

ALMA MATER STUDIORUM-UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA

CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe LM-33

Sede di Forlì

TESI DI LAUREA

In Progettazione Meccanica e Costruzione di Macchine

**Analisi comparativa di
forme costruttive di un componente critico
per macchinari da perforazione**

CANDIDATO

Lorenzo Vaenti

RELATORE

Prof. Vincenzo Dal Re

CORRELATORE

Ing. Eugenio Fiorilli

Anno accademico

2011/2012

Sessione Terza

SOMMARIO

In questo elaborato di tesi viene presentata un'analisi di comparazione tra diverse e possibili forme costruttive di un componente critico per macchinari da perforazione.

Sono state analizzate diverse soluzioni e per ognuna di queste sono state fatte verifiche strutturali, resistenza a buckling, progettazione dei cordoni di saldatura, realizzazione del ciclo produttivo, analisi dei costi dettagliata ed analisi FEM.

Le diverse soluzioni sono state comparate secondo dei filtri (fattibilità pratica, costo, peso, fattore estetico, ispezionabilità) in modo tale da riuscire ad individuare in maniera non soggettiva quale tra quelle proposte potrebbe essere presa in considerazione dall'azienda per un possibile sviluppo futuro.

Indice

1. Introduzione	9
1.1 Scopo	9
1.2 L'azienda	11
1.3 Macchine Soilmec	14
1.3.1 Gamma prodotti	14
1.3.2 Tecnologie	15
1.3.3 Utensili	17
2. La tecnologia della saldatura.....	19
2.1 Introduzione generale	19
2.2 Cenni storici.....	20
2.3 Tipi di giunti saldati	21
2.4 Specifica di saldatura Soilmec	23
2.4.1 Scopo.....	23
2.4.2 Riferimenti.....	23
2.4.3 Responsabilità.....	24
2.4.4 Tipologie dei giunti saldati	25
2.4.5 Tecnologie di saldatura	25
2.4.6 Preparazione dei materiali base per la saldatura.....	26
2.4.7 Materiali d'apporto	27
2.4.8 Precauzione da adottarsi per elettrodi rivestiti	27
2.4.9 Precauzione da adottarsi per arco sommerso	28
2.4.10 Precauzione da adottarsi per fili	28
2.4.11 Precauzioni da adottarsi per TIG	28
2.4.12 Preriscaldamento ed interpass.....	29
2.4.13 Trattamenti termici	29
2.5 Generalità dei processi di saldatura	30
2.5.1 GTAW o TIG	30
2.5.2 GMAW o MIG/MAG e FCAW	31
2.5.3 SMAW.....	33
2.5.4 SAW	34
2.6 Difettologie	35
2.6.1 Fenomeni metallurgici	35

2.6.2	Fenomeni termici.....	37
2.6.3	Difetti da esecuzione	38
2.7	Metodi di calcolo e Normative	39
2.7.1	Giunti a completa penetrazione	39
2.7.2	Giunti a cordoni d'angolo	41
2.7.3	Normative e metodi di calcolo.....	43
2.7.4	Normative straniere	46
2.7.5	Normativa italiana	47
2.7.6	Eurocodice 3.....	49
3.	Servizio Controllo Qualità (SCQ)	50
3.1	Magnetoscopia	52
3.2	Ultrasuoni	54
4.	Teoria carico di punta.....	56
4.1	Aste compresse	56
4.2	Progettazione secondo normativa.....	58
5.	Caso aziendale	62
5.1	Cinematismo	62
5.2	Criteri di valutazione	66
5.3	Ciclo produttivo ed analisi dei costi	67
5.4	Soluzioni alternative.....	69
6.	Codice esistente	73
6.1	Geometria base	74
6.2	Verifica a carico di punta secondo UNI EN 10011	75
6.3	Verifiche sul terminale.....	78
6.3.1	Verifica a pressione di contatto.....	79
6.3.2	Verifica a strappo in direzione del tiro	79
6.3.3	Verifica a strappo in direzione perpendicolare al tiro.....	80
6.4	Progettazione e verifica dei cordoni di saldatura.....	80
6.5	Ciclo produttivo ed analisi di costo	82
6.5.1	Materiale grezzo di partenza	83
6.6	Peso	84
6.7	Fattibilità pratica.....	85
6.8	Ispezionabilità	85

6.9	Fattore estetico.....	85
6.10	Analisi FEM	86
7.	Soluzione 2	94
7.1	Progettazione e verifica dei cordoni di saldatura.....	95
7.2	Ciclo produttivo ed analisi dei costi	96
7.3	Pesi.....	100
7.4	Fattibilità pratica.....	101
7.5	Ispezionabilità	102
7.6	Fattore estetico.....	102
7.7	Analisi FEM.....	103
8.	Soluzione 3	107
8.1	Verifica a carico di punta secondo UNI EN 10011	109
8.2	Progettazione e verifica dei cordoni di saldatura.....	111
8.3	Ciclo produttivo ed analisi di costo	112
8.3.1	Stampato	118
8.3.2	Piano ammortamento stampo	119
8.4	Peso	120
8.5	Fattibilità pratica.....	121
8.6	Ispezionabilità	122
8.7	Fattore estetico.....	122
8.8	Analisi FEM	123
9.	Soluzione 4	127
9.1	Verifica a carico di punta secondo UNI EN 10011	129
9.2	Progettazione e verifica dei cordoni di saldatura.....	130
9.3	Ciclo produttivo ed analisi costi.....	131
9.4	Peso	137
9.5	Fattibilità pratica.....	139
9.6	Ispezionabilità	139
9.7	Fattore estetico.....	140
9.8	Analisi FEM	141
10.	Confronto alternative	144
11.	Conclusioni.....	147
11.1	Disegno complessivo di carpenteria.....	148

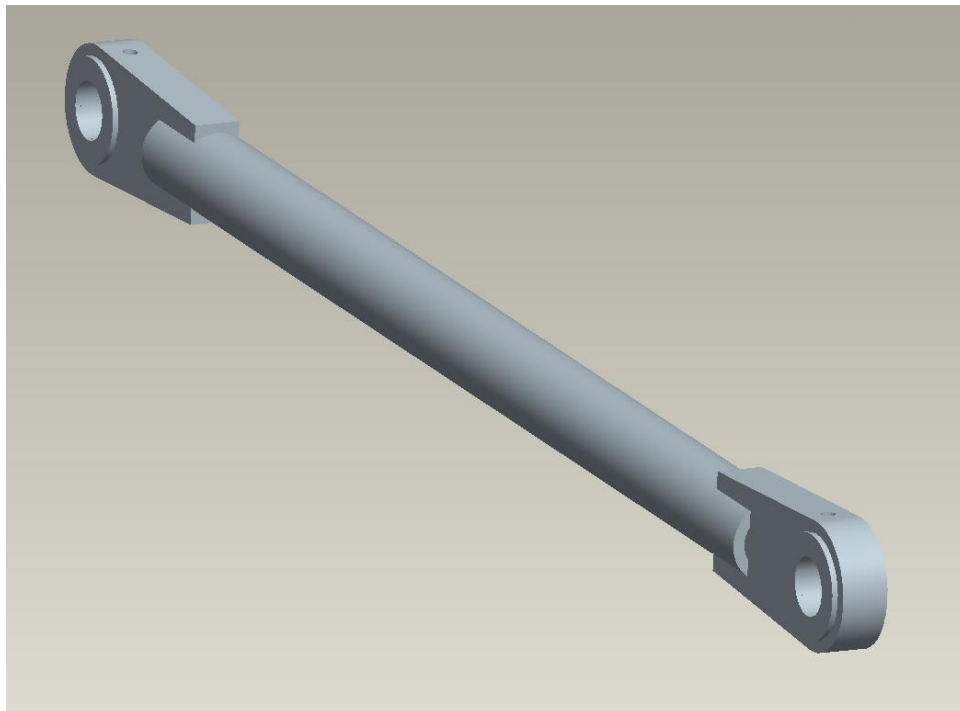
12. Bibliografia	151
------------------------	-----

1. Introduzione

1.1 Scopo

Lo scopo di questa tesi è quello di fare un'analisi comparativa di forme costruttive proposte in alternativa all'attuale puntello di sostegno dell'asta di perforazione delle macchine SR 65, SR 70 ed SR 80 ovvero macchine da perforazione per pali di grande diametro.

