



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Analisi del comportamento a fatica in
serbatoi smaltati sottoposti a cicli di pressione.**

Fatigue behavior analysis in enamelled tanks
subjected to pressure cycles.

Relatore:

Prof. **Marco Rossi**

Tesi di Laurea di:

Giovanni Zaccaria Felli

A.A. 2019/2020



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Analisi del comportamento a fatica in
serbatoi smaltati sottoposti a cicli di pressione.**

Fatigue behavior analysis in enamelled tanks
subjected to pressure cycles.

Relatore:

Prof. **Marco Rossi**

Tesi di Laurea di:

Giovanni Zaccaria Felli

A.A. 2019/2020

Università Politecnica delle Marche
Facoltà Di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica
Via Brezze Bianche-60131 Ancona (AN) Italy

Ringraziamenti

Un ringraziamento importante va alla mia famiglia che mi hanno permesso di seguire questo percorso standomi sempre vicino, sostenendomi nelle gioie e nei dispiaceri, credendo in me ogni giorno.

Ringrazio la mia ragazza Federica e la sua famiglia che mi hanno sempre spinto a dare il massimo e se sono riuscito a raggiungere questo traguardo il merito è anche il loro.

Non posso non ringraziare i miei cugini Omar e Giuseppe che mi hanno insegnato che con tanto sacrificio e tanta forza di volontà i risultati arrivano e questo ne è la prova.

Non posso certo dimenticarmi di loro, i miei amici che si meritano un grande ringraziamento per avermi sopportato e supportato in questo percorso. In particolare ringrazio Francesco e pino.

Un ringraziamento speciale va ai miei compagni di università, grazie Alessandro, Tommaso, Andrea, Antonio, Marco, Fabio, Valentino e Nicolò. Mi ritengo molto fortunato ad aver incontrato delle persone come loro.

Un grazie va anche al mio relatore Marco Rossi per la sua grande professionalità e disponibilità.

La mia tenacia non sarebbe mai stata sufficiente per arrivare oggi qui senza l'aiuto, la stima, la presenza di voi. Dedico questa laurea a me stesso, a voi, a chi mi ha accompagnato in questo percorso, a chi c'è stato, c'è e ci sarà e a chi con occhi attenti mi guarda crescere ogni giorno e oggi più che mai sento vicino.

Che questo sia un inizio di una vita piena di soddisfazioni come questa.

Ancona Ottobre 2020

Felli Giovanni Zaccaria

Abstract

In this project we will deal with the finite element analysis of enamelled tanks subjected to pressure cycles, in order to analyze more closely what happens on the weld.

The first step will be to make a modification on the geometry of the original solid model to recreate the weld bead, in such way, it will be possible to investigate in details the stress state inside the welding and evaluate the fatigue life.

Once the stress data has been obtained, a comparison between solid and shell element will be conducted to determine what is the best FEM approach to describe the component.

Finally, a sensitivity analysis will be conducted on the welding zone, simulating different sizes of the weld bead and introducing defects. All cases will be compared with the original model.

Sommario

In questo progetto verrà condotta un'analisi agli elementi finiti di serbatoi smaltati sottoposti a cicli di pressione, andando ad analizzare più da vicino quello che succede sulla saldatura.

Il primo passo sarà quello di andare ad effettuare una modifica sulla geometria del modello solido originale, andando a ricreare il cordone di saldatura, in modo tale da poter studiare in dettaglio le tensioni che si generano al suo interno e valutare la vita a fatica del serbatoio.

Una volta ottenuti i dati delle tensioni, verrà fatto un confronto tra modelli realizzati con elementi shell e elementi solidi, con l'obiettivo di valutare qual è l'approccio migliore da utilizzare.

Infine sarà valutato l'effetto di una variazione della dimensione del cordone di saldatura e della presenza di difetti, facendo opportune modifiche ai modelli numerici.

L'analisi dei modelli difettati permetterà di studiare alcune problematiche che potrebbero svilupparsi nel serbatoio in seguito a saldature non eseguite correttamente.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Nomenclatura	1
1.2	Oggetto dell'analisi	2
1.2.1	Criticità	4
1.3	Saldatura	7
1.3.1	Tipi di saldatura	9
2	Metodologia utilizzata	15
2.1	Lavorazione del modello mediante CAD	15
2.2	Metodo degli elementi finiti (o FEM)	18
2.3	Modello solido	19
2.3.1	Analisi modello solido	19
3	Confronto tra il modello solido e quello shell	31
3.1	Confronto geometrico	32
3.2	Confronto delle mesh	34
3.3	Confronto dei risultati di tensione	37
3.4	Analisi del modello solido applicando una pressione maggiore	41
4	Analisi di modelli difettati	45
4.1	Analisi del modello con uno spessore di saldatura maggiorato	45
4.2	Analisi del modello con un difetto di saldatura	48
	CONCLUSIONI	53

Elenco delle figure

1.1	Modello scaldacqua	2
1.2	Calotta superiore (a) e calotta inferiore (b)	3
1.3	Difetto di salatura	5
1.4	Corrosione	6
1.5	Salto smalto	7
1.6	Simbologia	8
1.7	Saldatura a completa penetrazione nel disegno	9
1.8	Saldatura a completa penetrazione nella realtà	9
1.9	Tipi di saldatura a completa penetrazione	10
1.10	Tensioni sulla saldatura	10
1.11	Saldatura a cordone d'angolo nel disegno	11
1.12	Saldatura a cordone d'angolo nella realtà	11
1.13	Sezione del cordone	12
1.14	Triangoli inscritti nella sezione del cordone	12
1.15	Verifica della tensione sulla saldatura	13
2.1	Modello del serbatoio originale	15
2.2	Cordone di saldatura del modello originale	16
2.3	Modello modificato	17
2.4	Cordone di saldatura del modello modificato	17
2.5	Project schematic	19
2.6	Proprietà fisico meccaniche del materiale	20
2.7	Modello modificato	21

2.8	Sezione del modello modificato	22
2.9	Struttura ad albero del nostro modello	23
2.10	Virtual topology del modello	24
2.11	Contacts di tipo Bonded	25
2.12	Risultato delle mesh	26
2.13	Element quality degli elementi delle mesh	27
2.14	Equivalent stress di Von Mises	28
2.15	Messa a fuoco della tensione sulla saldatura	29
2.16	Vita a fatica del modello	30
3.1	Modello shell	31
3.2	Modello solido	32
3.3	Cordone di saldatura del modello shell	33
3.4	Cordone di saldatura del modello solido	33
3.5	Mesh del modello shell	34
3.6	Mesh del modello solido	35
3.7	Wireframe del modello shell	36
3.8	Wireframe del modello solido	36
3.9	Equivalent stress di Von Mises del modello shell	37
3.10	Equivalent stress di Von Mises del modello solido	38
3.11	Equivalent stress sul cordone di saldature del modello shell	39
3.12	Equivalent stress sul cordone di saldatura del modello solido	39
3.13	Equivalent stress di Von Mises sul nostro modello sottoposto a una pressione di 0,8 Mpa	42

3.14 Equivalent stress di Von Mises sul cordone di saldatura del modello sottoposto a una pressione di 0,8MPa	43
4.1 Modello modificato con uno spessore di saldatura maggiore	45
4.2 Saldatura del modello modificato con un spessore maggiore	46
4.3 Equivalent stress del modello modificato con spessore di saldatura maggiore	47
4.4 Visione ravvicinata della saldatura del modello modificato	47
4.5 Modello solido con cordone di saldatura a cui è stato asportato una sfera di materiale	49
4.6 Cordone di saldatura difettato ovvero a cui è stato asportato una sfera di materiale	50
4.7 Equivalent stress del modello che presenta un cordone di saldatura difettato	51
4.8 Zoom sul difetto di saldatura	51

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Nomenclatura

Come grandezza di riferimento utilizziamo:

Grandezza	Simbolo	Unità di misura
Tensione meccanica	σ	Pa
Tensione di snervamento	σ_{sn}	Pa
Tensione di rottura	σ_r	Pa
Tensione assiale	σ_a	Pa
Tensione circonferenziale	σ_c	Pa
Tensione equivalente di Von Mises	σ_{eq}	Pa
Modulo di Young	E	Pa
Modulo di Bulck	K	Pa
Modulo di taglio	G	Pa
Coefficiente di Poisson	ν	Adm
Deformazione	ε	Adm
Deformazione equivalente di Von Mises	ε_{eq}	Adm
Forza	F	N
Pressione	p	Pa
Superficie	s	m ²
Volume	V	m ³
Lunghezza	ℓ	m
Tempo	t	s
Massa	m	kg
Accelerazione di gravità	g	m/s ²

1.2 Oggetto dell'analisi

L'oggetto dell'analisi consisterà nello studio di un serbatoio. Il volume di tale serbatoio è di circa 15 lt ed ha una capacità intermedia, come si può vedere dalla figura 1.1.



Figura 1.1: Modello scaldacqua.

Lo scaldacqua di tipo elettrico è composto da un serbatoio coibentato e smaltato che mantiene la temperatura dell'acqua costante e sempre pronta all'utilizzo. Lo scaldacqua deve essere collegato, tramite un flessibile a un rubinetto di acqua fredda, essa viene riscaldata e portata

1.2 Oggetto dell'analisi

alla temperatura desiderata tramite l'utilizzo di una resistenza in rame. Grazie all'effetto Joule, sfruttato dalla resistenza che rilascia calore nell'acqua e mediante l'utilizzo di un termostato, che spegne il meccanismo una volta raggiunta la temperatura ideale e allo stesso modo lo riaccende, quando questa scende al di sotto di una temperatura minima. Per avere un'ottima qualità delle prestazioni e dei bassi consumi dello scaldacqua, la casa produttrice consiglia di avere una temperatura massima intorno ai 60°. All'interno dello scaldacqua è presente una valvola di sicurezza che interviene nell'ipotesi in cui la pressione dell'acqua aumenti pericolosamente. In uscita dal serbatoio si trova un flessibile che permette all'acqua calda di raggiungere le tubature dell'impianto idrico della casa. Il nostro serbatoio è costituito da due calotte emisferiche unite mediante aggraffatura e poi saldate tra loro nella circonferenza di massimo diametro. Come si può ben vedere nelle due figure sottostanti, si distingue chiaramente la calotta superiore nella figura 1.2a e la calotta inferiore nella figura 1.2b, analizzando la prima immagine, abbiamo oltre alla calotta, anche due tubi collegati ad essa mediante saldatura e rivestiti in gomma all'interno, che svolgono la funzione di input e output dell'acqua, mentre nella calotta inferiore è presente una flangia saldata sul bordo sottostante che serve per il collegamento di altri componenti per il funzionamento del serbatoio.



Figura 1.2 (a): Calotta superiore



Figura 1.2 (b): Calotta inferiore

1.2.1 Criticità

In tutti i corpi sono presenti dei campi di tensione e deformazione, motivo per cui si creano delle zone che vengono denominate come zone critiche. Il serbatoio in questione è soggetto ad una pressione interna variabile tra 0,5-1 MPa, dovuta all'acqua al suo interno. Una zona molto critica la troviamo nel cordone di saldatura circonferenziale, in quanto il giunto non collega perfettamente le due calotte lasciando così uno spazio vuoto (Figura 1.3), che crea una zona d'intrusione dell'acqua, la quale porta a fenomeni corrosivi. La zona scoperta è anche una "zona d'ombra" per l'anodo sacrificale. Per far fronte a tali fenomeni corrosivi, si utilizzano dei serbatoi smaltati e in aggiunta a ciò degli anodi sacrificali che vanno a corrodersi al posto delle zone metalliche, che rimangono scoperte dopo la smaltatura. Un problema importante è smaltare il cordone di saldatura soprattutto nel caso circonferenziale, perché lo smalto non aderisce perfettamente al cordone e nelle zone in cui si verifica, potrebbe generare spessori di smalto insufficienti e questo porterebbe a fenomeni corrosivi (Figura 1.4). Un altro fenomeno è il salto smalto (Figura 1.5), che si verifica quando il serbatoio sottoposto a una continua variazione di carico potrebbe far sì che il rivestimento di smalto salti in qualche punto, lasciando scoperto l'acciaio e generando un ulteriore punto di innesco per la corrosione.



Figura 1.3 (difetto di saldatura): Da questa immagine si può notare nella zona cerchiata in rosso, la mancanza di materiale nel collegamento delle due calotte.



Figura 1.4 (Corrosione) : In questa immagine notiamo come lo smalto, non riesce ad aderire perfettamente. Nelle zone in cui succede potrebbe generare dei spessori di smalto insufficienti e questo potrebbe portare a fenomeni di corrosione.

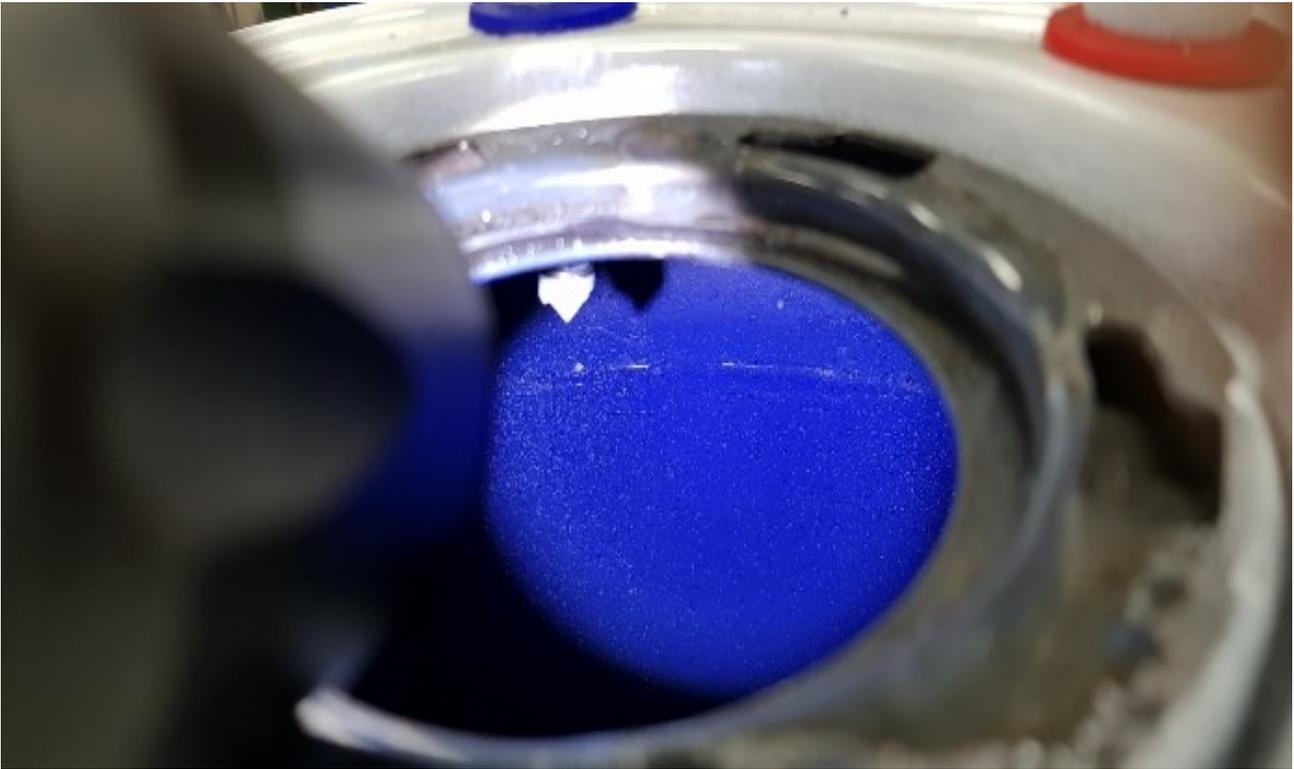


Figura 1.5 (Salto smalto) : in questa figura notiamo il fenomeno denominato salto smalto (lo smalto è quello colorato di blu): lo smalto potrebbe saltare in qualche punto, lasciando scoperto l'acciaio e generando un punto di innesco per la corrosione.

1.3 Saldatura

La forma richiesta di un organo meccanico può essere più facilmente raggiunta ricorrendo a processi di unione, come la saldatura. In particolare, quando le sezioni da collegare sono sottili si possono realizzare importanti risparmi, eliminando i dispositivi di collegamento. Una saldatura si realizza collegando fra loro vari pezzi di metallo e di solito durante tale metodo le parti sono tenute in posizione con staffe, morsetti, o con l'uso di apposite maschere. Le saldature devono essere indicate con precisione sui disegni usando la simbologia opportuna (Figura 1.6).

Capitolo 1 Introduzione

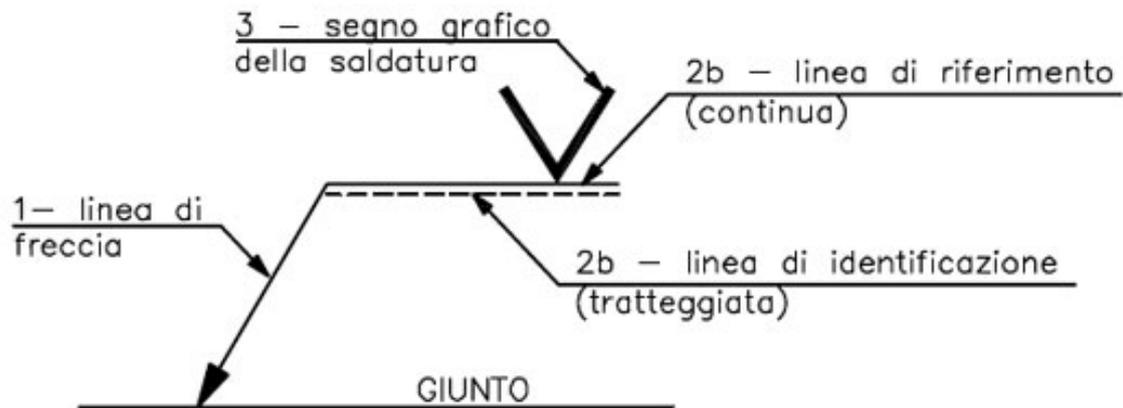


Figura 1.6 (Simbologia): in questa immagine viene mostrato come sono indicate le saldature in un disegno tecnico.

Per classificare i materiali e le saldature dobbiamo tener conto di ulteriori prescrizioni oltre alla resistenza del materiale:

1. La composizione chimica del metallo base;
2. Resilienza del metallo base;
3. Processo di saldatura (manuale, automatico, sotto gas...);
4. Tipi di elettrodi e di flussi;

In base alla qualità e alla severità dei controlli eseguiti le saldature si dividono in I° e II° classe.

