
D	A + B + C + notch stress concentration due to the weld bead notches (a) actual notch stress (b) effective notch stress	Range of elastic notch stress (total stress)	(a) Fracture mechanics approach (b) Effective notch stress approach

Figura 1.4 Tabella 2.1-1a tratta da [7] sulle tipologie di concentrazione delle tensioni analizzate dalle diverse procedure.

Si può quindi affermare che il metodo più completo che tiene conto della maggior parte di effetti di variazione dello stato tensionale, tutti quelli citati in figura 1.4, sia quello dell'*effective notch stress*. Questo metodo rientra nella teoria elastica dei materiali per cui può diventare interessante confrontare i suoi risultati con quelli ottenuti con gli altri modelli FEM. L'*effective notch stress* è la tensione totale all'apice di un intaglio.

In genere, specialmente a fatica come descritto da Fricke [10], se la saldatura è stata effettuata in maniera appropriata le fratture si innescano o alla radice della saldatura sviluppandosi nella stessa o la piede della saldatura sviluppandosi nel componente che è stato saldato. Sempre nel documento [10] si indicano come principali metodi di valutazione della vita a fatica dei giunti saldati quelli basati su:

- *Tensione nominale*, la tensione calcolata trascurando le intensificazioni dovute a particolari strutturali o la saldatura.
- *Tensione strutturale*, la tensione che considera solo l'intensificazione dovuta alla geometria della struttura.
- *Tensione effettiva dell'intaglio* (effective notch stress), la tensione locale al piede o alla radice arrotondati della saldatura ipotizzando il materiale lineare elastico.
- *Fattore d'intensificazione degli sforzi*, usando i fattori d'intensificazione degli sforzi di un intaglio con apice a raggio zero.
- *Propagazione della cricca*, usando la legge di Paris per determinare la vita a fatica.

Come visto prima il metodo della tensione effettiva d'intaglio si conferma quello più utile ai nostri scopi. Permette di conoscere i valori di tensione locale su più punti di innesco della frattura nello stesso modello, con saldature e particolari di geometria complessa e non appartenente ai casi standard.

1.1. Riferimenti Normativi

Per i calcoli di tipo statico la normativa europea di riferimento per le costruzioni meccaniche è quella contenuta nell'Eurocode 3 [2]. Nel caso di giunti saldati a completa penetrazione come quello in figura 1.1.a staticamente si dimensionano ipotizzando la continuità di materiale. Se la saldatura viene effettuata rispettando gli standard qualitativi le proprietà meccaniche del materiale si ipotizzano pari a quelle del materiale di base dei componenti giuntati.

Quando i giunti saldati sono con un cordone ad angolo e senza penetrazione viene utilizzata la seguente procedura. Si definisce come a l'altezza di gola, ovvero l'altezza del più grande triangolo iscrivibile tra la superficie esterna del cordone e i componenti che vengono saldati, misurata perpendicolarmente al lato esterno. Si dice piede del cordone p della saldatura la lunghezza del lato del cordone aderente alla lamiera saldata. Se il cordone è simmetrico, i due piedi della saldatura sono lunghi uguali e le lamiere sono posizionate perpendicolarmente tra loro, si può affermare che $a = p/\sqrt{2}$. La lunghezza effettiva l viene in genere approssimata come la lunghezza del cordone saldato meno due volte a . La sezione del cordone di saldatura che passa per a e per l'apice della saldatura si chiama sezione di gola. Si dividono le tensioni in normali e parallele a questa sezione. Le forze possono essere scomposte nelle direzioni perpendicolari e parallele alla sezione di gola applicando le regole della trigonometria. Si calcola quindi una tensione equivalente in questa sezione, la quale dovrà essere minore di una tensione ammissibile. La tensione ammissibile dipende dalla resistenza del materiale, scelta come la resistenza minore tra quelle dei componenti saldati, corretta con alcuni coefficienti per dimensionare il cordone di saldatura in sicurezza.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)}$$

Dove:

σ_{\perp} = Tensione normale perpendicolare all'asse del cordone sulla sezione di gola.

τ_{\perp} = Tensione tangenziale perpendicolare all'asse del cordone sulla sezione di gola.

τ_{\parallel} = Tensione tangenziale parallela all'asse del cordone sulla sezione di gola.

Nel caso di un cordone di saldatura ad angolo senza penetrazione come in figura 1.5, i cui piedi sono lunghi uguali e la lamiera e la piastra sono avvicinate in posizione perpendicolare tra loro, trascurando l'eccentricità provocata dal fatto che la saldatura non è in asse con la superficie su cui viene applicata la forza, si ottiene la seguente formula:

$$(1.1) \quad \sigma_{eq} = \frac{F\sqrt{2}}{l a}$$

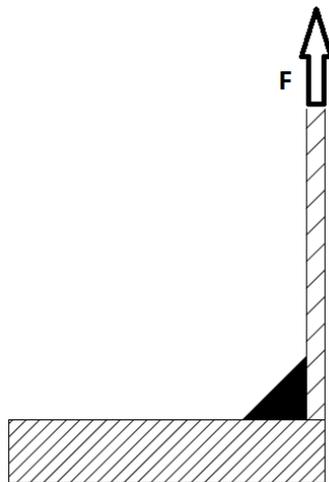


Figura 1.5 Esempio di forza su un giunto con saldatura ad angolo senza penetrazione

La normativa europea degli apparecchi di sollevamento [1] si ispira all'Eurocode 3 [2] ma ne semplifica l'applicazione tenendosi dalla parte della sicurezza, essendo gli apparecchi di sollevamento macchine che rappresentano grandi pericoli per beni e persone in caso di guasti, specialmente cedimenti di tipo meccanico. Lo spessore effettivo a e la lunghezza effettiva l sono

definite allo stesso modo dell'Eurocode 3 [2]. Però nella normativa stessa si invita a trascurare l'eccentricità e quindi a non variare la formula nel caso di saldatura su di un solo lato della lamiera. Vengono però definiti in maniera differente i coefficienti correttivi alla tensione ammissibile, per evitare snervamento e/o rottura. La tensione equivalente viene calcolata con la seguente formula semplificativa facendo riferimento ad un caso come quello in figura 1.5 e corrisponde alla tensione normale su un'area ottenuta ribaltando la tensione di gola sul piede della saldatura perpendicolare alla forza di trazione illustrata.

$$(1.2) \quad \sigma_{eq} = \frac{F}{l a}$$

1.2. Tensione effettiva dell'intaglio (Effective notch stress)

Leggendo le indicazioni di W. Fricke [10], [11] e [12] si può applicare nella maniera più corretta possibile questo metodo creato per determinare la vita a fatica di giunti saldati e nell'ambito di questa tesi per avere una stima ragionevole della tensione effettiva all'apice dell'intaglio. Quest'approccio permette di prendere in considerazione l'intensificazione locale della tensione elastica dovuta alla forma della saldatura. Teoricamente essendo il raggio d'intaglio del difetto pari a 0mm per essere cautelativi, la tensione elastica tenderebbe ad infinito. Questo valore non ha alcun significato fisico. Per avere una stima realistica della tensione effettiva si può utilizzare l'approccio dell'arrotondamento dell'apice dell'intaglio. Questo approccio è basato sull'idea di ridurre la tensione nell'intaglio allargando il raggio d'intaglio nel modello per il calcolo. La formula per determinare il raggio fittizio è la seguente:

$$\rho_f = \rho + s \rho^*$$

Dove:

ρ_f = Raggio fittizio.

s = Fattore per la tensione multi-assiale.

ρ^* = Lunghezza microstrutturale sostitutiva.

Ipotizzando in maniera cautelativa che il raggio reale sia pari a 0mm sul documento [12] si può leggere come per gli acciai il raggio fittizio sia pari a 1mm come assunto da Radaj [13] per i componenti di spessore maggiore a 5mm. Al di sotto di questo spessore delle strutture saldate il raggio di 1mm può avere un'influenza troppo grande sull'andamento delle tensioni e quindi si utilizza un raggio pari a 0,05mm. In figura 1.6 è presente un esempio di come si modellano le saldature angolari senza penetrazione per l'applicazione di questo approccio su FEM. La lunghezza delle facce non saldate è conservata posizionando l'apice della saldatura sulla circonferenza usata per lo scavo, di raggio 1mm.

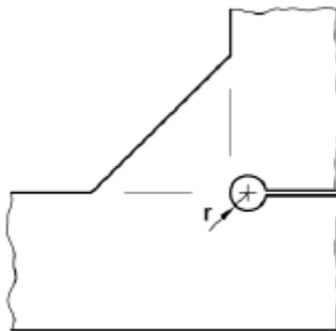


Figura 1.6 Arrotondamento esempio dell'apice dell'intaglio, figura tratta dal documento [10]

Il calcolo della tensione d'intaglio si effettua solitamente con una simulazione con il metodo agli elementi finiti. L'analisi si svolge in campo lineare elastico e la mesh deve seguire alcune raccomandazioni. Ad esempio, con l'utilizzo di elementi con funzioni di forma quadratiche la dimensione caratteristica degli elementi nella zona d'intaglio deve essere al massimo pari ad un quarto del raggio fittizio. Nei casi trattati in questo documento deve essere minore di 0,25mm.

Quindi si può ottenere, applicando i carichi ed i vincoli opportuni, il valore della tensione effettiva d'intaglio per qualsiasi tipologia di giunto saldato. Li possono effettuare simulazioni con qualsiasi configurazione geometrica, permettendo lo studio contemporaneo dell'innescio di fratture che possono partire sia dal piede del cordone di saldatura che dalla radice dello stesso.

2. Modello base

Per prima cosa si è scelto di analizzare un giunto saldato di geometria semplice ai fini di testare e confrontare tra loro simulazioni FEM su Ansys effettuati con Mechanical APDL e con Workbench. I risultati delle simulazioni verranno confrontati con le normative europee di riferimento [1] e [2]. Queste analisi e le indicazioni da esse ricavabili saranno utili nel momento in cui si modelleranno altre tipologie di saldatura ed i componenti reali.

2.1. Confronto tra APDL e Workbench

Durante lo svolgimento dell'attività di tesi in azienda si è utilizzato come programma di riferimento per le analisi FEM Ansys Workbench. La licenza che è stata messa a disposizione consente di effettuare analisi statiche di tipo lineare, in campo elastico lineare del materiale. Questa piattaforma ha il vantaggio di semplificare molto le fasi di preparazione dei modelli e di elaborazione delle soluzioni grazie a comandi grafici intuitivi ed immediati. Possiede in oltre un elevato livello d'integrazione con il programma di modellazione CAD utilizzato in azienda, Solid Edge. Queste sole due caratteristiche sono di sufficienti per giustificare il suo impiego in ambito industriale perché permettono di risparmiare molto tempo nelle fasi che tengono più impegnati gli utenti di Ansys Mechanical APDL. Le fasi di preparazione del modello e quelle di consultazione dei risultati. Il tempo di soluzione non varia ma è un'azione che può avvenire senza la supervisione di un operatore. Mechanical APDL presenta però il vantaggio di lasciare in mano all'utente maggior capacità di controllo sulla scelta degli elementi da impiegare, della geometria degli elementi della mesh e in tutte le altre fasi del processo di simulazione FEM. Questo controllo maggiore permette una maggiore sicurezza della bontà dei risultati in quanto più semplice individuare gli errori.

Si è quindi utilizzato Workbench in azienda per la maggior parte del lavoro svolto, ma per verificarne l'affidabilità dei risultati è stato confrontato con Mechanical APDL, utilizzato in ambito accademico presso il Politecnico di Torino. Per utilizzarli nel migliore dei modi si è sempre fatto riferimento alla guida [5].

2.1.1. Definizione del modello base

Per prima cosa si è definita la geometria del modello base, che farà da riferimento per le successive analisi. Si è modellato un giunto saldato con cordone ad angolo su di un lato della lamiera verticale, senza alcuna penetrazione. Nella figura 2.1 si può anche notare che al fine di garantire la presenza di nodi lungo il piano che la normativa europea [2] definisce sezione di gola si è suddiviso il cordone in due volumi distinti lungo ad essa. La lamiera verticale è sottile, e rappresenta un tratto rettilineo di una delle due lamiere piegate a C che compongono il braccio. La piastra orizzontale è invece rappresentativa della piastra della testata che viene saldata sul braccio. Da quest'ultima eredita lo spessore, come avviene anche per la lamiera descritta in precedenza. Si tratta per entrambi i casi di componenti in acciaio alto-resistenziale. Lungo l'asse perpendicolare alla sezione della figura. 2.1 l'estensione è fissa tra i vari modelli, ma non è rilevante in questa fase di analisi preliminare. Questa estensione è stata comunque scelta di un

valore sufficientemente ampio da poter paragonare le sezioni centrali alle condizioni al contorno di deformazione piana.

Il modello viene posto in trazione applicando un carico uniforme sulla superficie superiore della lamiera più sottile. Viene invece imposto un vincolo d'incastro fisso sulla superficie inferiore della piastra di spessore maggiore. Queste condizioni di carico e di vincolo se non diversamente specificato valgono per tutte le simulazioni compiute sui modelli dei provini in questo documento. Anche spessore della lamiera, spessore della piastra e lunghezza del piede del cordone di saldatura vengono mantenuti costanti.

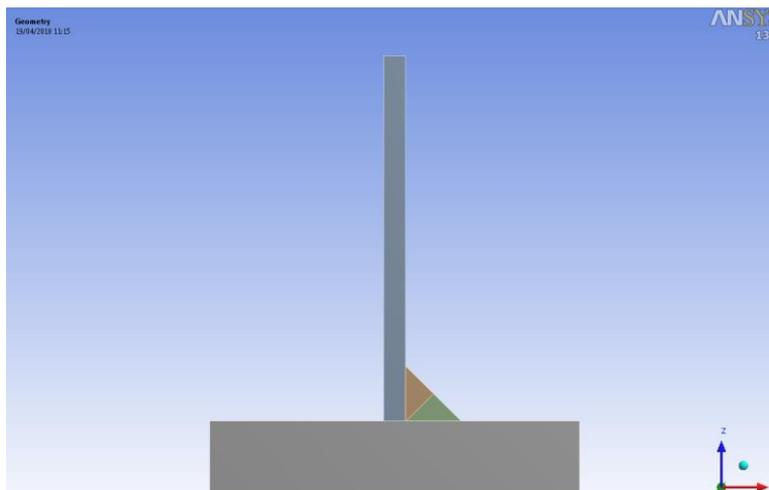


Figura 2.1 Sezione costante del modello base.

2.1.2. Analisi preliminare su Workbench

Il modello base è stato quindi utilizzato su Workbench per capire come perfezionare i risultati ottenuti con questa versione di Ansys intervenendo sulla preparazione della mesh e dei contatti variandone i parametri di controllo con il supporto della guida [5]. In tutte le casistiche presentate di seguito i contatti rimarranno gli stessi: tutte connessioni di tipo legato (*bonbed*) tra i vari volumi lungo le superfici di contatto. Fa eccezione la zona di contatto tra lamiera e piastra in cui la connessione viene soppressa perché vogliamo simulare una saldatura con penetrazione nulla. Non è necessario utilizzare contatti di tipo speciale perché a trazione queste due superfici non interagiscono tra loro, si allontanano e basta senza scambiare forze.

Metodo per creare la mesh

Tra le prime scelte che si possono effettuare c'è quella del metodo con cui creare la mesh. Il metodo a sua volta dipende dal tipo di elementi scelti e/o li impone. Di base il programma sceglie automaticamente in base alla geometria dei componenti il metodo di discretizzazione, ma così facendo crea degli elementi tetraedrici nei due volumi che compongono il cordone. Per ottenere degli elementi solidi parallelepipedi è necessario forzare la mesh con il metodo *sweep*. Vengono quindi creati elementi parallelepipedi a venti nodi con un nodo nelle zone centrali dei lati e otto vertici.

Analizzando i risultati riportati in figura 2.2 si può notare come lungo la stessa sezione del piano di gola si ottengano andamenti della tensione equivalente molto più regolari con gli elementi parallelepipedi a venti nodi rispetto a gli elementi tetraedrici. Questo confronto è effettuato a parità di dimensioni caratteristiche degli elementi. Fatto dimostrato dalla teoria degli elementi finiti [6], a causa delle funzioni di forma e delle loro derivate di ordine inferiore che possono introdurre maggiori discontinuità negli elementi tetraedrici rispetto a quelli parallelepipedi a

venti nodi. L'andamento della percentuale della tensione equivalente in particolare differisce nella zona a gradiente assoluto maggiore. Si ha il valore di picco della tensione equivalente alla radice della saldatura, dove si ha una zona d'intaglio a raggio teoricamente uguale a 0mm e a coordinata X=0mm.

Si può quindi concludere che dove è possibile, dove i volumi sono *sweepable*, è consigliabile forzare in questo modo il processo di creazione della mesh, in maniera tale da ottenere una maggiore precisione dei risultati.

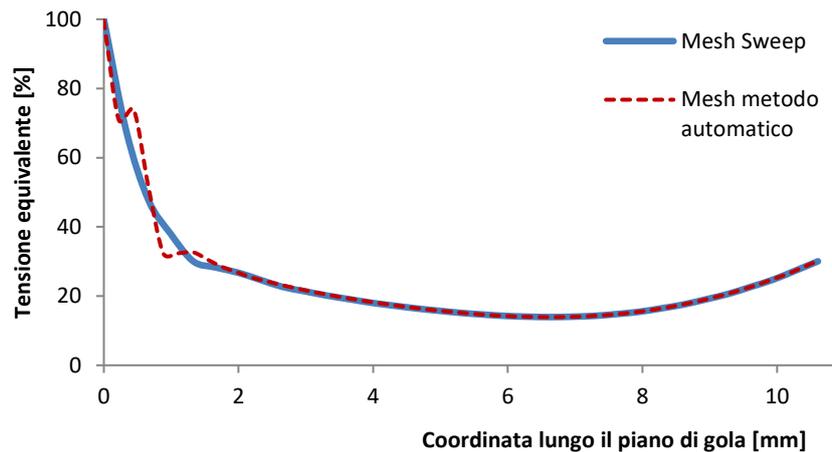


Figura 2.2 Grafico dell'andamento della tensione equivalente in percentuale lungo una sezione del piano di gola, a metà del modello, con due mesh di tipo differente.

Sizing della mesh

Si è quindi posta l'attenzione in maniera più precisa su dove andassero a ricadere i nodi della mesh. In particolare i nodi appartenenti al cordone di saldatura rispetto a quelli della lamiera e a quelli della piastra lungo i contatti.

Sul modello base si sono quindi create tre differenti mesh paragonabili tra loro. Le prime due mesh in figura 2.3 lungo le zone di contatto possiedono la stessa dimensione caratteristica degli elementi ma nella (a) i nodi del cordone allo stato indeformato si trovano in posizione coincidenti ai nodi della lamiera e della piastra. Questo si è ottenuto effettuando un dimensionamento dei lati degli elementi che formano i bordi dei volumi del modello. La mesh in figura 2.4 come la mesh della figura 2.3 (b) non pone attenzione al posizionamento relativo dei nodi dei differenti volumi, il sizing è fatto sulle intere zone di contatto. Essa però è più fitta nelle zone adiacenti alle zone di contatto. Ciò per ottenere a parità di tempo di calcolo un minore errore percentuale nella zona d'interesse maggiore.

Osservando la figura 2.5 si può notare come nella zona di maggiore valore assoluto del gradiente dell'andamento di tensione equivalente le tre differenti mesh portano ad andamenti più o meno regolari. La mesh con i nodi in posizione coincidente nell'indeformata si dimostra quella dagli andamenti tensionali più regolari, con meno oscillazioni.

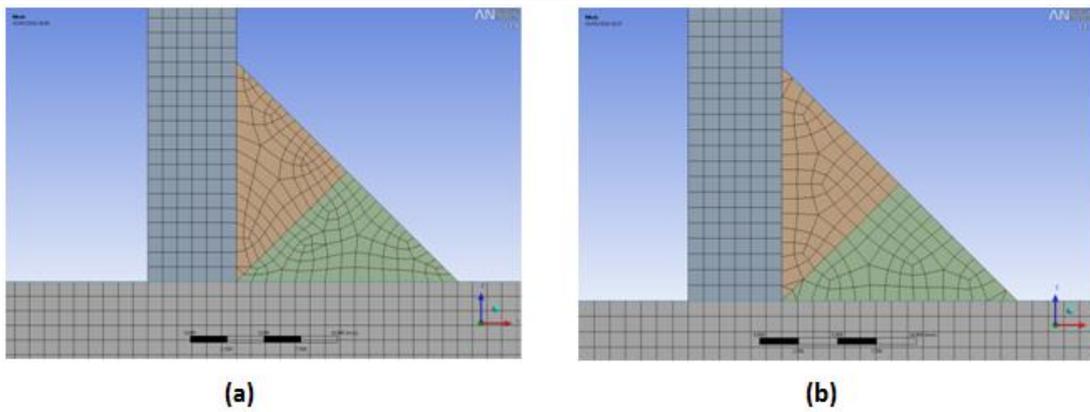


Figura 2.3 Vista frontale di mesh ottenuta con il sizing dei bordi (a) e quello dei contatti (b).

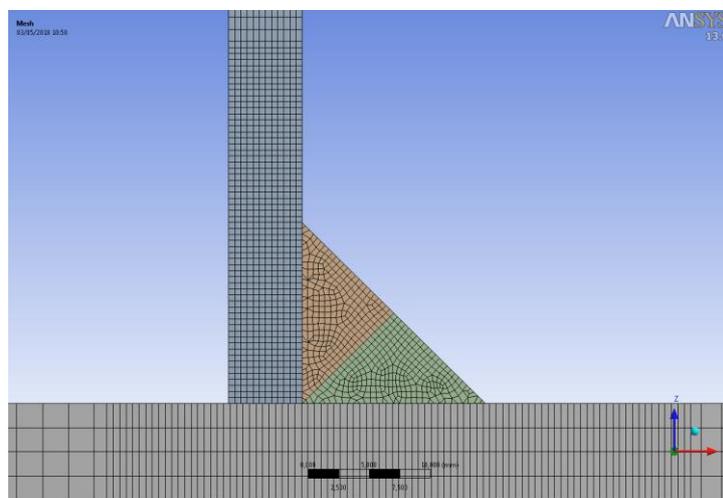


Figura 2.4 Vista frontale di una mesh ottenuta con il sizing dei contatti in modo tale da essere molto fitta nella zona d'interesse.

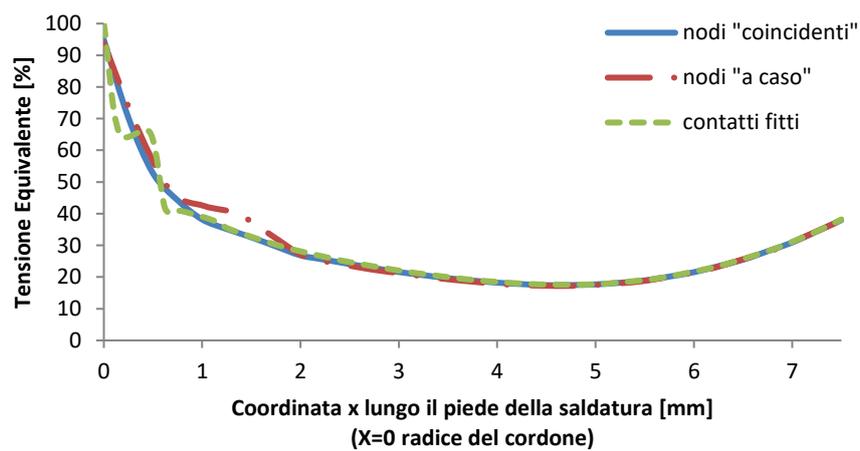


Figura 2.5 Grafico dell'andamento della tensione equivalente in percentuale lungo una sezione del piano di gola, a metà del modello, con tre mesh di tipo differente.

Esaminando la figura 2.6 si può notare dalle deformate come quando nella mesh i nodi vengono posizionati in maniera automatica e disordinata (a) lungo la superficie di contatto si ottengano

strani andamenti. Si tratta d'intensificazioni di tipo periodico lungo l'asse Y, asse parallelo all'asse di saldatura. Queste potrebbero essere causate da come il modello gestisce le connessioni. Gli elementi contatto sui punti d'integrazione delle superfici all'interfaccia dei volumi a causa di un intaglio perfettamente acuto, a raggio 0mm, potrebbero non riuscire a gestire localmente la grande intensificazione delle tensioni equivalenti. La figura 2.6 (b) fa notare in contrapposizione come il collocamento dei nodi in maniera ordinata lungo il contatto previene questi effetti d'irregolarità delle tensioni equivalenti lungo l'asse di saldatura. I nodi in posizioni corrispondenti portano ad avere allineati anche i punti d'integrazione su cui vanno ad agire i contatti. I contatti vanno a creare degli elementi molla tra i nodi degli elementi e se questi ultimi non sono perfettamente allineati nelle zone di contatto con forti intensificazioni delle tensioni si possono creare questi andamenti periodici di discontinuità.

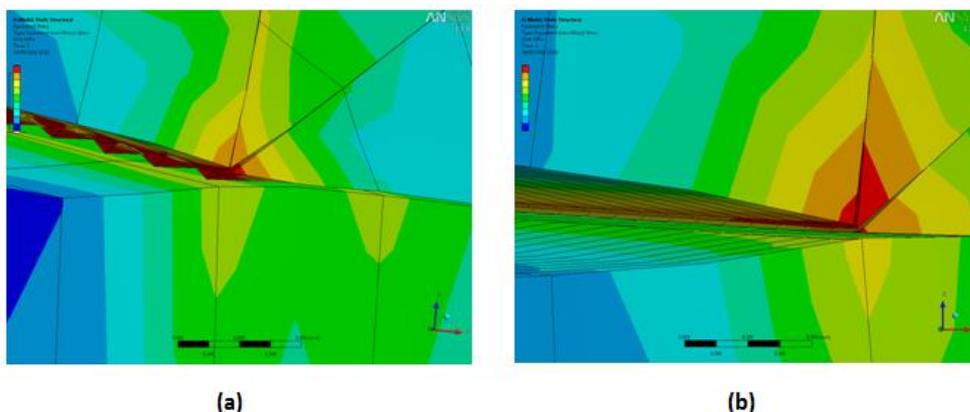


Figura 2.6 Zoom del plot delle tensioni equivalenti sulla deformata in caso di mesh (a) con i nodi disordinati e (b) con i nodi posizionati in maniera controllata.

Modello per i successivi confronti

Seguendo le indicazioni raccolte con le simulazioni presentate nei paragrafi precedenti si è quindi creato un modello su cui poter fare riferimento per i confronti successivi. La dimensione degli elementi è tale da mantenere il rapporto tra errore energetico strutturale ed energia di deformazione minore del 7% sugli elementi. I nodi sono stati posizionati in maniera ordinata e si è scelto il metodo *sweep* per la mesh, ottenendo quanto illustrato dalla figura 2.7.

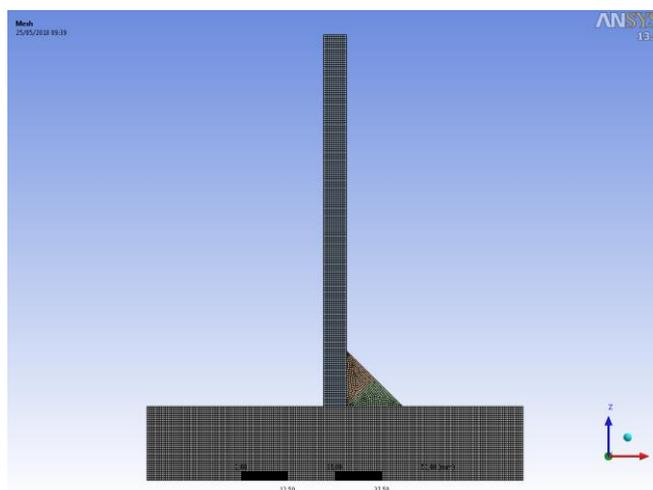


Figura 2.7 Mesh del modello che verrà utilizzato come riferimento.

Si è quindi anche avviata la simulazione con gli stessi vincoli e carichi che sono stati definiti nel paragrafo 2.1.1 e che verranno utilizzati in tutto questo capitolo, se non viene specificato diversamente.

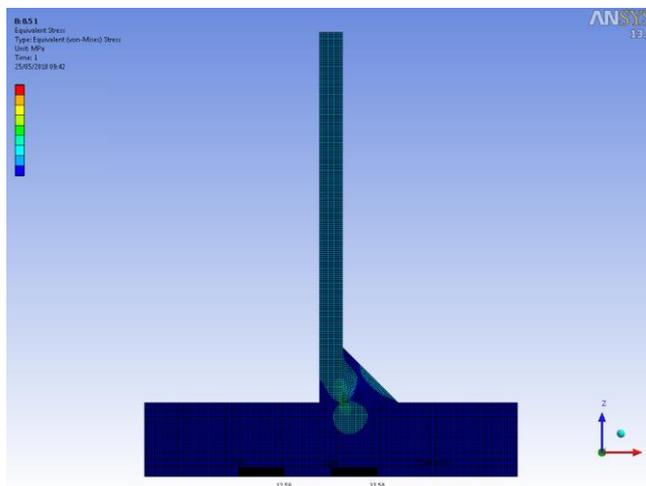


Figura 2.8 Plot sull'indeformata delle tensioni equivalenti del modello di riferimento di Workbench.

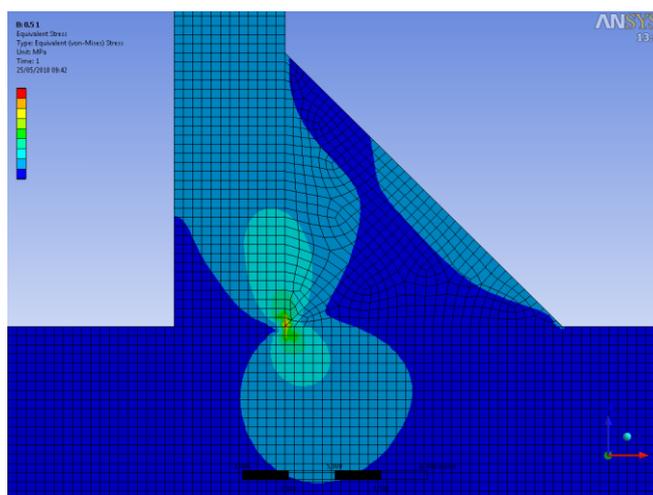


Figura 2.9 Zoom del plot sull'indeformata delle tensioni equivalenti del modello di riferimento di Workbench nella zona d'interesse.

Analizzando le figure 2.8 e 2.9 si può notare che nel caso di un giunto con il cordone angolare di saldatura senza penetrazione sembrerebbe che la zona di snervamento e rottura in caso di carichi più elevati di quelli limite è la radice della saldatura. Le curve ad isotensione hanno gli andamenti tipici riscontrabili nella meccanica della frattura lineare elastica nel caso di presenza di un intaglio con un raggio all'apice pari a 0mm.

2.1.3. Analisi preliminare su APDL

Si è quindi utilizzata la piattaforma su cui si ha più facilmente il controllo su tutti i parametri della simulazione FEM. Si è deciso di procedere per gradi, sviluppando prima dei modelli piani e successivamente dei modelli tridimensionali corrispondenti. I modelli piani sono stati sviluppati sia con le ipotesi di tensione piana che di deformazione piana per poi confrontarli rispettivamente con la sezione superficiale e la sezione centrale del modello tridimensionale. Il

modello tridimensionale possiede un'estensione tale da poter affermare con sicurezza che è realistico supporre valide le condizioni di deformazione piana. I carichi ed i vincoli applicati sono gli stessi carichi e vincoli definiti nel paragrafo 2.1.1 per i modelli utilizzati per le simulazioni su Workbench.

Modelli Piani

Per prima cosa si è ricreato lo stesso profilo della geometria che è stata utilizzata nel paragrafo 2.1.1. Si sono organizzate le aree come illustrato dalla figura 2.10, mantenendo la separazione lungo il piano di gola del cordone per garantire la presenza di nodi lungo ad esso, da utilizzare per confronti sugli andamenti delle tensioni equivalenti. Le divisioni in tre aree del profilo della piastra spessa ed in due della lamiera sottile sono state create per poter ingrandire la mesh nelle zone lontane dal cordone di saldatura e quindi creare un modello più efficiente perché con meno nodi in zone dalla geometria più regolare. Ha senso utilizzare un modello piano perché la geometria è ottenuta estrapolando la sezione in figura 2.10 perpendicolarmente al piano XY. Inoltre i carichi sono composti solamente da una forza in direzione Y, che a causa dell'eccentricità della saldatura provoca un momento nel piano XY. Le linee che sono sovrapposte, a confine tra le varie aree, dovranno possedere nodi coincidenti tra loro. Questa caratteristica serve a garantire il corretto funzionamento della funzione NUMMRG, che sostituisce con un'unica entità due o più entità sovrapposte. Nel nostro caso si utilizza per i keypoints coincidenti e per i nodi sui bordi condivisi dalle aree ad eccezione per quello tra l'area 2 viola e l'area 5 rosa in figura 2.10. Questo bordo non viene incluso nella funzione di NUMMRG perché vogliamo simulare un giunto con saldatura ad angolo con penetrazione nulla. Incluso questo bordo si otterrebbe il modello di una saldatura ad angolo con completa penetrazione.

Si sono testate due tipologie di elementi: i PLANE42 ed i PLANE82. I PLANE42 sono elementi piani, quadrangolari a quattro nodi, mentre i PLANE82 sono elementi sempre quadrangolari, ma con otto nodi (quattro nei vertici e quattro a metà dei lati). I PLANE42 sono stati utilizzati con le extrashapes attivate in maniera tale da raggiungere la convergenza della soluzione con minor numero di elementi e nodi possibile grazie ad un drogaggio delle funzioni di forma. I PLANE42 senza extrashapes hanno funzioni di forma del primo ordine mentre i PLANE82 di secondo. Entrambe le tipologie di elemento sono state testate sia in condizioni di tensione piana per simulare la superficie esterna del modello tridimensionale, che in condizioni di deformazione piana per simulare una sezione interna del modello tridimensionale. Gli elementi PLANE di default hanno attive le condizioni di tensione piana, per la deformazione piana bisogna impostare la terza keyoption al valore 2.

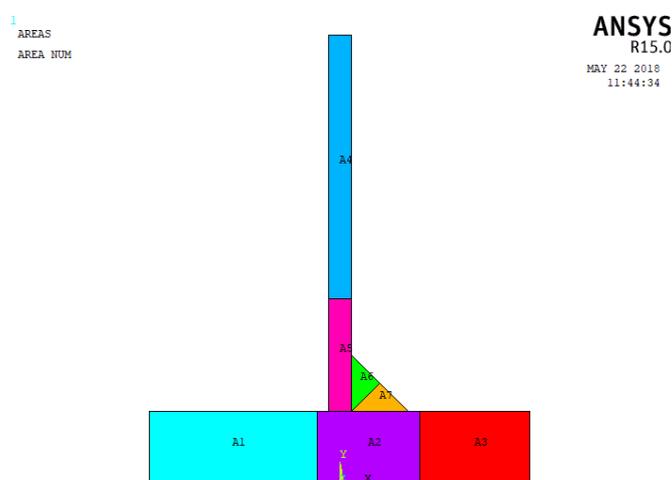


Figura 2.10 Divisione in aree per il modello piano su APDL.

Tabella 2.1 Valori del PRERR al variare della mesh con elementi PLANE42 in tensione piana per PRERR 1, in deformazione piana per PRERR 2; con elementi PLANE82 in tensione piana PRERR 3, in deformazione piana PRERR 4.

a [mm]	b [mm]	PRERR 1	PRERR 2	PRERR 3	PRERR 4
1,50	2,00	16,21	16,23	20,25	20,29
1,00	2,00	13,12	13,13	16,58	16,58
0,75	2,00	11,67	11,69	14,22	14,21
0,50	2,00	9,27	9,28	11,47	11,45
0,50	1,00	9,53	9,53	11,80	11,80
0,25	1,00	6,35	6,34	8,20	8,18
0,25	0,75	6,42	6,43	8,30	8,30

Si è controllata la generazione della mesh attraverso il comando LESIZE, determinando come effettuare le divisioni dei vari lati delle aree in figura 2.10. Sono stati utilizzati due parametri chiamati *a* e *b*. Il parametro *a* rappresenta la lunghezza dei lati di un elemento situato nelle zone in cui la mesh è più fitta, nelle vicinanze del cordone di saldatura. Il parametro *b* al contrario rappresenta la lunghezza massima del lato degli elementi nelle zone più lontane dal cordone di saldatura, e quindi con una mesh meno fitta. Si è cercato di rendere il più regolare possibile il passaggio da un'area all'altra, ponendo l'attenzione ad assicurare che i nodi sulle linee di contatto fossero sovrapposti perfettamente per non avere problemi con la funzione NUMMRG.

Cambiando il valore di questi due parametri si è verificato come variava il PRERR, indicatore dell'errore globale del modello, riportando i risultati nella tabella 2.1. Osservando questi valori è possibile comprendere quale sia il modello migliore ottenibile entro ai limiti tecnici del PC utilizzato per le simulazioni in termini di memoria e velocità di calcolo. Si può notare che solitamente il valore del PRERR si abbassa al diminuire dei parametri di dimensione degli elementi, ovvero all'aumentare della numerosità degli elementi nella mesh. A parità di suddivisione della mesh e tipo d'elemento con le ipotesi di tensione piana i valori del PRERR hanno differenze trascurabili da quelli con le ipotesi di deformazione piana, essendo un parametro che dipende fortemente dalla geometria.

Considerando il livello di precisione con cui si conoscono i dati del problema, i tempi di calcolo dei vari modelli e i valori del PRERR, si sono individuati come migliori gli elementi PLANE42 con extrashapes. Le combinazioni di *a* e *b* ritenute interessanti sono due: $a=0,50\text{mm}$ e $b=2\text{mm}$; $a=0,25\text{mm}$ e $b=1\text{mm}$.

Si possono quindi esaminare i risultati ottenuti con la mesh in figura 2.11, ottenuta con $a=0,50\text{mm}$ e $b=2\text{mm}$. La deformata e la tensione equivalente sono presentate nelle figure 2.12, 2.13, 2.14 e 2.15. Si osserva che le differenze tra tensione e deformazione piana non sono molto accentuate. Le tensioni equivalenti in condizioni di tensione piana sono di poco superiori alle tensioni equivalenti in condizioni di deformazione piana. I carichi e i vincoli utilizzati sono gli stessi che sono stati definiti nel paragrafo 2.1.1.

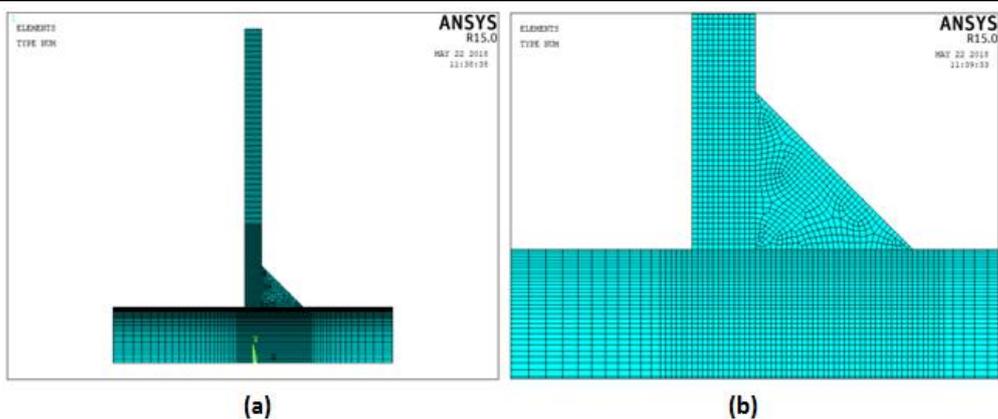


Figura 2.11 Mesh con elementi PLANE42 $a=0,5\text{mm}$ $b=2\text{mm}$ (a) e lo zoom nella zona del cordone di saldatura (b).

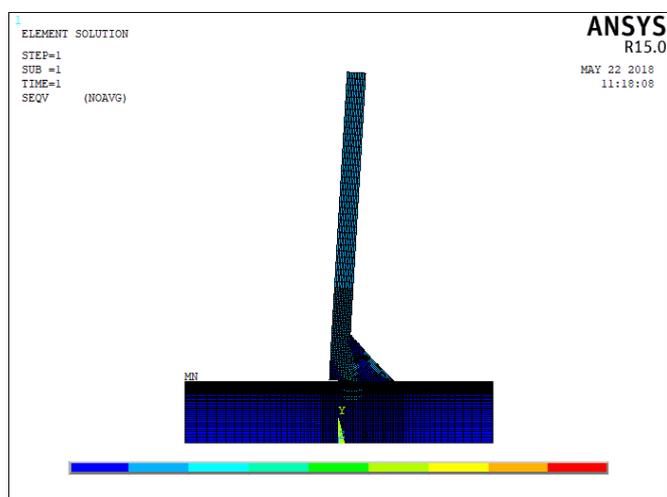


Figura 2.12 Deformata con tensioni equivalenti elementi PLANE42 $a=0,5\text{mm}$ $b=2\text{mm}$, tensione piana.

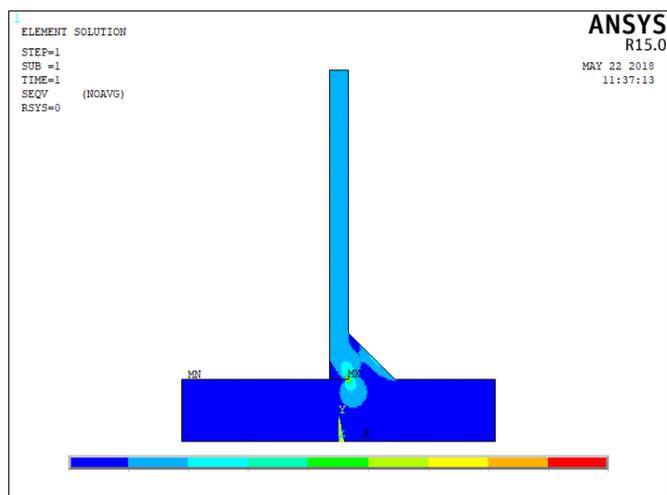


Figura 2.13 Tensione equivalente elementi PLANE42 $a=0,5\text{mm}$ $b=2\text{mm}$, tensione piana.

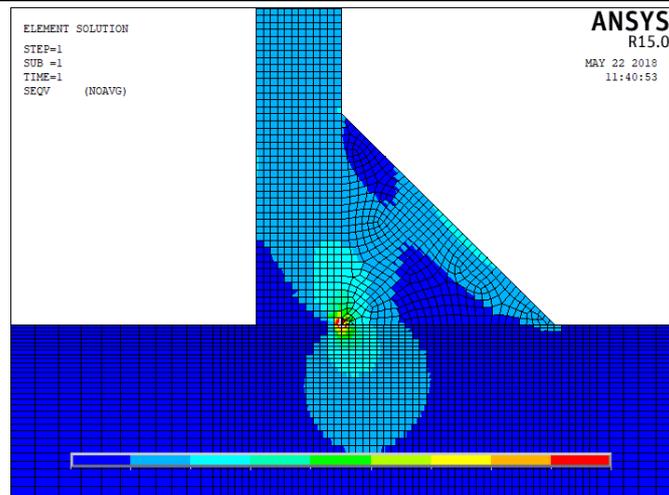


Figura 2.14 Zoom saldatura, tensione equivalente elementi PLANE42 $a=0,5\text{mm}$ $b=2\text{mm}$, tensione piana.

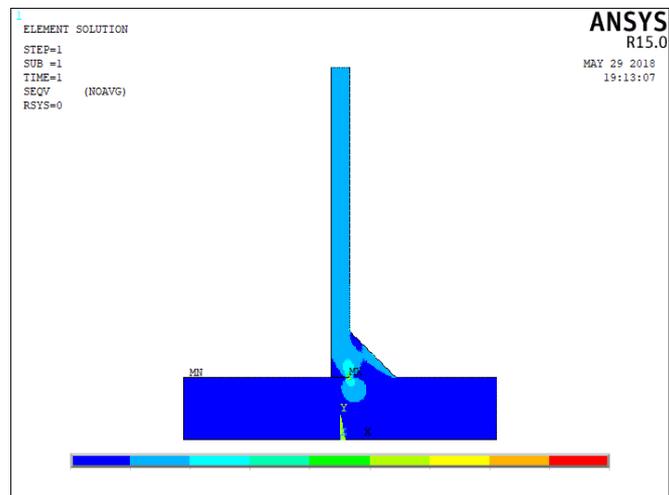


Figura 2.15 Tensione equivalente elementi PLANE42 $a=0,5\text{mm}$ $b=2\text{mm}$, deformazione piana.

Vengono poi esaminati i risultati ottenuti con la mesh più fitta delle due scelte, ottenuta con $a=0,25\text{mm}$ e $b=1\text{mm}$. La tensione equivalente è presentata nelle figure 2.16, 2.17e 2.18. Si possono nuovamente fare le stesse osservazioni fatte in precedenza: le differenze nei risultati tra le condizioni di tensione e deformazione piana non sono molto accentuate. In condizioni di tensione piana le tensioni equivalenti sono di poco superiori alle tensioni equivalenti in condizioni di deformazione piana.

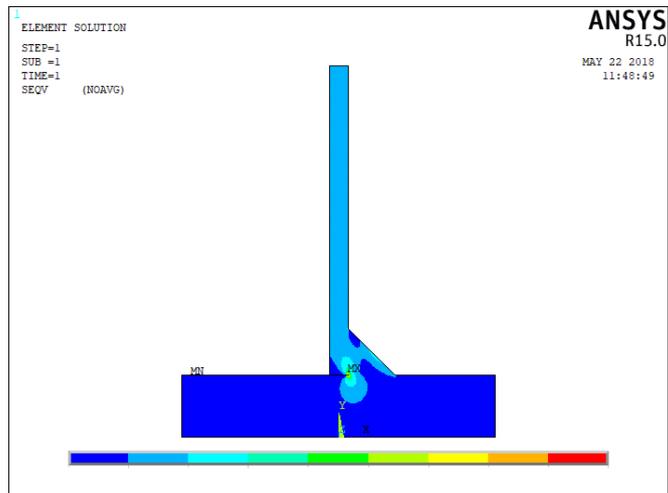


Figura 2.16 Tensione equivalente elementi PLANE42 $a=0,25\text{mm}$ $b=1\text{mm}$, tensione piana.

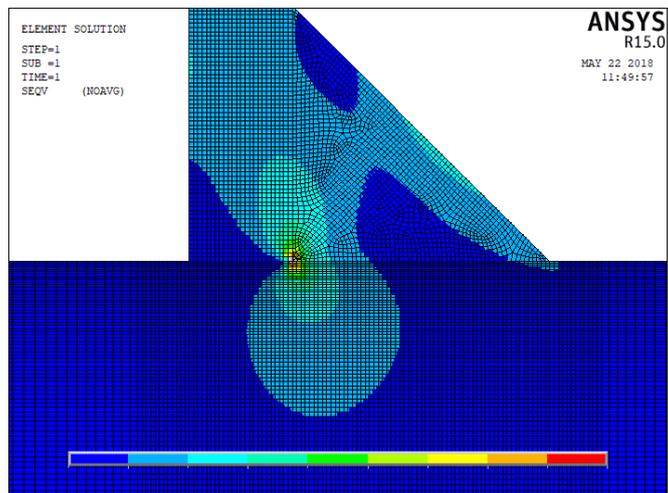


Figura 2.17 Zoom saldatura, tensione equivalente elementi PLANE42 $a=0,25\text{mm}$ $b=1\text{mm}$, tensione piana.

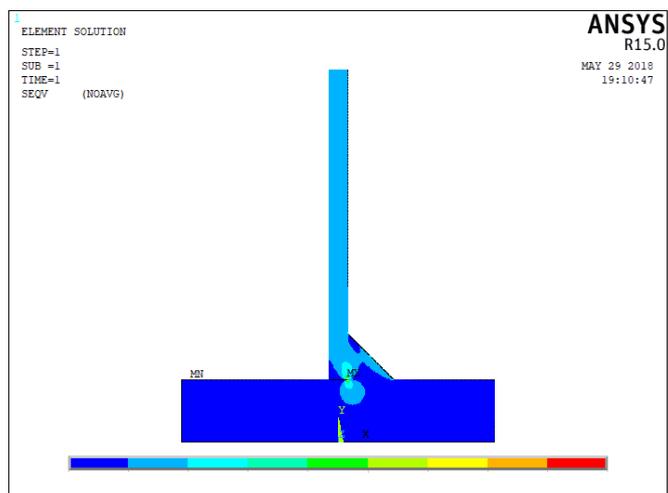


Figura 2.18 Tensione equivalente elementi PLANE42 $a=0,25\text{mm}$ $b=1\text{mm}$, deformazione piana.

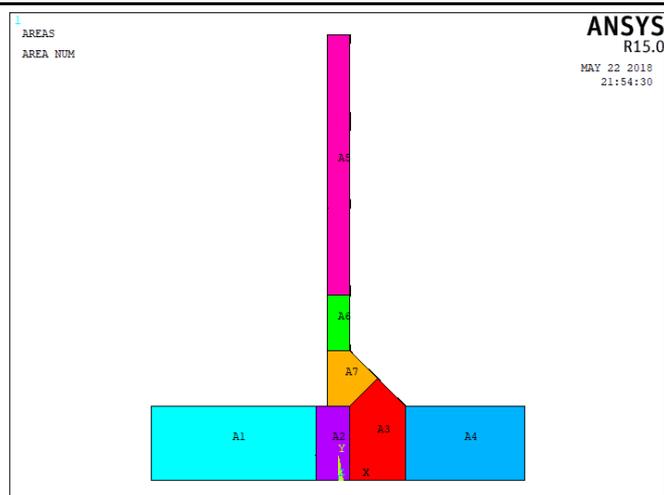


Figura 2.19 Divisione in aree del modello piano su APDL per la generazione del modello tridimensionale.

Modelli tridimensionali

Per realizzare nella maniera migliore la mesh dei volumi del modello si è partiti dal modello piano, il quale è stato preso come base di partenza. Attraverso la funzione VOFFST e le opportune EXTOPT è possibile creare un volume a partire da un'area ed estrarre anche la mesh associata all'area. Partendo da elementi PLANE42 si ottengono elementi SOLID45, partendo da elementi PLANE82 invece si ottengono elementi SOLID186. I SOLID45 sono elementi parallelepipedi a otto nodi, uno per vertice, mentre i SOLID186 ne hanno venti di nodi, uno per vertice e uno a metà di ogni lato del parallelepipedo. La creazione degli elementi tridimensionali con questo sistema e le mesh usate nel paragrafo precedente non funziona perché VOFFST ha parametri più restrittivi sulla forma degli elementi. Si sono quindi divise diversamente le aree, come illustrato nella figura 2.19, in maniera tale da rispettare queste restrizioni.

Per verificare quale sia la mesh ottimale tenendo in considerazione il valore del PRERR e i tempi di simulazione compatibilmente ai limiti del PC utilizzato si sono i parametri a e b , definiti per i modelli piani, con la funzione LESIZE applicata alle linee che compongono le aree. a è la lunghezza del lato dell'elemento nella zona più fitta, vicino alla saldatura. b è la lunghezza massima del lato degli elementi più lontani dalla saldatura, dove la mesh può essere meno fitta. Il LESIZE è stato determinato in maniera tale che i nodi fossero perfettamente coincidenti sui bordi e le aree di confine tra i volumi adiacenti. Questa caratteristica permette di utilizzare la funzione di NUMMGR dei keypoints e dei nodi in maniera corretta su tutte le aree di confine in comune tra i volumi. Fanno eccezione i nodi in posizioni coincidenti appartenenti ai volumi creati dall'area 1 e dall'area 7 in figura 2.19, perché si vuole modellare un giunto con saldatura ad angolo con penetrazione nulla. Si sono quindi ottenuti variando i parametri a e b per le mesh di SOLID45 e SOLID186 i valori del PRERR riportati nella tabella 2.2.

Tabella 2.2 Valori del PRERR al variare della mesh: elementi SOLID45 in PRERR 1, elementi SOLID186 in PRERR 2.

a [mm]	b [mm]	PRERR 1	PRERR 2
2,00	2,00	19,18	21,83
1,50	2,00	16,72	19,85
1,00	2,00	13,66	16,28
0,75	2,00	12,61	14,85
0,50	2,00	9,88	-
0,50	1,00	9,94	-

Si può osservare che in tutti i casi i valori di PRERR minori si ottengono con gli elementi SOLID45 che portano anche a calcoli più rapidi e meno onerosi come tempo e memoria occupati. Si è quindi scelto di utilizzare per le successive analisi la combinazione di $a=0,50\text{mm}$ e $b=2,00\text{mm}$, mesh osservabile nella figura 2.20. Ai nodi di questa mesh sono quindi stati applicati i vincoli e i carichi definiti nel paragrafo 2.1.1 per le simulazioni dei modelli su Workbench. Si sono quindi ottenuti i valori di tensione equivalente illustrati nelle figure 2.21, 2.22 dalle quali si può subito notare che gli andamenti sono confrontabili con quelli dei modelli piani, confronto che viene effettuato in maniera dettagliata nel paragrafo successivo.

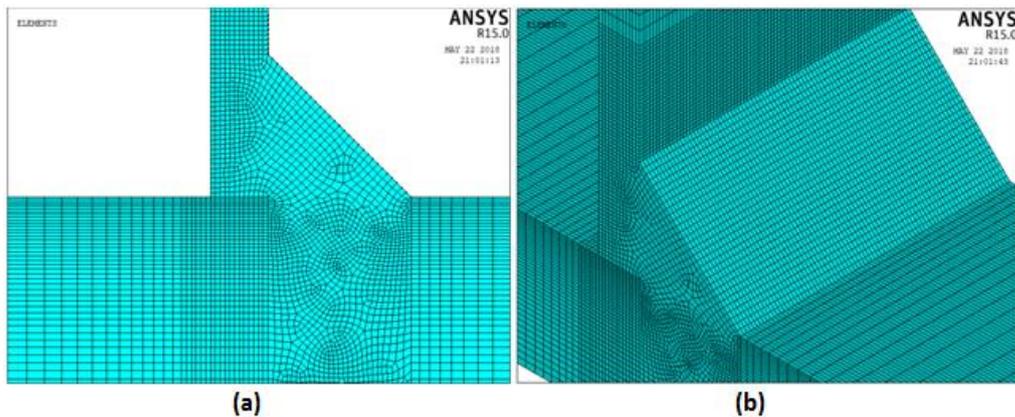


Figura 2.20 Vista frontale nella zona del cordone della mesh con $a=0,50\text{mm}$ e $b=2,00\text{mm}$ (a) e vista isometrica della stessa mesh nella zona del cordone (b).

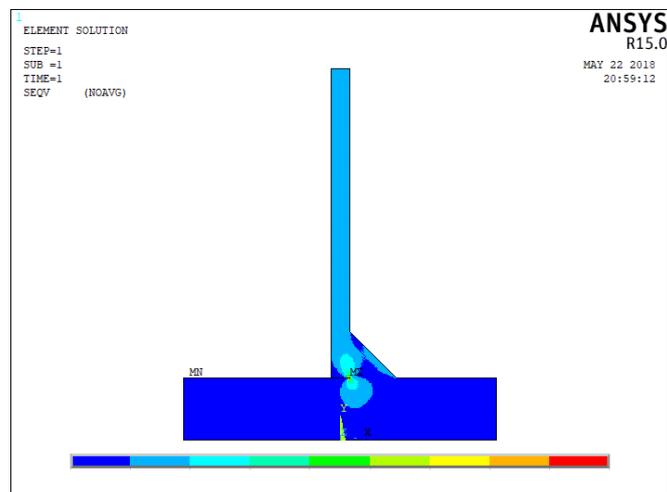


Figura 2.21 Tensione equivalente elementi SOLID45 $a=0,5\text{mm}$ $b=2\text{mm}$.

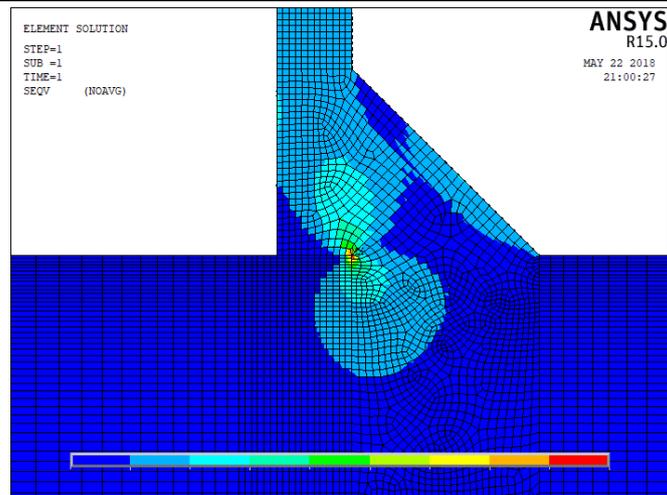


Figura 2.22 Zoom sulla saldatura della tensione equivalente elementi SOLID45 $a=0,5\text{mm}$ $b=2\text{mm}$.

Confronto

Quali sono le differenze tra gli elementi di tipo SOLID e quelli di tipo PLANE? Gli elementi di tipo SOLID vanno a comporre un modello di spessore finito nella direzione perpendicolare alla sezione dell'immagine 2.19. Gli elementi di tipo PLANE nel caso di tensioni piane simulano un modello di spessore trascurabile, al limite nullo. Nel caso di deformazioni piane invece simulano un modello di grandissimo spessore, al limite infinito. Si può quindi ragionevolmente confrontare la superficie esterna del modello tridimensionale con il modello piano sotto le ipotesi di tensione piana come nella figura 2.23. La sezione centrale del modello tridimensionale viene messa a confronto con il modello piano sotto le ipotesi di deformazione piana come nella figura 2.24 ipotizzando che lo spessore del modello tridimensionale sia sufficientemente esteso. Ipotesi ragionevole dato che lo spessore lungo l'asse Z della figura 2.19 del modello è circa 6,5 volte maggiore alla lunghezza di quello che può essere considerata la difettosità geometrica che produce un effetto d'intaglio: lo spessore della lamiera sottile posizionata verticalmente.

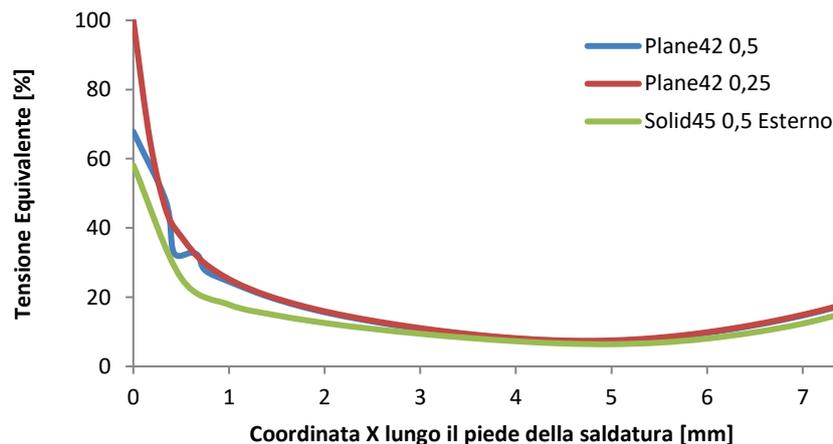


Figura 2.23 Tensioni equivalenti in percentuale lungo il piano di gola in ipotesi di tensione piana.

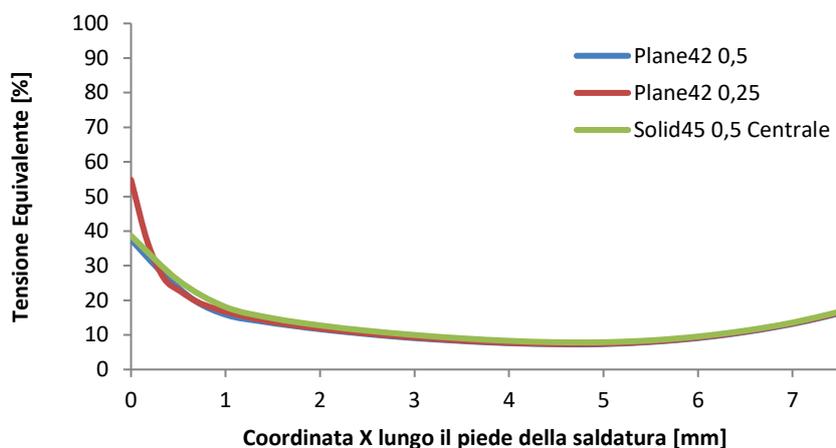


Figura 2.24 Tensioni equivalenti in percentuale lungo il piano di gola in ipotesi di deformazione piana.

Si può osservare come in condizioni di tensione piana le tensioni equivalenti siano maggiori rispetto a quelle di deformazione piana, esattamente come ci si sarebbe aspettato dalla teoria. Nella figura 2.23 si evidenzia bene l'effetto d'intensificazione delle tensioni all'apice del difetto al diminuire della dimensione degli elementi. Teoricamente avendo un raggio d'intaglio nullo la tensione puntualmente dovrebbe essere infinita. Il valore di picco di tensione equivalente sulla superficie esterna del modello SOLID è inferiore circa del 15% rispetto al modello con la mesh di dimensione corrispondente PLANE. Questa differenza può essere presente a causa proprio dell'ipotesi di tensione piana, ipotesi non perfettamente verificata sulla superficie del modello SOLID. Nella sezione centrale del modello SOLID al contrario ci sono differenze trascurabili tra i suoi valori di tensione equivalente e quelli del modello con la mesh di dimensioni corrispondenti con gli elementi PLANE.

2.1.4. Confronto

Si possono ora mettere a confronto i valori e gli andamenti delle tensioni equivalenti del modello di Workbench con quelli del modello di APLD con elementi SOLID. I due modelli possiedono la stessa geometria, gli stessi carichi, gli stessi vincoli. Il modello di Workbench è stato descritto al termine del paragrafo 2.1.2, mentre il modello su Mechanical APDL è stato descritto come il migliore con gli elementi SOLID nel paragrafo 2.1.3.

Le mesh sono differenti. La differenza maggiore è che il modello su Workbench possiede più nodi lungo il piano di gola per due motivi: Workbench utilizza elementi a 20 nodi mentre APLD elementi di tipo ad 8 e gli elementi sono maggiori in numero. Lungo i bordi della lamiera e della piastra gli elementi su APDL possiedono la stessa dimensione caratteristica nella zona del cordone di saldatura degli elementi su Workbench. La differente numerosità dei nodi può giustificare in parte il fatto che il modello su APDL possieda in $X=0$, in corrispondenza dell'apice dell'intaglio, un valore di tensione equivalente minore fino al 35% del valore del modello su Workbench. Per valori di X maggiori a 0,5mm le differenze tra i 2 modelli sono completamente trascurabili. Queste osservazioni sugli andamenti delle tensioni equivalenti sono state effettuate valutando i grafici nelle figure 2.25 e 2.26.

Le differenze potrebbero anche essere causate da un cattivo funzionamento dei contatti del modello di Workbench nella zona dell'apice dell'intaglio a causa della elevata intensificazione degli sforzi. Cattivo funzionamento assente su APDL perché i vari volumi sono stati legati unendo le entità nodo in condizioni in deformate con le stesse coordinate con la funzione NUMMGR. Questa differenza di comportamento è evidenziata nella figura 2.27. Si può anche notare come la fonte principale dell'errore generale valutato dal PRERR su APDL sia l'apice del

difetto, zona attorno alla quale le tensioni equivalenti calcolate sugli elementi presentano grandi discontinuità tra elementi adiacenti.

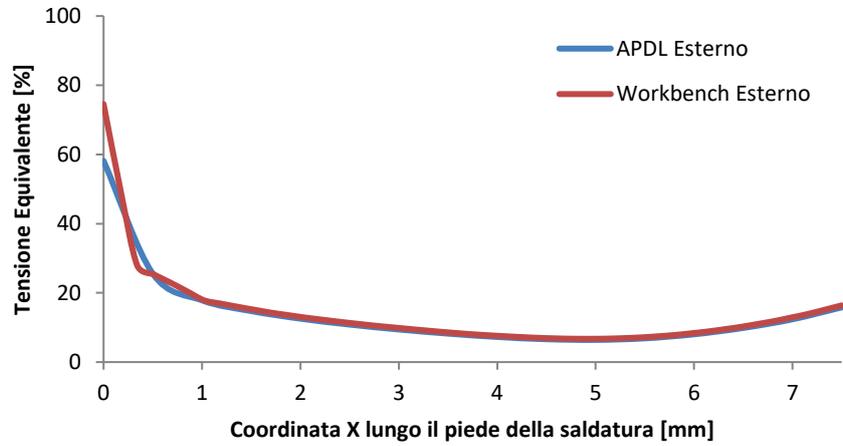


Figura 2.25 Andamento delle tensioni equivalenti lungo il piano di gola sulla superficie esterna dei modelli.

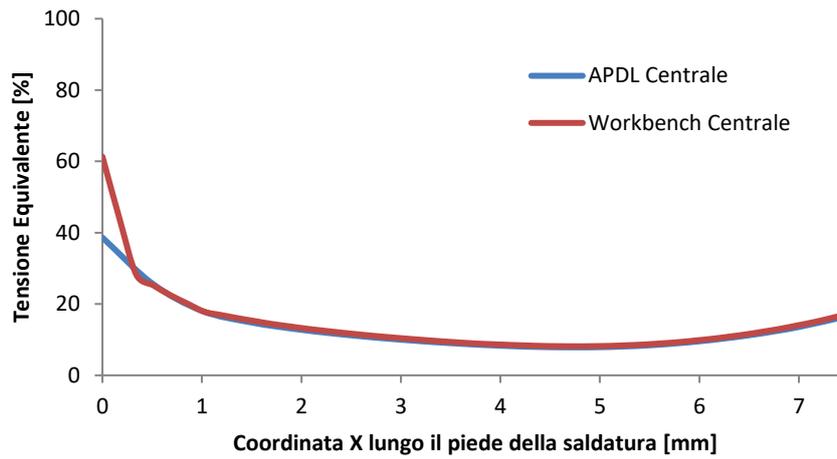


Figura 2.26 Andamento delle tensioni equivalenti lungo il piano di gola sulla sezione centrale dei modelli.

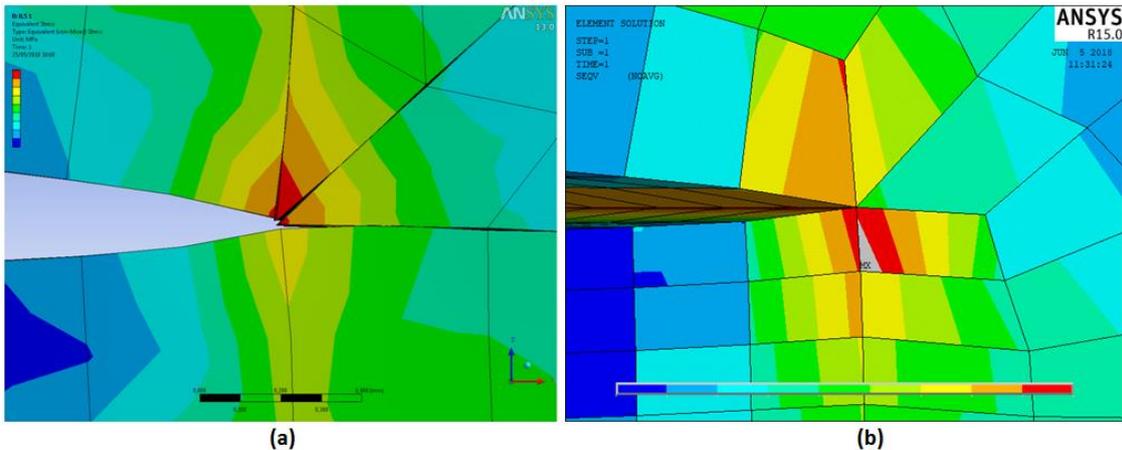


Figura 2.27 Zoom deformata del modello su Workbench (a) e del modello su APDL (b).

2.2. Confronto tra Workbench e normative

Oltre al modello base analizzato nel paragrafo 2.1 si è preso in considerazione anche il modello di un giunto a T con saldatura ad angolo simmetrica, senza penetrazione come illustrato in figura 2.28. Le normative europee sono molto chiare e collaudate per casi come quest'ultimo, in cui la saldatura è simmetrica e non sono presenti eccentricità. L'eccentricità nel caso studiato fin'ora è causata dal fatto che la forza è applicata su tutta la superficie superiore della lamiera verticale e il cordone non è in asse con essa, si forma un momento flettente.

Nel caso della normativa europea per i macchinari di sollevamento [1] si invita a trascurare gli effetti di quest'ultimo, ipotesi tanto più ragionevole nel nostro caso dato che a , lo spessore effettivo di gola, è circa 3,5 volte la lunghezza del braccio d'eccentricità. Viene fornita la formula (1.2) per il calcolo della tensione nominale nella sezione di gola della saldatura sia in caso di saldatura simmetrica che di saldatura su un lato solo.

La normativa europea generica [2] invece fornisce la formula (1.1) per il calcolo della tensione nominale nella sezione di gola della saldatura sia in caso di saldatura simmetrica che di saldatura su un lato solo. La differenza sta nel fatto che i termini di questa formula sono calcolati come descritto nel paragrafo 1.1 e portano a risultati differenti anche continuando ad ammettere che l'eccentricità nel caso del cordone su un lato solo sia di entità trascurabile.

Queste differenze possono essere dovute all'utilizzo di diverse definizioni dei coefficienti di sicurezza sui valori di resistenza dei materiali o dei coefficienti peggiorativi per risalire alle forze effettive. Si sono comunque confrontati i valori di tensione equivalente nominale ottenuti dalle normative con i valori di tensione nelle figure 2.29 e 2.30 ricavati su Workbench ed i loro valori medi. Osservando queste due figure si nota come la zona più critica passa dall'essere la radice del cordone ad angolo su un lato solo al piede superiore del cordone simmetrico. In figura 2.31 si può notare che gli andamenti delle tensioni in un giunto simmetrico sono molto differenti da quelli in un giunto con il cordone su di un lato solo. Sono invece confrontabili il valore di tensione medio nel caso non simmetrico con il valore ottenuto applicando la normativa europea generica [2]. Il valore di tensione medio del caso simmetrico è confrontabile con quello nominale ottenuto applicando la normativa europea sui macchinari di sollevamento [1] perché l'altra normativa si rivela troppo peggiorativa.

Le differenze possono essere causate da errori del modello FEM, i quali si è verificato fossero minori del 10% del valore dell'energia di deformazione, e per lo più dal fatto che le normative applicano a questi valori di tensione coefficienti correttivi.

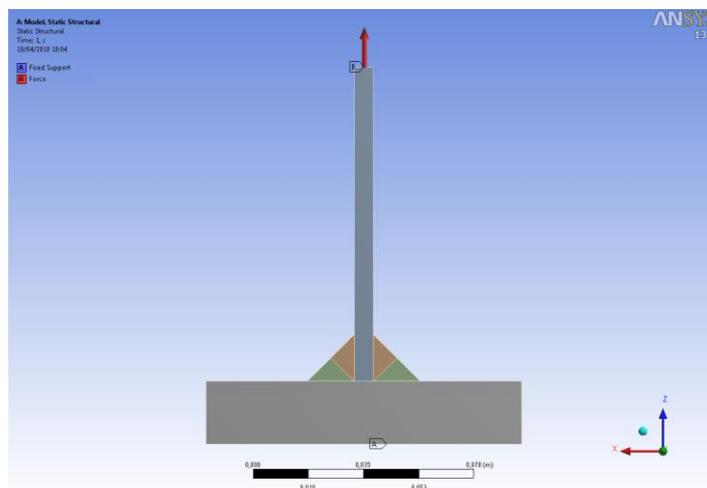


Figura 2.28 Geometria, carichi e vincoli del modello di un giunto a T con saldatura ad angolo simmetrica.

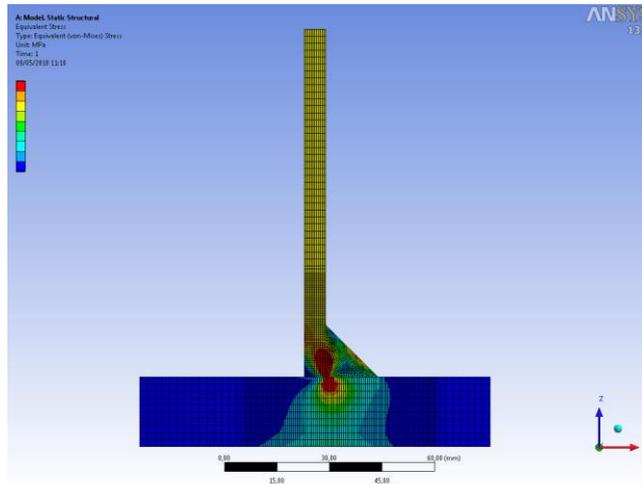


Figura 2.29 Plot della tensione equivalente sul modello con giunto saldato ad angolo su un lato solo.

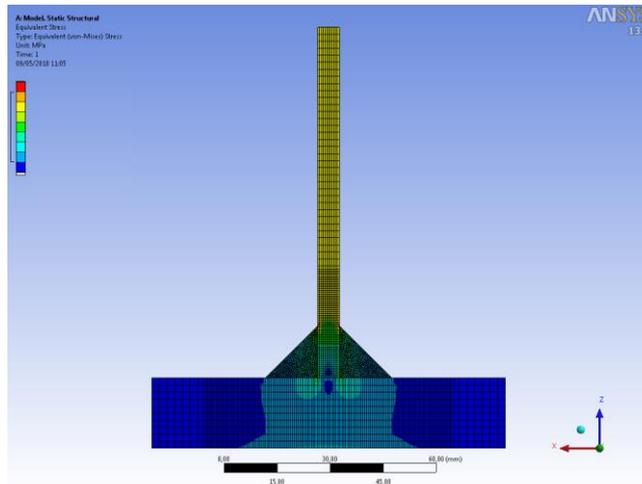


Figura 2.30 Plot della tensione equivalente sul modello con giunto saldato ad angolo simmetrico.

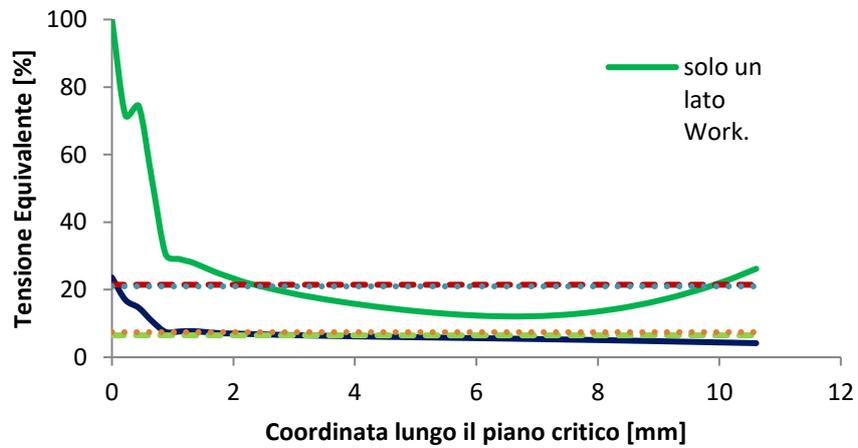


Figura 2.31 Grafico delle tensioni equivalenti lungo il piano di gola.

3. Provini

Al fine di testare in maniera accurata numericamente e sperimentalmente differenti soluzioni si sono definiti quattro provini con quattro differenti tipologie di saldatura. Lo scopo è quello di verificare quanti benefici possano portare sullo stato tensionale del giunto ognuno di loro.

3.1. Definizione dei tipi di saldatura

Ricordando che i provini andranno a simulare un tratto lineare di saldatura stile quella presente tra testata e braccio è necessario che le tipologie di saldatura analizzate siano realizzabili poi anche nella realtà senza stravolgere il processo produttivo. Si sono quindi definiti i provini descritti in figura 3.1:

- 1) Giunto saldato con cordone di saldatura angolare su un lato solo.
- 2) Giunto saldato con cordone di saldatura angolare su un lato solo e bisello sulla lamiera sottile verticale.
- 3) Giunto saldato con cordone di saldatura angolare su un lato solo e saldatura di testa grazie all'utilizzo di una lamiera di rinforzo chiodata.
- 4) Giunto saldato con cordone di saldatura angolare su un lato solo e saldatura di testa grazie all'utilizzo di una lamiera di rinforzo chiodata su cui si è effettuato un bisello.

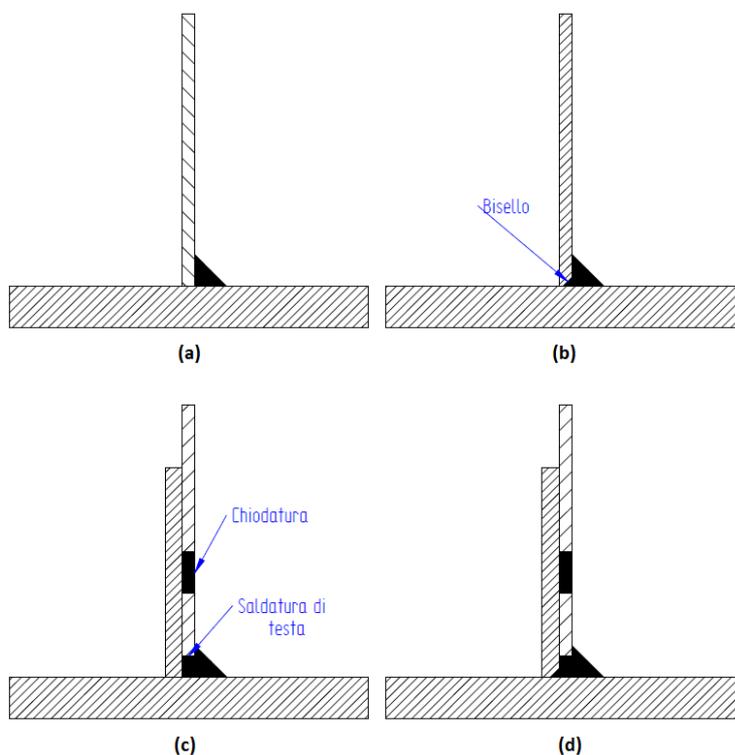


Figura 3.1 Sezioni dei modelli, modello 1 (a), modello 2 (b), modello 3 (c), modello 4 (d).