Il puntello è uno dei due bilancieri all'interno del cinematismo, nello specifico un parallelogramma articolato a due bilancieri, che mette in posizione, sostiene e riesce a far spostare parallelamente a se stessa l'asta di perforazione, ovvero è un componente critico per quanto riguarda la stabilità dell'intera macchina. Queste macchine non appartengono alla nuova gamma prodotti Soilmec e perciò presentano componenti di vecchia concezione, proprio come il puntello in esame.



Poco tempo fa su una macchina operante a Dubai, in Medio Oriente, il puntello si è rotto di schianto causando gravi disagi e mettendo in pericolo il personale presente in loco, questo avvenimento è stata fonte di ispirazione per questo percorso.



Terminale e tubo dopo rottura



Superficie di frattura

Come si può vedere la struttura esistente del puntello prevede un tubo (lunghezza 2200 mm, D 139.7 mm , spessore 20 mm) che viene tagliato alle estremità in maniera tale da poter esser saldato ai terminali (denominati orecchie), che si presentano come parte piena.



Struttura piena del terminale

Dopo un'attenta analisi ci si è accorti che una delle cause principali della rottura del pezzo è dovuto alla non conformità della saldatura richiesta ovvero il fornitore ha consegnato puntelli certificati con profondità di saldatura inferiore a quanto indicato a disegno (20mm). In questo periodo ne abbiamo avuta la controprova poiché pezzi

dello stesso codice sono stati consegnati e dopo un controllo del Servizio Controllo Qualità ci si è accorti ancora una volta della mancanza di saldatura.



Saldatura asportata dal SCQ



Saldatura rilevata da SCQ spessore 11,80 mm

Il fatto che i puntelli siano di vecchia concezione, la geometria stessa non sia ottimale e che il fornitore trovi effettive difficoltà a realizzare le saldature richieste ha dato spunto per l'inizio di questo nuovo studio di vera e propria riprogettazione del puntello ovvero dalla geometria, al tipo di giunto e quindi dei cordoni di saldatura stessi.

1.2 L'azienda

Il Gruppo Trevi nasce nel 1957 a Cesena grazie alla figura dell'imprenditore Davide Trevisani come "Impresa Palificazioni TREVISANI Geom. DAVIDE" producendo pali trivellati di piccolo diametro ottenuti mediante sonde a percussione.

Nel 1962 viene brevettata la prima attrezzatura semovente per l'esecuzione di pali battuti e nel 1967 viene progettata e brevettata la prima rotary a tre rulli, RT3, con convertitore idraulico di coppia, che ancora oggi rimane una delle macchine più versatili e potenti per lo scavo di pali trivellati di grande diametro. Sempre nel 1962 Gianluigi, fratello minore di Davide, entra nell'Impresa, forgiandosi quell'esperienza umana e tecnologica che dai primi anni '70 in poi, lo porterà ad affermare lo sviluppo dell'Azienda nei mercati Internazionali. Un'evoluzione tangibile

che sfocia nella registrazione di numerosi brevetti e porta alla prima acquisizione di un'importante commessa per la realizzazione delle fondazioni dell'Apapa Road a Lagos, in Nigeria, che sancisce il primo grande intervento internazionale, una svolta fondamentale nello sviluppo dell'azienda.

Nel 1969 la proprietà decide di fondare Soilmec S.p.A. ovvero una società specializzata nella progettazione e produzione di macchinari utilizzati per l'ingegneria del sottosuolo. Quella che inizialmente si chiamava Impresa Palificazioni TREVISANI Geom. DAVIDE prende il nome di Trevi e inizia così un rapporto di collaborazione tra le due aziende che nel giro di un decennio portano il Gruppo a diventare un importante riferimento a livello mondiale per quanto riguarda la realizzazioni di grandi opere (ponti, viadotti, autostrade, gallerie, linee metropolitane, ferrovie ed edifici di ogni tipo).

Grazie a questo continuo scambio d'informazioni Soilmec è diventata società di riferimento a livello mondiale per quanto realizzazione di macchine nel settore delle tecnologie del sottosuolo.



Foto che ritraggono i diversi scenari in cui operano macchine Soilmec

Con il passare degli anni il Gruppo Trevi si è espanso ulteriormente ed attualmente comprende oltre a Trevi e Soilmec anche Drillmec (specializzata in impianti per perforazioni petrolifere, geotermiche ed idriche), Petreven (specializzata in perforazioni petrolifere nel Sud America ha la stessa funzione per Drillmec che Trevi

ha per Soilmec) e Trevienergy (costituita nel 2008 svolge attività di progettazione e sviluppo nel settore delle energie rinnovabili).

Tra le grandi opere che in questi anni sono state realizzate grazie all'utilizzo di macchine Soilmec si possono ricordare: Ponti sul Paranà (Argentina 1971), centrale termoelettrica Porto Tolle (1975), porto di Bandar Abbas (Iran 1977); dighe di Alicura (Argentina 1980) , Khao Laem (Thailandia), Stratos (Grecia), Corumana – Pequenos Libombos (Mozambico) ,Valsinni (Italia) ed Ertan (Cina); metropolitane di Roma, Manila (Filippine) e Milano; Ponte Vasco de Gama (Portogallo); consolidamenti per la Torre di Pisa, Biblioteca di Alessandria (Egitto) ed antiche Moschee; negli Stati Uniti fondazioni del Four Season Hotel (era la struttura più alta di Miami), Ohio State University Stadium (Columbus), Università di Harvard, Massachusetts Institute of Technology (MIT) e tante altre opere nel settore geotecnico-fondazioni in Medio oriente (Oman, Qatar, Emirati Arabi, Kuwait, Barhein).