1.3.1 Tipi di saldatura

Possiamo dividere i tipi di saldatura in due gruppi principali:

5. Saldatura a completa penetrazione (Figura 1.7, 1.8, 1.9 e 1.10);
6. Saldatura a cordone d'angolo (Figura 1.12 e 1.13);

La saldatura a completa penetrazione, si ha quando la fusione del metallo di base è avvenuta lungo tutto lo spessore del pezzo da saldare. La resistenza del giunto, in corrispondenza della saldatura, è praticamente uguale a quella di un elemento con la stessa forma realizzato in unico pezzo e una delle conseguenze principali di questo tipo di saldatura, infatti, è l'effettiva continuità tra i pezzi del giunto. Lo stato tensionale è quindi quasi uguale a quello del pezzo continuo. Poiché il materiale di apporto ha una resistenza pari o superiore a quella del materiale base, in teoria la rottura dovrebbe avvenire fuori dal giunto, nel caso non ci siano imperfezioni. Viceversa, in presenza di difetti la rottura può avvenire anche nella sezione saldata.

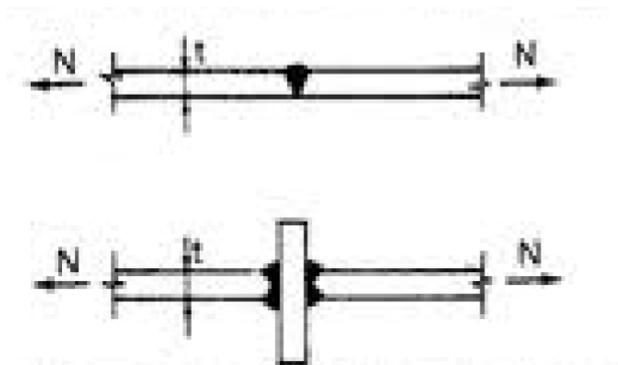


Figura 1.7 (Saldatura a completa penetrazione nel disegno): vediamo come viene rappresentata una saldatura a completa penetrazione nel disegno tecnico.

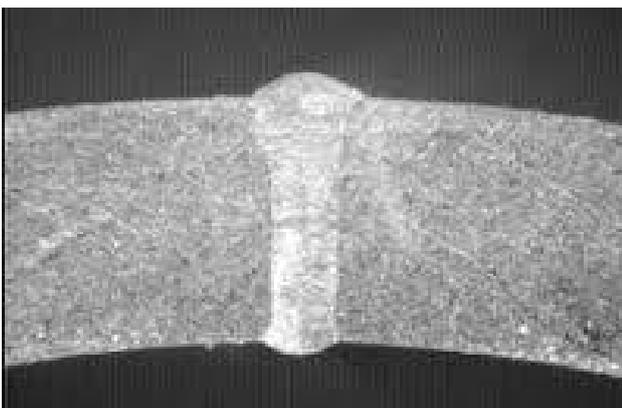


Figura 1.8 (Saldatura a completa penetrazione nella realtà): qui vediamo come è fatta una saldatura a completa penetrazione all'interno del materiale nel caso reale.

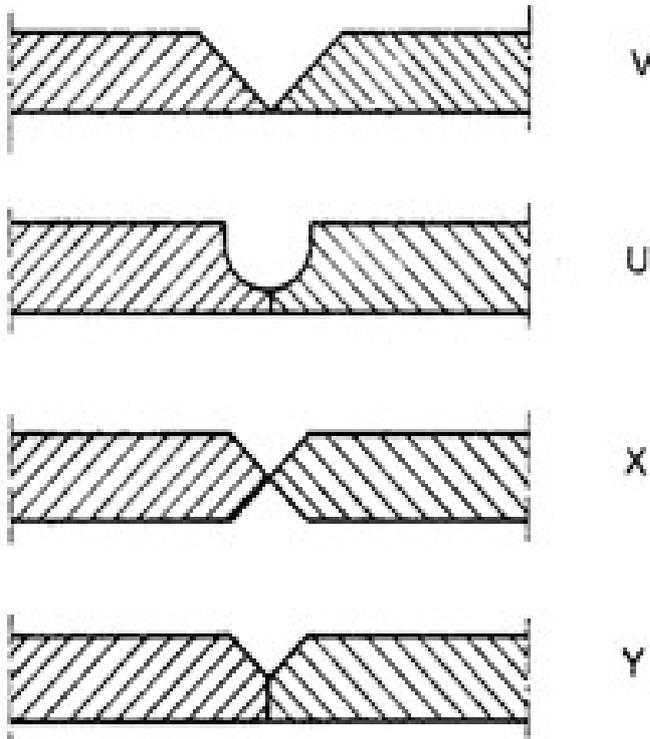


Figura 1.9 (Tipi di saldatura a completa penetrazione): in questa immagine vediamo un disegno sezionato dove si vedono i diversi tipi di saldatura a completa penetrazione che possono essere a V, U, Y o a X.

Per il calcolo di una saldatura a completa penetrazione, abbiamo che per le tensioni normali (\perp) si considera lo spessore minimo (testa) o lo spessore dell'elemento a completa penetrazione (T).

Per le tensioni parallele ($//$) si considera la sezione data al materiale base più il materiale d'apporto (Figura 1.10)

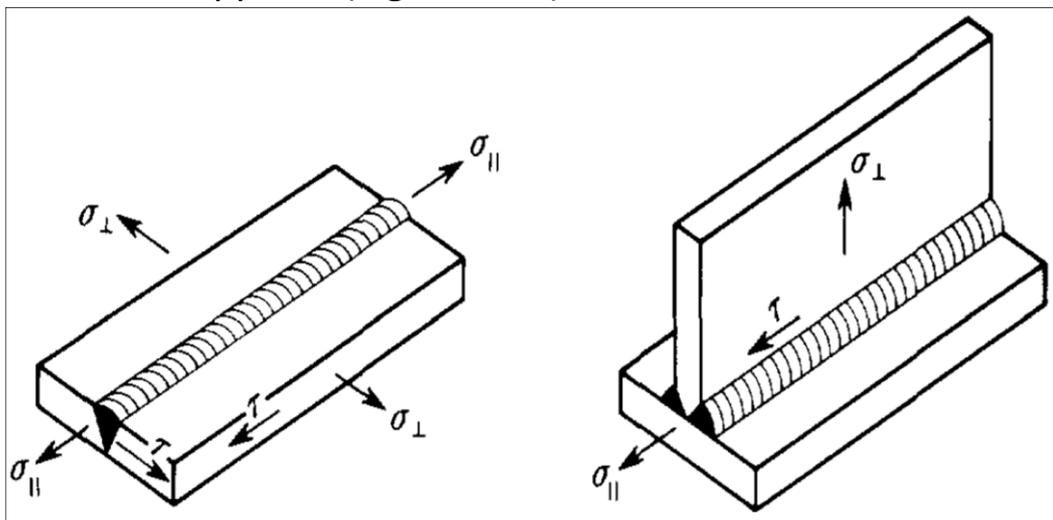


Figura 1.10 (Tensioni sulla saldatura): vediamo come vengono distribuite sulla saldatura, le tensioni normali e le tensioni parallele.

La formula per il calcolo della σ_{id} è data come:

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{//}^2 + \sigma_{\perp}\sigma_{//} + 3\tau_{//}^2}$$

Nelle saldature a cordone d'angolo i pezzi da saldare sono invece sovrapposti o accostati, senza preparazione. Il procedimento è più economico, ma non ripristina la continuità della sezione resistente. Questo influisce sulla possibilità di avere rottura in caso di fatica. Quindi le saldature di questo tipo sono sconsigliate in presenza di carichi ripetuti e in generale dove è richiesta la massima resistenza del pezzo.

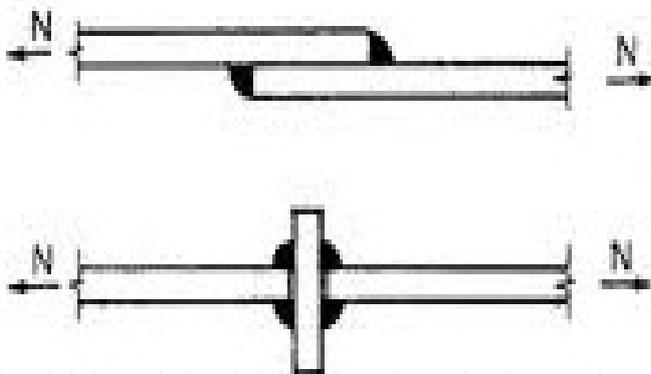


Figura 1.11 (Saldatura a cordone d'angolo nel disegno): vediamo la rappresentazione su un disegno tecnico di una saldatura a cordone d'angolo.



Figura 1.12 (Saldatura a cordone d'angolo nella realtà): in questa immagine si vede la rappresentazione di un saldatura a cordone d'angolo nella realtà.

Capitolo 1 Introduzione

Nell'ambito della progettazione, si sceglie la tipologia di giunti in base alle prestazioni che il giunto deve garantire. Per il calcolo nelle saldature a cordone d'angolo, la sezione resistente è la sezione di gola, definita come l'area di lunghezza L pari a quella del cordone ed altezza a quella minore del triangolo inscritto nella sezione trasversale della saldatura (Figura 1.13, 1.15 e 1.15).

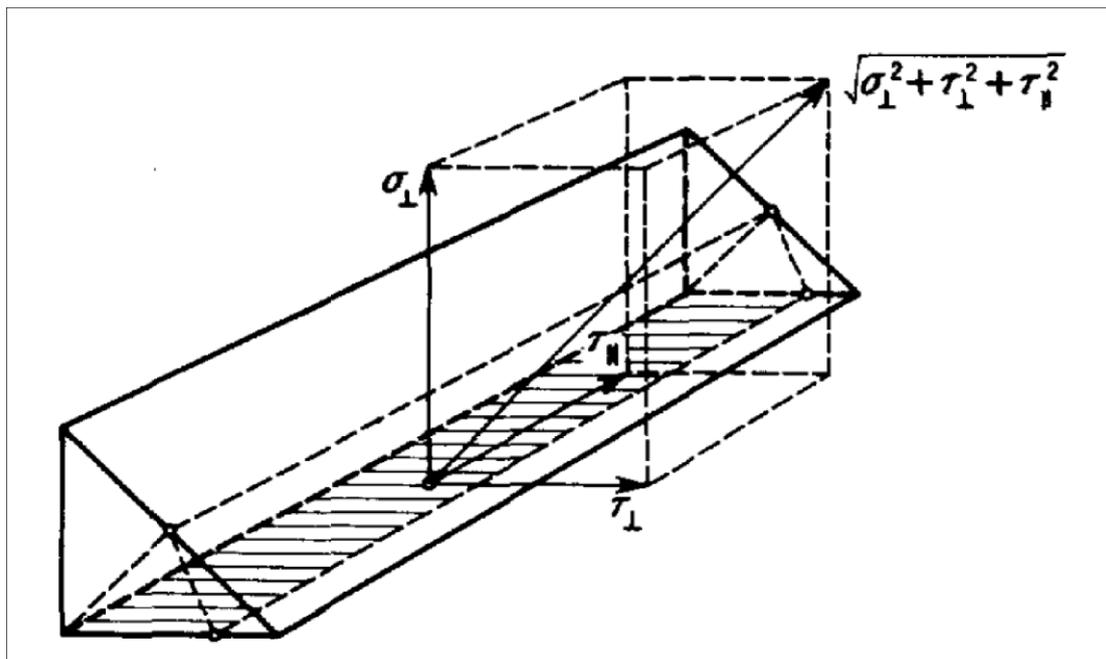


Figura 1.13 (Sezione del cordone): rappresentazione della sezione di gola, definita come l'area di lunghezza L pari a quella del cordone ed altezza a quella minore del triangolo inscritto nella sezione trasversale della saldatura.

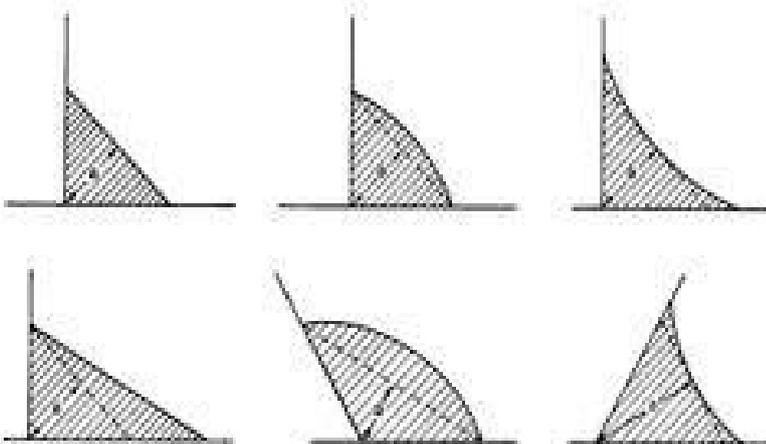


Figura 1.14 (Triangoli inscritti nella sezione del cordone): in questa foto si vedono i triangoli inscritti nella sezione trasversale della saldatura.

Nel caso siano presenti tutte e tre le componenti di tensione τ_{\parallel} , σ_{\perp} e τ_{\perp} devono essere verificate le seguenti limitazioni:

$$\sqrt{\tau_{\perp}^2 + \sigma_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2} \leq \begin{cases} 0,85 \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,70 \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510;} \end{cases} \quad [1]$$

$$|\tau_{\perp}| + |\sigma_{\perp}| \leq \begin{cases} \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,85 \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510.} \end{cases} \quad [2]$$

Nel caso in cui siano presenti le sole componenti di tensione τ_{\perp} e σ_{\perp} è sufficiente verificare l'espressione [2] e nel contempo accertare che sia:

$$|\tau_{\perp}| \leq \begin{cases} 0,85 \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,70 \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510;} \end{cases}$$

$$|\sigma_{\perp}| \leq \begin{cases} 0,85 \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,70 \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510.} \end{cases}$$

Nel caso in cui siano presenti le sole componenti di tensione τ_{\perp} e τ_{\parallel} ovvero σ_{\perp} e τ_{\parallel} è sufficiente verificare l'espressione [1].

Ove sia presente solo una delle componenti di tensione τ_{\perp} , σ_{\perp} o τ_{\parallel} basta ovviamente verificare che sia:

$$|\tau_{\perp}|, |\sigma_{\perp}|, |\tau_{\parallel}| \leq \begin{cases} 0,85 \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 360} \\ 0,70 \sigma_{\text{adm}} \text{ per l'acciaio Fe 430 ed Fe 510.} \end{cases}$$

Figura 1.15 (Verifica della tensione sulla saldatura): in questa immagine, vediamo come in base alle componenti della tensione, bisogna effettuare delle verifiche rispetto alla tensione ammissibile, per valutare la nostra saldatura a cordone d'angolo.

Capitolo 2

Metodologia utilizzata

In questo capitolo andremo a vedere la metodologia utilizzata per l'analisi a partire dalla modifica del modello del serbatoio originale. La prima procedura è creare il cordone di saldatura ottenendo così il modello modificato. In seguito si andrà a fare un'analisi agli elementi finiti mediante l'utilizzo del programma Ansys Workbench che ci permetterà di dare una valutazione effettiva, grazie alla valutazione di variabili che hanno una maggiore influenza sul risultato finale.

2.1 Lavorazione del modello mediante il CAD

Una volta preso in considerazione il modello originale, è stato opportuno apportare delle modifiche al livello geometrico per poter creare un nuovo cordone di saldatura per la nostra analisi. La modifica in questione è stata fatta utilizzando un programma di lavorazione dei modelli CAD, Spaceclaim che lo troviamo all'interno del software Ansys. (Figura 2.1 a e 2.2)

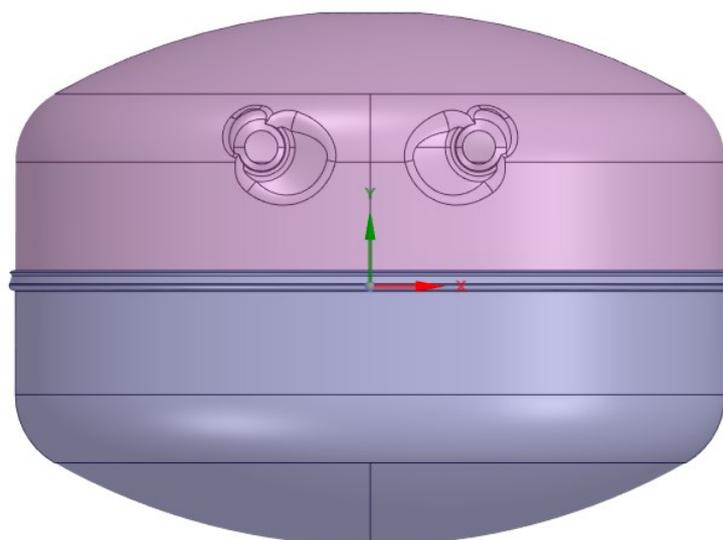


Figura 2.1 Modello del serbatoio originale.

2.1 Lavorazione del modello mediante il CAD

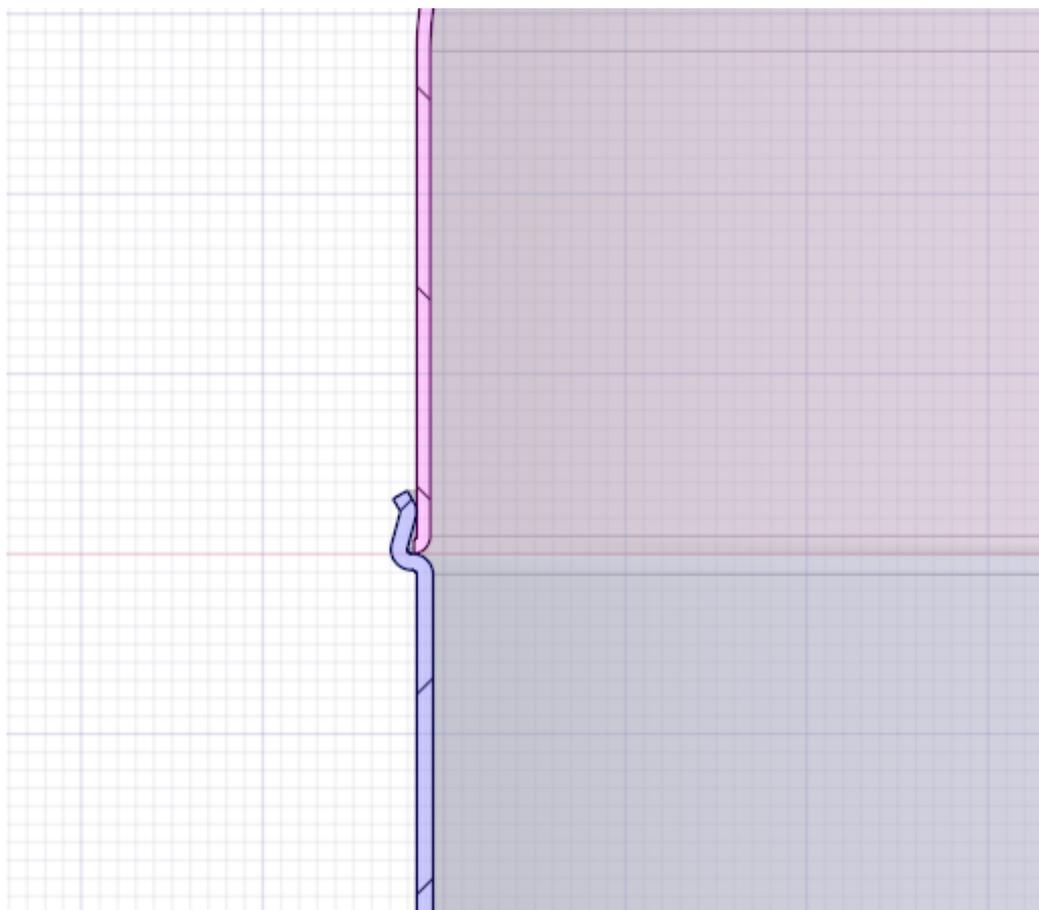


Figura 2.2: Cordone di saldatura del modello originale.