La geometria della sezione del modello 1 è la stessa del modello base descritto ed analizzato nel capitolo 2 e corrisponde alla tipologia di giunto saldato ora in uso tra i componenti reali.

3.2. Criteri per la progettazione dei provini per le prove sperimentali

Le prove sperimentali si svolgono ponendo in trazione dei provini che devono avere: dimensioni tali da essere certi di arrivare a rottura con l'attrezzatura disponibile, avere condizioni di carico e di vincolo più simili possibili a quelle del modello FEM, essere semplici da realizzare.

Per rendere semplice e rapida la realizzazione dei provini e facilitarne l'ancoraggio al banco di prova ed al martinetto idraulico che li porrà in trazione si è pensato di realizzare delle specie di travi IPE come mostrato in figura 3.2. La sezione di queste travi è ottenuta unendo due modelli dello stesso tipo utilizzando una lamiera sottile alta il doppio. Dopo che vengono effettuate le saldature queste strutture simili a delle travi IPE vengono tagliate con un seghetto in sezioni di spessore opportuno come indicato in figura 3.2, le quali sezioni sono i provini che verranno testati. Il primo vincolo di progetto è dato dalla massima altezza della struttura, H in figura 3.2, che il seghetto può tagliare. La stessa altezza, insieme a tutte le altre dimensioni, è anche vincolata dallo spazio disponibile nel banco di prova con montati il martinetto e dall'attrezzature di ancoraggio. Il martinetto idraulico deve essere parzialmente sfilato, in maniera tale che abbia disponibile la corsa necessaria per porre in trazione fino a rottura i provini. La corsa stessa del martinetto è ridotta rispetto ad un martinetto tradizionale per cui i provini non potranno essere troppo corti.

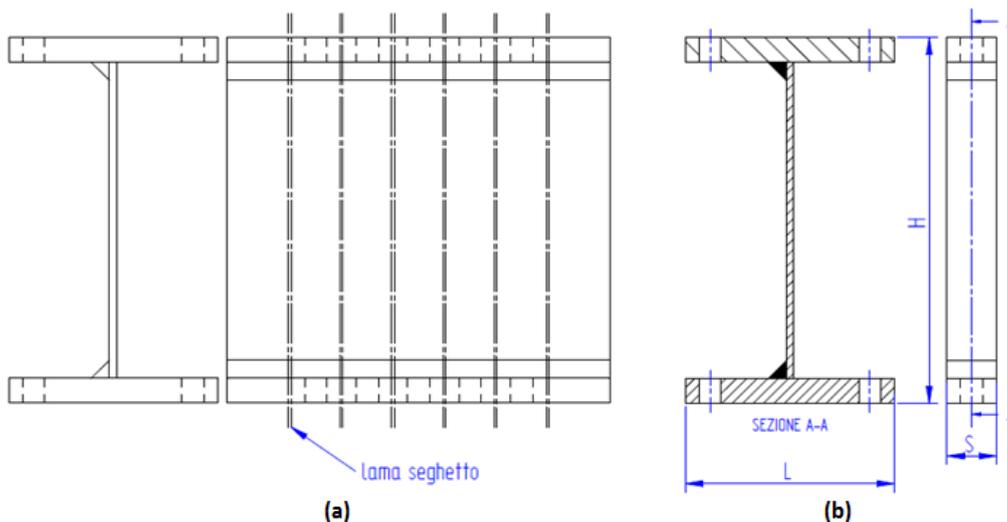


Figura 3.2 Struttura a forma di trave IPE con le indicazioni per il taglio (a) e provino 1 tagliato (b).

Per garantire con sicurezza che non siano necessarie pressioni troppo elevate nel martinetto idraulico per rompere i provini si è dimensionato lo spessore S in maniera tale che la massima forza esercitabile dal martinetto porti a rottura la lamiera sottile posizionata verticalmente. Si è quindi garantito che:

$$\frac{p_{max} \pi (D_{camera}^2 - D_{stelo}^2)}{4 s S} \geq R_{acciaio}$$

Dove:

p_{max} è la pressione massima raggiungibile nella camera del martinetto idraulico

D_{camera} è il diametro interno della camera del martinetto idraulico

D_{stelo}	è il diametro esterno dello stelo del martinetto idraulico
s	è lo spessore della lamiera sottile verticale
S	è lo spessore del provino come indicato in figura 3.2
$R_{acciaio}$	è il valore di resistenza a rottura dell'acciaio in cui è realizzata la lamiera sottile

Per garantire facilità di montaggio e smontaggio dei vari provini sull'attrezzatura durante la campagna di sperimentazione si è scelto di utilizzare come giunti tra questi componenti delle viti imbullonate a testa cilindrica. Il numero di viti, il diametro, la tipologia di filettatura e la classe di resistenza sono stati scelti in maniera tale da garantire il fissaggio durante la prova senza deformatle, così da poterle riutilizzare per tutte le prove che si effettueranno. Per questo dimensionamento si sono scelti il valore di forza di rottura a trazione della lamiera sottile e un coefficiente di sicurezza pari a 1,5. Il diametro e il numero dei bulloni sono limitati anche dalle dimensioni del provino e delle attrezzature su cui sono presenti i fori passanti, dall'ingombro delle chiavi che ne effettueranno il serraggio.

Infine, si è verificato come fosse possibile garantire le condizioni di carico e di vincolo più simili possibili a quelle dei modelli FEM che sono rappresentativi di metà provino e con le condizioni di vincolo e carico identiche a quelle descritte nel capitolo 2. I cordoni di saldatura possono essere posizionati in due maniere differenti tra loro: o entrambi sullo stesso lato della lamiera sottile o in maniera incrociata, come in figura 3.3. Si sono quindi creati dei modelli su Ansys Workbench per analizzare l'andamento delle tensioni equivalenti nelle sezioni di gola. Si è imposto un vincolo fissando la superficie inferiore del provino e si è imposto lo spostamento della superficie superiore pari a due volte lo spostamento che subiva la superficie superiore del modello del capitolo 2. In figura 3.4 si può osservare che in tutte e due in casi le differenze di andamento e di valore delle tensioni equivalenti sono trascurabili. Sono più accentuate in $X < 2\text{mm}$ a causa della mesh con i nodi non perfettamente coincidenti nelle zone di contatto. La differenza di valori di tensione equivalente con il modello base è dovuta alle approssimazioni fatte sui carichi imposti. Gli andamenti simili delle tensioni equivalenti in tutte e due le maniere di posizionare i cordoni di saldatura porta ad esaminare un altro parametro. Osservando nelle figure 3.5 e 3.6 le deformazioni lungo l'asse X. I comportamenti differenti sono generati dall'eccentricità dei giunti saldati ad angolo da un solo lato. Quando i cordoni di saldatura si trovano sullo stesso lato i momenti generati dall'eccentricità si annullano a vicenda mentre quando i cordoni sono incrociati si sommano facendo lavorare le viti di taglio nei provini reali.

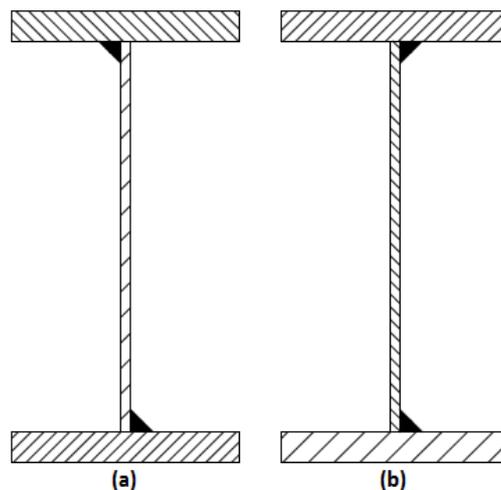


Figura 3.3 Possibili posizione dei cordoni di saldatura sul provino 1, incrociato (a) e simmetrico (b).

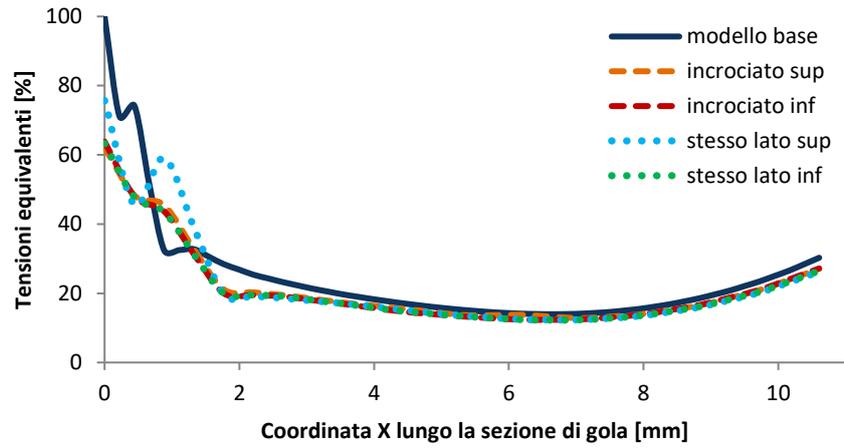


Figura 3.4 Tensioni equivalenti lungo la sezione di gola, sulla superficie esterna dei modelli.

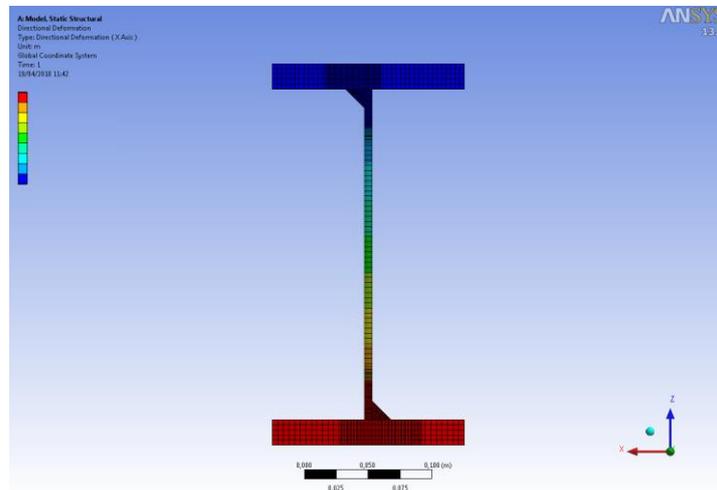


Figura 3.5 Deformazione lungo X se i cordoni di saldatura fossero incrociati rispetto alla lamiera.

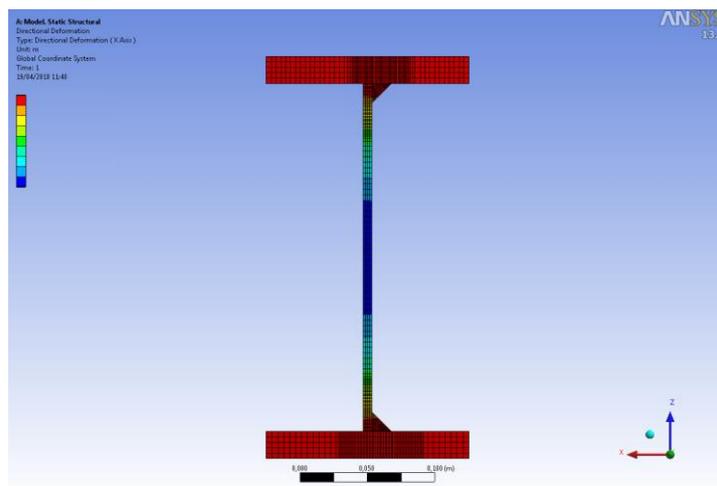


Figura 3.6 Deformazione lungo X se i cordoni di saldatura fossero dallo stesso lato alla lamiera.

Considerando tutti i criteri di progetto descritti si sono quindi disegnate le lamiere da tagliare al laser e le piastre da tagliare al plasma, poi saldate tra loro per formare le strutture stile trave IPE. Le strutture sono poi state tagliate in sezioni a formare i provini per le quattro differenti tipologie di saldatura. La prima e l'ultima sezione si sono scartate perchè nelle zone in cui si inizia la saldatura e dove si finisce la stessa si hanno dei difetti maggiori nel cordone. Non sono però state rottamate, una volta pulite e lucidate si sono utilizzate per fare valutazioni sulla qualità dei cordoni di saldatura. In figura 3.7 si può osservare un esempio di come si potrebbe effettuare il montaggio finale di un provino nel banco di prova con il martinetto, i quali sono stati semplificati in un modello solido che ne conserva degli ingombri.

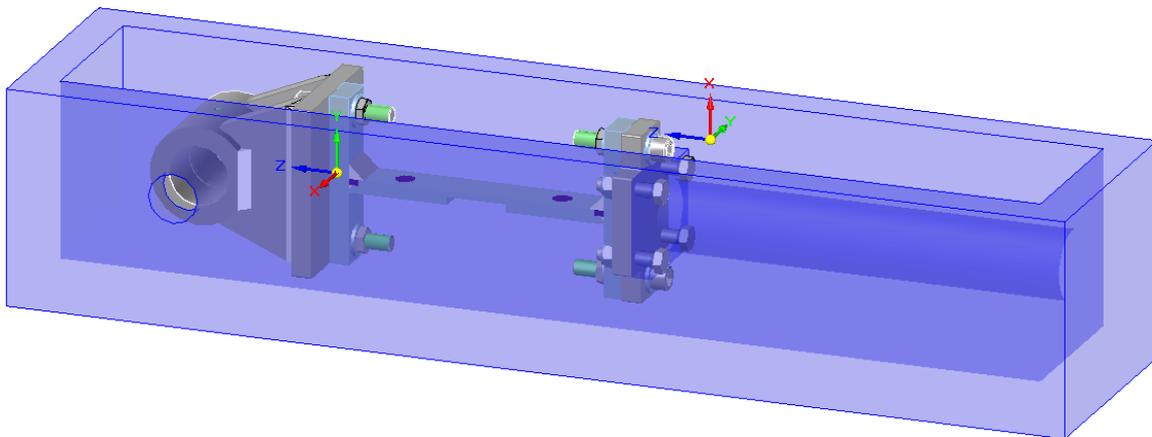


Figura 3.7 Montaggio del provino 4 per le prove di trazione.

3.3. Modello lineare elastico

Si sono realizzati i modelli dei quattro provini su Ansys Workbench seguendo le linee guida determinate nel capitolo 2. Si è sempre controllato di mantenere il rapporto tra errore energetico della tensione ed energia di deformazione al di sotto del 10% in tutto il modello. Le differenze tra i tutti i modelli ed i provini reali non potranno mai essere eliminate del tutto. Il cordone di saldatura nella realtà non sarà privo di imperfezioni geometriche e nel materiale fuso. Il grado di penetrazione stesso sarà differente da quello ipotizzato per i modelli FEM. Ed in oltre in questo paragrafo il materiale viene considerato come lineare elastico mentre nelle prove sperimentali si raggiungerà il campo plastico prima della rottura.

Si sono quindi vincolati i modelli dei provini in maniera simile a come sono vincolati nella prova sperimentale e si è applicato un carico campione. Durante le prove di trazione sperimentali si attende che la rottura dei provini avvenga comunque nelle zone evidenziate dalle simulazioni come zone d'intensificazione delle tensioni equivalenti.

3.3.1. Provino 1

Questo provino come mostrato nella figura 3.1.a rappresenta lo stato dell'arte delle saldature tra testata e braccio, con il solo cordone di saldatura ad angolo su di un lato solo tra lamiera e piastra. Nelle figure 3.8 e 3.9 si può notare come le tensioni equivalenti si intensifichino principalmente nella radice della saldatura. La scala evidenzia come ci sia una distribuzione di tensione simile a quella descritta all'apice di un difetto nella meccanica della frattura lineare elastica [14]. Osservando la figura 3.10 è possibile osservare meglio i valori di tensione lungo la sezione di gola.

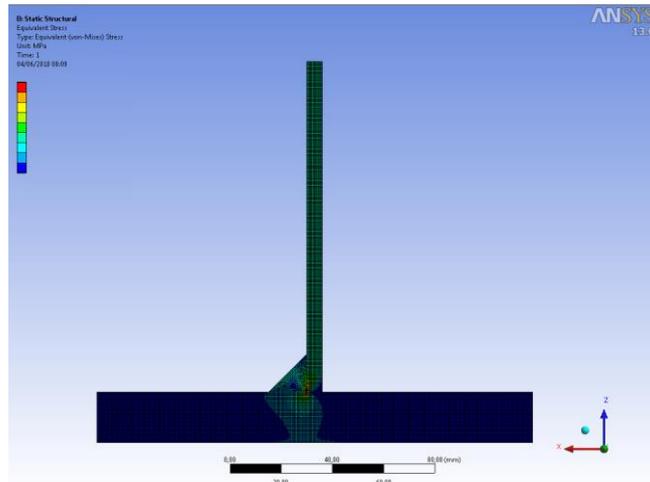


Figura 3.8 Tensione equivalente sulla superficie del modello del Provino 1.

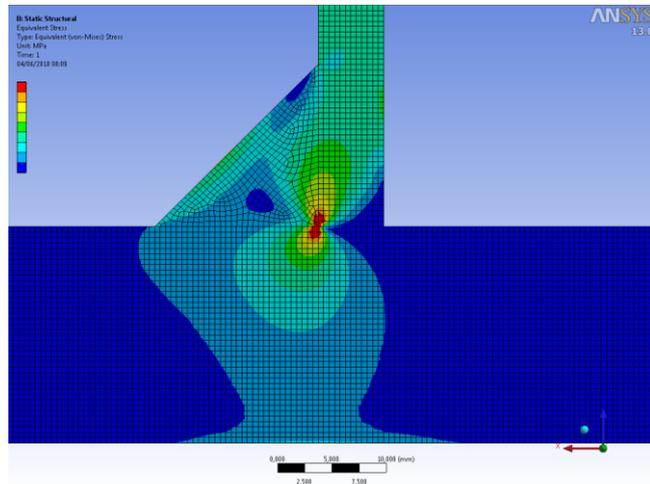


Figura 3.9 Zoom della tensione equivalente nella zona del cordone di saldatura ad angolo del Provino 1.

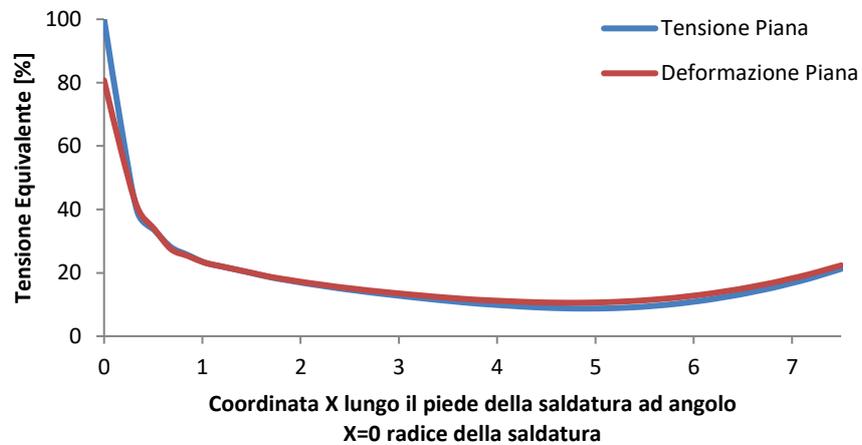


Figura 3.10 Tensione equivalente percentuale lungo il piano di gola del Provino 1.

3.3.2. Provino 2

Questo provino oltre al cordone di saldatura ad angolo presenta un bisello sulla lamiera per rinforzare il giunto saldato, come descritto dalla figura 3.1.b. Nelle figure 3.11 e 3.12 è possibile osservare come varia l'andamento delle tensioni equivalenti. la superficie di contatto aumenta e nella parte del bisello si lavora a trazione. Diminuiscono di molto le tensioni tangenziali e l'intensificazione è in generale minore. Il valore massimo d'intensificazione della tensione si trova all'apice dell'intaglio, sulla saldatura del bisello. Il cordone ad angolo rimane notevolmente scarico come sottolineato anche dalle figure 3.13 e 3.14. I questi grafici viene riportato in blu l'andamento delle tensioni nel cordone del Provino 1, in rosso quello del Provino 2.

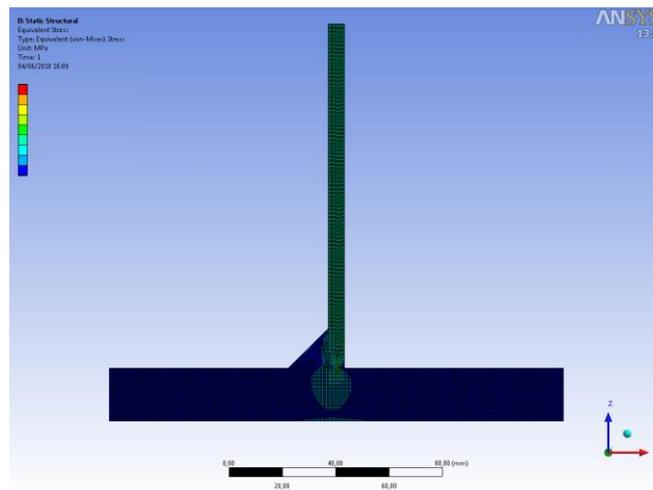


Figura 3.11 Tensioni equivalenti sulla superficie del Provino 2.

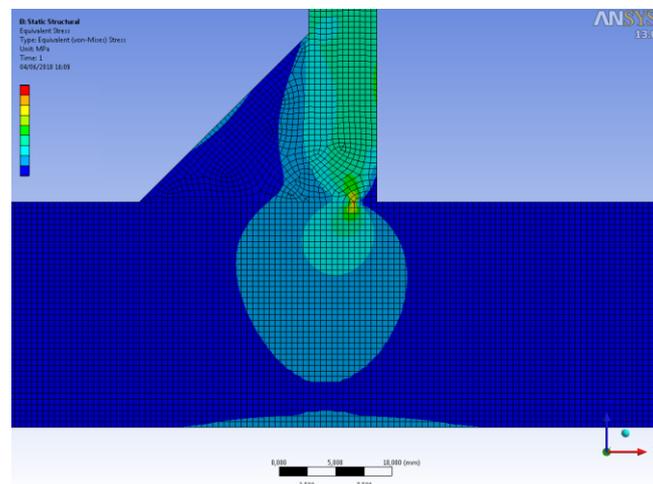


Figura 3.12 Zoom delle tensioni equivalenti nella zona d'interesse del Provino 2.

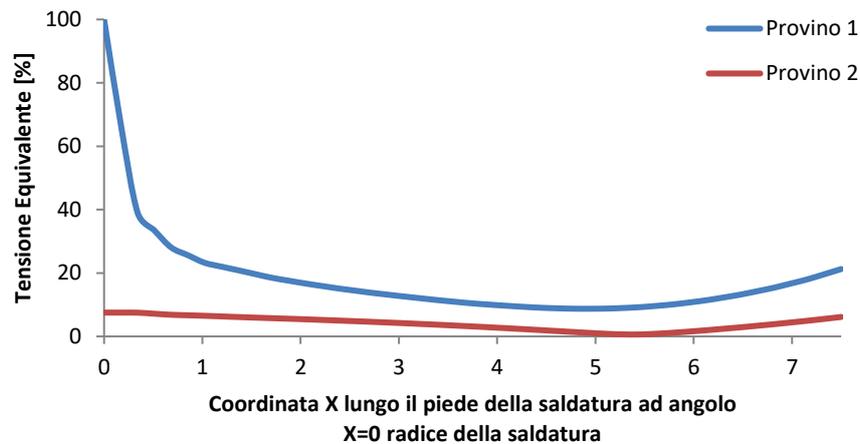


Figura 3.13 Grafico delle tensioni equivalenti sulla superficie esterna dei provini indicati lungo la sezione di gola.

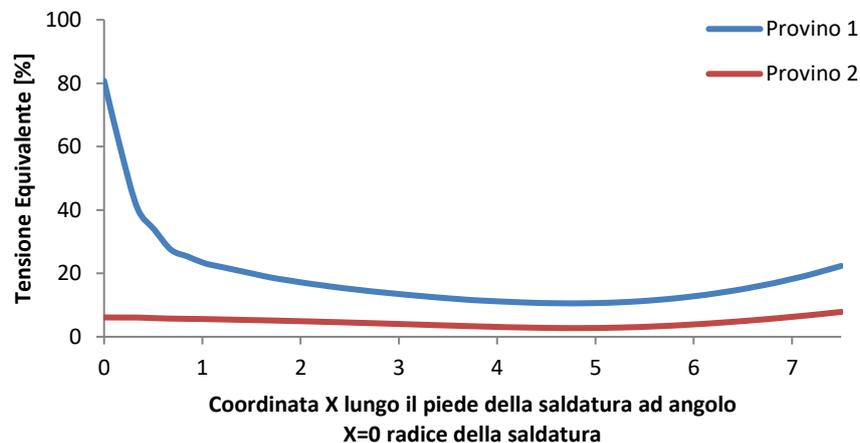


Figura 3.14 Grafico delle tensioni equivalenti all'interno dei provini indicati lungo la sezione di gola.

3.3.3. Provino 3

In questo provino per rinforzare la saldatura ad angolo da una sola parte si utilizza una piastra di rinforzo chiodata alla lamiera. Questa piastra di rinforzo permette di effettuare una saldatura di testa come illustrato dalla figura 3.1.c. Osservando le figure 3.15 e 3.16 si può osservare che ci sono principalmente tre punti d'intensificazione delle tensioni:

- Il piede della saldatura ad angolo, sulla lamiera sottile.
- La nuova radice della saldatura, il bordo della saldatura di testa che tiene uniti la piastra di rinforzo e la piastra di base.
- Nella zona del bordo della saldatura di testa che unisce sia la lamiera che la piastra di rinforzo.

Si può notare come le tensioni ormai sono quasi tutte completamente distribuite solo sulla saldatura di testa che lavorerà principalmente in trazione, con tensioni tangenziali limitate alle zone d'intensificazione. Il cordone di saldatura ad angolo è quasi privo di tensioni equivalenti, in particolar modo lungo la sezione di gola come evidenziato dalle figure 3.17 e 3.18. Il massimo assoluto di questo modello si trova nella zona di chiodatura tra lamiera e piastra di rinforzo ed è probabilmente causato da una cattiva mesh del tratto circolare. In questa zona infatti questi massimi sono molto localizzati e puntiformi.

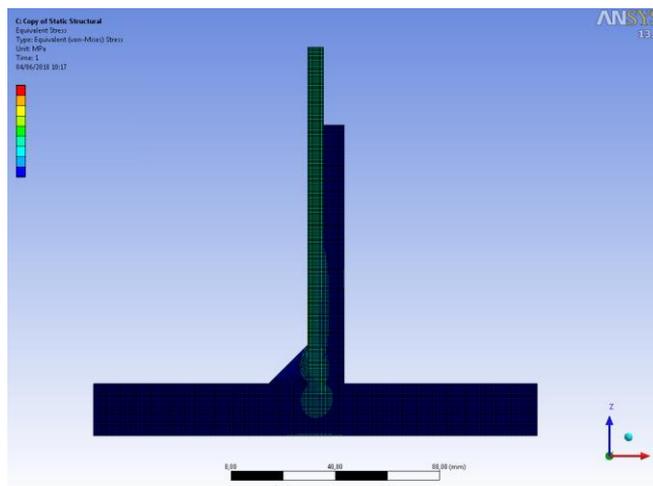


Figura 3.15 Tensione equivalente sulla superficie del Provino 3.

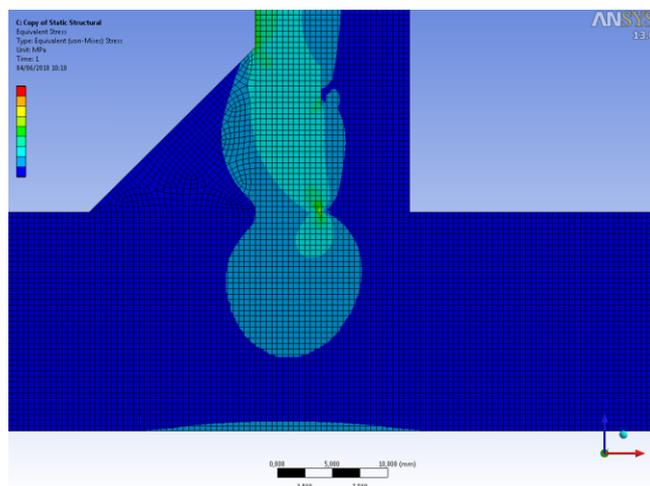


Figura 3.16 Zoom della tensione equivalente nella zona d'interesse del Provino 3.

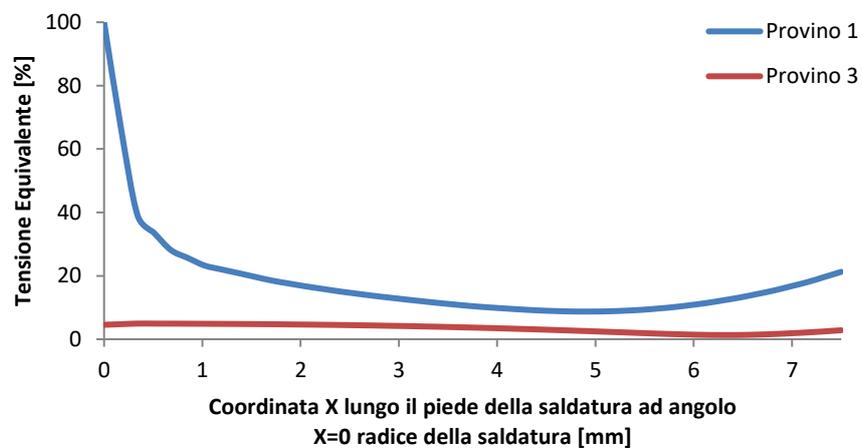


Figura 3.17 Grafico delle tensioni equivalenti sulla superficie esterna dei provini indicati lungo la sezione di gola.

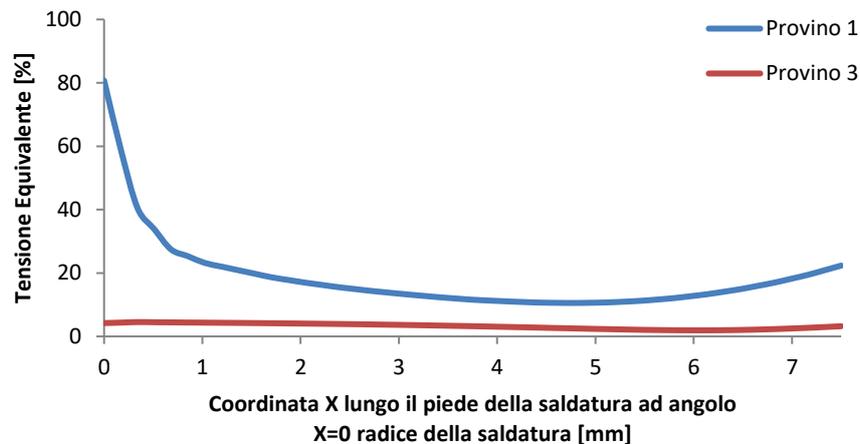


Figura 3.18 Grafico delle tensioni equivalenti all'interno dei provini indicati lungo la sezione di gola.

3.3.4. Provino 4

In questo provino oltre alla soluzione tecnica presente nel Provino 3 si somma la saldatura di un bisello di rinforzo nella piastra di rinforzo. Il Provino 4 quindi rappresenta la soluzione tecnica con la maggior quantità di materiale saldato, con la maggior estensione della saldatura come illustrato nella figura 3.1.d. Analizzando le tensioni equivalenti di cui due plot sono illustrati dalle figure 3.19 e 3.20 si nota che il massimo valore assoluto è nuovamente nella zona della chiodatura tra lamiera e piastra di rinforzo. Sono nuovamente tre le zone d'intensificazione nella zona d'interesse del modello:

- Il piede della saldatura, sulla lamiera.
- Il bordo della saldatura di testa in comune con la lamiera e la piastra di rinforzo.
- Il bordo della saldatura del bisello che tiene unite la piastra di rinforzo e la piastra di base.

Si può quindi affermare che le tensioni sono ancor meglio distribuite sulla saldatura di testa e sul bisello riducendo al minimo le tensioni tangenziali nel modello. Come per il Provino 3 le tensioni lungo il piano di gola sono ridotte a dei valori molto bassi confronto alla tensione nominale nella lamiera come illustrato nelle figure 3.21 e 3.22.

La presenza del bisello quindi rispetto al Provino 3 va a limitare e di molto una zona d'intensificazione delle tensioni.

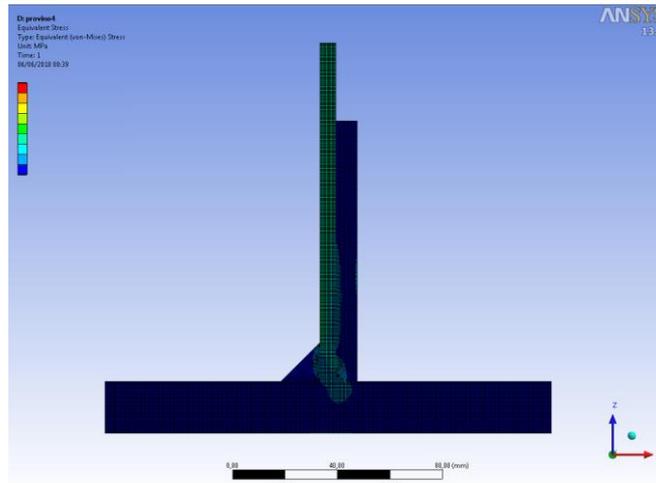


Figura 3.19 Tensione equivalente sulla superficie del Provino 4.

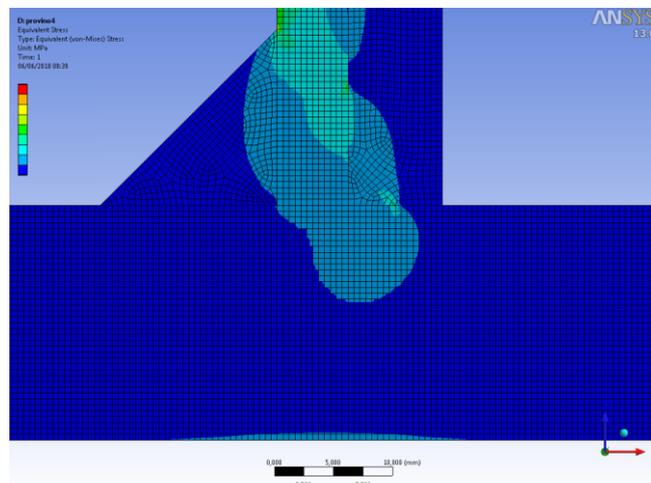


Figura 3.20 Zoom della tensione equivalente nella zona d'interesse.

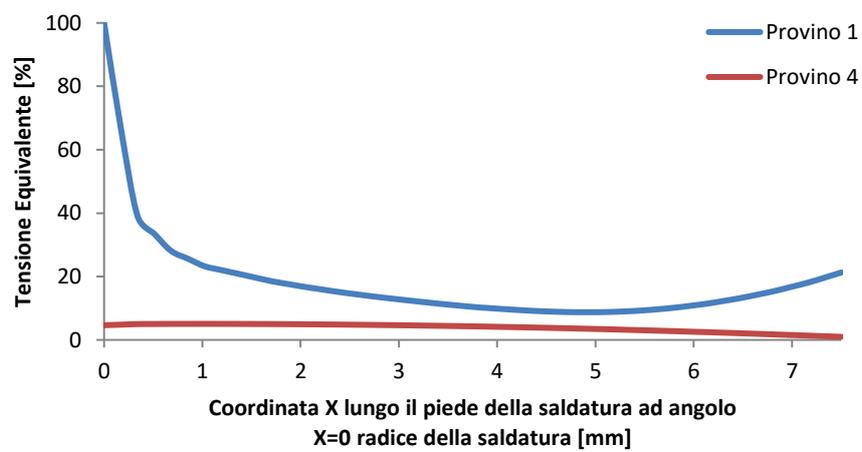


Figura 3.21 Grafico delle tensioni equivalenti sulla superficie esterna dei provini indicati lungo la sezione di gola.

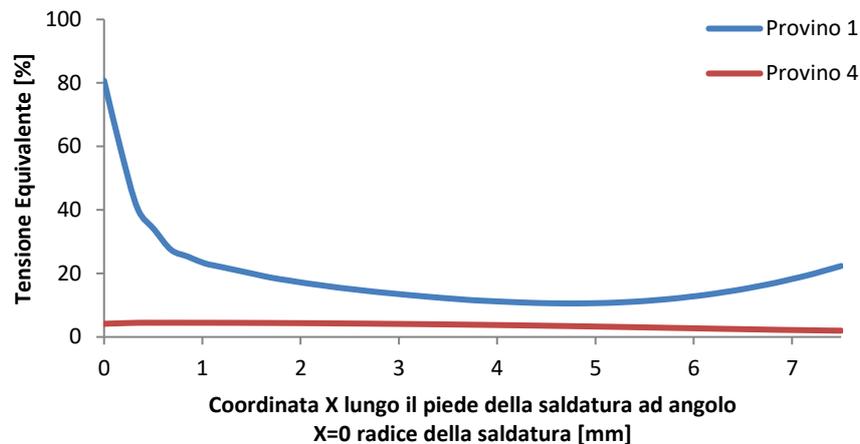


Figura 3.22 Grafico delle tensioni equivalenti all'interno dei provini indicati lungo la sezione di gola.

3.4. Tensione effettiva dell'intaglio

Per ottenere risultati più precisi per poter verificare la bontà dei modelli fatti in precedenza e avere un ulteriore confronto con le prove sperimentali si è applicato quanto descritto nel paragrafo 1.2. Quando nel capitolo 4 si modelleranno i giunti saldati dei modelli reali di testata e braccio non sarà più possibile applicare questo metodo a causa della complessità geometrica e soprattutto dei limiti delle macchine di calcolo utilizzate. Si potranno solo effettuare modelli come quelli del paragrafo 3.3, quindi è utile confrontarli e verificarne la bontà. È anche utile per avere una verifica in più su dove possa nascere la cricca della rottura.

L'andamento delle tensioni trovato in precedenza per il Provino 1 in figura 3.9 e soprattutto in figura 2.30 nel paragrafo 2.2 si può paragonare con la figura 3.23. In figura 3.23 la tensione effettiva d'intaglio è di un giunto a croce con le saldature caricate come nel caso di studio di questo documento. Sono però quattro cordoni molto vicini e simmetrici, con rapporti di dimensione tra piede del cordone e spessore delle lamiere molto differenti da quello esaminati fin ora. Si notano molto bene quali sono le zone di intensificazione e nel caso della radice della saldatura la concentrazione localizzata e la forma sono paragonabili.

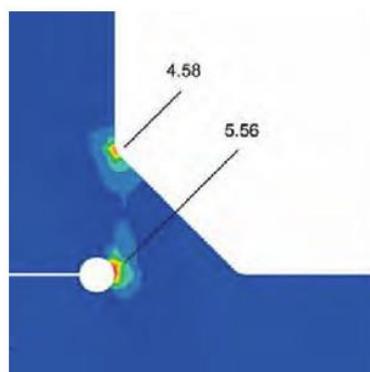


Figura 3.23 Immagine tratta da [11] rappresentante la tensione effettiva d'intaglio di un giunto a croce

3.4.1. Provino 1

Si è creata la geometria tridimensionale del semi-provino modificando i raggi d'intaglio al piede della saldatura e alla radice della stessa come descritto nel paragrafo 1.2. Seguendo le

indicazioni si è quindi effettuata la mesh come in figura 3.24. In figura 3.25 sono riportate le tensioni con la stessa scala, con gli stessi vincoli e gli stessi carichi della figura 3.9. Si può notare che il punto d'intensificazione principale si trova all'apice della saldatura.

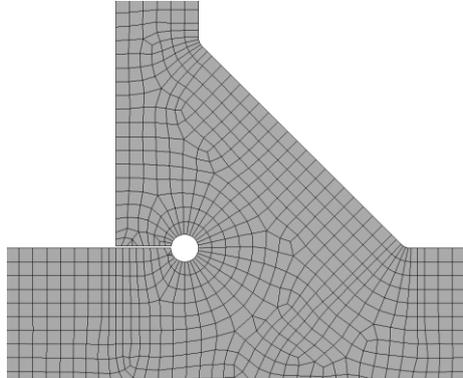


Figura 3.24 Zoom della mesh nella zona della saldatura del Provino 1.

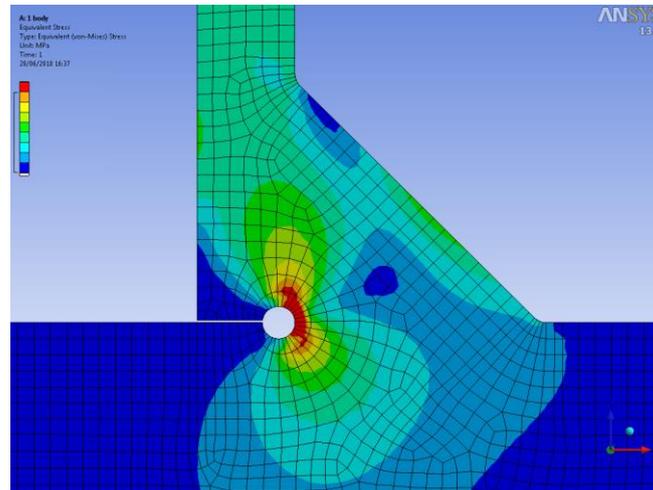


Figura 3.25 Tensione effettiva d'intaglio Provino 1.

3.4.2. Provino 2

Per prima cosa si è creato il modello con Solid Edge del semiprovino modificando i raggi d'intaglio al piede della saldatura e alla radice della stessa come descritto nel paragrafo 1.2. Seguendo le indicazioni si è quindi effettuata la mesh come in figura 3.26. In figura 3.27 sono riportate le tensioni con la stessa scala, con gli stessi vincoli e gli stessi carichi della figura 3.12. Si può notare che il punto d'intensificazione principale si trova come per il Provino 1 all'apice della saldatura ma le tensioni si sono abbassate molto, grazie alla presenza del bisello di rinforzo.

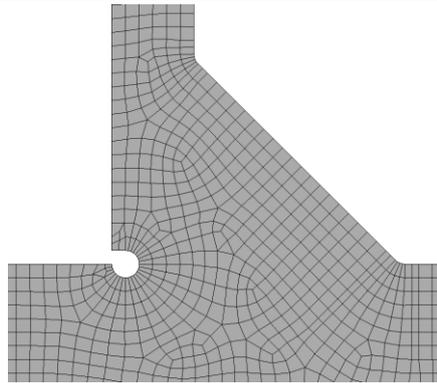


Figura 3.26 Zoom della mesh nella zona della saldatura del Provino 2.

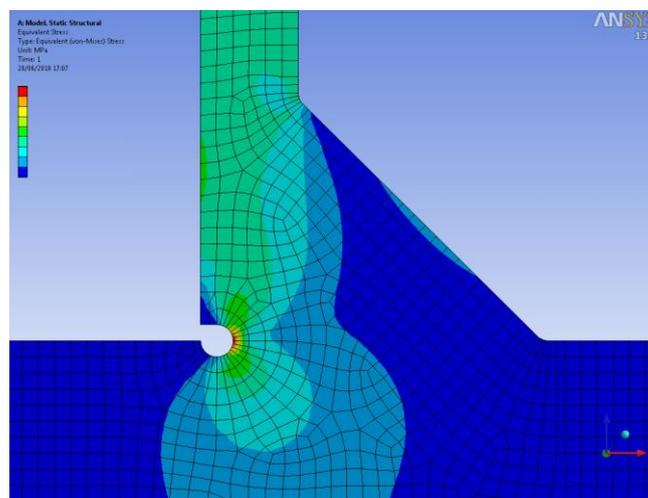


Figura 3.27 Tensione effettiva d'intaglio Provino 2.

3.4.3. Provino 3

Si è creata la geometria tridimensionale del semi-provino su Solid Edge in un a parte unica, modificando i raggi d'intaglio al piede della saldatura e alla radice della stessa come descritto nel paragrafo 1.2. Seguendo le indicazioni si è quindi effettuata la mesh come in figura 3.28. In figura 3.29 sono riportate le tensioni con la stessa scala, con gli stessi vincoli e gli stessi carichi della figura 3.16. Si può notare che si manifestano più di un punto d'intensificazione. Il primo di trova al piede della saldatura ad angolo, il secondo alla radice della saldatura tra saldatura di testa e le due piastre, il terzo sul bordo dove si uniscono saldatura di testa e la lamiera con la piastra di rinforzo.

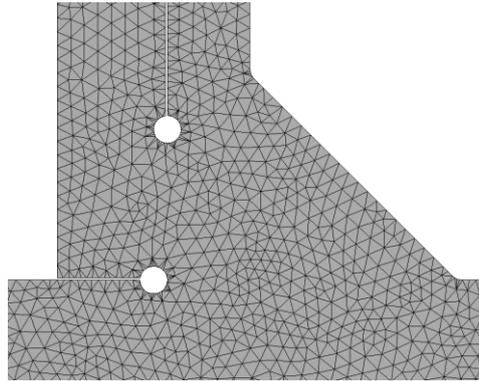


Figura 3.28 Zoom della mesh nella zona della saldatura del Provino 3.

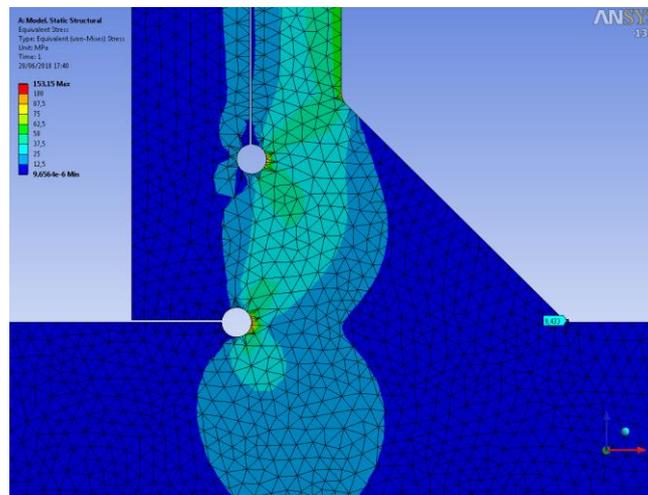


Figura 3.29 Tensione effettiva d'intaglio Provino 3.

3.4.4. Provino 4

Si è modellata la geometria tridimensionale del semi-provino in un unico componente, modificando i raggi all'apice delle zone d'intaglio come descritto nel paragrafo 1.2. Seguendo le indicazioni si è quindi effettuata la mesh come in figura 3.30. In figura 3.31 sono riportate le tensioni con la stessa scala, con gli stessi vincoli e gli stessi carichi della figura 3.20. Si possono notare più di un punto d'intensificazione delle tensioni. Il primo di trova al piede della saldatura ad angolo tra cordone e lamiera, il secondo tra saldatura di testa e lamiera e piastra di rinforzo, il terzo sul bordo dove si uniscono bisello e la piastra di rinforzo.

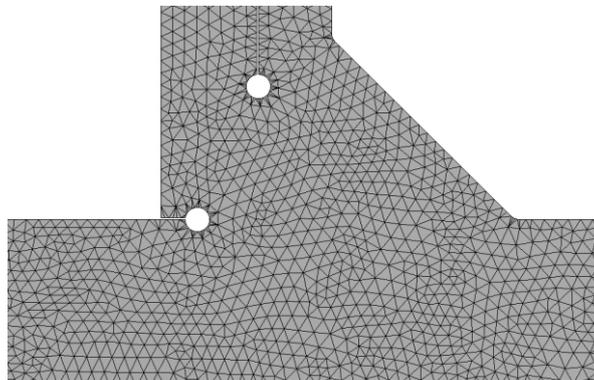


Figura 3.30 Zoom della mesh nella zona della saldatura del Provino 4.

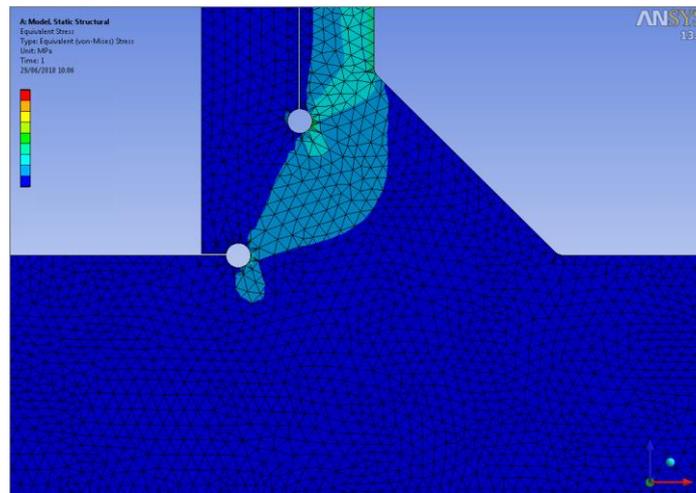


Figura 3.31 Tensione effettiva d'intaglio Provino 4.

Tabella 3.1 Fattori d'intensificazione metodo della tensione effettiva e analisi paragrafo 3.3.

Provino	Posizione	Normale	ENS
1	Apice dell'intaglio alla radice della saldatura angolare	5,78	5,58
2	Apice dell'intaglio tra lamiera e piastra	3,14	2,96
	Piede del cordone di saldatura ad angolo	2,13	2,18
3	Apice dell'intaglio tra piastra base e piastra di rinforzo	2,58	2,88
	Apice dell'intaglio tra piastra di rinforzo e lamiera	1,43	2,00
	Piede del cordone di saldatura ad angolo	2,14	2,42
4	Apice dell'intaglio tra piastra di rinforzo e lamiera	1,60	2,12
	Apice dell'intaglio tra piastra base e piastra di rinforzo	1,43	1,57

3.4.5. Confronto

Per poter confrontare le stime della tensione all'apice delle zone d'intaglio, nelle zone d'intensificazione degli sforzi si sono calcolati i coefficienti della tabella 3.1. Questi dati numerici si sono ottenuti dividendo il valore della tensione equivalente nelle zone dove è maggiore per il valore di tensione nominale della lamiera verticale. Si sono quindi ottenuti dei fattori d'intensificazione sia per valori trovati con i modelli del paragrafo 3.3 che per quelli trovati con

il metodo della tensione effettiva d'intaglio. In entrambe le tipologie di simulazione si utilizza un modello elastico lineare del materiale. Si può osservare che in genere i fattori d'intensificazioni non hanno scostamenti maggiori del 10%. Fanno eccezione le zone d'intensificazione i cui intagli si trovano posizionati in direzione parallela alla direzione di carico. In questi due casi le differenze sono maggiori del 30%. In genere sono anche le posizioni in cui il fattore d'intensificazione è minore rispetto a quello delle altre zone del modello. Si può quindi affermare che in generale i due metodi differenti di modellare le stesse saldature con il cordone ad angolo portano a risultati confrontabili in termine di tensioni massime e individuano le stesse zone d'intensificazione dove è maggiore la possibilità d'innesco della cricca a fatica e della rottura per un carico statico a trazione.

3.5. Prove sperimentali

Sono state eseguite dal Centro Ricerche della Merlo Project S.r.l. le prove sperimentali utilizzando i provini realizzati secondo le osservazioni svolte nel paragrafo 3.2. L'attrezzatura e il banco prova messi a disposizione permettono di effettuare la prova controllando con un potenziometro la pressione della camera del martinetto che pone in trazione i provini, effettuando quindi una prova di trazione in controllo di forza. La centralina associata al banco prova in figura 3.32 è quella che è stata utilizzata per la prova. Possiede due pompe a pistoncini radiali, ed ognuna è collegata ad un proprio motore elettrico. È possibile lavorare in portata singola e doppia. Le pompe sono di dimensioni differenti, la prima ha portata massima di 11l, la seconda di 30l. entrambe hanno la pressione massima di 400bar. Tramite dei selettori è possibile scegliere quale pompa attivare o se utilizzarle entrambe. È presente un controllo del livello dell'olio nel circuito per tenere sotto controllo eventuali perdite. Sono anche disponibili dei timer con cui si possono creare rampe di carico per effettuare delle prove di tipo ciclico. Attraverso delle valvole di massima, manualmente o tramite un potenziometro è possibile controllare la prova in pressione a partire da 5bar al massimo di 400bar. Il sistema di controllo possiede un'accuratezza dello 0,5% sul fondo scala a 400bar. Lo strumento di misura per l'acquisizione dei dati di pressione della camera del martinetto possiede lo stesso livello di accuratezza. Si possiede quindi un'incertezza di circa 0,3 bar sui dati finali di pressione.



Figura 3.32 Centralina utilizzata per effettuare le prove

L'allungamento del provino durante la prova è stato possibile misurarlo a causa della poca accessibilità e spazio all'interno del banco. Si è provato ad inserire uno strumento di misura sulla piastra di ancoraggio tra provino e martinetto ma non ha fornito risultati sufficientemente accurati. Quindi è possibile effettuare delle osservazioni qualitative sulla zona di rottura e

quantitative solo in termini di forza. Per ogni tipologia di provino si sono effettuati almeno tre test validi. Il test si è considerato valido quando le attrezzature di vincolo riuscivano a mantenere la piastra di base vincolata come nei modelli FEM, senza permettere che subisse grandi deformazioni. I valori di forza verranno espressi in percentuale rispetto al valore di forza medio trovato per il provino di tipologia 1, i quali rappresentano lo stato dell'arte delle saldature tra testata e braccio.

Il banco di prova era già presente in magazzino, ed anche il martinetto a corsa ridotta per altre prove che si erano effettuate in azienda. In figura 3.33, 3.34 e 3.35 si può osservare il banco di prova montato. In queste foto si tratta del banco di prova con le attrezzature di ancoraggio del provino definitive, che hanno permesso di vincolare il provino nella maniera più simile ai vincoli che sono stati imposti sui modelli agli elementi finiti. I bulloni utilizzati sono stati dimensionati in modo tale che possano resistere in caso si dovesse portare a rottura per strappo la lamiera centrale dei provini.



Figura 3.33 Banco di prova montato.



Figura 3.34 Dettaglio montaggio attrezzature d'ancoraggio del provino allo stelo del martinetto idraulico.



Figura 3.35 Dettaglio montaggio delle attrezzature di vincolo del provino al banco di prova.

3.5.1. Provino 1

Prima di effettuare la prova si è controllato come si presentassero le saldature, verificando se fossero presenti difettosità di grandi dimensioni. In figura 3.32 si può notare che sono presenti dei difetti di piccole dimensioni all'apice della saldatura. Probabilmente a causa del fatto che il materiale fuso per una non corretta posizione della torcia non ha riempito bene l'apice del cordone.

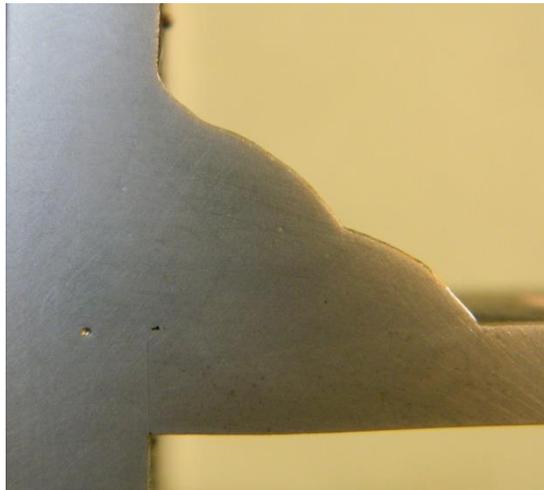


Figura 3.32 Cordone di saldatura del Provino 1, stato indeformato.

Come si può osservare nelle figure 3.33, 3.34, 3.35, 3.36 e 3.37 i provini si sono rotti nella zona individuata come la più critica nei modelli FEM. La cricca si è sviluppata lungo la sezione di gola partendo dall'apice del cordone di saldatura, come ipotizzato nei paragrafi 3.3.1 e 3.4.1. In media si è misurato un valore di forza pari al 100%. La lamiera non subisce molta strizione ma nell'apertura della cricca si incurva molto.



Figura 3.33 Provino 1 dopo la prova di trazione.



Figura 3.34 Zoom nella zona di rottura del Provino 1, lembo lamiera.

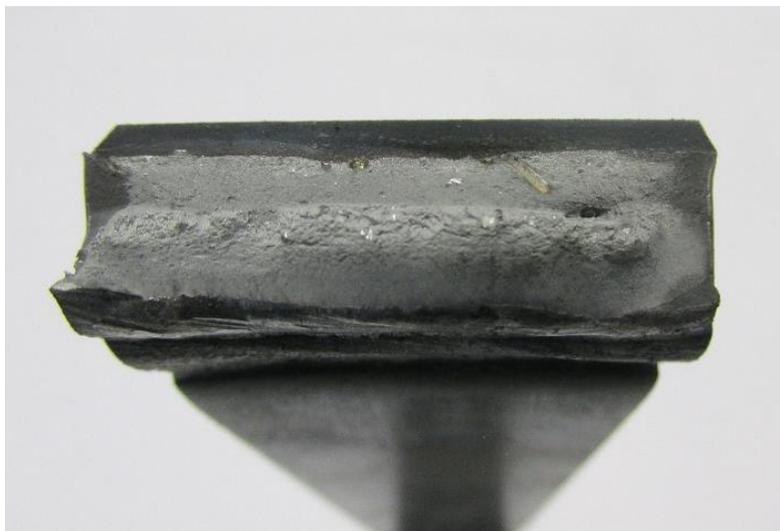


Figura 3.35 Zoom nella zona di rottura del Provino 1 vista frontale.



Figura 3.36 Zoom della zona di rottura del Provino 1 vista frontale evidenziando la strizione.



Figura 3.37 Zoom nella zona di rottura del Provino 1.

3.5.2. Provino 2

Prima di effettuare la prova si è controllato come si presentassero le saldature, verificando se fossero presenti difettosità di grandi dimensioni. In figura 3.36 si può notare che sono presenti dei difetti di dimensioni minori a quelli del provino 1. La presenza del bisello ha probabilmente spinto l'operatore ad avvicinare maggiormente la torcia della zona dell'apice del cordone di saldatura e facilita il flusso del materiale fuso durante il processo.

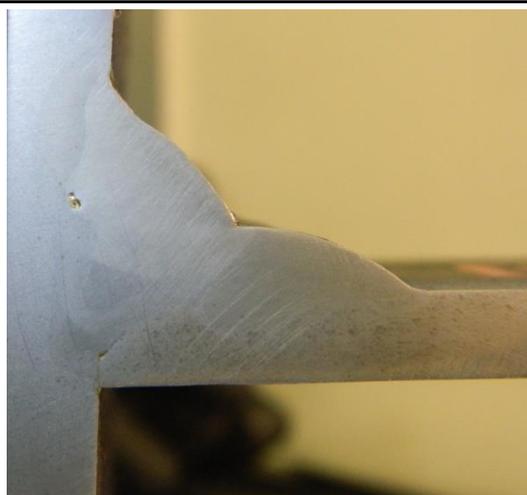


Figura 3.38 Cordone di saldatura del Provino 2, stato indeformato.

Come si può osservare nelle figure 3.39, 3.40, 3.41, 3.42 e 3.43 i provini si sono rotti in una zona differente da quella individuata dai modelli FEM nei paragrafi 3.3.1 e 3.4.1. La sezione di gola come descritto in quei paragrafi si ritrova con tensioni equivalenti molto basse per la maggior parte della sua estensione, per cui la rottura avviene al piede della saldatura, nella lamiera più sottile, in una sezione dove mediamente la tensione equivalente è più alta e non solo puntualmente. In media si è misurato un valore di forza pari al 119%. È presente una seconda cricca, non ancora di dimensioni critiche da portare a cedimento, lungo la sezione di gola, a partire dall'apice del cordone di saldatura.



Figura 3.39 Provino 2 dopo la prova di trazione.



Figura 3.40 Provino 2 dopo la prova di trazione, zoom nella zona di rottura.

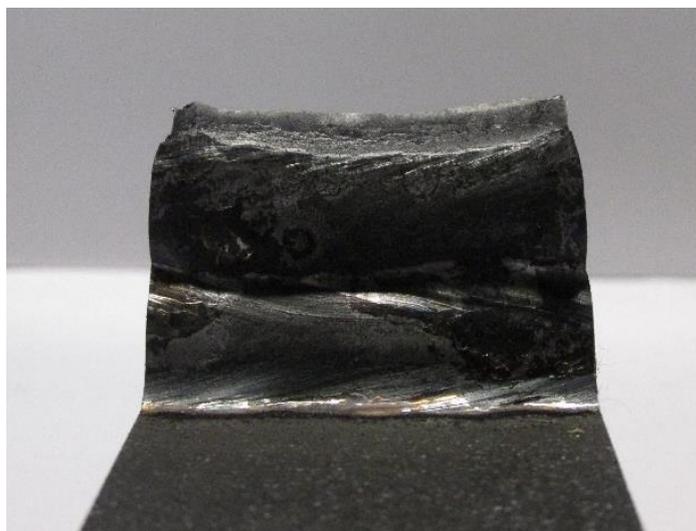
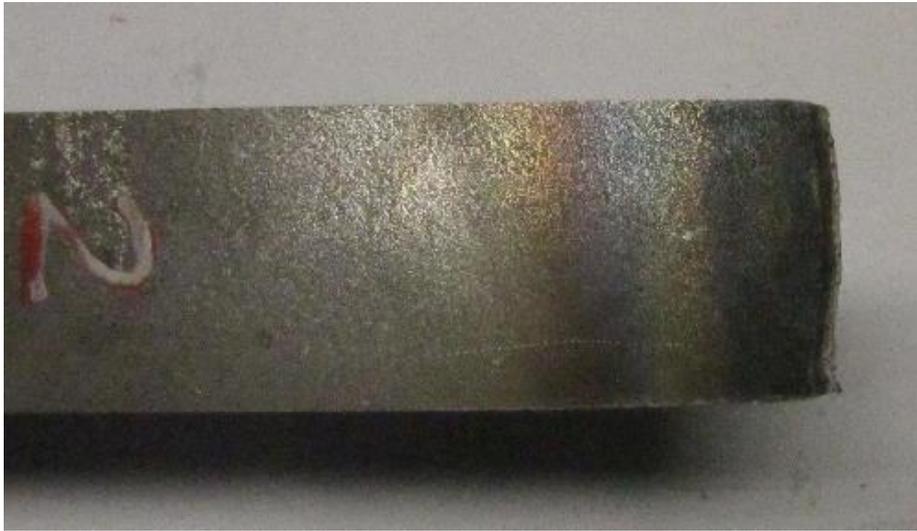


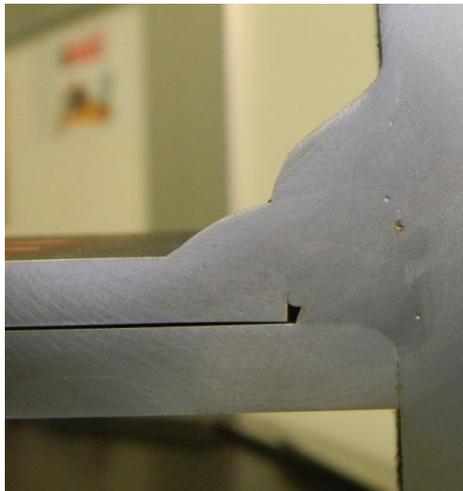
Figura 3.41 Provino 2 dopo la prova di trazione vista frontale, zoom nella zona di rottura, piastra base.



Figura 3.42 Zoom della zona di rottura del Provino 2, lamiera sottile.**Figura 3.43** Zoom della zona di rottura del Provino 2 evidenziando la strizione della lamiera sottile.

3.5.3. Provino 3 e Provino 4

Prima di effettuare la prova si è controllato come si presentassero le saldature, verificando se fossero presenti difettosità di grandi dimensioni. In figura 3.44 si può notare che nei provini di tipologia 3 sono presenti dei difetti di dimensioni minori vicino alla piastra di base mentre in testa alla lamiera sottile è presente una zona con assenza di materiale di dimensioni notevoli. Questa mancanza di materiale è probabilmente causata dalla poca accessibilità di quella zona da parte della torcia e dalla geometria che non facilita il flusso del materiale fuso.

**Figura 3.44** Cordone di saldatura del Provino 3, stato indeformato.

In figura 3.45 si può notare che nei provini di tipologia 4 sono presenti dei difetti di dimensioni minori vicino alla piastra di base mentre in testa alla lamiera sottile è presente una zona con assenza di materiale di dimensioni maggiori. Questa mancanza di materiale è probabilmente causata dalla poca accessibilità di quella zona da parte della torcia. Questo effetto è comunque minore a quelli notati in figura 3.44 per il provino di tipologia 3. Probabilmente la presenza di un

bisello sulla lamiera di rinforzo che porta a porre più attenzione nel posizionamento della torcia e facilita il flusso di materiale fuso.

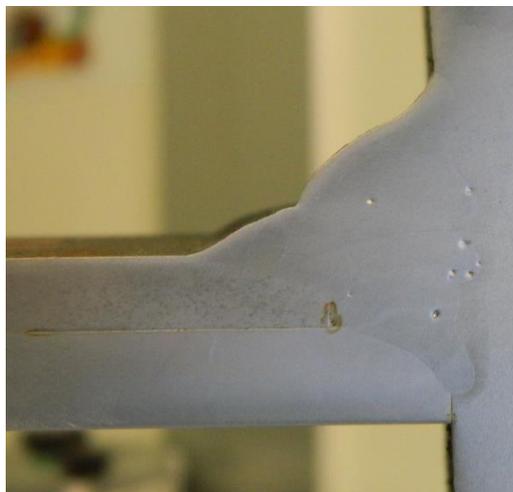


Figura 3.45 Cordone di saldatura del Provino 4, stato indeformato.

I risultati sperimentali per entrambe le tipologie di provino hanno evidenziato un effetto che in precedenza è stato trascurato nei modelli FEM, i quali ipotizzano perfetta continuità di materiale delle saldature e nei quali l'attenzione del raffinamento della mesh è stata posta nella zona del cordone di saldatura. A causa della geometria scelta per i provini la zona più debole non è più il cordone di saldatura ad angolo ma quella della chiodatura. Come si può osservare nelle figure 3.46, 3.47, 3.48 e 3.49 la sezione ridotta della lamiera sottile subisce strizione fino a rottura. Il materiale di riporto della chiodatura rimane completamente aderente alla piastra di rinforzo, senza deformarsi insieme alla lamiera sottile. Il valore di forza massimo registrato prima della rottura mediamente è di circa il 95%.



Figura 3.46 Provino 4 dopo la prova di trazione.

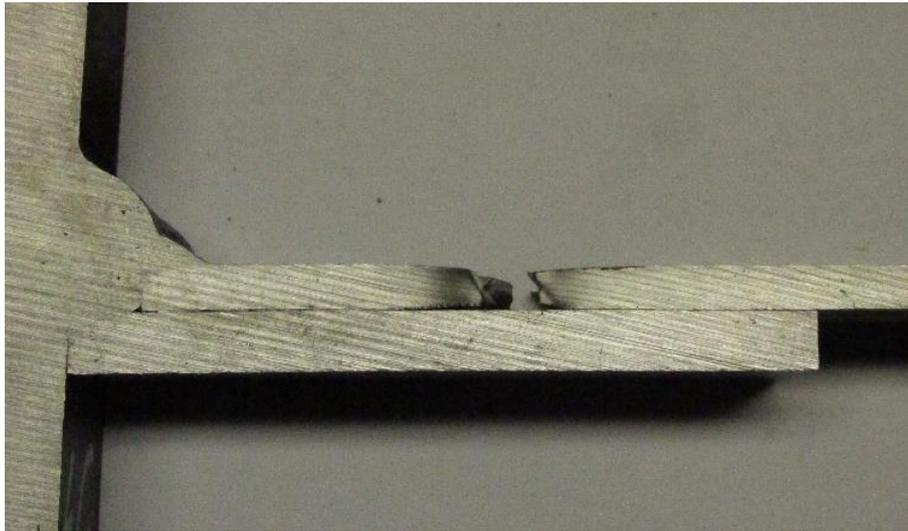


Figura 3.47 Provino 4 dopo la prova di trazione, zoom nella zona di rottura.



Figura 3.48 Provino 4 dopo la prova di trazione, zoom nella zona di rottura, lamiera sottile snervata.

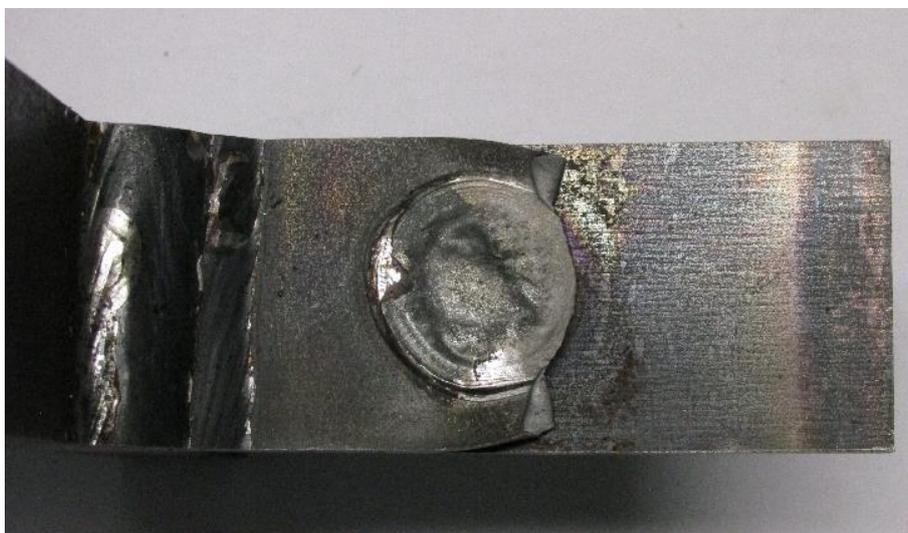


Figura 3.49 Provino 4 dopo la prova di trazione, zoom nella zona di rottura, lamiera sottile snervata e lamiera di rinforzo che non ha subito deformazioni.

3.6. Modello elasto-plastico

Nel paragrafo 3.3 e in tutte le simulazioni presentate in questo documento è stato utilizzato il modello elastico lineare per descrivere il comportamento del materiale. Essendo tutti i componenti e le saldature in acciaio si è utilizzato un modulo di Young $E=200\text{GPa}$, costante per ogni valore di allungamento e di forza. Il modello elastico del materiale quando si vogliono progettare i componenti è corretto e fornisce risultati attendibili perché generalmente si vuole garantire di rimanere sempre con valori di tensione minore di quelli di snervamento. I provini durante le prove sono però stati posti in trazione fino a rottura, per cui è necessario considerare il comportamento del materiale anche nel campo plastico.

È stata scelta come riferimento la curva tensione-deformazione proposta da de Jesus [8] per un acciaio s690 nella figura 1 a pagina 141 del documento. Stando allo standard europeo EN 10025 [9] dei materiali si hanno indicazioni sulla composizione degli stessi e sui vari carichi caratteristici. Ogni produttore d'acciaio quindi vende materiale che come minimo soddisfa quelle richieste ma che sovente è di fattura migliore per sicurezza. Di quando sia migliore non è dato saperlo a meno che non si proceda con una campagna di prove e di verifiche. Si è utilizzata la stessa caratteristica del materiale in tutto il provino, anche nel cordone della saldatura ad angolo seguendo le indicazioni delle normative europee [1] e [2], le quali invitano ad utilizzare gli stessi valori di resistenza dei materiali dei pezzi collegati con il giunto se la saldatura è stata effettuata rispettando le indicazioni di qualità.

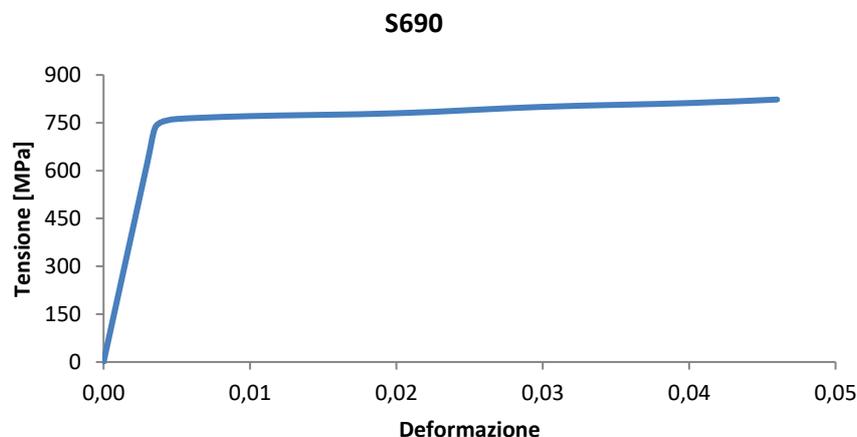


Figura 3.46 Curva caratteristica dell'acciaio s690.

3.6.1. Mechanical APDL

Si è quindi preso in considerazione il modello del Provino 1 su Ansys APDL, utilizzato nel paragrafo 2.1.3. La modellazione, la mesh, l'applicazione di carichi e vincoli avviene nella stessa maniera, con lo stesso script, scegliendo i valori di $a=0,5\text{mm}$ $b=2\text{mm}$. Per studiare il modello elasto-plastico si è introdotta la caratteristica tensione-deformazione del materiale attraverso il comando TB. Consultando l'help [5] si è scelto il label MELAS (Multilinear ELASticity). È possibile inserire la caratteristica per punti e il materiale seguirà la curva ricavata interpolando tra i punti inseriti, sia mentre si applica il carico, che mentre si scarica. Quindi si può dire che introduca delle pseudo deformazioni plastiche, mentre si applica il carico il comportamento è quello reale, mentre si toglie il materiale le tratta come le deformazioni elastiche, non rimangono

deformazioni permanenti. Nelle simulazioni trattate in questo documento di Tesi e nella prova sperimentale si studia il comportamento fino alla rottura in controllo di forza aumentando progressivamente il carico, quindi questo modello semplificativo del comportamento del materiale può essere accettato.

Successivamente, partendo dal modello del Provino 1, si è creato il modello del Provino 2. Questo provino differisce del primo per la presenza del bisello che permette di avere continuità di materiale nella zona dell'intaglio e quindi i nodi della zona in cui è presente il bisello subiscono la funzione NUMMGR per venire uniti.

Le zone di colore rosso delle figure in questo paragrafo corrispondono alle zone in cui il materiale ha superato i limiti del campo elastico e quindi subisce delle deformazioni di tipo plastico, nella realtà irreversibili.

Provino 1

Si può notare nelle figure 3.47 e 3.48 come la simulazione con il modello di materiale elasto-plastico evidenzia come zona di rottura la stessa delle prove sperimentali nel paragrafo 3.5.1. Il materiale plasticizza e va a rottura lungo il piano della sezione di gola del cordone di saldatura. I risultati si sono ottenuti impostando come valore di forza di trazione quello medio misurato durante le prove sperimentali. La lamiera non viene sollecitata in particolare modo lungo la sua estensione, ad eccezione della zona vicino al cordone di saldatura dove anche lei risente dell'effetto d'intensificazione delle tensioni.

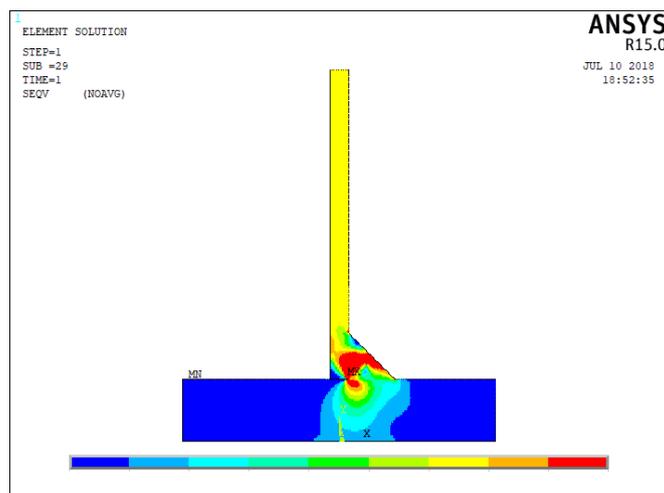


Figura 3.47 Tensioni Equivalenti sugli elementi, Provino 1, materiale elasto-plastico.

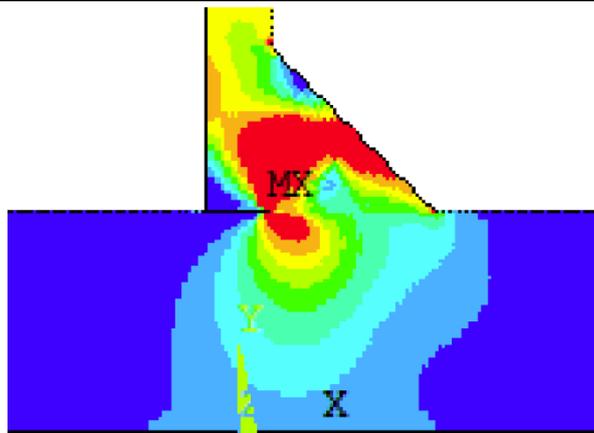


Figura 3.48 Zoom della figura 3.47 nella zona del cordone di saldatura.

Provino 2

Anche per il provino 2 con le dovute osservazioni è possibile paragonare i risultati sperimentali con i risultati visibili nelle figure 3.49 e 3.50 la prima cosa che si può notare è come il cordone di saldatura triangolare sia scarico. Le tensioni non si concentrano lungo tutta la sezione di gola. Si va a plasticizzare e formare una sezione a minor resistenza in prossimità della zona termicamente alterata, dove il materiale peggiora le proprie caratteristiche meccaniche a causa del processo di saldatura. I risultati della figura 3.49 si sono ottenuti impostando come valore di forza di trazione quello medio misurato durante le prove sperimentali. Mentre il cordone di saldatura ha migliorati di molto il suo stato tensionale le intensificazioni si sono quindi concentrate sulla lamiera sottile. Questa lamiera anche lontano dal giunto è quasi snervata.