Panoramica delle macchine Soilmec attualmente attive nei cantieri mondiali

1.3 Macchine Soilmec

1.3.1 Gamma prodotti

Come visto Soilmec è un'azienda che, a livello internazionale, progetta e realizza macchine per l'ingegneria del sottosuolo. Le macchine che vengono prodotte possono essere suddivise in 3 classi principali:

- Pali di grande diametro (Serie SR)

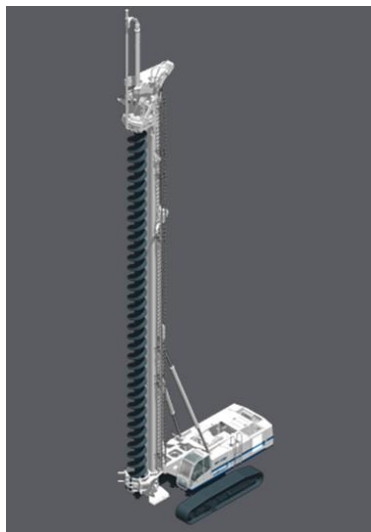
Queste macchine, dotate delle opportune attrezzature, sono in grado di svolgere diverse applicazioni (pali trivellati rivestiti, pali trivellati profondi non rivestiti, pali ad elica continua (CFA), pali costipati (DP)).

- Pali ad elica continua (Serie SF)
- Gru (Serie SC)

Gru cingolate appositamente progettate per soddisfare i requisiti e gli standard di sollevamento ed associare ai lavori di fondazione le caratteristiche di sollevamento tipiche delle gru.



SR 80



SF 120



SC 100

La gamma prodotti esistente consente all'azienda di fornire macchine per qualsiasi utilizzo e su richiesta crea macchine dedicate in base al terreno ed all'opera da realizzare.

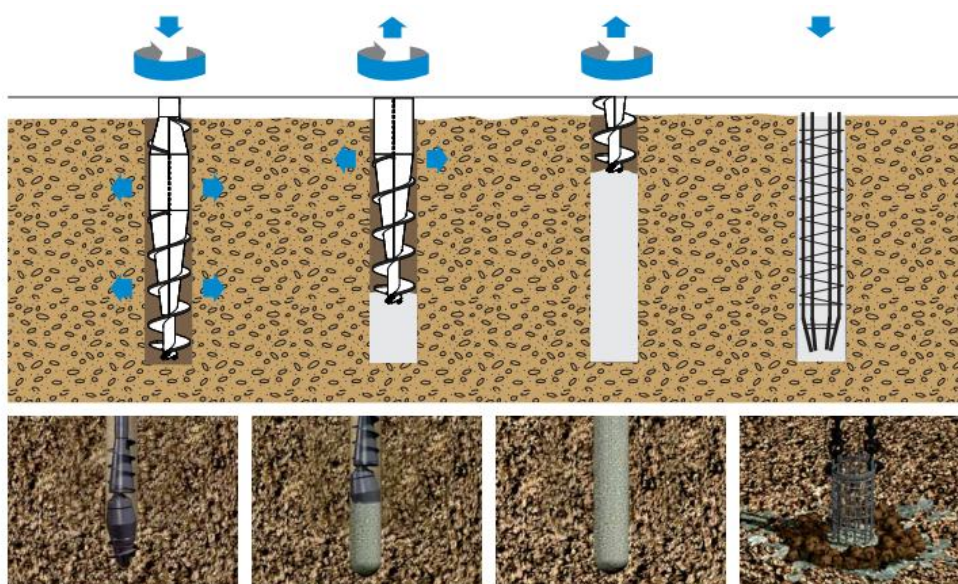
1.3.2 Tecnologie

La tecnica più antica e che ha dato l'input per opere di fondazione è sicuramente quella dei pali battuti. Rispetto ai pali battuti, la più moderna trivellazione presenta il problema del possibile cedimento delle pareti del foro ma grazie all'utilizzo di tubi di rivestimento, polimeri e bentonite vi si riesce a porre rimedio.

Con la tecnica CFA, pali ad elica continua, l'estrazione del terreno ed il pompaggio del calcestruzzo avvengono contemporaneamente, il foro è sempre pieno o di detriti o di calcestruzzo quindi non si hanno problemi per possibili cedimenti.

Utilizzando la tecnica del costipamento, invece, l'utensile penetra nel terreno, lo smuove e lo spinge contro le pareti del foro ottenendo quindi un cantiere pulito, poiché privo di materiale di risulta. La possibilità di creare pali costipati, dove la pressione che l'utensile esercita sulle pareti riesce a compattare il terreno sulle pareti del foro, dipende esclusivamente dalla deformità del terreno. Le tecniche di costipamento sono applicabili senza problemi su terreni incoerenti (sabbiosi) con densità relativa 65% o su terreni coesivi (duri) con coesione non drenata inferiore ai 120kPa.

La tecnologia di costipamento DP (displacement piles) consente di montare l'utensile all'estremità inferiore di una batteria di aste cave (senza spire), invece di utilizzare una batteria di eliche lunghe.



Fase 1

Fase 2

Fase 3

Perforazione e costipamento

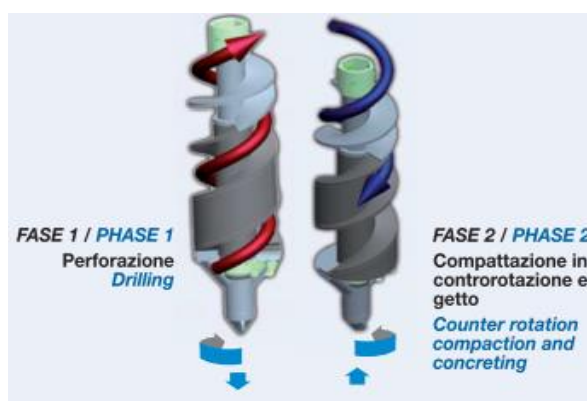
Estrazione e getto calcestruzzo

Inserimento armatura

Durante la fase 1 avviene il costipamento facendo ruotare in senso orario l'utensile, il terreno rimosso viene spinto contro le pareti del foro ma in fase di penetrazione le pareti non sono completamente consolidate. Una volta raggiunta la profondità di progetto inizia la fase 2, ovvero s'inizia con l'estrazione della batteria di perforazione continuando a ruotare in senso orario e contemporaneamente gettando calcestruzzo. Durante la risalita l'utensile compatta ulteriormente le pareti del foro. Spesso è previsto l'inserimento di un'armatura (gabbia, profili o barre) nel calcestruzzo ancora fresco (fase 3).

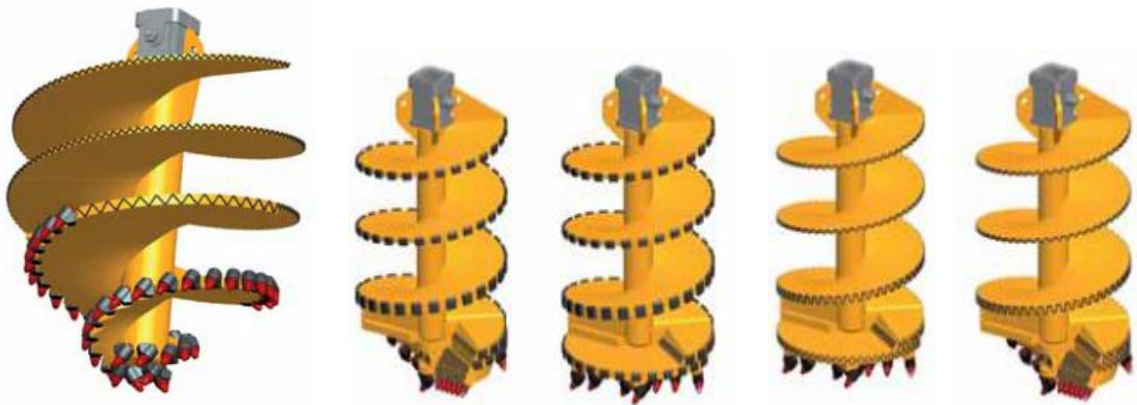
Soilmec è depositaria di un brevetto che riguarda la tecnologia denominata TCT, traction compacting tool, in cui il costipamento avviene nella fase di tiro e non di spinta riuscendo a diminuire la spinta richiesta e perciò diminuendo la dimensione delle perforatrici utilizzate normalmente. La sequenza operativa può essere così sintetizzata:

La fase di perforazione è simile a quella che avviene nel caso di elica continua ma la forma delle spire consente al terreno smosso di risalire in senso antiorario senza creare forte attrito con le pareti, riducendo così la coppia richiesta. Una volta raggiunta la profondità di progetto, la batteria di perforazione inizia a ruotare in senso antiorario. La sezione superiore ed inferiore, collegate alla batteria, ruotano simultaneamente posizionando le spire in modo tale da formare un disco che protegge la portella d'iniezione cemento. L'utensile risale continuando a ruotare in senso antiorario, il terreno rimasto sopra l'utensile durante la fase di penetrazione viene quindi scaricato, bloccato dal disco di copertura e costipato sulle pareti.

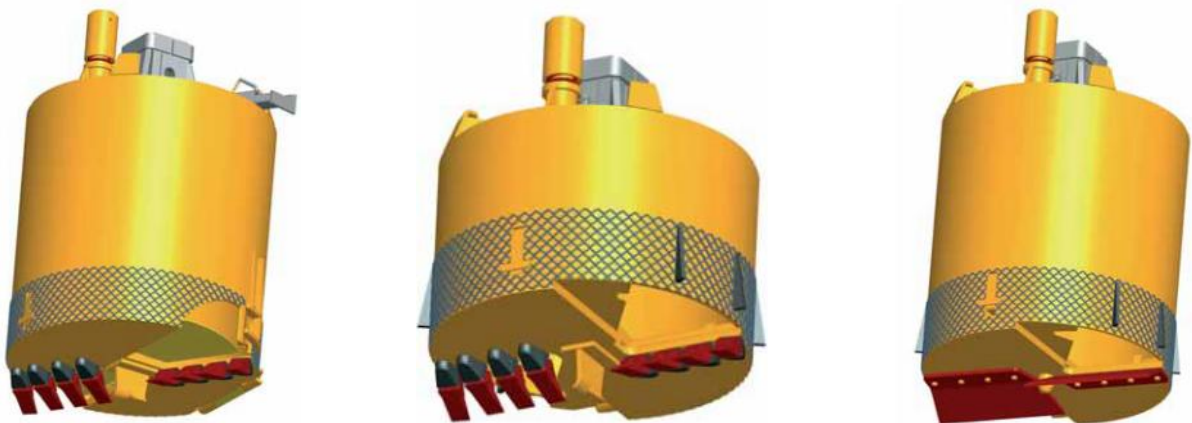


1.3.3 Utensili

La scelta del giusto utensile è una scelta fondamentale e difficile che ogni fornitore di fondazioni speciali deve affrontare quotidianamente per completare, entro i limiti prefissati, la propria commessa. E' quindi di vitale importanza avere a disposizione l'utensile opportuno per riuscire ad ottenere la produttività richiesta. I tre tipi principali di utensili per la perforazione si possono individuare in: trivelle, buckets (benne), carotieri.



Trivelle

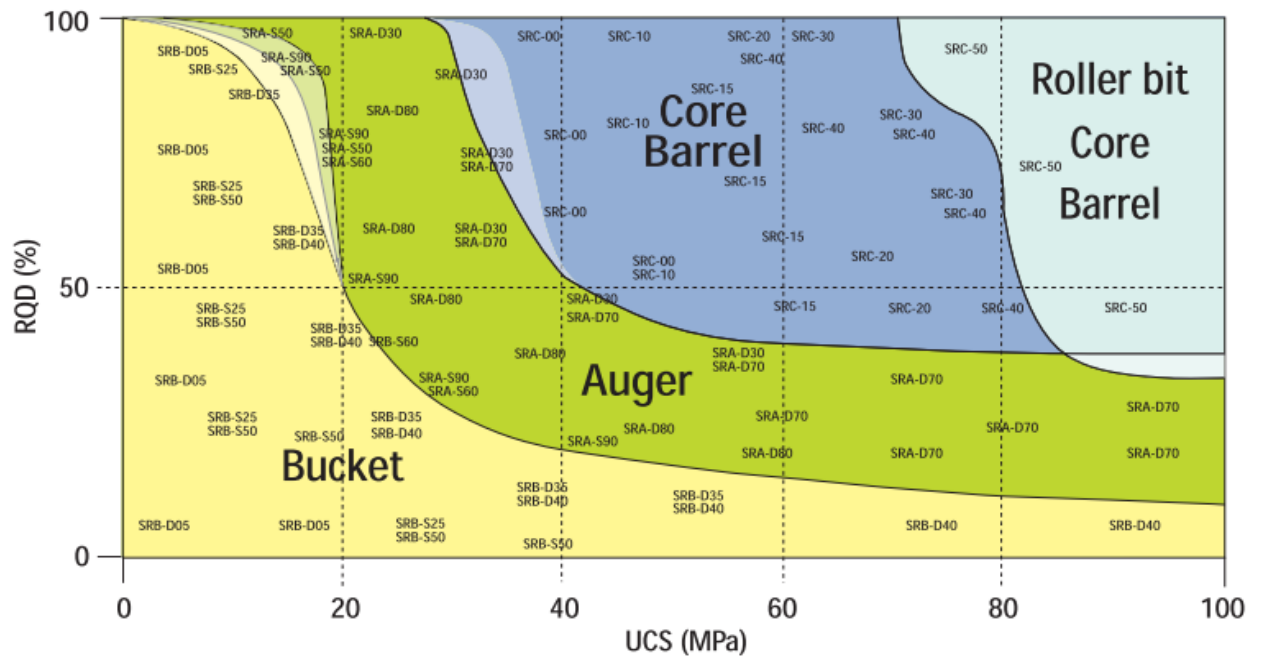


Buckets



Carotieri

La scelta dell'utensile oltre che dall'opera da realizzare dipende direttamente dal tipo di terreno da lavorare, per questo Soilmec fornisce indicazioni su che tipo di utensile scegliere in base alla diversa conformazione del terreno e le diverse condizioni di lavoro. Le macchine Soilmec devono essere in grado di lavorare in qualsiasi tipo di ambiente, da quello urbano fino a quelli più ostili come deserti o ghiacciai ed è facile intuire come il sottosuolo possa essere vario in queste condizioni.



Utensili in base a differenti terreni e condizioni di lavoro

2. La tecnologia della saldatura

2.1 Introduzione generale

La saldatura è una tecnica di giunzione che consente di unire permanentemente parti solide, realizzando la continuità del materiale.

Le costruzioni saldate, a differenza di quelle realizzate con altri tipi di giunzione (chiodatura, rivettatura, imbullonatura, ...), risultano pertanto monolitiche poiché non vi è soluzione di continuità in corrispondenza delle giunzioni stesse.