Il primo passo per modificare il cordone del modello originale è stato dividere i corpi solidi, in modo da isolare la saldatura per poterla eliminare e poi ricreare un nuovo cordone. All'inizio è stato creato una sorta di anello che collegava le due calotte emisferiche: sui bordi sono stati modificati gli spigoli creando dei raccordi, ottenendo un cordone di saldatura. Alla fine combinando tutti i corpi solidi si otterrà il nostro modello modificato (Figura 2.3 e 2.4).

Capitolo 2 Metodologia utilizzata

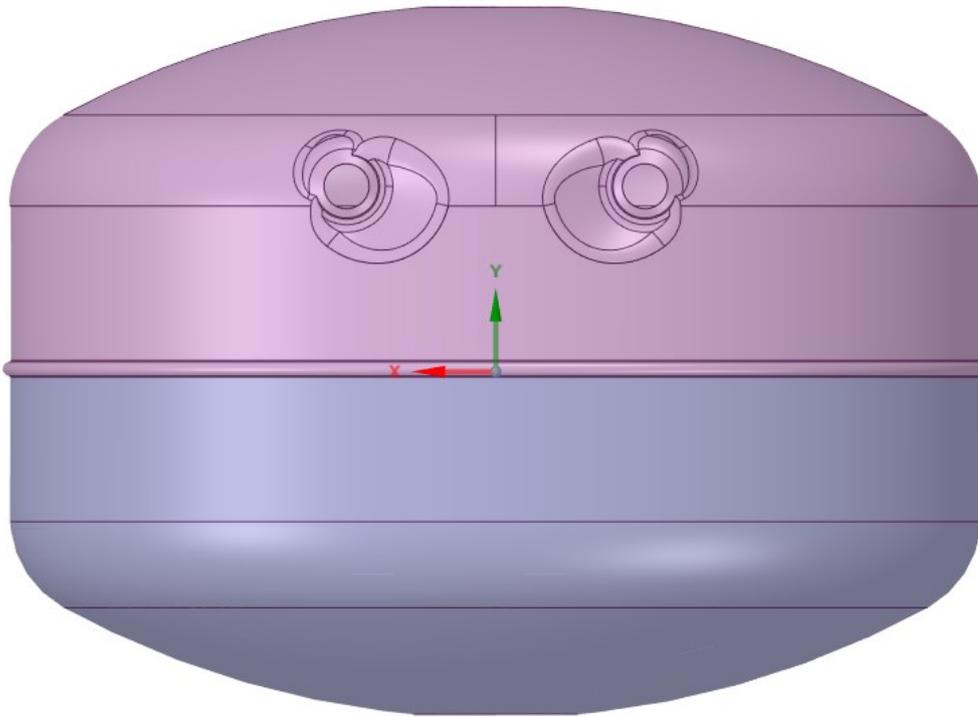


Figura 2.3: Modello modificato.

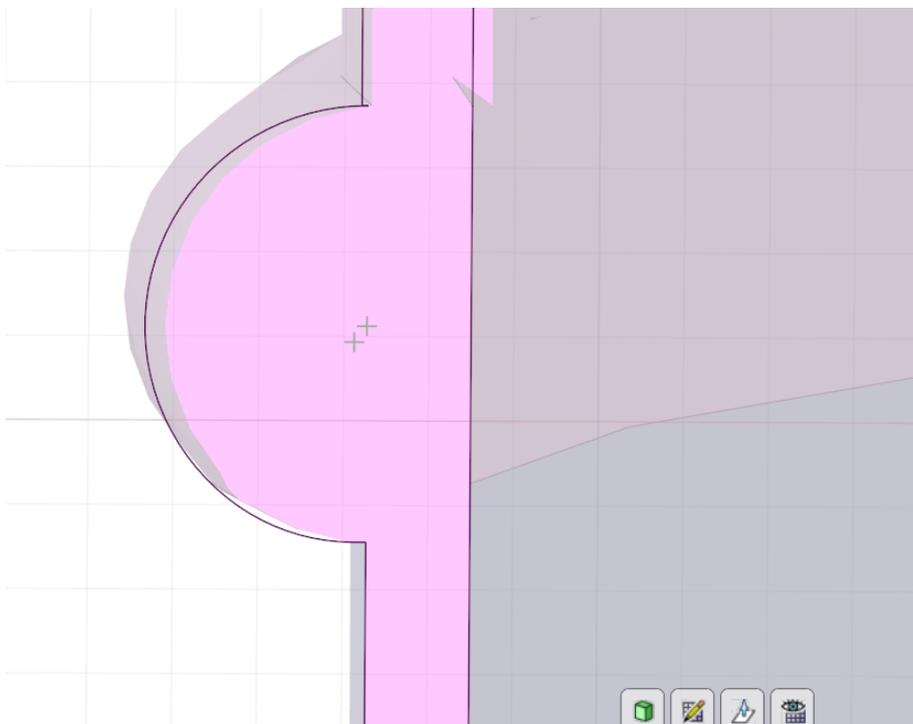


Figura 2.4: Cordone di saldatura del modello modificato.

2.2 Metodo degli elementi finiti (o FEM)

Nella progettazione meccanica, dove sono ampiamente utilizzati i programmi di disegno assistito dal calcolatore (CAD), il metodo di calcolo che meglio si integra con tali sistemi CAD è il metodo degli elementi finiti (FEM). Gli aspetti matematici e applicativi di questo metodo sono molto vasti; oggi inoltre sono disponibili numerosi software commerciali per il metodo degli elementi finiti tra cui ANSYS, il programma che noi andremo ad utilizzare. La FEM ci permette di effettuare numerosi applicazioni tra cui analisi statiche, dinamiche lineari e molte altre, ma ciò che interessa a noi è l'analisi statica. Un componente meccanico reale è una struttura elastica continua. Il FEM divide la struttura intera in sottostrutture elastiche di dimensione piccole ma finite. Per mezzo di funzioni di approssimazione polinomiale del campo degli spostamenti, e sfruttando opportunamente il calcolo matriciale, il comportamento elastico continuo di ogni elemento viene determinato in funzione delle proprietà geometriche e del materiale dell'elemento stesso. Si possono applicare carichi interni all'elemento, sulla superficie o sui nodi dell'elemento. I nodi sono le vere entità fondamentali che caratterizzano gli elementi; infatti è ai nodi che gli elementi si collegano tra loro garantendo la congruenza del continuo elastico, assegnando le condizioni al contorno o di vincolo, le quali vengono realmente applicate in ultima analisi a tutte le forze. Riassumendo possiamo definire la FEM come una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime a un sistema di equazioni algebriche.

Capitolo 2 Metodologia utilizzata

2.3 Modello solido

Partendo dal nostro modello modificato andremo a fare un'analisi agli elementi finiti mediante l'utilizzo del software ANSYS Workbench, dove all'interno troviamo il programma Mechanical che ci consente di effettuare un'analisi statica per valutare le tensioni e le deformazioni del nostro serbatoio sottoposto a diversi carichi di pressione. L'analisi è stata sviluppata utilizzando un carico di pressione pari a 0,5 MPa. In aggiunta è stata effettuata un'altra analisi con un carico pari a 0,8 MPa.

2.3.1 Analisi del modello solido

Come prima cosa bisogna impostare un project schematic (Figura 2.5), ossia un layout iniziale dove verranno inseriti i nostri toolbox, dove il toolbox A viene utilizzato per lavorare la geometria del serbatoio tramite Spaceclaim (come illustrato nel paragrafo 2.1) mentre nel toolbox B andremo a fare la nostra analisi statica tramite Mechanical.

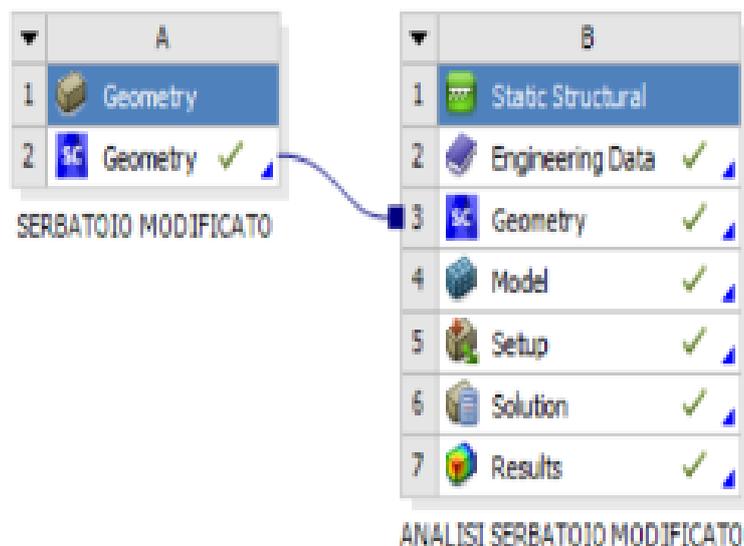


Figura 2.5: Project schematic.

2.3.1 Analisi del modello solido

Una volta impostati i toolbox ed aver creato il nostro modello nel toolbox A nella sezione geometry, per fare l'analisi statica ci spostiamo nel toolbox B.

- Engineering data: qui si definiscono tutte le caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale di cui è fatto il nostro modello, in questo caso è stato scelto dell'acciaio strutturale. I dati della curva σ - ε (Figura 2.6) sono valori ricavati dalla prova a trazione su provini in lamiera dello stesso materiale.

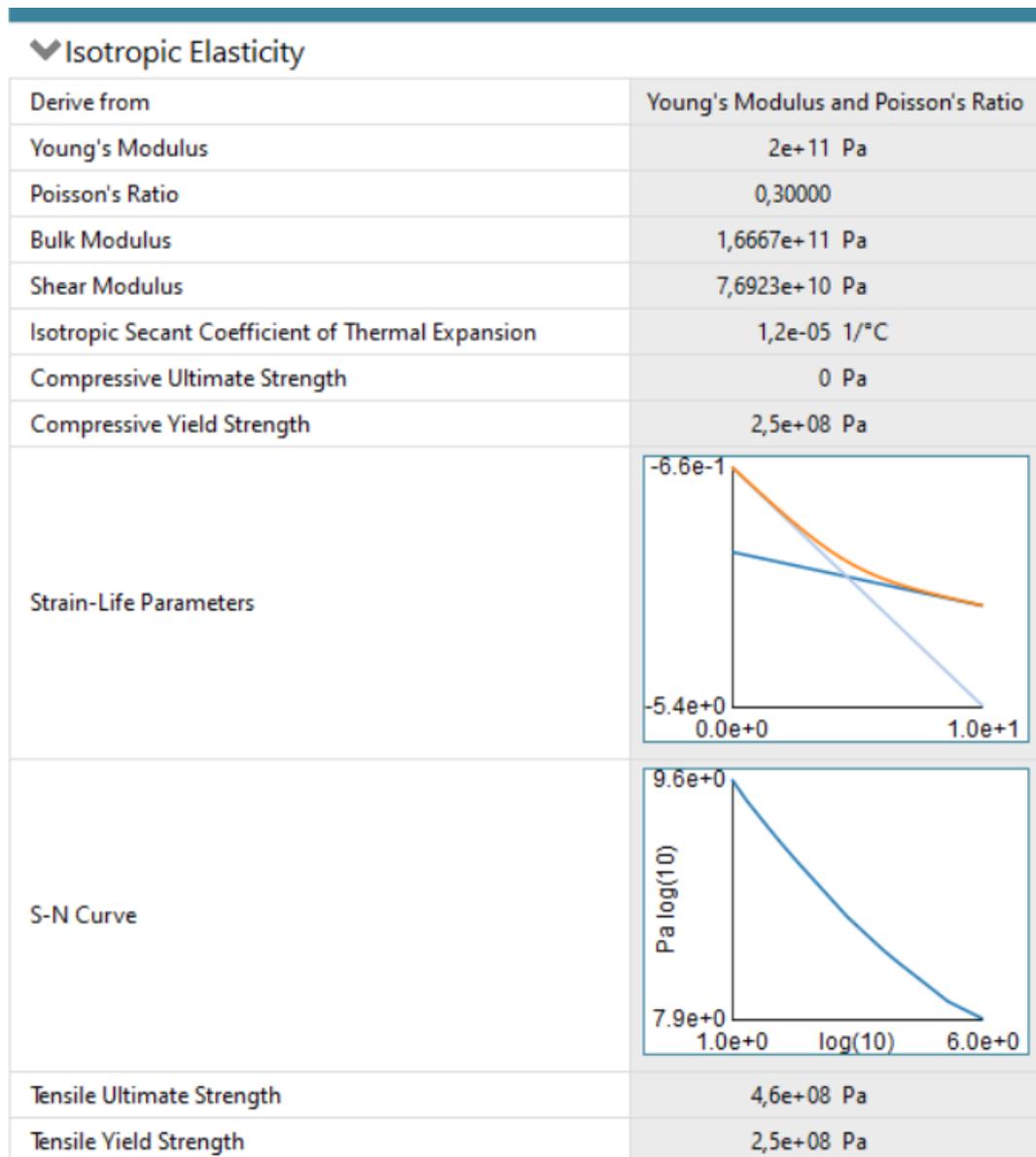


Figura 2.6: Proprietà fisico meccaniche del materiale.

Capitolo 2 Metodologia utilizzata

- **Geometry:** qui notiamo subito come ci sia un collegamento tra le geometry dei toolbox A e B, la linea che li collega sta ad indicare che la geometria lavorata precedentemente è stata importata nel toolbox B per permetterci poi di effettuare la nostra analisi FEM. (Figura 2.7 e 2.8).

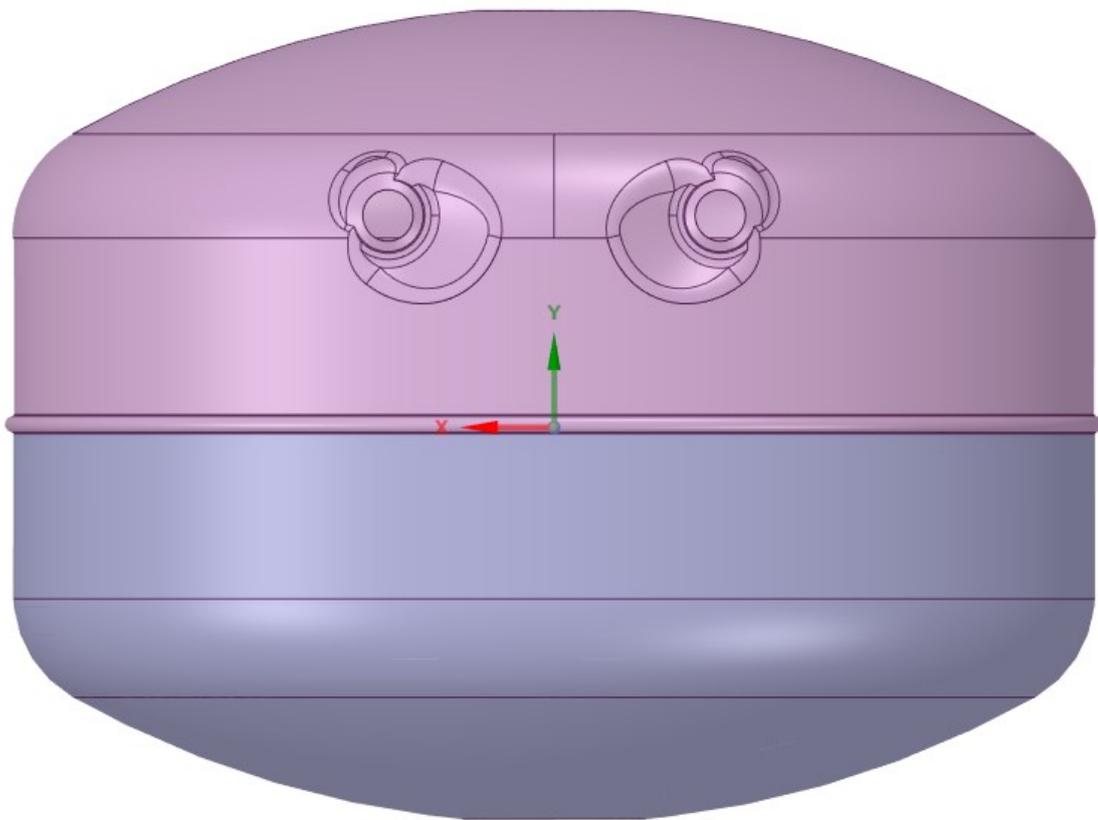


Figura 2.7: Modello modificato

2.3.1 Analisi del modello solido

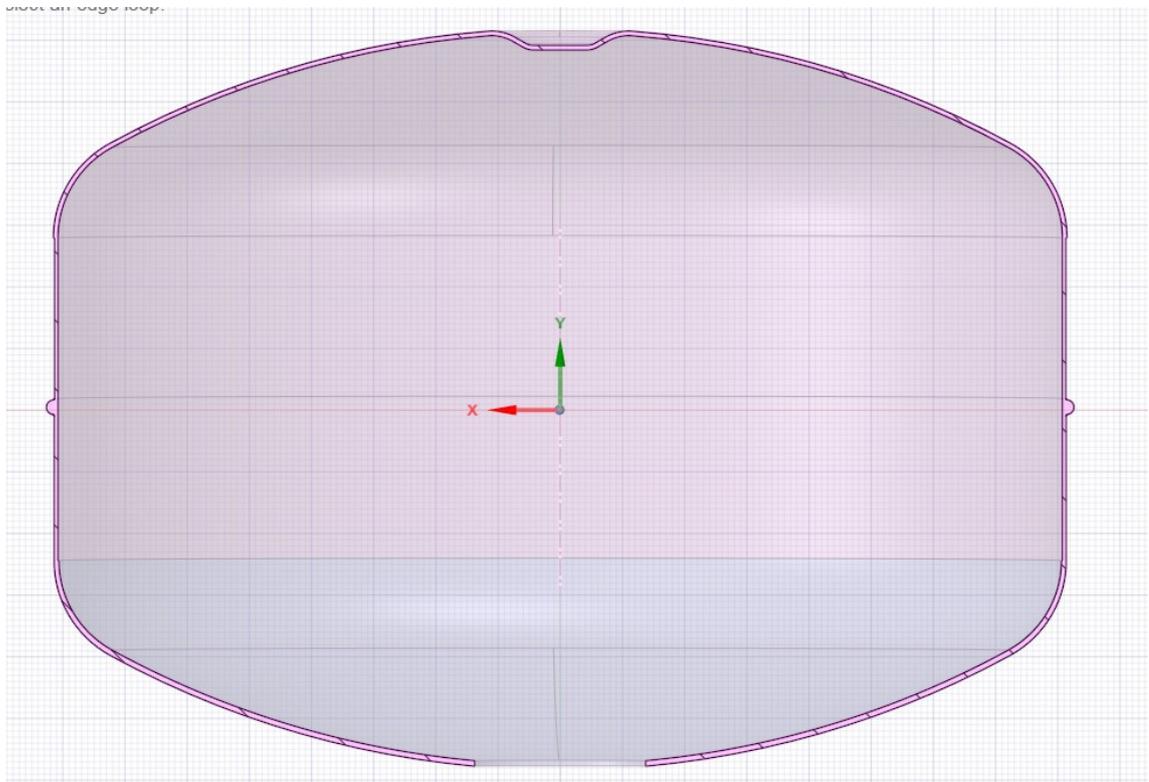


Figura 2.8: Sezione del modello modificato.