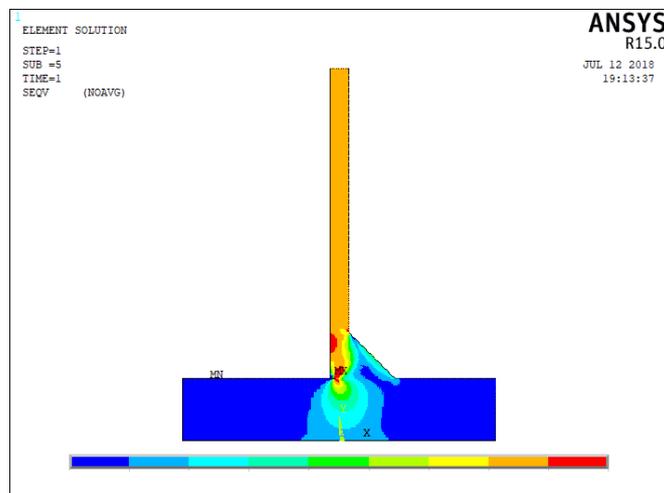


Figura 3.49 Tensioni Equivalenti sugli elementi, Provino 2, materiale elasto-plastico, forza rottura Provino 2.

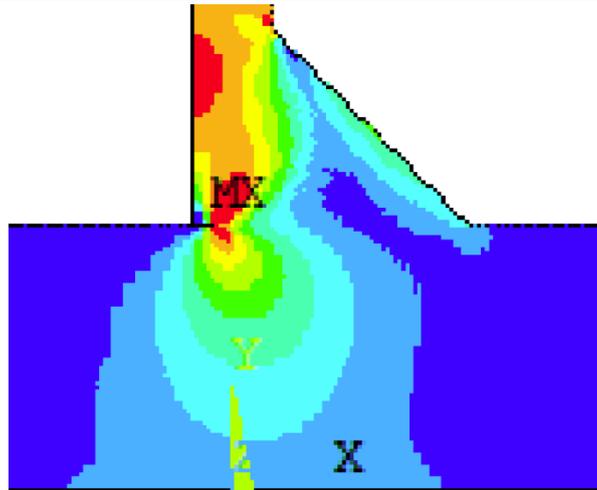


Figura 3.50 Zoom della figura 3.49 nella zona del cordone di saldatura.

Quindi a differenza del provino 1 la lamiera quando avviene la rottura sta già snervando tutta, non è più in campo elastico. Le tensioni equivalenti si distribuiscono in maniera molto migliore. Per evidenziare meglio gli effetti benefici del bisello si è anche effettuata una simulazione con il carico pari a quello utilizzato per il Provino 1. Si nota quindi in figura 3.51 come la lamiera stessa, non solo il cordone di saldatura, subisca un effetto d'intensificazione delle tensioni molto minore rispetto a quanto si può osservare in figura 3.48 per il Provino 1.

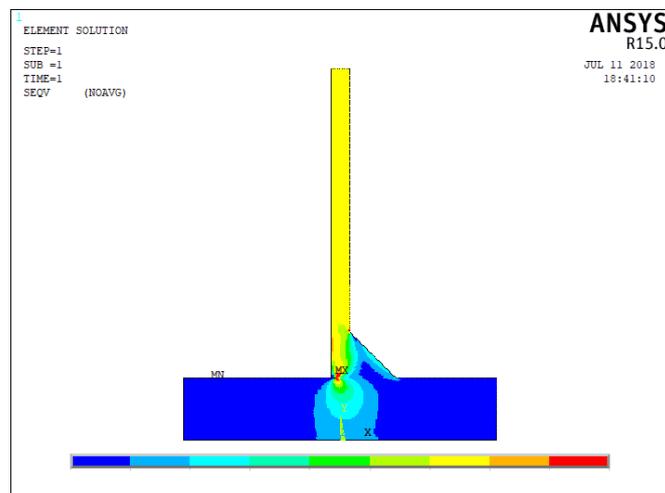


Figura 3.51 Tensioni Equivalenti sugli elementi, Provino 2, materiale elasto-plastico, forza rottura Provino 1.

3.6.2. Workbench

Si è svolta presso il Politecnico di Torino la simulazione del comportamento plastico del materiale con Workbench. A causa dei limiti tecnici della macchina di calcolo utilizzata la si è approssimata la curva caratteristica di tensione e allungamento del materiale attraverso ad una bilineare. Se si osserva la figura 3.46 si può notare che è possibile tracciare la curva bilineare senza dover introdurre delle approssimazioni di grande entità. Ad esempio, è possibile approssimare il tratto plastico come illustrato nella figura 3.52.

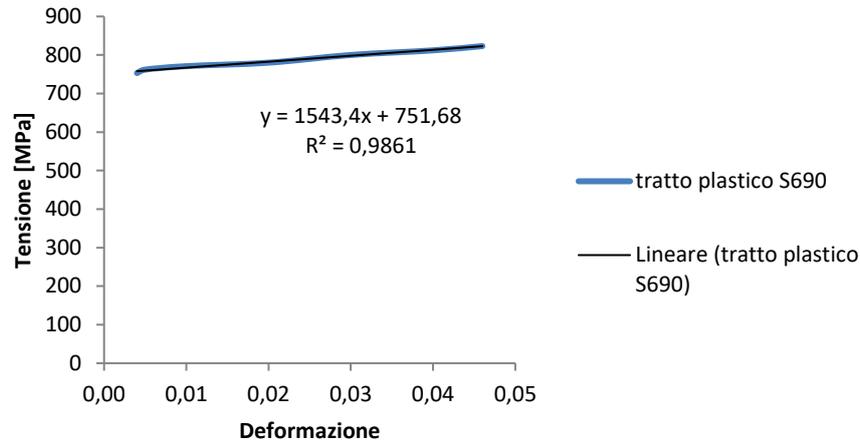


Figura 3.52 Linearizzazione del tratto plastico della caratteristica dell'acciaio S690.

I modelli di base dei provini per le simulazioni sono geometricamente gli stessi usati fin ora in questo documento. Si applica sempre il vincolo sulla superficie inferiore della piastra e il carico su quella superiore della lamiera. Si sono usati gli stessi carichi del paragrafo 3.6.1. La mesh sempre per esigenze di calcolo e limiti di memoria possiede elementi di dimensione maggiore a quelli utilizzati su APDL. La dimensione caratteristica da 0,5mm è passata ad 1mm.

Provino 1

Utilizzando il carico di rottura medio misurato durante le prove sperimentali dei provini di tipologia 1 si sono ottenuti gli andamenti della tensione equivalente illustrati nelle figure 3.53 e 3.54. In rosso è evidenziata la zona in cui si ha plasticizzazione ed in cui è quindi possibile ipotizzare la rottura. La sezione di gola del cordone di saldatura ad angolo è l'unica zona dove sono presenti elementi che superano il limite di snervamento. La lamiera sottile non è ancora lontana dal limite di snervamento.

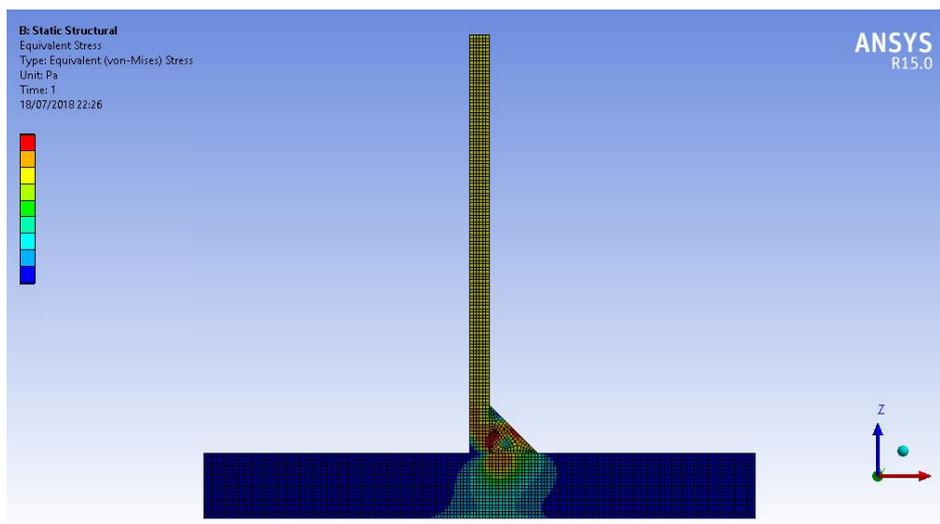


Figura 3.53 Tensioni equivalenti, Provino 1, materiale bilineare.

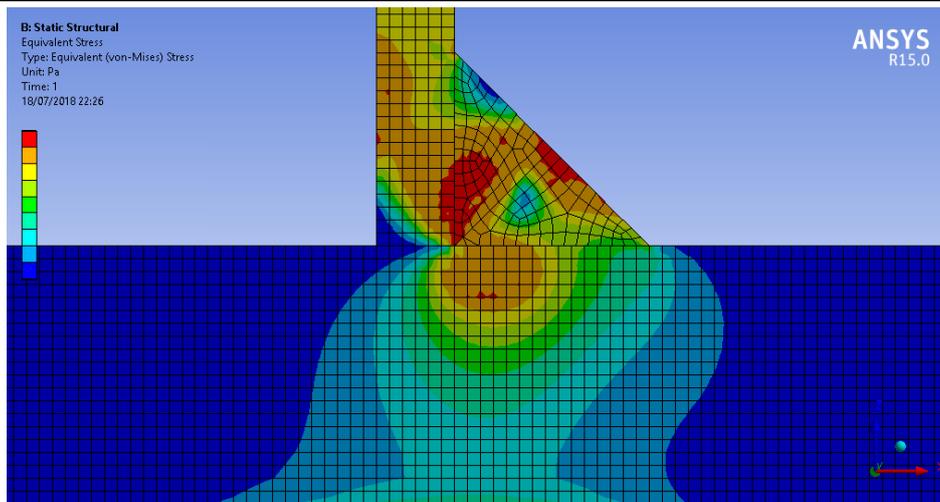


Figura 3.54 Tensioni equivalenti, Provino 1 zona cordone di saldatura, materiale bilineare.

Provino 2

Utilizzando il carico di rottura medio misurato durante le prove sperimentali dei provini di tipologia 2 si sono ottenuti gli andamenti della tensione equivalente illustrati nelle figure 3.55 e 3.56. In rosso è evidenziata la zona in cui si ha plasticizzazione ed in cui è quindi possibile ipotizzare la rottura. La sezione di gola del cordone di saldatura ad angolo in questo caso si ritrova molto scarica del limite di snervamento. La zona d'interfaccia del bisello con la lamiera si ritrova con tensioni prossime allo snervamento. La zona in cui si manifestano le tensioni equivalenti maggiori è al piede della saldatura, all'interno della lamiera sottile. Quest'ultima zona per altro coincide con quella di rottura dei provini di tipologia 2 durante le prove sperimentali. La lamiera sottile non è più lontana dal limite di snervamento. La scala di colori utilizzata per le figure è la medesima utilizzata in tutto il paragrafo 3.6 e i valori di tensione nella lamiera sottile si trovano appena al di sopra della soglia per la colorazione rossa, per cui in realtà non è presente una grande discontinuità lontano dal cordone di saldatura come sembrerebbe essere evidenziato dalla differenza di colore.

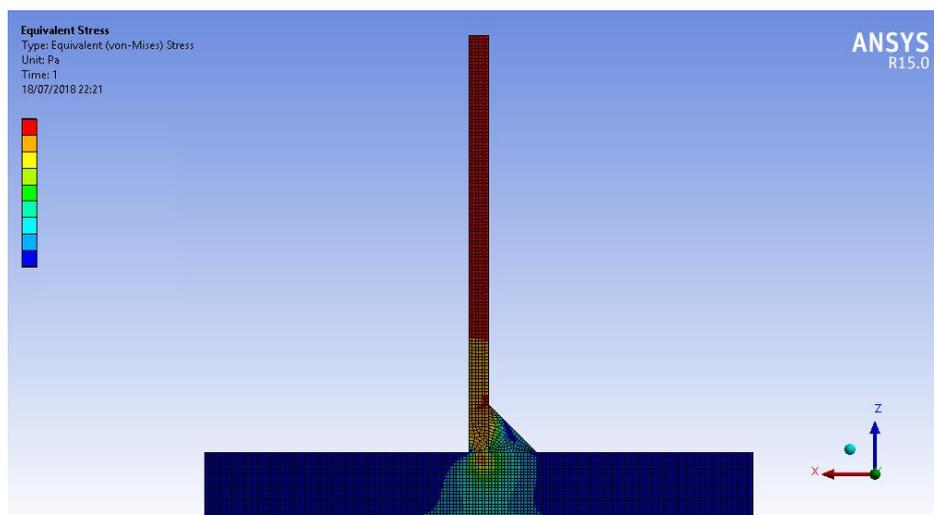


Figura 3.55 Tensioni equivalenti, Provino 2, materiale bilineare.

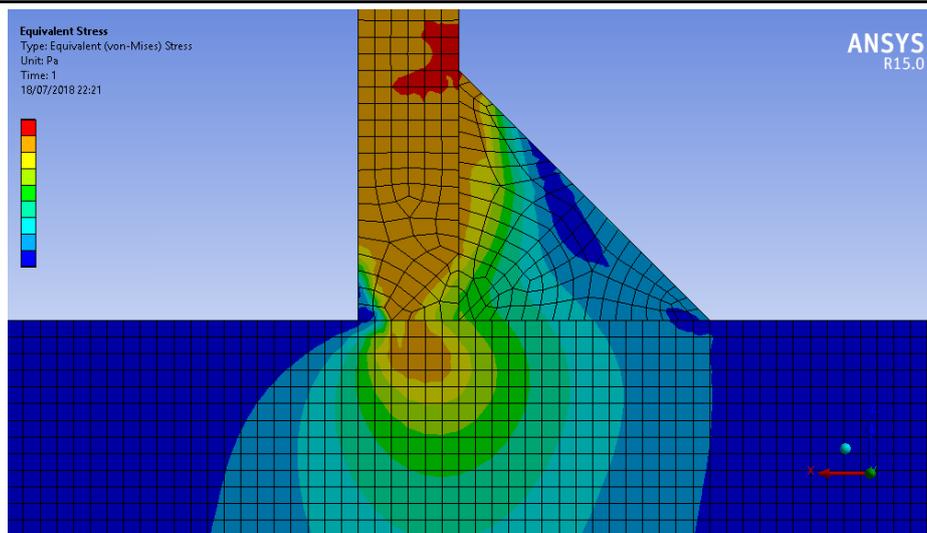


Figura 3.56 Tensioni equivalenti, Provino 1 zona cordone di saldatura, materiale bilineare.

3.6.3. Confronto tra Mechanical APDL e Workbench

Il confronto tra i risultati ottenuti con le due piattaforme di ANSYS deve tener conto di alcune differenze che stavano tra i dati di partenza utilizzati. queste differenze sono messe in evidenza dalla tabella 3.2. In comune si hanno le forme geometriche generali, i carichi ed i vincoli applicati ai modelli.

Tabella 3.2 Differenze sui dati iniziali delle simulazioni del paragrafo 3.6.

	Mechanical APDL	Workbench
Elementi	PLANE42	SOLID186
L caratteristica elementi zona di saldatura	0,5mm	1mm
Collegamento tra nodi e elementi di lamiera, saldatura e piastra coincidenti	NUMMGR	contatti <i>bonded</i>
Curva caratteristica tensione-deformazione Acciaio S690	Multilinear ELASTicity	Bilinear Isotropic Hardening

Osservando i risultati che sono stati presentati in questo documento si possono effettuare le seguenti cose. Entrambe le simulazioni del Provino 1 portano ad evidenziare nella zona della sezione di gola del cordone lo snervamento del materiale, conseguente alla maggiore intensificazione degli sforzi. L'andamento delle tensioni è paragonabile, risente di maggiori discontinuità nei risultati di Workbench a causa dei contatti. I contatti anche se *bonded* aggiungono rigidzze aggiuntive rispetto al processo di NUMMGR.

Le simulazioni della geometria del Provino 2 portano a risultati apparentemente differenti. Entrambi i modelli evidenziano come zona più critica il tratto della lamiera sottile al piede del cordone di saldatura. Le dimensioni e la forma di questa zona dove avviene snervamento sono differenti. Si conferma invece su entrambi i modelli il fenomeno per cui le tensioni si distribuiscono in maniera migliore all'interno del cordone ad angolo, con il bisello stesso che si

fa carico della maggior parte delle tensioni. In entrambi i casi i valori di forza necessari per arrivare a rottura comportano l'arrivo a condizioni di snervamento in tutta la lamiera sottile.

3.6.4. Confronto con i risultati sperimentali

I modelli risolti con Mechanical ADPL e i modelli risolti con Workbench hanno evidenziato come zone a tensione maggiore le stesse zone in cui si sono verificate rotture e aperture di cricche durante le prove sperimentali.

I modelli del Provino 1 hanno indicato la sezione di gola come possibile zona di rottura, cosa che si è verificata. Inoltre, viene evidenziata sulla lamiera sottile, sulla faccia opposta al cordone di saldatura una zona d'intensificazione con valori prossimi o pari allo snervamento. Questa zona può corrispondere nelle prove sperimentali con la causa delle deformazioni della lamiera visibili in figura 3.34.

I modelli del Provino 2 differiscono maggiormente tra loro ma evidenziano entrambi come probabile zona di rottura la lamiera sottile in prossimità del piede della saldatura. Il modello su Workbench in maniera più chiara del modello su Mechanical APDL. Nelle figure 3.40 e 3.43 si nota un fenomeno di strizionamento della lamiera sottile, questo fenomeno può essere causato da cosa evidenziato dai FEM: la lamiera sottile a quel livello di carico è quasi nella sua totalità in condizioni di snervamento.

4. Giunti reali tra testata e braccio

Dopo l'analisi FEM e sperimentale dei modelli semplificati si è passati all'analisi attraverso modelli FEM più simili ai componenti reali. Queste nuove analisi si sono svolte tutte utilizzando Ansys Workbench in azienda. Le matematiche di testata e braccio sono quindi state tenute quasi invariate e con analisi di complessità crescente si sono confrontati i benefici o i peggioramenti delle tensioni equivalenti sulla struttura e nei cordoni di saldatura a seconda dei sistemi di rinforzo applicati.

4.1. Modello base

L'ultima sezione di un braccio di un sollevatore telescopico come quelli prodotti dalla Merlo S.p.a. possono raggiungere ingombri massimi di più di 3m. Inoltre, mentre si utilizza il sollevatore con agganciata alla zattera una pala per caricare il materiale non si dovrebbe tenere il braccio completamente sfilato. Queste due osservazioni unite ai limiti di nodi ed elementi che il PC utilizzato può supportare, innanzitutto si è preso in considerazione solo un troncone della sezione finale del braccio. L'ingombro massimo di questo troncone è dell'ordine di grandezza dei 0,5m. I componenti reali così troncati sono osservabili nella figura 4.1.

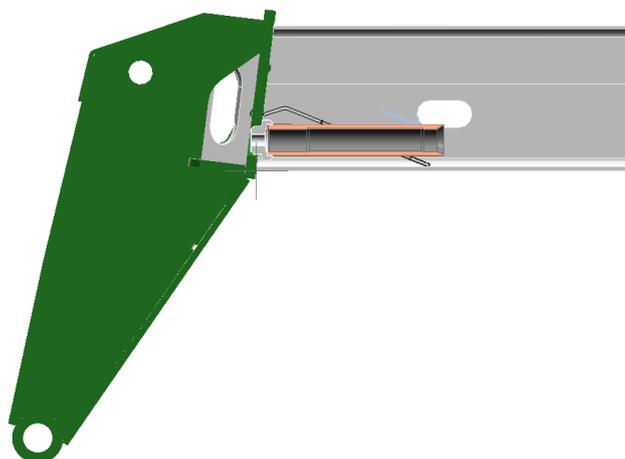


Figura 4.1 Vista in sezione del troncone dei componenti reali della struttura del'ultima sezione di un braccio a due sezioni con saldata la testata.

Questo modello geometrico di partenza è stato innanzitutto privato di fori e scavi che comportano effetti trascurabili ai fini delle simulazioni. È stata rimossa la boccola interna al braccio che fa da guida allo stelo del martinetto idraulico di sfilo, di conseguenza anche il foro della lamiera su cui era saldata la boccola. Sono stati rimossi i lamierini tondi che servono a garantire il passaggio delle condotte senza che si rovinino, attraverso gli scavi nella piastra della testata saldata sul braccio. È stata modificata la geometria della boccola saldata sulla piastra di

fondo della testata per evitare di modellarne le saldature che hanno geometrie complesse. Si è infine modellato il cordone di saldatura ad angolo tra testata e braccio, lungo tutto il perimetro di quest'ultimo secondo le prescrizioni che sono fornite nei disegni ufficiali. Anche i cordoni di saldatura interni per fissare la lamiera che supporta la boccola di guida sono stati modellati. Tutte queste modifiche a livello geometrico sono applicate nella figura 4.2.

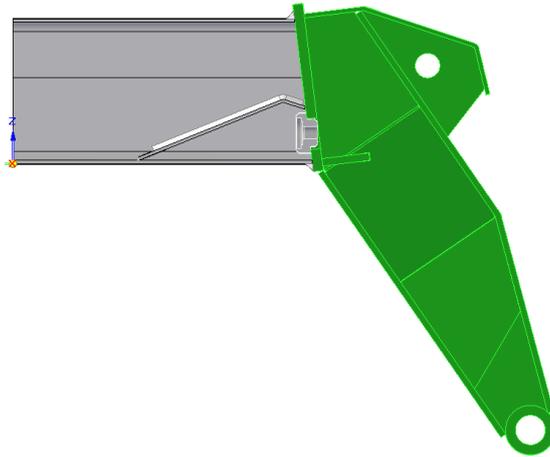


Figura 4.2 Sezione del braccio e della testata dopo tutte le modifiche a livello geometrico.

Le lamiere e le piastre che formano la testata sono state collegate tra loro e con la boccola per il perno della zattera imponendo dei contatti di tipo *bonded*. La piastra di base della testata e le lamiere piegate a C che formano il braccio hanno tra di loro delle superfici di contatto che teoricamente trasmettono solo delle forze normali di compressione. Per modellare questo comportamento bisogna usare contatti di tipo *frictionless*. Questa tipologia di contatto introduce nella soluzione del problema calcoli di tipo iterativo perché bisogna controllare se le superfici degli elementi collegati in questo modo sono a contatto o meno. Tutto ciò comporta un livello maggiore di complessità di calcolo e un aumento notevole di tempo di simulazione, mettendo a rischio la convergenza stessa della soluzione. Per questi motivi si compiranno prima simulazioni sopprimendo questi contatti, verificando successivamente di quanto è grossolana questa approssimazione.

Si è quindi verificato se fosse possibile ridurre ancora di più l'estensione del modello geometrico riducendo la testata alla sola piastra saldata direttamente sul braccio. Si sono quindi confrontati i risultati delle simulazioni con i due modelli. I vincoli sono stati posti come un supporto fisso sulla superficie all'estremità non saldata del braccio in tutti e due i casi. Come si vede in figura 4.3 per il modello semplificato la forza è stata applicata sotto forma di forza remota. Questa opzione permette di specificare le coordinate in cui si trova applicata la forza che viene poi durante la soluzione trasposta sulla superficie di applicazione con i dovuti momenti. La superficie di applicazione si è ottenuta facendo uno scavo di 0,1mm sulla superficie esterna della piastra della forma delle impronte delle lamiere che nella realtà sono saldate sopra per formare la testata. L'intensità, la direzione della forza e le coordinate della forza sono le stesse del modello con la testata completa, dove è applicata al centro della boccola come si vede in figura 4.4. La mesh del braccio, dei suoi componenti interni, del cordone di saldatura e per lo più della piastra di base della testata è la stessa per tutti e due i modelli.

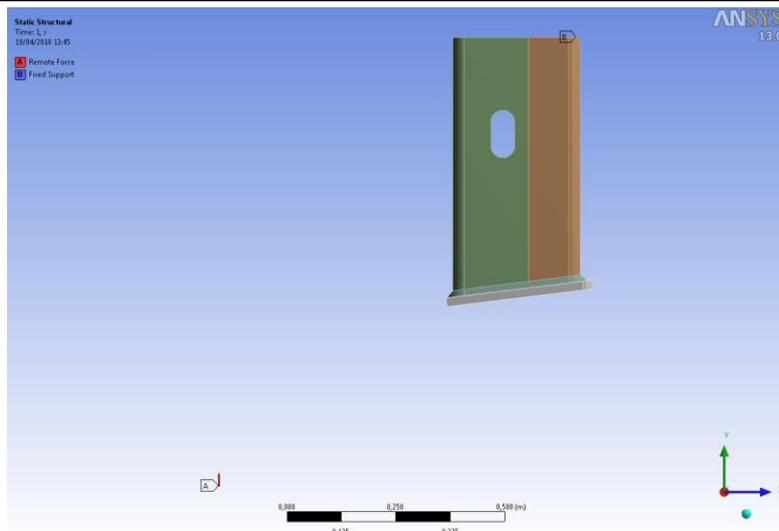


Figura 4.3 Carichi e vincoli per il modello con la sola piastra della testata.

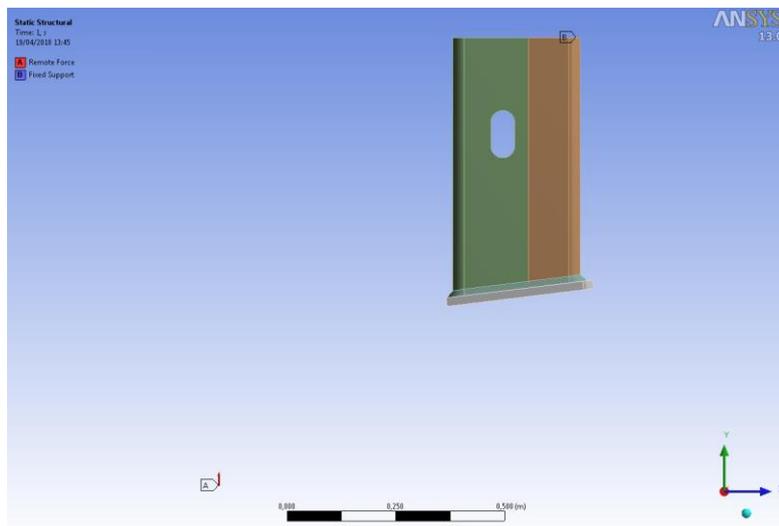


Figura 4.4 Carichi e vincoli per il modello con la testata completa.

Osservando le figure 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 si può notare come l'andamento delle tensioni equivalenti sul braccio sia differente nei due modelli. Per capire di quanto si sono presi dei punti di riferimento come in figura 4.9 lungo il braccio in vicinanza della saldatura e lungo il cordone stesso di saldatura dove poter verificare i valori di tensione equivalente ottenuti con i due modelli differenti. I punti sono stati numerati da sinistra verso destra. Dalle figure 4.10 e 4.11 si nota che i valori e gli andamenti delle tensioni equivalenti sono molto differenti per i due modelli. In media distano del 15%. In particolar modo le differenze si notano nelle zone in cui il braccio ha le curvature.

Si conclude che è necessario mantenere l'intera testata nelle simulazioni. Per alleggerire il modello però non si specificheranno particolari caratteristiche per la mesh delle lamiere della testata lasciandola effettuare con le impostazioni automatiche del programma che creano elementi di grandi dimensioni. Verrà invece affinata con attenzione la mesh della piastra d'interfaccia, del cordone di saldatura, delle lamiere che compongono il braccio ed i suoi componenti interni.

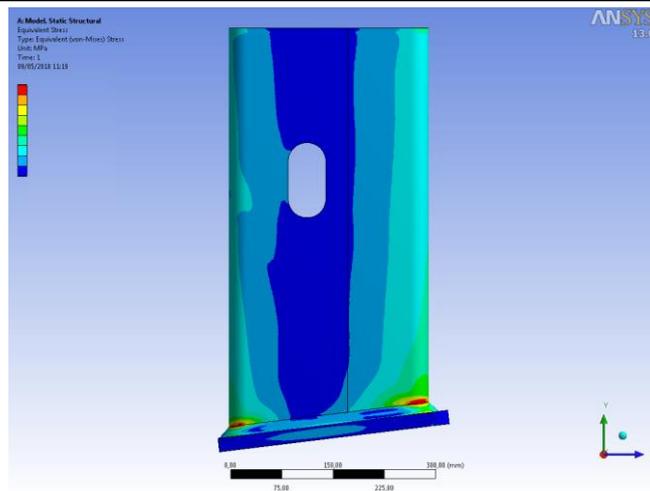


Figura 4.5 Tensioni equivalenti vista con l'asse X entrante del modello con solo la piastra.

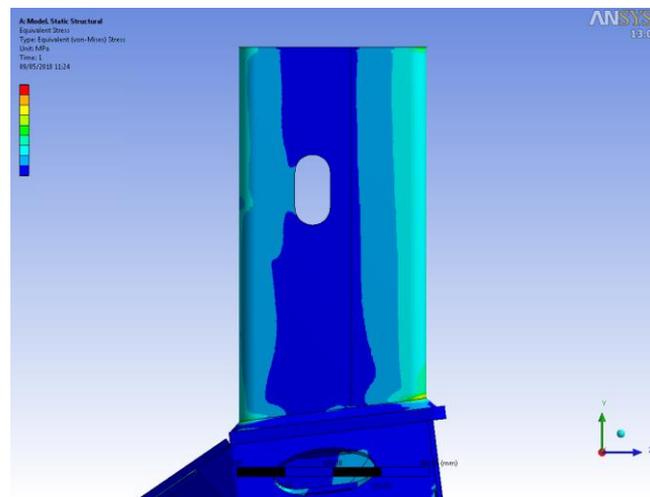


Figura 4.6 Tensioni equivalenti vista con l'asse X entrante del modello con tutta la testata.

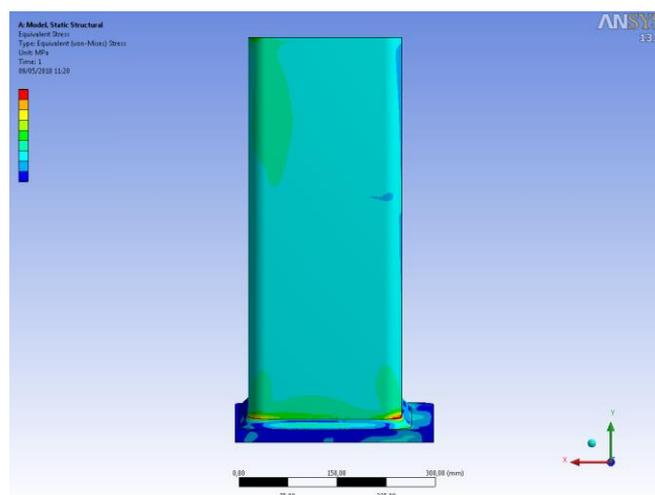


Figura 4.7 Tensioni equivalenti vista con l'asse Z entrante del modello con solo la piastra.

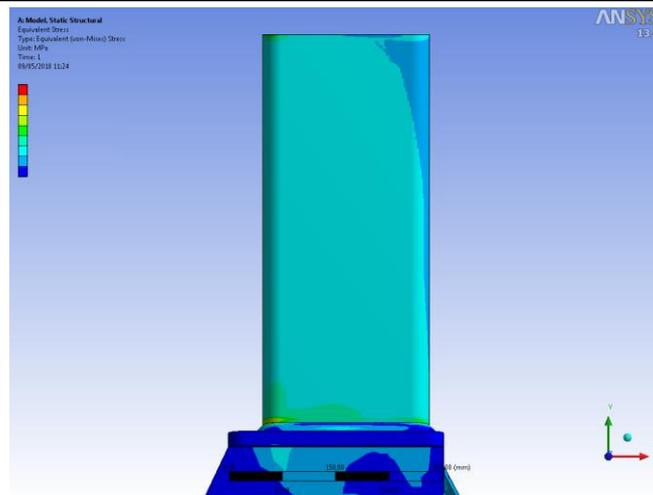


Figura 4.8 Tensioni equivalenti vista con l'asse Z entrante del modello con tutta la testata.

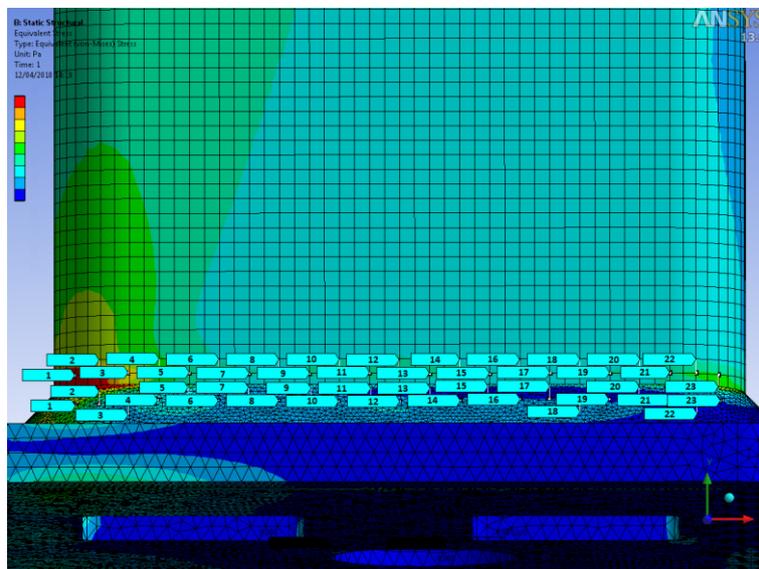


Figura 4.9 Posizione dei punti presi come campione per i grafici delle tensioni equivalenti.

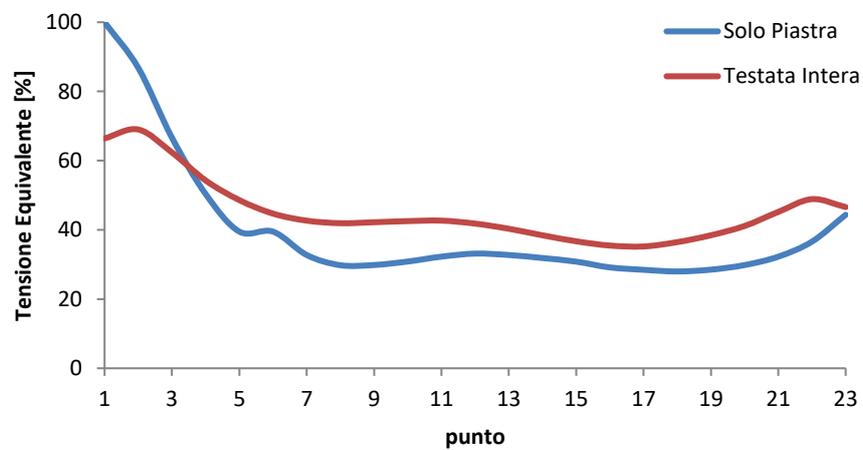


Figura 4.10 Tensioni equivalenti lungo i punti campione sul braccio.

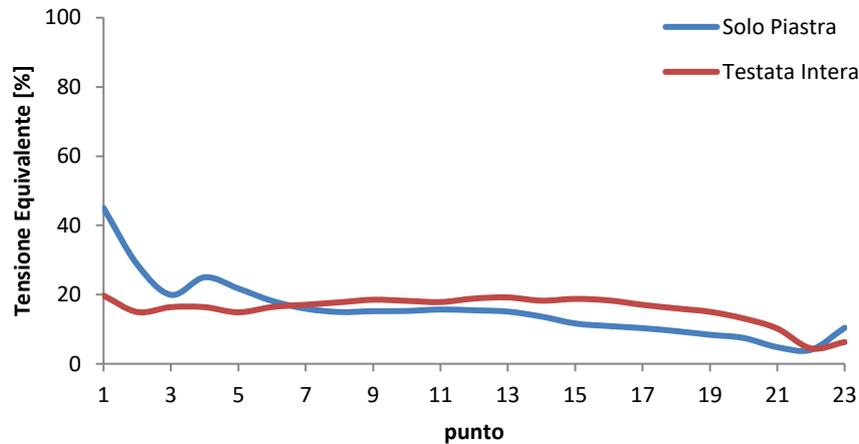


Figura 4.11 Tensioni equivalenti lungo i punti campione sul cordone di saldatura.

4.2. Carichi e Vincoli

Questa Tesi si interessa a quando sulla testata è montata una zattera a cui è ancorata una pala come in figura 4.12 e 4.13. Il martinetto serve per vincolare la rotazione del perno nella boccola intorno all'asse X. Nella posizione studiata la pala ha il fondo parallelo all'asse X. Si vogliono verificare le condizioni di carico in cui viene applicata la forza massima di tiraggio che può essere fornita dal sistema di trazione della macchina. Il carico può essere posizionato o centralmente sulla pala a $X=0\text{mm}$ o sullo spigolo della pala a $X<0\text{mm}$ o sullo spigolo della pala a $X>0\text{mm}$.

Si sono quindi calcolate le forze ed i momenti trasmessi dalla Pala e dal martinetto tramite dei perni alla testata.

In tutte e tre le tipologie di carico si hanno queste forze applicate sulla testata e un momento che rimane costante:

$$F_{mY} = \frac{F_t g \sin(\alpha) \cos(\alpha)}{d}$$

$$F_{mZ} = \frac{F_t g (\sin(\alpha))^2}{d}$$

$$F_{bY} = F_t - F_{mY}$$

$$F_{bZ} = -F_{mZ}$$

$$M_Y = -F_{mZ} b$$

Dove:

F_{mY}	Forza applicata dal martinetto attraverso un perno, lungo Y
F_{mZ}	Forza applicata dal martinetto attraverso un perno, lungo Z
F_{bY}	Forza applicata dalla zattera attraverso un perno, lungo Y
F_{bZ}	Forza applicata dalla zattera attraverso un perno, lungo Z
F_t	Forza di tiraggio massima
M_Y	Momento applicato sulla boccola con asse parallelo all'asse Y
α	Angolo tra l'asse Y e l'asse del martinetto

Invece a seconda di dove si posiziona il carico sulla pala si ottengono formulazioni differenti per il seguente momento:

$$M_{Z_{centrale}} = F_{mY} b$$

$$M_{Z_{X<0}} = F_{mY} b - F_t a$$

$$M_{Z_{X>0}} = F_{mY} b + F_t a$$

Dove:

$M_{Z_{centrale}}$ Momento applicato sulla boccola con asse parallelo all'asse Z se il carico è centrale

$M_{Z_{X<0}}$ Momento applicato sulla boccola con asse parallelo all'asse Z se il carico è a $X<0$

$M_{Z_{X>0}}$ Momento applicato sulla boccola con asse parallelo all'asse Z se il carico è a $X>0$

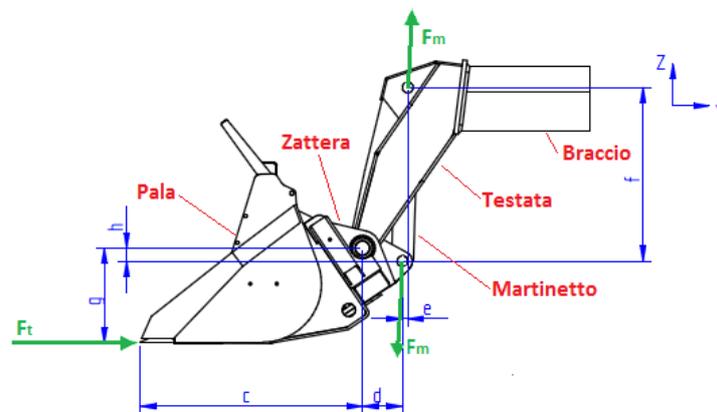


Figura 4.12 Vista con l'asse X uscente dell'assieme di riferimento con quote e forze.

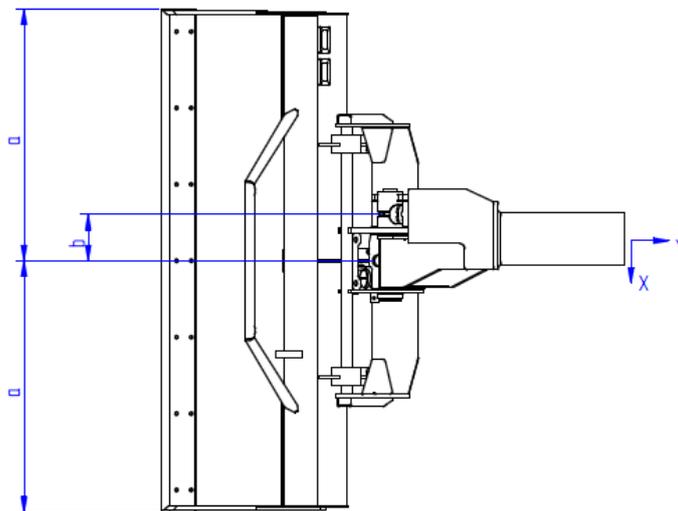


Figura 4.13 Vista con l'asse Z uscente dell'assieme di riferimento con quote.

La condizione di carico corrispondente alla forza di tiraggio sullo spigolo a $X<0$ della pala è stata accantonata perché non portava ad informazioni aggiuntive rispetto a quelle fornite dalle altre condizioni di carico.

Per quanto riguarda i vincoli il discorso si complica nuovamente e va ad intaccare anche il modello geometrico definito nel paragrafo 4.1. I bracci a due sezioni hanno nell'ultima sezione il

martinetto di sfilo che con il suo stelo vincola sulla boccola interna al braccio gli spostamenti lungo l'asse Y. I rimanenti spostamenti lungo X e Z e le rotazioni attorno a tutti gli assi sono nella realtà vincolati dal sistema di pattini di sfilo. Nel modello FEM sono vincolati sulla superficie del braccio all'estremità non saldata come si può osservare in figura 4.14.

I bracci a tre sezioni invece internamente sono diversi. Non è più presente il martinetto di sfilo ma sistemi di funi che agiscono sul fondo dell'ultima sezione braccio. Quindi il modello verrà completamente vincolato sulla superficie del braccio all'estremità non saldata come si può osservare in figura 4.15. Inoltre, data la presenza del sistema di sfilo a funi son assenti la boccola interna e la piastra che sosteneva la boccola di guida dello stelo del martinetto di sfilo.

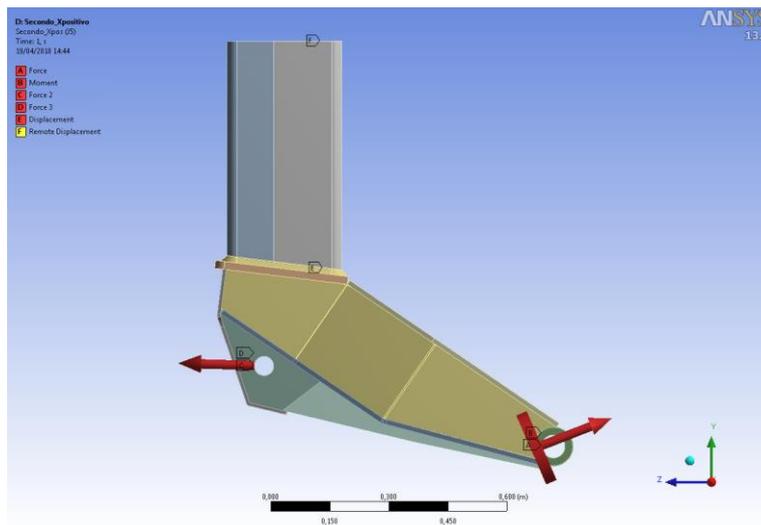


Figura 4.14 Carichi e vincoli del modello base dell'ultima sezione di un braccio a due sfili.

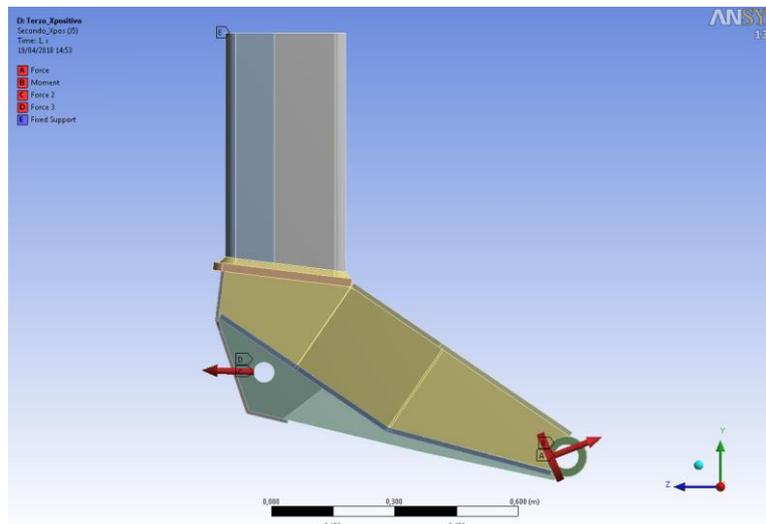


Figura 4.15 Carichi e vincoli del modello base dell'ultima sezione di un braccio a tre sfili.

4.3. Tipologie di saldatura

Dopo che con i provini vengono analizzate alcune tipologie di rinforzo per il cordone di saldatura vengo riproposte anche nei casi reali adattandole alle caratteristiche geometriche dei componenti di base.

Cordone di saldatura ad angolo lungo tutto il perimetro

Corrisponde al modello base descritto nei paragrafi 4.1 e 4.2 e all'attuale soluzione costruttiva reale. Come si può vedere in figura 4.16 è la soluzione che permette un assemblaggio più veloce e con meno componenti.

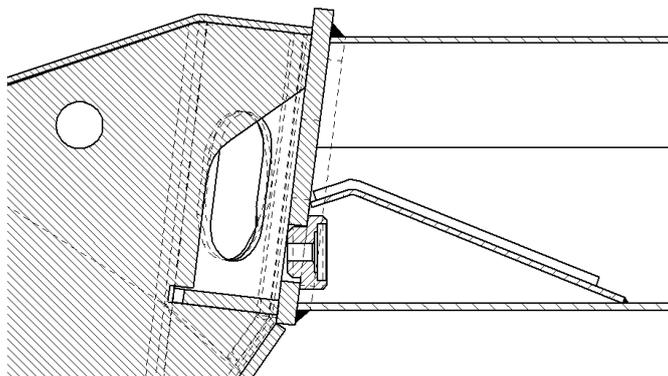


Figura 4.16 Sezione di testata e braccio saldati nella maniera attualmente in produzione.

Piastra di rinforzo inferiore

Oltre al tradizionale cordone di saldatura ad angolo lungo il perimetro esterno del braccio, si inserisce una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio come si vede in figura 4.17. La suddetta piastra è fissata al braccio tramite ad una saldatura di chiodatura a forma di asola e permette di effettuare per un considerevole tratto una saldatura di testa tra braccio e testata. La forma e la dimensione dell'asola sono determinate dal fatto che nelle zone in cui possono passare i pattini di guida per lo sfilo del braccio è meglio avere delle superfici il più regolari possibili. Una saldatura anche solo nelle vicinanze potrebbe creare problemi a rispettare questa richiesta. La presenza sui bracci a due sezioni della lamiera di sostegno per la boccola di guida dello stelo del martinetto di sfilo rende sconsigliabili ulteriori saldature all'interno del braccio.

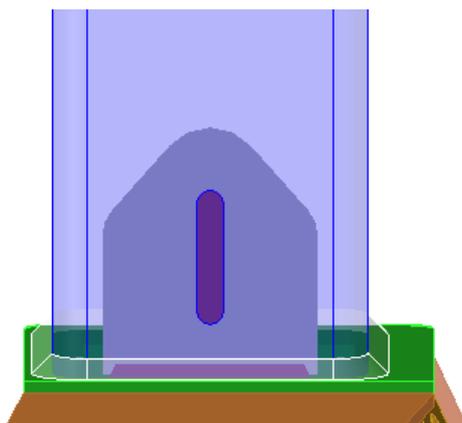


Figura 4.17 Rappresentazione della piastra di rinforzo inferiore e delle sue saldature aggiuntive.

Collare di rinforzo inferiore

Nella zona inferiore del braccio viene aggiunto un collare di rinforzo per aiutare il cordone di saldatura ad angolo presente lungo tutto il perimetro del braccio. Come evidenziato in figura 4.18 le sue dimensioni sono limitata dalla presenza sui bracci a due sezioni della lamiera di

sostegno per la boccola di guida dello stelo del martinetto di sfilo. La presenza di questa lamiera rende anche sconsigliata la presenza di saldature di fissaggio interne. Il collare viene vincolato al braccio attraverso alla saldatura di chiodatura di un'asola nella zona inferiore e un foro per lato del braccio. I fori e l'asola sono modellati in maniera tale che la loro dimensione e posizione li renda ben distanziati dai pattini di guida per lo sfilo del braccio. Il collare a differenza della piastra di rinforzo rende molto più ampia la zona in cui effettuare una saldatura di testa, anche dove la lamiera del braccio è curva.

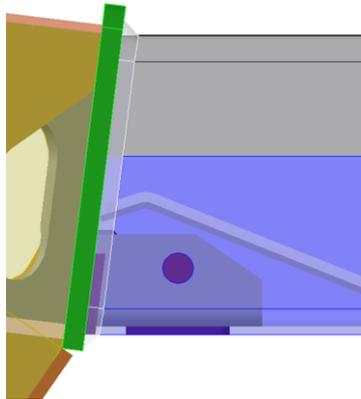


Figura 4.18 Collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio e saldature aggiuntive che comporta.

Piastra di rinforzo superiore

Si aggiunge una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio per permettere di effettuare una saldatura di testa che scarica in quelle zone il cordone di saldatura esterno ad angolo lungo tutto il perimetro del braccio. La piastra visibile in figura 4.19 è fissata al braccio attraverso due sistemi differenti. Esternamente si può scegliere tra un pattern di fori o un'asola sulla lamiera piegata a C del braccio, in maniera da effettuare delle saldature di chiodatura. Internamente sono invece presenti dei cordoni di saldatura ad angolo, non lungo tutto il perimetro ma effettuando dei baffi di saldatura. Piastra e baffi sono limitati in estensione perché sui bracci a tre sezioni non bisogna creare interferenze con le canaline nella parte superiore del braccio per il passaggio delle condotte e con le condotte, funi e la puleggia del sistema di sfilo.

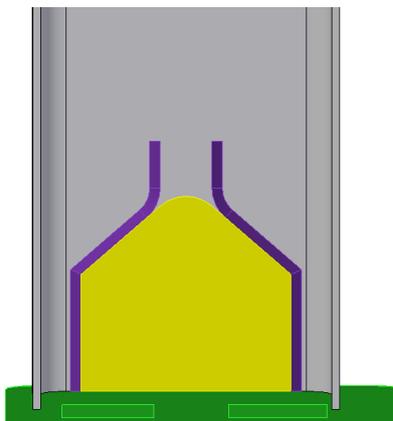


Figura 4.19 Piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio e cordoni interni con baffi di saldatura.

La forma stessa dei baffi di saldatura può ancora portare ad intensificazioni indesiderate delle tensioni. Si sono allora testate alcune forme di cui si possono osservare i valori di tensione

equivalente percentuale rispetto al massimo riscontrato nelle figure 4.20, 4.21, 4.22. si può osservare che la forma dei baffi con valori di tensione inferiori ha però la forma più complessa da eseguire in produzione a causa dell'utilizzo di riferimenti poco chiari. Per questo motivo si è scelta la forma dei baffi di saldatura della figura 4.20 anche se possiedono valori di tensione maggiori.

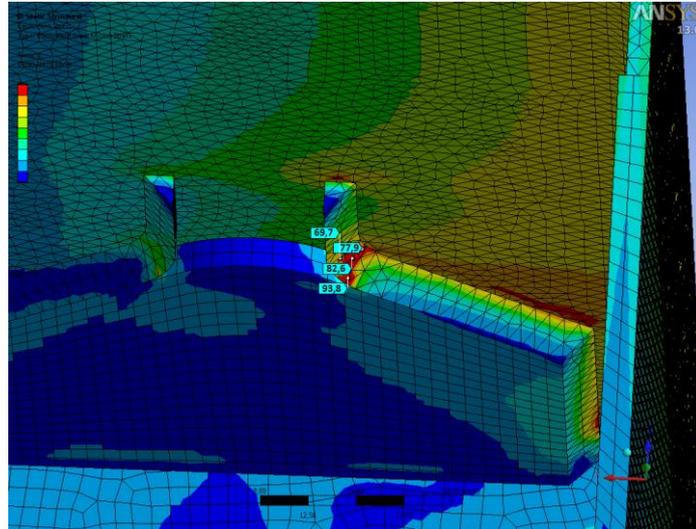


Figura 4.20 Tensione Equivalente nel baffo del cordone di saldatura interno, geometria 1.

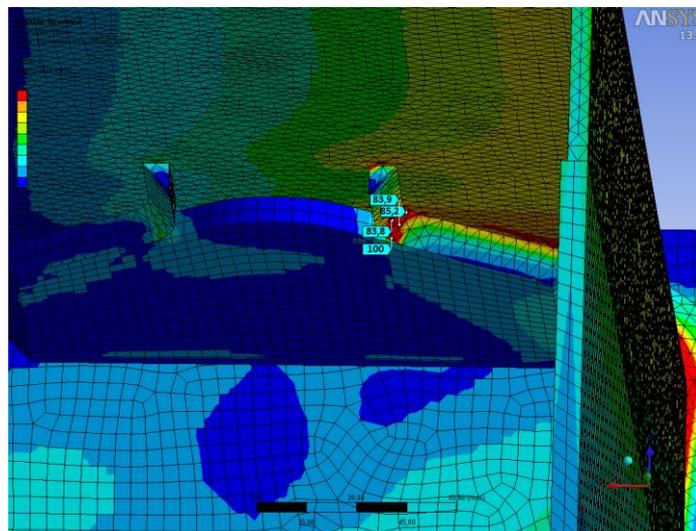


Figura 4.21 Tensione Equivalente nel baffo del cordone di saldatura interno, geometria 2.

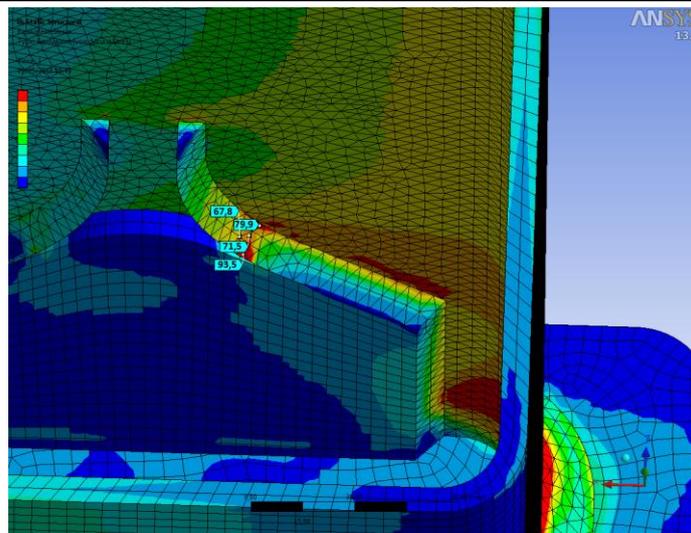


Figura 4.22 Tensione Equivalente nel baffo del cordone di saldatura interno, geometria 3.

Collare di rinforzo superiore

Per abbassare le tensioni nel cordone di saldatura ad angolo tra braccio e testata si aggiunge un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio come si vede in figura 4.23. Questo collare, come la piastra, può possedere saldature di chiodatura o con un pattern di fori o con un'asola nella lamiera piegata a C che compone la metà superiore del braccio. Non se ne possono effettuare in altre zone se si vuole rimanere distanti dalle zone di passaggio dei pattini di guida dello sfilo del braccio. La forma del collare e dei cordoni di saldatura interni dipende nuovamente dalla presenza nell'ultima sezione dei bracci a tre sezioni delle canaline per il passaggio delle condotte, e della puleggia con avvolte funi e condotte. Questo collare consente di effettuare la saldatura di testa per un più ampio tratto rispetto alla piastra, incluse le due zone curve superiori del braccio.

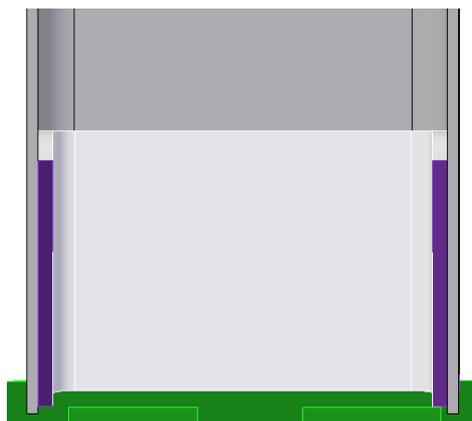


Figura 4.23 Collare di rinforzo nella zona superiore del braccio e cordoni interni.

Bisello lungo tutto il perimetro del braccio

Si è creato un bisello sulle due lamiere piegate a C che compongono il braccio, quindi lungo tutto il suo perimetro, per provare ad abbassare le tensioni sul cordone di saldatura ad angolo adiacente. Questa soluzione a differenza delle altre non aggiunge nessun componente nuovo, ma una lavorazione ulteriore sulle lamiere prima del piego come si vede in figura 4.24. Lo stesso

piego deve essere effettuato con maggiore cautela perché diventa fondamentale com'è orientata la lamiera. Il bisello deve essere accuratamente riempito durante l'operazione di saldatura.

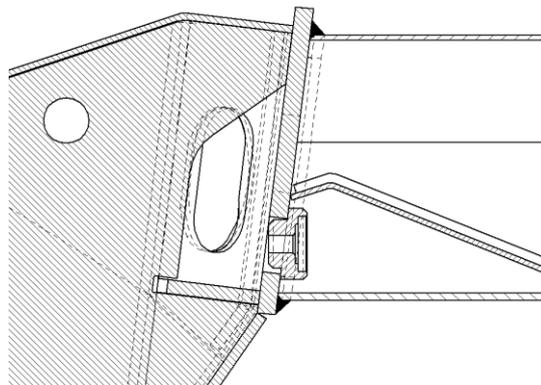


Figura 4.24 Bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

4.4. Analisi preliminare dei rinforzi

Si sono effettuate le simulazioni senza attivare i contatti *frictionless* tra la piastra base della testata e i componenti del braccio o dei rinforzi appoggiati ad essa. Queste simulazioni sono più rapide e possono già fornire indicazioni utili su quali tipi di rinforzo si possano escludere dell'elenco delle possibili soluzioni al problema reale.

La mesh è stata effettuata sufficientemente fitta da mantenere sempre al di sotto del 10% il rapporto tra errore delle tensioni e energia di deformazione nelle zone d'interesse. Le zone d'interesse sono i componenti coinvolti nella saldatura in esame. Le lamiere che compongono la testata ad esempio non ne fanno parte ma servono per trasmettere correttamente i carichi.

4.4.1. Confronto generale

Ogni tipo di rinforzo dove possibile è anche stato testato in configurazioni differenti di ancoraggio al braccio. Ad esempio, dove è presente un cordone di saldatura interno si sono effettuate due simulazioni: una con il cordone ed una senza. I valori di tensione equivalente sono tutti espressi in percentuale rispetto ad un valore di tensione costante.

Braccio a tre sezioni

La prima condizione di vincolo scelta è stata quella che simula l'ultima sezione di un braccio a due sfili, quindi a tre sezioni. Il modello di base a cui tutti i risultati faranno riferimento per confrontare lo stato tensionale è quello senza alcuna tipologia di rinforzo, con il solo cordone di saldatura angolare esterno lungo tutto il perimetro. Le tensioni equivalenti nelle zone d'interesse di questo modello sono visualizzabili nelle figure 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, 4.31 e 4.32.

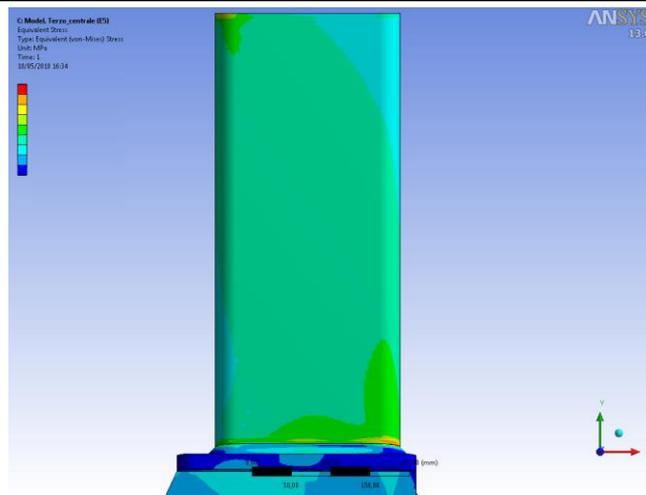


Figura 4.25 Tensioni equivalenti nessun rinforzo, tre sezioni, carico centrato, vista con Z uscente.

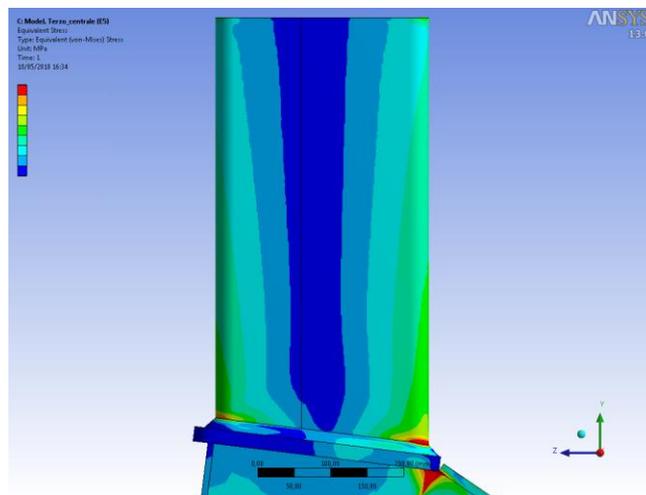


Figura 4.26 Tensioni equivalenti nessun rinforzo, tre sezioni, carico centrato, vista con X uscente.

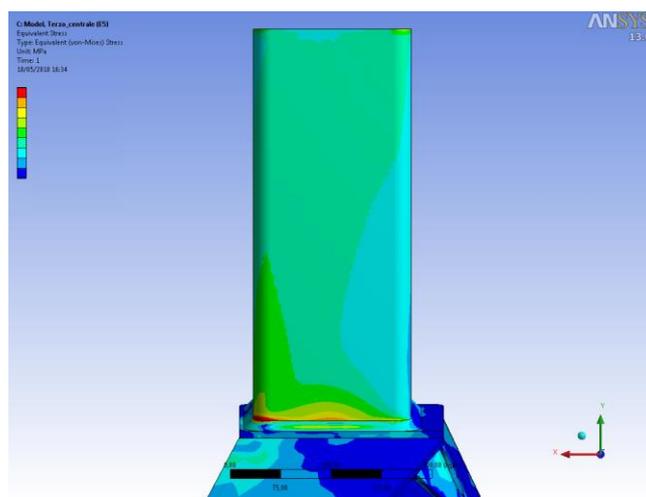


Figura 4.27 Tensioni equivalenti nessun rinforzo, tre sezioni, carico centrato, vista con Z entrante.

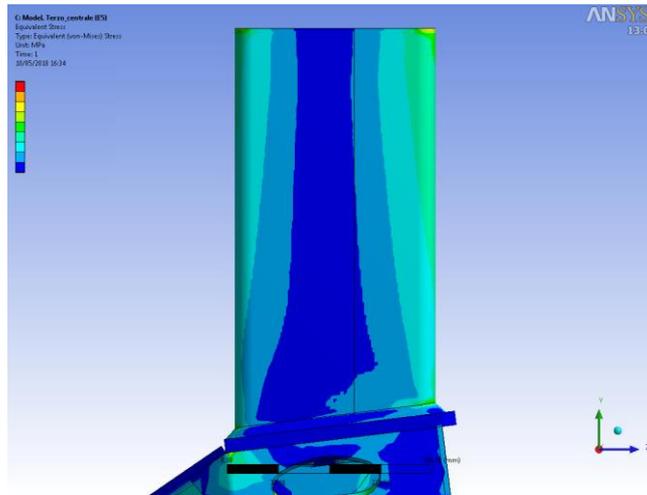


Figura 4.28 Tensioni equivalenti nessun rinforzo, tre sezioni, carico centrato, vista con X entrante.

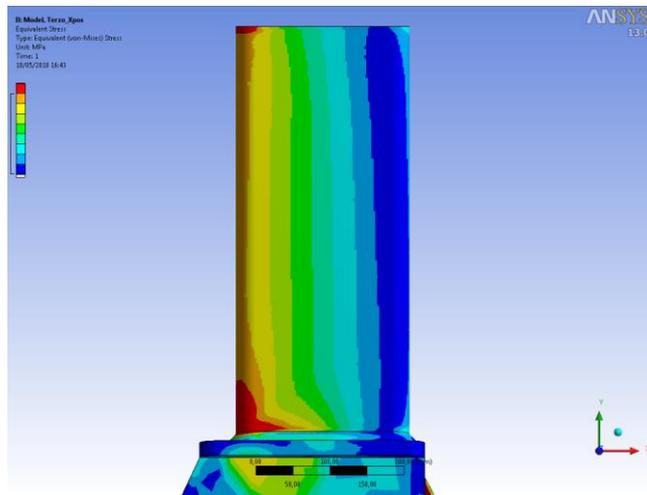


Figura 4.29 Tensioni equivalenti nessun rinforzo, tre sezioni, carico sullo spigolo $X > 0$, vista con Z uscente.

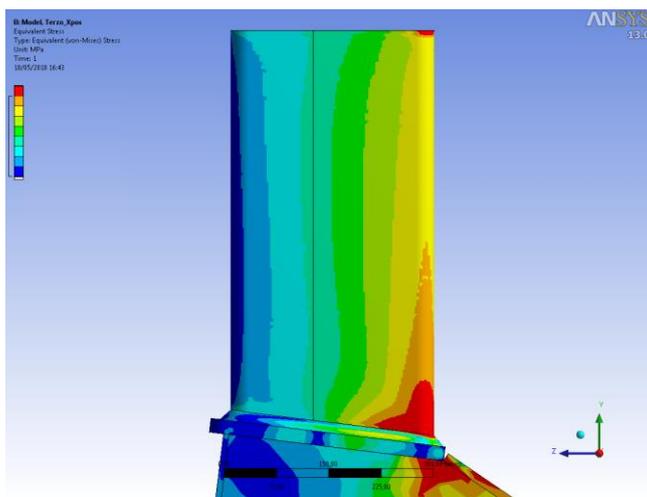


Figura 4.30 Tensioni equivalenti nessun rinforzo, tre sezioni, carico sullo spigolo $X > 0$, vista con X uscente.

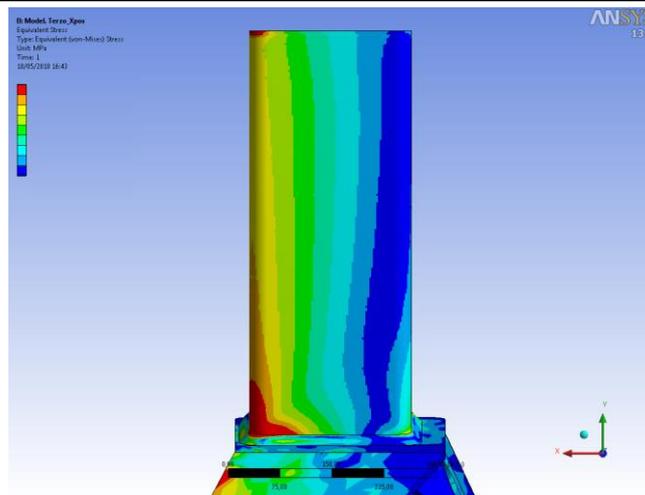


Figura 4.31 Tensioni equivalenti nessun rinforzo, tre sezioni, carico sullo spigolo $X>0$, vista con Z entrante.

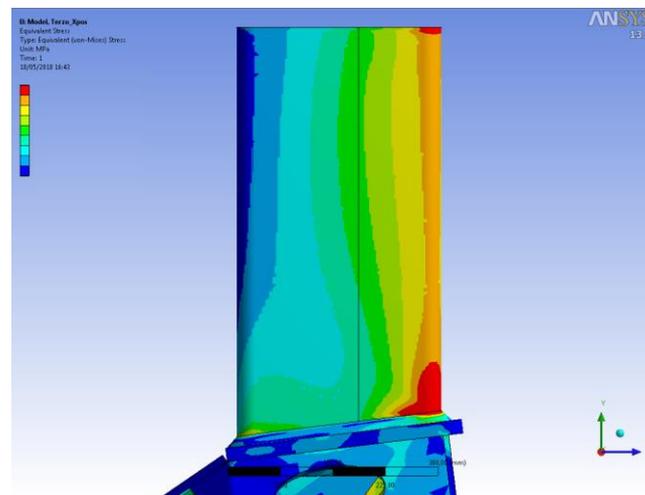


Figura 4.32 Tensioni equivalenti nessun rinforzo, tre sezioni, carico sullo spigolo $X>0$, vista con X entrante.

Per confrontare in valori di tensione in maniera oggettiva si sono presi in considerazione dei punti fissi per tutti i modelli. Nella figura 4.33 si possono osservare posizioni e nomi di questi punti di cui si sono misurate le tensioni equivalenti riportate in valore percentuale nelle tabelle 4.1 e 4.2. I rinforzi presi in considerazione per il confronto sono:

- Piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.
- Collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.
- Piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio con pattern di chiodature circolari e cordone interno con baffi di saldatura.
- Piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio con asola per la chiodatura e cordone interno con baffi di saldatura.
- Piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio con pattern di chiodature circolari ma senza cordone interno con baffi di saldatura.
- Piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio con asola per la chiodatura ma senza cordone interno con baffi di saldatura.
- Piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio con il solo cordone interno con baffi di saldatura.
- Collare di rinforzo nella zona superiore con chiodatura e cordone interno di saldatura.

- Collare di rinforzo nella zona superiore con la sola chiodatura.
- Collare di rinforzo nella zona superiore con il solo cordone interno di saldatura.
- Bisello lungo tutto il perimetro del braccio.
- Due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro nella zona inferiore del braccio.

Consultando le tabelle si può osservare che:

- La piastra di rinforzo nella zona superiore porta maggiori benefici in rapporto alla complessità ed alla velocità di realizzazione delle saldature se viene ancorata al braccio con la saldatura di un'asola e il cordone interno.
- Il collare di rinforzo nella zona superiore porta anche lui maggiori benefici se viene ancorato al braccio con la saldatura di un'asola e il cordone interno.

Si sono quindi creati i grafici presenti nell'Appendice A per le casistiche più rilevanti, scelte tenendo conto delle osservazioni appena fatte.

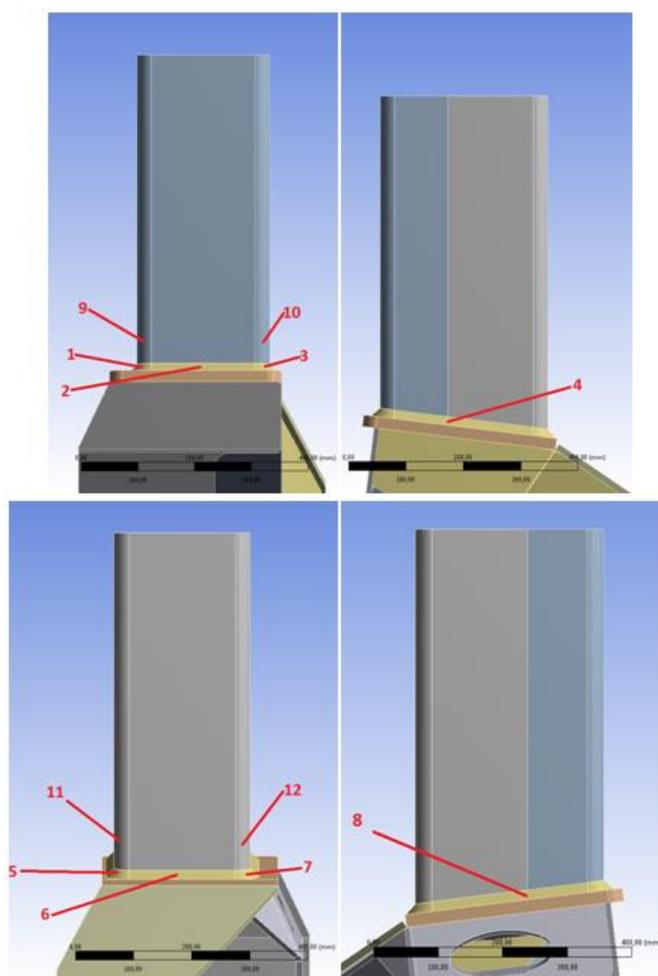


Figura 4.33 Posizione e nome dei punti per il confronto tra modelli.

Tabella 4.1 Tensioni equivalenti percentuali nei punti campione al variare delle tipologie di rinforzo con carico centrato sulla pala per un braccio a tre sezioni.

	Niente	Pia.inf	Coll.inf	Pia.sup chiod.T	Pia.sup asol.T	Pia.sup chiod	Pia.sup asol	Pia.sup cord	Coll.sup T	Coll.sup cord	Coll.sup chiod	Bise.	2 Coll.
1	12,6	12,1	11,9	11,0	11,0	11,6	11,7	10,8	13,1	12,1	13,1	12,1	12,2
2	40,6	40,8	40,4	19,9	18,3	18,9	18,1	20,0	18,6	17,2	18,5	21,7	18,7
3	11,1	10,7	10,7	11,3	11,3	11,2	11,7	11,5	14,5	16,2	15,1	14,7	14,8
4	10,8	11,0	11,2	11,3	11,4	11,5	11,4	11,4	12,3	13,6	11,7	11,1	12,7
5	30,8	32,1	42,1	31,8	31,7	31,8	31,9	31,7	32,1	32,1	32,1	39,1	41,7
6	68,6	13,0	12,7	67,2	68,8	68,5	69,0	68,2	65,2	64,9	65,6	22,4	14,1
7	26,0	24,8	21,9	26,6	26,6	26,5	26,5	25,0	26,2	26,1	26,3	23,0	21,9
8	8,6	8,3	8,5	8,1	8,6	8,5	8,6	8,9	9,0	9,7	9,1	9,2	9,2
9	32,3	31,5	30,6	26,3	26,8	28,1	26,6	27,2	25,6	26,9	27,1	28,5	24,4
10	52,3	52,2	52,0	46,1	45,8	48,6	49,0	46,5	48,1	49,4	47,5	51,0	46,1
11	64,7	58,1	50,6	63,5	63,4	63,4	63,7	63,5	63,5	63,3	63,9	59,5	50,3
12	25,6	19,2	17,1	25,9	25,7	26,0	26,0	23,5	25,7	25,3	25,7	21,4	17,0

Tabella 4.2 Tensioni equivalenti percentuali nei punti campione al variare delle tipologie di rinforzo con carico sullo spigolo della pala per un braccio a tre sezioni.

	Niente	Pia.inf	Coll.inf	Pia.sup chiod.T	Pia.sup asol.T	Pia.sup chiod	Pia.sup asol	Pia.sup cord	Coll.sup T	Coll.sup cord	Coll.sup chiod	Bise.	2 Coll.
1	56,4	56,3	55,4	56,9	56,1	56,1	56,1	57,2	60,4	58,0	63,8	64,8	58,3
2	47,4	47,3	46,5	25,8	24,4	25,2	24,7	25,7	23,9	23,7	23,9	28,6	24,3
3	13,6	13,7	13,7	15,9	15,9	14,8	14,5	15,9	13,3	13,5	15,3	14,5	14,0
4	49,4	48,6	39,1	50,8	51,2	50,6	51,0	50,8	42,8	45,4	50,1	30,0	35,9
5	56,2	53,5	65,3	55,6	55,4	55,9	55,7	55,7	56,1	56,1	55,9	64,3	64,8
6	37,1	7,0	10,1	36,5	35,7	35,9	35,7	36,0	34,9	34,3	34,3	11,1	8,4
7	13,7	15,0	12,8	13,6	13,7	13,6	13,5	14,2	12,6	12,5	13,2	13,5	12,0
8	19,9	20,4	16,3	17,9	20,2	20,2	20,7	21,1	18,4	20,5	19,1	17,3	16,0
9	121,0	121,5	118,9	110,6	112,0	115,7	114,6	112,7	101,7	104,0	107,2	114,7	98,7
10	20,7	20,7	20,8	22,4	22,6	22,1	22,6	21,5	14,9	15,5	20,0	19,0	17,7
11	125,9	118,9	98,3	123,9	125,1	125,2	125,1	124,7	124,3	124,7	124,5	118,2	97,5
12	46,1	45,2	36,1	45,4	46,0	45,9	45,7	48,3	45,5	45,9	45,3	44,6	35,8

Braccio a due sezioni

Si sono quindi cambiate le condizioni di vincolo e si sono imposte quelle corrispondenti all'ultima sezione di un braccio a due sezioni o uno sfilo, come spiegato nel paragrafo 4.2. Non si sono ripetute tutte le tipologie di rinforzo utilizzate per il braccio a tre sezioni, si è fatta una prima scrematura mantenendo:

- Piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.
- Collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.
- Piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio con asola per la chiodatura e cordone interno con baffi di saldatura.
- Piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio con asola per la chiodatura ma senza cordone interno con baffi di saldatura.

- Collare di rinforzo nella zona superiore con chiodatura e cordone interno di saldatura.
- Collare di rinforzo nella zona superiore con la sola chiodatura.
- Collare di rinforzo nella zona superiore con il solo cordone interno di saldatura.
- Bisello lungo tutto il perimetro del braccio.
- Due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro nella zona inferiore del braccio.

I valori di tensione equivalente sono stati nuovamente valutati nei punti indicati nella figura 4.33, ottenendo così le tabelle 4.3 e 4.4 da cui sono stati scelti i dati per i grafici nell'Appendice A seguendo le stesse osservazioni fatte per i bracci a tre sezioni.

Tabella 4.3 Tensioni equivalenti nei punti campione al variare delle tipologie di rinforzo con carico centrato sulla pala per un braccio a due sezioni.