Questo fattore può presentare vantaggi da certi punti di vista, come la rigidità, ma d'altra parte può essere causa d'inconvenienti. Nei collegamenti imbullonati o chiodati le sollecitazioni si trasmettono dall'una all'altra delle parti collegate attraverso azioni superficiali delle stesse parti unite o azioni dei mezzi di collegamento, per cui le sollecitazioni non possono mai superare la possibilità di slittamento dei giunti stessi o la resistenza a taglio dei chiodi o dei bulloni e quindi le eventuali rotture si arrestano in occasione di tali giunti; mentre tutto questo non avviene nei giunti saldati ove esiste fra i pezzi una vera e propria continuità metallica.

Tenuto conto quindi che le linee di forza delle tensioni si distribuiscono liberamente nella struttura, una concezione dei giunti non corretta può portare a notevoli incrementi locali delle tensioni, con possibilità di deformazioni plastiche locali, diminuzione della resistenza a fatica, rischio di rottura istantanea (fragile) nel caso di acciai al carbonio e debolmente legati. Sempre a causa della continuità metallica che conferisce il giunto saldato, un'eventuale rottura che inizia in un qualsiasi elemento, anche secondario, della struttura può propagarsi fino ad elementi principali, se il materiale non ha le capacità di arrestarla, e danneggiare gravemente l'intera costruzione.

2.2 Cenni storici

La saldatura può essere considerata un'arte antica che, nel corso del tempo, si è trasformata in una scienza. Le prime applicazioni della saldatura si perdono nella notte dei tempi, si usa dire che “l'uomo ha imparato a saldare prima di imparare a scrivere” infatti, si hanno prove che già nel 5000 a.C. era in grado di unire pezzi metallici grazie ad un processo di bollitura molto semplice. Sono note già applicazioni di brasatura dolce ai tempi di Tutankhamon (circa 1300 a.C.), infatti, un monumento a lui dedicato nella valle dei Re in Egitto presenta numerose parti brasate.

Il limite tecnologico che fino al '800 non si riuscì a superare era dovuto alla mancanza di fonti di energia concentrate in grado di fondere localmente il materiale e quindi si continuò a scaldare, martellare, unire per pressione ad elevata temperatura applicando processi rudimentali.

Nel 1802, lo scienziato russo Vasily Petrov scoprì l'arco elettrico e tra le possibili applicazioni pratiche che propose è compresa la saldatura. Nel 1881-1882 l'inventore russo Nikolay Benardos creò il primo metodo di saldatura ad arco elettrico noto come saldatura a resistenza. In questi anni nasce anche la saldatura a resistenza, grazie ad una delle tante intuizioni di Elihu Thompson, che si svilupperà nei primi del '900 nei suoi processi derivati (puntatura, saldatura a rulli, ...).

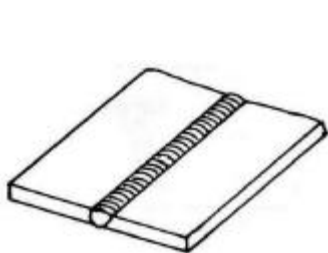
L'acetilene venne scoperto nel 1836 da Edmund Davy ma bisogna aspettare i primi del '900 per trovare applicazioni nella saldatura ed in pochi anni divenne uno dei più popolari per il costo relativamente basso e la sua portabilità. Col passare degli anni questa tecnologia iniziò a cadere in disgrazia per quanto riguarda molte applicazioni industriali poiché iniziò ad imporsi sul mercato la saldatura ad arco. Nel 1920 vennero fatti importanti progressi per quanto riguarda l'introduzione della saldatura automatica, nelle quali il filo dell'elettrodo viene alimentato continuamente.

In questi anni erano molto frequenti incidenti, veri e propri disastri navali, o cedimenti improvvisi di strutture saldate e quindi s'intensificarono gli studi per capire l'origine di questi fenomeni. Vennero fatti passi da gigante per quanto riguarda la metallografia, s'intuì che la presenza dell'idrogeno nel bagno di saldatura era una delle cause

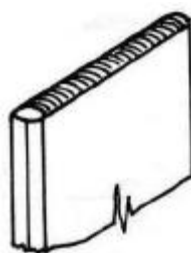
principali della criccabilità a freddo ed iniziarono ad essere utilizzati gas di protezione. Il 1930 vide la pubblicazione della saldatura ad arco sommerso, la saldatura ad arco sommerso con elettrodo in tungsteno venne messa a punto nel 1941 mentre la saldatura MIG/MAG nel 1948. La saldatura ad arco con elettrodo rivestito è stato sviluppato nel corso del 1950 e divenne presto il più popolare processo di saldatura ad arco manuale. Nel 1957 possiamo trovare le prime tracce di saldatura con flusso animato (flux-cored) e della saldatura al plasma mentre la saldatura ad elettro-scoria ed a fascio elettronico risalgono al 1958 seguita dalla saldatura elettrogas nel 1961. Nel 1960 viene inventato il laser e qualche decennio dopo si sviluppa la saldatura a fascio laser che risultò molto utile per la saldatura robotizzata. Infine, nel 1991 è stata inventata in Inghilterra la saldatura per frizione trovando applicazioni di alta qualità in tutto il mondo.

2.3 Tipi di giunti saldati

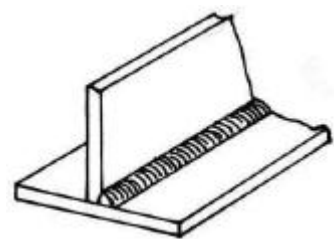
La tipologia e la geometria della giunzione, è determinata fondamentalmente dalle richieste geometriche, dalle restrizioni della struttura e dal tipo di carico. A seconda del posizionamento reciproco dei pezzi da saldare, si distinguono sei tipologie di giunti saldati, rappresentati in figura.



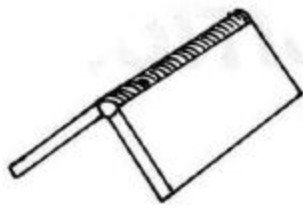
Testa



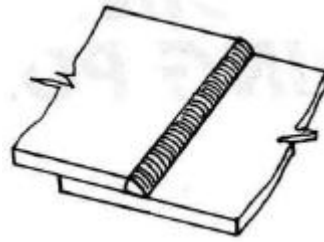
Spigolo



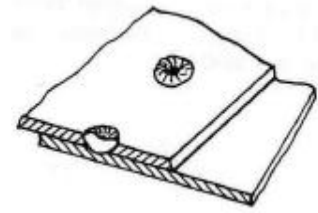
T



Angolo



Sovrapposizione



Punti

Affinché la saldatura interessi totalmente lo spessore dei pezzi, in quelle di maggior impegno si richiede normalmente una preparazione dei lembi, smusso o cianfrino, entro il quale depositare più cordoni in passate successive.