- Model: il model è la funzione del toolbox che ci connette con Mechanical, dove andremo a fare la nostra analisi statica secondo l'ordine rappresentato nella struttura ad albero (Figura 2.9).

Capitolo 2 Metodologia utilizzata

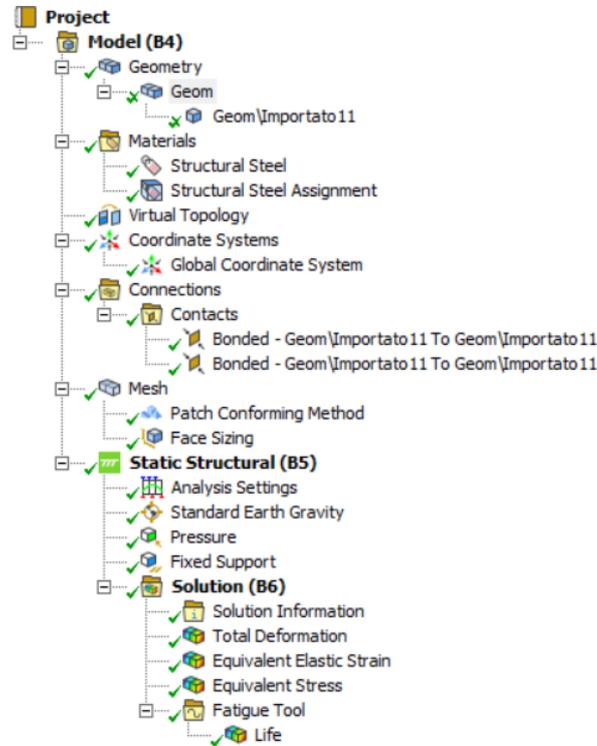


Figura 2.9: Struttura ad albero del nostro modello modificato.

Ora andremo a vedere come Mechanical permette di effettuare un'analisi agli elementi finiti andando ad analizzare in ordine le varie funzioni dei singoli comandi della struttura ad albero:

2.3.1 Analisi del modello solido

1. Geometry: qui abbiamo la geometri del nostro modello solido;
2. Materials: in materials definiamo il materiale di cui è fatto il nostro serbatoio. All'interno troviamo un'altra funzione chiamata virtual topology, che consente di manipolare e creare un modulo semplificato ai fini della mesh. La virtual topology permette di eliminare le irregolarità non importanti ai fini dell'analisi creando delle zone omogenee ognuna differenziata con un colore (Figura2.10).

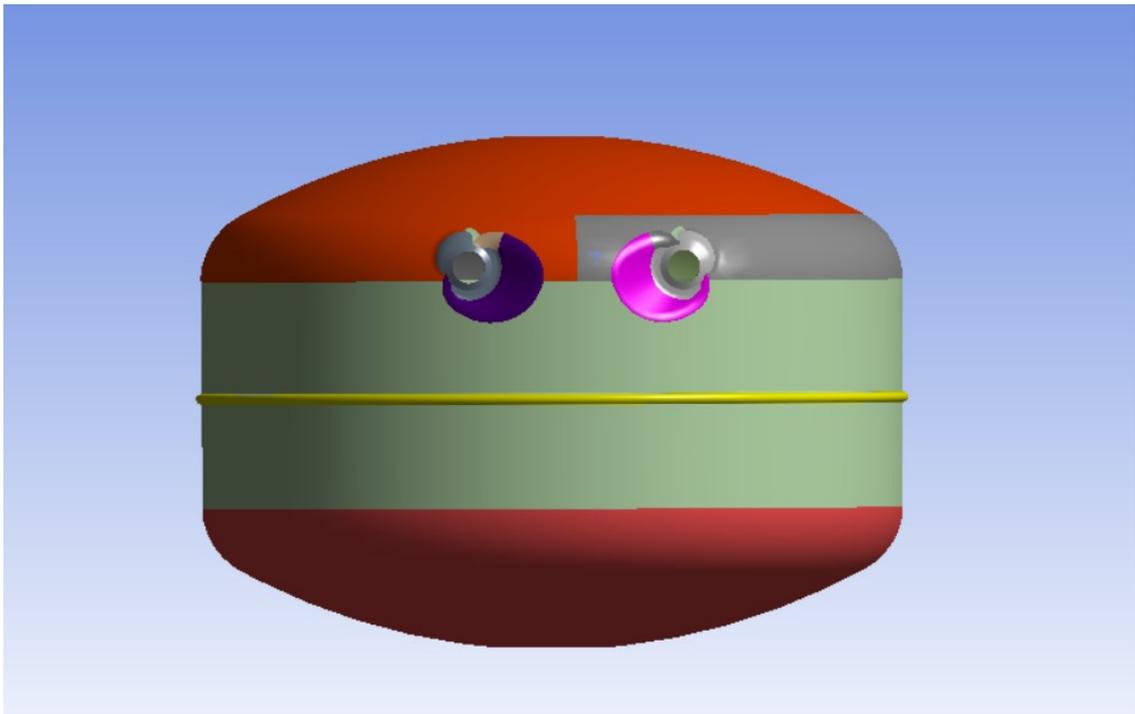


Figura 2.10: Virtual topology del modello.

Capitolo 2 Metodologia utilizzata

3. Connections: all'interno troviamo la funzione contacts che va a definire i tipi di contatti tra le varie parti. Il tipo di contatto scelto è quello Bonded, dove le zone di contatto del modello sono vincolate tra loro per ogni grado di libertà (Figura 2.11).

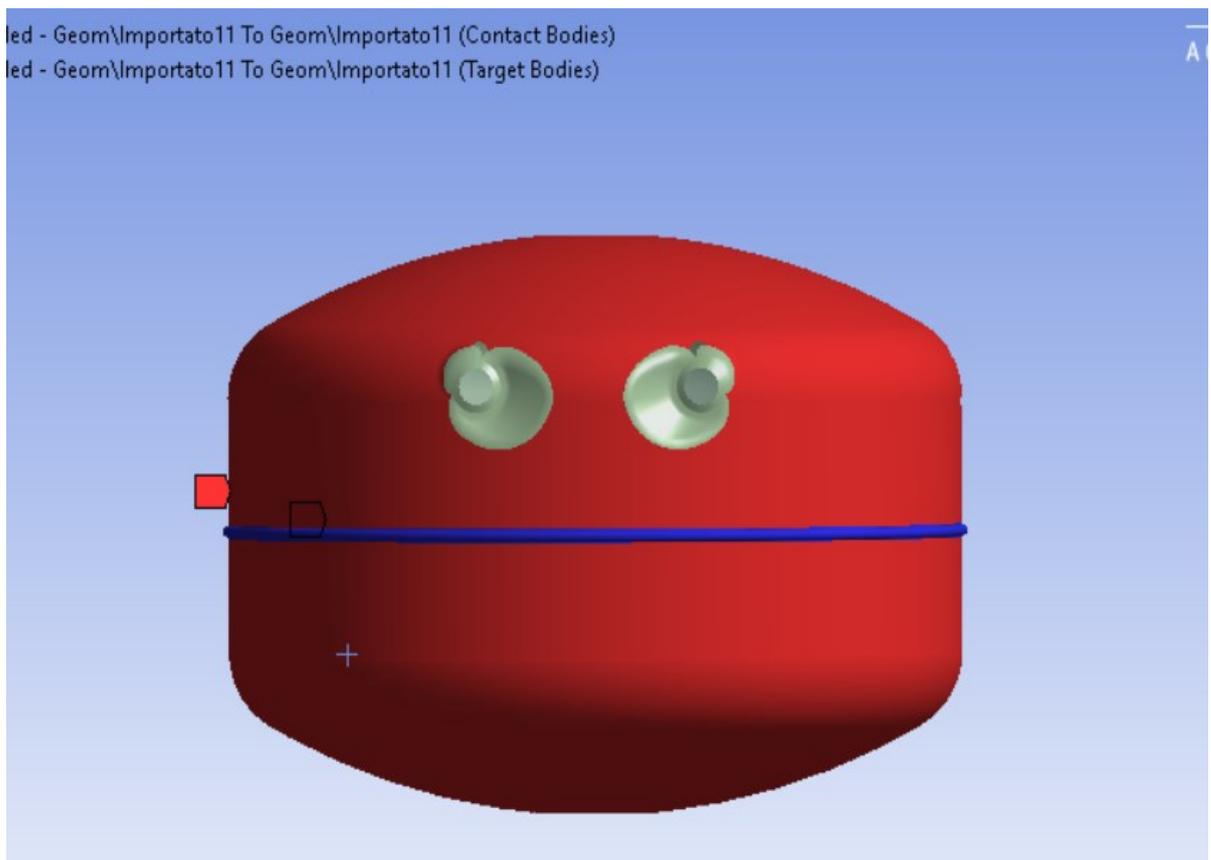


Figura 2.11: Contacts di tipo bonded.

2.3.1 Analisi del modello solido

4. Mesh: l'operazione di meshing è l'elemento fondamentale dell'analisi agli elementi finiti, è dalla quantità e dalla qualità degli elementi che dipenderà l'analisi. Per aver un risultato accettabile è stata scelta una dimensione delle mesh di 7,5 mm. Il metodo scelto per le mesh è stato quello dei tetraedri, essendo un modello solido, è l'unico che riesce a creare delle mesh accettabili. Mentre per il cordone di saldatura, per avere una maggior precisione, è stato utilizzato un face sizing della dimensione di 1,5 mm. Il risultato delle mesh lo vediamo nella figura 2.12 mentre la qualità nella figura 2.13.

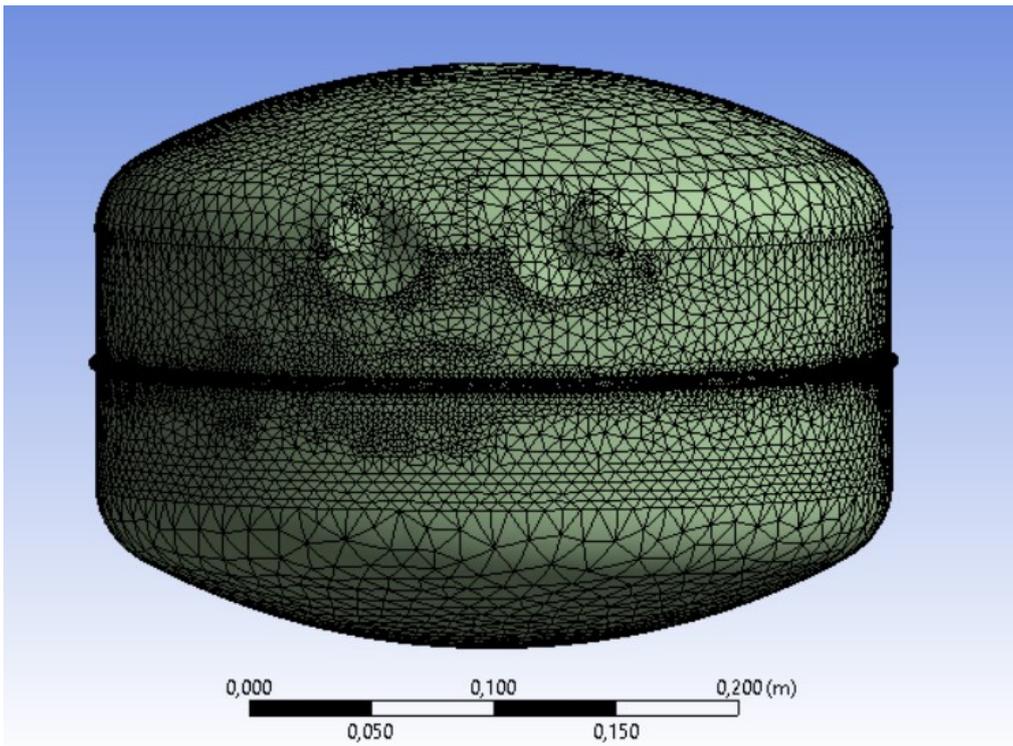


Figura 2.12: Mesh del modello modificato.

Capitolo 2 Metodologia utilizzata

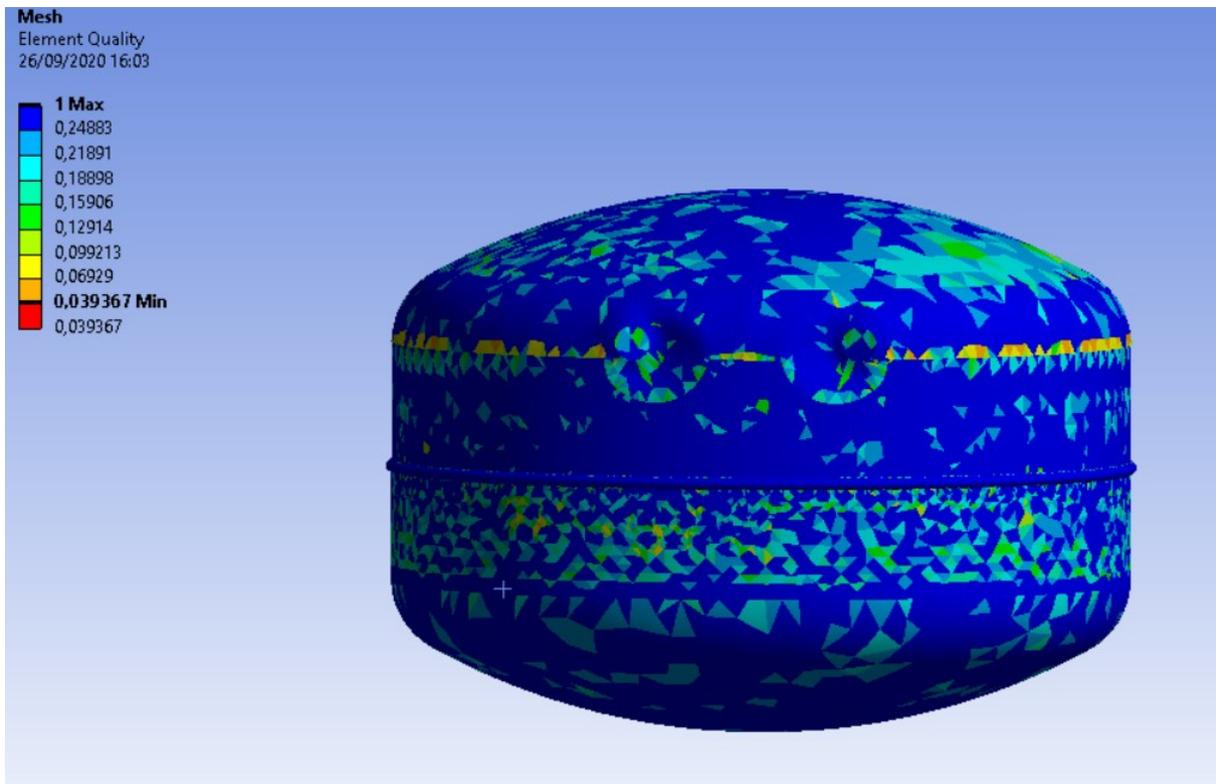


Figura 2.13: Element quality della mesh (qualità degli elementi della mesh).

5. Static structural: questo è il fulcro della nostra analisi, dove andremo ad inserire le forze, le pressioni e i vincoli sul nostro modello. La forza che abbiamo inserito, è la forza di gravità terrestre, agente sul baricentro del modello e la direzione scelta è $-Y$ rispetto al nostro sistema di riferimento. Il corpo è stato vincolato nella calotta inferiore utilizzando un fixed support, ovvero un supporto fisso che non permette nessun movimento al modello ed infine è stata applicata un pressione interna di 0,5 MPa.

2.3.1 Analisi del modello solido

6. Solution: questo è l'ultimo elemento della struttura ad albero ed è dove troviamo la nostra soluzione ovvero la deformazione totale, lo stress equivalente di Von Mises e la vita a fatica del nostro modello. L'informazione che a noi ci interessa è lo stress equivalente di Von Mises che viene calcolato tenendo conto dell'energia massima di distorsione e la formula data è definita come:

$$\sigma_{id,VM} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

La tensione equivalente di Von Mises espressa in MPa, ha il suo massimo nelle zone in cui si ha la curvatura della calotta superiore: come si può ben notare, più ci avviciniamo alla zona di saldatura più tensione decresce e di conseguenza il cordone non diventa una zona critica (Figura 2.14 e 2.15).