	Niente	Pias.inf	Coll.inf	Pias.sup asol.T	Pias.sup asol	Coll.sup T	Coll.sup cord	Coll.sup chiod	Bisello	2 Coll.
1	17,0	16,9	16,6	15,1	16,0	17,3	18,2	17,9	19,9	17,4
2	40,3	40,3	40,1	19,7	18,7	18,4	17,1	18,2	21,5	18,5
3	7,6	7,8	7,7	8,0	8,6	12,2	12,9	12,1	11,2	11,6
4	16,1	17,5	14,5	15,1	15,1	17,1	15,9	15,9	16,3	15,4
5	40,4	31,2	38,9	30,3	30,3	30,7	30,5	30,5	37,2	38,6
6	13,0	10,7	17,0	42,1	42,2	42,1	42,3	41,0	14,8	12,4
7	23,8	26,4	22,2	27,5	27,3	27,0	27,0	27,2	24,8	23,4
8	11,9	13,8	14,5	13,4	13,4	14,3	14,6	14,1	13,3	14,9
9	39,0	39,1	38,7	34,1	35,4	32,0	34,6	32,8	37,5	33,8
10	43,6	43,7	43,5	38,3	40,7	39,5	40,8	39,9	42,0	39,1
11	48,6	48,8	42,7	46,4	51,8	49,8	51,4	51,3	49,0	41,5
12	21,0	13,3	15,4	25,0	25,4	25,4	25,2	25,1	22,2	17,7

Tabella 4.4 Tensioni equivalenti nei punti campione al variare delle tipologie di rinforzo con carico sullo spigolo della pala per un braccio a due sezioni.

	Niente	Pias.inf	Coll.inf	Pias.sup asol.T	Pias.sup asol	Coll.sup T	Coll.sup cord	Coll.sup chiod	Bisello	2 Coll.
1	57,8	57,8	57,4	58,0	57,6	61,0	62,6	64,7	66,7	63,4
2	46,9	44,1	46,5	25,8	25,0	23,7	23,1	23,8	28,5	23,9
3	13,3	13,7	14,1	15,5	14,3	13,3	13,3	14,8	14,6	15,6
4	18,6	37,0	36,5	37,0	36,8	35,2	33,5	37,2	27,8	36,4
5	66,4	51,8	64,8	52,4	52,4	53,0	52,9	52,6	62,0	61,0
6	11,8	13,0	17,0	18,3	18,3	18,4	18,7	17,4	11,5	14,0
7	15,5	15,6	14,8	13,6	13,6	12,6	12,5	13,3	14,6	13,9
8	12,3	14,7	14,2	13,0	13,4	17,5	17,4	14,9	14,5	15,4
9	121,8	122,6	121,9	111,2	115,9	100,0	103,6	108,6	117,1	108,8
10	18,5	19,5	20,0	20,4	20,5	15,5	14,8	18,3	18,3	20,3
11	107,1	109,9	90,5	113,2	113,3	113,5	112,7	113,2	108,8	89,3
12	44,2	44,3	38,2	46,4	46,0	45,7	45,8	46,1	44,9	35,8

Considerazioni

Dalle simulazioni svolte si può osservare che nel caso in cui si considera un braccio a due sezioni con la pala caricata sullo spigolo a X positivo:

- La piastra di rinforzo nella zona superiore porta ad un miglioramento delle tensioni equivalenti percentuali di circa l'8% in posizione 9.
- Il collare di rinforzo nella zona superiore porta ad un abbassamento delle tensioni equivalenti percentuali di circa il 16% in posizione 9.
- La piastra di rinforzo nella zona inferiore comporta un miglioramento del valore delle tensioni equivalenti percentuali trascurabili.
- Il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio abbassa di circa il 18% il valore delle tensioni equivalenti percentuali in posizione 11.
- Il bisello di rinforzo porta a degli effetti trascurabili su andamenti e valori di tensione equivalente.
- I due collari di rinforzo, sia nella parte inferiore che quella superiore, portano ad ottenere la somma dei benefici che portano singolarmente in 9 e in 11.

Le stesse osservazioni si possono fare per il braccio a due sezioni caricato centralmente sulla pala. Anche in condizioni di vincolo corrispondenti ad un braccio a tre sezioni gli andamenti sono i medesimi, ma i vantaggi portati dai rinforzi sono di circa il 4% più intensi.

I vari sistemi di rinforzo generalmente vanno ad influenzare gli andamenti e i valori di tensione equivalente nelle zone in cui sono applicati. Ad esempio, una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio influenzerà principalmente solo i punti 5, 6, 7, 11 e 12. Ciò è vero in particolar modo quando i vincoli simulano l'ultima sezione di un braccio a tre sezioni.

Generalmente si può notare che le piastre danno la maggior parte dei loro benefici sulla superficie esterna del cordone di saldatura ad angolo, mentre i collari nelle zone critiche sulla curvatura delle lamiere piegate a C che formano il braccio. Il bisello ha invece un comportamento che si può definire intermedio. Ridistribuisce le tensioni quasi come è fatto dai collari, con il grande vantaggio di non aggiungere materiale e componenti alla struttura. Per contro l'introduzione dei biselli comporta una grossa variazione del processo produttivo introducendo un'operazione che al momento non viene svolta in azienda. L'introduzione di due collari, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore porta ad avere gli effetti benefici più ampi sia in termini di cordone che di struttura.

4.4.2. Tensioni lungo il cordone di saldatura ad angolo

Si è quindi posta maggiore attenzione all'andamento delle tensioni equivalenti lungo le superfici del cordone di saldatura ad angolo. Si sono valutati sette punti per ognuna delle posizioni descritte dalla figura 4.33 e giacenti sul cordone come descritto in figura 4.34. Il punto denominato A corrisponde ai punti presi in considerazione nel paragrafo 4.4.1. I risultati di queste misurazioni sono contenuti nei grafici dell'Appendice B. Le simulazioni si sono effettuate per tutti e due i casi di vincolo e i due casi di carico descritti nel paragrafo 4.2.

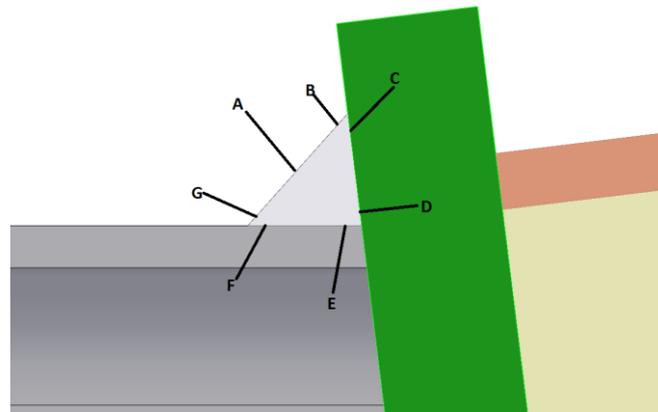


Figura 4.34 Punti di riferimento sulla sezione del cordone di saldatura ad angolo.

Si sono presi in considerazione i seguenti sistemi di rinforzo che si erano rivelati più efficaci nel paragrafo 4.4.1:

- Piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.
- Collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.
- Piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio con asola per la chiodatura e cordone interno con baffi di saldatura.
- Collare di rinforzo nella zona superiore con chiodatura e cordone interno di saldatura.
- Bisello lungo tutto il perimetro del braccio.
- Due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro nella zona inferiore del braccio.

Osservando i grafici delle tensioni equivalenti percentuali nell'Appendice B nel caso in cui i vicoli che simulano un braccio a due sezioni, quando la pala è caricata sullo spigolo a X positivo in genere si hanno i valori di tensione massime. Per il punto:

- A. È un punto che senza sistemi di rinforzo lungo il cordone di saldatura è relativamente poco sollecitato. Il massimo valore di tensione equivalente è circa il 70% quindi questo punto avrà poco peso sulle valutazioni finali. Tutti i sistemi di rinforzo portano benefici, senza far notare grandi differenze tra piastre e collari quando presi singolarmente.
 - Rinforzi nelle zone inferiori del braccio ottengono una riduzione della tensione equivalente del 20% in posizione 5 in ogni condizione di carico.
 - Rinforzi nelle zone superiori del braccio portano a una riduzione del 50% circa della tensione equivalente in posizione 2 e in tutte le condizioni di carico.
 - Il bisello di rinforzo e i due collari di rinforzo portano ad ottenere valori di tensione identici, mantenendo gli effetti benevoli in posizione 2 ma con effetti trascurabili in posizione 5, per tutte le condizioni di carico.
- B. Come per il caso del punto A non presenta valori di tensione equivalente molto elevati già quando non si hanno rinforzi, massimo si circa il 55%. Inoltre, tutti i sistemi di rinforzo testati portano dei benefici trascurabili sullo stato tensionale di questo punto.
- C. Come per il punto B non si osservano dei valori di tensione equivalente elevati sul modello senza sistemi di rinforzo, il massimo è circa del 55%. Anche per il punto C tutti i sistemi di rinforzo testati hanno degli effetti trascurabili sullo stato di tensione.
- D. I valori di tensione equivalente del modello di base sono maggiore rispetto a quelli trattati fin ora, il massimo è di circa l'87%, probabilmente a causa della maggiore vicinanza alla zona dell'intaglio.
 - I sistemi di rinforzo che agiscono nella zona superiore del braccio hanno effetti migliorativi sullo stato di tensione di circa il 70% in posizione 2, dove il modello base possiede una tensione equivalente del 70% con il carico sullo spigolo della

- pala. È però anche presente un effetto d'intensificazione in posizione 5 di circa il 140% in tutte le condizioni di carico con valori di tensione che di base sono del 90%.
- L'effetto d'intensificazione in posizione 5 è presente anche quando si utilizza una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio. È invece assente quando si utilizza un collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio, il quale ha effetti trascurabili sullo stato di tensione.
 - Il bisello di rinforzo e i due collari di rinforzo hanno effetti analoghi, mantengono i benefici nella zona superiore in posizione 2 e limitano l'effetto indesiderato d'intensificazione delle tensioni in posizione 5. In posizione 1 insieme al collare di rinforzo nella zona superiore del braccio presentano un effetto benefico paragonabile per entità a quello in posizione 2.
- E. Questo punto di misurazione si trova in una zona in cui si ha una prevalenza di sforzo di taglio. Anche per questo motivo la tensione equivalente si alza quasi a valori del 130% in posizione 1. Gli andamenti di base e gli effetti dei sistemi di rinforzo sono analoghi a quelli del punto D.
- F. In questo punto di misurazione si registrano tensioni equivalenti ancora più elevate, con un picco del 320% in 1 quando il carico è applicato sullo spigolo a X positivo sulla pala. La causa è in parte il fatto che come per il punto E si trova in una zona in cui si hanno elevate tensioni tangenziali. Le zone in cui bisogna prestare più attenzione perché posseggono le tensioni equivalenti più elevate sono la 1 e la 5.
- La piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio comporta degli effetti peggiorativi sullo stato tensionale del 8% circa in posizione 5.
 - L'utilizzo del collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio porta ad ottenere un miglioramento della tensione equivalente di circa il 25% in posizione 5.
 - La piastra ed il collare di rinforzo se posizionati nella zona superiore del braccio causano delle riduzioni dello stato di tensione del 15% e del 20% in posizione 1 rispettivamente con il carico sullo spigolo a X positivo o centrato sulla pala. In posizione 5 però quando il carico è sullo spigolo della pala si manifesta un'intensificazione della tensione equivalente del 25%. Sempre in 5 se il carico si trova in posizione centrale sulla pala gli effetti peggiorativi sono minori, come minore è il valore di tensione equivalente quando sono assenti i rinforzi.
 - Il bisello di rinforzo manifesta degli effetti trascurabili sull'andamento delle tensioni.
 - La presenza di due collari di rinforzo, sia nella zona inferiore che in quella superiore del braccio, comportano due effetti benefici sullo stato tensionale. Le tensioni equivalenti si abbassano del 25% in posizione 5 e del 15% in posizione 1.
- G. Le tensioni equivalenti in questo punto continuano ad avere valori elevati, il massimo è di circa il 215%. Le zone a tensione equivalente più elevata sono la 1 e la 5.
- La piastra di rinforzo posizionata nella zona inferiore del braccio, nella zona superiore del braccio e il collare di rinforzo posizionato nella zona superiore del braccio portano tutti a manifestarsi di un effetto peggiorativo in posizione 5 di circa il 20% sulla tensione equivalente. Il collare di rinforzo però presenta anche un effetto benefico di circa il 20% della tensione equivalente in posizione 1.
 - Il bisello di rinforzo causa effetti trascurabili sullo stato di tensione.
 - Il collare di rinforzo superiore è causa di un effetto di abbassamento delle tensioni equivalenti di circa il 15% in posizione 5.
 - I due collari di rinforzo in posizione inferiore e superiore del braccio, insieme, oltre a mantenere gli effetti migliorativi dei collari utilizzati da soli.

Quando i vincoli simulano l'ultima sezione di un braccio a tre sezioni si può notare che generalmente i valori di tensione equivalente maggiori si manifestano se la pala viene caricata sullo spigolo ad X positivo. Analizziamo ora cosa succede nei vari punti al variare dei sistemi di rinforzo:

- A. È un punto in cui le tensioni equivalenti sono relativamente basse. Il massimo si presenta in posizione 5 con il carico centrato sulla pala ed ammonta al 67%. Generalmente i sistemi di rinforzo hanno effetti trascurabili sullo stato di tensione vicino alle curvature del braccio, posizioni 1, 3, 5 e 7.
- La piastra ed il collare di rinforzo posizionati nella zona inferiore del braccio portano a miglioramenti del valore di tensione equivalente fino al 85% in 6 quando il carico è centrato sulla pala. Quando il carico è sullo spigolo ad X positivo della pala i benefici sono minori.
 - La piastra ed il collare di rinforzo posizionati nella zona superiore del braccio sono causa di un miglioramento di circa il 48% delle tensioni equivalenti in posizione 2.
 - Il bisello di rinforzo e i due collari di rinforzo posizionati insieme nella zona inferiore e superiore del braccio mantengono tutti gli effetti positivi descritti per gli altri sistemi di rinforzo. Si aggiunge un effetto benefico fino al 40% della tensione equivalente in posizione 4 con il carico applicato sullo spigolo della pala.
- B. Le tensioni equivalenti misurate in questo punto continuano a mantenersi generalmente basse, il massimo di tensione equivalente è di circa il 67%. Gli effetti dei sistemi di rinforzo sono tutti trascurabili.
- C. Per questo punto valgono le stesse considerazioni fatte per il punto B.
- D. In questo punto i valori di tensione equivalente salgono fino ad un massimo di circa il 240% in posizione 5 quando il carico è applicato sullo spigolo a X positivo della pala.
- I sistemi di rinforzo posizionati nella zona superiore del braccio comportano effetti benefici fino al 70% circa in posizione 2. Il collare in particolare anche del 40% in posizione 1.
 - I sistemi di rinforzo posizionati nella zona inferiore del braccio comportano effetti benefici del 70% circa in posizione 6 quando il carico è centrato sulla pala. Il collare in particolare anche del 60% in posizione 5 quando il carico si trova sullo spigolo a X positivo della pala.
 - Il bisello di rinforzo e i due collari di rinforzo posizionati contemporaneamente nella zona superiore e nella zona inferiore del braccio portano ad ottenere tensioni analoghe. Si verifica la somma degli effetti benefici descritti per i collari di rinforzo presi in considerazione singolarmente.
- E. Gli andamenti delle tensioni equivalenti e gli effetti benefici dei sistemi di rinforzo sono analoghi a quelli del punto D. Il massimo valore di tensione equivalente è del 260% in posizione 5.
- F. Si conferma il punto con la tensione equivalente massima assoluta, di circa il 390% in posizione 5 ed il 325% in posizione 1.
- La piastra di rinforzo in zona inferiore del braccio porta ad un abbassamento del 15% circa del valor di tensione equivalente in posizione 5.
 - Il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio migliora lo stato di tensione del 45% in posizione 5.
 - La piastra di rinforzo in zona superiore del braccio porta ad un abbassamento del 10% circa del valor di tensione equivalente in posizione 1.
 - Il collare di rinforzo nella zona superiore del braccio migliora lo stato di tensione del 25% in posizione 1.

- I due collari di rinforzo insieme nella zona superiore e nella zona inferiore del braccio portano all'unione anche degli effetti positivi riscontrati per i collari di rinforzo usati singolarmente.
 - Il bisello di rinforzo ha degli effetti di miglioramento delle tensioni equivalenti del 1% circa in posizione 1 e del 30% in posizione 5.
- G. Come per i vincoli che simulano il braccio a due sezioni anche in questo caso le tensioni equivalenti sono elevate. In posizione 1 e 5 si osservano valori di tensione equivalente del 215% e del 230% circa.
- La piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio comporta degli effetti sullo stato di tensione trascurabili. Stessa considerazione è applicabile per la piastra di rinforzo in zona superiore.
 - Il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio comporta una riduzione del 35% in posizione 5 del valore della tensione equivalente.
 - Il collare di rinforzo nella zona superiore del braccio comporta una riduzione del 18% in posizione 1 del valore della tensione equivalente.
 - I due collari di rinforzo insieme nella zona superiore e nella zona inferiore del braccio come spesso notato fanno misurare la somma degli effetti benefici dei collari di rinforzo presi singolarmente.
 - Il bisello di rinforzo porta all'ottenimento di circa la metà dei benefici dei due collari di rinforzo.

4.4.3. Approfondimento lungo lo spessore della lamiera del braccio

Si è cercato di comprendere meglio come varia lo stato di tensione lungo la superficie del braccio che è a contatto con la piastra della testata. Si sono numerate le zone curve del braccio come illustrato nella figura 4.35 e si sono misurati i valori di tensione equivalente in punti vicini al bordo esterno del profilo del braccio. Lo si è fatto sui modelli analizzati nel paragrafo 4.4.3 con i vincoli che simulano la sezione finale di un braccio a tre sezioni per quanto riguarda:

- Il modello base, senza nessun sistema di rinforzo.
- Il modello con il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.
- Il modello con il collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.
- Il modello con il bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

Si è anche infittito la mesh utilizzando le sfere d'influenza, nelle zone di misurazione delle tensioni equivalenti. I valori di queste misurazioni hanno l'estensione "_1" nella tabella 4.5. Con l'estensione "_1N" sono indicati i valori di tensione equivalente vicino al bordo interno del braccio nei casi in cui si presentavano valori di tensione maggiori o non trascurabili rispetto ai punti vicino al bordo esterno.

Nell' Appendice C sono visionabili i dati della tabella 4.5 in forma grafica che permettono di consultare meglio le informazioni.

Tabella 4.5 Tensioni equivalenti percentuali nei punti della figura 4.35.

Carico	Niente	Niente_1	Coll.inf	Coll.infN	Coll.inf_1	Col.inf_1N	Coll.sup.	Coll.sup_1	Bisello	Bisello_1	
X=0	1	32,2	55,3	-	-	-	-	11,7	12,6	13,9	17,4
	2	72,6	106,9	-	-	-	-	21,3	30,0	28,6	21,4
	3	124,7	194,4	41,8	41,8	47,2	75,0	-	-	31,1	42,6
	4	45,8	95,3	16,1	13,1	14,1	19,4	-	-	13,2	14,6
X>0	1	144,5	201,4	-	-	-	-	43,0	47,4	50,9	60,3
	2	38,7	59,0	-	-	-	-	12,7	18,4	15,1	15,6
	3	227,2	432,4	90,9	103,4	99,9	153,0	-	-	66,3	89,9
	4	83,7	132,6	21,6	68,5	24,2	124,5	-	-	22,2	25,0

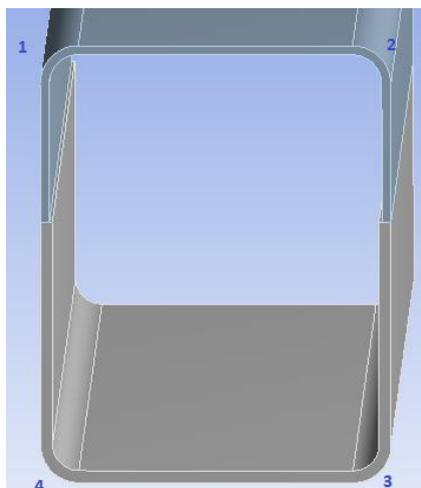


Figura 4.35 Nomi delle zone curve per il paragrafo 4.4.3.

Si può notare che aumentare il numero di elementi lungo lo spessore fa alzare i valori di tensione equivalente vicino alla superficie esterna del braccio. Ciò avviene per tutti i casi e i benefici portati dai sistemi di rinforzo si mantengono percentualmente gli stessi.

4.5. Analisi con i contatti di tipo *frictionless* attivati

Dove le superfici di braccio e testata si possono scambiare solo forze di compressione nei modelli delle simulazioni analizzate fin ora i contatti *frictionless* erano disattivati. Adesso che le tipologie di rinforzo rilevanti sono limitate in numero si possono creare dei modelli in cui si attivano questi contatti. In questo modo si eliminano le piccole compenetrazioni presenti nelle zone a compressione. A causa dei tempi di calcolo, la memoria occupata per il calcolo e la convergenza della soluzione si sono modificate le definizioni delle mesh per ridurre il numero di nodi ed elementi, ma sempre mantenendo sotto al 10% il rapporto tra l'errore delle tensioni e l'energia di deformazione nelle zone vicino al cordone di saldatura ad angolo.

Le tipologie di saldatura prese in considerazione sono:

- Cordone di saldatura ad angolo senza penetrazione e senza alcun tipo di rinforzo.
- Cordone di saldatura ad angolo senza penetrazione con un collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.
- Cordone di saldatura ad angolo senza penetrazione con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.
- Cordone di saldatura ad angolo senza penetrazione con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.
- Cordone di saldatura ad angolo senza penetrazione con due collari di rinforzo nella zona inferiore e nella zona superiore del braccio.

4.5.1. Confronto con le simulazioni del paragrafo 4.4

Si sono presi in considerazione gli stessi punti della figura 4.33 per confrontare i valori di tensione tra le simulazioni con i contatti *frictionless* attivi e con gli stessi soppressi. Si sono simulate tutte le condizioni di carico e di vincolo descritte nel paragrafo 4.2. Nell'Appendice D sono riportati i grafici per agevolare il confronto, i dati numerici nuovi si possono trovare nella tabella 4.6. Osservando gli andamenti delle tensioni equivalenti si può affermare che quando:

- Nessun sistema di rinforzo.
 - Braccio a due sezioni.

- I valori di tensione equivalente sul braccio restano all'incirca invariati.
- Nelle posizioni del modello in trazione nei punti A, B, C e D ho delle variazioni trascurabili del campo tensionale.
- Nelle posizioni in compressione in A e in B continuo ad avere variazioni trascurabili di andamenti e valori della tensione equivalente.
- Nel punto C a compressione ho una riduzione delle tensioni equivalenti, nella zona 5 di circa il 10%, quando il carico è sullo spigolo a X positivo della pala.
- Nel punto D a compressione ho un peggioramento delle tensioni equivalenti, nella zona 5 di circa il 75%.
- Nel punto G ho in miglioramento delle tensioni equivalenti del 25% nelle posizioni 2 e 5 quando il carico è sullo spigolo a X positivo della pala. Se il carico è centrato sulla pala l'entità del miglioramento è di poco minore.
- Braccio a tre sezioni.
 - I valori di tensione equivalente sul braccio restano all'incirca invariati.
 - Nel punto A quando il carico è centrato sulla pala c'è un miglioramento delle tensioni equivalenti nelle zone che lavorano a compressione. Il valore massimo passa dalla posizione 6 alla posizione 2 diminuendo del 30%. Quando il carico è sullo spigolo a X positivo della pala c'è anche un miglioramento nelle zone che si trovano a lavorare a compressione, nelle posizioni 4 e 6 di circa il 58%.
 - Nel punto B il valore di tensione equivalente migliora nelle zone che lavorano a compressione, in posizione 5 di circa il 2%.
 - Nel punto C ho un comportamento molto simile al punto B, ma il miglioramento in posizione 5 è del 25%.
 - Nel punto D ho un miglioramento della tensione equivalente in zona 5 del 37% quando il carico è applicato sullo spigolo a X positivo della pala.
 - Nel punto E ho un comportamento simile a quello del punto D, ma l'entità del miglioramento è del 60%.
 - Nel punto F ho un miglioramento dello stato tensionale nella zona 1 di circa il 20% e nella zona 5 del 28%.
 - Nel punto G la tensione equivalente migliora nelle zone che subiscono compressione. Nella zona 5 migliora del 35%.
- Bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.
 - Braccio a due sezioni.
 - I valori e gli andamenti della tensione equivalente restano all'incirca invariati nelle posizioni sul braccio.
 - Nel punto A i valori di tensione equivalente subiscono variazioni trascurabili.
 - Nei punti B e C ho un abbassamento della tensione equivalente nella posizione 5 di circa il 15%.
 - Nel punto D ho un miglioramento dello stato tensionale di circa il 25% nella posizione 5.
 - Nel punto E si può ripetere la stessa osservazione del punto D, ma il miglioramento è del 60%.
 - Nel punto F in posizione 1 ho un miglioramento del 17% delle tensioni equivalenti e in posizione 5 del 40%.
 - Nel punto G si ha un miglioramento dello stato di tensione con lo stesso andamento del punto F ma l'entità dello stesso è del 20% per entrambe le posizioni.

- Braccio a tre sezioni, si possono osservare andamenti e valori delle tensioni equivalenti del tutto angoli a quando si è simulato il braccio a due sezioni.
- Collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.
 - Braccio a due sezioni.
 - I valori di tensione equivalente sul braccio restano all'incirca invariati.
 - Nei punti A, B, C e G gli andamenti e i valori della tensione equivalente sono all'incirca invariati.
 - Nel punto D si osservano dei miglioramenti della tensione equivalente nelle posizioni 2 e 5 circa del 10%.
 - Nel punto E ho dei miglioramenti dello stato tensionale nelle zone poste a trazione. Nelle posizioni 1 e 2 migliorano di circa il 30%.
 - Nel punto F ho un abbassamento della tensione equivalente nelle posizioni 1 e 5 di circa il 35%.
 - Braccio a tre sezioni.
 - I valori di tensione equivalente sul braccio restano all'incirca invariati.
 - Nei punti A, B, C e G gli andamenti e i valori della tensione equivalente sono all'incirca invariati come per il braccio a due sezioni.
 - Nel punto D ho dei miglioramenti d'entità trascurabile in ogni posizione.
 - Nel punto E ho dei miglioramenti nella zone che subiscono la trazione. In particolare quando il carico è applicato sullo spigolo a X positivo della pala in posizione 1 ho un miglioramento della tensione equivalente del 25%. Con il carico centrato sulla pala passa al 17%.
 - Nel punto F ho un abbassamento delle tensioni in posizione 1 di circa il 40% e in posizione 5 di circa il 35%.
- Collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.
 - Braccio a due sezioni.
 - I valori di tensione equivalente sul braccio restano all'incirca invariati.
 - Nel punto A si registrano variazioni trascurabili dello stato tensionale.
 - Nel punto B si osserva un peggioramento della tensione equivalente nella posizione 5 del 54%.
 - Nel punto C si osserva un peggioramento della tensione equivalente nella posizione 5 del 68%.
 - Nel punto D si può notare un miglioramento del campo tensionale nelle zone poste a compressione. Quando il carico è posizionato sullo spigolo a X positivo della pala in posizione 5 ho un miglioramento del 12%. Quando il carico è centrato sulla pala nella posizione 6 ho un miglioramento del 53% e nella posizione 5 del 34%.
 - Nel punto E quando il carico è sullo spigolo a X positivo della pala in posizione 5 si osserva un abbassamento della tensione equivalente del 48%. Quando il carico è centrato sulla pala in posizione 6 ho un miglioramento del 54% e in posizione 5 del 52%.
 - Nel punto F in posizione 5 quando il carico è sullo spigolo a X positivo della pala si registra un miglioramento del 60%, quando il carico è centrato sulla pala del 42%. In entrambi i casi di carico in posizione 1 ho un miglioramento del 32%.
 - Nel punto G ho un miglioramento in posizione 5 del 42% quando il carico è sullo spigolo a X positivo della pala.
 - Braccio a tre sezioni.
 - I valori di tensione equivalente migliorano leggermente sul braccio, il massimo miglioramento è del 9% in posizione 11.

-
- Nel punto A ho un miglioramento di piccola entità delle tensioni equivalenti nelle zone sollecitate a compressione. Se il carico è centrato sulla pala il miglioramento è più accentuato, in posizione 6 del 70%.
 - Nei punti B e C ho delle variazioni dei campi tensionali trascurabili, eccetto per un'intensificazione del 30% in posizione 5 con il carico sullo spigolo a X positivo della pala.
 - Nel punto D ho degli effetti positivi nelle zone sollecitate a compressione. Quando il carico è sullo spigolo a X positivo della pala in posizione 5 ho un miglioramento del 26%. Quando il carico è centrato sulla pala in posizione 6 migliora del 69%.
 - Nel punto E ho dei miglioramenti dello stato tensionale nelle zone sottoposte a compressione. Nel caso in cui il carico è sullo spigolo a X positivo della pala in posizione 5 ho un miglioramento del 49%. Se il carico è posizionato centralmente sulla pala in posizione 6 ho un miglioramento del 69%.
 - Nel punto F ho dei miglioramenti delle tensioni equivalenti in tutte le zone, tra cui in posizione 1 del 33%, in posizione 5 del 62%.
 - Nel punto G si osserva un abbassamento del 45% in posizione 5 quando il carico è sullo spigolo a X positivo della pala.
- Due collari di rinforzo:
 - Braccio a due sezioni.
 - I valori di tensione equivalente sul braccio restano all'incirca invariati.
 - Nei punti A, B e C gli andamenti e i valori delle tensioni equivalenti hanno delle variazioni trascurabili.
 - Nel punto D ho una diminuzione delle tensioni equivalenti in posizione 5 del 15% circa.
 - Nel punto E ho una diminuzione delle tensioni equivalenti in posizione 5 del 12% circa e del 82% in posizione 1.
 - Nel punto F ho un miglioramento delle tensioni equivalenti in posizione 1 del 31% circa e del 36% in posizione 5.
 - Nel punto G ho un miglioramento dello stato tensionale del 13% in posizione 5.
 - Braccio a tre sezioni: si riscontrano andamenti e valori degli scostamenti del tutto analoghi al braccio a due sezioni ad eccezione per il punto G. in questo punto il miglioramento della tensione equivalente in posizione 1 è del 13% ed è anche presente un effetto d'intensificazione del 16% in posizione 5.

Riassumendo si può concludere che le variazioni a seconda dell'attivazione o meno dei contatti *frictionless* non sono completamente trascurabili. In molte zone si presentano variazioni maggiori del 10%. È quindi consigliabile proseguire con l'analisi di queste nuove simulazioni.

Tabella 4.7 Tensioni equivalenti percentuali nei punti della figura 4.35, braccio a due sezioni.

	Carico	Niente	Bisello	Coll inf	Coll sup	2 Coll
X=0	1	16,1	20,4	14,0	16,6	18,0
	2	45,1	20,2	40,7	18,8	19,0
	3	7,6	12,5	6,5	10,6	12,1
	4	15,2	17,1	13,9	17,2	14,7
	5	38,6	37,3	39,4	39,1	38,9
	6	13,3	12,5	13,9	14,3	15,8
	7	23,7	23,9	23,5	25,1	23,8
	8	13,4	13,1	13,2	14,1	14,1
	9	39,8	35,6	41,5	33,4	32,6
	10	45,0	41,7	47,2	41,4	40,8
	11	50,2	48,7	40,6	48,8	40,1
	12	21,3	21,6	18,3	21,9	17,1
X>0	1	58,5	71,9	51,4	60,1	66,8
	2	53,1	27,8	47,8	23,8	23,5
	3	15,5	15,7	13,8	11,8	14,6
	4	19,2	24,6	17,2	24,6	20,7
	5	63,0	59,1	58,8	43,2	58,5
	6	7,6	11,3	17,8	9,7	19,9
	7	11,6	14,4	11,6	11,0	12,1
	8	13,0	14,3	12,7	15,1	12,9
	9	125,5	117,9	126,7	99,8	101,6
	10	17,0	19,2	12,8	6,0	12,6
	11	111,5	107,9	86,3	106,3	86,0
	12	45,4	43,1	32,8	42,2	33,5

4.5.2. Confronto tra i vari sistemi di rinforzo

Si sono analizzati gli effetti dei rinforzi sul braccio e sulla saldatura. Si sono utilizzate le stesse nomenclature del paragrafo 4.4.1 per individuare tipologie di rinforzo, punti di misurazione e tipologie di vincolo. I valori di tensione equivalente sono riportati nelle tabelle 4.6, 4.7 e nei grafici dell'Appendice E per facilitare l'analisi degli stessi. Si può quindi osservare che:

- Quando i vincoli simulano un braccio a due sezioni.
 - Con il carico centrato sulla pala.
 - Lungo il cordone nella zona superiore del modello il bisello di rinforzo, il collare di rinforzo nella zona superiore e i due collari di rinforzo portano ad effetti analoghi. Il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio non causa nessuna variazione nello stato tensionale della zona superiore del braccio.
 - Sulla struttura del braccio il collare di rinforzo nella zona inferiore abbassa le tensioni equivalenti del 20% in posizione 11, mentre il collare di rinforzo nella zona superiore del 17% in posizione 9. I due collari di rinforzo utilizzati contemporaneamente funzionano come somma degli effetti benefici dei collari di rinforzo presi singolarmente. Il bisello d

rinforzo causa invece effetti benefici che sono circa del 10% nelle posizioni 9 e 10. Nelle rimanenti posizioni il bisello di rinforzo porta ad effetti trascurabili.

- Con il carico sullo spigolo ad X positivo della pala.
 - Il bisello di rinforzo, il collare di rinforzo nella zona superiore del braccio e i due collari di rinforzo causano effetti analoghi nella zona di cordone nella parte superiore del modello. Il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio non influenza affatto le tensioni equivalenti del cordone nella sua parte nella parte superiore del modello.
 - Lungo la struttura del braccio il collare nella zona inferiore dello stesso migliora le tensioni equivalenti del 23% circa nella posizione 11, il collare nella zona superiore del 20% nella posizione 9. L'utilizzo dei due collari di rinforzo contemporaneamente somma gli effetti benefici dei collari utilizzati singolarmente. Il bisello di rinforzo abbassa del 6% la tensione equivalente in posizione 9 e in posizione 10, nelle zone inferiori del braccio causa invece effetti trascurabili.
- Quando i vincoli simulano un braccio a tre sezioni:
 - Con il carico centrato sulla pala.
 - Lungo il cordone, dove si trova nella zona superiore del modello, il bisello di rinforzo e il collare di rinforzo nella parte superiore del braccio e i due collari di rinforzo contemporaneamente causano variazioni dello stato tensionale analoghe. Il collare di rinforzo nella zona inferiore non influenza l'andamento delle tensioni equivalenti nella parte superiore del modello.
 - Lungo la struttura del braccio il collare di rinforzo nella zona inferiore dello stesso migliora le tensioni equivalenti del 17% circa in posizione 11. Il collare di rinforzo nella parte superiore del braccio abbassa le tensioni equivalenti del 15% in posizione 9. L'utilizzo dei due collari di rinforzo contemporaneamente somma gli effetti benefici dei collari presi singolarmente, il bisello di rinforzo invece fa registrare delle variazioni delle tensioni equivalenti trascurabili.
 - Con il carico sullo spigolo ad X positivo della pala.
 - Sul cordone di saldatura ad angolo, dove si trova nella parte superiore del modello, si osservano variazioni delle tensioni equivalenti analoghe se si utilizza un bisello di rinforzo o un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio o i due collari contemporaneamente. Il collare di rinforzo nella zona superiore inoltre causa un ulteriore abbassamento della tensione equivalente del 32% in posizione 5. Il collare di rinforzo nella parte inferiore del braccio non porta a variazioni tensionali rilevanti.
 - Lungo la struttura del braccio il collare di rinforzo nella parte inferiore del braccio migliora le tensioni equivalenti del 20% in posizione 11, il collare di rinforzo nella parte superiore del braccio del 19% in posizione 9. Quando si utilizzano i due collari di rinforzo contemporaneamente si ottiene la somma degli effetti positivi osservati quando i collari sono stati utilizzati singolarmente. Il bisello di rinforzo in posizione 9 abbassa le tensioni equivalenti del 6% circa.

Ricapitolando si può affermare che, specialmente analizzando le tensioni sulla struttura del braccio, l'adozione dei due collari porta ad ottenere miglioramenti più marcati rispetto all'utilizzo del bisello di rinforzo.

Tabella 4.6 Tensioni equivalenti percentuali nei punti della figura 4.35, braccio a tre sezioni.

	Carico	Niente	Bisello	Coll inf	Coll sup	2 Coll
X=0	1	11,8	14,6	9,9	12,6	12,8
	2	45,0	22,8	41,4	19,1	19,5
	3	10,9	15,2	9,1	13,4	14,9
	4	12,2	11,1	12,2	13,7	13,5
	5	40,4	38,2	42,5	41,4	41,9
	6	18,5	18,3	16,5	18,6	15,4
	7	22,0	21,9	22,0	23,4	22,5
	8	8,1	7,8	8,2	8,6	8,8
	9	31,8	28,1	32,3	26,8	24,8
	10	53,3	51,3	57,1	49,4	48,1
	11	59,5	59,5	49,4	58,1	49,4
	12	19,4	19,6	32,5	20,8	16,8
X>0	1	56,8	68,2	48,6	59,4	53,0
	2	53,1	30,2	48,3	24,7	22,1
	3	15,5	15,5	13,7	12,5	13,7
	4	20,9	30,1	16,8	26,3	22,6
	5	66,0	59,8	63,6	45,8	68,0
	6	11,2	7,9	11,0	14,6	12,7
	7	11,8	12,0	11,0	11,0	10,7
	8	18,3	14,2	15,2	16,5	14,1
	9	125,7	118,6	123,4	101,4	97,4
	10	18,5	20,4	13,1	8,0	11,8
	11	118,8	118,9	95,0	113,4	94,5
	12	45,3	44,2	17,5	40,8	33,1

4.5.3. Tensioni lungo il cordone di saldatura ad angolo

Per completare in maniera accurata l'analisi dello stato tensionale dei vari modelli corrispondenti alle differenti tipologie di rinforzo in tutte le possibili combinazioni di carico e di vincolo si sono creati i grafici dell'Appendice F con i valori di tensione equivalente negli stessi punti presi in considerazione nel paragrafo 4.4.2. Si può quindi osservare che in generale si presentano valori di tensione equivalente maggiori quando la pala è caricata sullo spigolo a X positivo. Quando i vincoli simulano un braccio a due sezioni per il punto:

- A. È un punto che non presenta elevate sollecitazioni già quando non viene applicata nessuna tipologia di rinforzo, il picco è del 65%. Questo punto avrà quindi poco peso sulle decisioni finali.
- Il collare di rinforzo nella parte inferiore del braccio fa ottenere una riduzione della tensione equivalente trascurabile in ogni condizione di carico.
 - Il collare di rinforzo nella parte superiore del braccio porta ad una riduzione del 50% circa in posizione 2 in tutte le condizioni di carico. Quando il carico è applicato sullo spigolo della pala a X positivo si nota una ulteriore riduzione del 30% in posizione 5.

-
- Il bisello di rinforzo e i due collari di rinforzo contemporaneamente variano lo stato di tensione del cordone di saldatura ad angolo allo stesso modo. Mantengono gli effetti positivi del collare di rinforzo in zona superiore in posizione 2 in tutte le condizioni di carico.
- B. Come per il caso del punto A non si presentano valori di tensione equivalente molto elevati già senza applicare sistemi di rinforzo, il massimo è del 55% circa. Tutti i sistemi di rinforzo testati comportano effetti trascurabili ai fini di questa analisi. Si può notare però un effetto peggiorativo quando si utilizza un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio, in posizione 5. La tensione equivalente aumenta del 90% ma rimane sempre inferiore a 100%.
- C. Come per il punto B non si osservano valori di tensione equivalente elevati senza nessun sistema di rinforzo, massimo del 55% circa. Tutti i sistemi di rinforzo testati provocano variazioni trascurabili dello stato tensionale. Si verifica lo stesso effetto d'intensificazione in posizione 5 che si è visto nel punto B quando si utilizza un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.
- D. Quando non si utilizzano sistemi di rinforzo in questo punto si osservano valori di tensione equivalente maggiori dei precedenti punti. Il massimo è del 150% circa in posizione 5, a causa della maggiore vicinanza alla zona d'intaglio.
- Il collare di rinforzo nella parte superiore del braccio porta dei benefici di circa il 78% in posizione 2 dove si avrebbe la tensione equivalente a 90% con il carico sullo spigolo a X positivo della pala. Di contro è anche presente un piccolo effetto d'intensificazione del 13% circa in posizione 5.
 - Il collare di rinforzo nella parte inferiore del braccio fa ottenere un miglioramento del 50% circa in posizione 5, dove la tensione è di circa il 150% quando il carico è applicato sullo spigolo a X positivo sulla pala.
 - Quando si utilizza il bisello di rinforzo o i due collari di rinforzo contemporaneamente si osservano andamenti tensionali analoghi, mantenendo i benefici che i collari introducono quando sono utilizzati singolarmente.
- E. È un punto del cordone nella zona che lavora a taglio, quindi il massimo di tensione equivalente sale al 160% in posizione 1, quando la pala è caricata sullo spigolo ad X positivo.
- Il collare di rinforzo posizionato nella parte superiore del braccio comporta un abbassamento della tensione equivalente del 70% in posizione 1, dove la tensione è del 160% con il carico sullo spigolo della pala. Si nota però anche un peggioramento del 32% in posizione 5.
 - Il collare di rinforzo nella zona inferiore porta ad un miglioramento del 37% in posizione 1 e di circa il 75% in posizione 6, entrambe con il carico sullo spigolo della pala.
 - Il bisello di rinforzo ed i due collari di rinforzo contemporaneamente causano effetti analoghi sulla tensione equivalente. Si mantengono i benefici che si sono osservati per i collari presi singolarmente.
- F. In questo punto si possono osservare tensioni ancora più elevate, con un massimo del 300% circa in posizione 5 quando il carico è applicato sullo spigolo a X positivo della pala. Questo valore molto più elevato dei precedenti può essere causato dalla presenza di elevate tensioni tangenziali in questa zona del cordone di saldatura ad angolo. Le posizioni più critiche sono la 1 e la 5.
- Se si utilizza un collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio si ottiene un miglioramento del 52% in posizione 5.
 - Il collare di rinforzo nella zona superiore del braccio porta effetti benefici del 35% circa in posizione 1 quando il carico è applicato sullo spigolo della pala. Se il

carico è centrato sulla pala gli effetti di riduzione delle tensioni equivalenti sono proporzionati con il minor valore della tensione equivalente stessa.

- Il bisello di rinforzo mantiene l'effetto positivo del collare di rinforzo nella zona inferiore, ma nella zona superiore non porta a nessuna variazione rilevante dello stato tensionale.
 - I due collari di rinforzo utilizzati contemporaneamente fanno ottenere la somma dei benefici ottenuti quando si utilizzano i collari di rinforzo uno alla volta.
- G. Le tensioni equivalenti in questo punto continuano ad essere elevate, il massimo è del 190% circa in posizione 1 quando il carico è applicato sullo spigolo a X positivo della pala. Anche in posizione 5 le tensioni equivalenti sono elevate, raggiungono quasi il 150%.
- Il collare di rinforzo nella parte superiore del braccio fa osservare dei miglioramenti molto limitati e trascurabili dello stato tensionale.
 - Il bisello di rinforzo, il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio e il due collari di rinforzo contemporaneamente sul braccio manifestano lo stesso comportamento. In posizione 7, dove senza rinforzi la tensione equivalente è al 60%, si ha un miglioramento, ma dato il basso valore di partenza relativamente ad altre zone prese in esame da questo punto questo miglioramento di può ritenere trascurabile.

Sempre nell'Appendice F è possibile trovare gli stessi grafici ma per il caso in cui i vincoli simulino un braccio a tre sezioni. Si può quindi osservare nuovamente che generalmente si hanno tensioni equivalenti maggiori quando il carico è applicato sullo spigolo ad X positivo della pala e:

- A. È un punto che se osservato senza sistemi di rinforzo non è molto sollecitato, il massimo è di circa il 65%. Per questo motivo avrà poco peso sulle decisioni finali.
- Il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio porta ad una riduzione della tensione equivalente trascurabile in tutte le condizioni di carico.
 - Il collare di rinforzo nella zona superiore del braccio porta ad una riduzione di circa il 50% in posizione 2, in tutte le condizioni di carico. Se il carico è applicato sullo spigolo ad X positivo della pala è presente una diminuzione anche in posizione 5 del 30%.
 - Il bisello di rinforzo e i due collari di rinforzo applicati contemporaneamente mettono in evidenza lo stesso comportamento. Viene mantenuto l'effetto del collare di rinforzo nella zona superiore del braccio: in posizione 2 e in tutte le condizioni di carico si può notare una riduzione del 50% della tensione equivalente.
- B. Come per il punto A non si presentano valori di tensione equivalente molto elevati già in assenza di sistemi di rinforzo, il massimo è al 55% circa. Ogni tipologia di rinforzo testata ha effetti trascurabili.
- C. Allo stesso modo del punto B non è presente uno stato di tensione particolarmente intenso già quando non vengono applicati i sistemi di rinforzo. Il massimo è del 55% circa e tutti i sistemi di rinforzo fanno registrare variazioni trascurabili. In posizione 5 la tensione equivalente aumenta del 100%, rimanendo comunque al di sotto del 100%.
- D. I valori della tensione equivalente senza rinforzi sono del 150% in posizione 5 probabilmente a causa della maggiore vicinanza alla zona d'intaglio.
- Il collare di rinforzo in zona superiore del braccio ha effetti benefici del 75% in posizione 2, dove la tensione equivalente era del 93% con il carico sullo spigolo ad X positivo della pala. In posizione 5 è invece osservabile un peggioramento del 15% quando il carico è applicato sullo spigolo X positivo della pala.

- Il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio causa una riduzione della tensione equivalente del 40% in posizione 5, a tensione 150% con il carico sullo spigolo della pala.
 - Il bisello di rinforzo e i due collari di rinforzo contemporaneamente sul braccio portano a campi di tensione analoghi. Si mantengono, sommandoli, i benefici che si sono visti con i collari di rinforzo presi singolarmente.
- E. È un punto caratterizzato da grandi tensioni di tipo tangenziale, motivo che concorre alla all'aumentare del massimo a quasi 160% in posizione 1, in condizioni di carico sullo spigolo a X positivo della pala.
- Il collare di rinforzo nella zona superiore del braccio fa osservare degli effetti migliorativi della tensione equivalente del 70% in posizione 1. In posizione 5 invece comporta un effetto d'intensificazione del 35%.
 - Il collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio comporta dei benefici del 37% circa in posizione 1 e di circa il 70% in posizione 6 quando il carico è applicato sullo spigolo ad X positivo della pala.
 - Il bisello di rinforzo e i due collari di rinforzo sul braccio contemporaneamente provocano degli effetti analoghi sullo stato di tensione. Entrambi mantengono i benefici nella zona superiore e nella zona inferiore del braccio che sono stati osservati nei collari quando si sono considerati singolarmente.
- F. Le tensioni equivalenti in questo punto sono tra le più elevate, si raggiunge un massimo di 272% circa nella posizione 5 quando il carico è applicato sullo spigolo ad X positivo della pala. L'altra posizione moto importante perché raggiunge tensioni equivalenti del 250% è la posizione 1.
- Il collare di rinforzo nella parte inferiore del braccio porta ad un miglioramento del 47% del valore della tensione equivalente in posizione 5.
 - Il collare di rinforzo nella parte superiore del braccio mette in evidenza un effetto migliorativo del 40% sul valore della tensione equivalente in posizione 1. Inoltre, mantiene in posizione 5 lo stesso effetto benefico evidenziato per il collare di rinforzo in zona inferiore del braccio. Queste considerazioni fanno riferimento al carico sullo spigolo a X positivo della pala, ma possono ripetersi anche per il carico centrato sulla pala con le dovute proporzioni.
 - Il bisello di rinforzo comporta delle variazioni trascurabili sullo stato tensionale di questo punto dl cordone in posizione 1, mantiene i benefici in posizione 5 evidenziati per il collare di rinforzo in zona inferiore del braccio.
 - I due collari di rinforzo applicati insieme al braccio causano effetti di riduzione delle tensioni equivalenti corrispondenti a quelli esaminati per i collari esaminati singolarmente in 1 ed in 5. In realtà in 5 l'effetto benefico si riduce al 30.
- G. Con un massimo del 195% in posizione 1 con il carico sullo spigolo a X positivo della pala si può osservare che in questo punto le tensioni rimangono elevate. In posizione 5 invece si sfiorano i 150% di tensione equivalente.
- Il collare di rinforzo nella zona superiore del braccio comporta degli effetti di miglioramento sullo stato tensionale di entità trascurabile.
 - Il bisello di rinforzo ed il collare di rinforzo nella parte inferiore del braccio presentano entrambi una riduzione delle tensioni equivalenti in posizione 7 dove senza rinforzi la tensione equivalente è del 60%. Per questo motivo l'effetto di riduzione presente è di scarso interesse in posizione 7.
 - I due collari di rinforzo applicati insieme portano ad un beneficio del 24% in posizione 1 ma un'intensificazione in posizione 5 del 20% che la fa diventare la nuova zona a tensione equivalente massima.

5. Osservazioni e Conclusioni finali

Una volta definiti nell'Introduzione, capitolo 1, i punti di partenza dello studio trattato in questo documento di Tesi si è per prima cosa cercato di affinare gli strumenti numerici a disposizione. Nel capitolo 2 si è utilizzata una struttura di geometria semplice con un cordone di saldatura angolare effettuato solo su un lato della struttura. Con questa struttura si sono potuti confrontare gli andamenti di tensione equivalente ottenuti con Workbench e con Mechanical APDL, due pacchetti di ANSYS. Nel paragrafo 2.1.2 si è potuto osservare che su Workbench:

- Bisogna porre attenzione al metodo con cui il software va a creare la mesh. Spesso per risparmiare tempo nella fase di mesh in automatico vengono inseriti elementi triangolari e tetraedrici. Se si impone l'utilizzo del metodo di suddivisione con *sweep* ed elementi quadrangolari si ottengono risultati migliori dalle simulazioni.
- Per controllare la creazione della mesh è consigliabile utilizzare il sizing dei bordi per garantire che i nodi di diversi volumi nelle superfici di contatto, allo stato indeformato, siano in posizioni coincidenti. In caso contrario nelle zone dove sono presenti grandi discontinuità geometriche ed elementi distorti si manifestano andamenti discontinui delle tensioni equivalenti dovuti ad errori numerici.

Nel paragrafo 2.1.3 si sono creati i modelli corrispettivi su Mechanical APDL. Si è confrontato il livello di precisione dei risultati ottenuti con differenti dimensioni degli elementi e tipi di elementi. Il parametro di dimensione crea delle differenze ampie dei valori di tensione nella zona dell'apice dell'intaglio a causa del suo raggio pari a 0mm. Definiti questi due parametri si sono confrontati i risultati che si possono ottenere con elementi di tipo piano ed elementi di tipo solido. Da questo confronto è emerso che nella sezione interna al modello solido si ha gli stessi valori di tensione equivalente ottenibili con degli elementi piani in condizioni di deformazione piana. Sulla superficie esterna le condizioni di tensione piana non vengono perfettamente rispettate. I modelli piani sovrastimano a parità di dimensione degli elementi il valore di tensione equivalente fino ad un massimo del 15% all'apice dell'intaglio, dove le soluzioni sono più affette da errori numerici.

All'interno del paragrafo 2.1.4 si sono confrontati i risultati delle simulazioni effettuate con Workbench e con Mechanical APDL. Nella zona d'intaglio Workbench porta a valori di tensione equivalente più elevati perché sono presenti più elementi lungo la sezione di gola, arrivando ad un massimo del 35%. A 0,5mm dell'intaglio le differenze tra i modelli diventano trascurabili. La differenza descritta probabilmente causata anche dalle differenze tra l'utilizzo dei contatti e l'utilizzo della funzione NUMMGR.

Si è effettuato il confronto tra modelli lineari elastici su Workbench ed i valori di tensione nominale calcolati analiticamente seguendo le normative [1] e [2] all'interno del paragrafo 2.2. Le normative portano al calcolo di valori differenti di tensioni nominali, a causa dell'utilizzo poi a progetto di differenti coefficienti correttivi e di sicurezza. Ricordando che ho un'incertezza del circa 10% sui risultati dei modelli FEM realizzati si può affermare che i valori medi misurati lungo i piani di gola corrispondono che i valori di tensione nominale calcolati. Si sono utilizzati

due modelli: uno con 2 cordoni di saldatura simmetrici tra lamiera e piastra e l'altro con un cordone di saldatura solo.

Dopo questa prima fase in cui si è tarato gli strumenti numerici a disposizione nel capitolo 3 si sono analizzati i provini veri e propri con 4 tipologie di saldatura differenti. Si sono definite le 4 tipologie nel paragrafo 3.1 e come poterli realizzare per effettuare le prove sperimentali nel paragrafo 3.2.

Nel paragrafo 3.3 seguendo le indicazioni che si sono ottenute all'interno di questo documento si sono realizzati dei modelli numerici con Workbench dei 4 modelli CAD corrispondenti ai 4 provini. Le simulazioni di tipo lineare, studiando il materiale in campo elastico, possono fornire indicazioni utili a livello progettuale, quando si vuole evitare lo snervamento. Si può subito notare che l'introduzione di un bisello di rinforzo nella lamiera sottile porta a dei vantaggi minori a quelli di una saldatura di testa completa ma comunque paragonabili.

Si è quindi applicato nel paragrafo 3.4 un metodo utilizzato in letteratura per stimare la tensione effettiva d'intaglio utilizzando il modello lineare elastico del materiale. Si è utilizzato Workbench e confrontando dettagliatamente nel paragrafo 3.4.5 i risultati ottenuti con quelli ottenuti precedentemente in generale, a meno di un'eccezione, si confermano le posizioni delle zone con intensificazioni delle tensioni maggiori. In termini di fattori d'intensificazione i valori misurati delle tensioni equivalenti differiscono mediamente del 10% circa.

Si sono effettuate le prove sperimentali descritte nel paragrafo 3.5 per verificare quanto ipotizzato fin ora. Per i provini di tipo 1 si è verificata la rottura nella zona prevista, per quelli di tipo 2 in una zona che non era stata ben rimarcata dai modelli lineari elastici ed infine i provini di tipo 3 e 4 hanno rivelato una criticità fin a quel momento trascurata. La chiodatura che serve a tenere in posizione la piastra di rinforzo durante la saldatura di tesa e nei bracci reali dovrebbe aiutare a distribuire meglio le tensioni a causa della sua geometria e della penetrazione assente della saldatura va a creare un indebolimento nella lamiera sottile. Questa quindi si strappa all'altezza del foro per la chiodatura. Nei bracci reali è quindi consigliabile porre attenzione al fatto che le chiodature siano sufficientemente distanti le une dalle altre. Il bisello sulla lamiera sottile permette di ottenere un innalzamento del carico di rottura a trazione del 20%, scaricando il cordone di saldatura ad angolo.

Per studiare meglio il comportamento a rottura si sono quindi introdotte le caratteristiche plastiche del materiale all'interno delle simulazioni i cui risultati sono presentati nel paragrafo 3.6. Questa precisione maggiore nel comportamento del materiale prima della rottura è stata introdotta sia su Mechanical APLD che su Workbench confrontando i risultati nel paragrafo 3.6.3. Nel 3.6.4 li si sono paragonati ai risultati sperimentali. A questi modelli sono stati applicati i carichi medi di rottura misurati durante le prove sperimentali. Con le dovute precisazioni per il provino di tipologia 1 e tipologia 2 si ottengono andamenti delle tensioni equivalenti che combaciano con quelli si possono ipotizzare a causa delle rotture durante le prove sperimentali.

Nel capitolo 4 si è quindi potuti passare alla realizzazione dei modelli dei componenti reali. Testata e braccio sono stati semplificati geometricamente il più possibile e si sono definite tutte le possibili condizioni di carico e di vincolo quando si utilizza una pala sulle macchine telescopiche progettate dalla Merlo Project S.r.l. Si sono anche definite le possibili tipologie di rinforzo che si potrebbero realizzare senza stravolgere il processo produttivo nel paragrafo 4.3.

Si sono inizialmente svolte simulazioni trascurando la possibilità di compenetrazioni tra superfici che nella realtà si trasmettono tensioni di compressione nel paragrafo 4.4. Malgrado questa approssimazione è stato possibile eliminare dalle analisi successive alcune tipologie di rinforzo che già si erano rivelate di poco interesse.

Verificato che le variazioni nello stato tensionale con i contatti di tipo *frictionless* attivato non fossero trascurabili, si sono analizzate con più attenzione le tensioni equivalenti nella zona del

cordone di saldatura quando si utilizzano i rinforzi che si erano rivelati interessanti dopo le prime analisi. Da questi risultati del paragrafo 4.5 è possibile concludere che dal punto di vista tensionale sono due i sistemi di rinforzo che sono efficaci:

- Il bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro esterno del braccio
- I due collari di rinforzo sia nella zona superiore che inferiore del braccio che permettono di effettuare una saldatura di testa tra testata e braccio

Entrambi in alcune zone del cordone sono capaci di abbassare le tensioni equivalenti anche del 70%. In genere i due collari di rinforzo sono più efficaci ma bisogna prestare molta attenzione a come si posizionano le chiodature per fissare il collare durante il processo di produzione. In alternativa si potrebbe introdurre un processo produttivo che elimina le chiodature, tenendo in posizione i collari di rinforzo con altri sistemi. Sempre dalle prove sperimentali è emerso che bisogna porre particolare attenzione a come il materiale fuso riesca a raggiungere l'intera zona della saldatura di testa.

Il bisello di rinforzo non introduce particolari difficoltà aggiuntive durante il processo di saldatura e da vantaggi strutturali paragonabili a quelli di una saldatura di testa per le geometrie scelte. Introduce la necessità di aggiungere la lavorazione di bisellatura e una particolare attenzione sul verso in cui vengono posizionate le lamiere in piegatura per formare le due C che compongono il braccio. Inoltre, non si andrebbero ad aggiungere componenti (i collari) e peso sulla parte terminale del braccio.

Riferimenti Bibliografici

- [1] European Committee for Standardization (CEN). *EN 13001-3-1: Cranes: General design, Part 3-1: Limit States and proof competence of steel structure*. Brussels: European Standard; 2014.
- [2] European Committee for Standardization (CEN). *EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-8: Design of joints*. Brussels: European Standard; 2005.
- [3] European Committee for Standardization (CEN). *EN 13001-2: Crane safety: General design, Part 2: Load actions*. Brussels: European Standard; 2014.
- [4] Fricke. *Fatigue analysis of welded joints: state of development*. Marine structures 2003; 16: 185-200
- [5] ANSYS, Inc. *ANSYS Help*. 2010.
- [6] Gugliotta A. *Elementi finiti*. Politecnico di Torino, Dipartimento di Meccanica: Otto Editore; 2002
- [7] Hobbacher A.F., *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. International Institute of Welding, Springer; 2016
- [8] De Jesus, Matos, Fontoura, Rebelo, da Silva, Veljkovic. *A comparison of the fatigue behavior between S355 and S690 steel grades*. Journal of Construcional Steel Reserch 2012; 79: 140-150
- [9] European Committee for Standardization (CEN). *EN 10025: hot rolled products of structural steels*. Brussels: European Standard; 2004
- [10] Fricke. *IIW Guideline for the Assessment of Weld Root Fatigue*. Welding in the World 2013; 57: 753-791
- [11] Fricke. *Roud-robin study on stress analysis for the effective notch stress approach*. Welding in the World 2007; 51, n°3/4
- [12] International Institute of Welding, 2012, *Recommendations for the fatigue assessment of welded structures by notch stress analysis*
- [13] Radaj, *Design and analysis of fatigue resistant welded structures*, Woodhead Publishing, Cambridge, UK. 1990
- [14] Gugliotta A. *introduzione alla meccanica della frattura lineare elastica*. Levrotto & Bella; 2002

Appendice A

In questa appendice vengono riportati i grafici degli andamenti delle tensioni equivalenti dei casi ritenuti rilevanti delle tabelle 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. Tensioni equivalenti prese nei punti descritti dalla figura 4.33. Sono messi sul grafico:

- In blu le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo
- In rosso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo
- In verde le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato
- In viola le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato

A.1. Braccio a tre sezioni con il carico centrato sulla pala

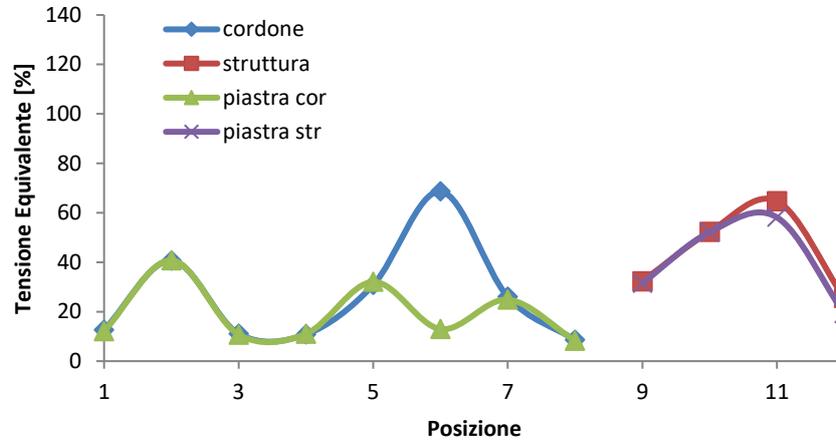


Figura A.1 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

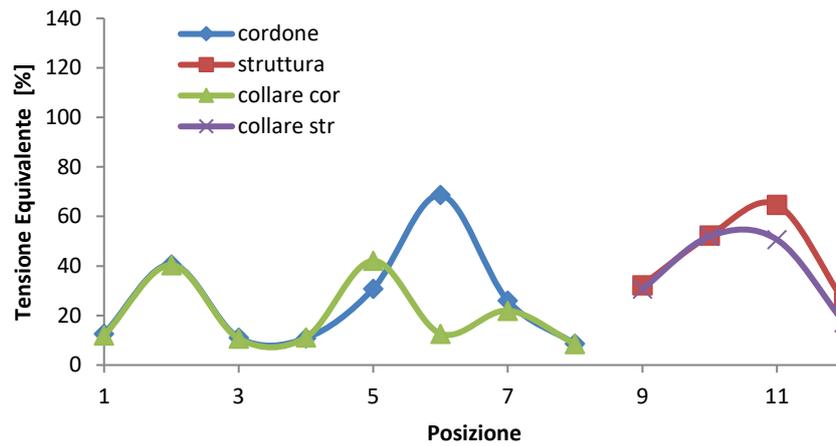


Figura A.2 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

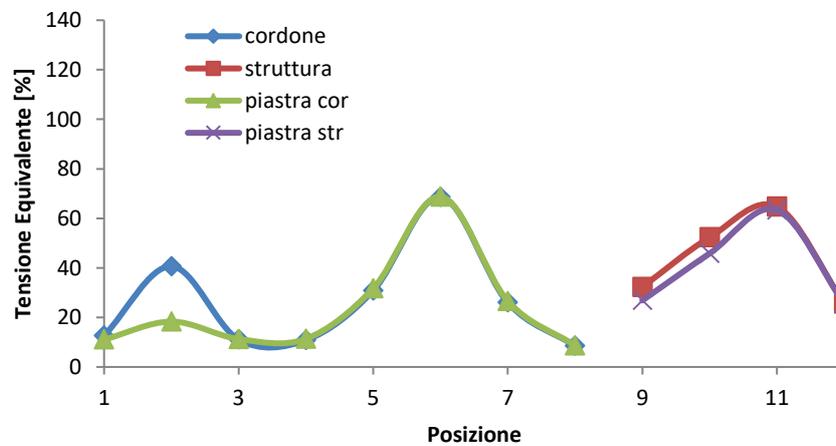


Figura A.3 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

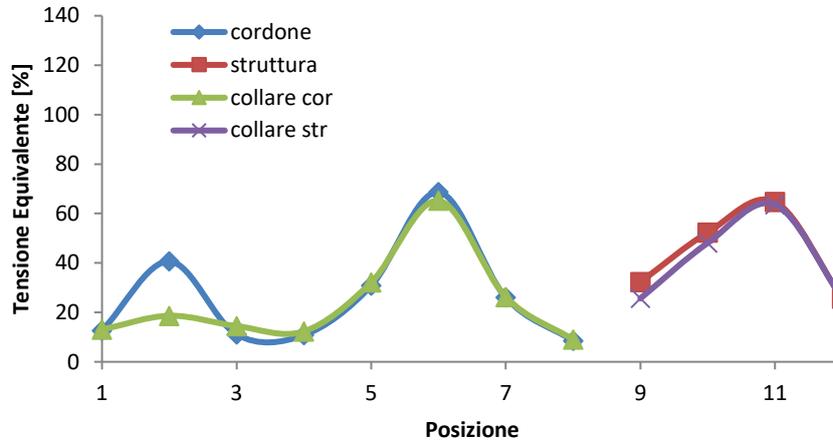


Figura A.4 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

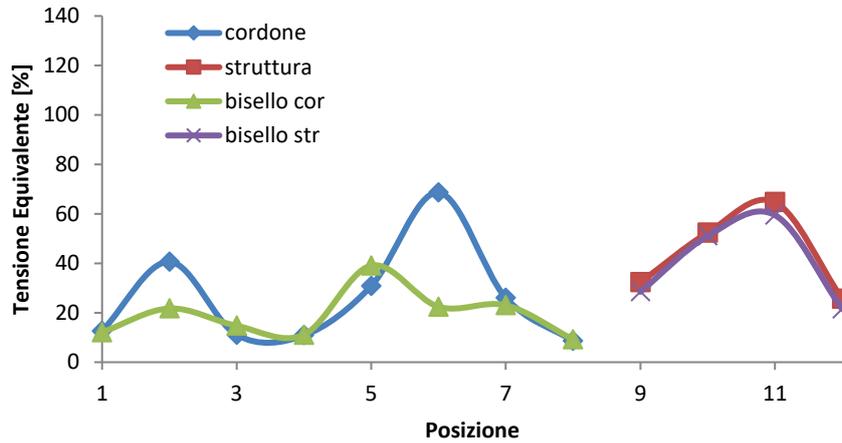


Figura A.5 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

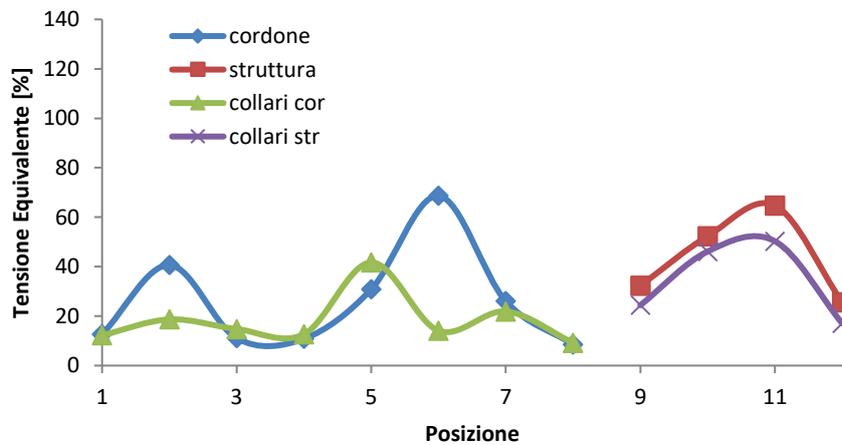


Figura A.6 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

A.2. Braccio a tre sezioni con il carico sullo spigolo X positivo della pala

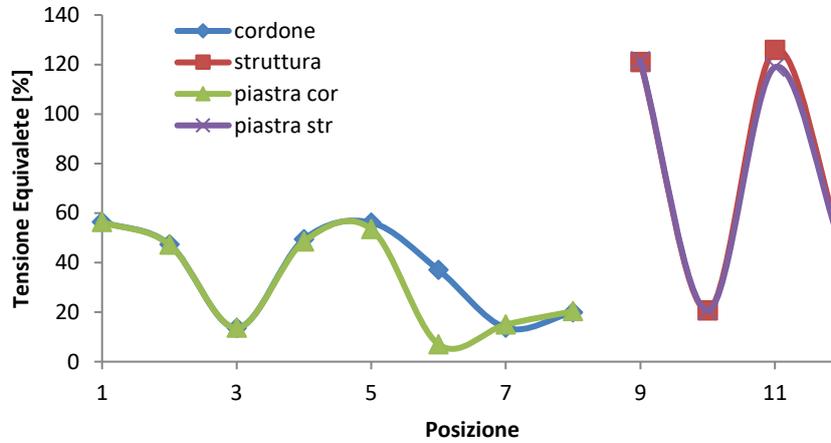


Figura A.7 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

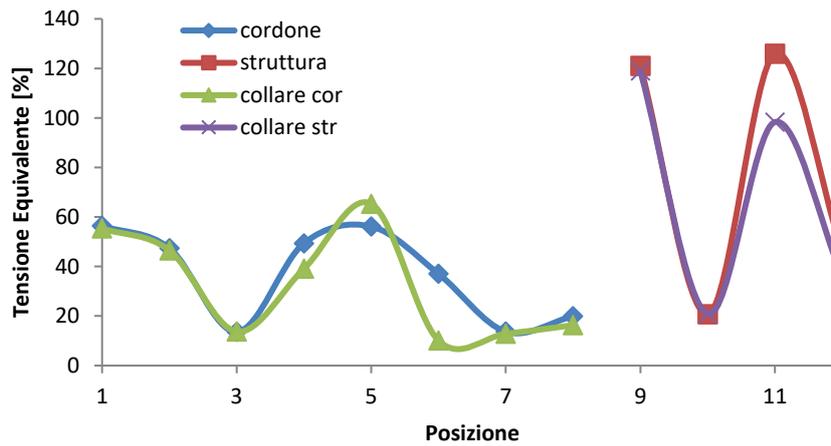


Figura A.8 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

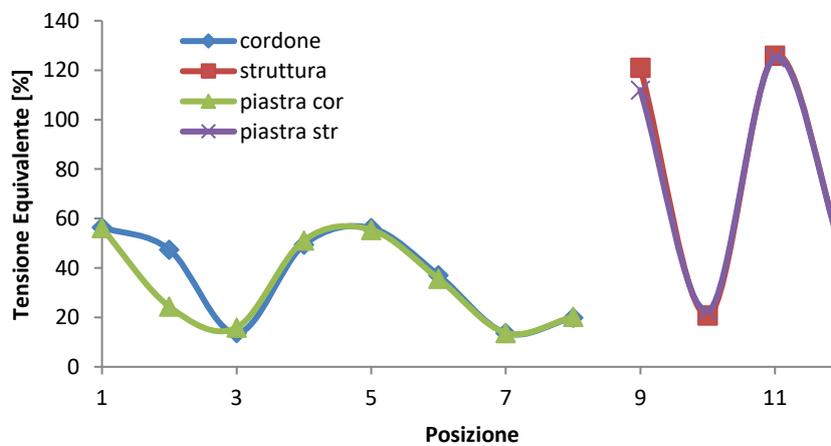


Figura A.9 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

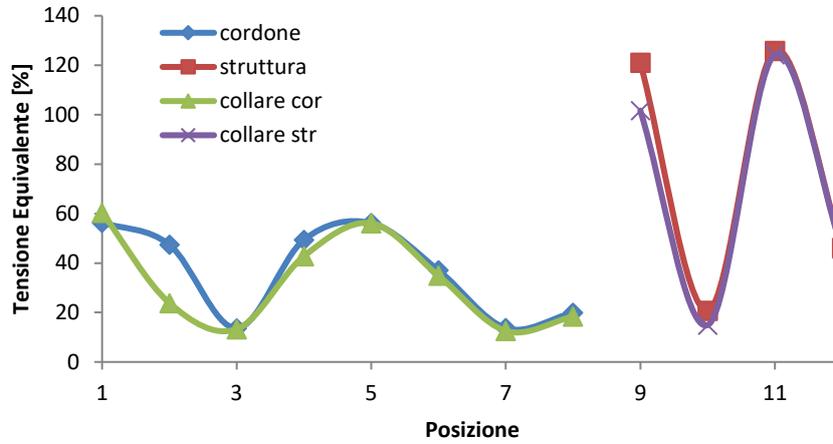


Figura A.10 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

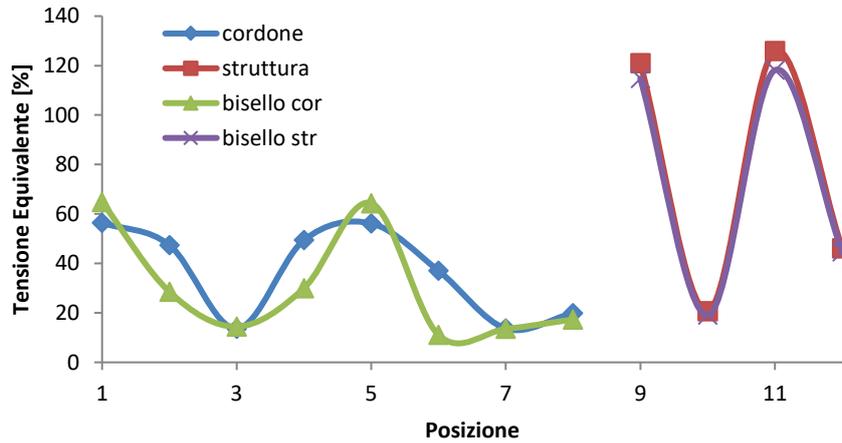


Figura A.11 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

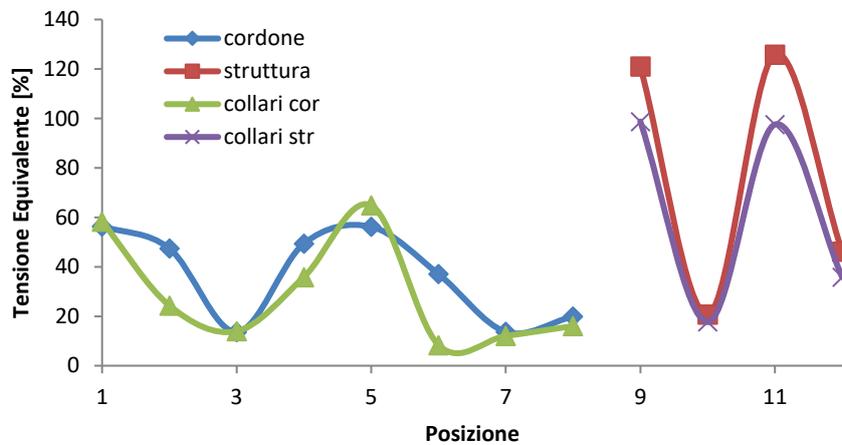


Figura A.12 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

A.3. Braccio a due sezioni con il carico centrato sulla pala

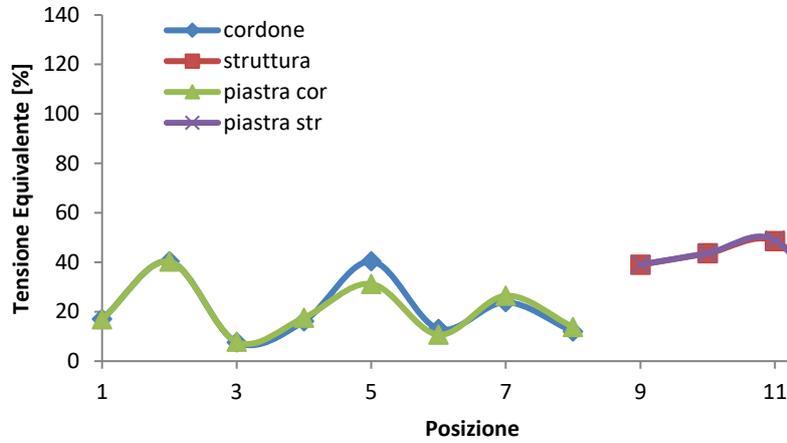


Figura A.13 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

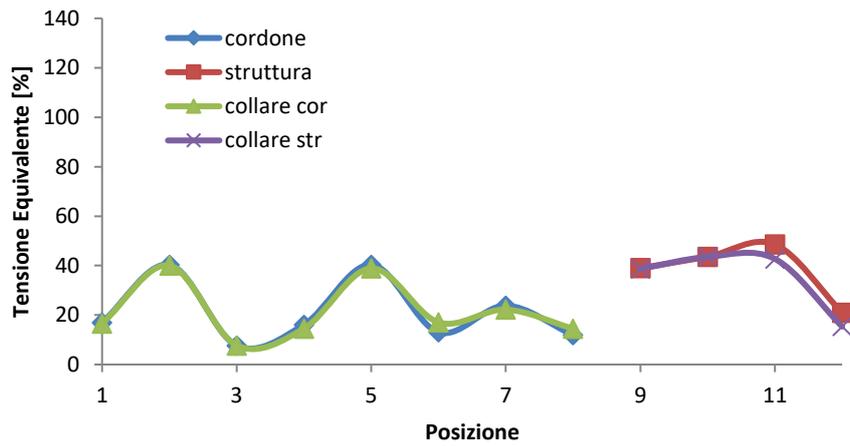


Figura A.14 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

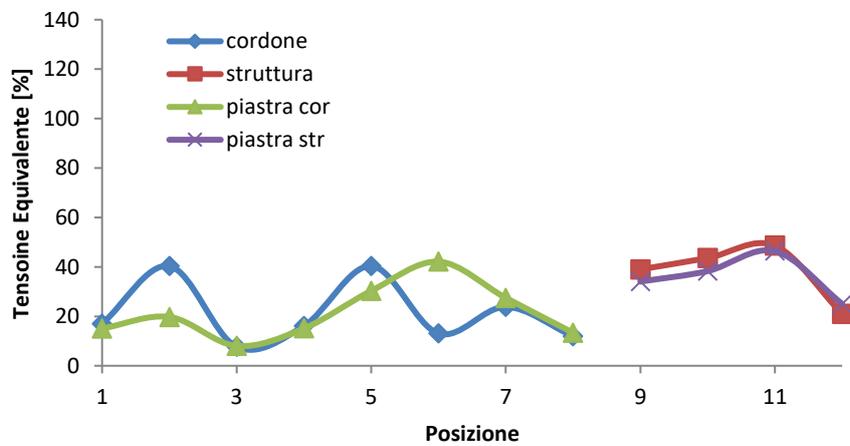


Figura A.15 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

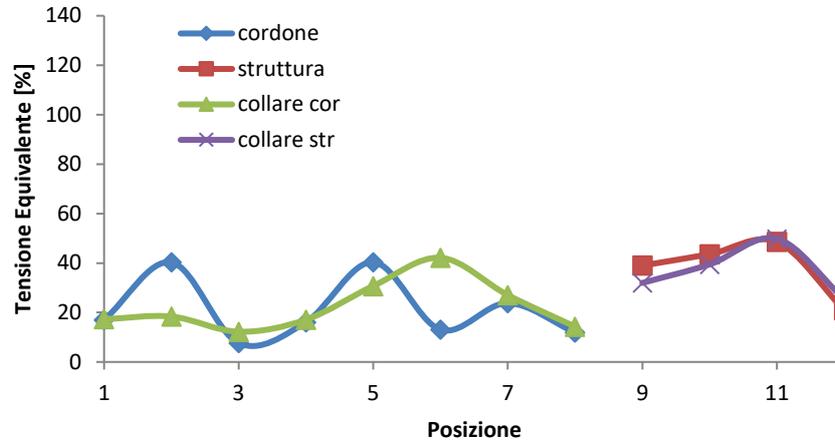


Figura A.16 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

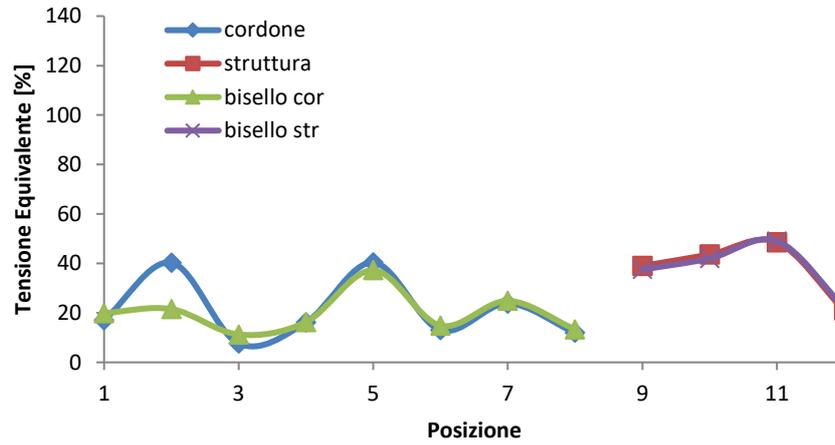


Figura A.17 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

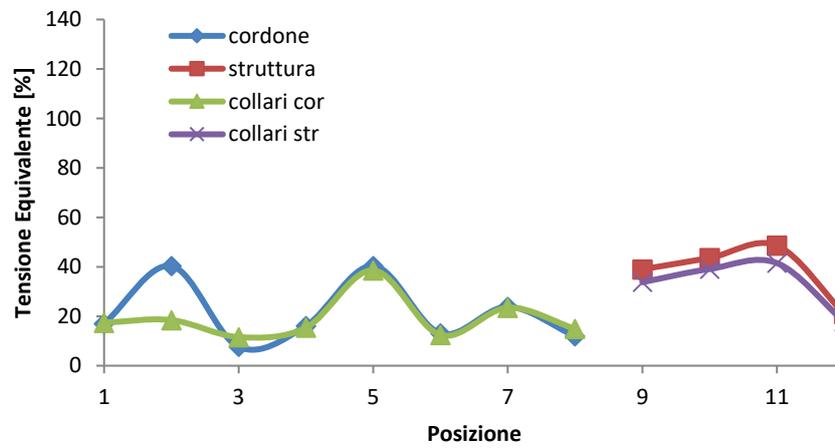


Figura A.18 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

A.4. Braccio a due sezioni con il carico sullo spigolo X positivo della pala

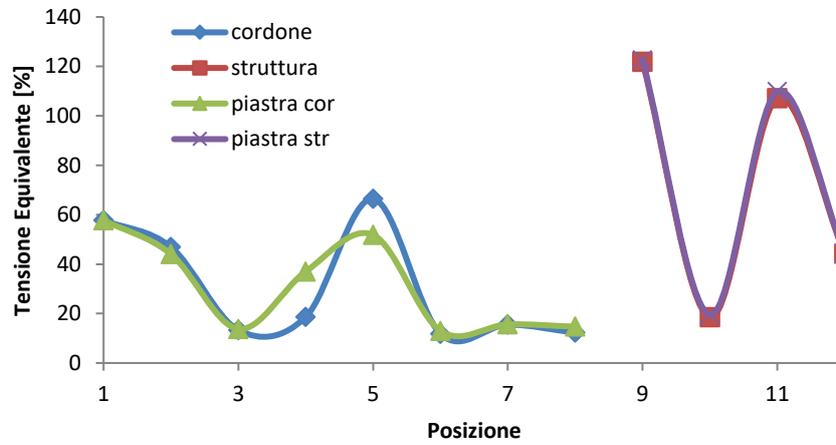


Figura A.19 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

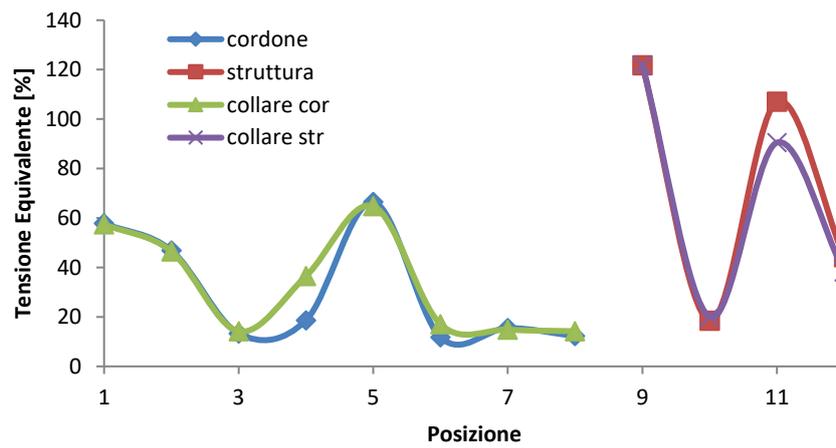


Figura A.20 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

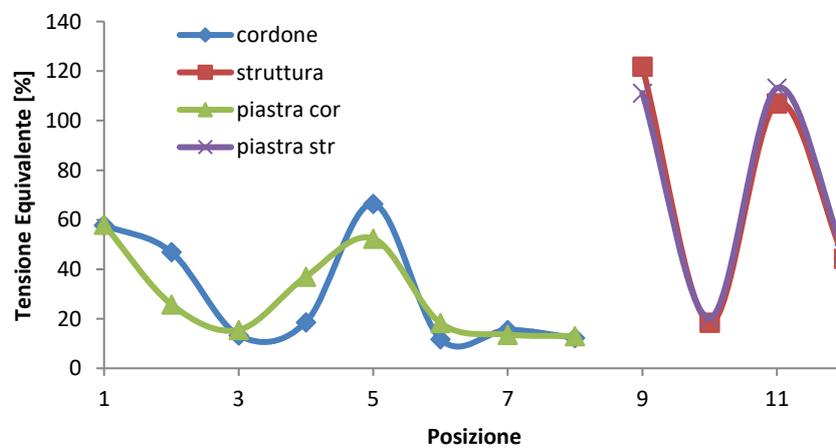


Figura A.21 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

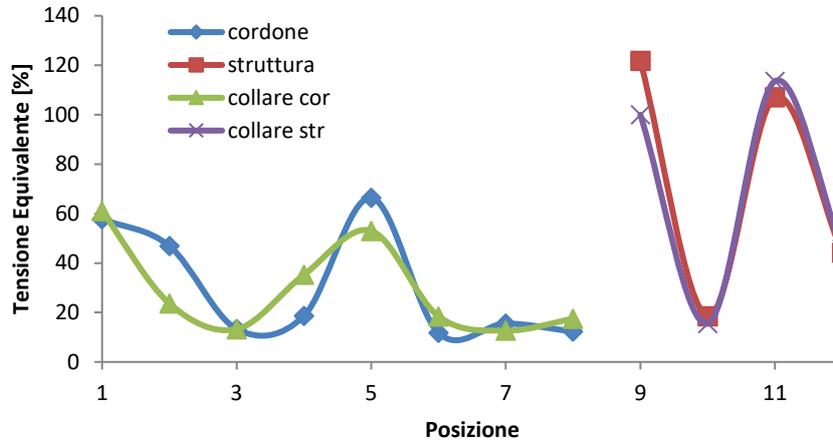


Figura A.22 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

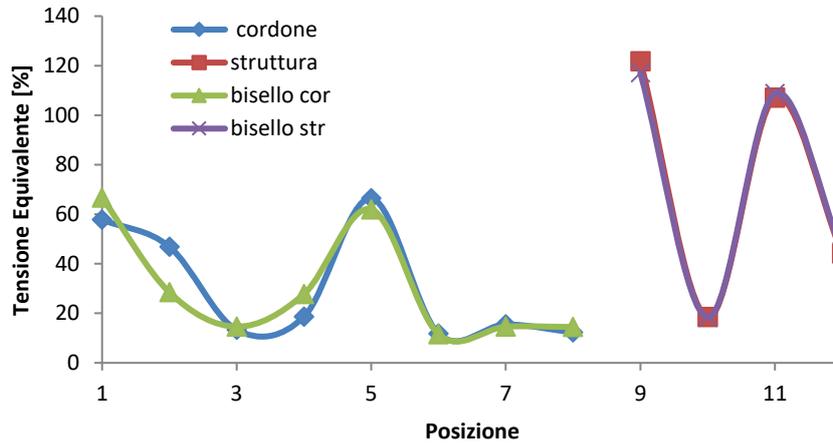


Figura A.23 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

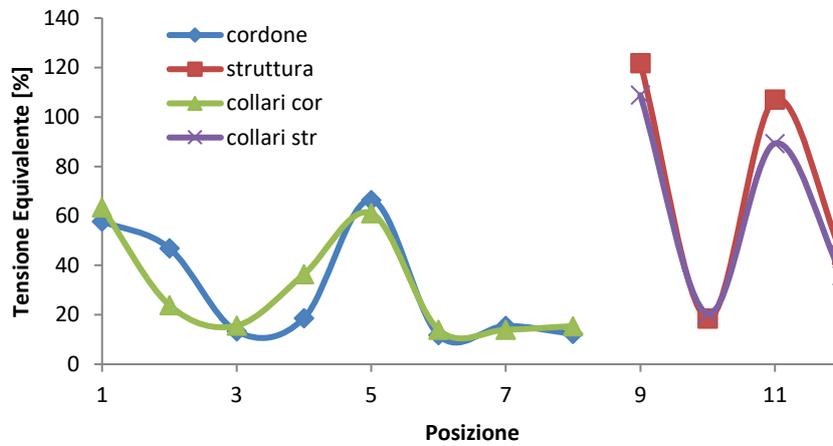


Figura A.24 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

Appendice B

In questa appendice vengono riportati i grafici degli andamenti delle tensioni equivalenti misurate nei punti descritti dalla figura 4.34 nelle posizioni illustrate dalla figura 4.33. Sono messi sul grafico:

- In blu chiaro le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo con il carico centrato sulla pala
- In rosso chiaro le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo con il carico sullo spigolo a X positivo della pala
- In blu intenso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato con il carico centrato sulla pala
- In rosso intenso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato con il carico centrato sullo spigolo a X positivo della pala

B.1. Braccio a due sezioni punto A

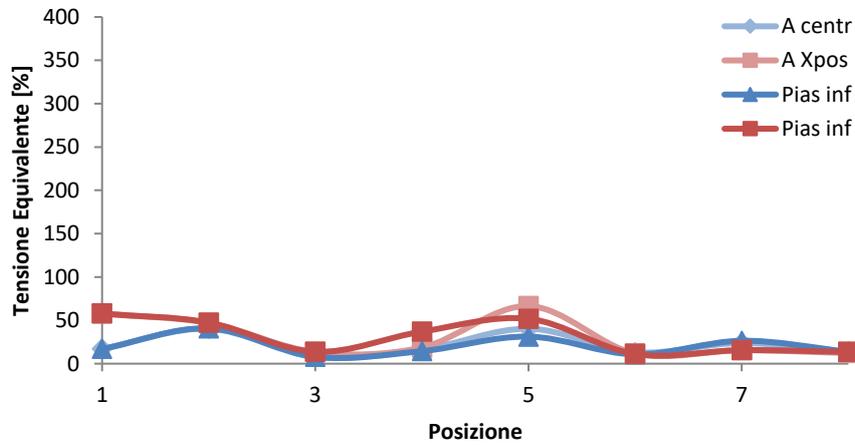


Figura B.1 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

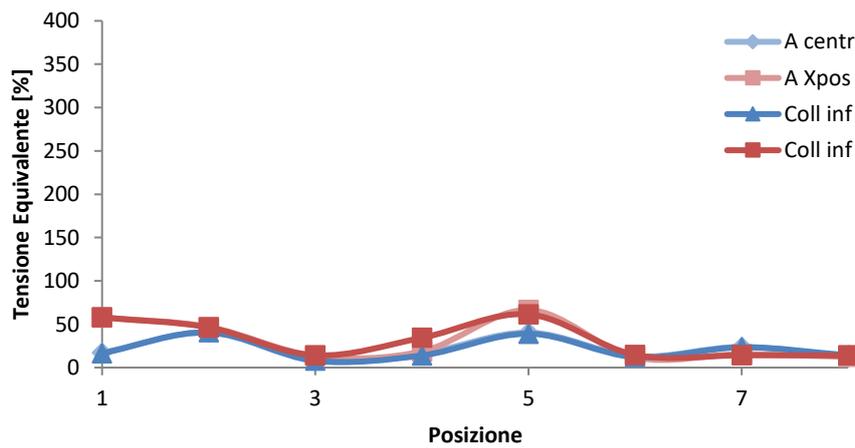


Figura B.2 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

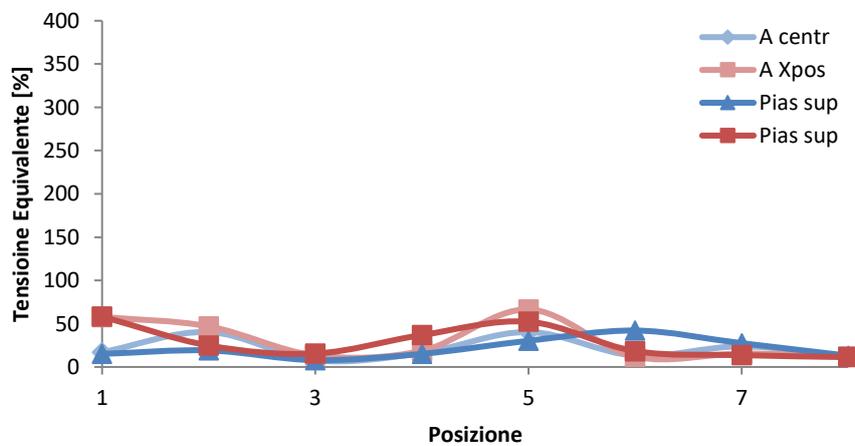


Figura B.3 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

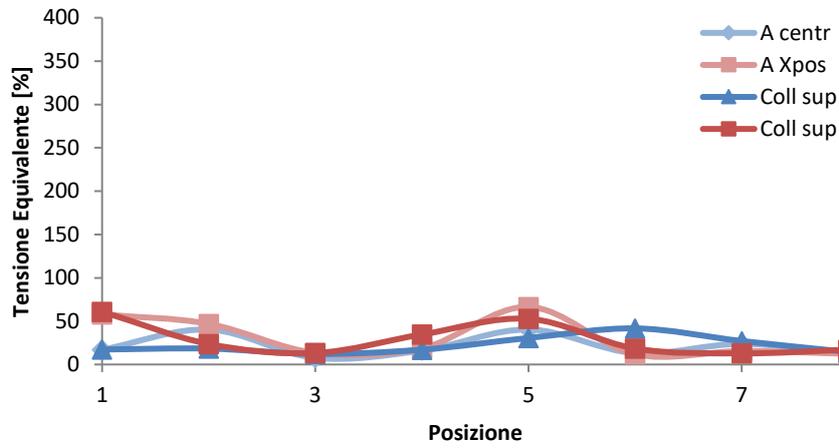


Figura B.4 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

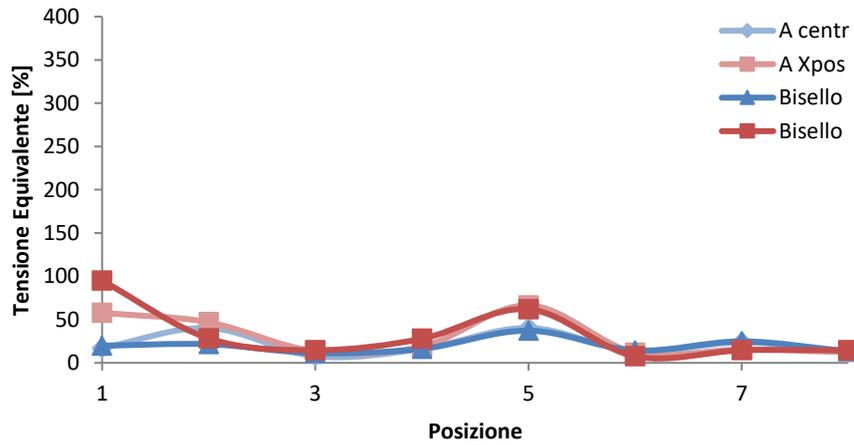


Figura B.5 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

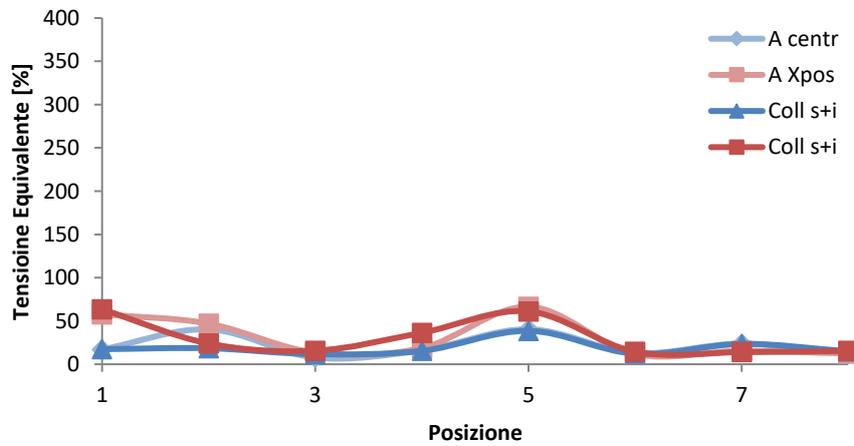


Figura B.6 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.2. Braccio a due sezioni punto B

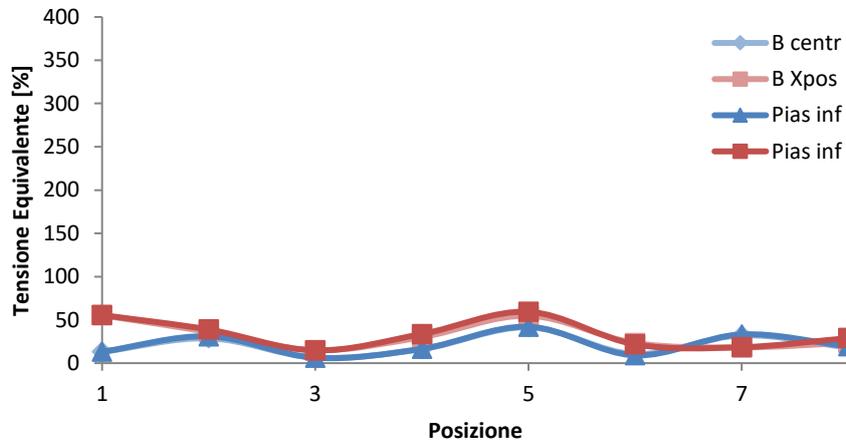


Figura B.7 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

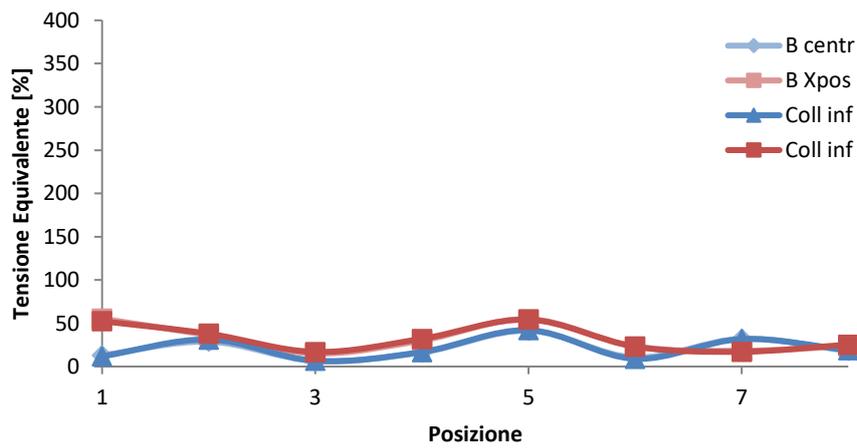


Figura B.8 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

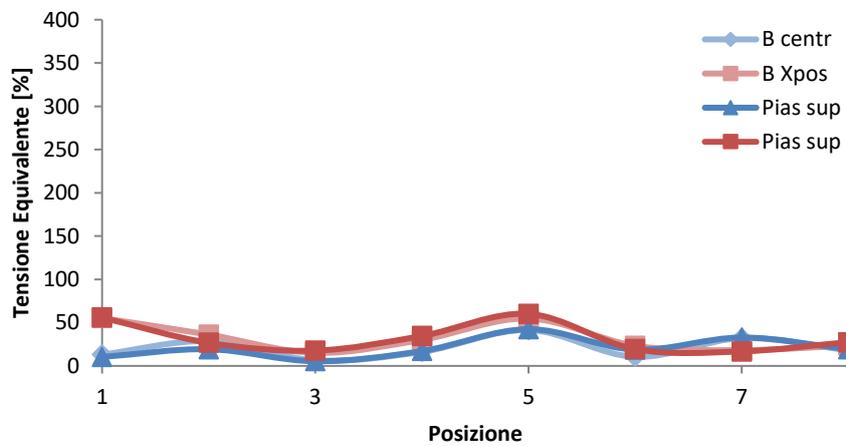


Figura B.9 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

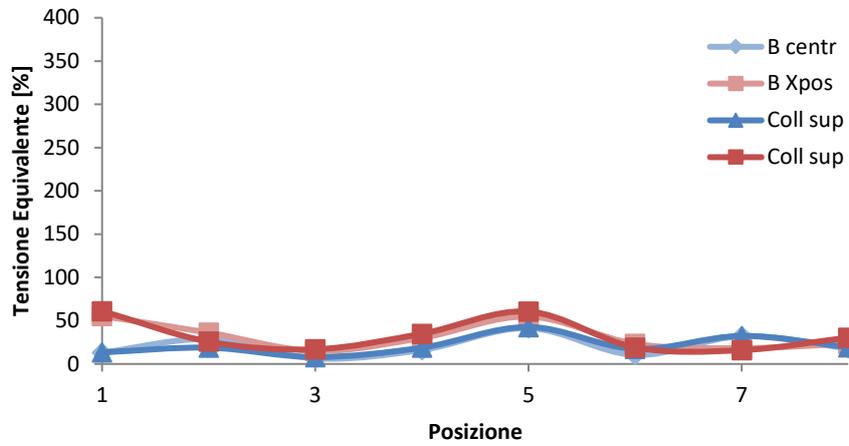


Figura B.10 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

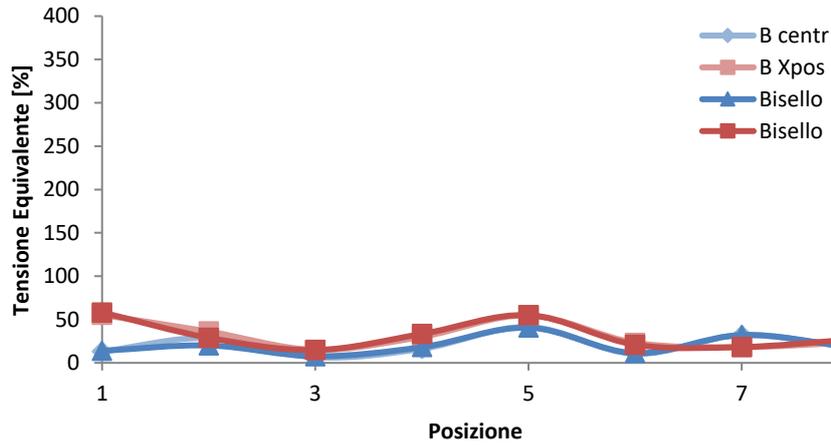


Figura B.11 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

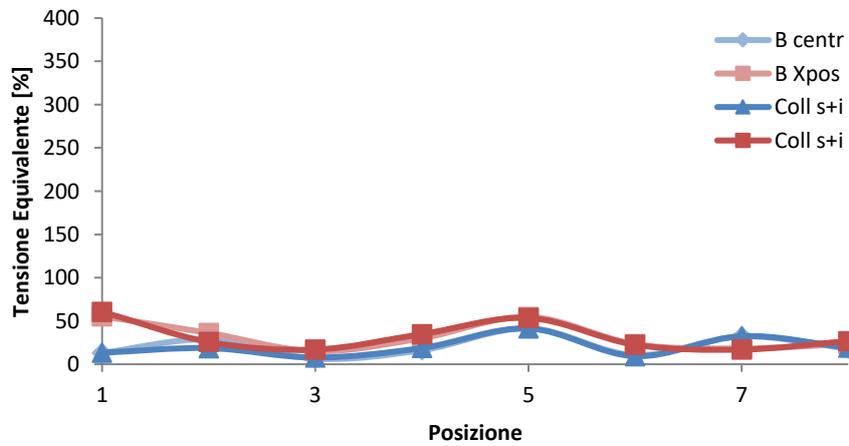


Figura B.12 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.3. Braccio a due sezioni punto C

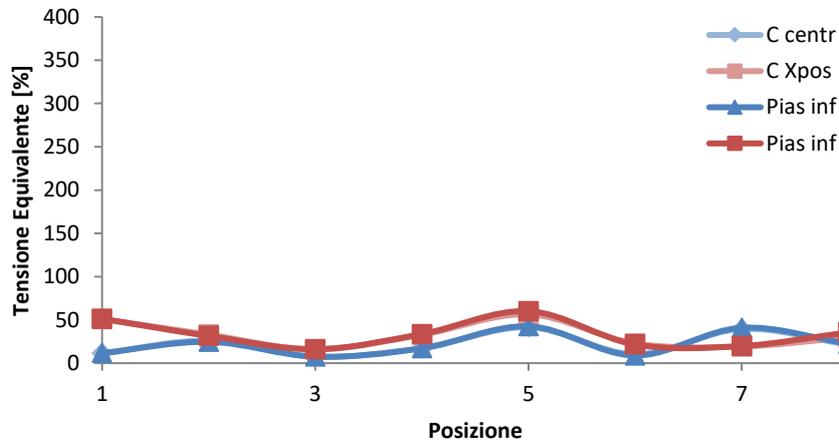


Figura B.13 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

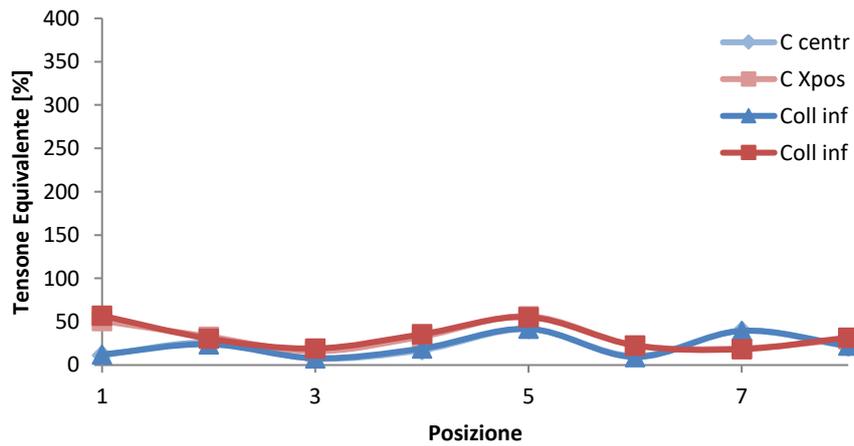


Figura B.14 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

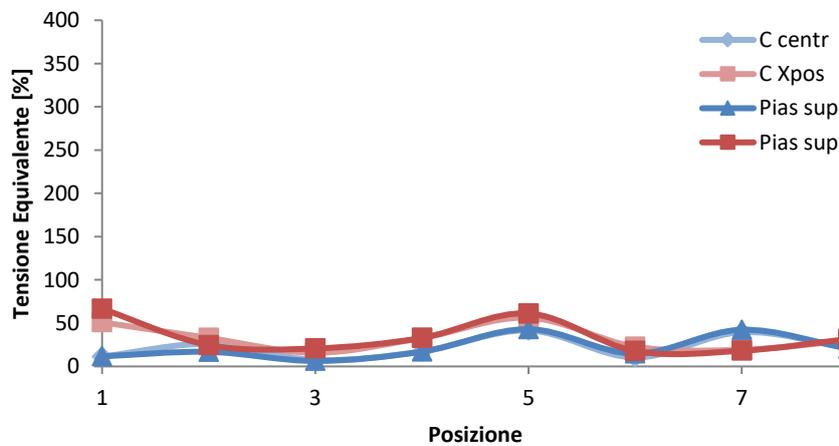


Figura B.15 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

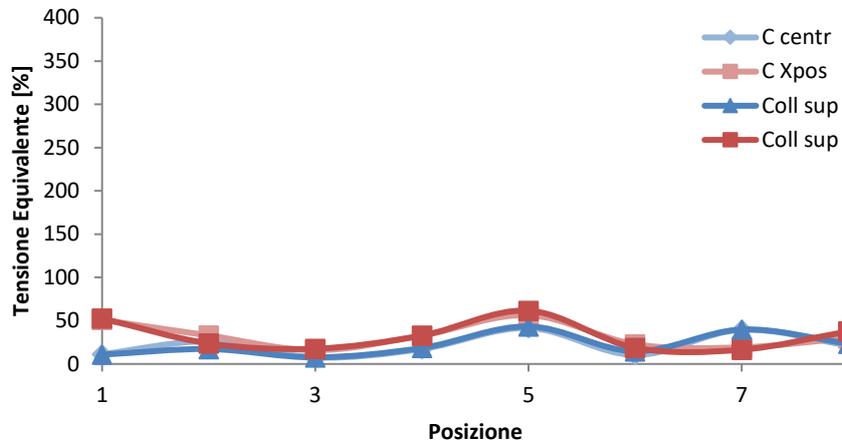


Figura B.16 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

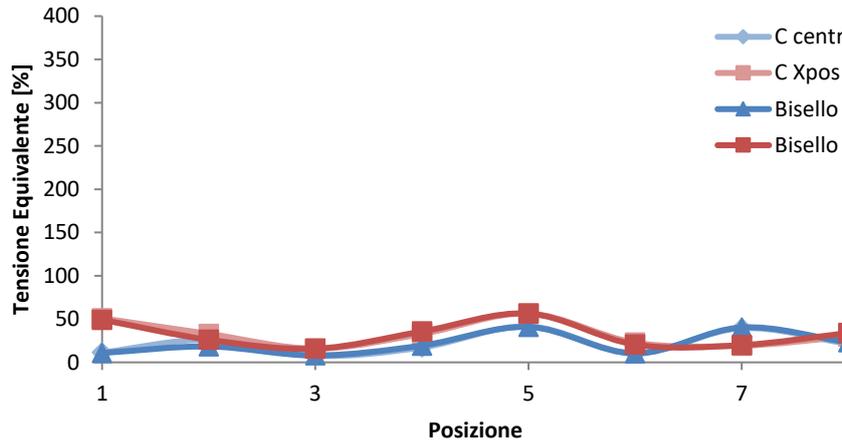


Figura B.17 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

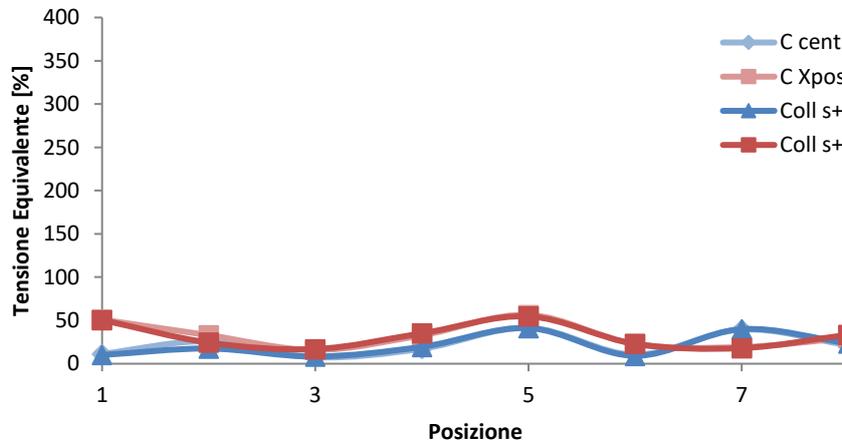


Figura B.18 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.4. Braccio a due sezioni punto D

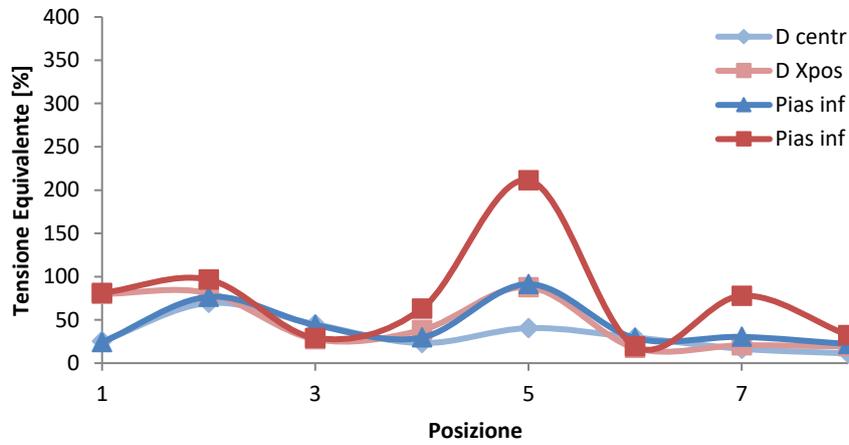


Figura B.19 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

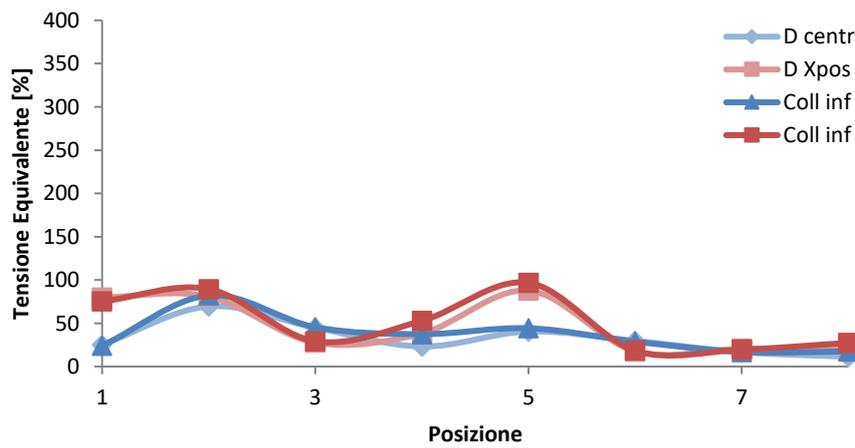


Figura B.20 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

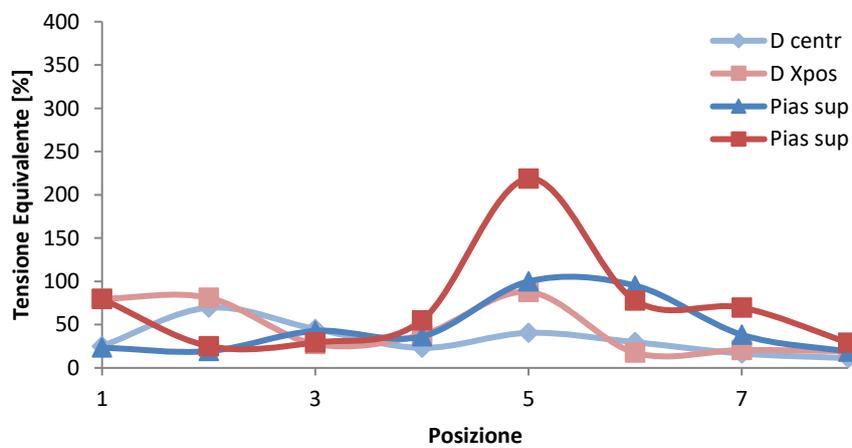


Figura B.21 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

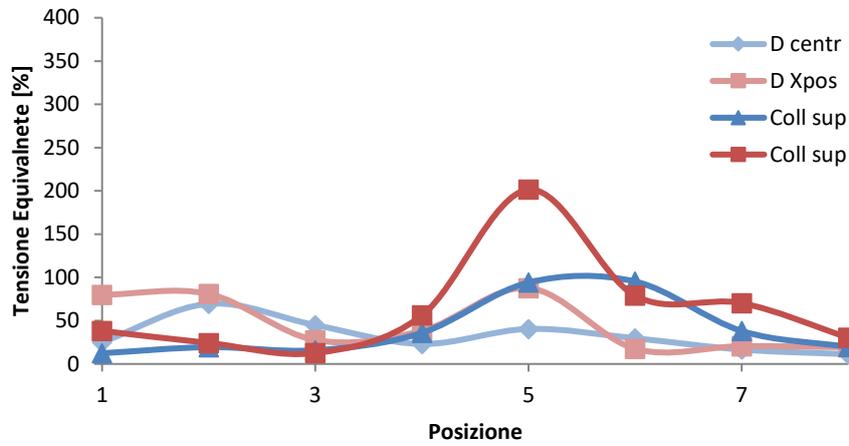


Figura B.22 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

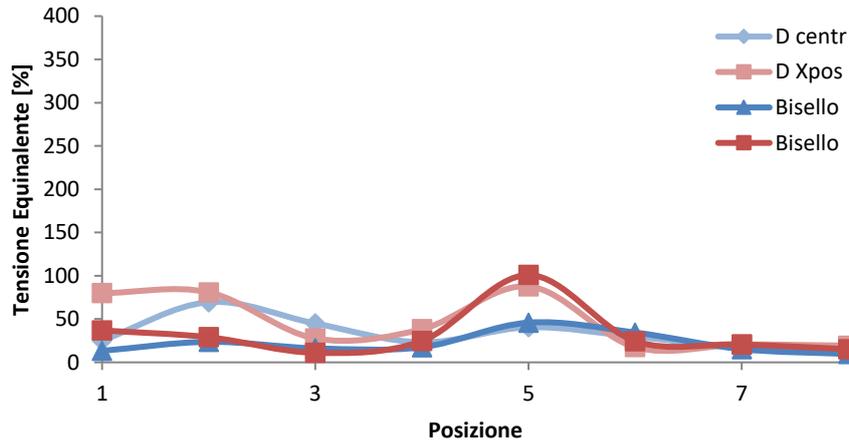


Figura B.23 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

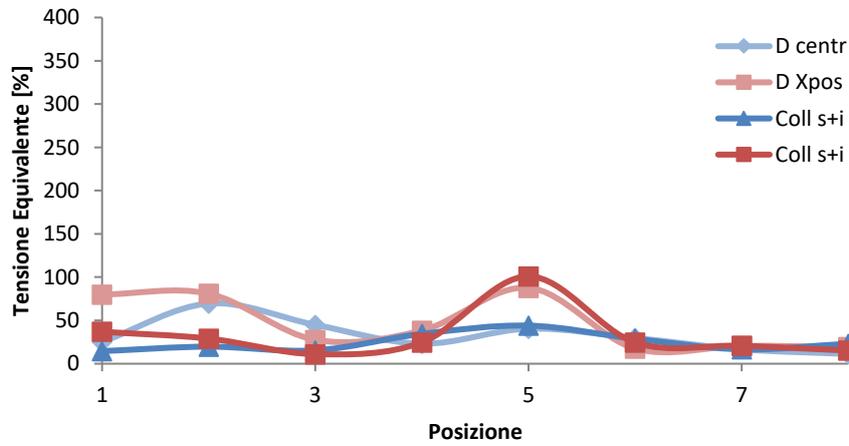


Figura B.24 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.5. Braccio a due sezioni punto E

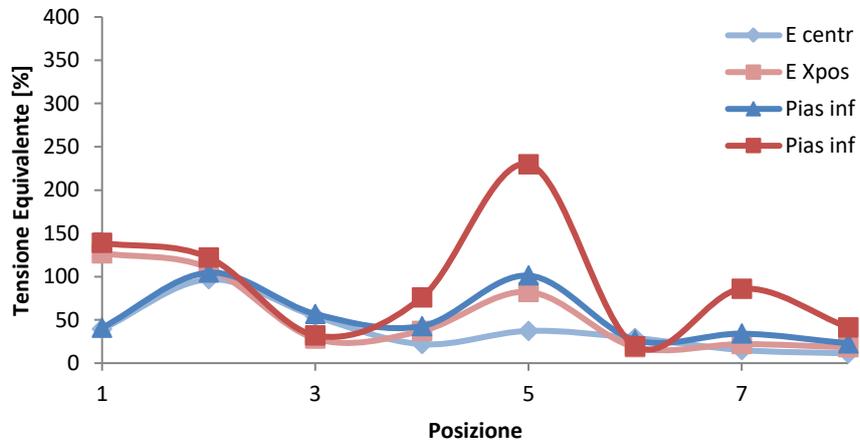


Figura B.25 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

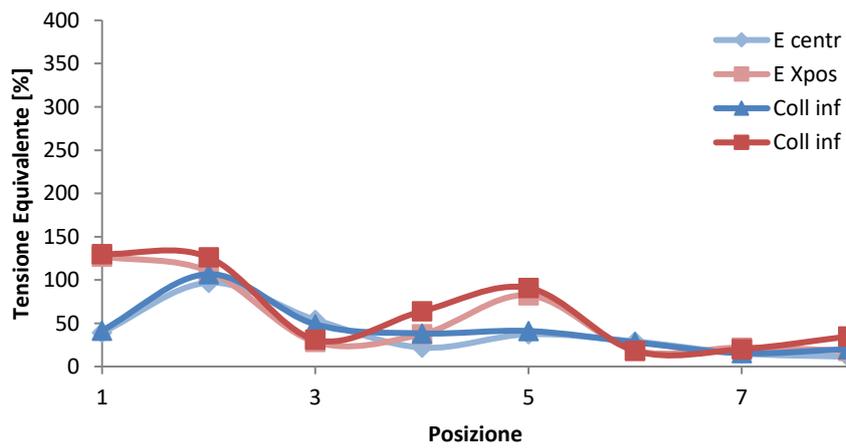


Figura B.26 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

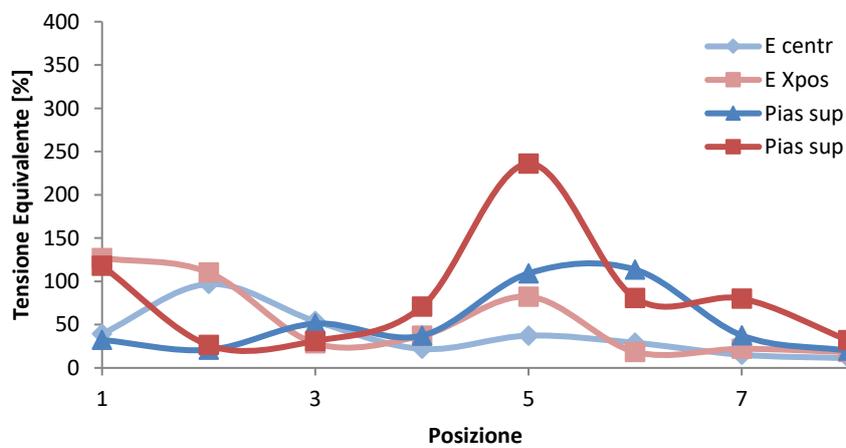


Figura B.27 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

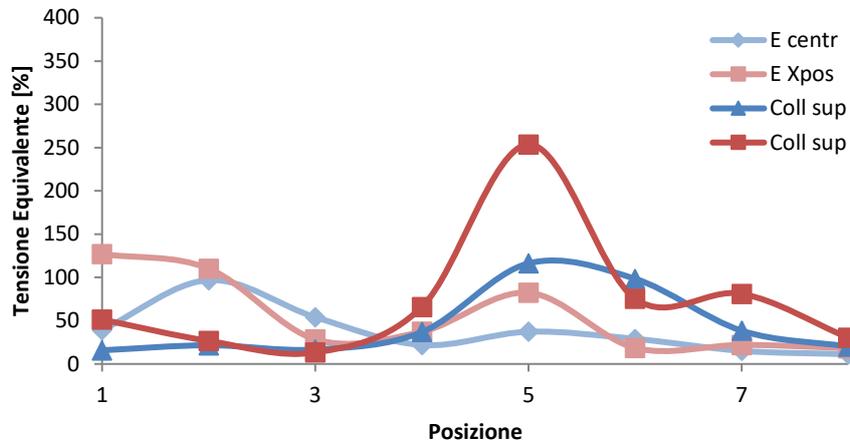


Figura B.28 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

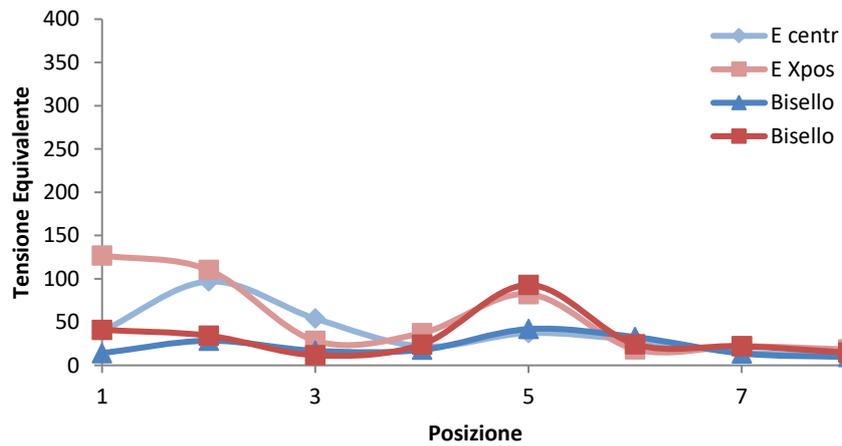


Figura B.29 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

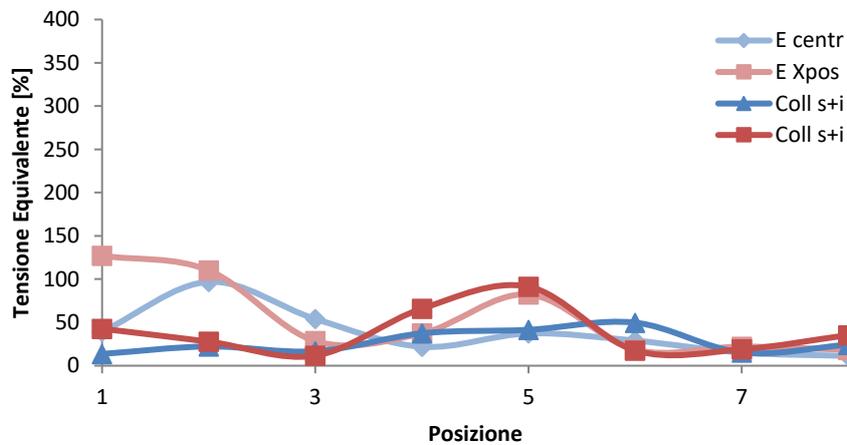


Figura B.30 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.5. Braccio a due sezioni punto F

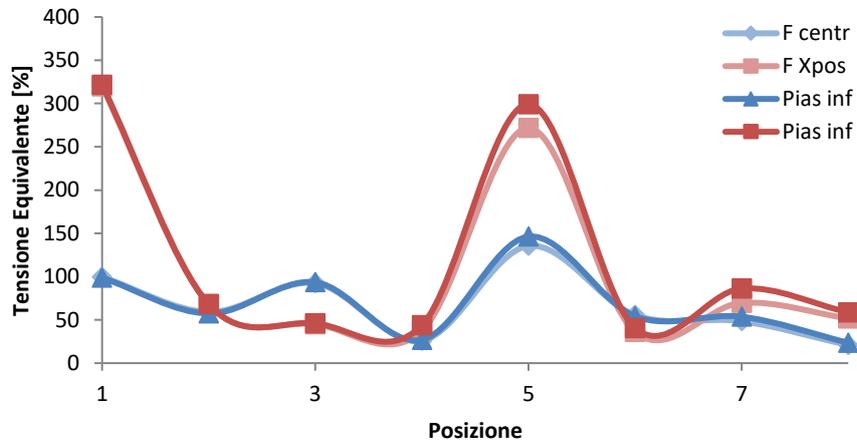


Figura B.31 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

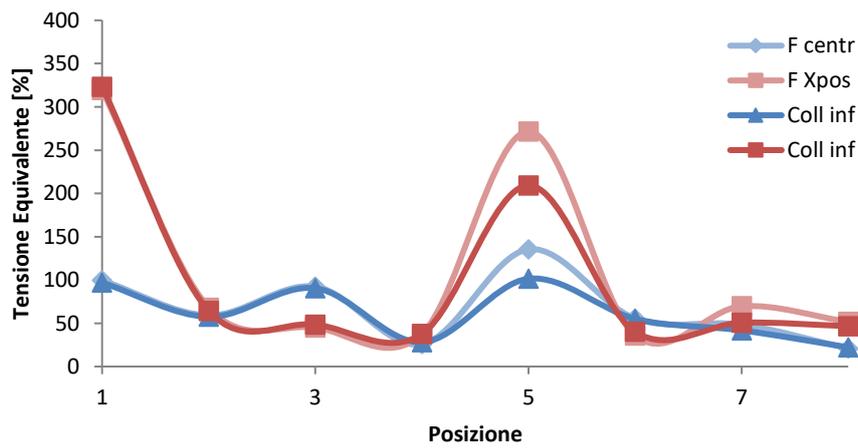


Figura B.32 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

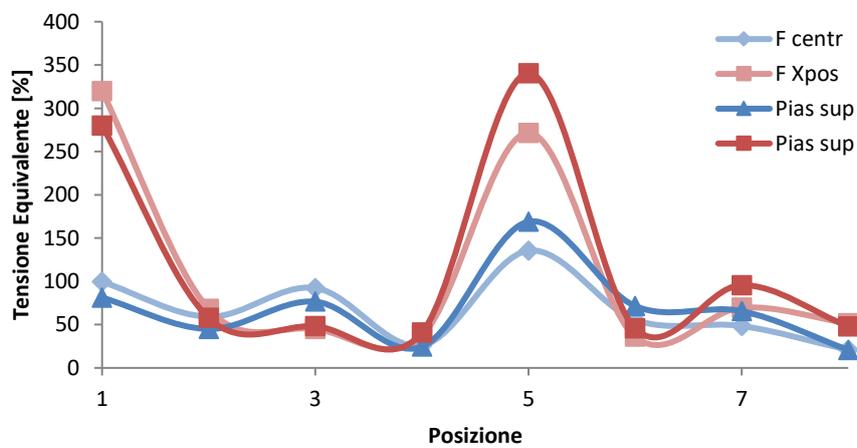


Figura B.33 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

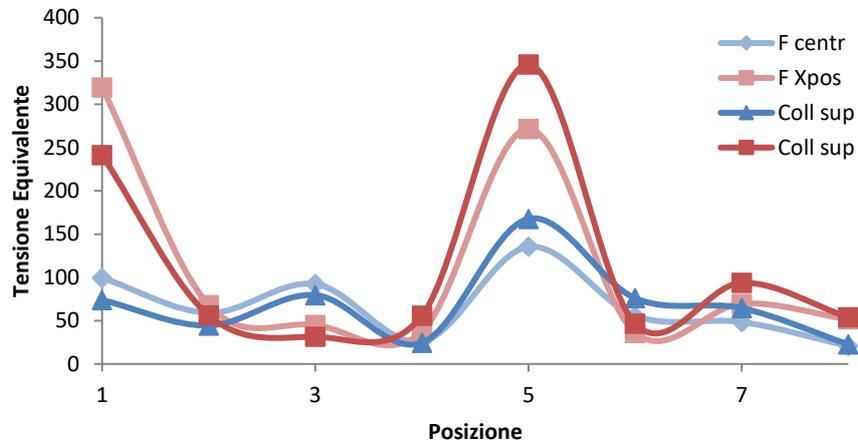


Figura B.34 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

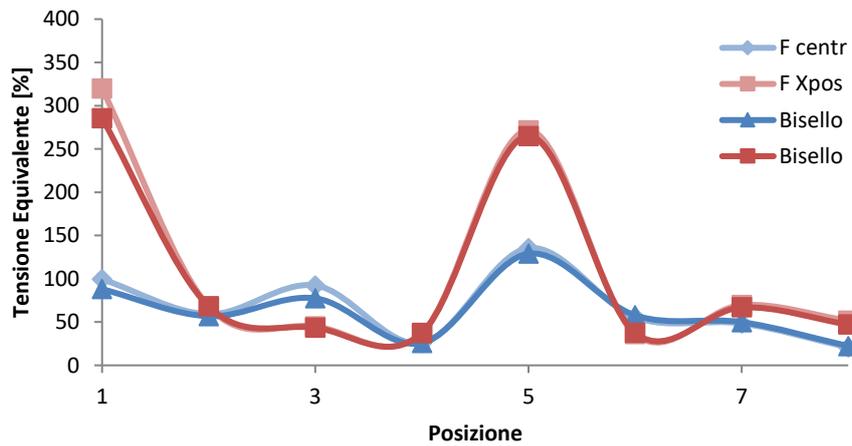


Figura B.35 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

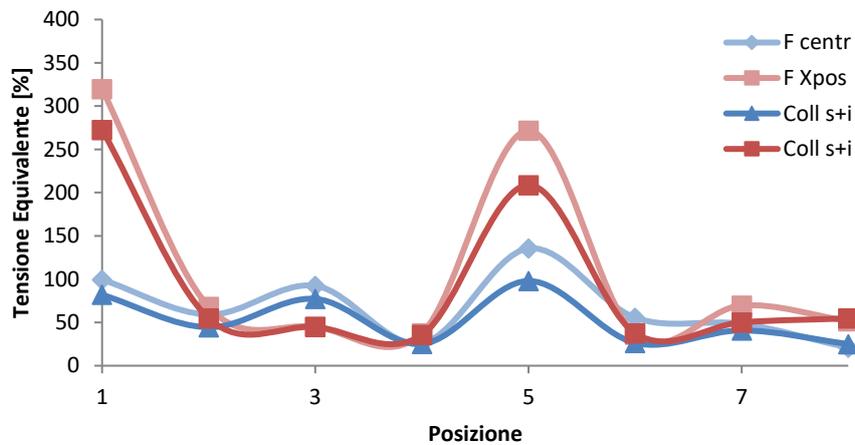


Figura B.36 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.6. Braccio a due sezioni punto G

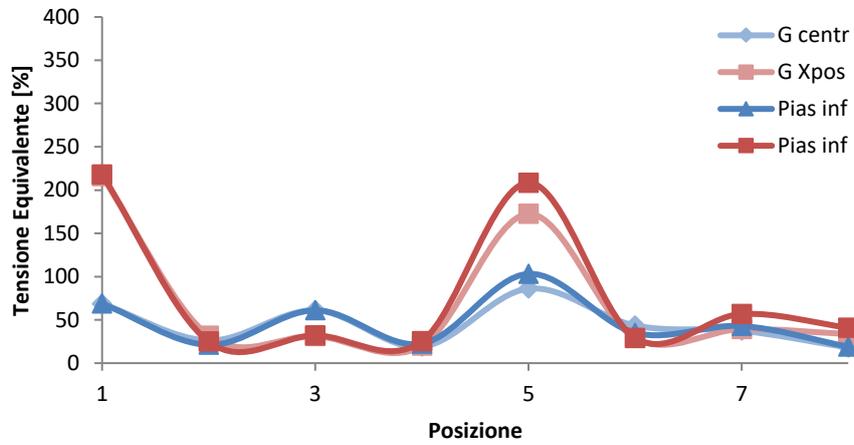


Figura B.37 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

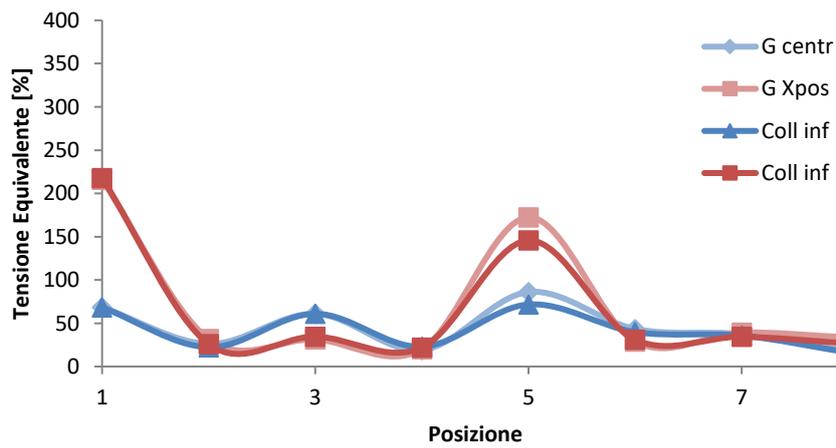


Figura B.38 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

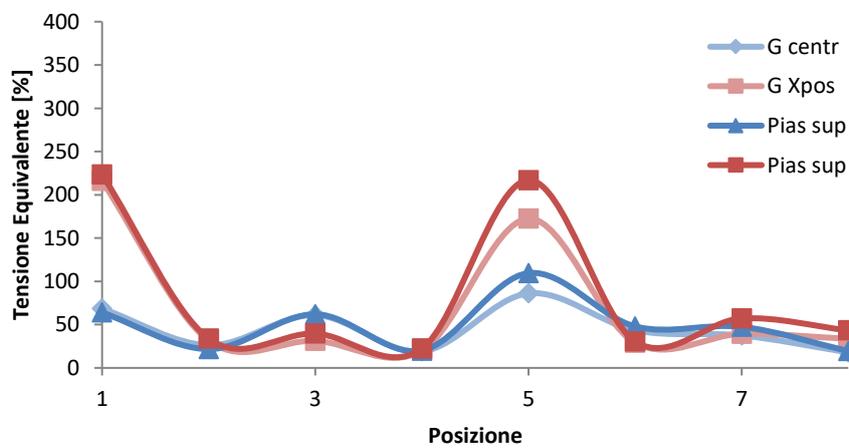


Figura B.39 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

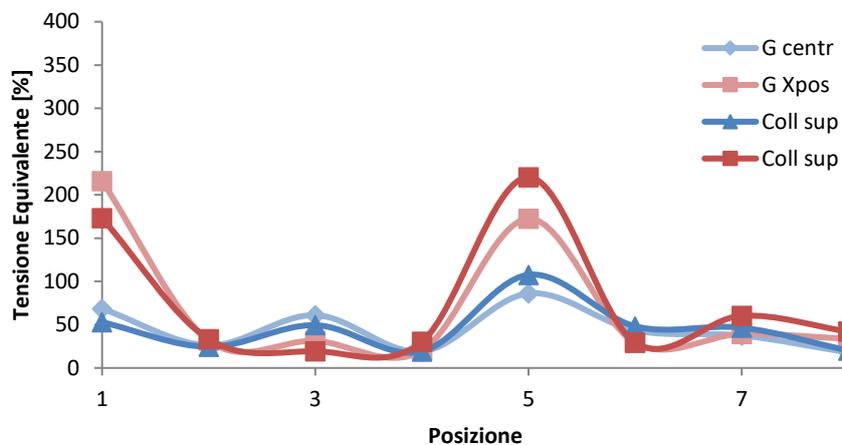


Figura B.40 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

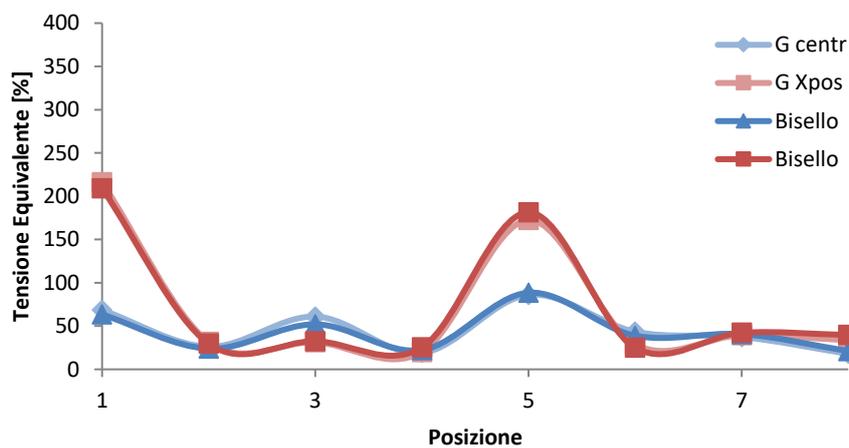


Figura B.41 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

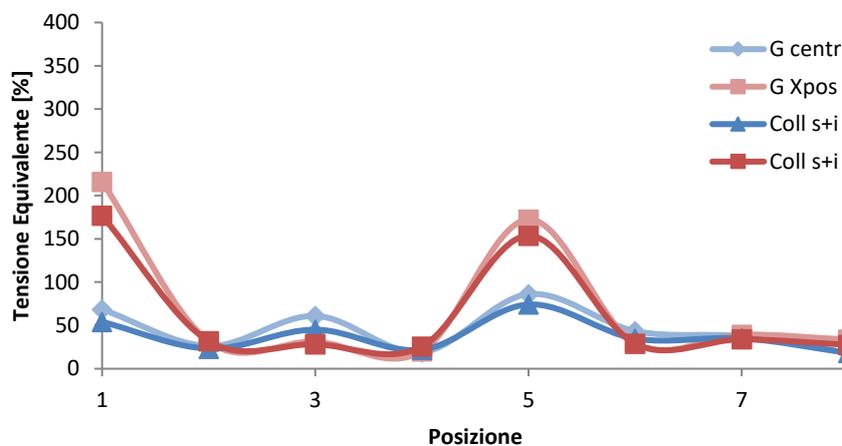


Figura B.42 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.7. Braccio a tre sezioni punto A

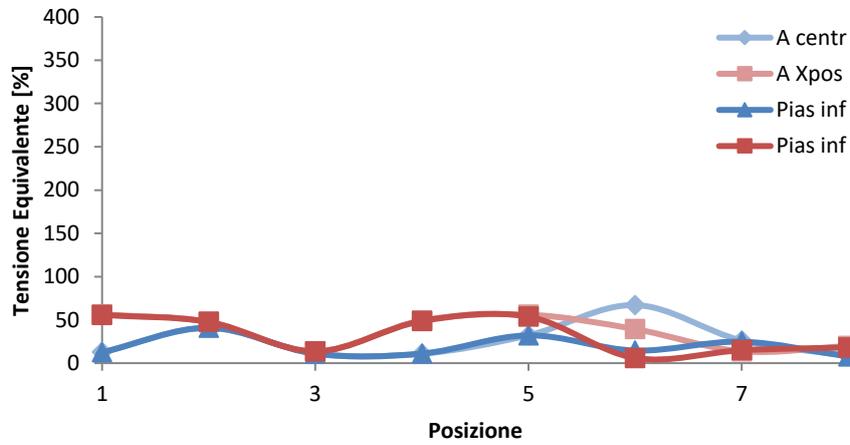


Figura B.43 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

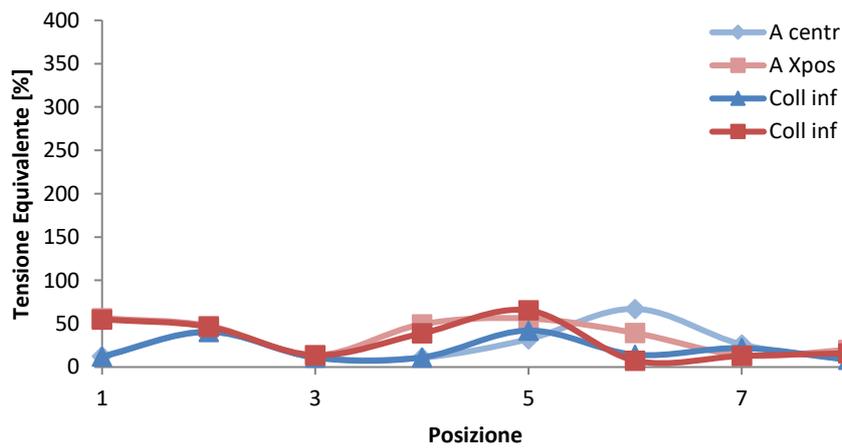


Figura B.44 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

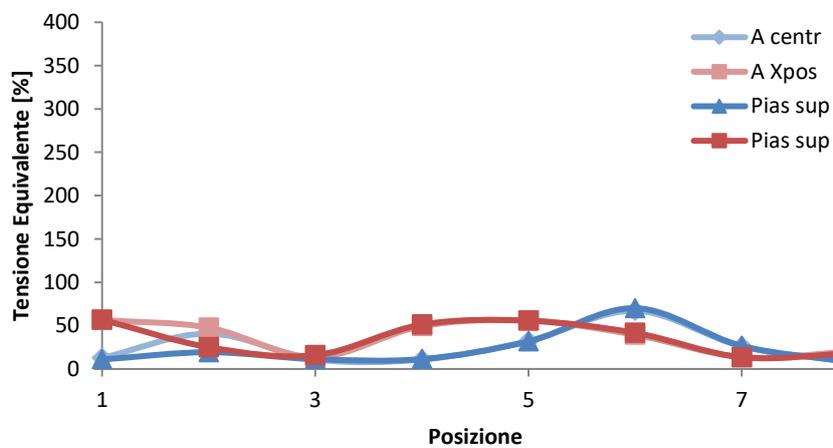


Figura B.45 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

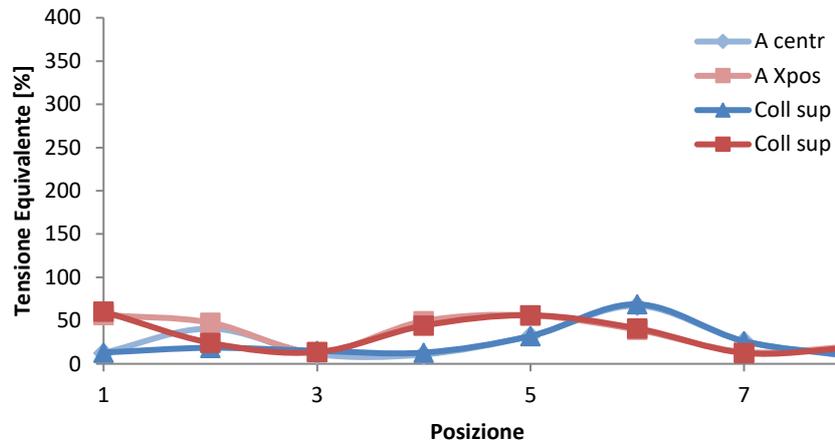


Figura B.46 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

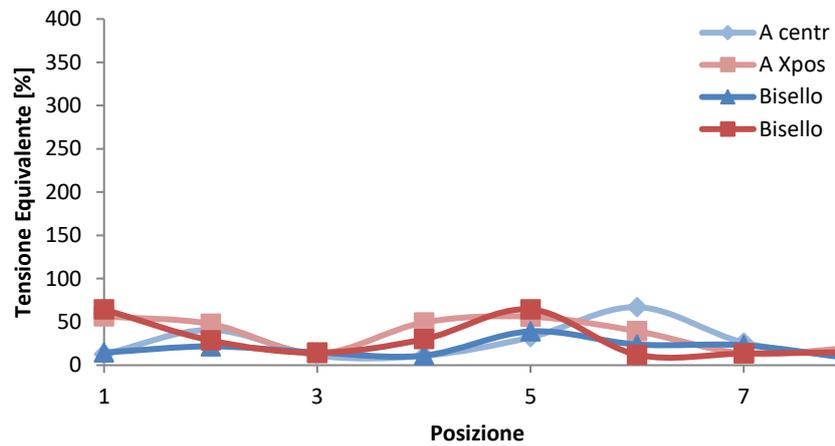


Figura B.47 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

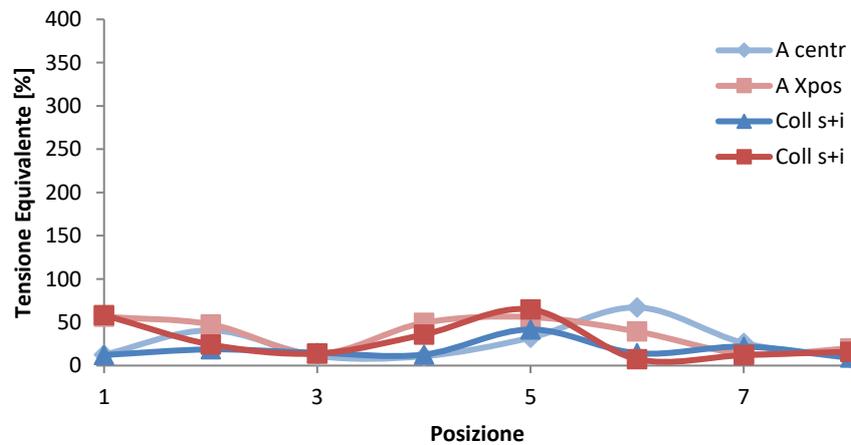


Figura B.48 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.8. Braccio a tre sezioni punto B

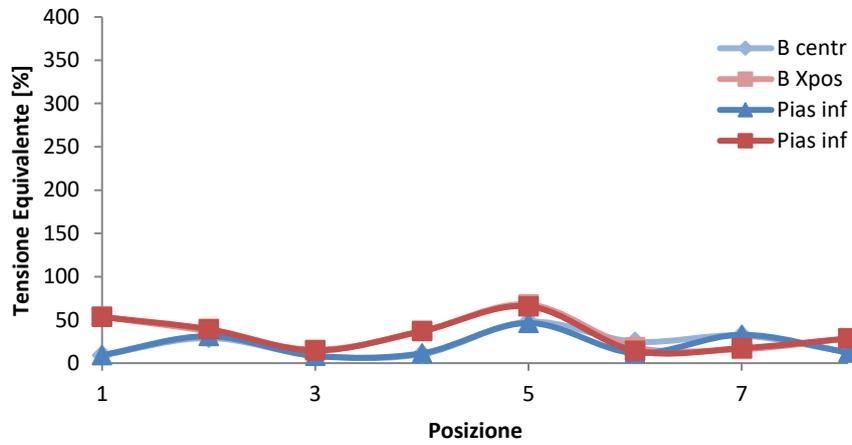


Figura B.49 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

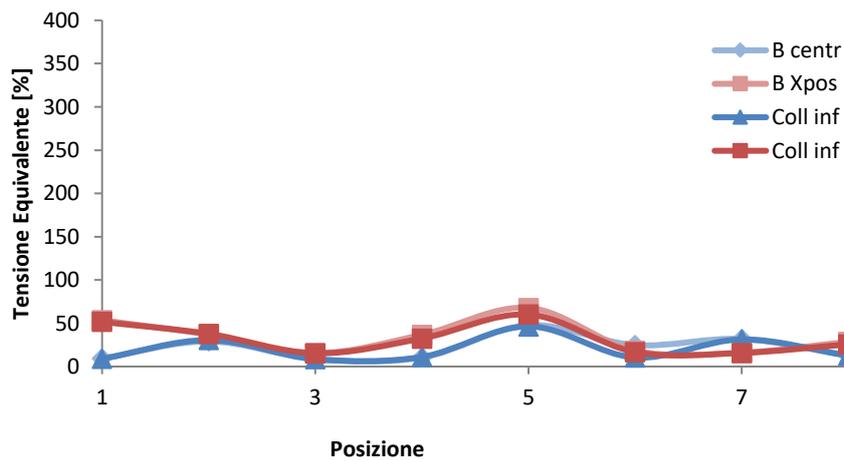


Figura B.50 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

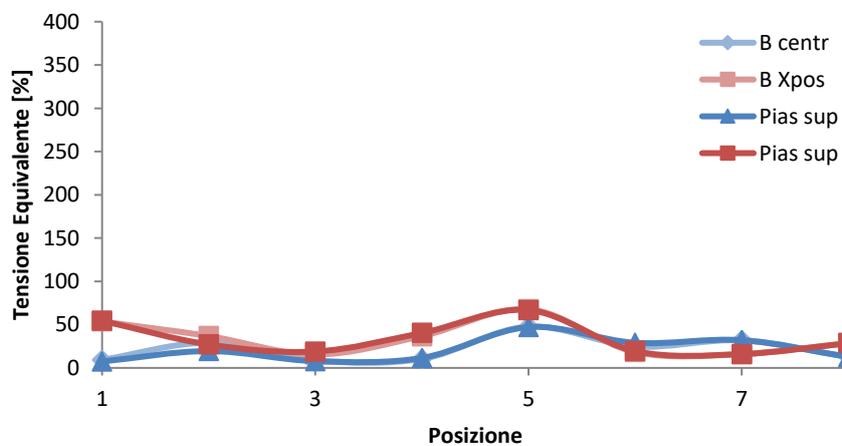


Figura B.51 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

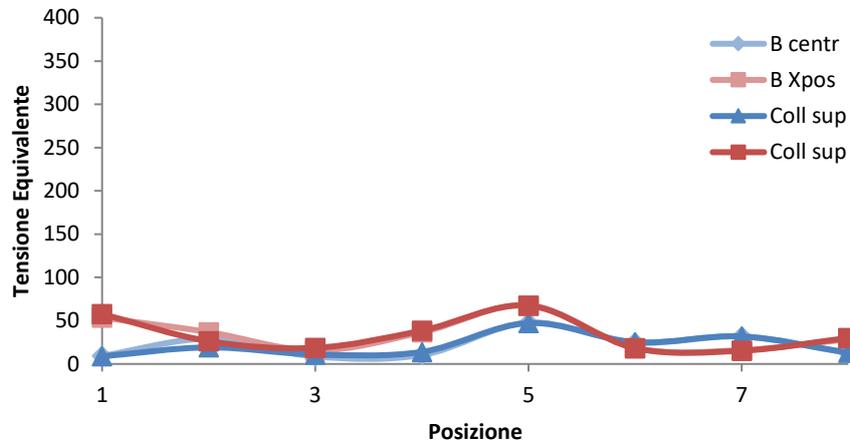


Figura B.52 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

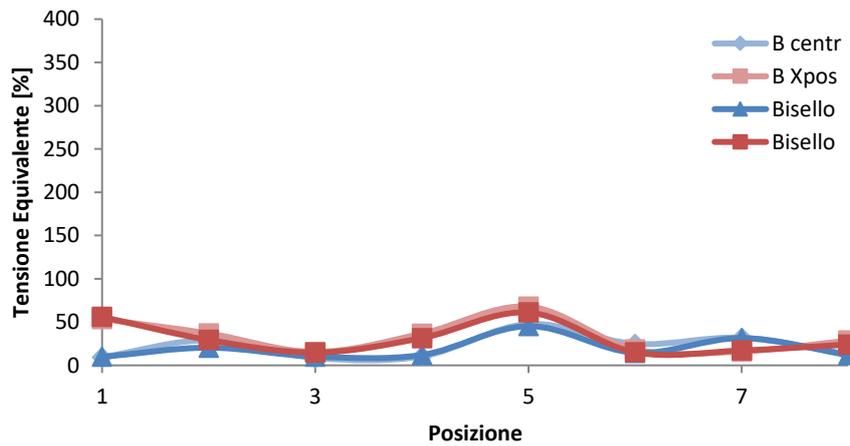


Figura B.53 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

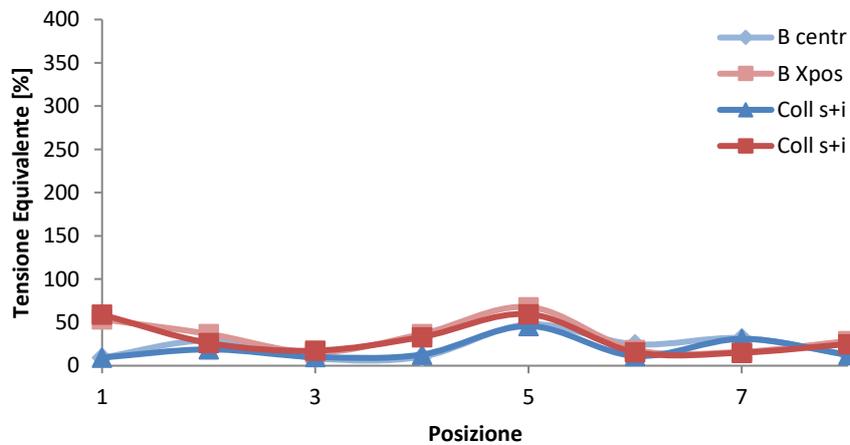


Figura B.54 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.9. Braccio a tre sezioni punto C