Lembi retti chiusi



Lembi retti aperti



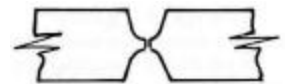
Singolo "V"



Singola "U"

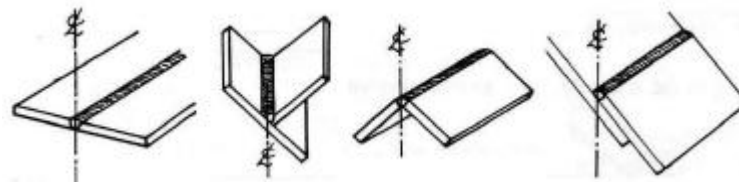


Doppio "V"

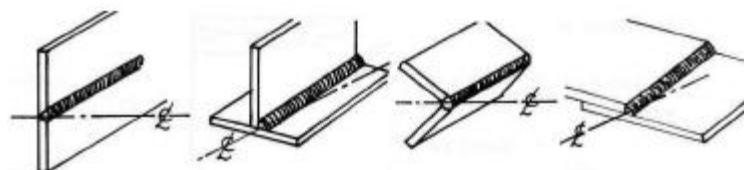


Doppio "U"

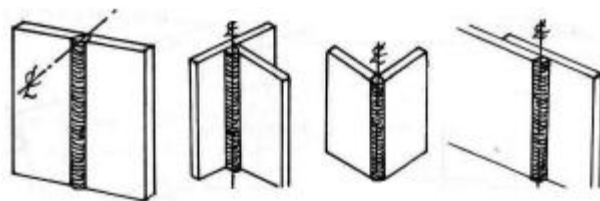
In linea generale, un giunto saldato può occupare, in seno alla costruzione, qualunque posizione. Le posizioni più frequenti con relativa nomenclatura, sono riportate in figura. Nella terminologia corrente si vuole spesso dire "saldatura in posizione" quando ci si riferisce a qualunque posizione diversa dal piano.



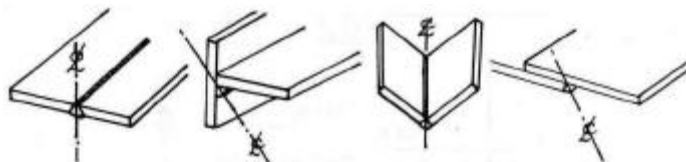
In piano



Frontale od orizzontale



Verticale



Sopratesta

Si può concludere dicendo che la configurazione, il numero e la posizione della giunzione da saldare determinano la facilità della lavorazione, i costi e l'integrità strutturale del pezzo ma soprattutto le scelte del progettista che deve trovare la soluzione più opportuna alle sue esigenze e in un'ottica aziendale non perdere mai di vista la voce costi.

2.4 Specifica di saldatura Soilmec

2.4.1 Scopo

Già da questa breve introduzione al processo di saldatura si può intuire quanto sia importante questo processo ed infatti si può tranquillamente parlare di scienza della saldatura.

All'interno delle macchine Soilmec le saldature sono presenti in gran numero e sono una parte fondamentale dell'intera struttura quindi l'azienda ha deciso di creare un "Istruzione di lavoro", valida sia internamente sia per i fornitori, con lo scopo di dare tutte le informazioni necessarie per poter fabbricare in maniera corretta carpenterie saldate di qualsiasi impiego sulle varie tipologie di macchine ed attrezzature.

2.4.2 Riferimenti

Nello sviluppo, preparazione e redazione di questa "Istruzione di lavoro" sono stati considerati manuali ma soprattutto sono state analizzate e sintetizzate le varie

normative che si occupano del processo di saldatura. Le principali che sono state considerate sono:

- UNI EN ISO 9692-1 Raccomandazioni per la preparazione dei giunti
- UNI EN ISO 9692-2 Preparazione dei giunti
- UNI EN ISO 5817 Giunti saldati per fusione di acciaio, nichel, titanio e le loro leghe (esclusa la saldatura a fascio di energia)
- UNI EN ISO 6520 Classificazioni delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici
- UNI EN 22553 Giunti saldati e brasati. Rappresentazione simbolica delle saldature sui disegni
- UNI EN 13916 Saldatura. Guida per la misurazione della temperatura di preriscaldamento, della temperatura tra le passate e della temperatura di mantenimento del preriscaldamento
- UNI EN ISO 4063 Nomenclatura e codificazione numerica dei processi

2.4.3 Responsabilità

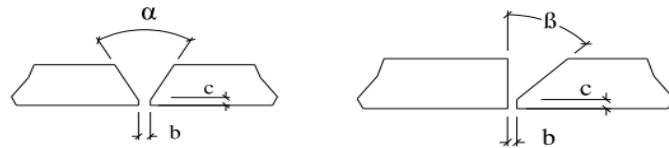
La responsabilità per l'applicazione del contenuto di questa Istruzione è data sia ai Capi reparto ed ufficio produzione nell'ambito della struttura produttiva SOILMEC, sia al fornitore esterno nell'ambito dell'appalto di tali forniture.

L'ufficio Acquisti SOILMEC dovrà informare i vari fornitori dell'applicazione di questa Istruzione che diventa un documento contrattuale vincolante tra le parti.

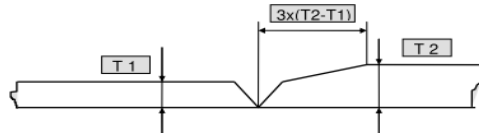
Il Controllo Qualità SOILMEC attraverso il suo servizio interno e quello di verifica verso i fornitori esterni accerterà che questo documento sia recepito, compreso ed applicato ed eventualmente si adopererà come interfaccia informativo per la raccolta di commenti o consigli nell'ambito di un'ottica di miglioramento continuo della produzione e del prodotto.

2.4.4 Tipologie dei giunti saldati

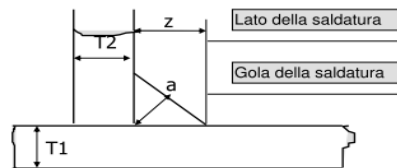
La preparazione dei giunti deve essere conforme alle norme UNI EN ISO 9692-1 e UNI EN ISO 9692-2, ad eccezione per quanto sotto indicato: tutti i giunti a piena penetrazione devono presentare una luce (b) non inferiore ai 2 mm, spalla (c) non maggiore di 2 mm e angolo di cianfrino (β) non inferiore ai 45° per il $\frac{1}{2}$ V e angolo di cianfrino (α) non inferiore ai 60° per il giunto a V. Come indicato nelle figure sottostanti:



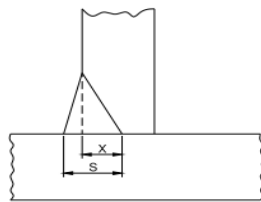
Per le saldature di testa di lamiere con differente spessore la "rastrematura" dovrà essere eseguita secondo il seguente schema:



Per tutte le saldature ad angolo non quotate sul disegno vale la seguente regola riportata nella seguente figura



$a = 70\%$ del minimo spessore tra T1 e T2
 $z = 100\%$ del minimo spessore tra T1 e T2



$$S = X * 1.4$$

Per i giunti a T a parziale e piena penetrazione le dimensioni del cordone devono rispettare le indicazioni riportate nella figura accanto

2.4.5 Tecnologie di saldatura

I procedimenti di saldatura da utilizzare saranno scelti tra i seguenti, salvo diversa indicazione per casi eccezionali, in funzione delle caratteristiche del manufatto, delle possibilità operative del fabbricante e delle tipologie di giunto da realizzarsi.