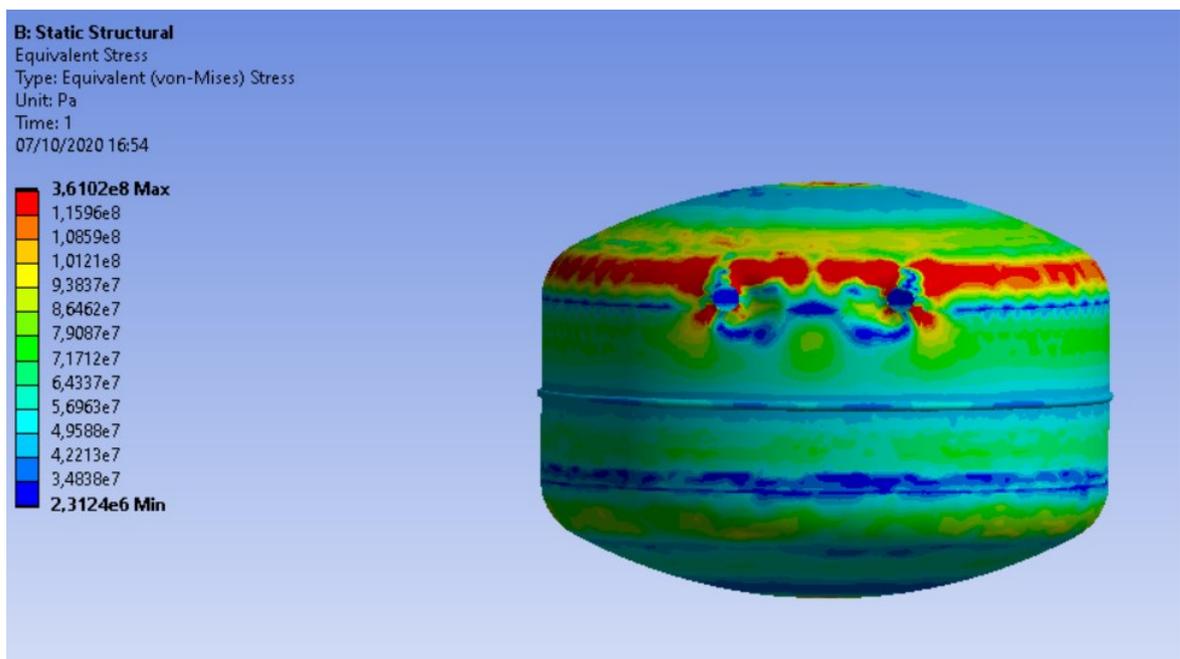


Figura 2.14: Equivalent stress di Von Mises.

Capitolo 2 Metodologia utilizzata

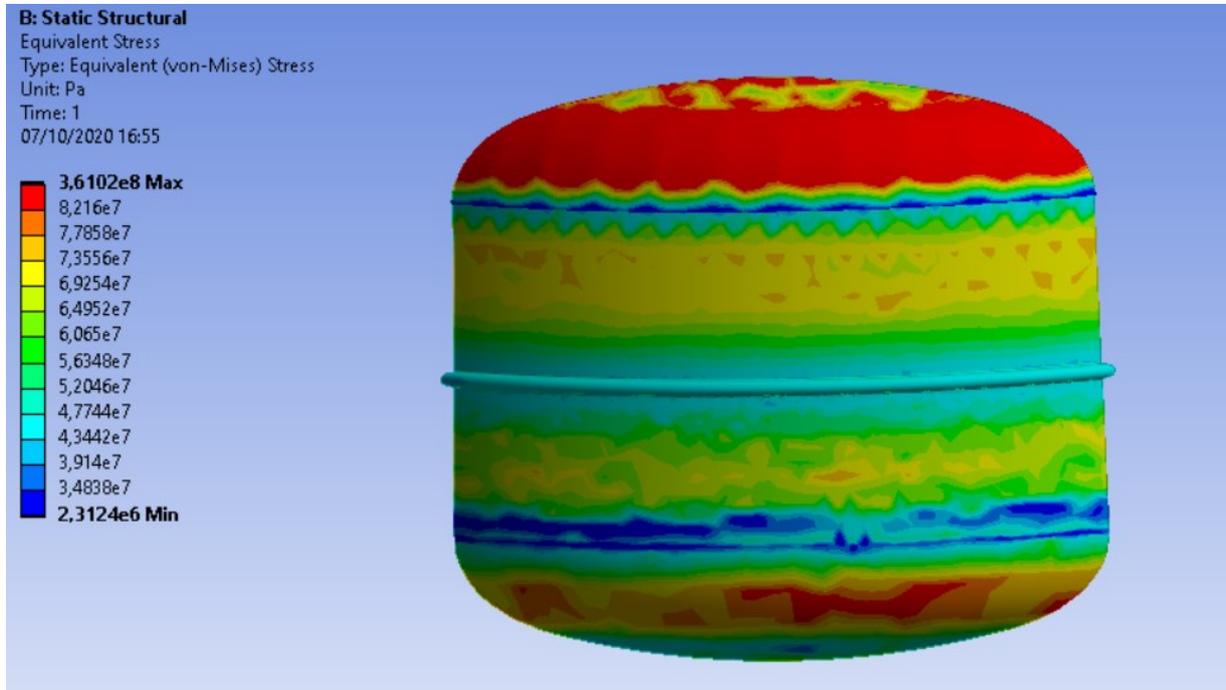


Figura 2.15: Sono stati usati un paio di piani di sezione per avere un visione più accurata sulla saldatura.

Possiamo dedurre dai risultati ottenuti che le zone più critiche si trovano sul raccordo della calotta superiore e possiamo ritenere che nella saldatura non si creano delle concentrazioni di tensione elevate.

Ora, l'ultima cosa che resta da analizzare è la vita a fatica del serbatoio che nella struttura ad albero viene denominata Fatigue tool. Il criterio utilizzato per lo studio della vita a fatica è il metodo di Goodman con il quale notiamo che la zona che sopporta il numero minimo di cicli sono i fori per il collegamento delle bugne (Figura 2.16).

2.3.1 Analisi del modello solido

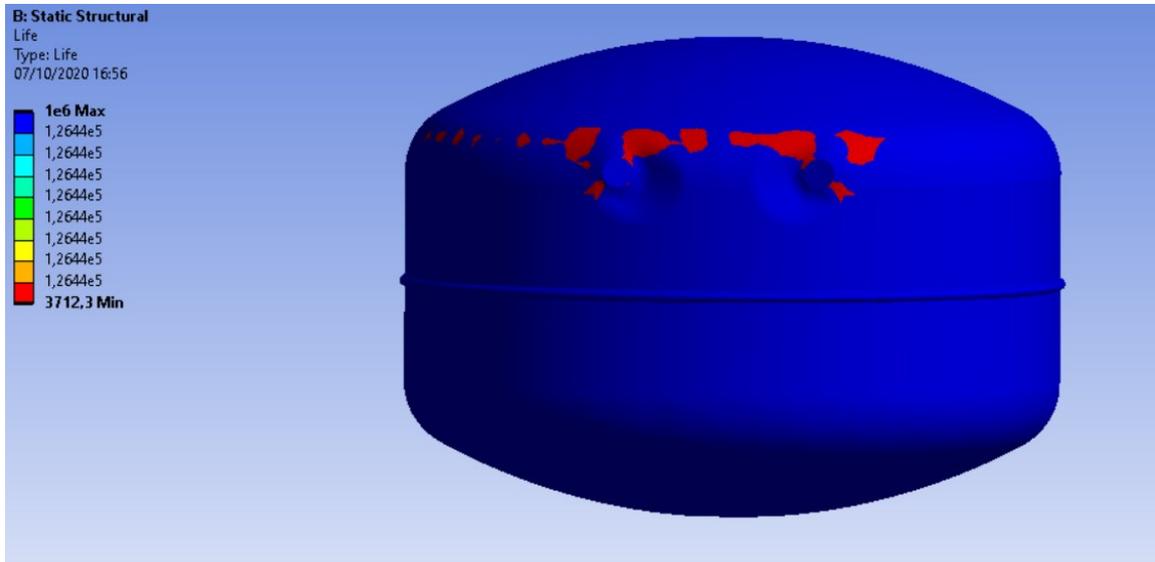


Figura 2.16: Vita a fatica del modello.

Capitolo 3

Confronto tra il modello solido e quello shell

In questo capitolo andremo a fare un confronto tra i risultati ottenuti mediante l'analisi agli elementi finiti di un modello solido, rispetto a un modello shell, per valutare se ci sia una notevole differenza tra i risultati e quale delle due soluzioni dia valori di tensione accettabili (Figura 3.1 e 3.2). Ricordiamo che uno shell è una superficie a cui viene attribuito uno spessore.

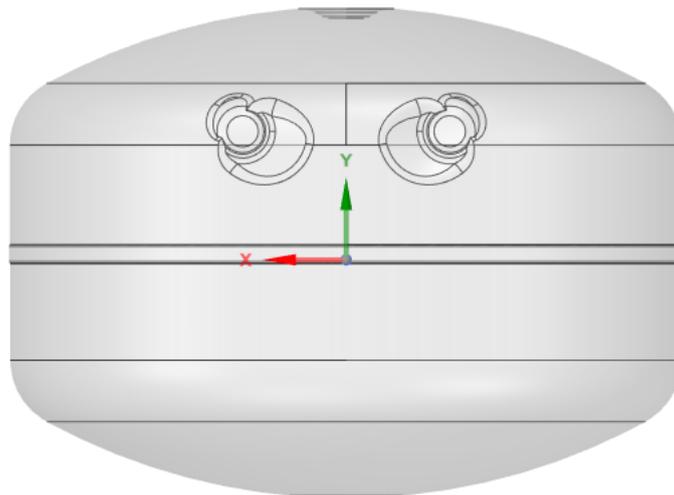


Figura 3.1: Modello shell.

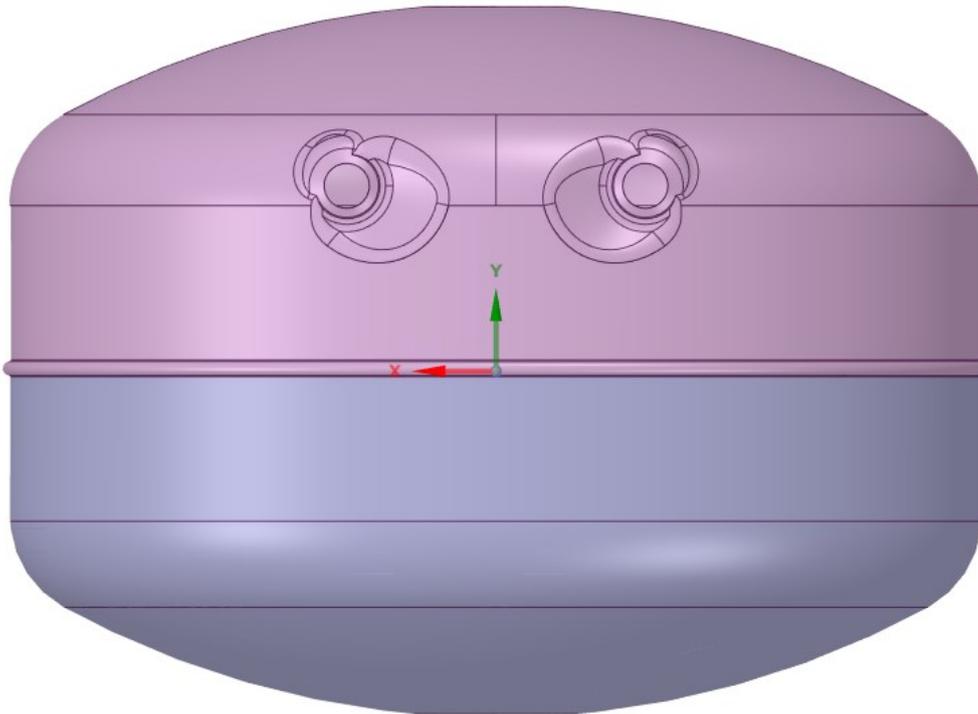


Figura 3.2: Modello solido.

3.1 Confronto geometrico

Il primo passo è mettere in primo piano le sezioni dei due modelli ed andare a focalizzarci sui cordoni di saldatura, già da qui vediamo come in un modello shell la saldatura viene approssimata con una superficie di spessore 1,5 mm che collega le due calotte semisferiche (Figura 3.3) mentre nel nostro modello si vede che si ha un elemento solido che unisce le calotte e va a formare il nostro cordone di saldatura (Figura 3.4).

Capitolo 3 Confronto tra il modello solido e quello shell

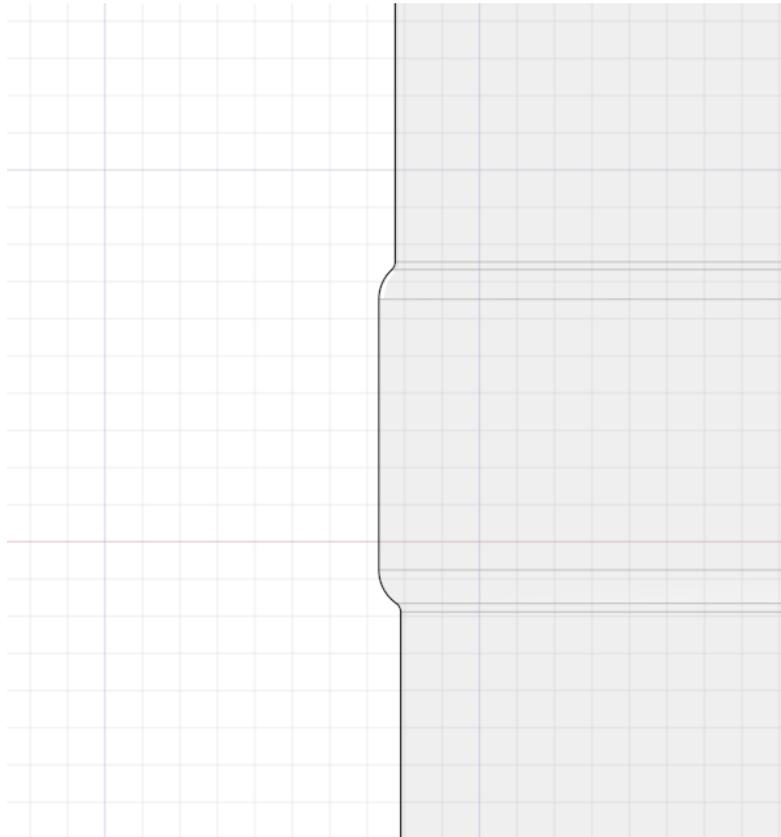


Figura 3.3: Cordone di saldatura del modello shell.

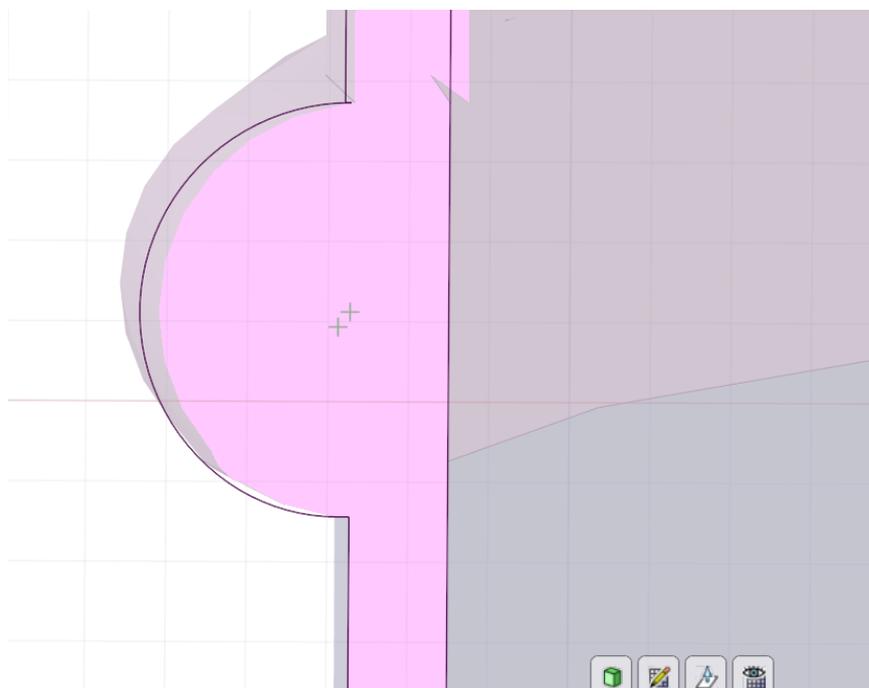


Figura 3.4: Cordone di saldatura del modello solido.

3.2 Confronto delle mesh

Il confronto tra le mesh mi permette di dare una valutazione più accurata sui risultati che avremo alla fine, poiché l'operazione di meshing su un modello shell mi permette di avere un numero di elementi minori. Inoltre permette di utilizzare figure geometriche più semplici per l'operazione di meshing, nonostante risulti più complicato per il programma perché deve rappresentare superfici 3D con figure 2D, utilizzando dei quadrati/rettangoli. Nel modello solido tutto ciò non è permesso, perché bisogna tener conto oltre che delle superficie del serbatoio, anche dello spessore, essendo esso un solido. Quindi per l'operazione di meshing devo usare il metodo dei tetraedri, che va a creare una mesh molto più fitta e il numero degli elementi si innalza rispetto al modello shell. Questo porta a un tempo di calcolo maggiore per il programma che fa l'analisi, ma aumenta anche le probabilità di errore, visto il gran numero di elementi. Analizzando il numero di elementi dei due modelli, vediamo come il modello shell abbia 10589 elementi (Figura 3.5), rispetto al modello solido che ne possiede 66315 (Figura 3.6), questo sta ad indicare che il numero degli elementi cresce radicalmente se passiamo da un modello shell a un solido.

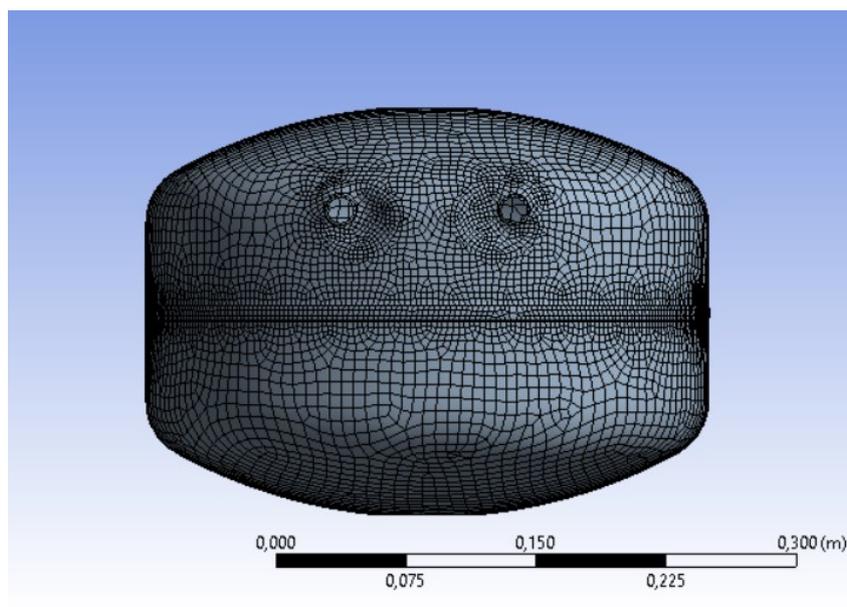


Figura3.5: Mesh del modello shell.