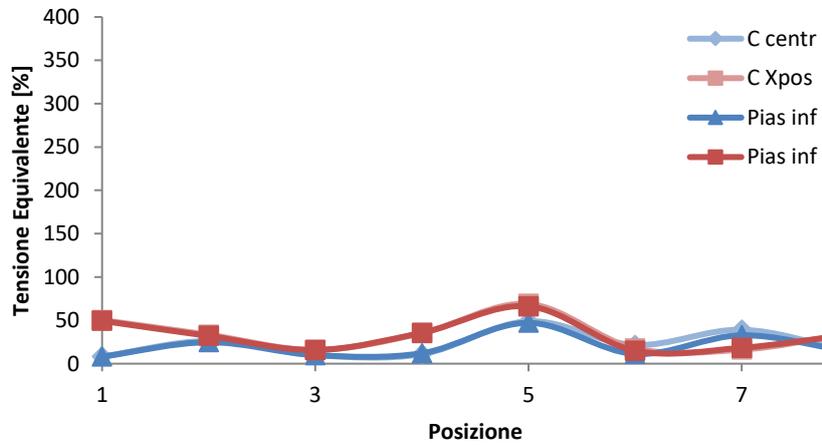


Figura B.55 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

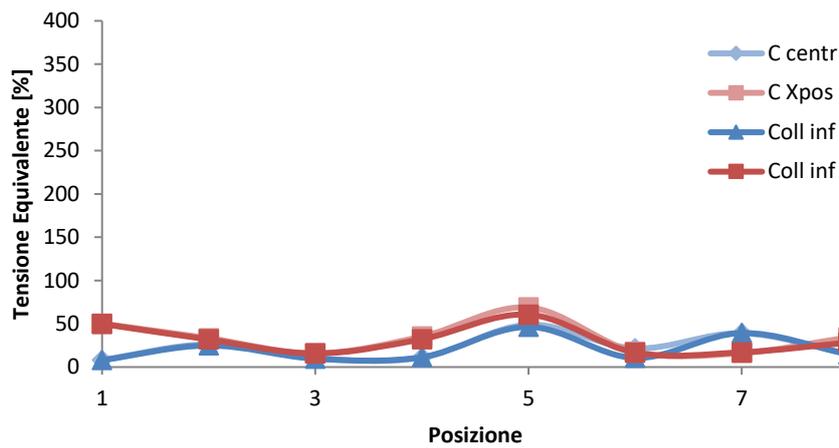


Figura B.56 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

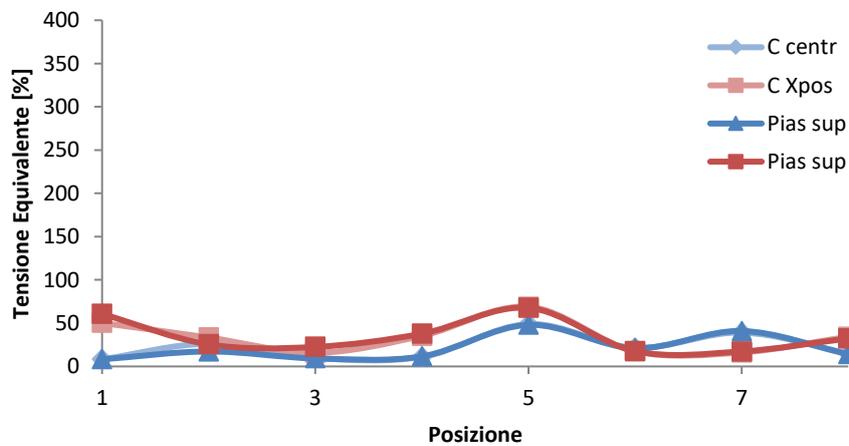


Figura B.57 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

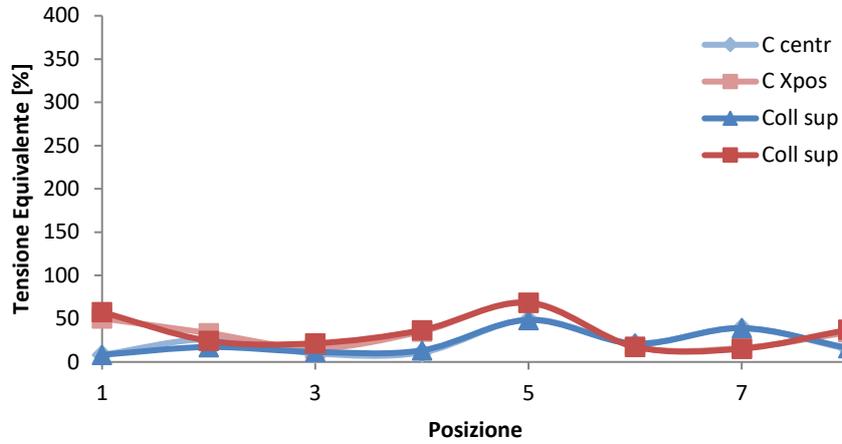


Figura B.58 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

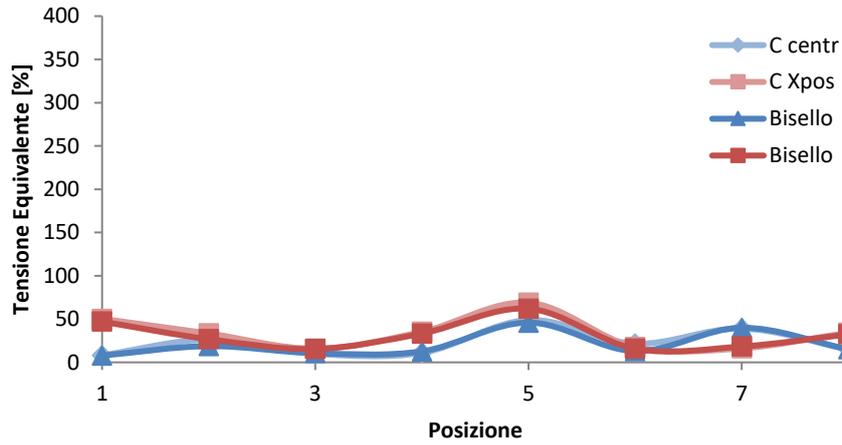


Figura B.59 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

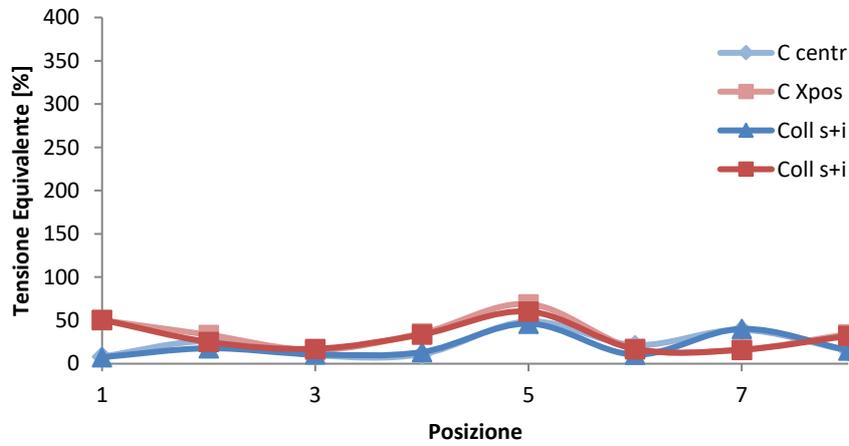


Figura B.60 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.10. Braccio a tre sezioni punto D

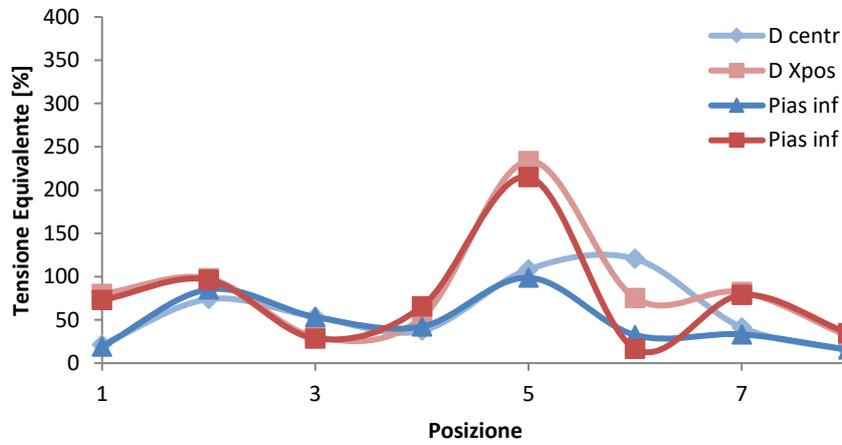


Figura B.61 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

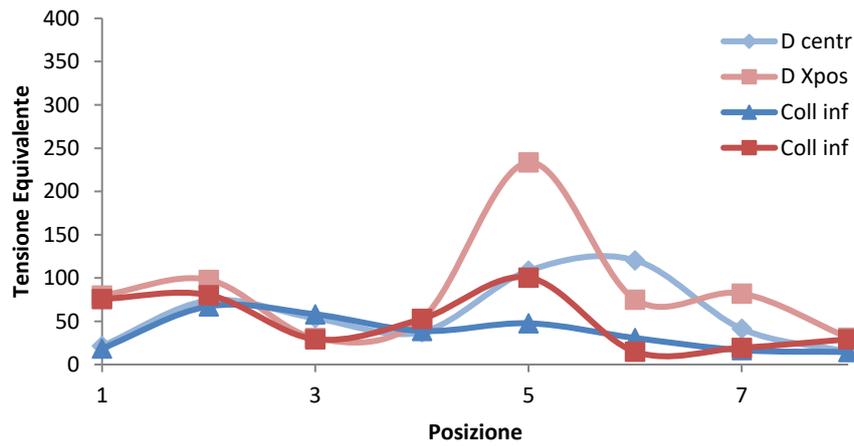


Figura B.62 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

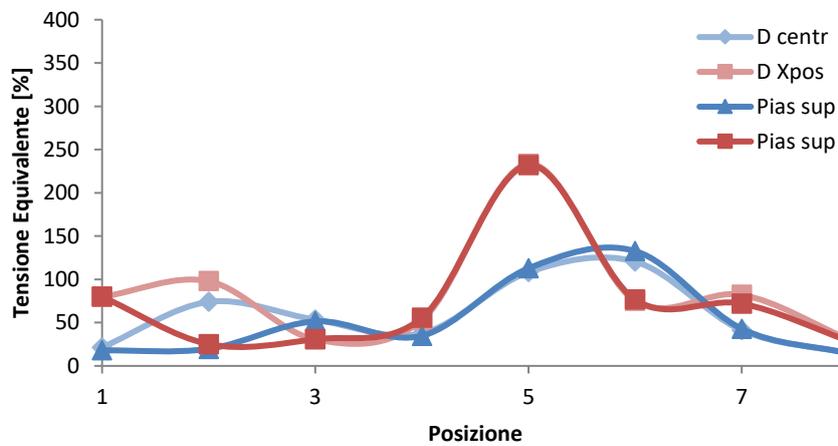


Figura B.63 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

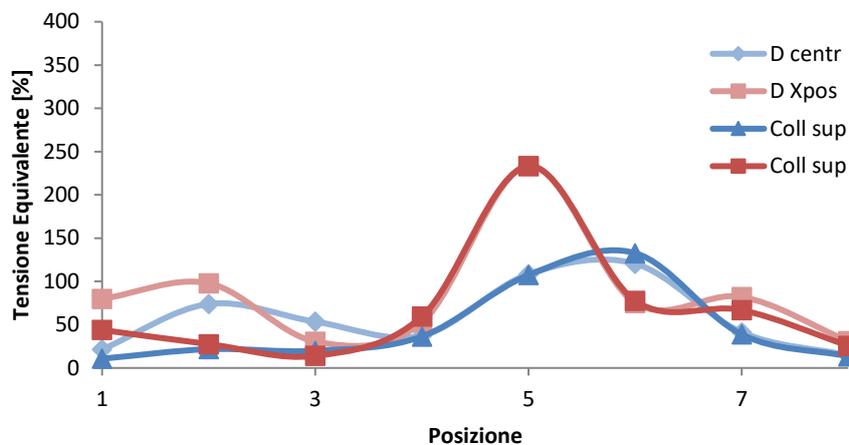


Figura B.64 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

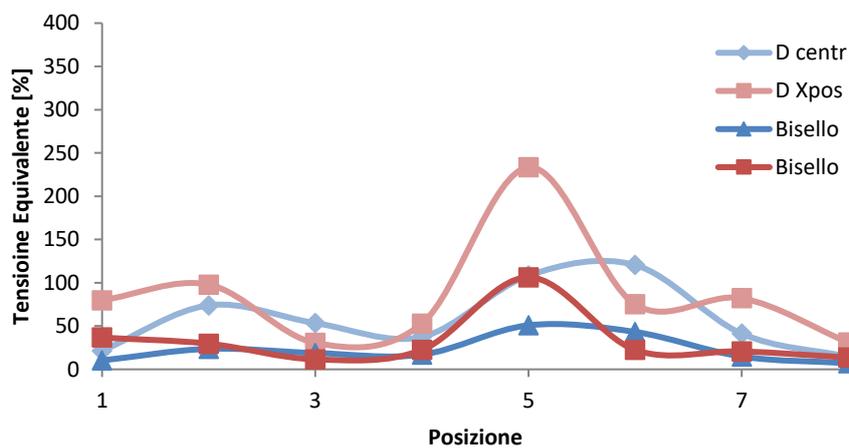


Figura B.65 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

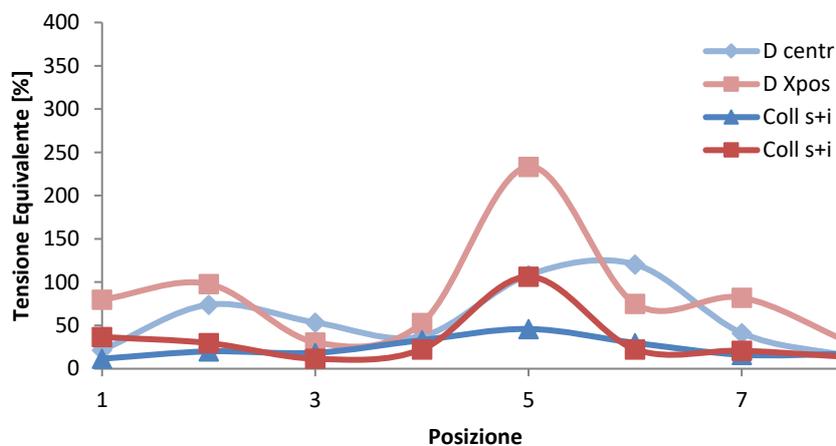


Figura B.66 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.11. Braccio a tre sezioni punto E

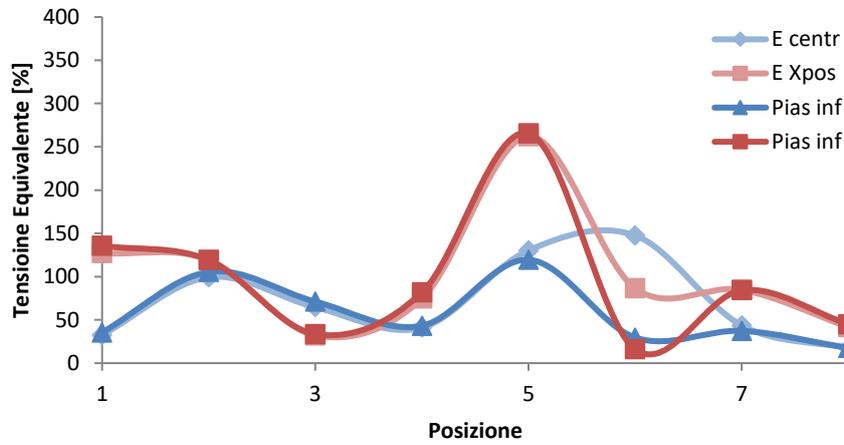


Figura B.67 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

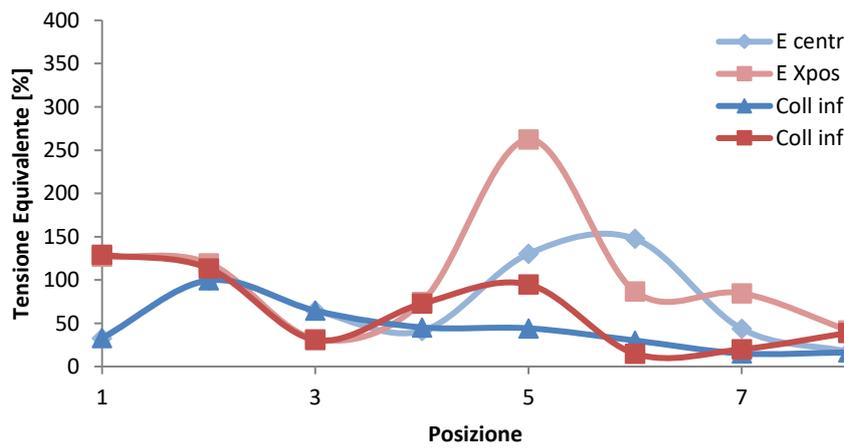


Figura B.68 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

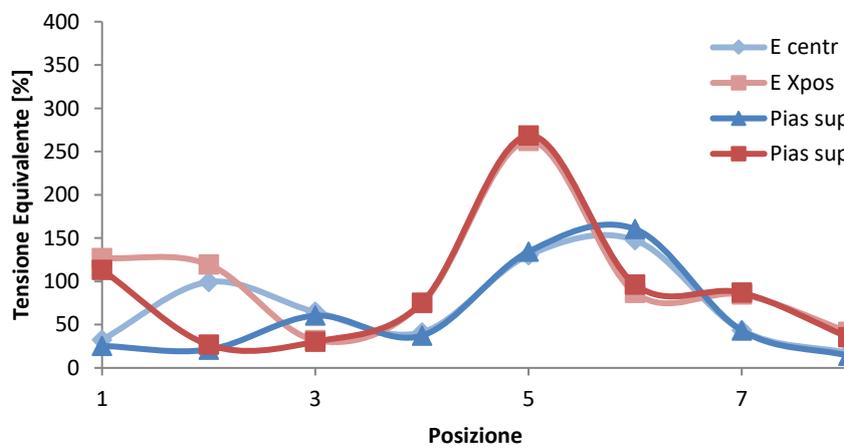


Figura B.69 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

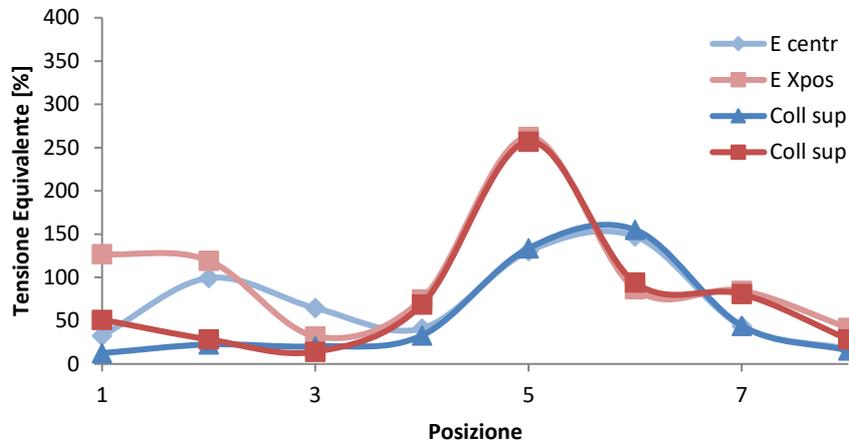


Figura B.70 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

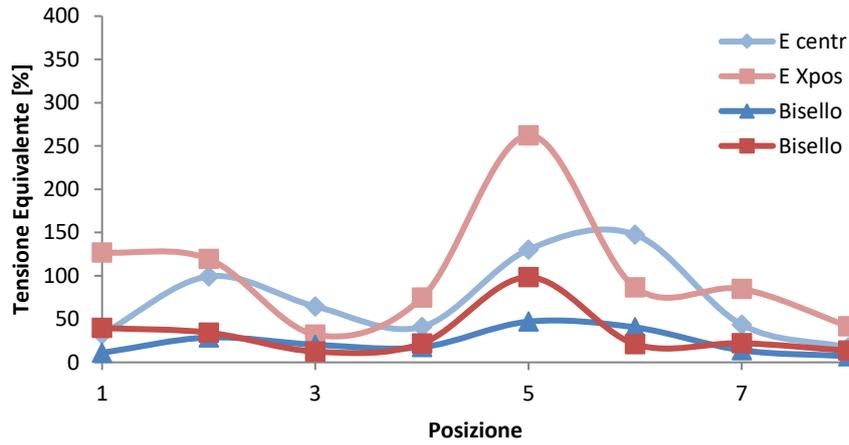


Figura B.71 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

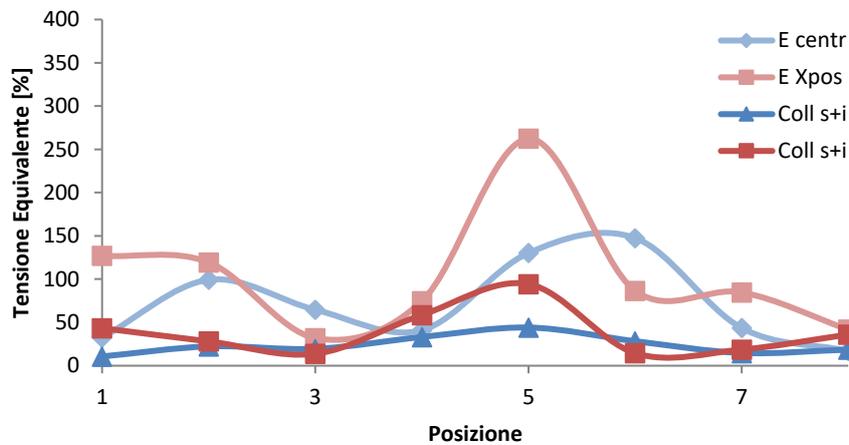


Figura B.72 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.12. Braccio a tre sezioni punto F

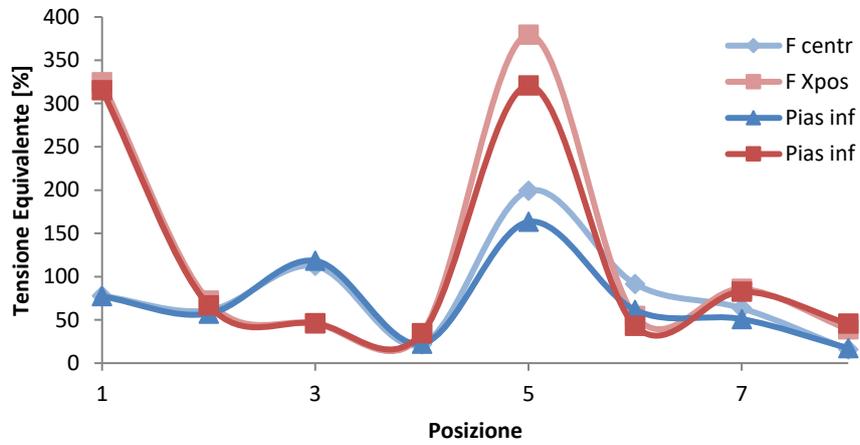


Figura B.73 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

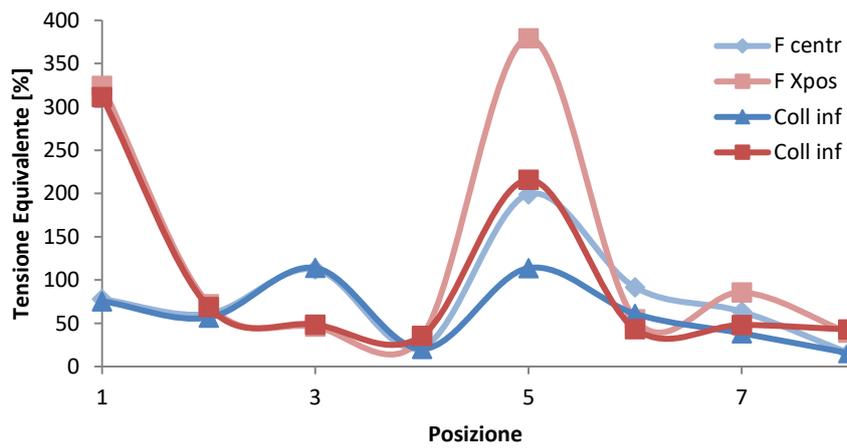


Figura B.74 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

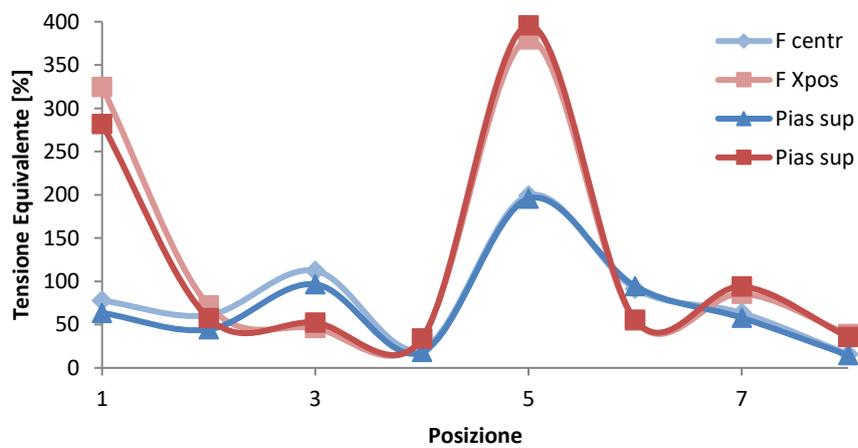


Figura B.75 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

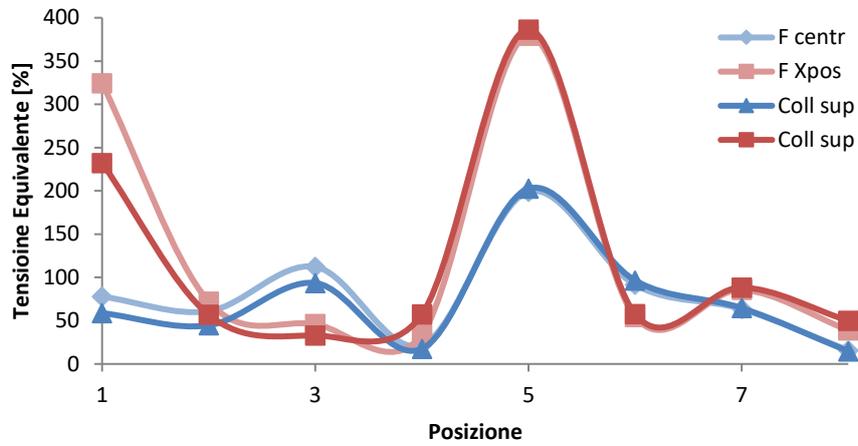


Figura B.76 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

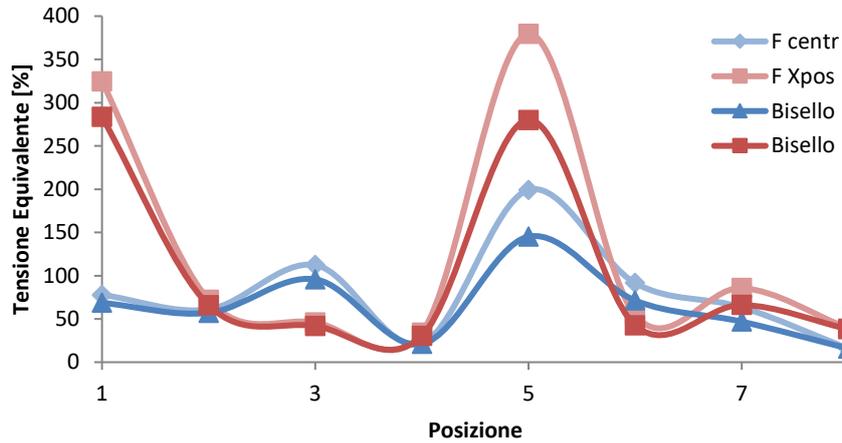


Figura B.77 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

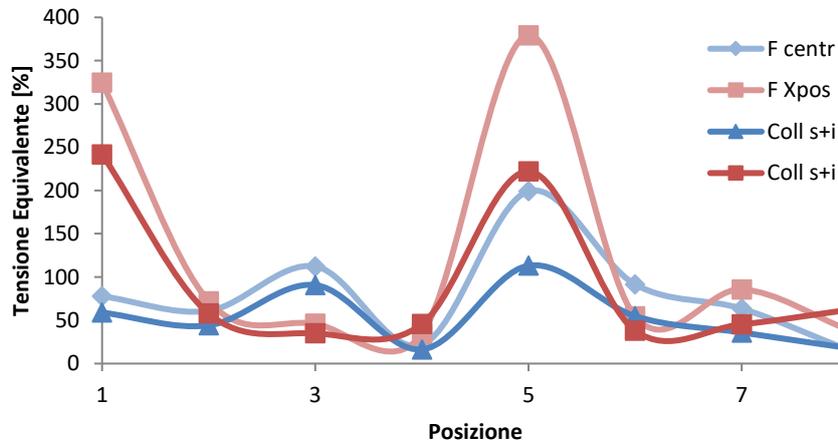


Figura B.78 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

B.13. Braccio a tre sezioni punto G

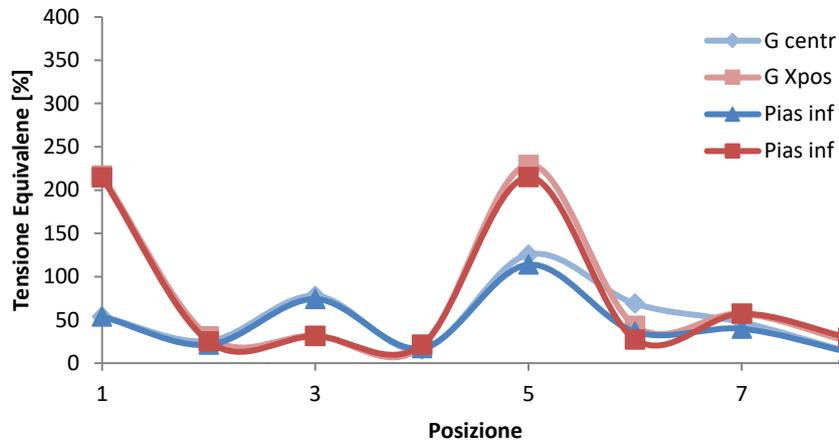


Figura B.79 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

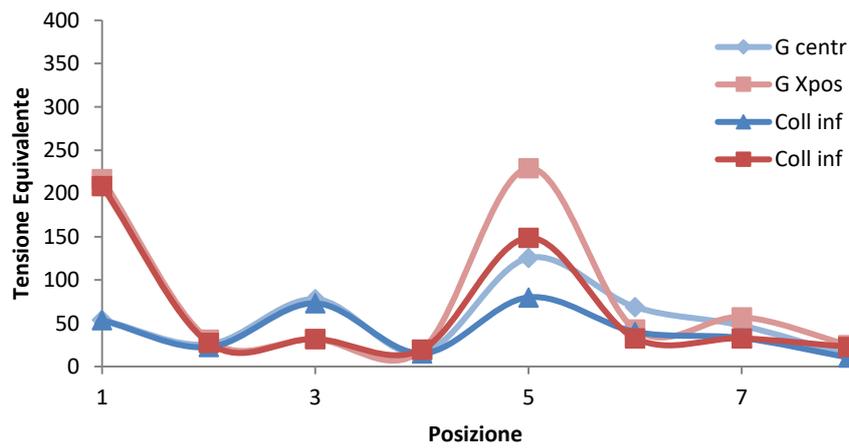


Figura B.80 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

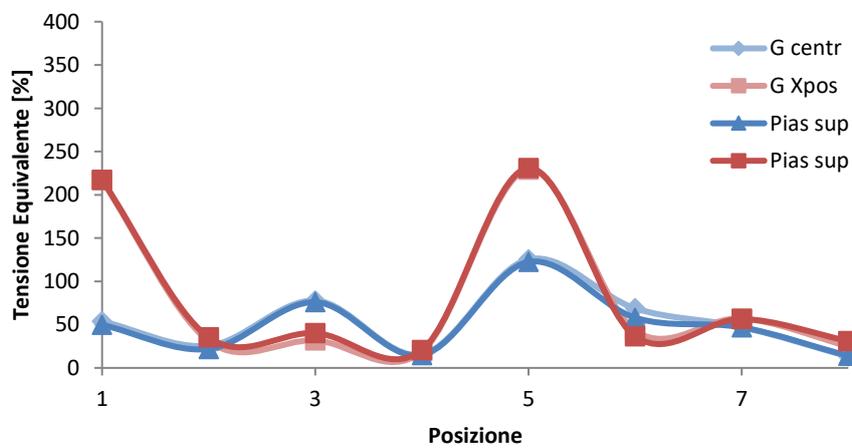


Figura B.81 Tensioni equivalenti con una piastra di rinforzo nella zona superiore del braccio.

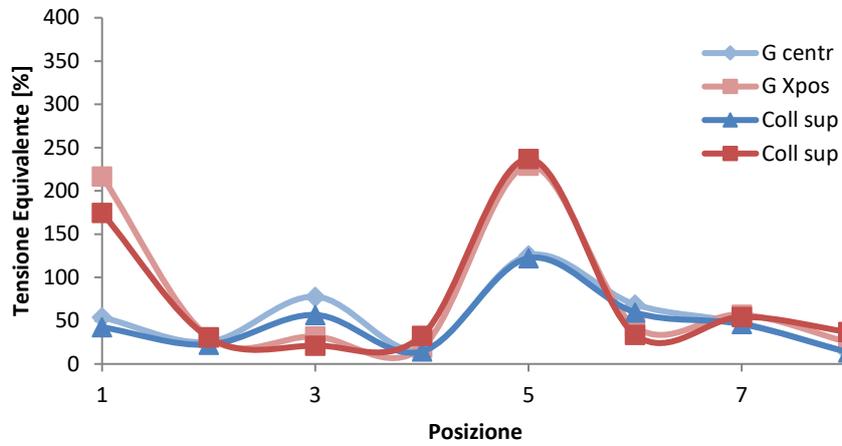


Figura B.82 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

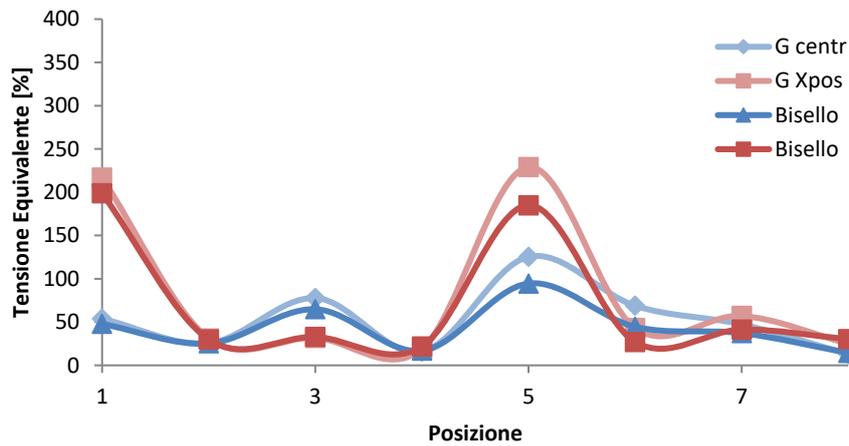


Figura B.83 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

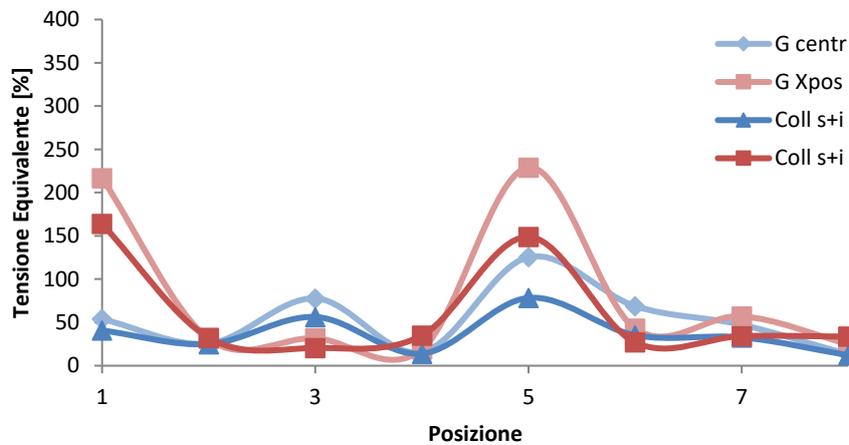


Figura B.84 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

Appendice C

In questa appendice vengono riportati i grafici degli andamenti delle tensioni equivalenti misurate nelle posizioni illustrate dalla figura 4.35 e i carichi specificati. Sono messi sul grafico:

- In blu chiaro le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio specificati quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo
- In blu intenso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio specificati quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo con la mesh più fitta nelle zone specificate
- In verde chiaro le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio specificati quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato
- In verde scuro le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio specificati quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato con la mesh più fitta nelle zone specificate
- In rosa le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio vicino al bordo interno quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato se sono presenti valori di tensione equivalenti confrontabili con i valori considerati fin ora
- In rosso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio vicino al bordo interno quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato se sono presenti valori di tensione equivalenti confrontabili con i valori considerati fin ora, con la mesh più fitta nelle zone specificate

C.1. Braccio a tre sezioni con il carico centrato sulla pala

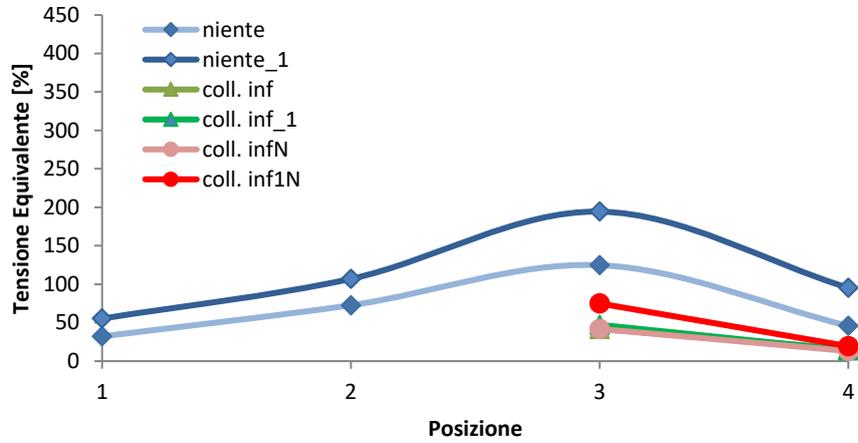


Figura C.1 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

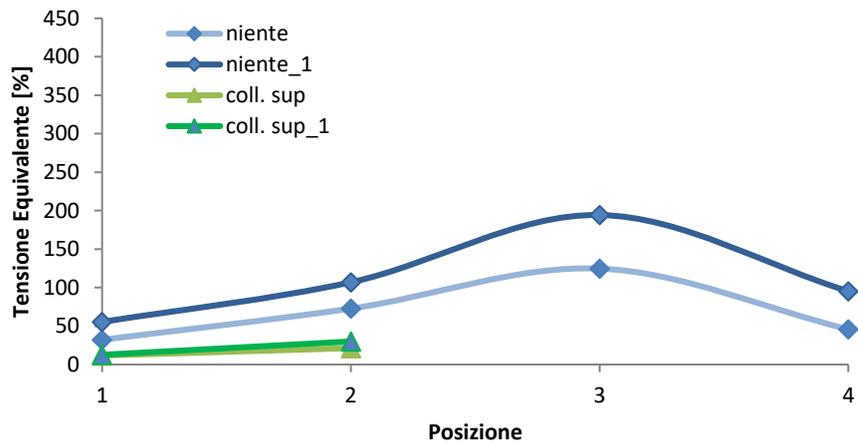


Figura C.2 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

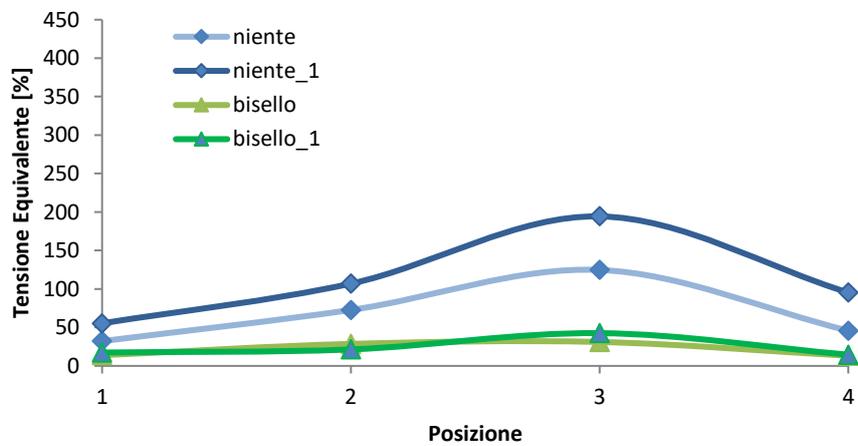


Figura C.3 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

C.2. Braccio a tre sezioni con il carico sullo spigolo a X positivo della pala

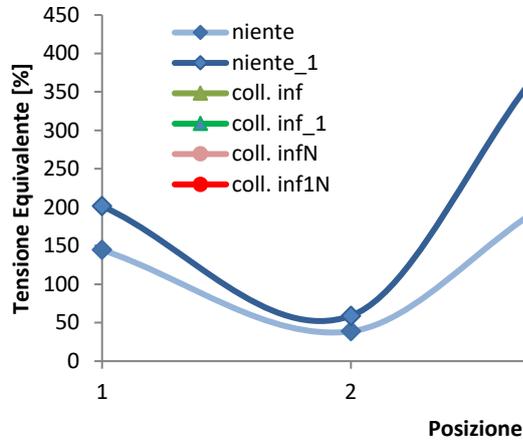


Figura C.4 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

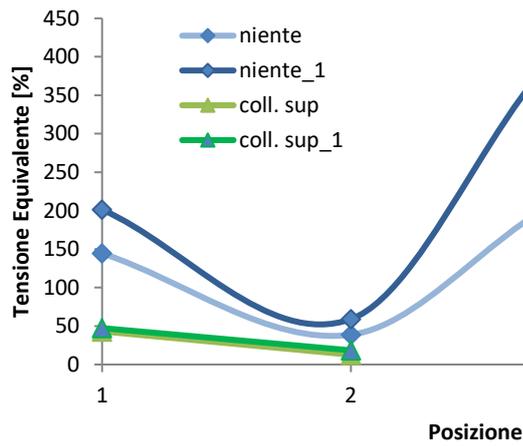


Figura C.5 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

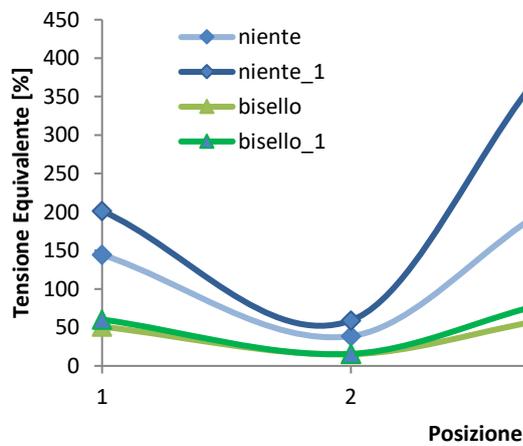


Figura C.6 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

Appendice D

In questa appendice vengono riportati i grafici degli andamenti delle tensioni equivalenti misurate nei punti descritti dalla figura 4.34 nelle posizioni illustrate dalla figura 4.33 per il confronto tra contatti *frictionless* attivi o soppressi del paragrafo 4.5.1. Sono messi sul grafico:

- In blu chiaro le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando non si utilizzano i contatti *frictionless* con il carico centrato sulla pala
- In rosso chiaro le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando non si utilizzano i contatti *frictionless* con il carico sullo spigolo a X positivo della pala
- In blu intenso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando si utilizzano i contatti *frictionless* con il carico centrato sulla pala
- In rosso intenso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando si utilizzano i contatti *frictionless* con il carico centrato sullo spigolo a X positivo della pala

D.1. Braccio a due sezioni nessun sistema di rinforzo

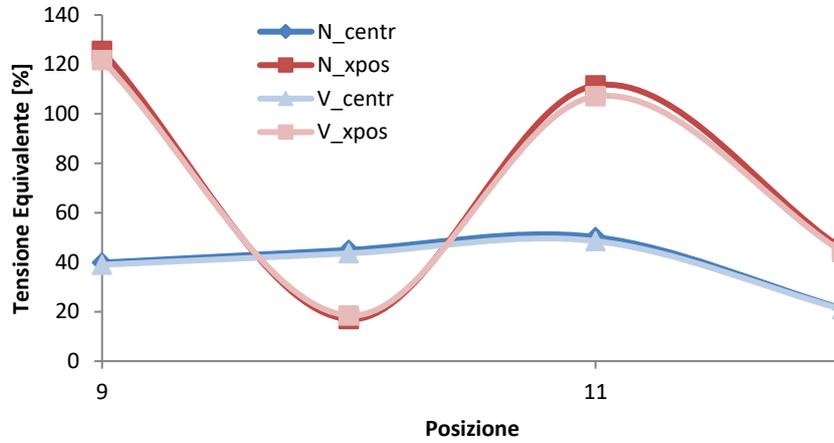


Figura D.1 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

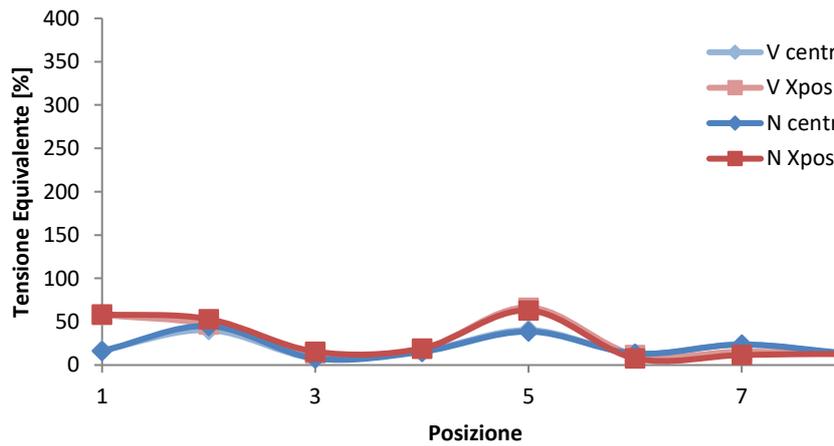


Figura D.2 Tensioni equivalenti nei punti A.

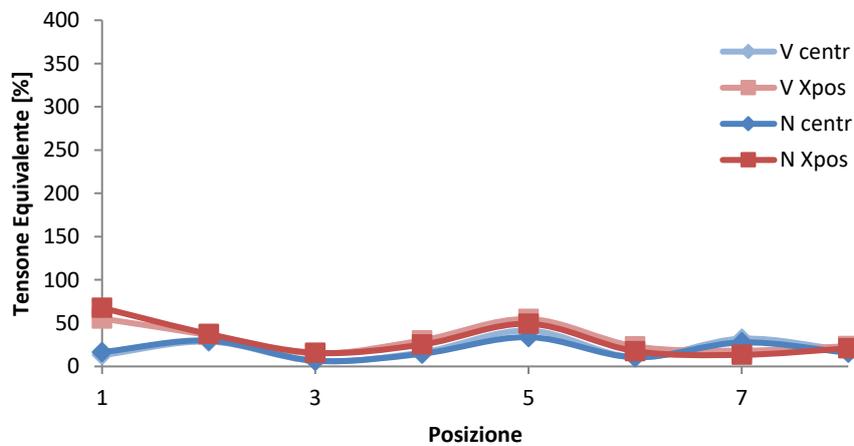


Figura D.3 Tensioni equivalenti nei punti B.

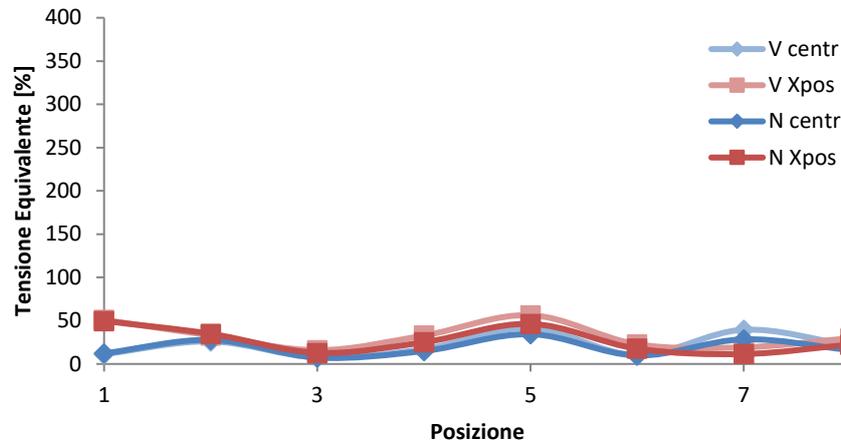


Figura D.4 Tensioni equivalenti nei punti C.

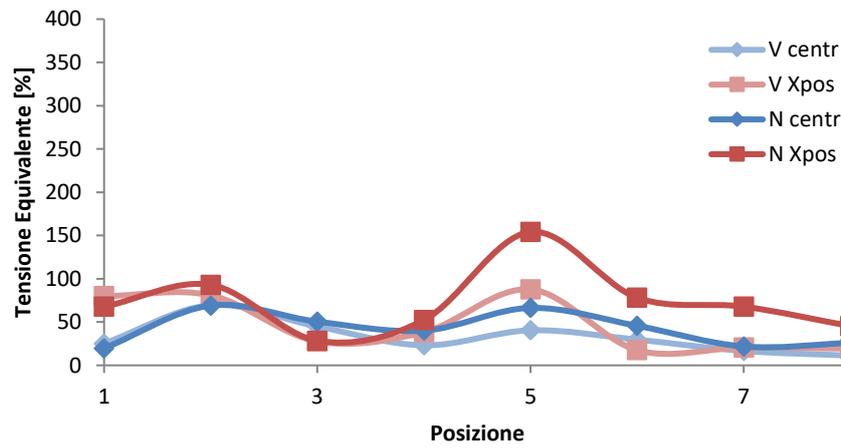


Figura D.5 Tensioni equivalenti nei punti D.

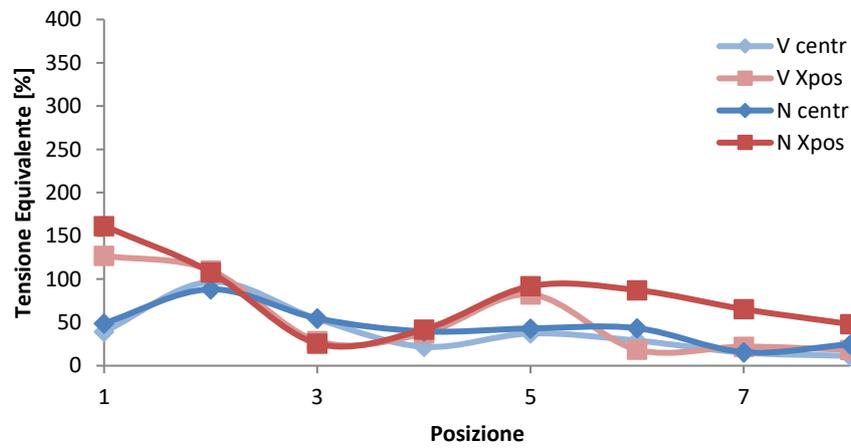


Figura D.6 Tensioni equivalenti nei punti E.

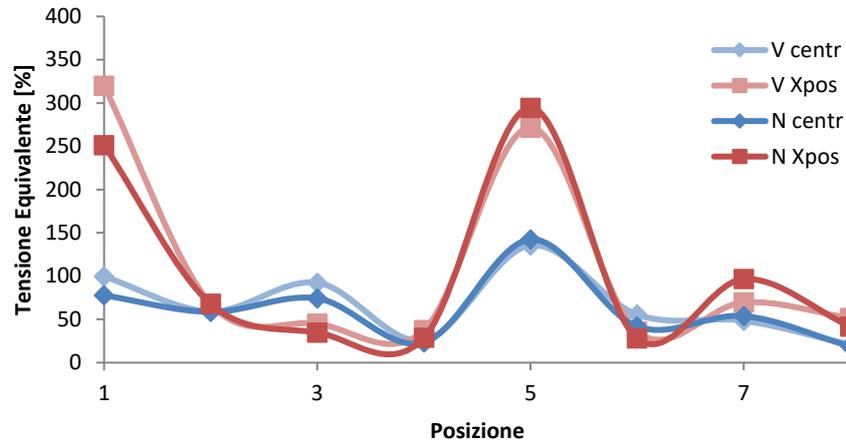


Figura D.7 Tensioni equivalenti nei punti F.

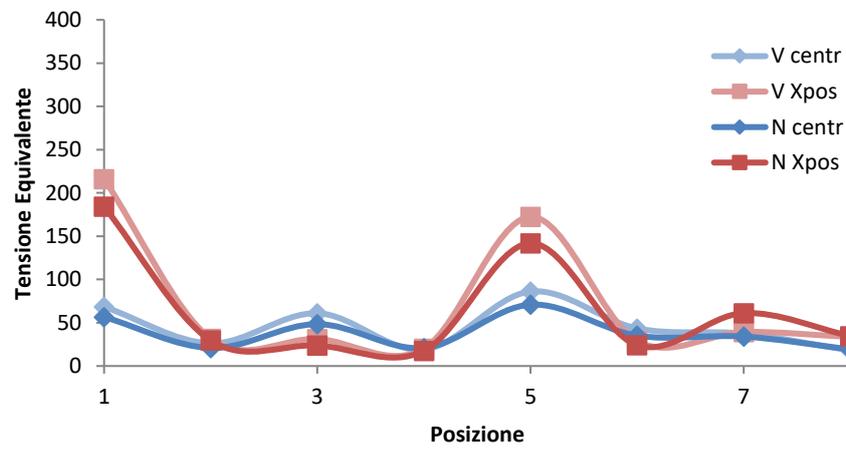


Figura D.8 Tensioni equivalenti nei punti G.

D.2. Braccio a tre sezioni nessun sistema di rinforzo

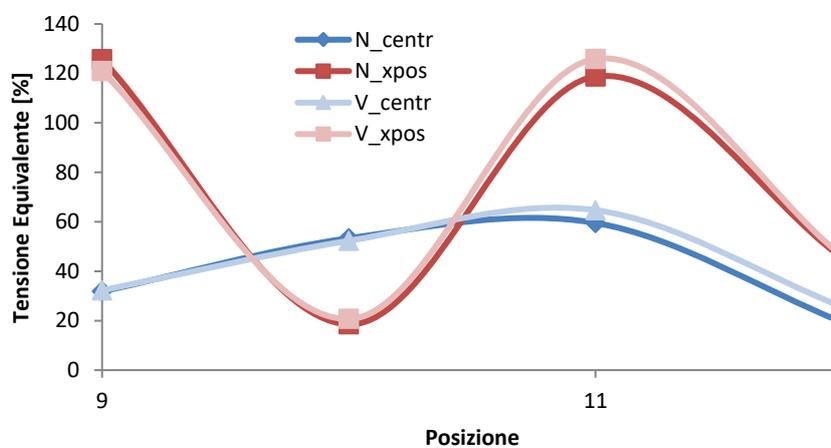


Figura D.9 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

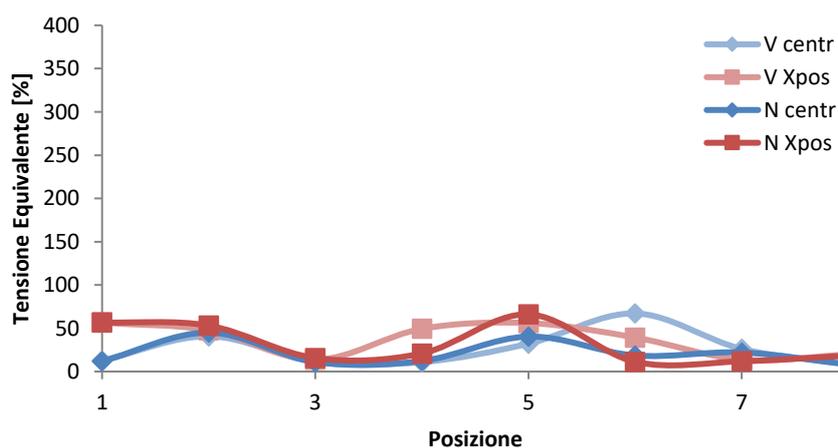


Figura D.10 Tensioni equivalenti nei punti A.

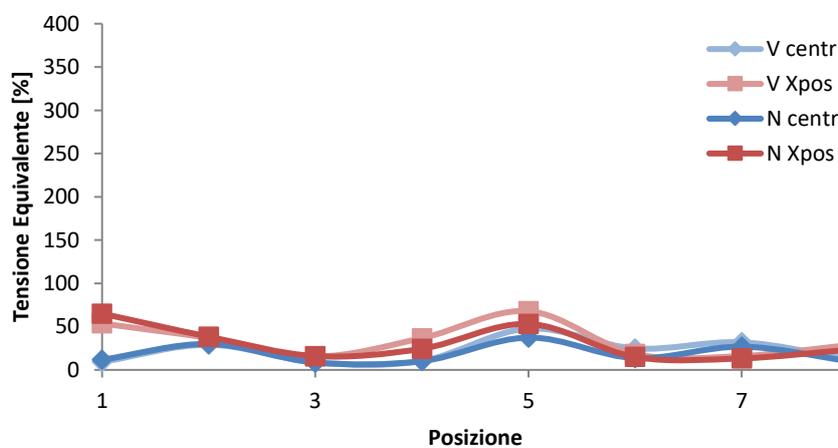


Figura D.11 Tensioni equivalenti nei punti B.

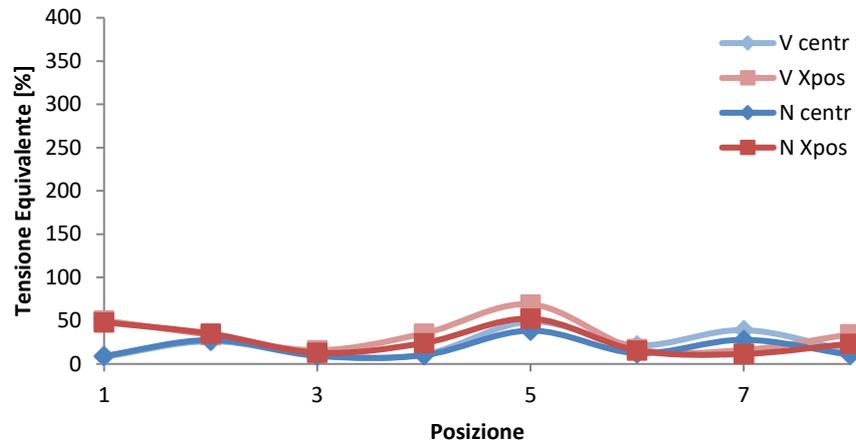


Figura D.12 Tensioni equivalenti nei punti C.

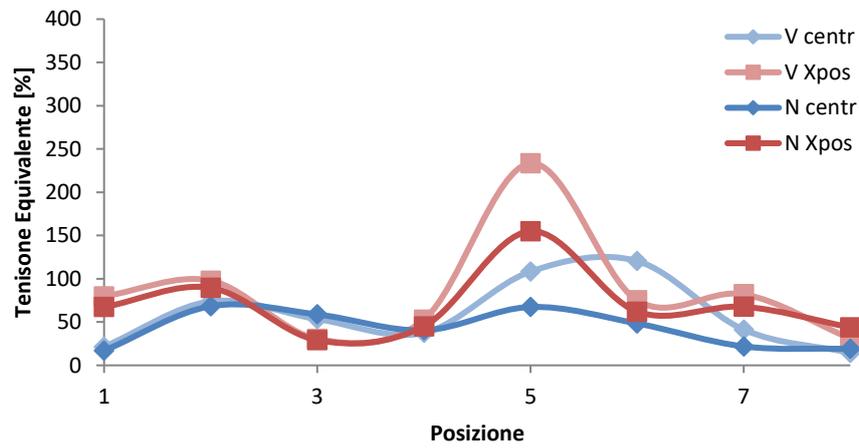


Figura D.13 Tensioni equivalenti nei punti D.

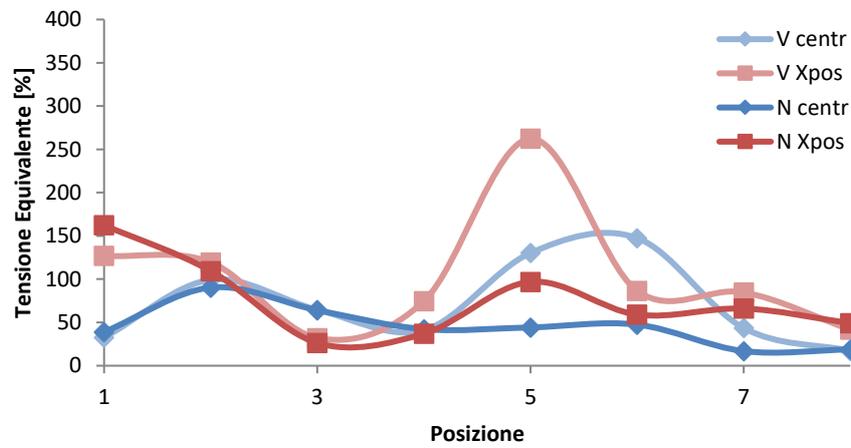


Figura D.14 Tensioni equivalenti nei punti E.

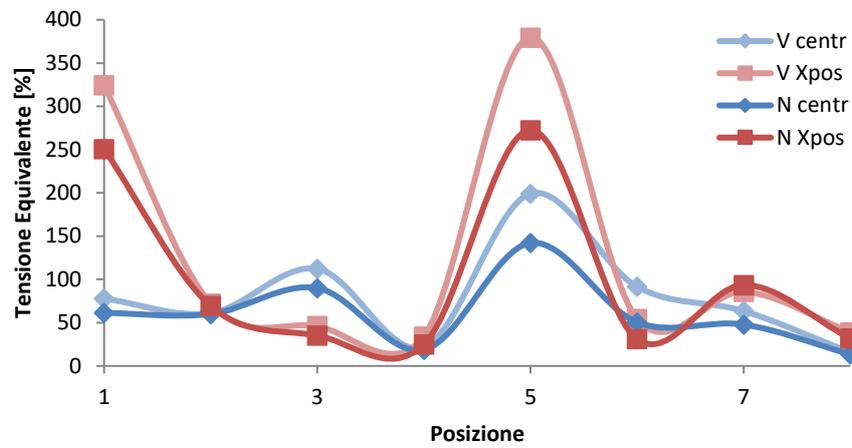


Figura D.15 Tensioni equivalenti nei punti F.

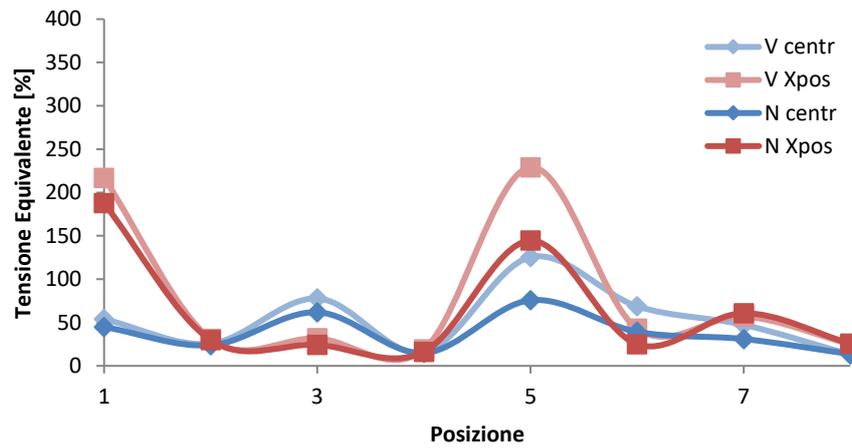


Figura D.16 Tensioni equivalenti nei punti G.

D.3. Braccio a due sezioni bisello di rinforzo

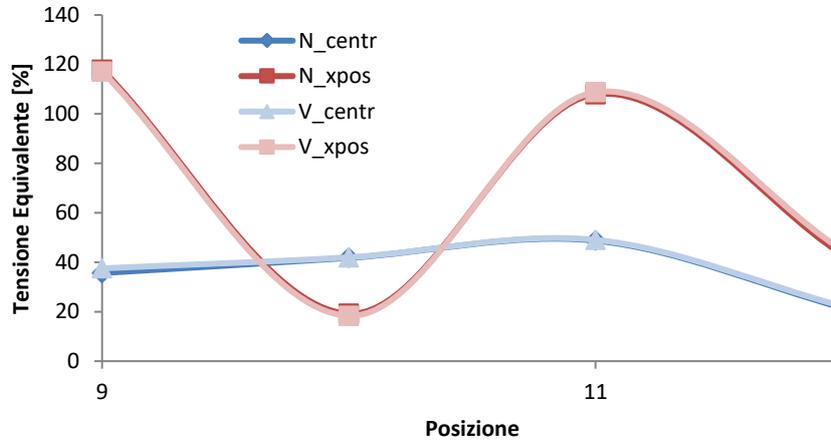


Figura D.17 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

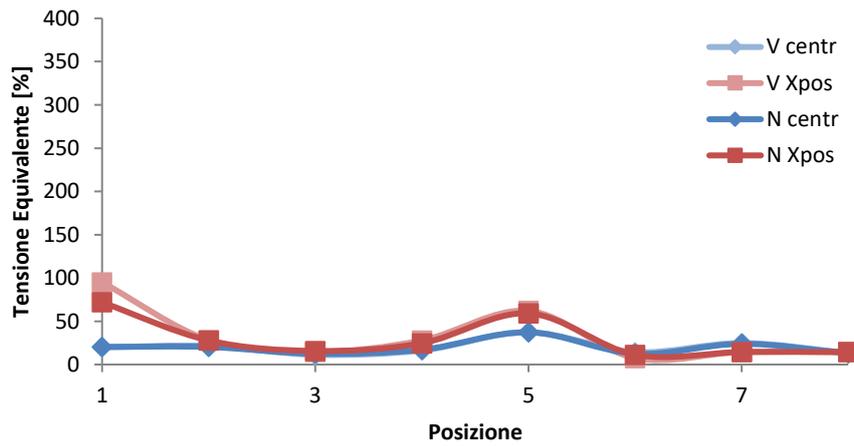


Figura D.18 Tensioni equivalenti nei punti A.

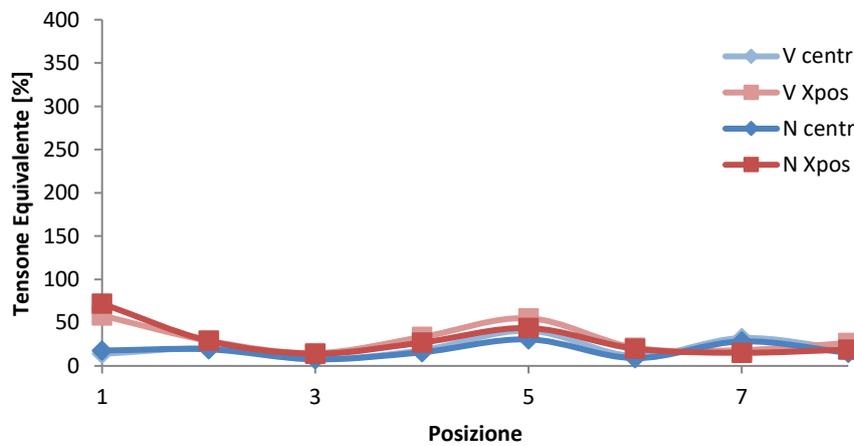


Figura D.19 Tensioni equivalenti nei punti B.

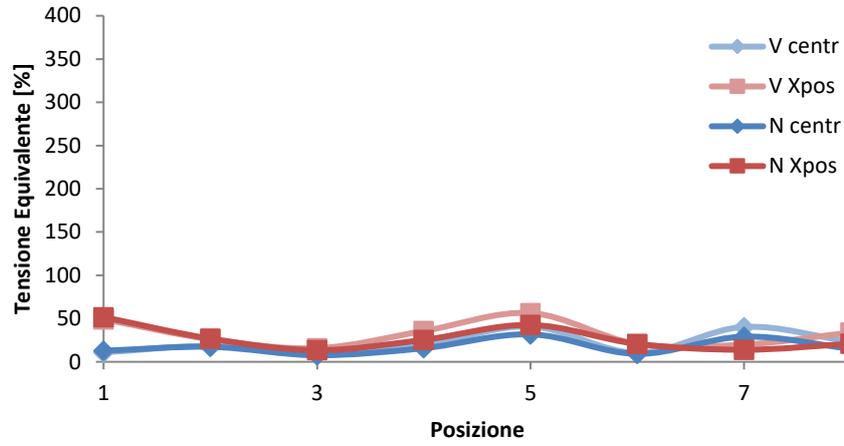


Figura D.20 Tensioni equivalenti nei punti C.

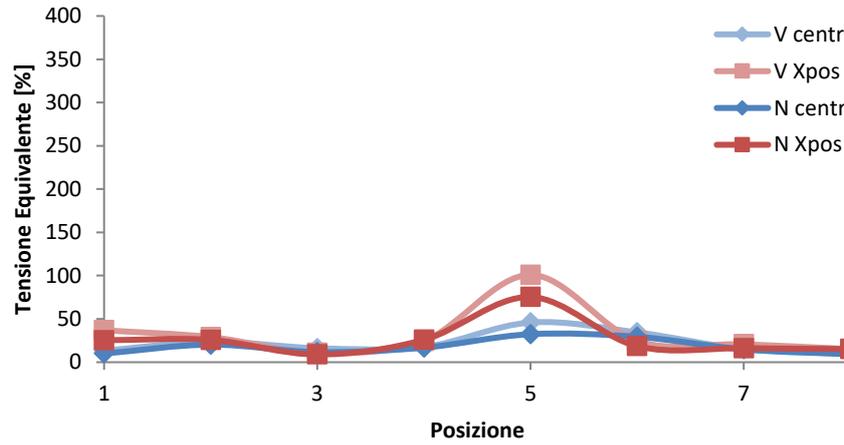


Figura D.21 Tensioni equivalenti nei punti D.

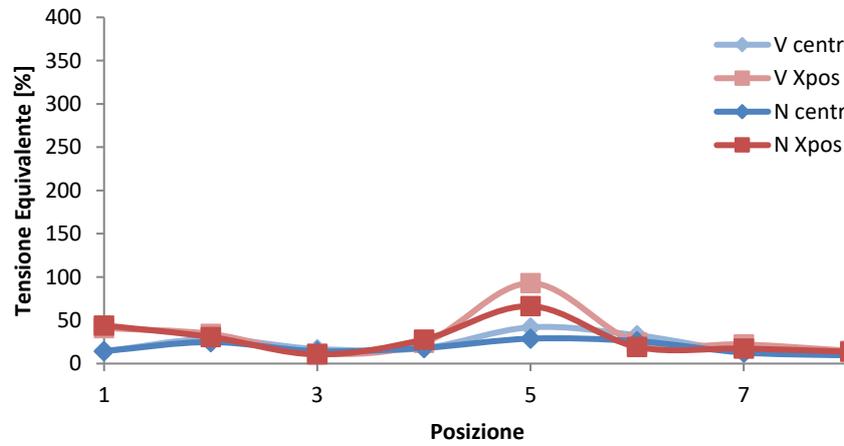


Figura D.22 Tensioni equivalenti nei punti E.

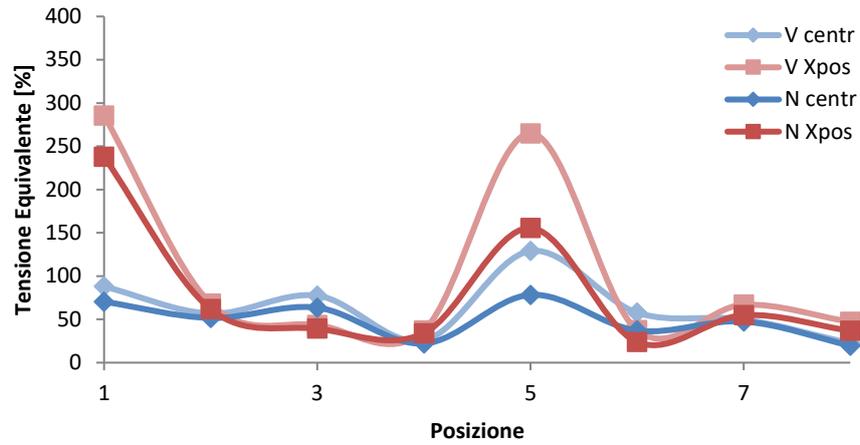


Figura D.23 Tensioni equivalenti nei punti F.

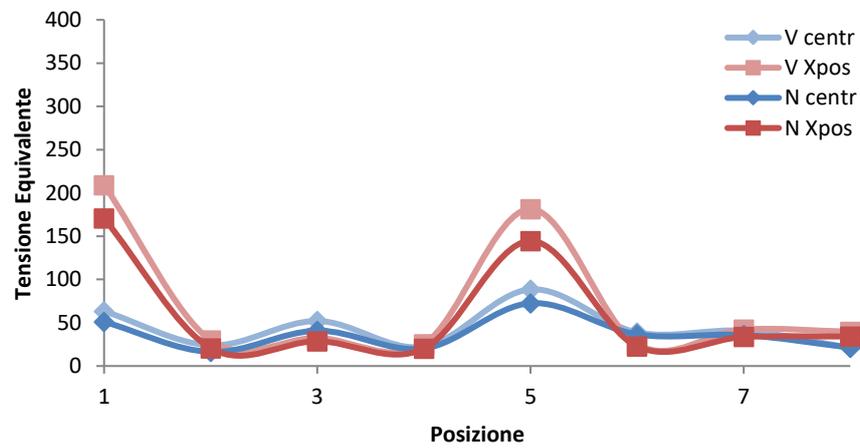


Figura D.24 Tensioni equivalenti nei punti G.

D.4. Braccio a tre sezioni bisello di rinforzo

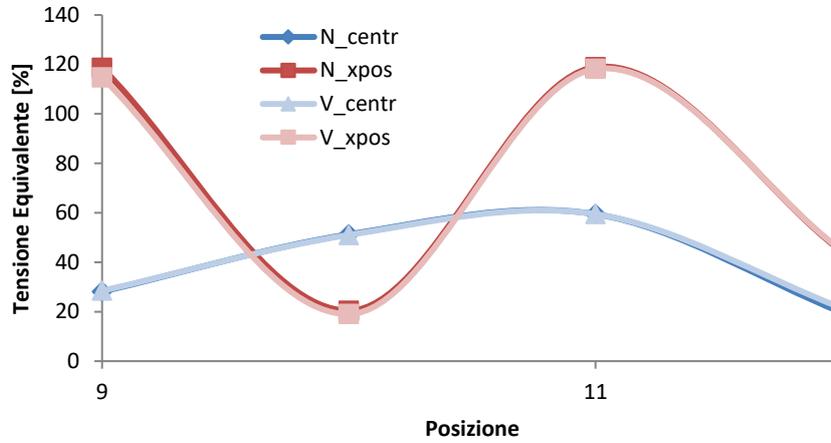


Figura D.25 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

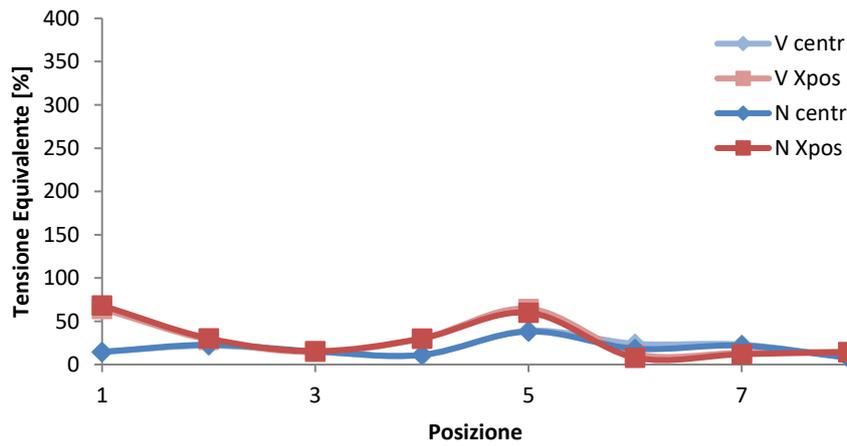


Figura D.26 Tensioni equivalenti nei punti A.

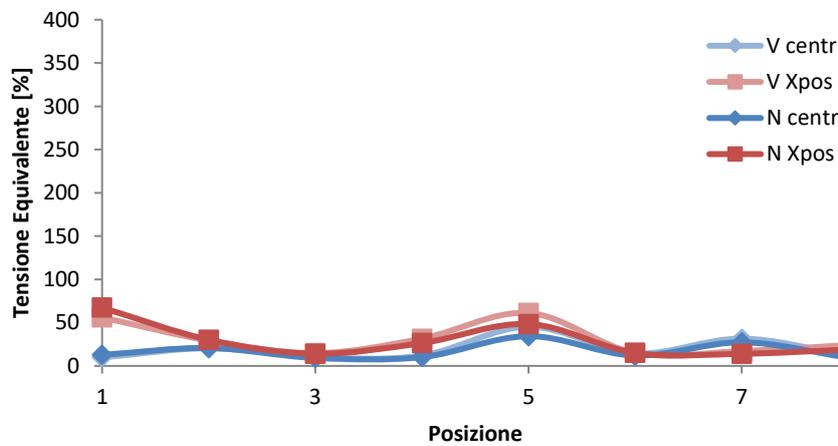


Figura D.27 Tensioni equivalenti nei punti B.

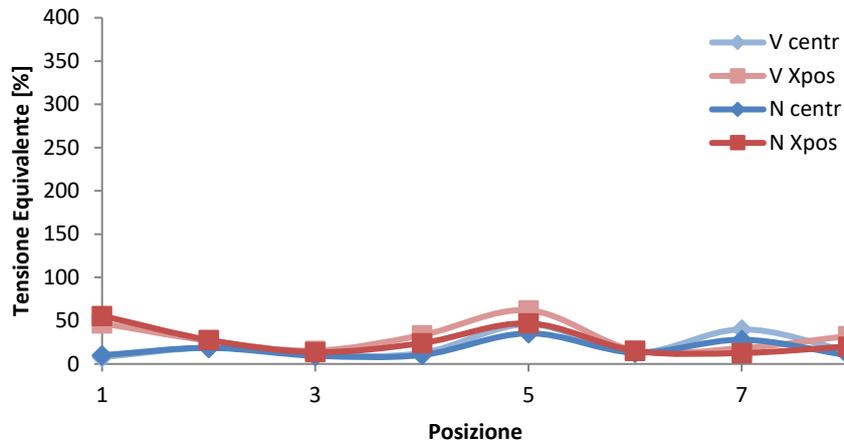


Figura D.28 Tensioni equivalenti nei punti C.