Le tecnologie ammesse da Soilmec sono:

- Arco elettrico con elettrodi rivestiti (SMAW)
- Arco elettrico ad arco sommerso (SAW)
- Arco elettrico con filo continuo pieno e protezione gassosa (GMAW)
- Arco elettrico con filo animato con o senza protezione gassosa (FCAW)
- Arco elettrico con elettrodo infusibile e filo pieno d'apporto (GTAW o TIG)

2.4.6 Preparazione dei materiali base per la saldatura

L'”Istruzione di lavoro” ha estrapolato dalle normative le principali avvertenze che l'operatore deve avere per la preparazione dei materiali base che dovranno essere saldati:

- I materiali dovranno essere esenti, nella zona interessata alla saldatura e per un tratto di almeno 50 mm ai lati, da tracce di olio, grassi e vernici
- I pezzi da saldare dovranno essere asciugati, se stoccati all'aperto, con torcia a propano od altro mezzo prima di iniziare a saldare
- Per i giunti a totale penetrazione e per quelli a parziale penetrazione nella zona soggetta alla saldatura, dovrà essere ripulita di mola la superficie del materiale dalla scoria di ossidazione rimasta dopo l'ossitaglio in modo che sia possibile verificare visivamente l'eventuale presenza di laminazioni o sdoppiature che l'apporto termico dell'ossitaglio può aver favorito
- La superficie dopo il taglio alla fiamma dovrà presentarsi abbastanza uniforme e liscia e dovranno essere eventualmente raccordati alla mola eccessive improntature dovute a errate regolazioni o movimentazione del cannello di taglio
- La zona di appoggio di lamiera poste di taglio per saldature ad angolo dovrà essere ripulita da eccessive tracce di ruggine o calamina parzialmente sollevata, per assicurare una buona pulizia ed esecuzione della saldatura, specialmente per quei procedimenti di saldatura che scorificano poco le impurità presenti
- Le preparazioni di lamiera eseguite con roditrice dovranno presentare un aspetto del taglio abbastanza uniforme specialmente quando sono coinvolti procedimenti di saldatura con apporto termico limitato e con una bassa capacità di

penetrazione, questo specialmente per lamiere saldate di testa e con procedimenti ad elettrodo o filo che potrebbero non fondere zone di materiale strappate dalla roditrice

2.4.7 Materiali d'apporto

La scelta dei materiali d'apporto va effettuata secondo la normativa che fornisce tutte le possibili combinazioni a seconda del materiale o dei diversi materiali base e del processo di saldatura. In particolare vanno rispettate le caratteristiche meccaniche di tenacità, allungamento e snervamento indicate nelle tabelle della normativa, per ogni materiale d'apporto utilizzato.

Ovviamente è importante assicurarsi che i materiali d'apporto non siano scambiati tra loro specialmente se nella stessa officina o linea di produzione sono saldati componenti in acciaio al carbonio o basso legati.

Regola comune per tutti i materiali d'apporto è quella che vengano conservati in luogo asciutto per evitare il più possibile l'assorbimento dell'umidità ambientale.

2.4.8 Precauzione da adottarsi per elettrodi rivestiti

- Si raccomanda di utilizzare gli elettrodi con rivestimento basico, secondo le indicazioni dei fabbricanti, ricorrendo all'impiego di forni di essiccazione e mantenimento. Gli elettrodi a rivestimento basico tipo Vacuum Pack possono essere utilizzati nell'arco massimo delle 8 ore una volta estratti dalla loro confezione sigillata di fornitura
- Evitare di utilizzare qualsiasi tipo di elettrodo che presenti il rivestimento di protezione rotto o che siano bagnati oppure inquinati con oli o grassi
- Mantenere se possibile gli elettrodi nelle loro confezioni originali oppure in contenitori identificati durante il loro utilizzo e riporli in posto riparato una volta finito il turno di lavoro
- Fare attenzione alle marcature sempre stampigliate su ogni singolo elettrodo che riportano le caratteristiche di identificazione elementare

2.4.9 Precauzione da adottarsi per arco sommerso

Fare attenzione che siano sempre rispettati gli accoppiamenti filo con flusso previsti dal fabbricante dei prodotti d'apporto perché solo questo rispetto condurrà ad avere un prodotto con caratteristiche ben determinate.

- Non utilizzare fili che abbiano il rivestimento protettivo in rame parzialmente o totalmente distrutto dalla ruggine o inquinato da sostanze estranee
- Mantenere sempre identificata la bobina del filo sia durante la produzione sia durante lo stoccaggio
- Non lasciare il flusso per più giorni di seguito nella tramoggia di carico in quanto lo stesso assorbe umidità che può causare poi problemi di porosità eccessive in saldatura
- Il flusso in eccesso durante la fusione deve essere aspirato e rimesso in tramoggia e mai lasciato cadere per terra e successivamente raccolto e riutilizzato

2.4.10 Precauzione da adottarsi per fili

- Non utilizzare fili che abbiano il rivestimento protettivo in rame parzialmente o totalmente distrutto dalla ruggine o inquinato da sostanze estranee
- Mantenere sempre identificata la bobina del filo sia durante la produzione sia durante lo stoccaggio
- Assicurarsi sempre che il tipo di gas o di miscela utilizzata sia quella prevista dal fornitore del filo oppure che sia quella qualificata in base a prove interne
- Evitare di saldare all'aperto o in aree eccessivamente ventose in quanto il gas alla torcia può essere disturbato o deviato dalla zona di lavoro

2.4.11 Precauzioni da adottarsi per TIG

- Non utilizzare materiale d'apporto inquinato da grassi od olio e che abbia il rivestimento protettivo in rame corrosivo o distrutto
- Accertarsi che il gas di protezione alla torcia sia quello consigliato dal

fabbricante dei prodotti d'apporto oppure che sia quello qualificato in base a prove interne

- Accertarsi che sia presente ed in portata sufficiente il gas di protezione al rovescio quando si saldano acciai inossidabili e medio alto legati al Cr

2.4.12 Preriscaldamento ed interpass

Fare riferimento alla norma UNI EN ISO 13916 che fornisce tabelle in cui sono presenti tutte le temperature di preriscaldamento ed interpass per le possibili combinazioni di acciai saldabili.

2.4.13 Trattamenti termici

Il trattamento termico di distensione può essere richiesto per :

- Eliminare le tensioni residue di saldatura per consentire una stabilità dimensionale del componente prima delle lavorazioni meccaniche
- Eliminare le tensioni residue su parti complesse in previsione di un ciclo di lavoro a fatica gravoso del componente
- Attenuare gli effetti dello shock termico di saldatura in zona termicamente alterata riducendo i valori di durezza altrimenti elevati, specialmente per acciai legati

Eventuali trattamenti termici di distensione sono da effettuare secondo le indicazioni riportate a disegno.