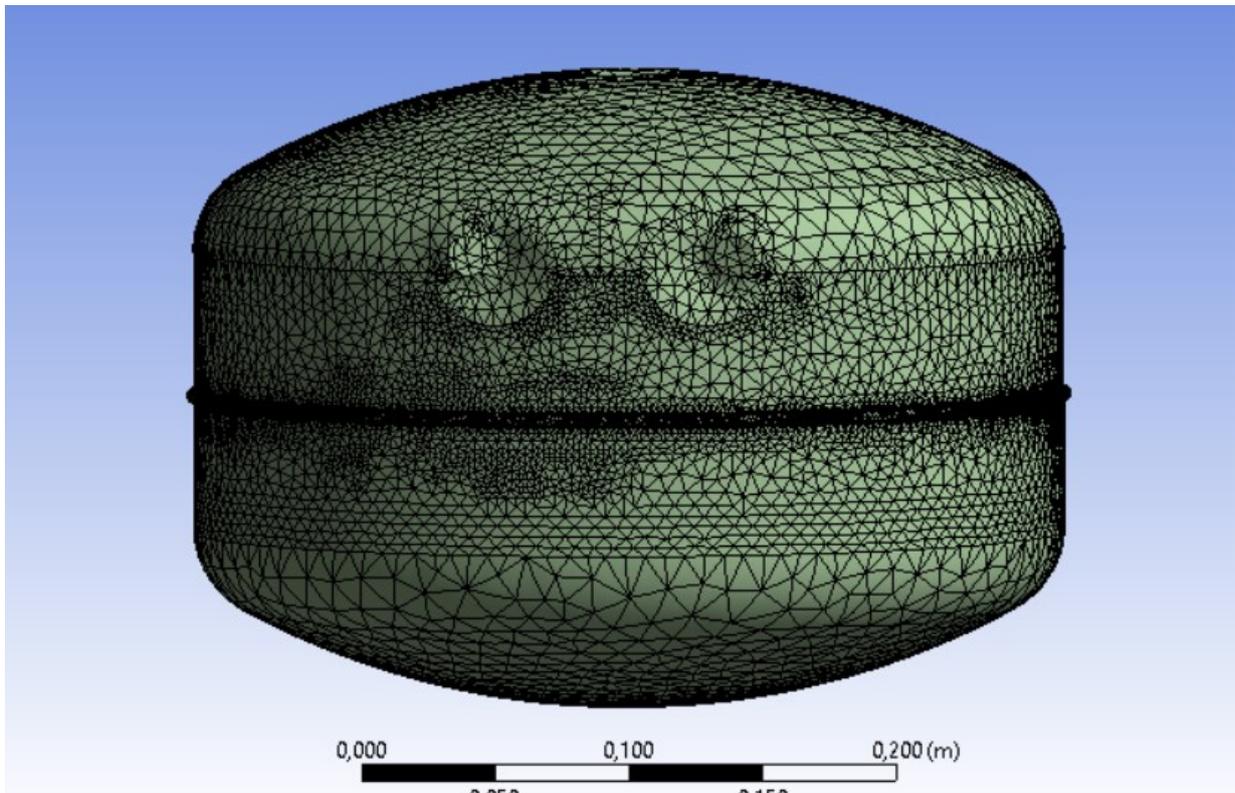


Figura 3.6: Mesh del modello solido.

Anche nelle immagini qui proposte si vede come le mesh rappresentate in un modello solido siano molto più fitte rispetto a quelle di un modello shell, soprattutto in quelle zone in cui si hanno delle forme strane, come l'intorno alle zone di collegamento delle bugne oppure nei punti di contatto tra la saldatura e le calotte. Per vedere meglio la differenza tra le due operazioni di meshing vediamo il wireframe dei due modelli (Figura 3.7 e 3.8).

3.2 Confronto delle mesh

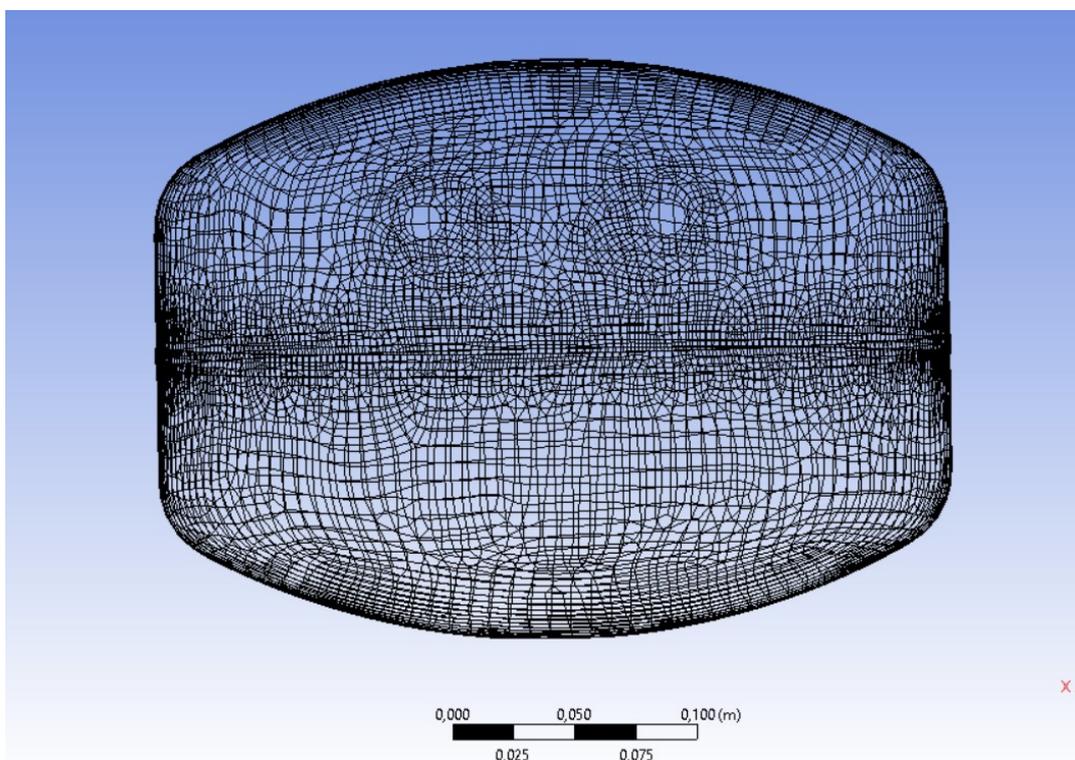


Figura 3.7: Wireframe del modello shell.

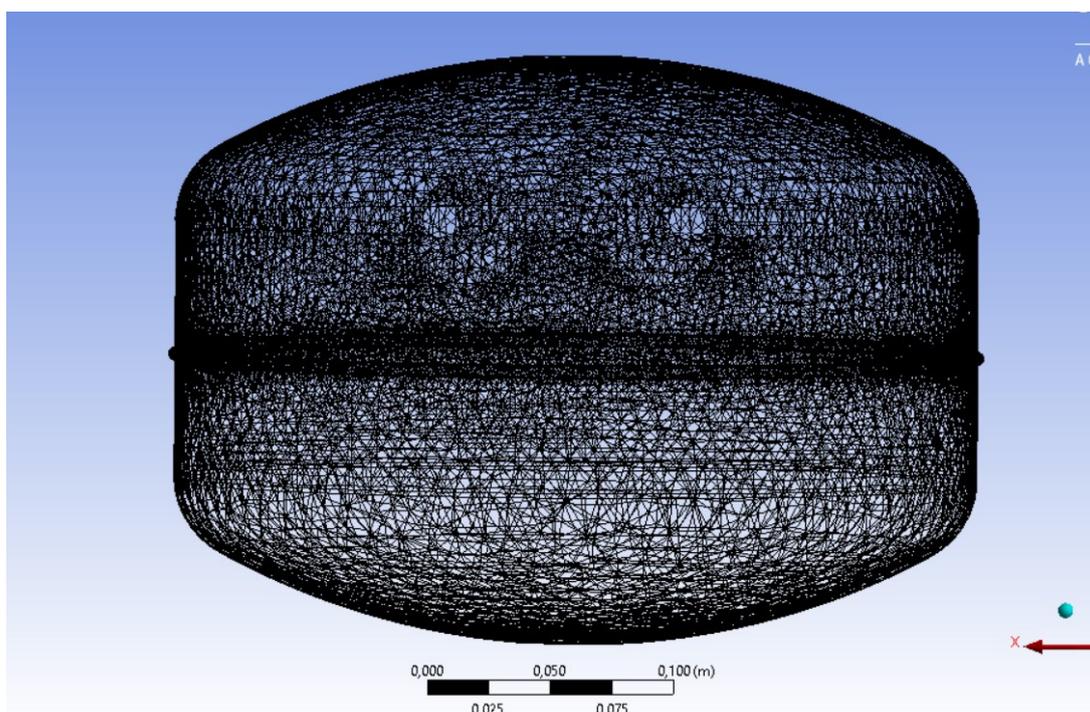


Figura 3.8: Wireframe del modello solido.

3.3 Confronto dei risultati di tensione

Una volta visto il confronto tra le mesh del modello solido e quello shell, possiamo andare a vedere come cambiano i risultati sulla tensione equivalente dei due modelli. In entrambi i serbatoi è stata applicata la stessa forza di gravità terrestre, nello stesso punto e nella stessa direzione ed è stata applicata la stessa pressione interna di 0,5 MPa (Figura 3.9 e 3.10).

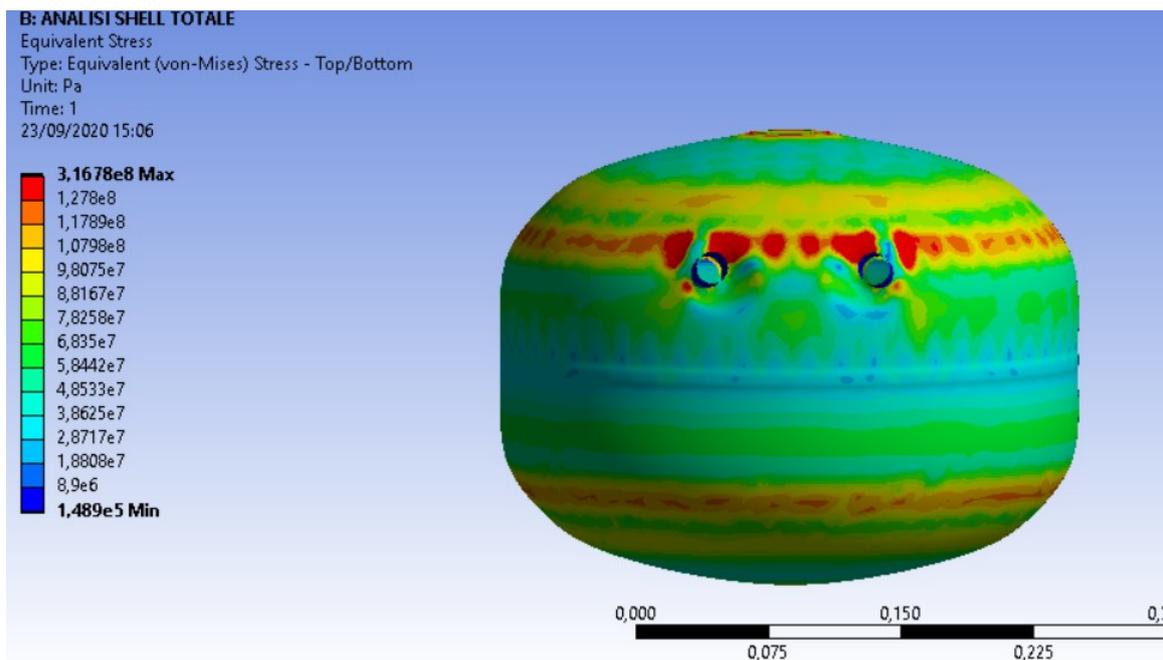


Figura 3.9: Equivalent stress di Von Mises del modello shell.

3.3 Confronto dei risultati di tensione

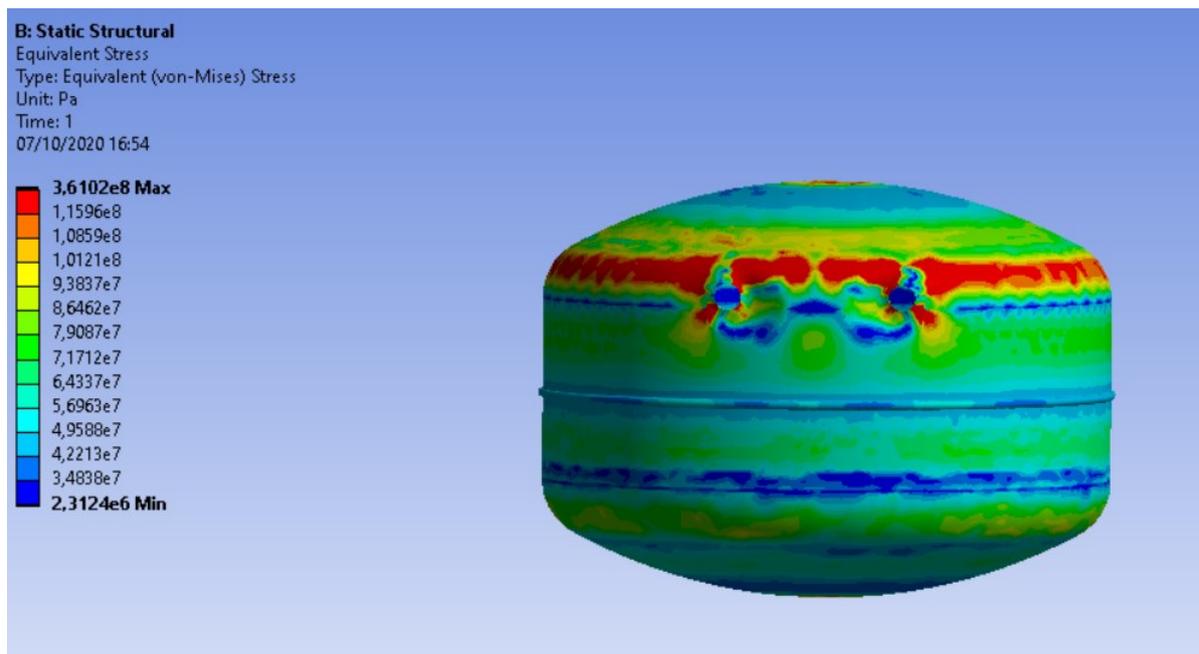


Figura 3.10: Equivalent stress di Von Mises del modello solido

Si nota benissimo dalle due immagine poste precedentemente, come l'intervallo tra cui oscilla la tensione equivalente del modello shell varia tra 0,15 MPa e 316 MPa mentre per il solido va da 2,31 MPa a 361 MPa. Da questi risultati possiamo dire che tra un analisi agli elementi finiti di un modello shell e quella di un modello solido, vediamo che i risultati della tensione non sono così distanti tra loro, soprattutto quando trattiamo tensioni di 10^8 Pa. Una differenza così bassa non reca alcun danno per l'analisi. Un'altra osservazione da fare è che per entrambi i modelli la zona critica la ritroviamo sempre intorno ai fori, che servono per il collegamento delle bugne. Ora invece vediamo come varia le tensione equivalente sul cordone di saldatura (Figura 3.11 e 3.12).

Capitolo 3 confronto tra il modello solido e quello shell

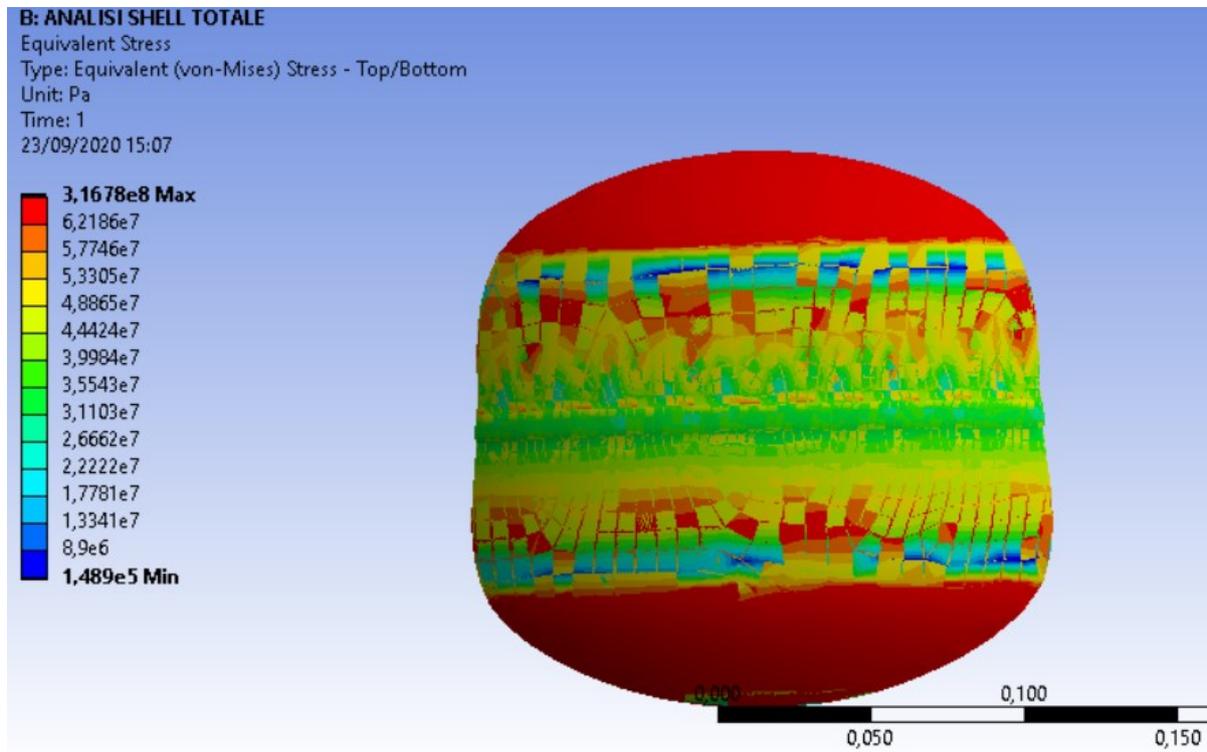


Figura 3.11: Equivalent stress sul cordone di saldatura del modello shell.