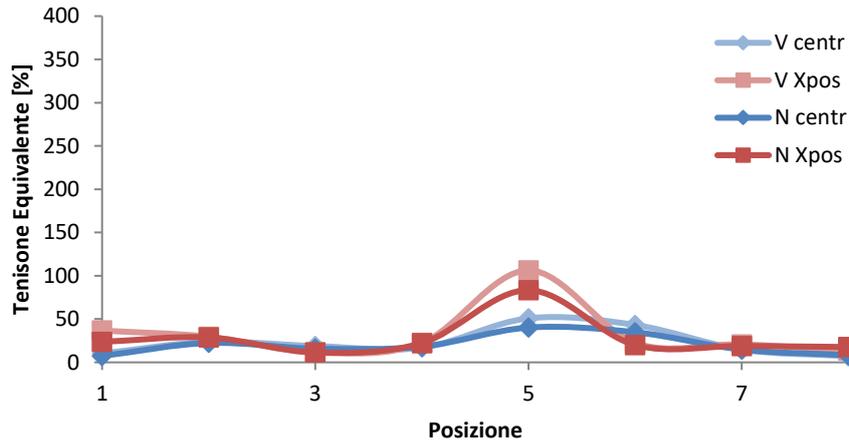


Figura D.29 Tensioni equivalenti nei punti D.

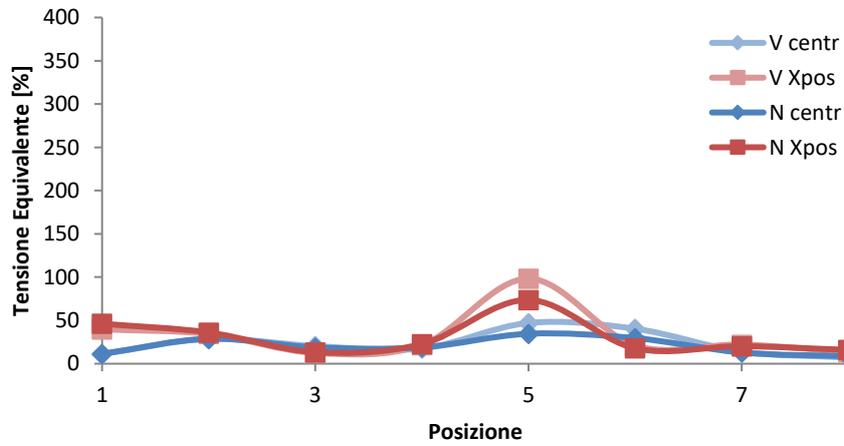


Figura D.30 Tensioni equivalenti nei punti E.

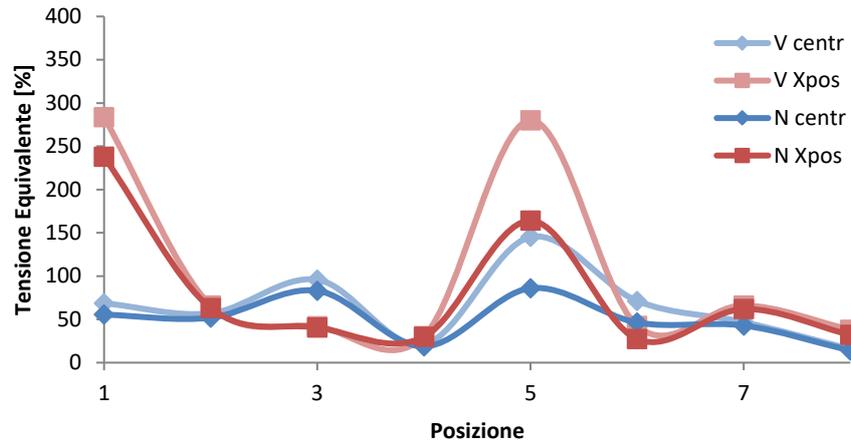


Figura D.31 Tensioni equivalenti nei punti F.

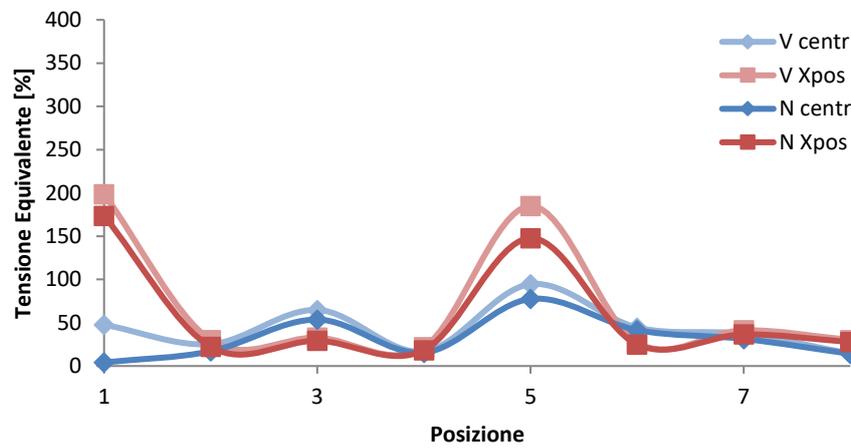


Figura D.32 Tensioni equivalenti nei punti G.

D.5. Braccio a due sezioni, colare di rinforzo nella zona inferiore

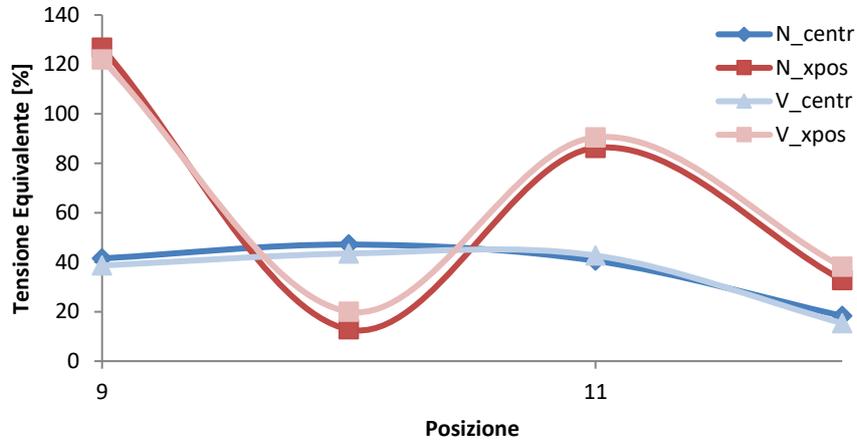


Figura D.33 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

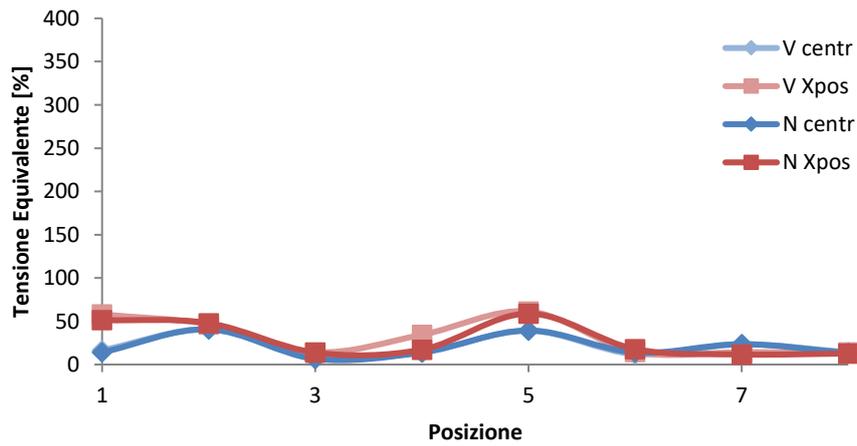


Figura D.34 Tensioni equivalenti nei punti A.

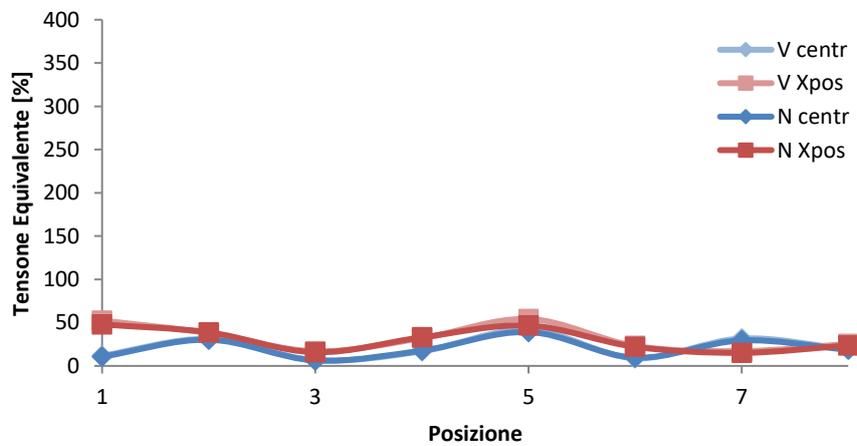


Figura D.35 Tensioni equivalenti nei punti B.

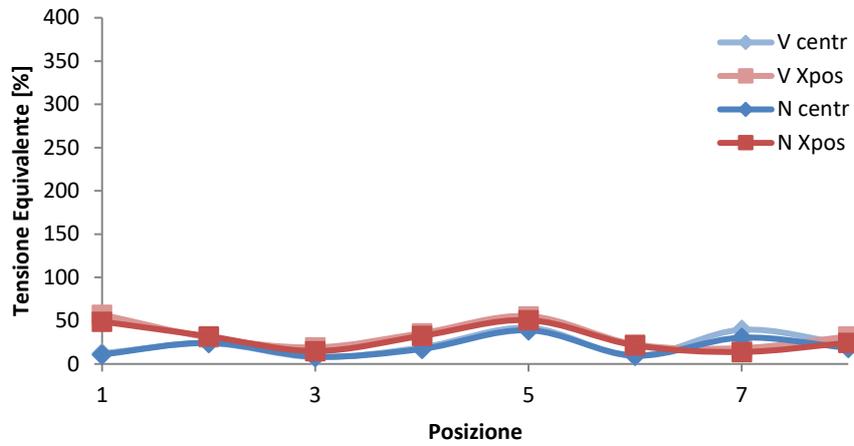


Figura D.36 Tensioni equivalenti nei punti C.

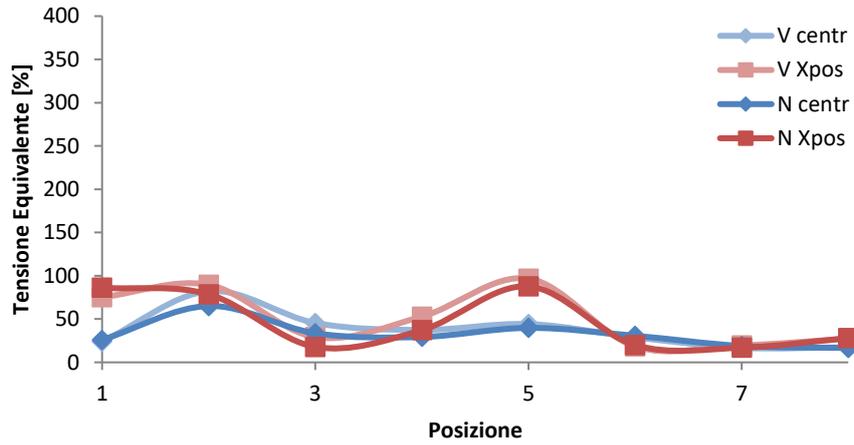


Figura D.37 Tensioni equivalenti nei punti D.

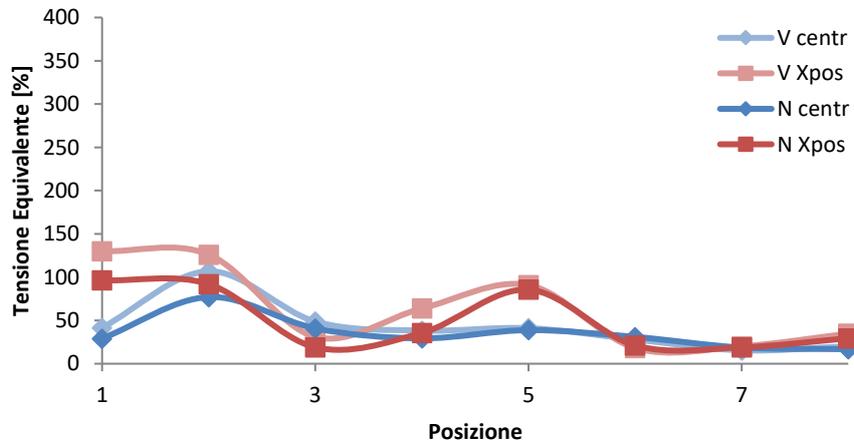


Figura D.38 Tensioni equivalenti nei punti E.

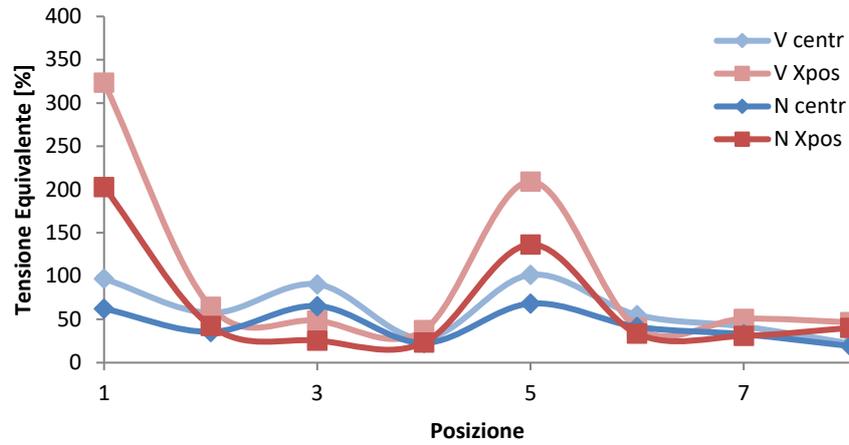


Figura D.39 Tensioni equivalenti nei punti F.

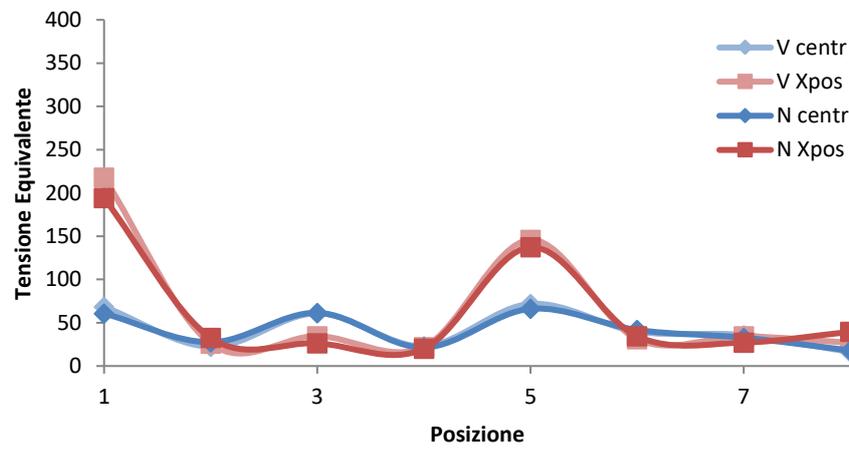


Figura D.40 Tensioni equivalenti nei punti G.

D.6. Braccio a tre sezioni colare di rinforzo nella zona inferiore

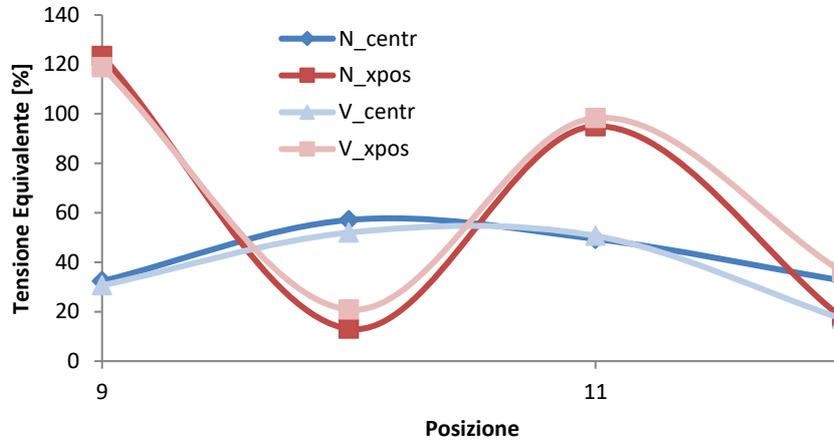


Figura D.41 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

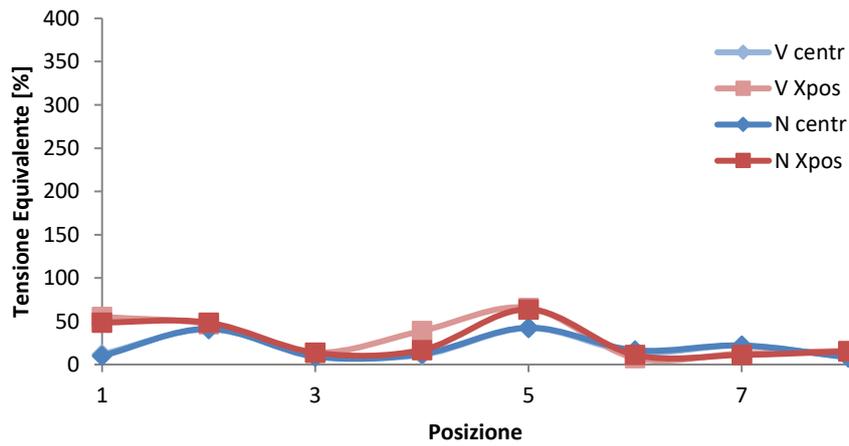


Figura D.42 Tensioni equivalenti nei punti A.

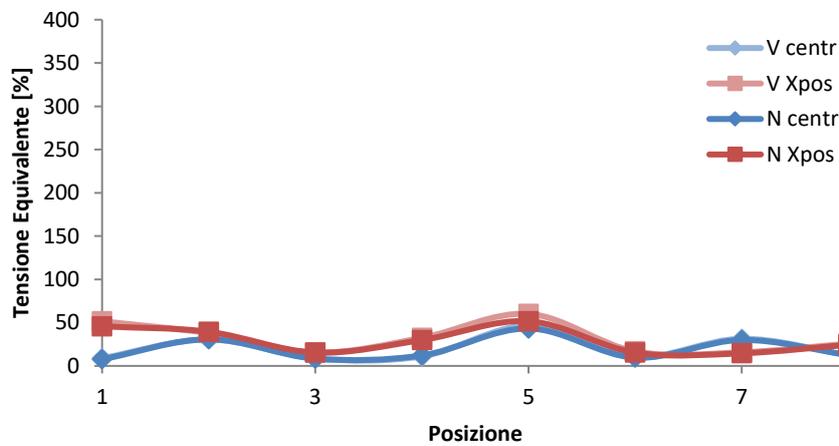


Figura D.43 Tensioni equivalenti nei punti B.

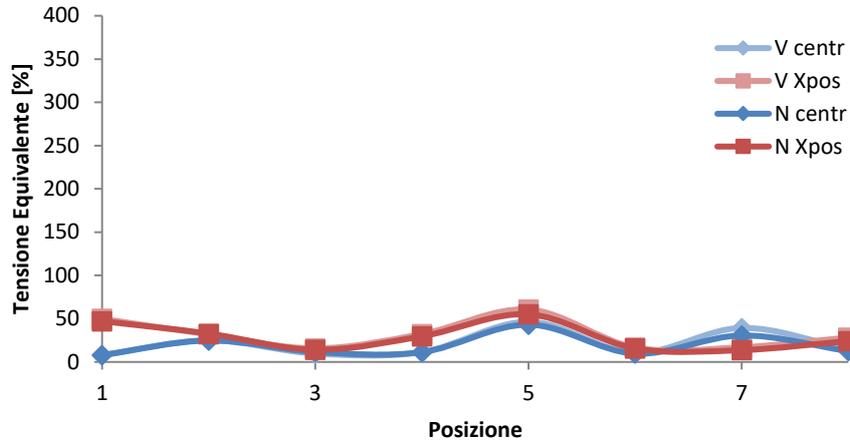


Figura D.44 Tensioni equivalenti nei punti C.

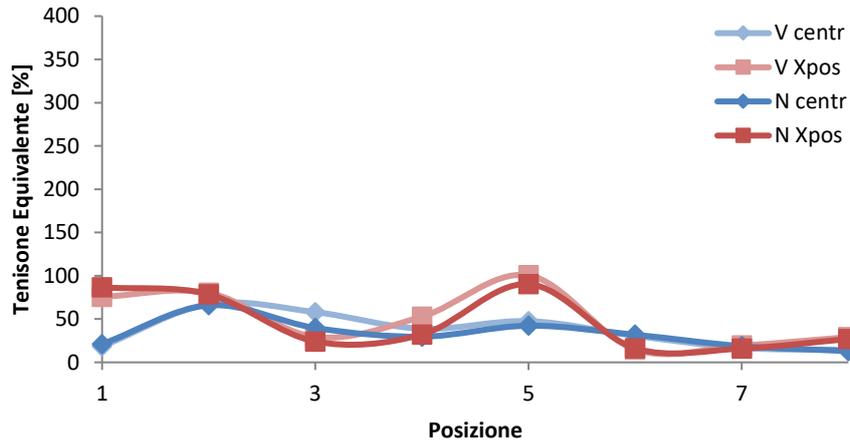


Figura D.45 Tensioni equivalenti nei punti D.

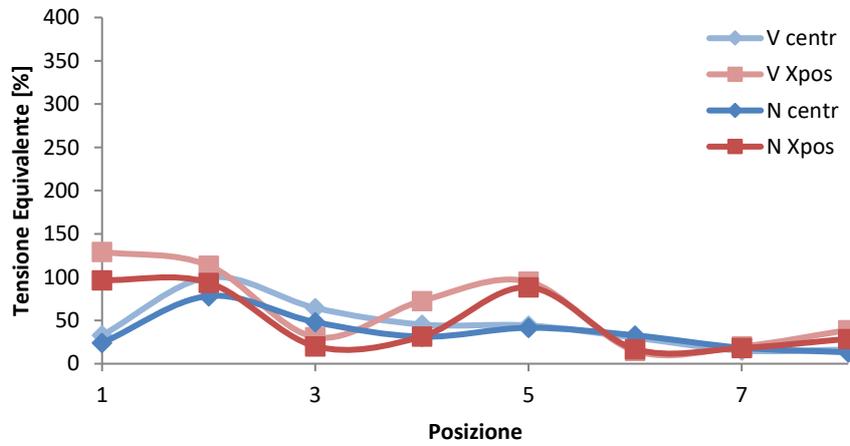


Figura D.46 Tensioni equivalenti nei punti E.

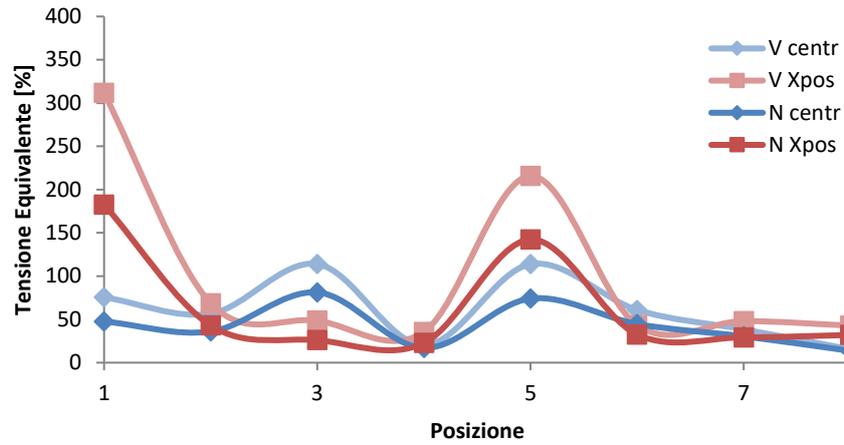


Figura D.47 Tensioni equivalenti nei punti F.

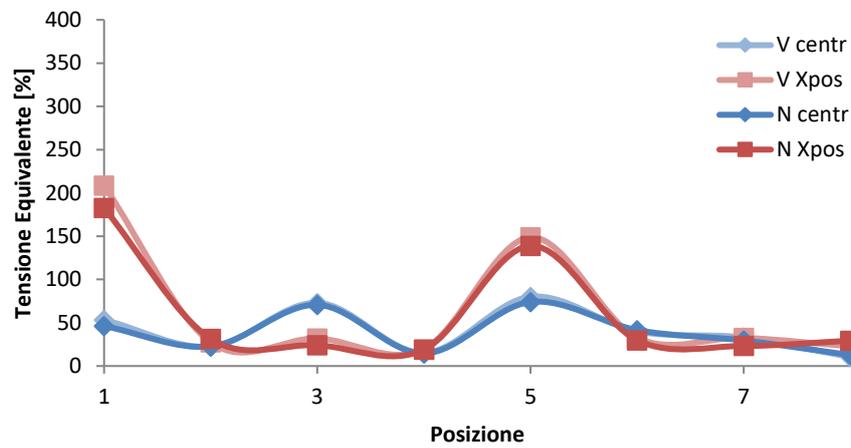


Figura D.48 Tensioni equivalenti nei punti G.

D.7. Braccio a due sezioni colare di rinforzo nella zona superiore

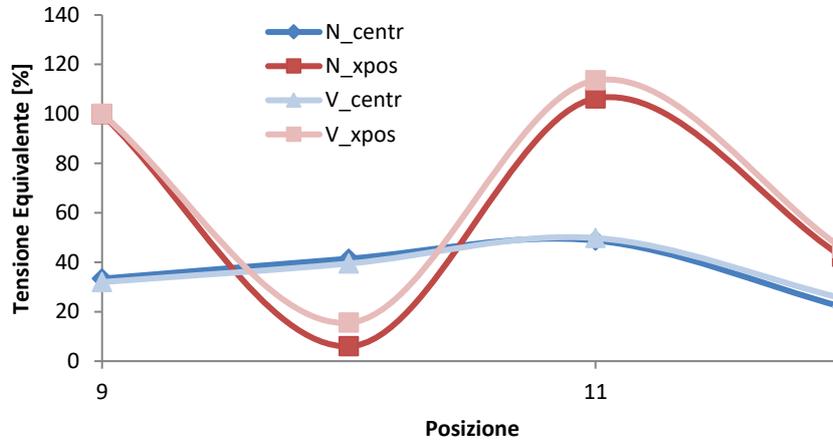


Figura D.49 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

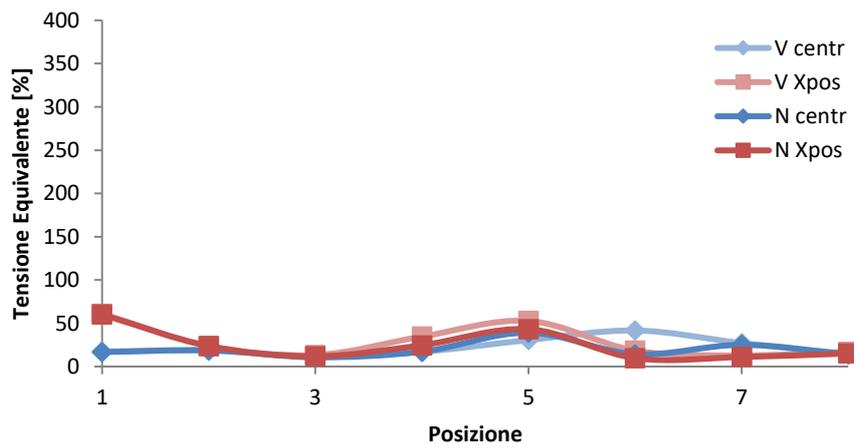


Figura D.50 Tensioni equivalenti nei punti A.

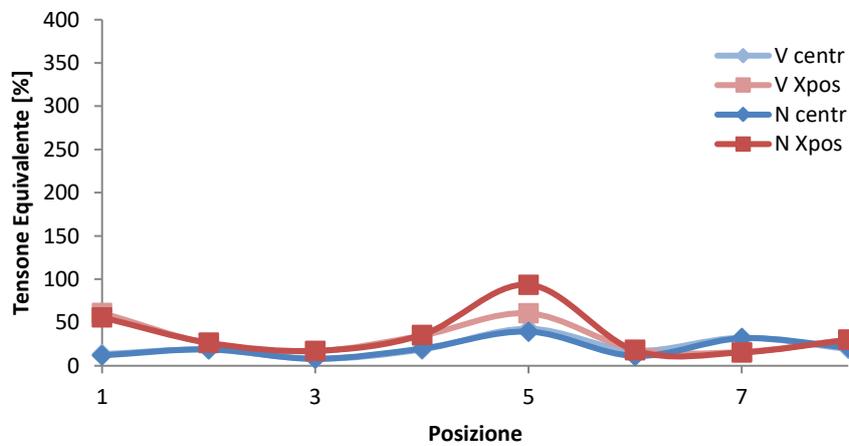


Figura D.51 Tensioni equivalenti nei punti B.

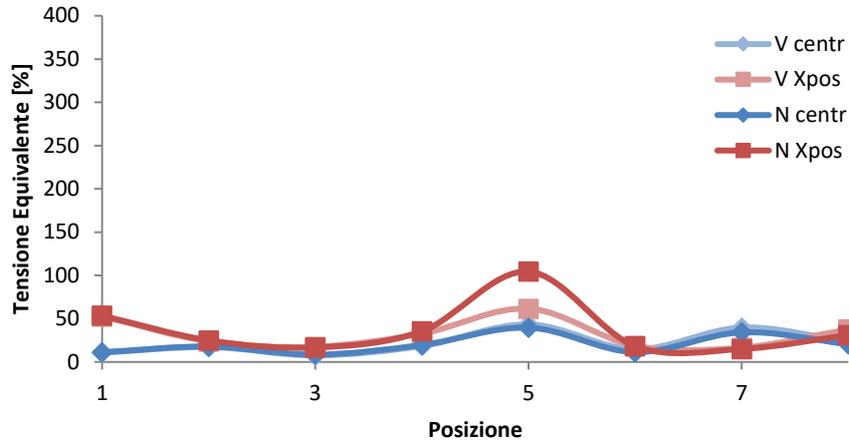


Figura D.52 Tensioni equivalenti nei punti C.

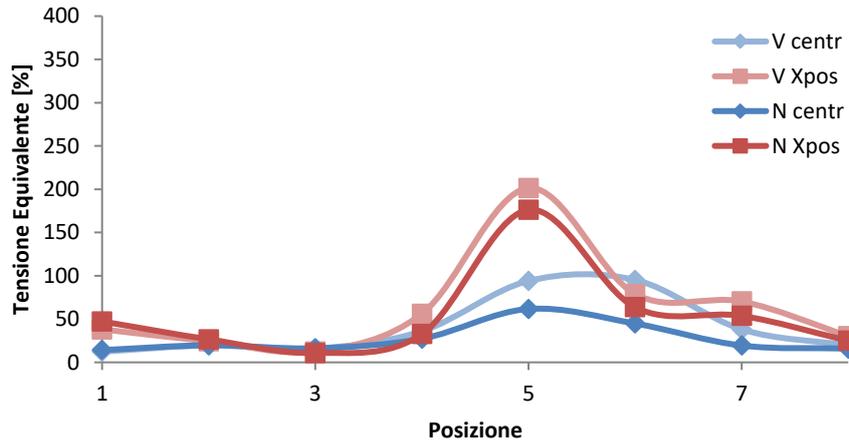


Figura D.53 Tensioni equivalenti nei punti D.

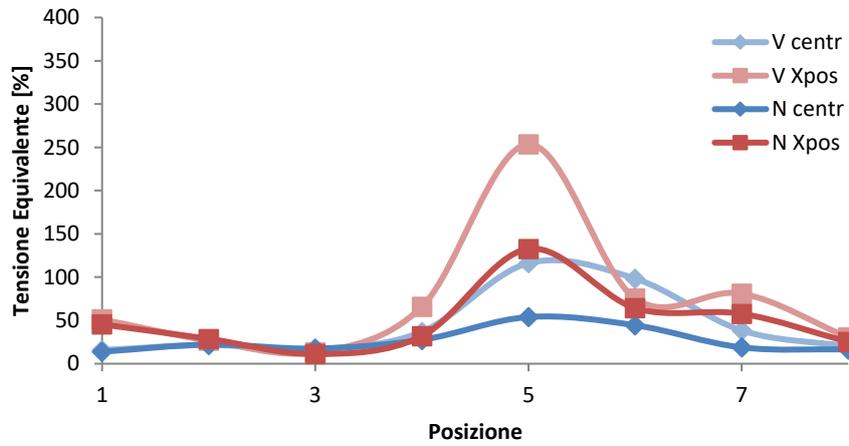


Figura D.54 Tensioni equivalenti nei punti E.

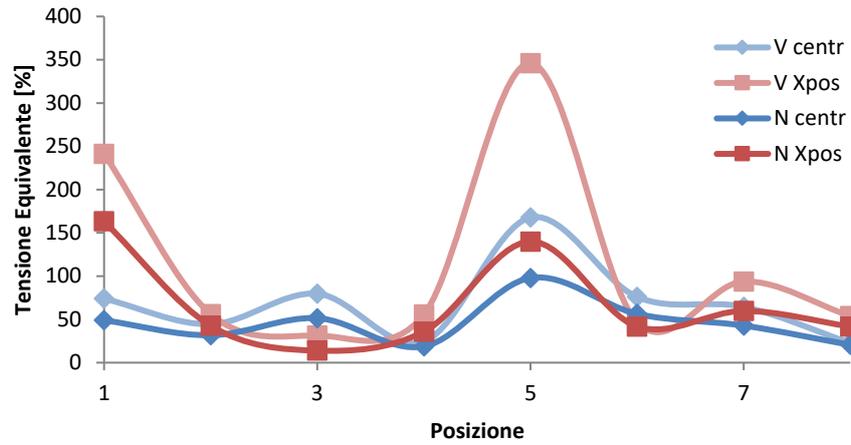


Figura D.55 Tensioni equivalenti nei punti F.

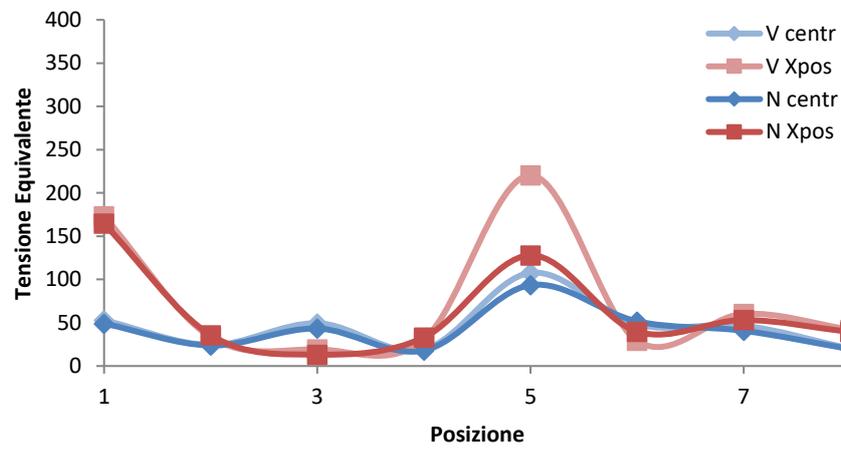


Figura D.56 Tensioni equivalenti nei punti G.

D.8. Braccio a tre sezioni colare di rinforzo nella zona superiore

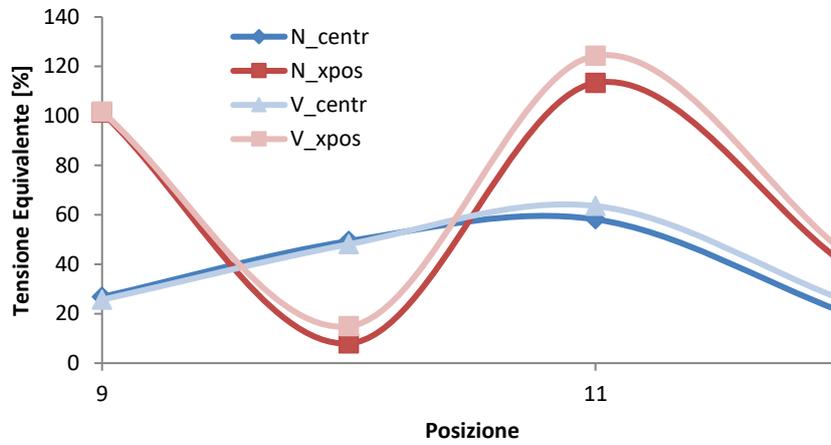


Figura D.57 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

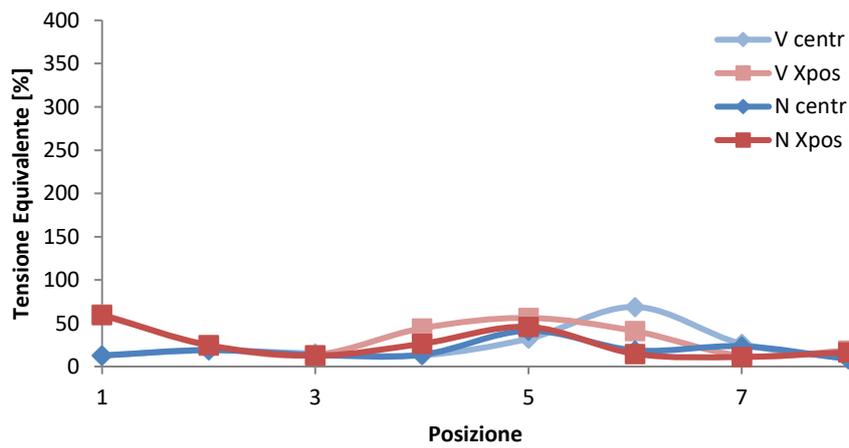


Figura D.58 Tensioni equivalenti nei punti A.

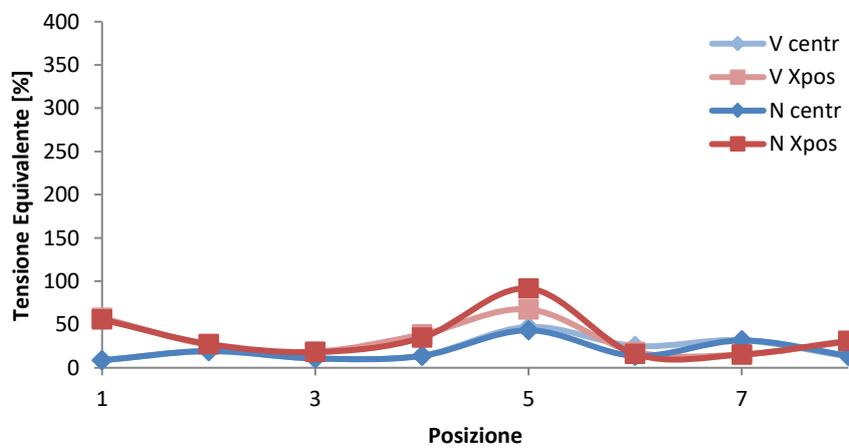


Figura D.59 Tensioni equivalenti nei punti B.

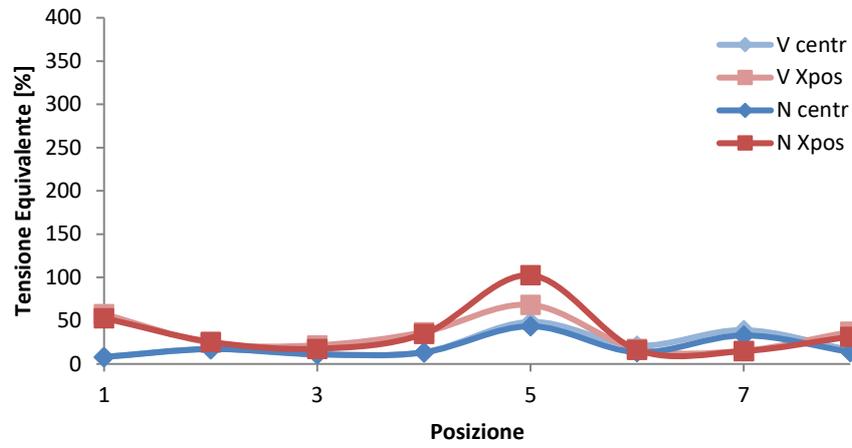


Figura D.60 Tensioni equivalenti nei punti C.

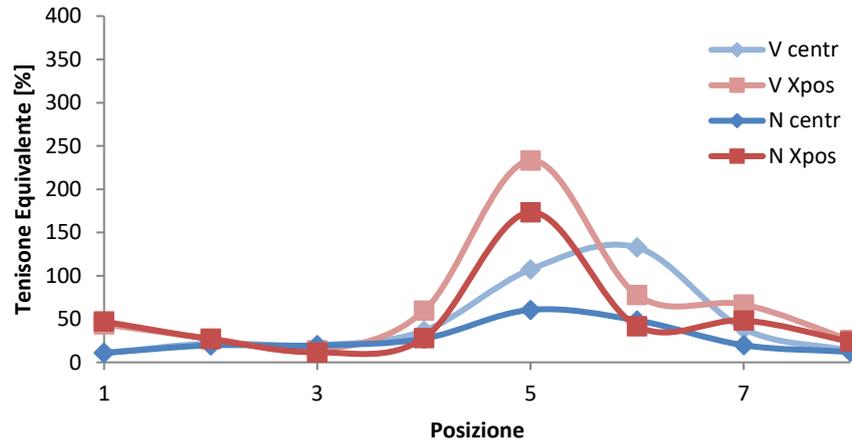


Figura D.61 Tensioni equivalenti nei punti D.

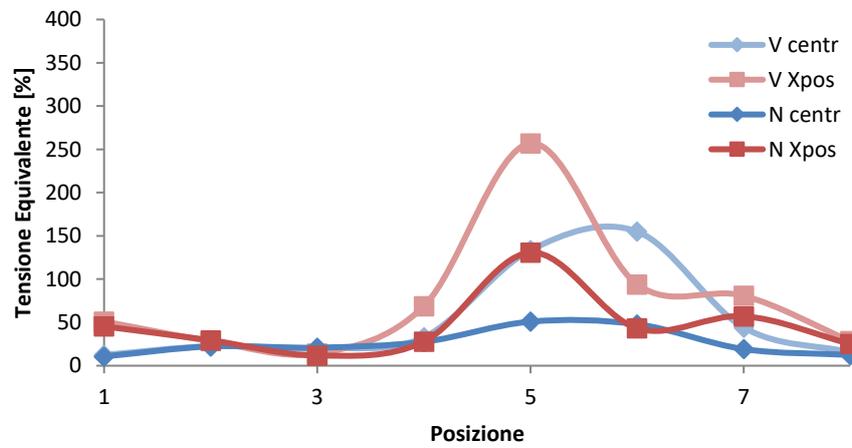


Figura D.62 Tensioni equivalenti nei punti E.

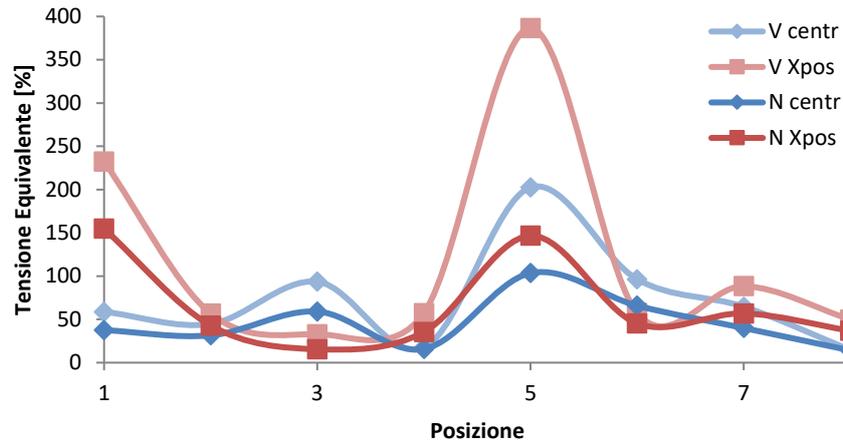


Figura D.63 Tensioni equivalenti nei punti F.

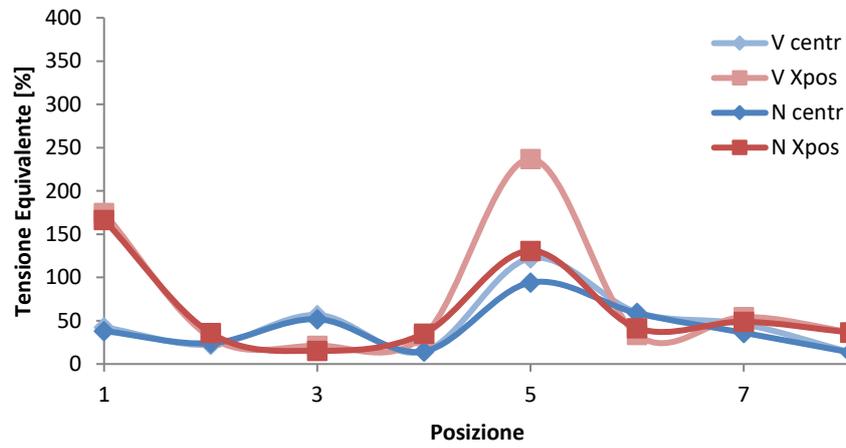


Figura D.64 Tensioni equivalenti nei punti G.

D.9. Braccio a due sezioni due colari di rinforzo

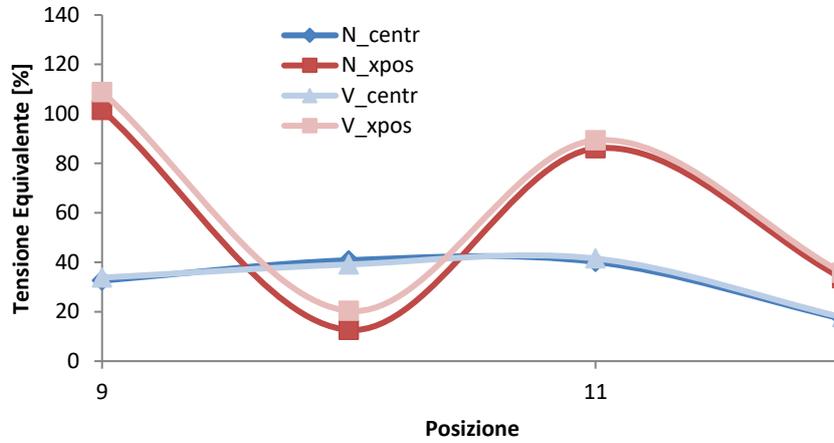


Figura D.65 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

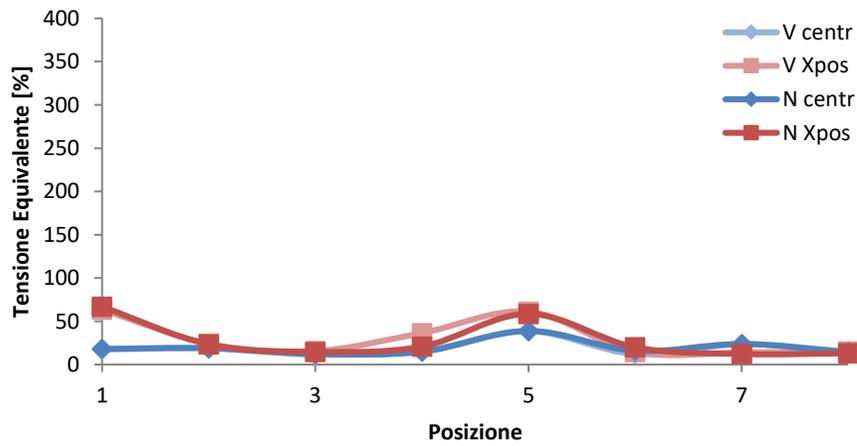


Figura D.66 Tensioni equivalenti nei punti A.

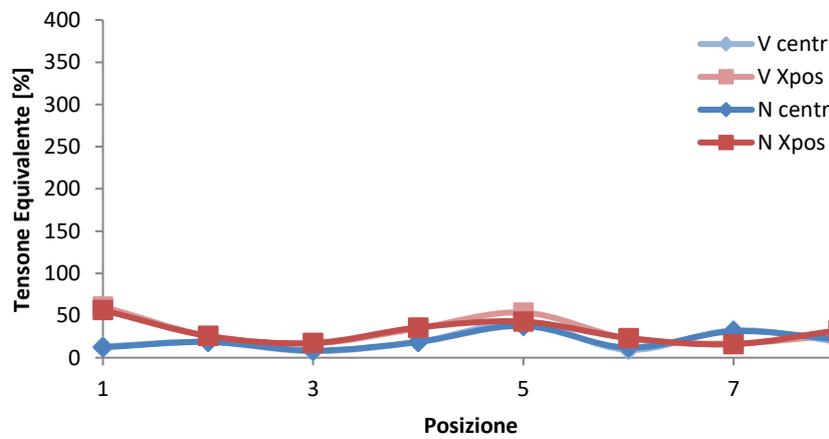


Figura D.67 Tensioni equivalenti nei punti B.

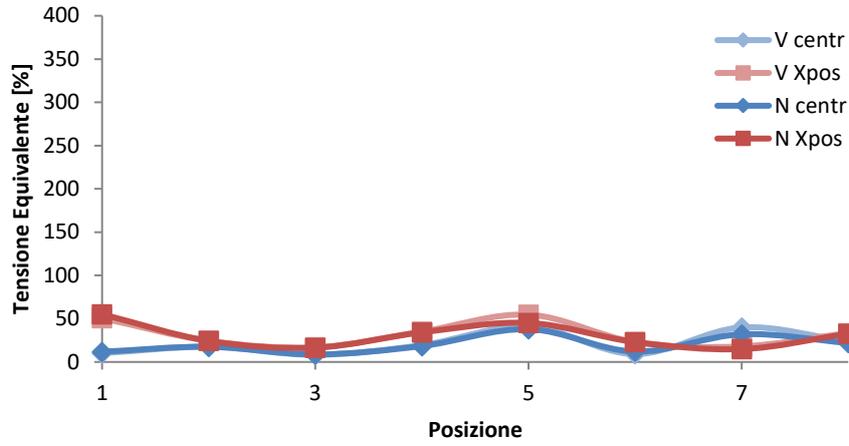


Figura D.68 Tensioni equivalenti nei punti C.

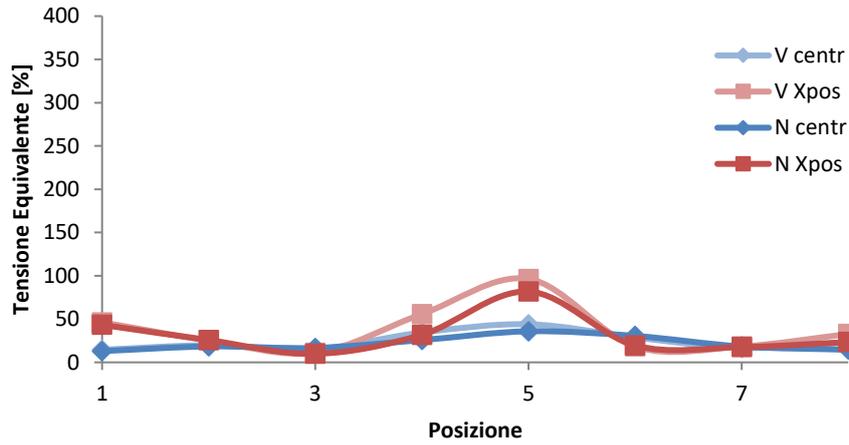


Figura D.69 Tensioni equivalenti nei punti D.

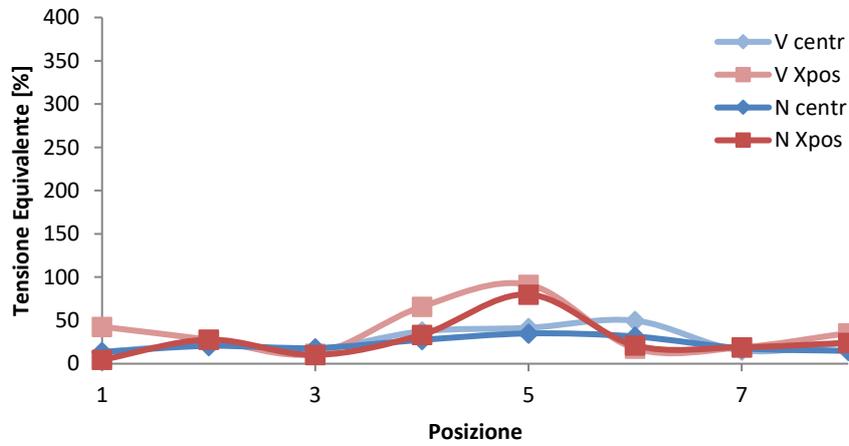


Figura D.70 Tensioni equivalenti nei punti E.

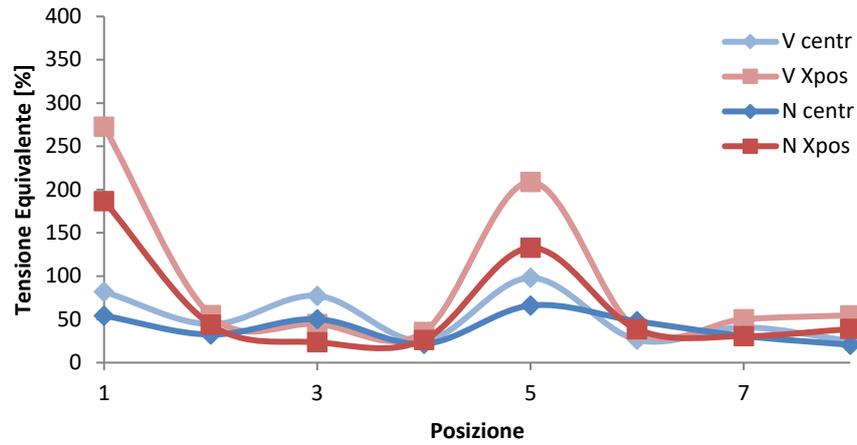


Figura D.71 Tensioni equivalenti nei punti F.

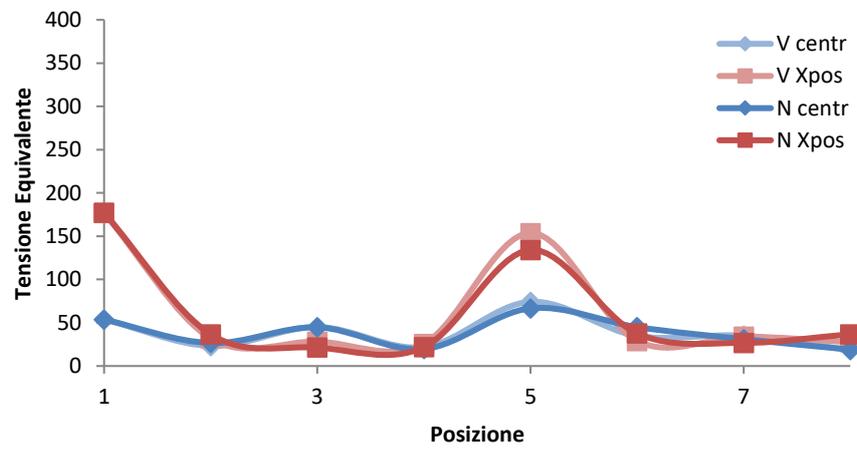


Figura D.72 Tensioni equivalenti nei punti G.

D.10. Braccio a due sezioni due colari di rinforzo

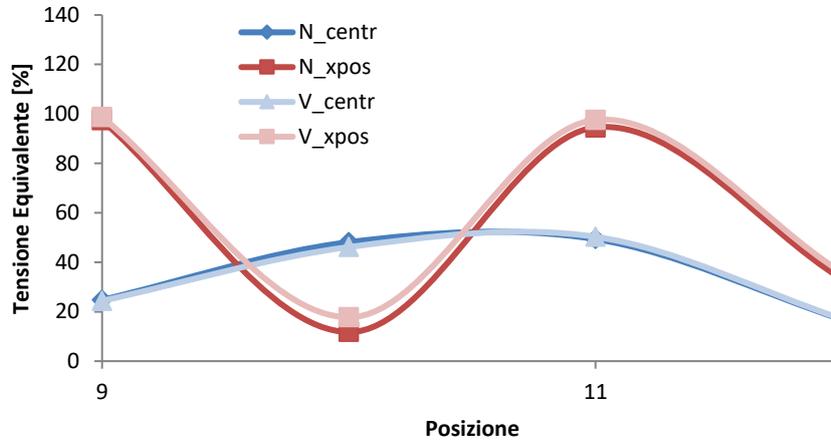


Figura D.73 Tensioni equivalenti lungo il braccio.

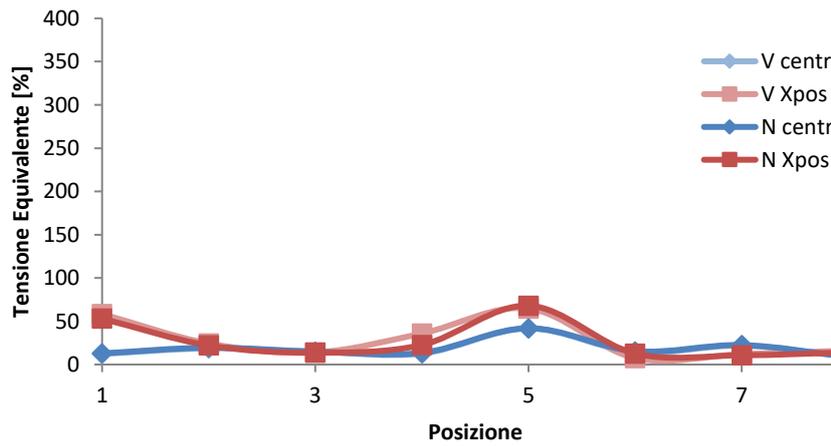


Figura D.74 Tensioni equivalenti nei punti A.

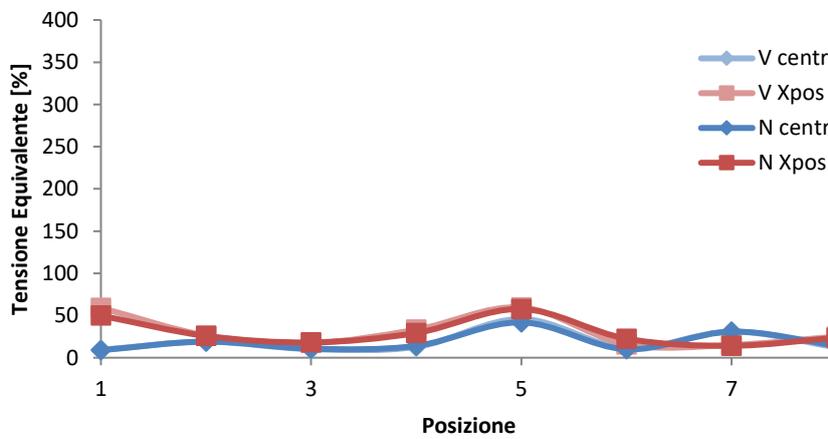


Figura D.75 Tensioni equivalenti nei punti B.

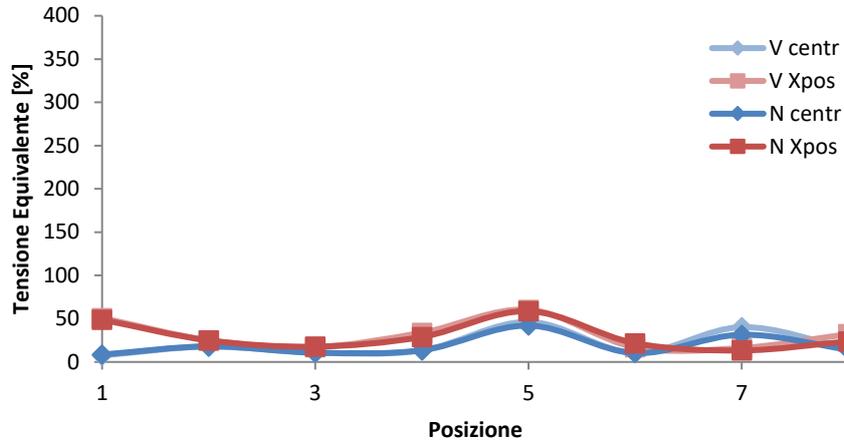


Figura D.76 Tensioni equivalenti nei punti C.

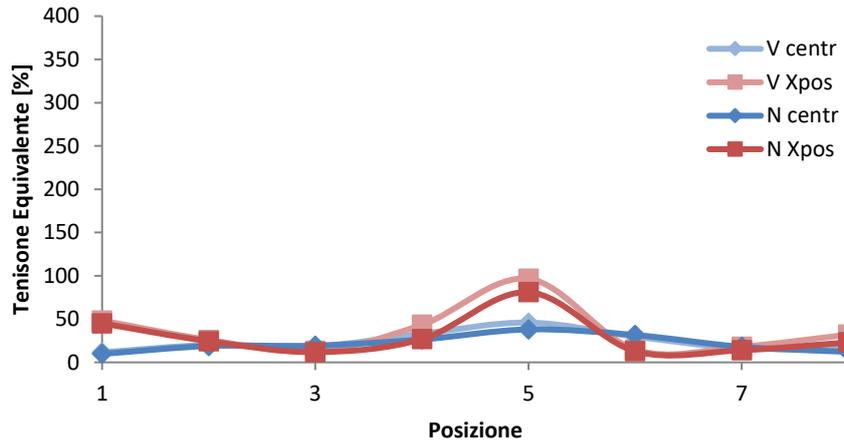


Figura D.77 Tensioni equivalenti nei punti D.

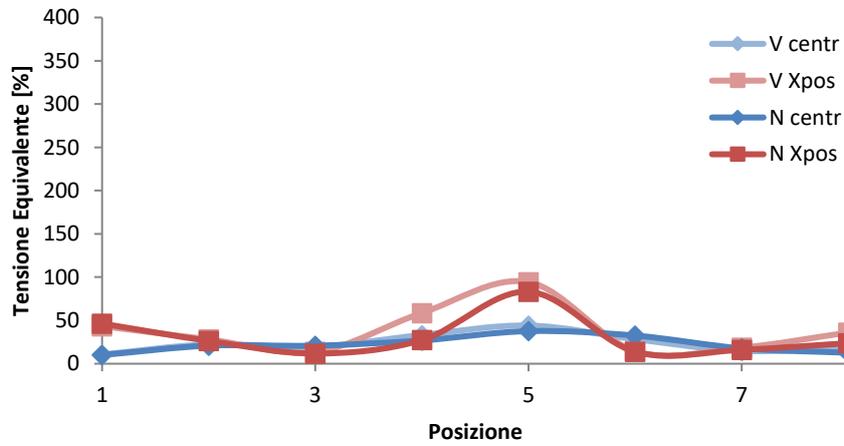


Figura D.78 Tensioni equivalenti nei punti E.

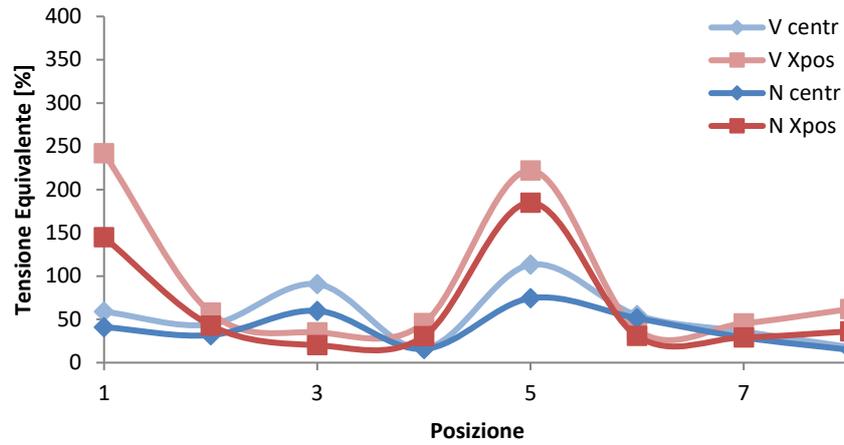


Figura D.79 Tensioni equivalenti nei punti F.

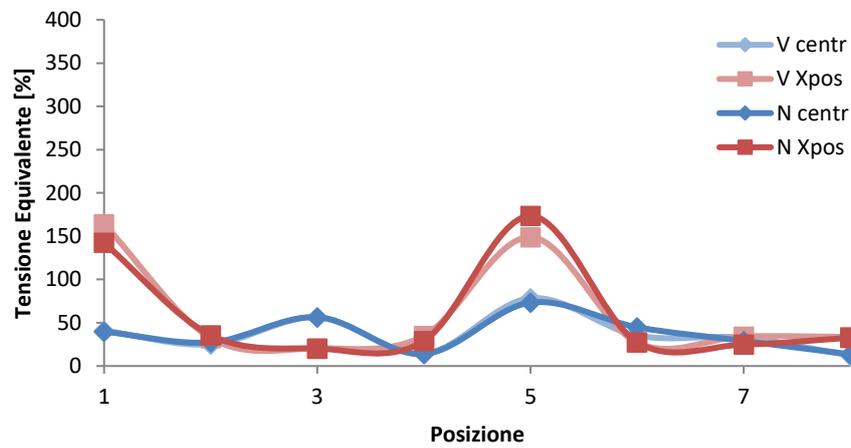


Figura D.80 Tensioni equivalenti nei punti G.

Appendice E

In questa appendice vengono riportati i grafici degli andamenti delle tensioni equivalenti dei casi ritenuti rilevanti delle tabelle 4.6, e 4.7. Tensioni equivalenti prese nei punti descritti dalla figura 4.33. Sono messi sul grafico:

- In blu le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo
- In rosso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo
- In verde le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato
- In viola le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul braccio quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato

E.1. Braccio a due sezioni con il carico centrato sulla pala

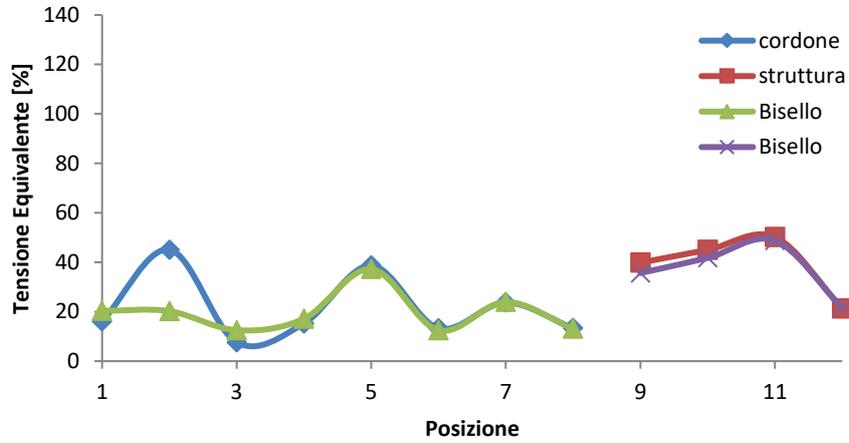


Figura E.1 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

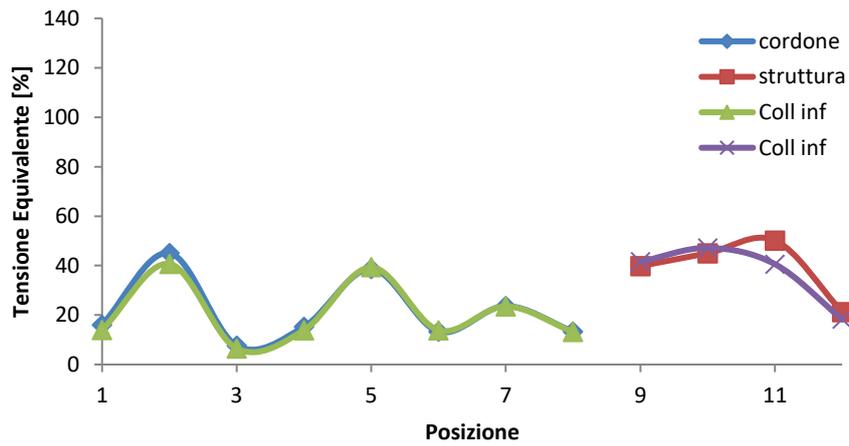


Figura E.2 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

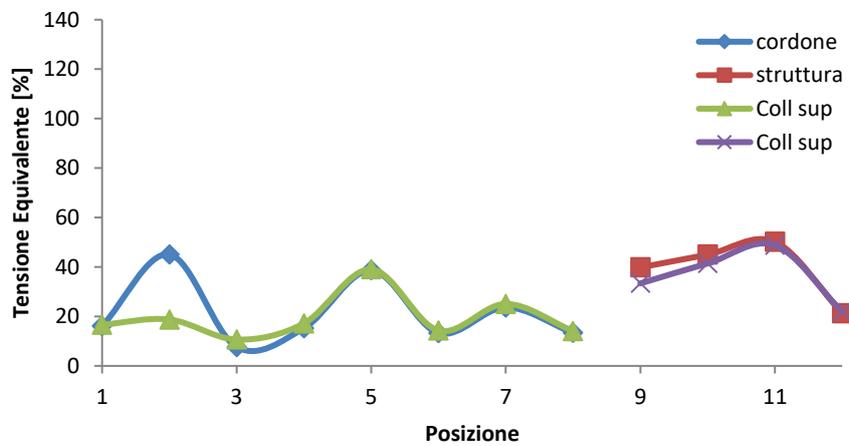


Figura E.3 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

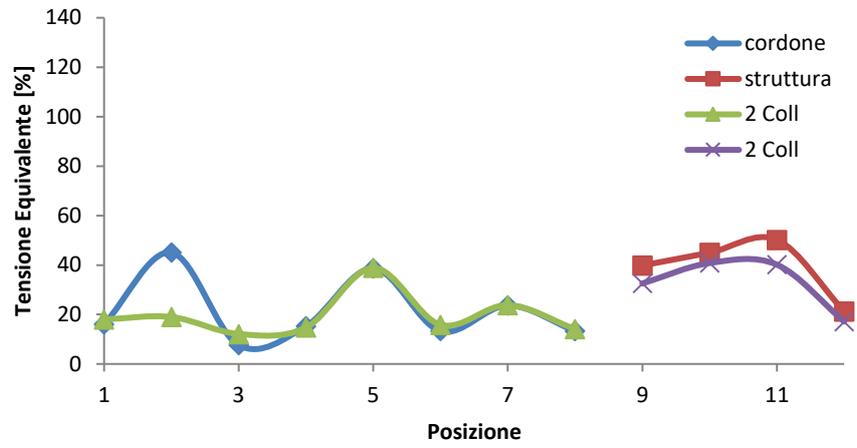


Figura E.4 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

E.2. Braccio a due sezioni con il carico sullo spigolo X positivo della pala

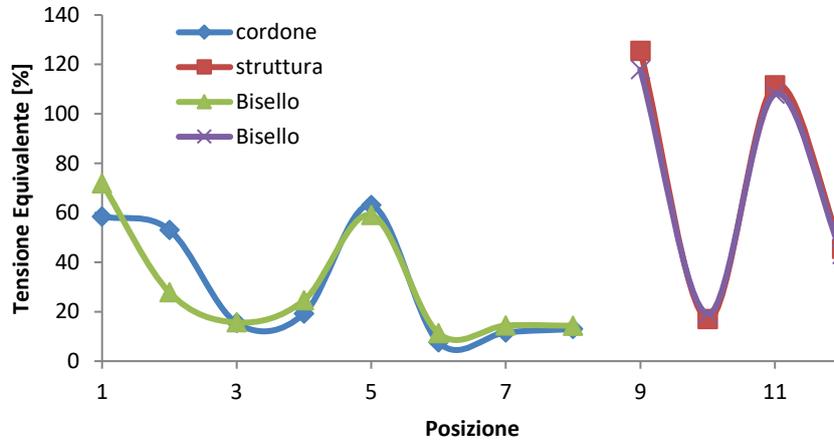


Figura E.5 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

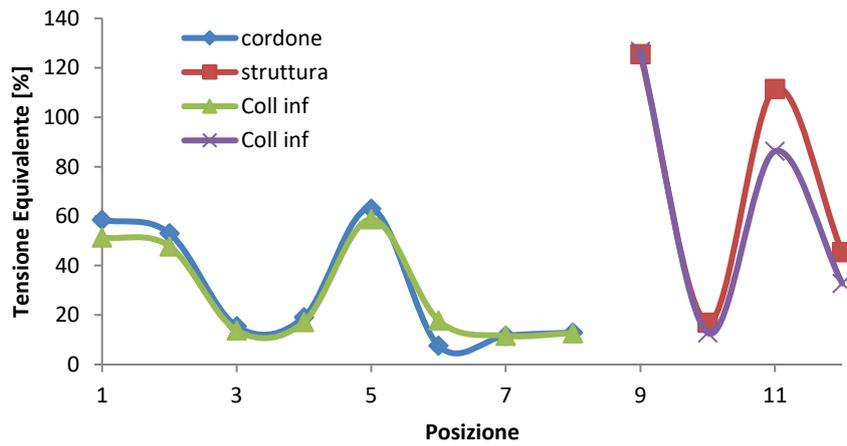


Figura E.6 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

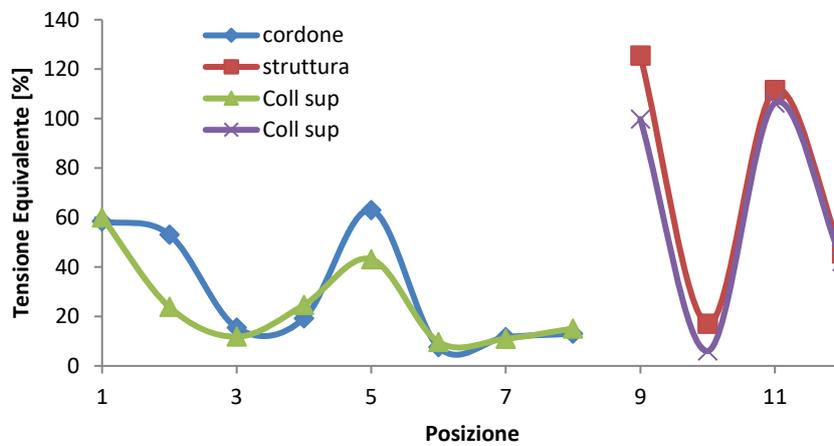


Figura E.7 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

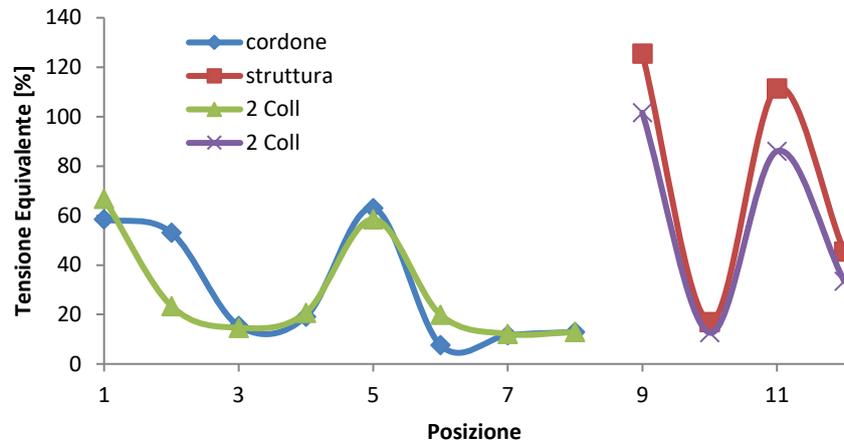


Figura E.8 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

E.3. Braccio a tre sezioni con il carico centrato sulla pala

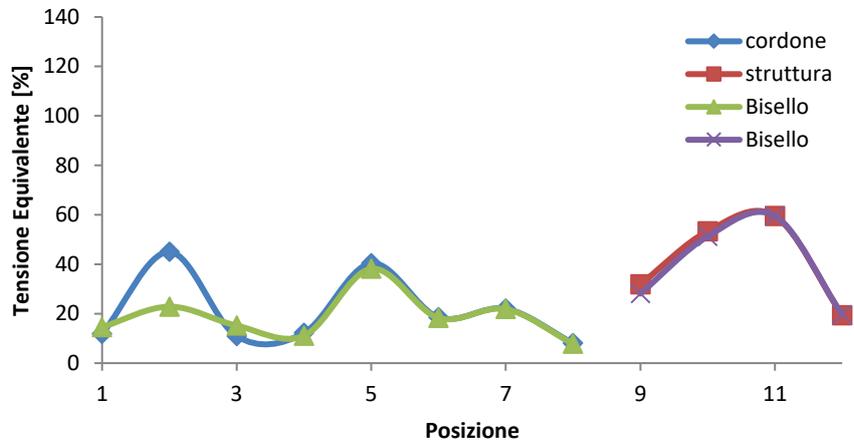


Figura E.9 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

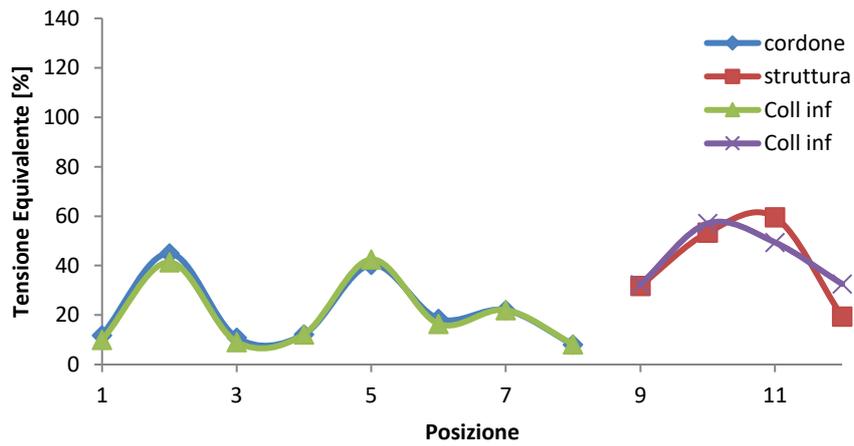


Figura E.10 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

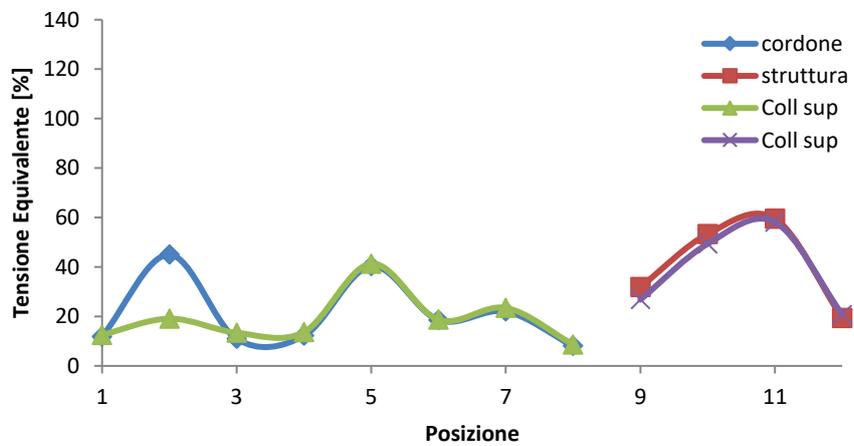


Figura E.11 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

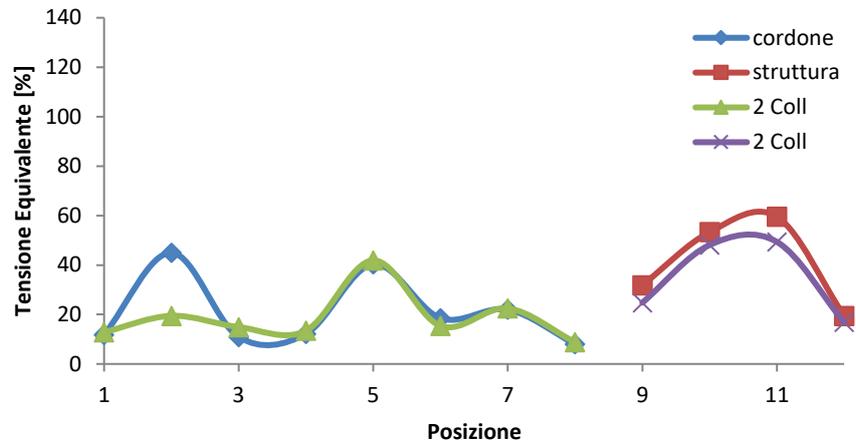


Figura E.12 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

E.3. Braccio a tre sezioni con il carico sullo spigolo X positivo della pala

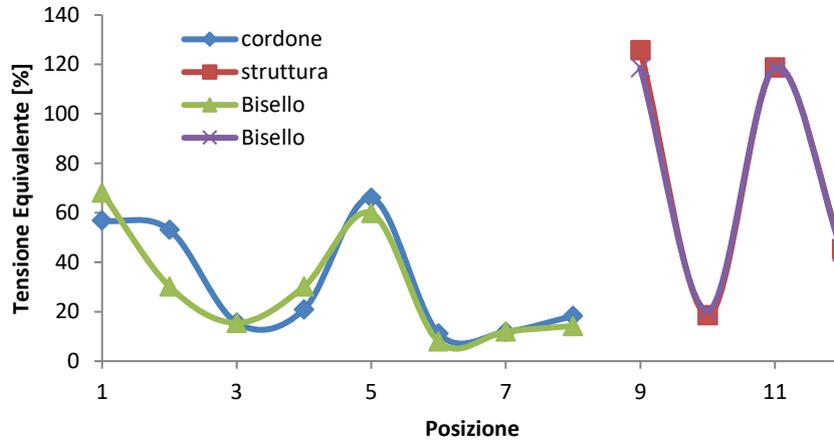


Figura E.13 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

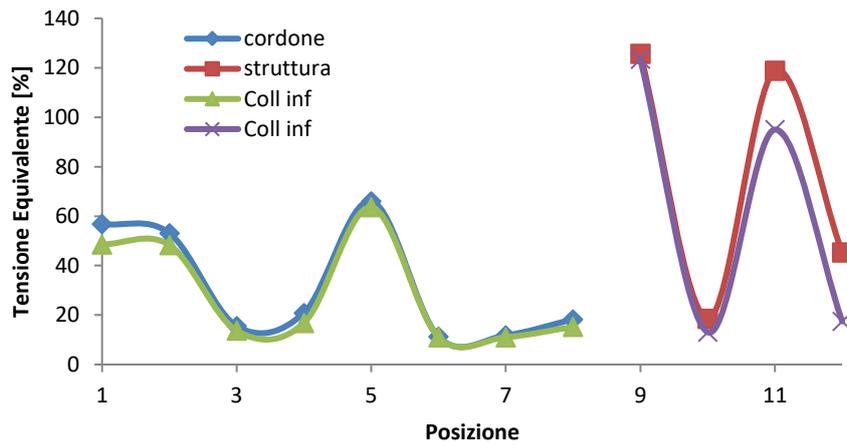


Figura E.14 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

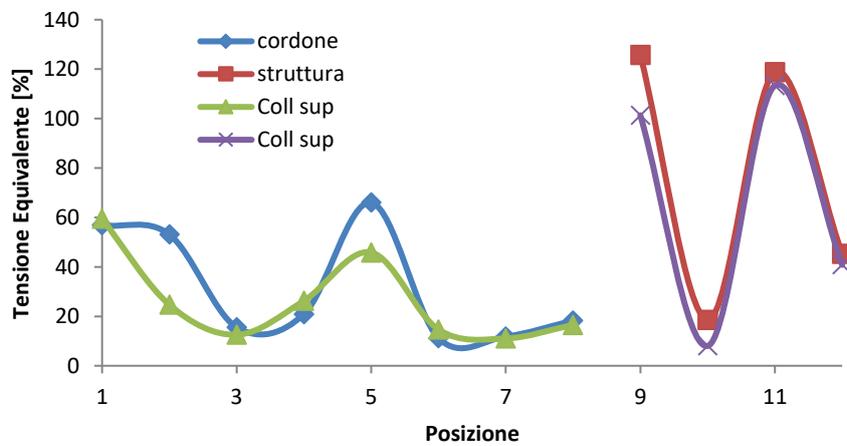


Figura E.15 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

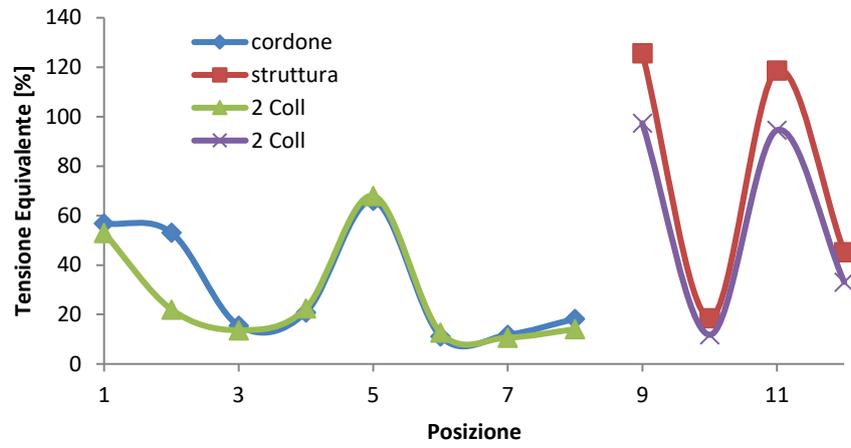


Figura E.16 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

Appendice F

In questa appendice vengono riportati i grafici degli andamenti delle tensioni equivalenti misurate nei punti descritti dalla figura 4.34 nelle posizioni illustrate dalla figura 4.33. Sono messi sul grafico:

- In blu chiaro le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo con il carico centrato sulla pala
- In rosso chiaro le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando non si utilizza nessun sistema di rinforzo con il carico sullo spigolo a X positivo della pala
- In blu intenso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato con il carico centrato sulla pala
- In rosso intenso le tensioni equivalenti percentuali lungo i punti sul cordone di saldatura specificati quando si utilizza il sistema di rinforzo specificato con il carico centrato sullo spigolo a X positivo della pala

F.1. Braccio a due sezioni punto A

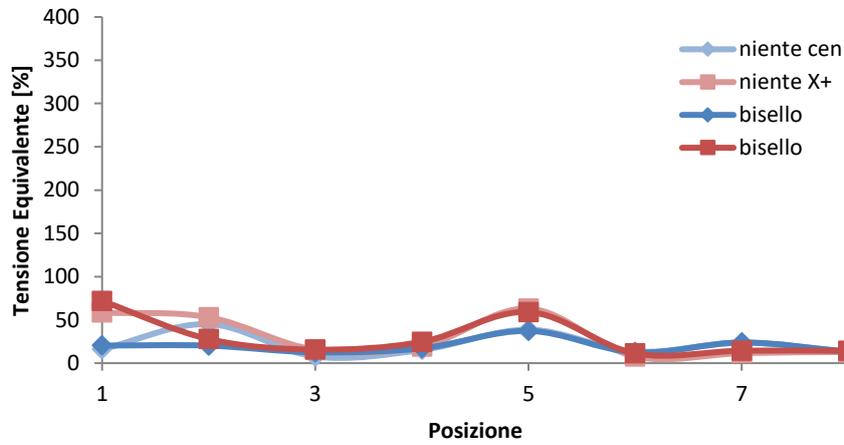


Figura F.1 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

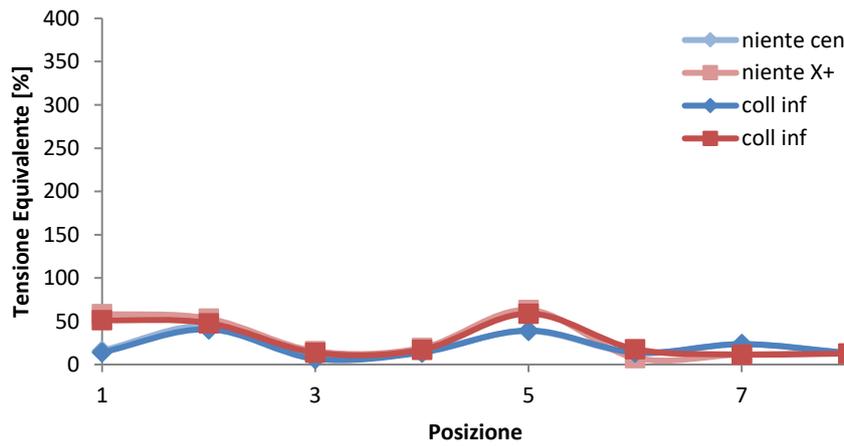


Figura F.2 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

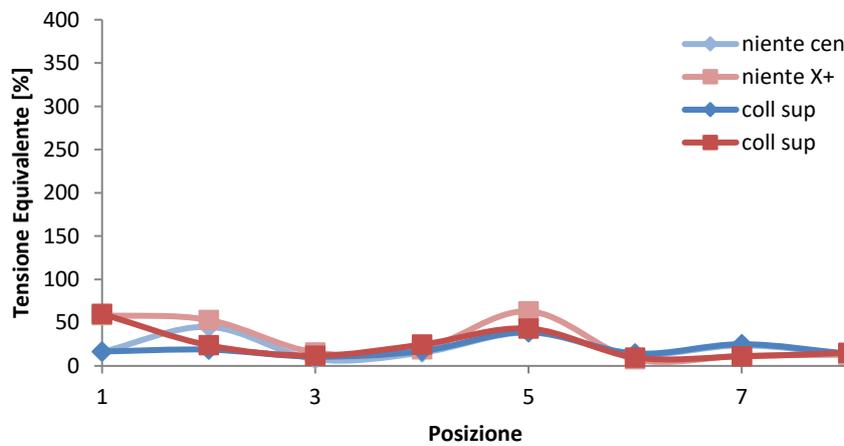


Figura F.3 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

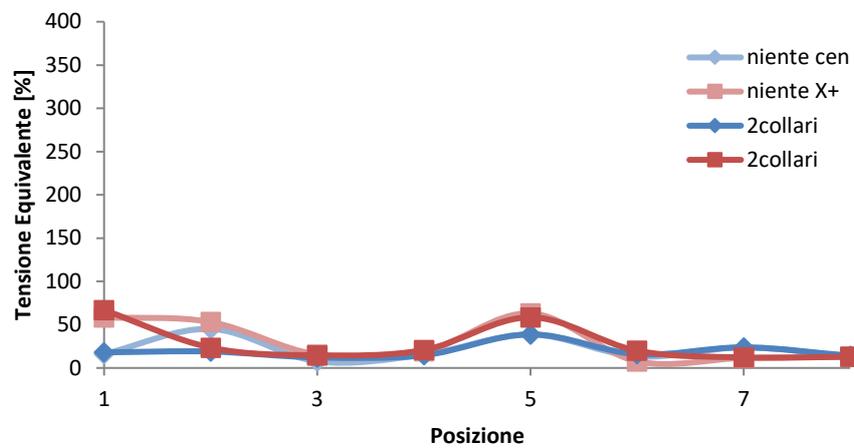


Figura F.4 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.2. Braccio a due sezioni punto B

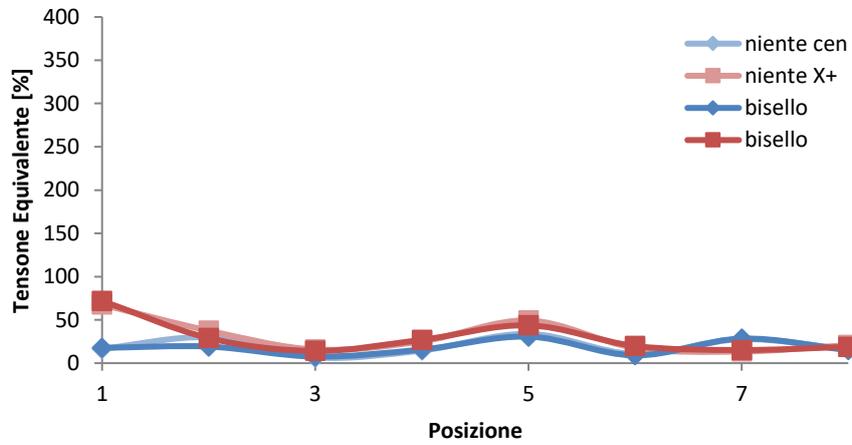


Figura F.5 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

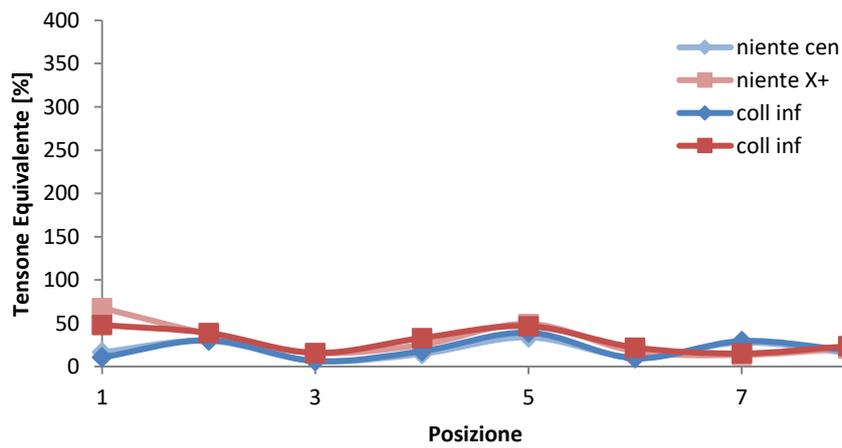


Figura F.6 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

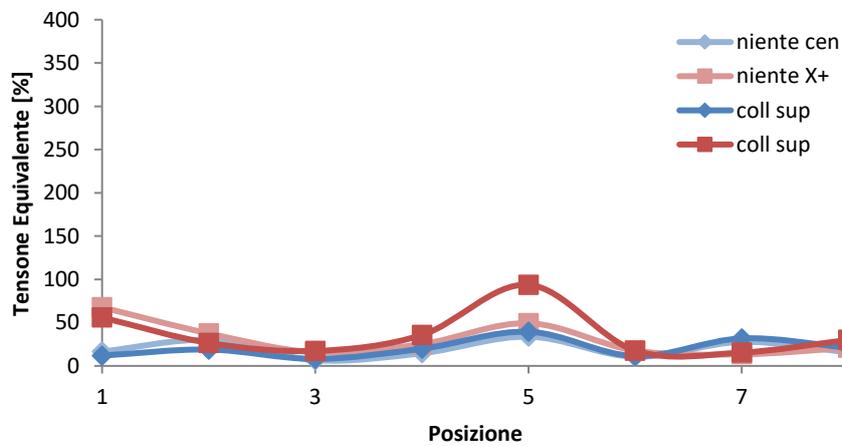


Figura F.7 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

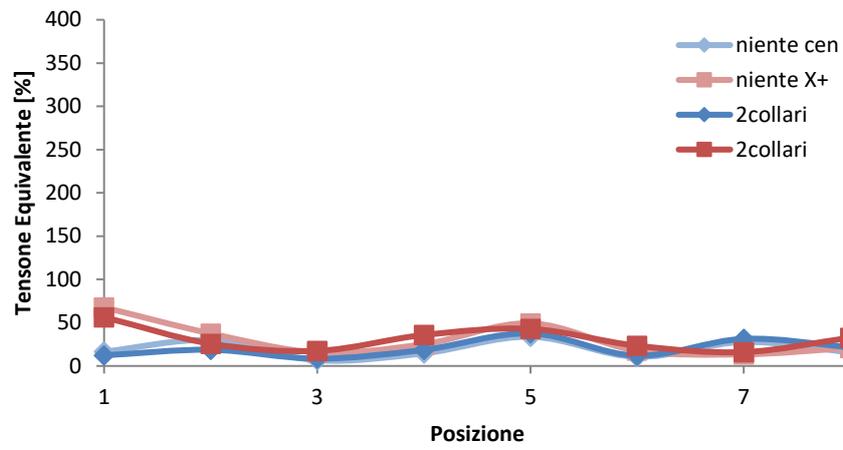


Figura F.8 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.3. Braccio a due sezioni punto C

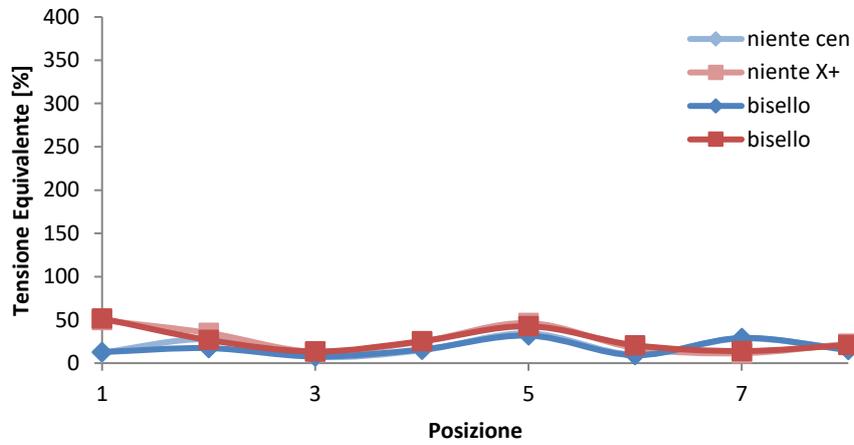


Figura F.9 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

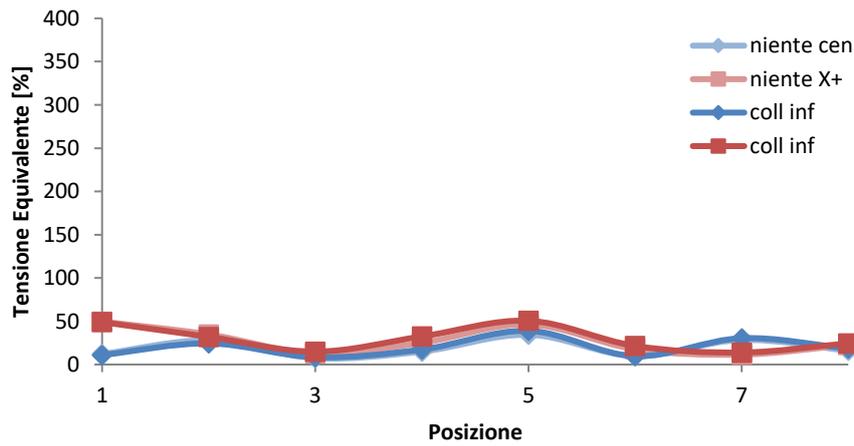


Figura F.10 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

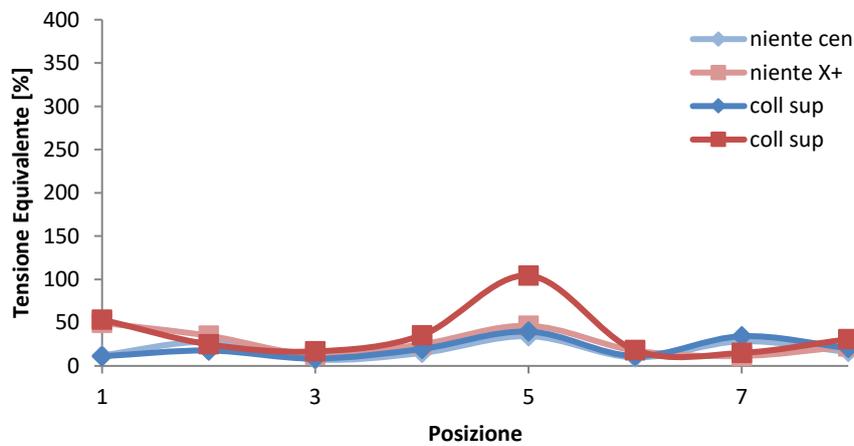


Figura F.11 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

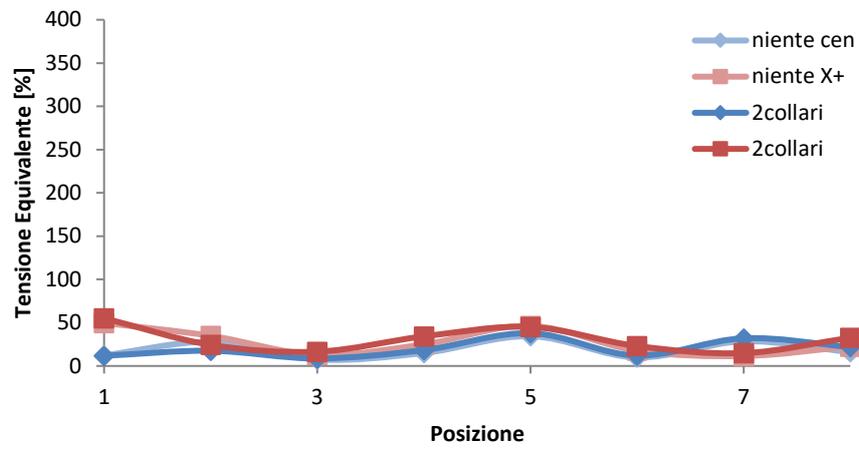


Figura F.12 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.4. Braccio a due sezioni punto D

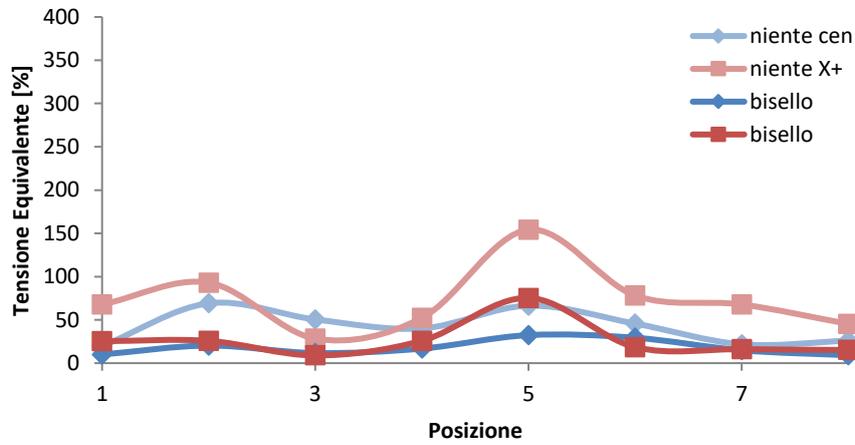


Figura F.13 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

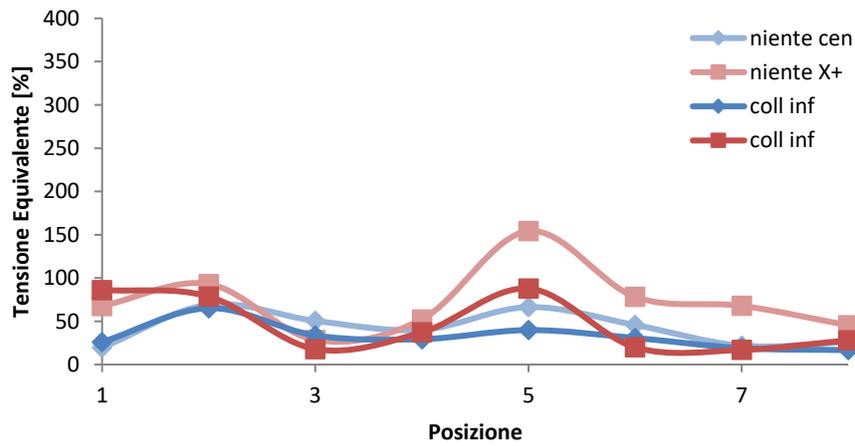


Figura F.14 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

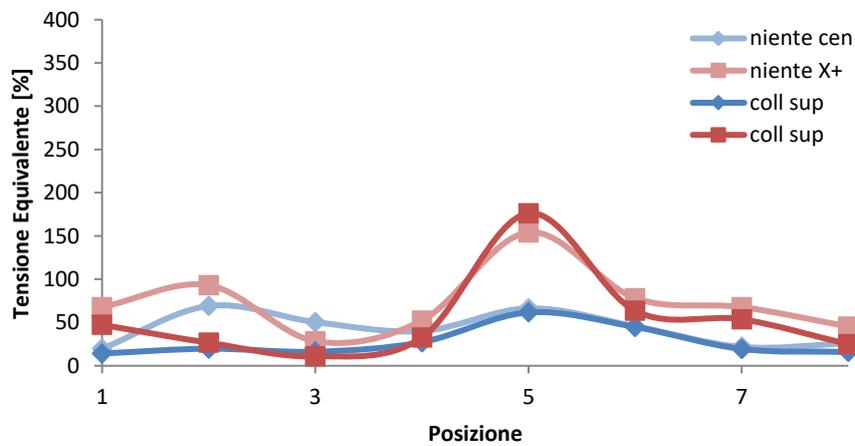


Figura F.15 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

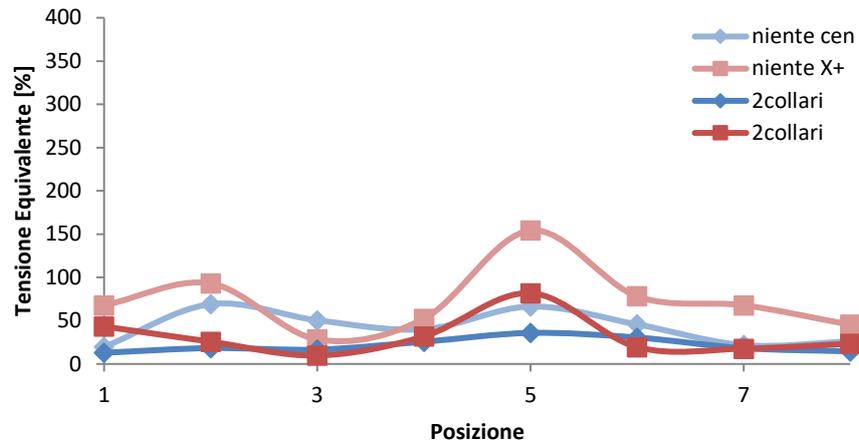


Figura F.16 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.5. Braccio a due sezioni punto E

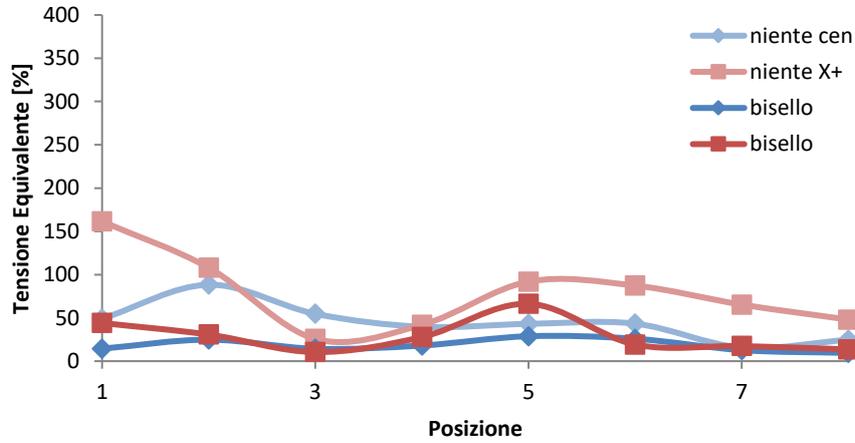


Figura F.17 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

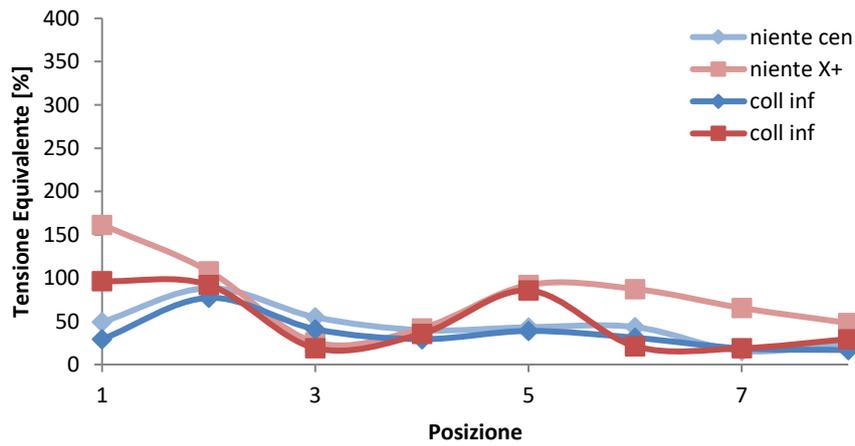


Figura F.18 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

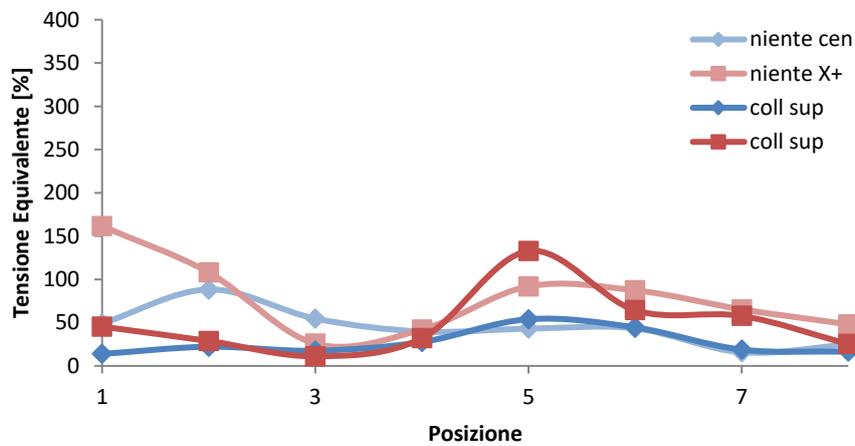


Figura F.19 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

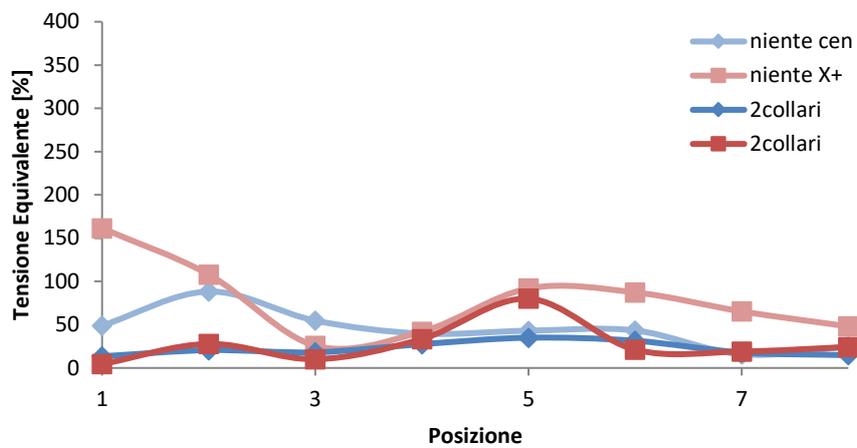


Figura F.20 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.6. Braccio a due sezioni punto F

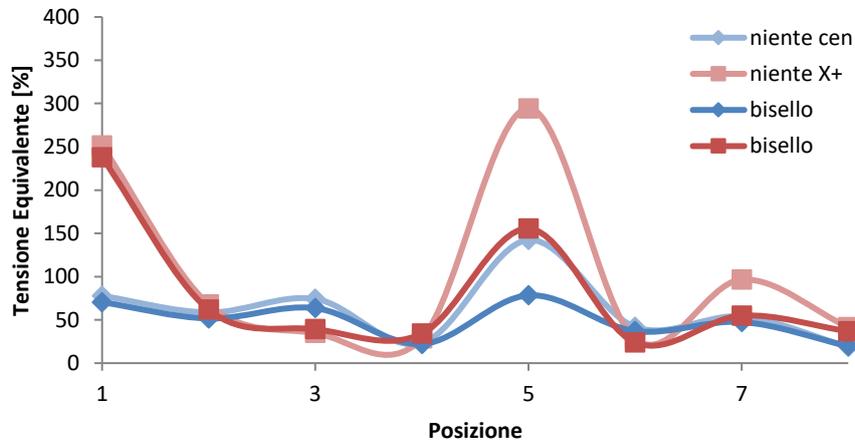


Figura F.21 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

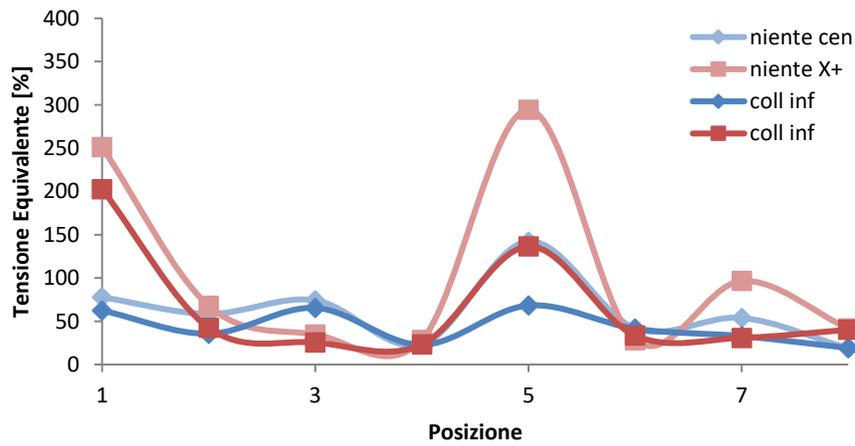


Figura F.22 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

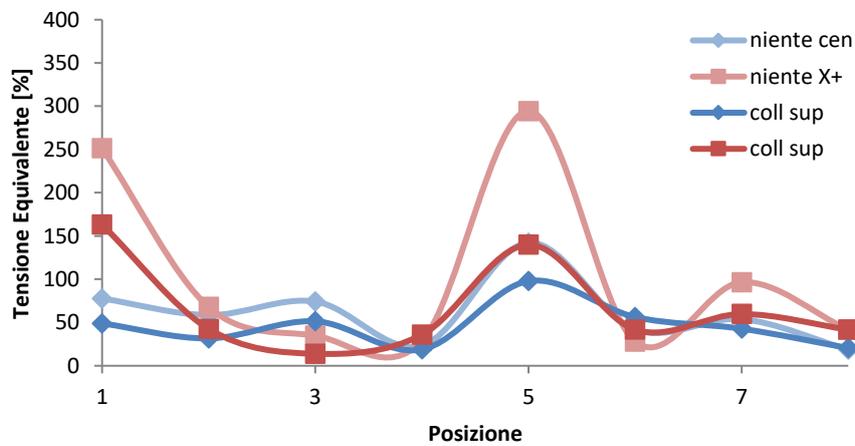


Figura F.23 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

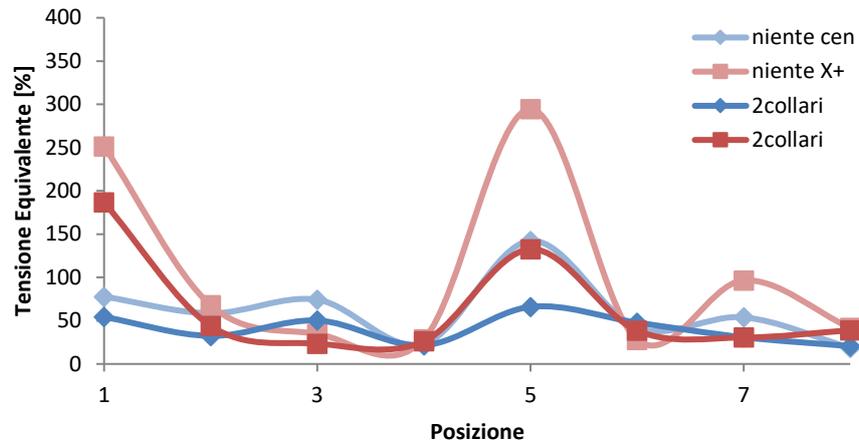


Figura F.24 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.7. Braccio a due sezioni punto G

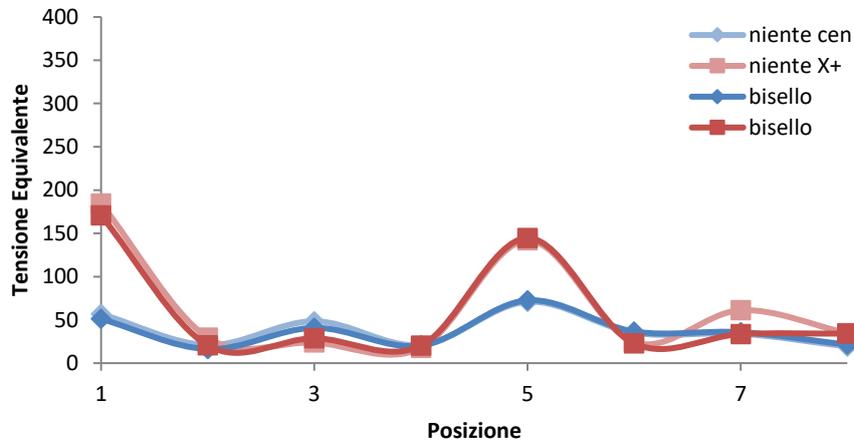


Figura F.25 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

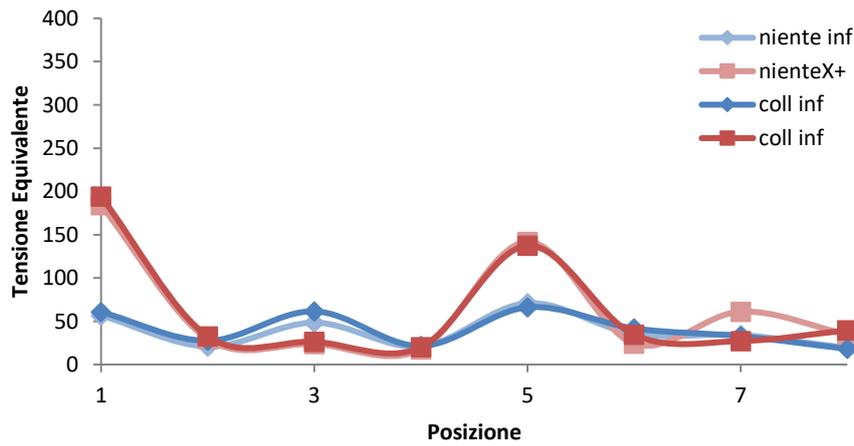


Figura F.26 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

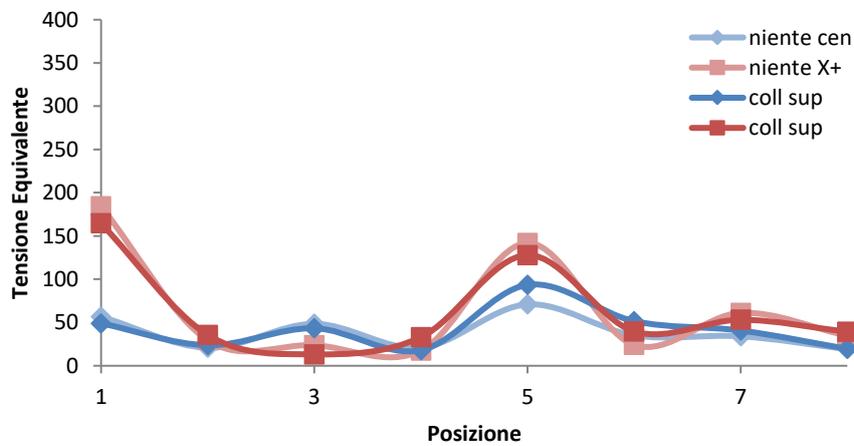


Figura F.27 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

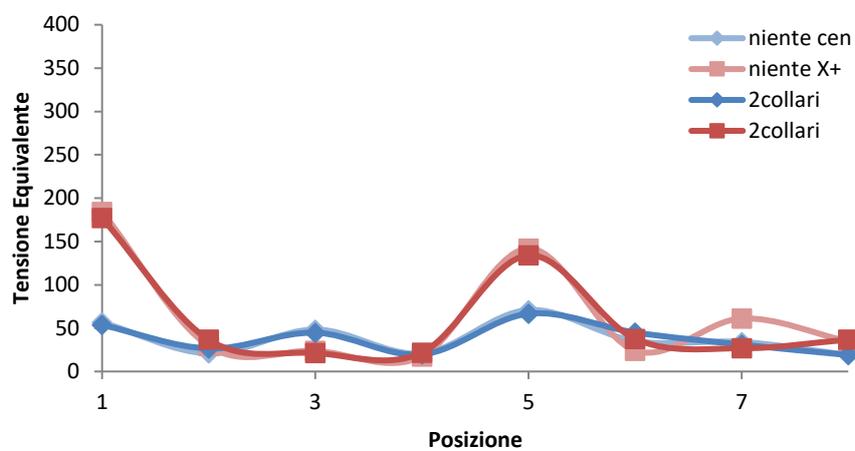


Figura F.28 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.8. Braccio a tre sezioni punto A

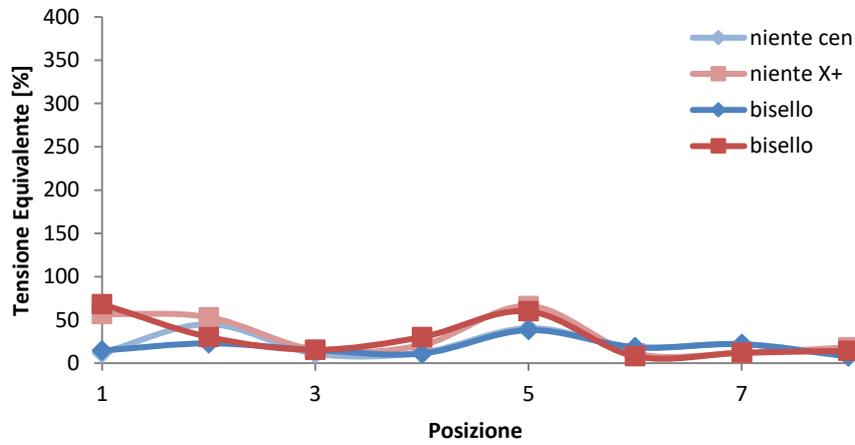


Figura F.29 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

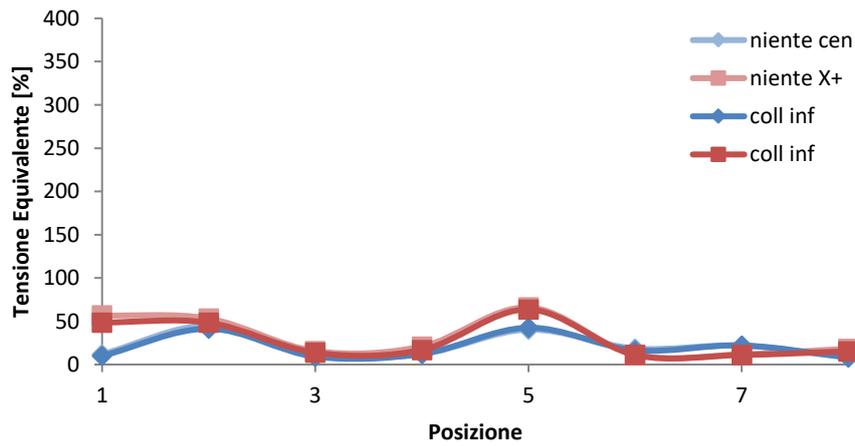


Figura F.30 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

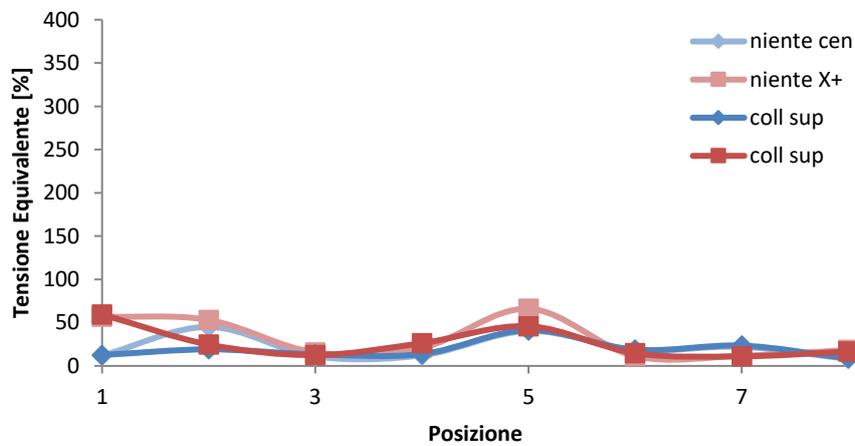


Figura F.31 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

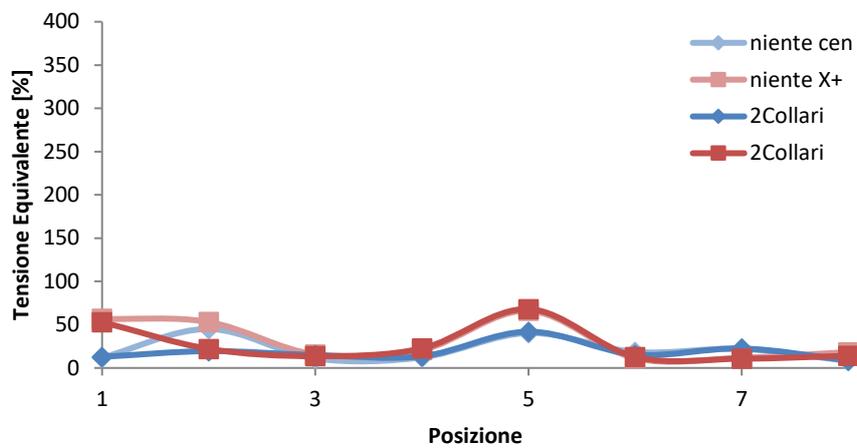


Figura F.32 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.9. Braccio a tre sezioni punto B

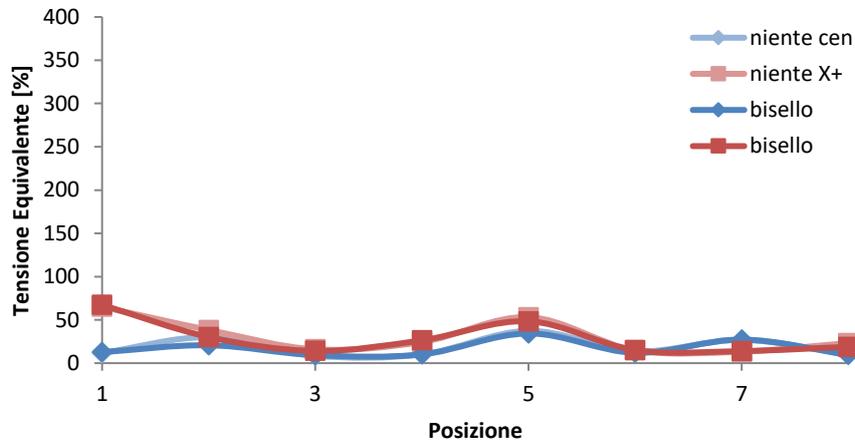


Figura F.33 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

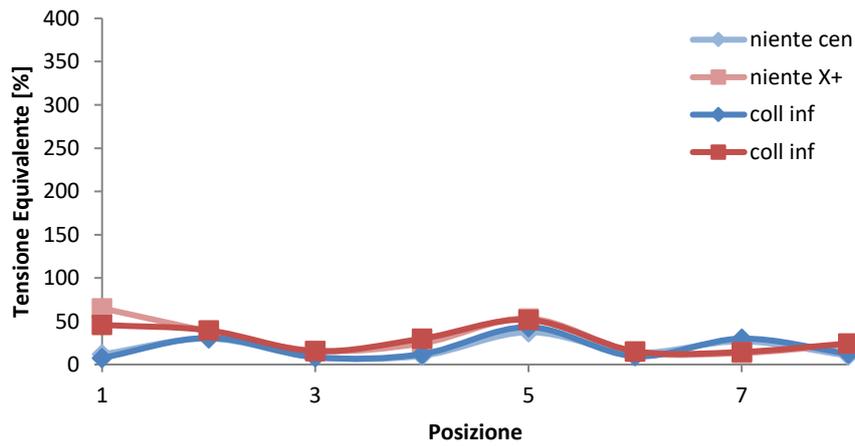


Figura F.34 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

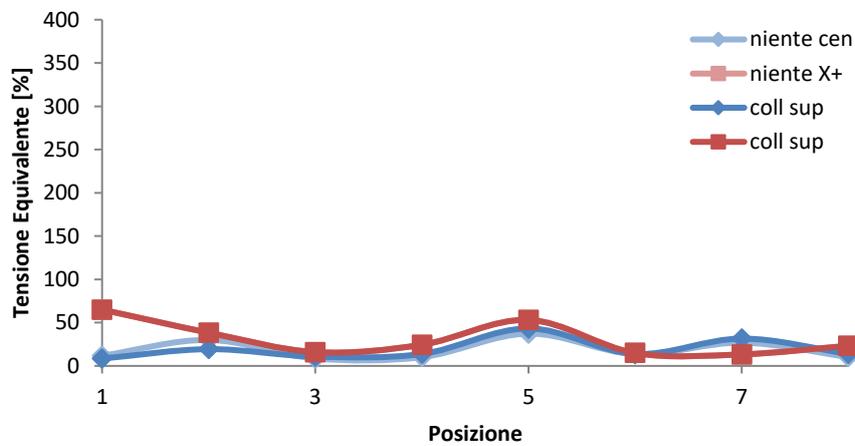


Figura F.35 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

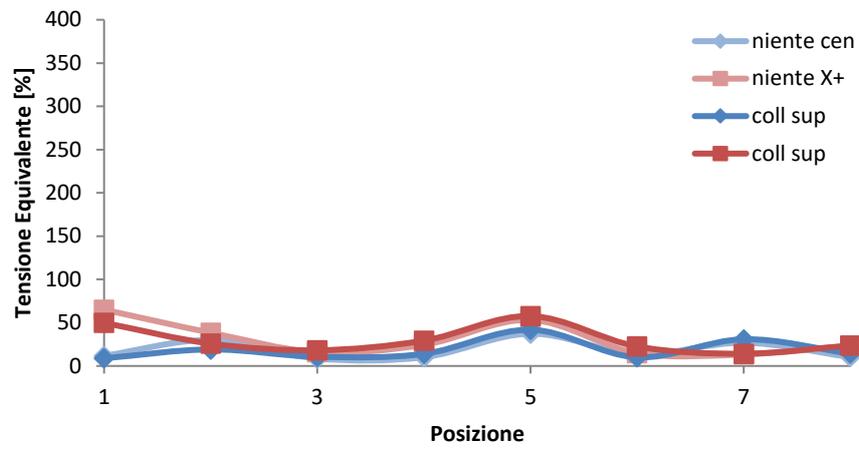


Figura F.36 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.10. Braccio a tre sezioni punto C

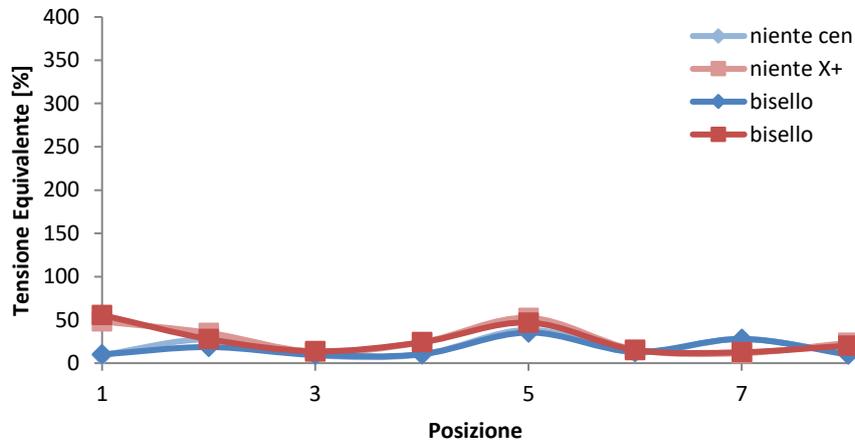


Figura F.37 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

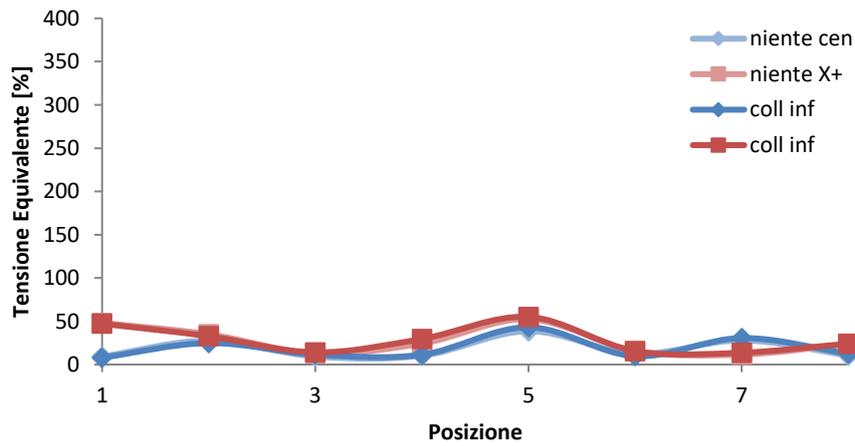


Figura F.38 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

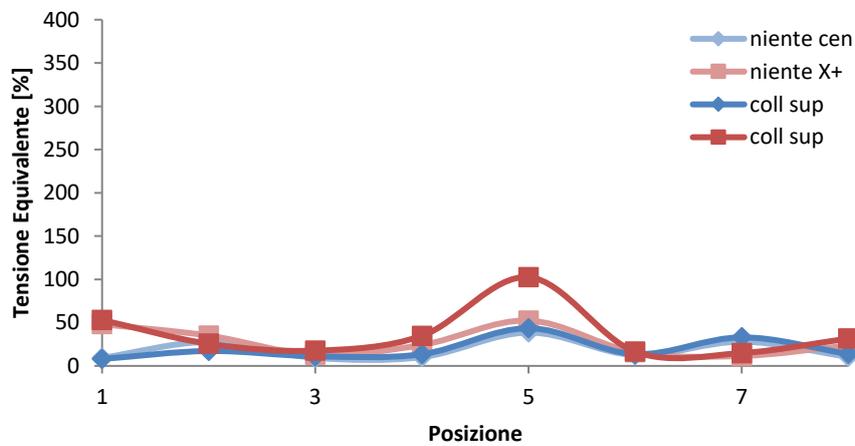


Figura F.39 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

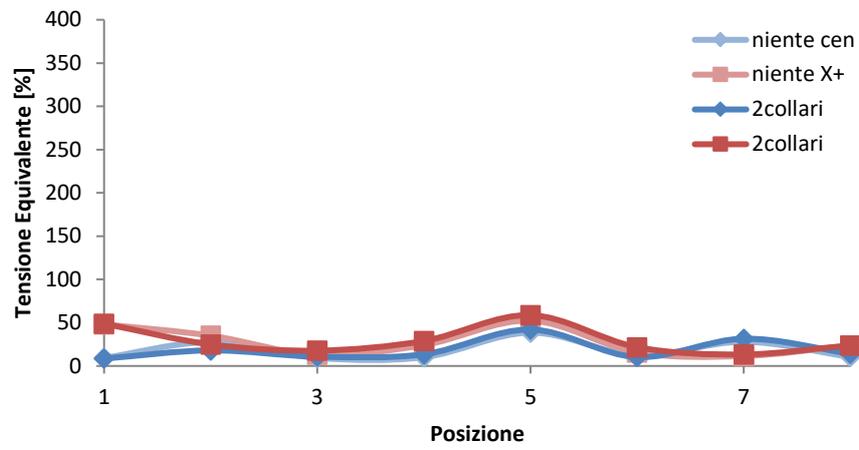


Figura F.40 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.11. Braccio a tre sezioni punto D

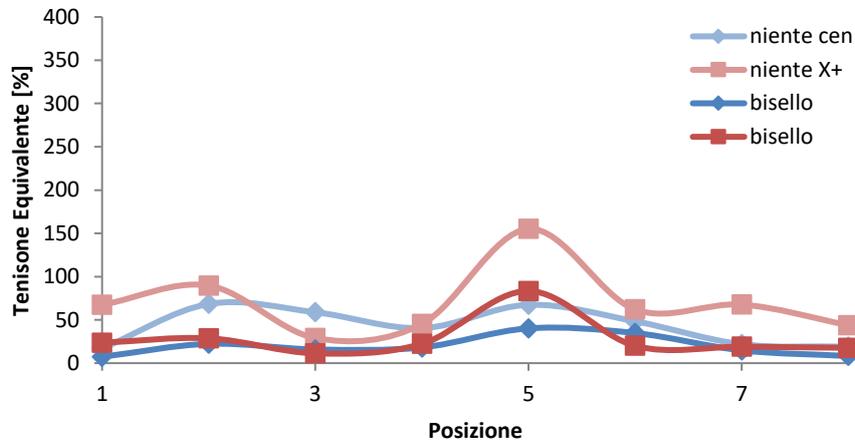


Figura F.41 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

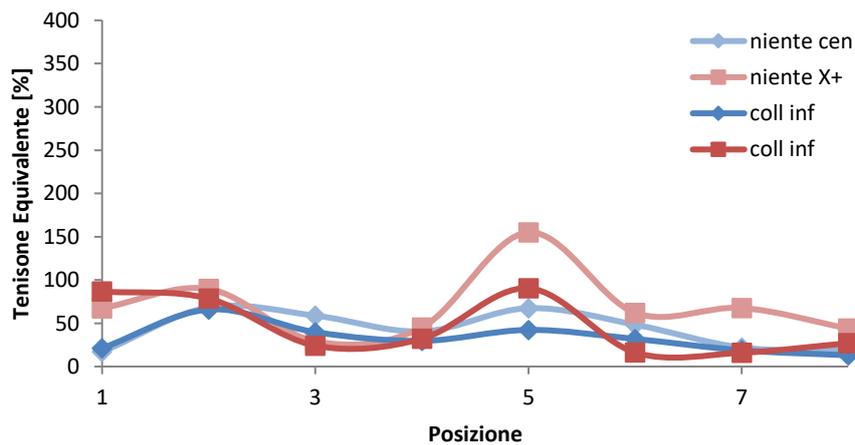


Figura F.42 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

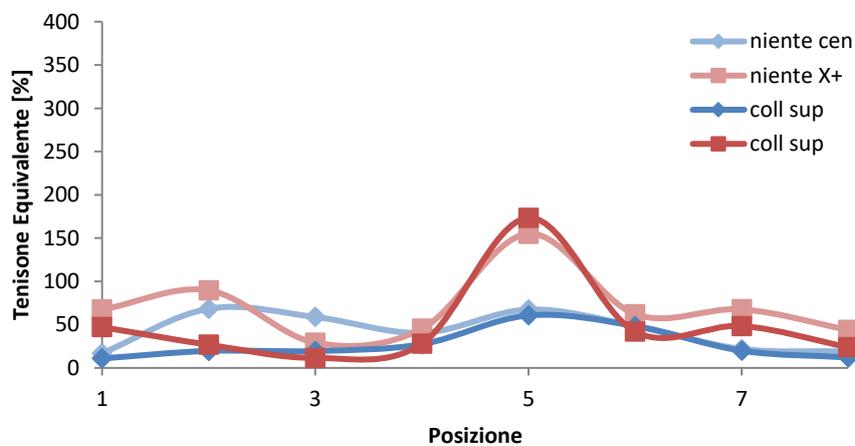


Figura F.43 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

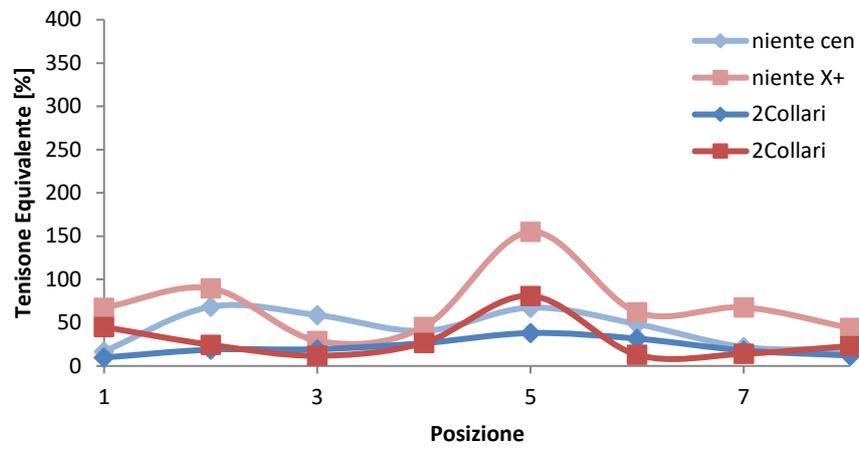


Figura F.44 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.12. Braccio a tre sezioni punto E

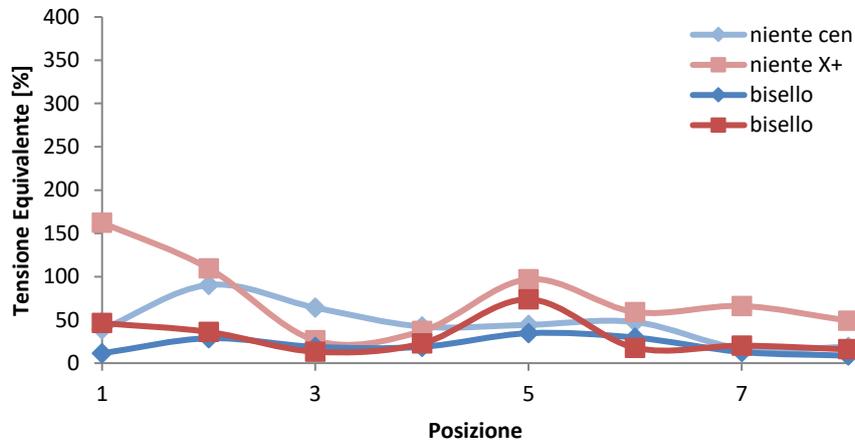


Figura F.45 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

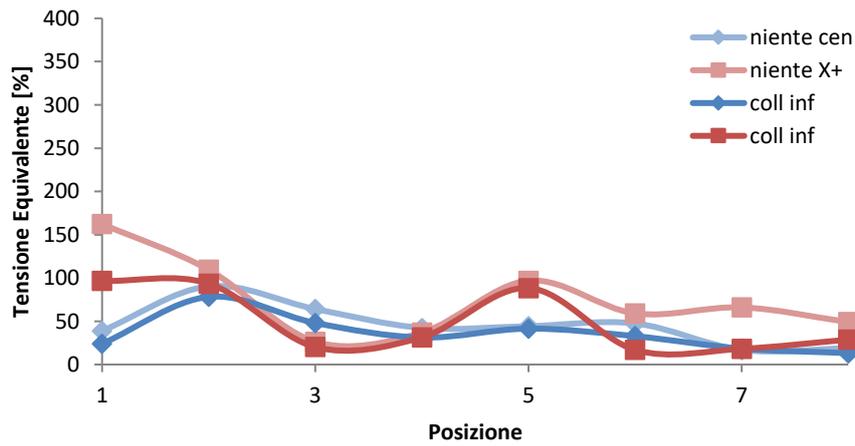


Figura F.46 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

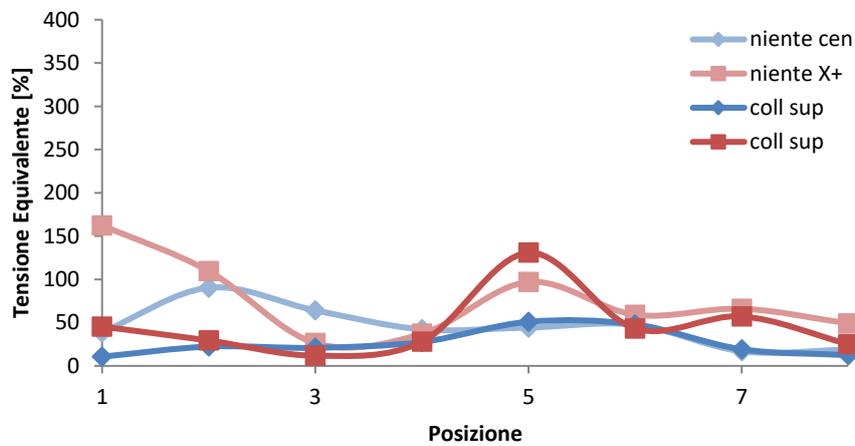


Figura F.47 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

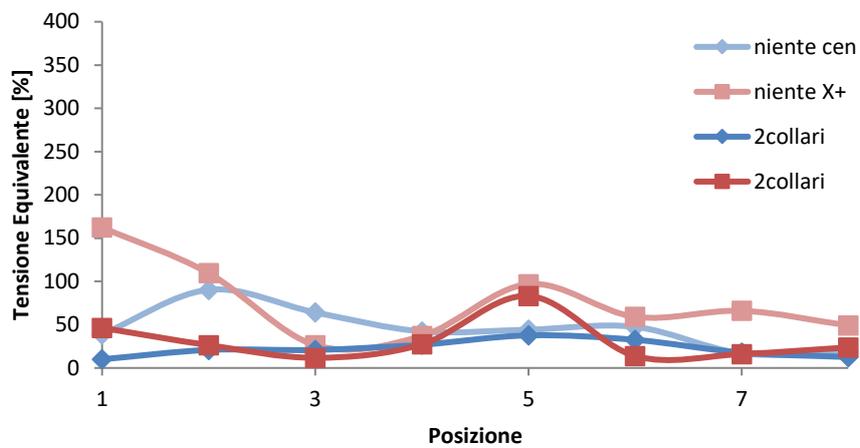


Figura F.48 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.13. Braccio a tre sezioni punto F

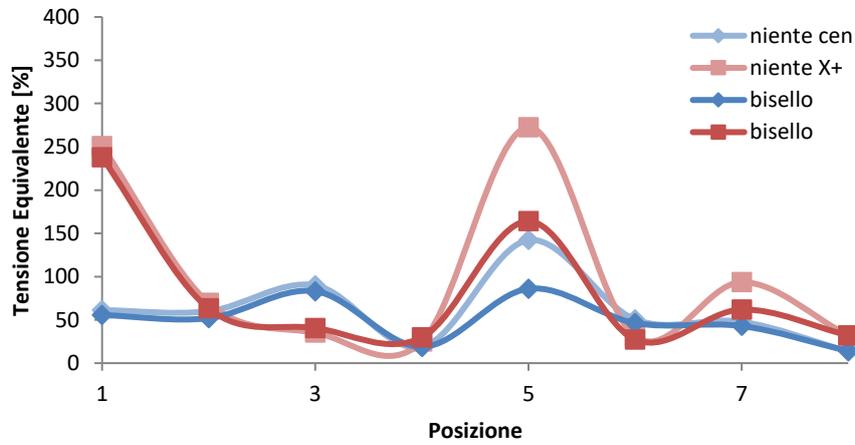


Figura F.49 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

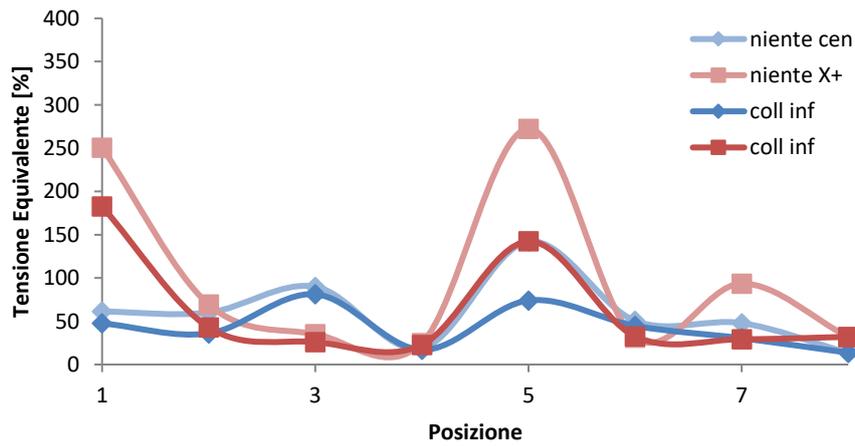


Figura F.50 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

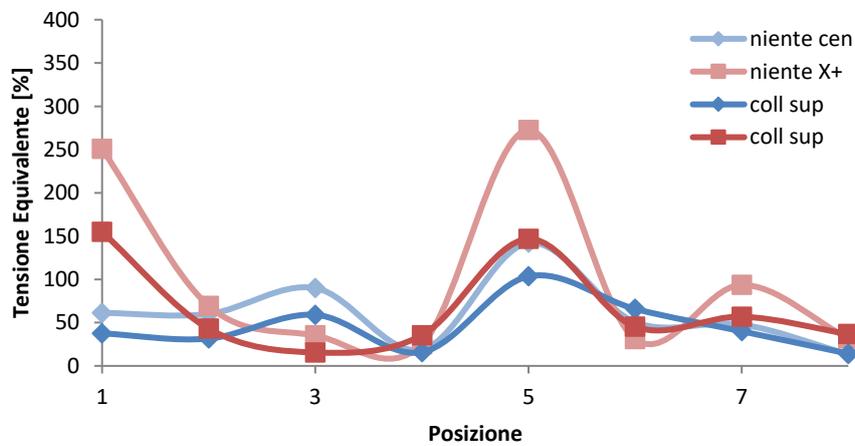


Figura F.51 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

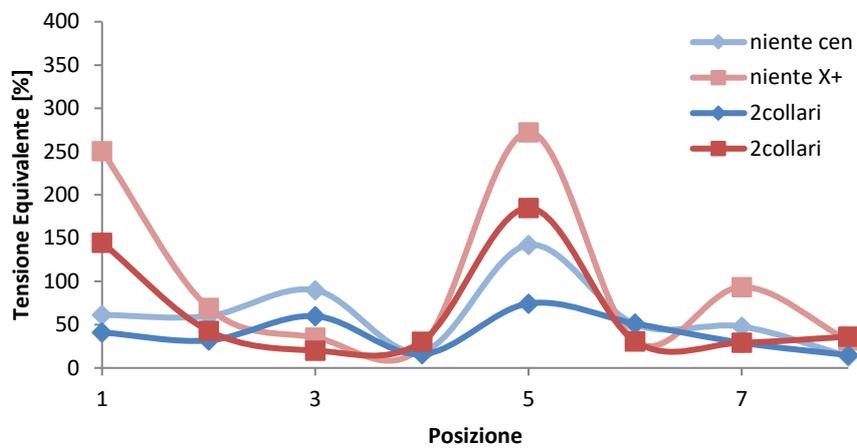


Figura F.52 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.

F.14. Braccio a tre sezioni punto G

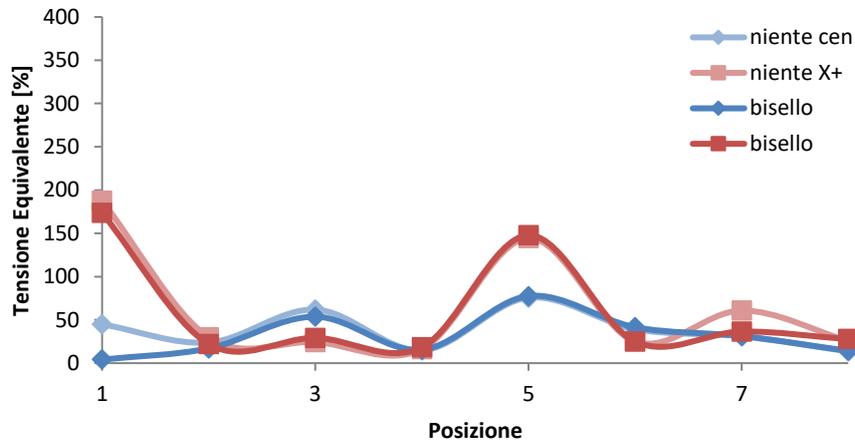


Figura F.53 Tensioni equivalenti con un bisello di rinforzo lungo tutto il perimetro del braccio.

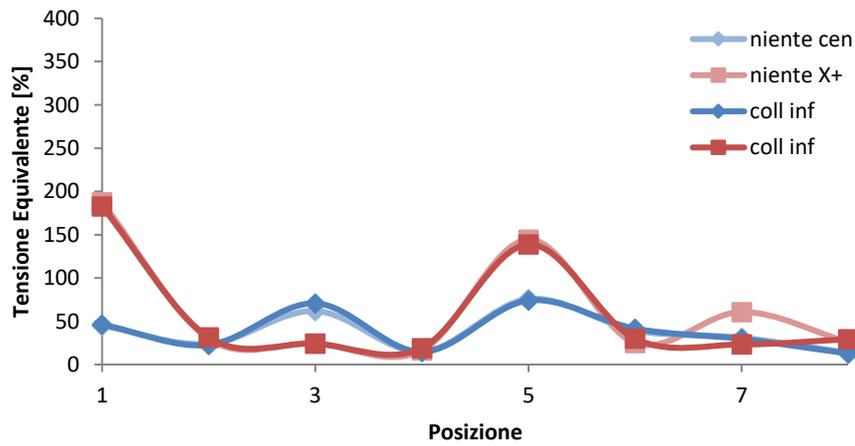


Figura F.54 Tensioni equivalenti con una collare di rinforzo nella zona inferiore del braccio.

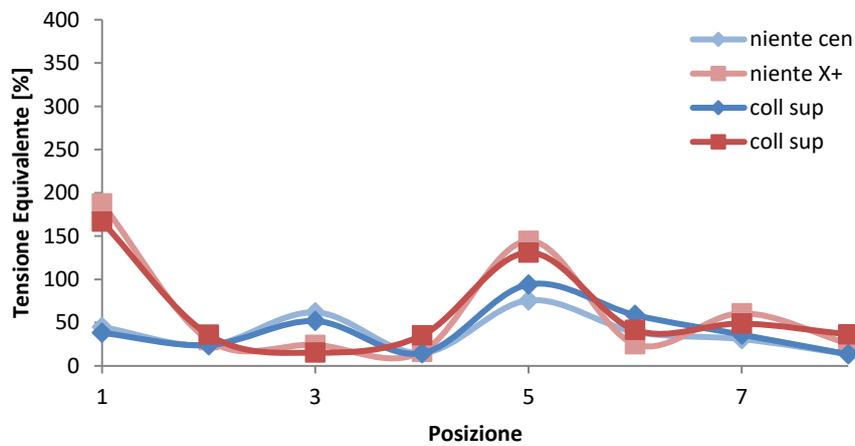


Figura F.55 Tensioni equivalenti con un collare di rinforzo nella zona superiore del braccio.

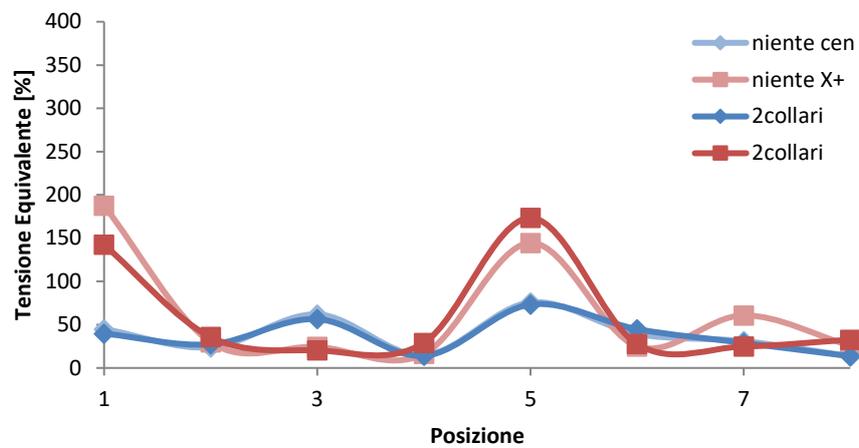


Figura F.56 Tensioni equivalenti con due collari di rinforzo, uno nella zona superiore e l'altro in quella inferiore del braccio.