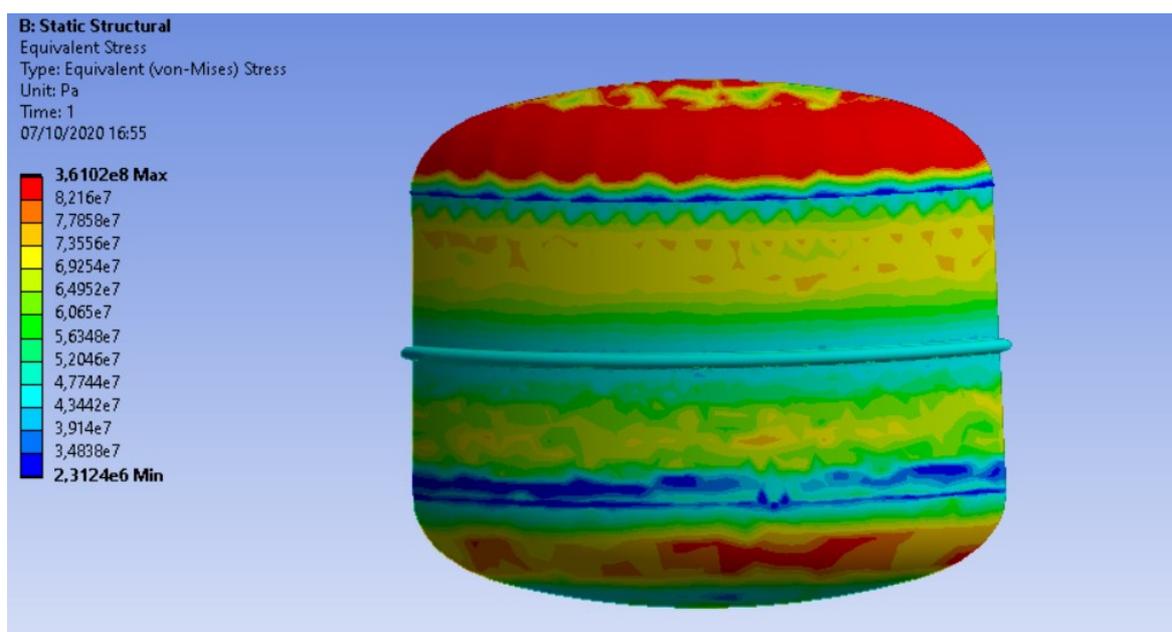


Figura 3.12 : Equivalent stress sul cordone di saldatura del modello solido.

3.3 Confronto dei risultati di tensione

In entrambi i modelli vediamo che la saldatura non è una zona critica e si nota molto bene come nel modello shell la tensione nell'intorno di saldatura varia tra 31 MPa e 48 MPa, mentre nel modello solido oscilla tra 39 MPa e 51 MPa. Quindi, anche in questo caso, possiamo dire che tra il modello solido e il modello shell non abbiamo una grossa variazione della tensione equivalente. Dopo aver fatto un confronto tra l'analisi agli elementi finiti del modello shell e quello del modello solido, dai risultati ottenuti vediamo che non abbiamo una differenza notevole dei valori di tensione e che in entrambi i casi il programma rileva come zona critica l'intorno ai fori utilizzati per il collegamento delle bugne. Detto ciò possiamo dire che per un'analisi FEM dal punto di vista pratico conviene effettuare un'analisi su un modello shell perché il programma riesce ad elaborare più velocemente i risultati, riesce ad ottenere delle mesh più semplici, andando a semplificare quelle zone dove ci potrebbero essere delle discontinuità geometriche e di conseguenza diminuirà anche la percentuale di errore da parte del programma.

(Teniamo conto del fatto che per quanto il software lavori correttamente, esso non rispecchierà mai in modo esattamente perfetto la realtà).

3.4 Analisi del modello solido applicando una pressione maggiore

In questo paragrafo andremo ad effettuare un'analisi agli elementi finiti del modello solido modificato. Ad esso andremo ad applicare un pressione di carico interna maggiore rispetto a quella precedente, pari a 0,8 MPa. Questa variazione di carico ci servirà per valutare se lo stress equivalente aumenti a tal punto da creare delle zone critiche nell'intorno del cordone di saldatura o addirittura se si creino delle nuove zone critiche. La procedura di analisi è analoga a quella precedente: ricreiamo in Ansys Workbench un project schematic con i due toolbox A e B, dove nel primo si ha la geometria del nostro modello solido modificato, mentre nel secondo andremo ad impostare le caratteristiche fisico meccaniche del nostro modello attraverso l'engineering data. Poi procederemo all'analisi utilizzando il software Mechanical. Analogamente a prima, assegneremo lo stesso materiale al modello, utilizzeremo il virtual topology per semplificare quelle zone con qualche discontinuità, andremo a ricreare delle mesh sul nostro solido identiche alle precedenti sempre utilizzando il patch conforming method (metodo dei tetraedri), di dimensione 7,5 mm per l'intero modello e con un face sizing per il cordone di saldatura con una dimensione di 1,5 mm. Adesso nella static structural ripeteremo quello già fatto in precedenza inserendo una forza di gravità terrestre nel baricentro sempre in direzione $-Y$, inseriamo un fixed support ed applichiamo una pressione di carico interna pari a 0,8 MPa. Una volta fatto tutto ciò andiamo a calcolare la soluzione in solution per vedere l'equivalent stress di Von Mises e la vita a fatica del nostro modello (Figura 3.13 e 3.14).

3.4 Analisi del modello solido applicando una pressione maggiore

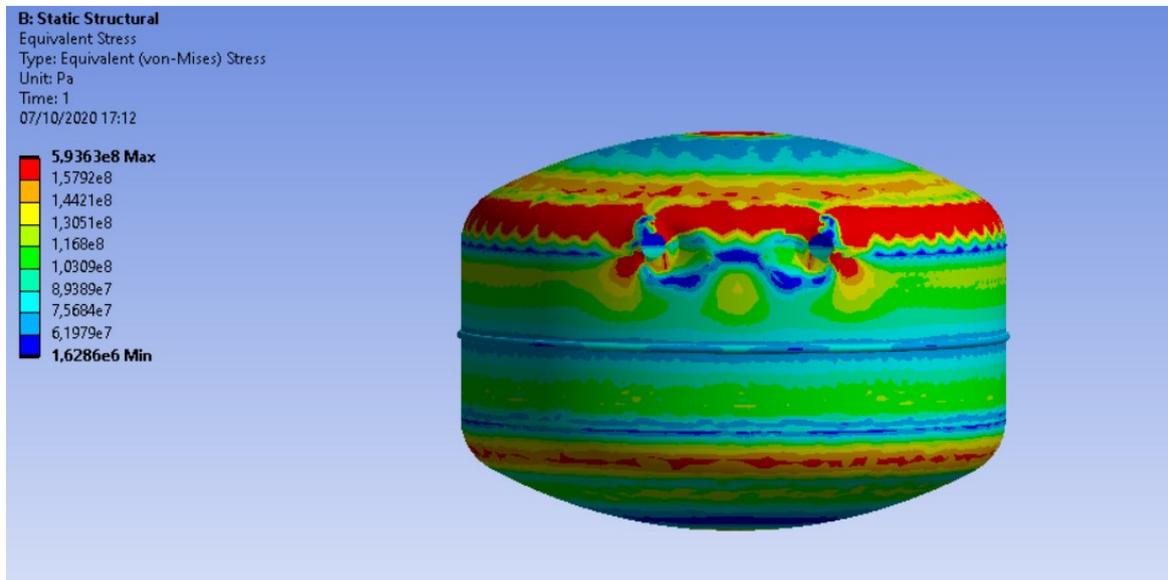


Figura 3.13: Equivalent stress di Von Mises sul nostro modello con una pressione di 0,8MPa.

Dall'immagine presente vediamo come lo stress equivalente aumenti perché abbiamo un intervallo tra un massimo di 594MPa e un minimo di 162MPa e si nota come le zone critiche nell'intorno dei fori si allarga anche nella zona sottostante ad essi e da ciò possiamo dire che innalzando la pressione di carico interna, la tensione equivalente crescerà a tal punto da creare delle zone critiche maggiori rispetto all'analisi del modello precedente che era sottoposto ad una pressione di 0,5MPa.

Capitolo 3 confronto tra modello solido e quello shell

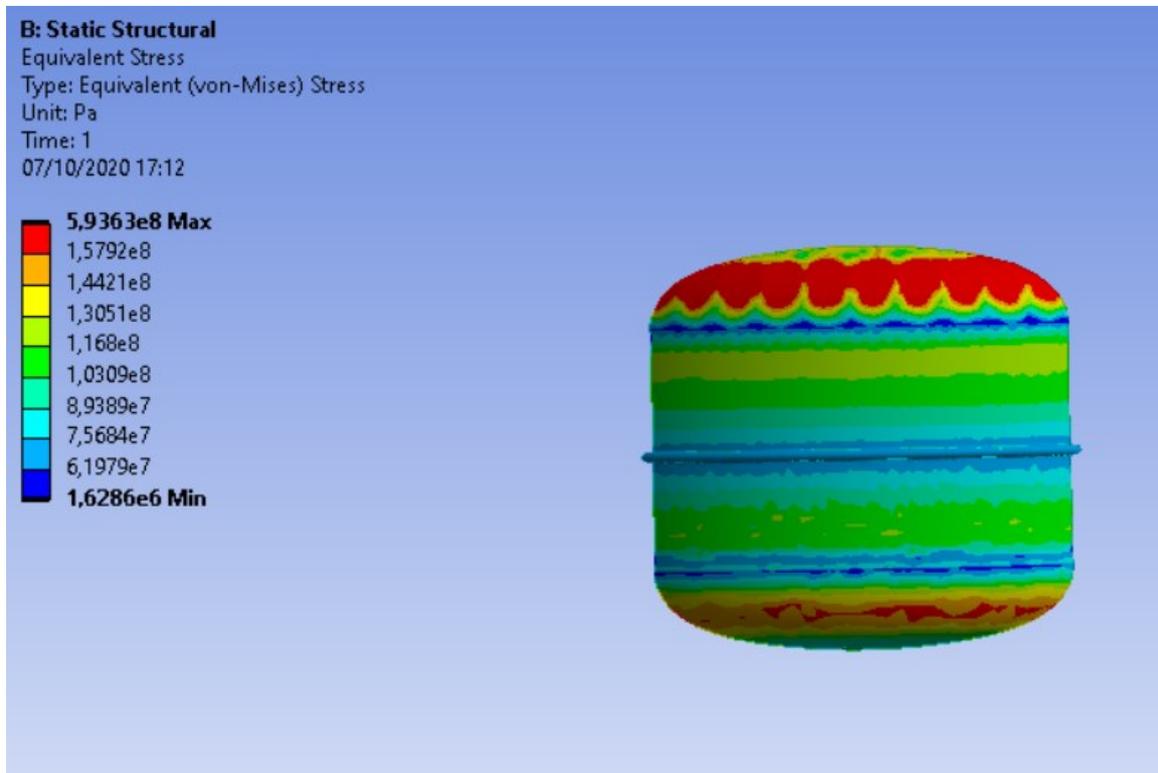


Figura 3.14: Equivalent stress di Von Mises sul cordone di saldatura del modello sottoposto a una pressione di 0,8MPa.

Andando a vedere quello che succede sulla saldatura, notiamo come anche innalzando il carico di pressione interna la saldatura non ne risente cioè che anche se la tensione sul nostro cordone aumenti rispetto al modello sottoposto a una pressione di 0,5 MPa, esso non diventa una zona critica.

Capitolo 4

Analisi di modelli difettati

In questo capitolo andremo a vedere l'analisi agli elementi finiti del nostro modello solido a cui vengono apportate delle modifiche geometriche. Vedremo un'analisi FEM con un cordone di saldatura di uno spessore maggiore. Analizzeremo un modello con un difetto di saldatura a cui verrà asportato un volume di materiale. Per entrambi i casi stenderemo delle considerazioni sulla tensione equivalente di Von Mises sul cordone.

4.1 Analisi del modello con uno spessore di saldatura maggiorato

Inizialmente modificheremo il modello solido aumentando lo spessore del cordone di saldatura e valuteremo le eventuali differenze nel caso ci fossero con la saldatura del modello solido originale (Figura 4.1 e 4.2).

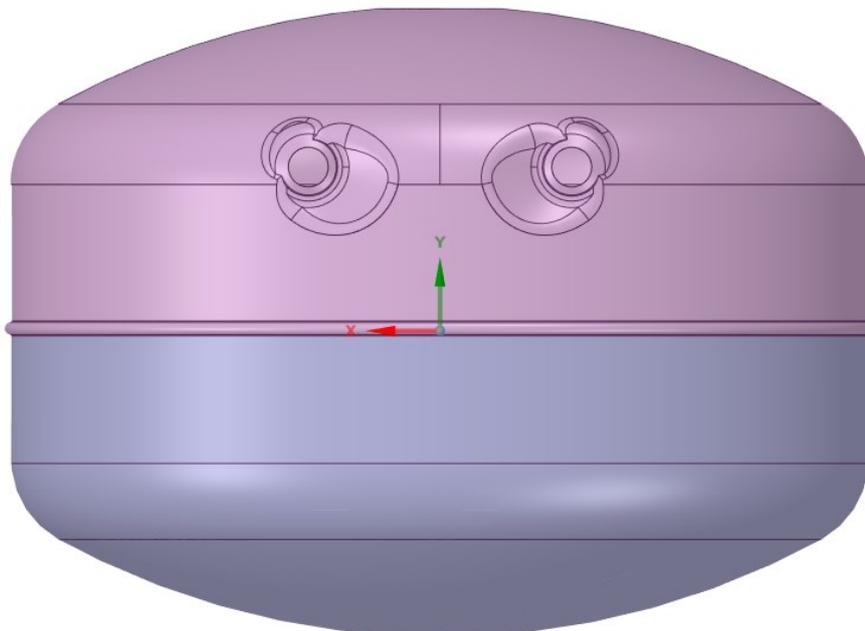


Figura 4.1: Modello modificato con uno spessore di saldatura maggiore.

4.1 Analisi del modello con uno spessore di saldatura maggiorato

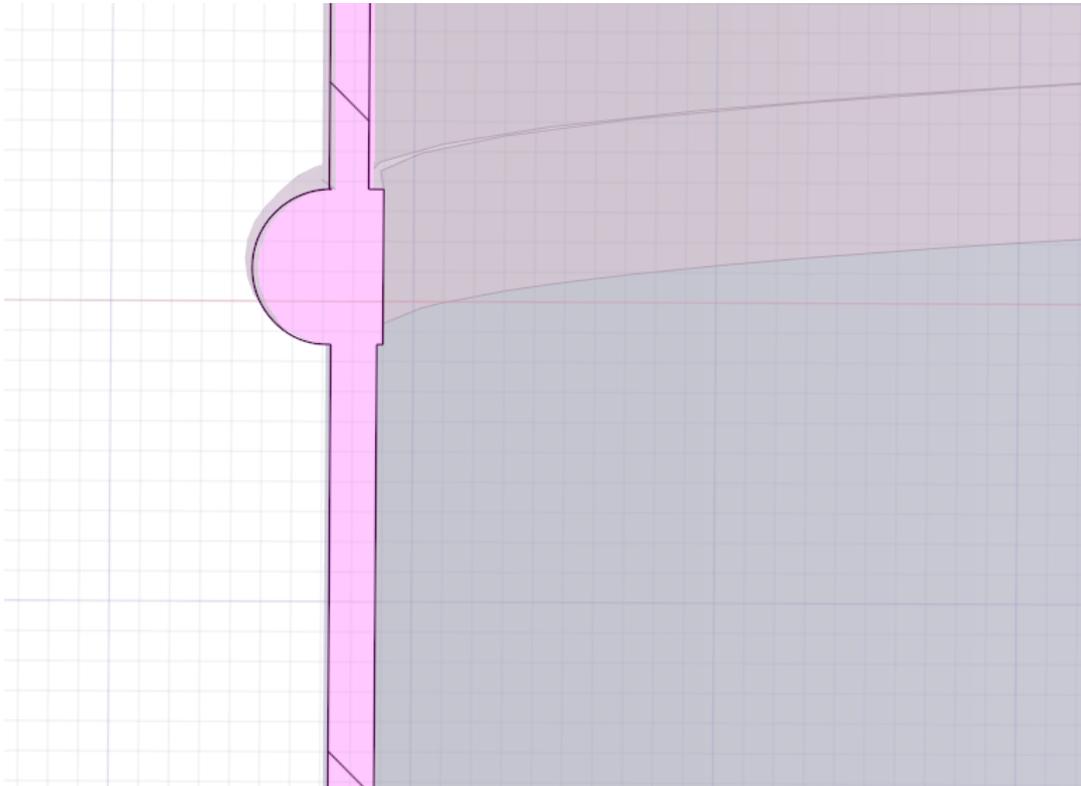


Figura 4.2: Saldatura del modello modificato con un spessore maggiore.

Una volta modificata la geometria del modello solido, andremo a fare un'analisi agli elementi finiti, ripetendo lo stesso procedimento già precedentemente utilizzato (vedi capitolo 2, paragrafo 2.3.1) per vedere se, aumentando lo spessore del cordone di saldatura, aumenteranno le tensioni o se, si creeranno delle zone problematiche, che potrebbero portare ad eventuali problemi. La soluzione dell'analisi FEM ottenuta utilizzando l'equivalent stress di Von Mises, è visibile in figura 4.3. Per analizzare più da vicino il cordone di saldatura, sono stati utilizzati una serie di piani di taglio (come mostrato nella figura 4.4).

Capitolo 4 Analisi di modelli difettati

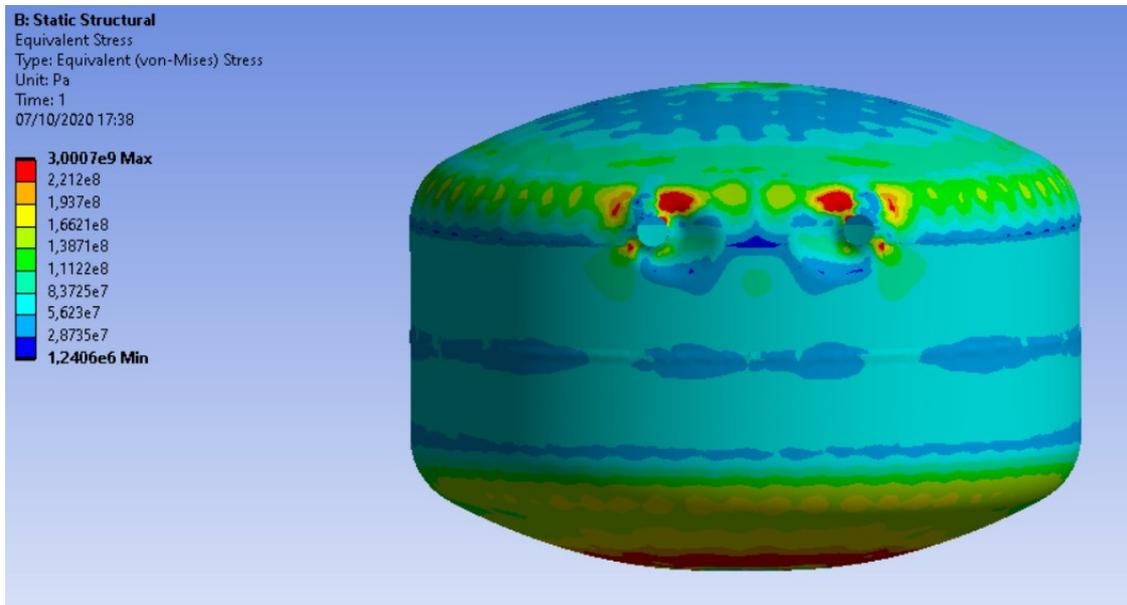


Figura 4.3: Equivalent stress del modello modificato con spessore di saldatura maggiore (la tensione di picco è dovuta ad una concentrazione numerica e non deve essere tenuta in considerazione).

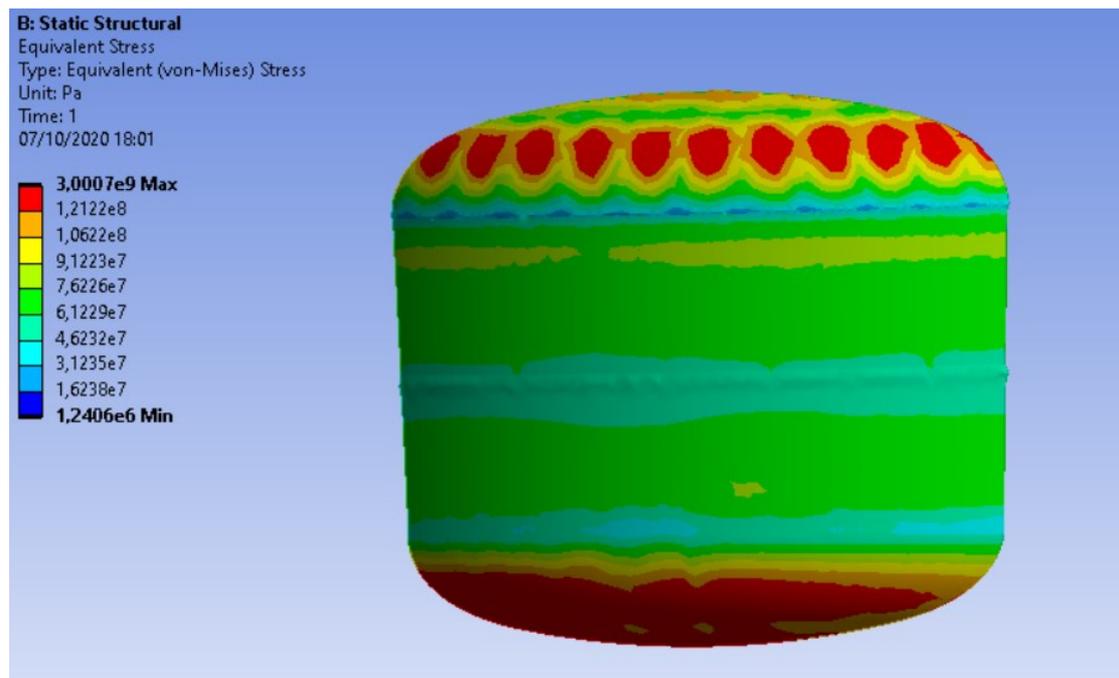


Figura 4.4: Visione ravvicinata della saldatura del modello modificato

4.1 Analisi del modello con uno spessore di saldatura maggiorato

Grazie all'analisi FEM, possiamo vedere che nel nostro modello modificato, che anche aumentando lo spessore del cordone di saldatura, essa non riporta nessuna zona critica e confrontandolo con il modello originale (Figura 2.14) vediamo che il range delle tensioni è differente.

Nel modello originale abbiamo una tensione che va 2,3 MPa a 360 MPa, mentre nel modello modificato va da 1,2 MPa a 3000 MPa.

Questa differenza ci indica che avendo un cordone di saldatura con uno spessore maggiore, avremo anche una resistenza più alta delle nostre calotte, ma la tensione sopportata dalla nostra saldatura si aggira sempre sugli stessi valori di tensione tra 43-52 MPa per il modello solido originale e tra 46-60 MPa per il modello modificato.

Quindi possiamo dire che aumentando lo spessore del cordone di saldatura, non ci permette di poter applicare tensioni maggiori su di esso.

4.2 Analisi di un modello con un difetto di saldatura

Nel paragrafo seguente tratteremo un difetto di saldatura simile a quello che potrebbe crearsi nella realtà, andando ad asportare una sfera di volume dal cordone di saldatura (Figura 4.5 e 4.6) del modello solido, per poi andare ad effettuare la nostra analisi agli elementi finiti, tenendo conto delle tensioni mediante, sempre l'utilizzando dell'equivalent stress di Von Mises, per poi fare le nostre considerazioni confrontandolo con il modello solido originale.

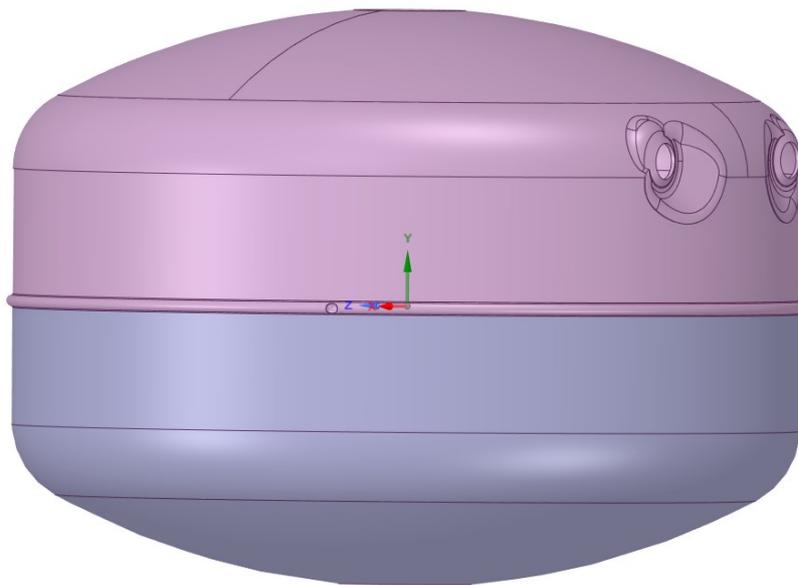


Figura 4.5: Modello solido con cordone di saldatura a cui è stato asportato una sfera di materiale.

4.1 Analisi del modello con uno spessore di saldatura maggiorato

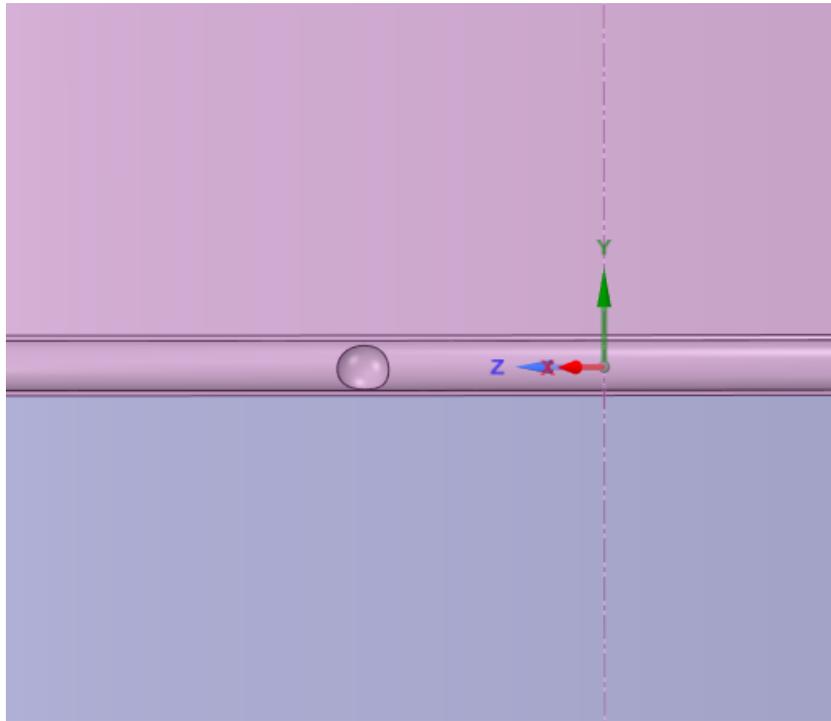


Figura 4.6: Cordone di saldatura difettato ovvero a cui è stato asportato una sfera di materiale.

Ora una volta apportate le modifiche geometriche e aver ricreato il difetto sul nostro cordone di saldatura, basterà effettuare l'analisi agli elementi finiti, sempre tramite il software Mechanical, all'interno di ANSYS, ripercorrendo lo stesso procedimento spiegato nel capitolo 2 paragrafo 2.3.1 e poi andare a fare il confronto con il modello originale. Nella figura 4.7 vediamo l'equivalent stress di Von Mises sull'intero modello e quello cerchiato in rosso sta a dirmi dove si trova il difetto, mentre nella figura 4.8 è stato fatto uno zoom per mostrare in modo più chiaro quello che succede sul difetto del nostro cordone.

Capitolo 4 Analisi di modelli difettati

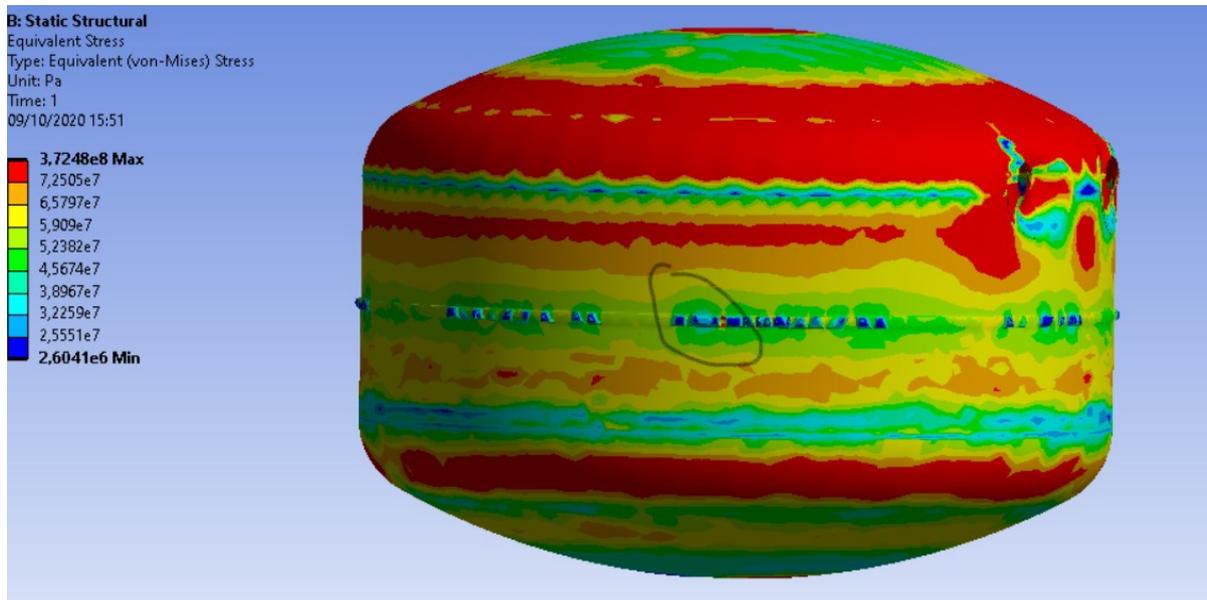


Figura 4.7: Equivalent stress del modello che presenta un cordone di saldatura difettato.

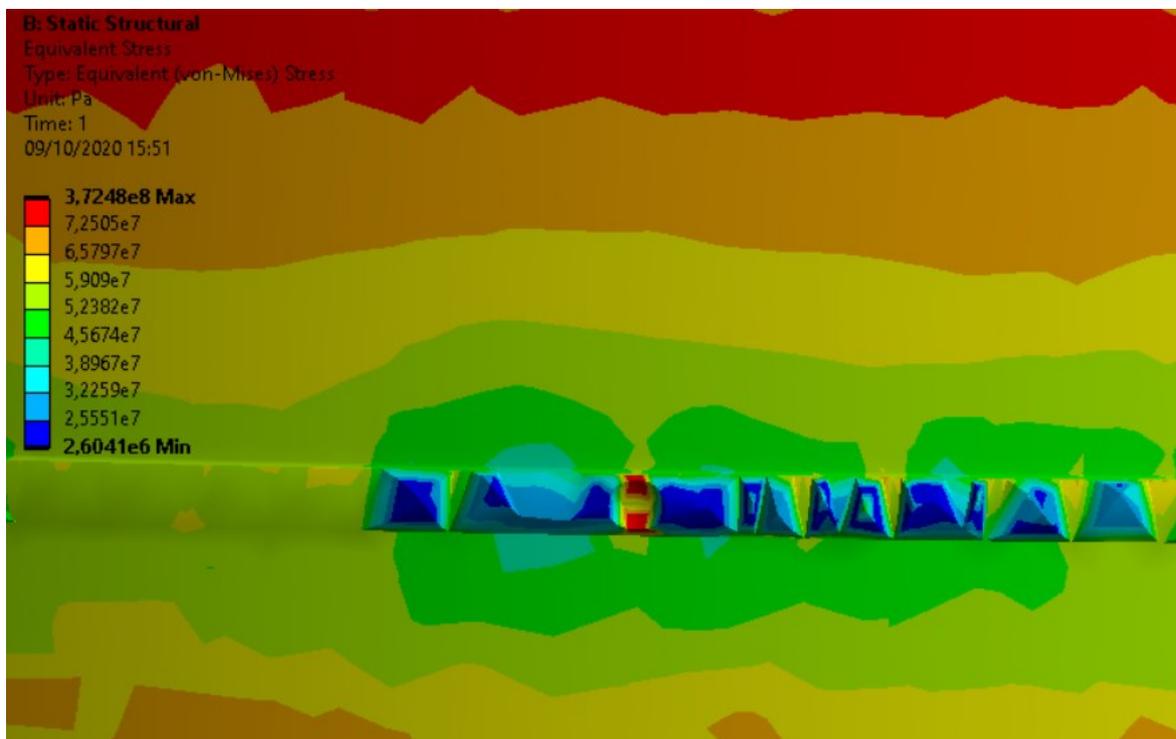


Figura 4.8: Zoom sul difetto di saldatura.

4.1 Analisi del modello con uno spessore di saldatura maggiorato

Alla fine dall'analisi di questo modello possiamo dire che confrontandolo con il modello solido originale, non troviamo delle differenze sulle tensioni sopportate dal serbatoio: sia la tensione minima che la tensione massima sono quasi le stesse, ma se andiamo a vedere quello che succede nella zona dove è presente il difetto sul cordone, troviamo delle tensioni molto alte, a tal punto da creare delle zone critiche nel difetto che possono essere dannose per l'intero modello. Quindi diciamo che, affinché non si presentino difetti, non ci sono delle zone critiche sul cordone di saldatura, ma dal momento in cui la saldatura viene lavorata e si creano dei punti in cui manca del materiale, questo potrebbe portare a difetti seri. Nell'eventualità che si crei una rottura, avremo perdite di acqua dal serbatoio e il contatto con l'aria porterà ad avere problemi di corrosione.

Conclusioni

In conclusione possiamo dire che dai risultati ottenuti nel capitolo 2 paragrafo 2.3.1 l'analisi agli elementi finiti del nostro modello originale, ci consente di affermare che non abbiamo tensioni critiche sul nostro cordone di saldatura, quindi possiamo dire che per un modello ideale con una saldatura perfetta sottoposto a cicli di pressione variabili tra 0,5 MPa e 1 MPa non si creano delle zone critiche che possono portare ad avere delle cricche o addirittura delle rotture che possono provocare infiltrazioni di aria o perdite di acqua, che portano a fenomeni di corrosione.

Il confronto con il modello shell ci mostra come l'analisi di un modello solido e quella di un modello shell non sono molto differenti tra loro al fine dei risultati, mentre la differenza si vede nell'operazioni di meshing, in quanto in un modello solido si ha bisogno di elementi di forma tetraedrica, per dare alla fine dei risultati corretti.

Mentre con lo shell è possibile utilizzare degli elementi con una geometria abbastanza semplice, come possono essere quadrati o rettangoli, ma risulta più complicato creare delle mesh su un modello shell, in quanto tale modello è composto da una serie di superfici alle quali viene attribuito uno spessore.

Quindi alla fine dell'operazione di meshing si viene a creare sempre una mesh di una figura 3D, ma avremo sempre un numero di elementi e di nodi minore rispetto a quelli che si creano in modello solido.

In conclusione per cercare di fare un'analisi abbastanza accurata della nostra saldatura, siamo andati a vedere cosa succederebbe al nostro modello se esso riportasse dei difetti di saldatura: nel primo caso abbiamo analizzato un modello con un cordone di uno spessore maggiore rispetto all'originale, ma alla fine dei risultati non abbiamo avuto grosse differenze al livello di tensioni, mentre nel secondo caso dove è stato creato un cordone di saldatura alla quale è stato asportato un volume sferico di materiale, si nota chiaramente come in quel punto si creano delle tensioni molto elevate, rendendolo critico.

Conclusioni

Infine possiamo dire che se lavoriamo con un modello solido, con una saldatura perfetta, non avremo problemi di tensioni sul nostro cordone, mentre nel caso in cui esso dovrebbe riportare dei difetti bisognerà procedere a rimuovere tale difetto, oppure si dovrà tenere sotto controllo la nostra saldatura perché si potrebbero verificare dei problemi abbastanza critici.

Un'aggiuntiva analisi che si poteva fare per avere un confronto con l'analisi agli elementi finiti, era prendere il nostro modello e sottoporlo alla DIC (digital image correlation): una tecnica ottica che permette di valutare in modo non distruttivo e senza contatto, lo stato deformativo.

Tale tecnica permette di studiare qualsiasi materiale sottoposto a distorsioni causate da azioni termiche o meccaniche e consente di ricavare mappature ad alta definizione di spostamenti e deformazioni, confrontando immagine acquisite in stati deformativi diversi.