Controllo e livello di qualità delle imperfezioni (Norma UNI EN ISO 5817)

- Dovrà essere verificata l'assenza di difetti presenti sui materiali base come
- sfogliature, laminazioni e scheggiature
- I tipi di controllo da eseguire dovranno seguire la seguente tabella:
-

Tipo di controllo	Norma di controllo	Livello qualità imperfezioni	Estensione del controllo
VT	UNI EN 970	UNI EN ISO 5817-C (appendice A)	100 %
PT	UNI EN 571-1		Richiesta a disegno
MT	UNI EN ISO 17638		Richiesta a disegno
UT	UNI EN ISO 17640		Richiesta a disegno
RT	UNI EN 1435		Richiesta a disegno

Il controllo dei giunti con estensione a disegno inferiori al 100% deve essere eseguito secondo i seguenti criteri:

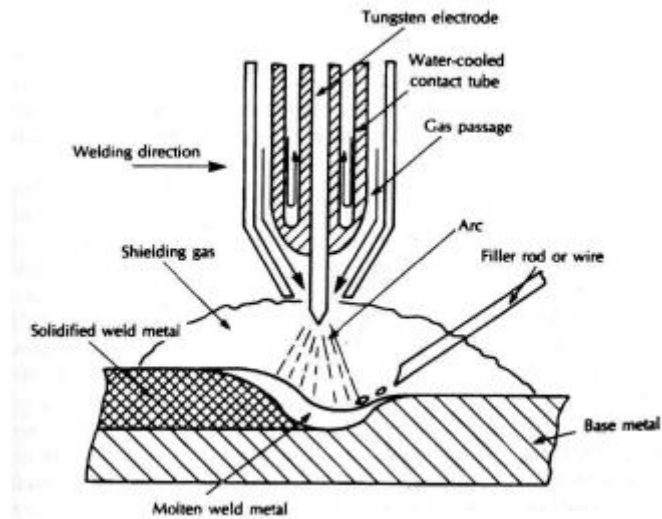
- per cordoni longitudinali il controllo percentuale va eseguito su 3 aree di medesima lunghezza ad inizio, fine e centro cordone
- per cordoni circonferenziali il controllo percentuale va eseguito su 3 aree equidistanti
- Nel caso si riscontri un difetto, il controllo percentuale indicato si estende al 100%

SOILMEC si riserva sempre la possibilità di eseguire i controlli che ritiene più opportuni.

2.5 Generalità dei processi di saldatura

2.5.1 GTAW o TIG

Il procedimento GTAW (Gas-tungsten Arc Welding), secondo classificazione AWS (American Welding Society), utilizza un elettrodo di tungsteno (permanente e non consumabile) per creare un arco con il pezzo da saldare. L'elettrodo è di tungsteno o sue leghe, materiale ad altissima temperatura di fusione, con ottime proprietà di emissione termoionica che viene sfruttata per facilitare il funzionamento dell'arco elettrico. Per prevenire la sua degradazione, questo elettrodo è protetto da un gas inerte che può essere: Argon che offre una migliore protezione, Elio che produce un arco più caldo oppure entrambi per ottenere un mix di caratteristiche.



Schematizzazione processo GTAW

Questo processo ha tra le sue caratteristiche principali quello di utilizzare un elettrodo infusibile, questo comporta il fatto che la saldatura può essere eseguita per i piccoli spessori senza materiale d'apporto e, quando questo è utilizzato, consente sempre un ottimo controllo del bagno grazie alla buona visibilità dello stesso ed all'assenza di fenomeni di trasferimento metallico nell'arco. Il procedimento si adatta a qualsiasi posizione di lavoro e può essere applicato anche su lamierini di pochi millimetri di spessore. Considerando la particolare stabilità dell'arco, la piccola dimensione della sorgente di calore e la possibilità di non utilizzare materiale d'apporto, questo processo risulta molto utilizzato per la realizzazione di giunti di elevata qualità su materiali sensibili al riscaldamento imposto dalla saldatura, soprattutto per la realizzazione della prima passata (giunti di tubi).

2.5.2 GMAW o MIG/MAG e FCAW

In questo procedimento la protezione è effettuata mediante un'atmosfera gassosa fatta defluire intorno al filo sulla zona di saldatura che protegge dall'aria esterna l'arco e dal metallo fuso che cola dal filo ed inoltre fornisce una desiderata caratteristica all'arco attraverso il suo effetto ionizzante.

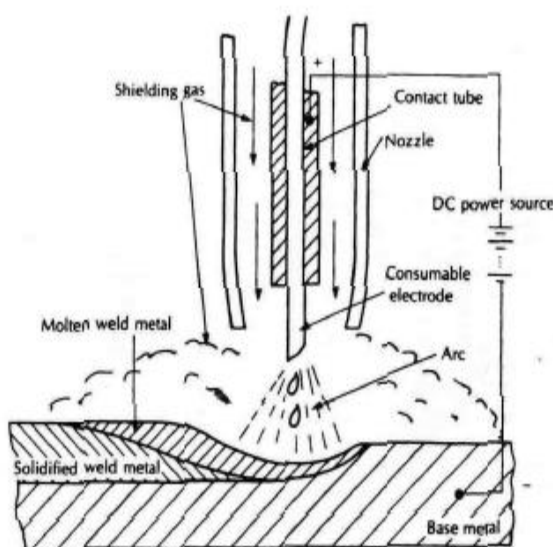
Si impiegano diversi tipi di gas e loro miscele. Se l'atmosfera è formata da gas inerti, il procedimento si chiama MIG (Metal Inert Gas), se è formata da gas con una certa

reattività chimica, il procedimento si chiama MAG (Metal Active Gas). Secondo la normativa anglosassone, non viene fatta distinzione nella classificazione del procedimento in base al tipo di gas protettivo, ma viene indicato semplicemente come Gas Metal Arc Welding (GMAW).

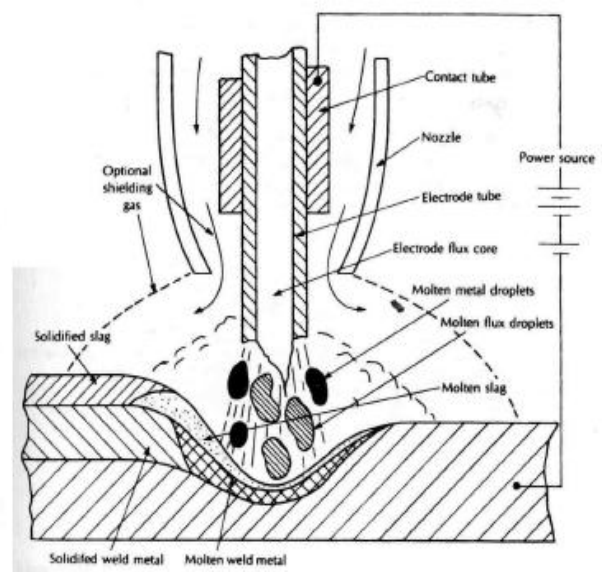
Con la protezione di gas l'arco è completamente visibile e l'operatore salda usando una torcia collegata mediante un grosso cavo alla macchina. Questa provvede a fornire il filo-elettrodo con il dovuto avanzamento, la circolazione dell'acqua in andata e ritorno per il raffreddamento della torcia, il flusso di gas protettivo e la corrente al filo.

Variante di questo tipo di procedimento è quello cosiddetto *a filo animato* (FCAW dalla classificazione anglosassone Flux Cored Arc Welding). In questo procedimento, il filo non è costituito da metallo massiccio ma è internamente cavo e riempito di flusso; questo può avere tutte le funzioni dei rivestimenti degli elettrodi rivestiti, cioè operativa, protettiva, elettrica e metallurgica (disossidazione, desolfurazione, apporto di elementi di lega). Esiste lo svantaggio di un maggior costo del filo e il problema della scoria che deve essere asportata.

I fili animati hanno, rispetto ai fili pieni, il grande vantaggio di consentire generalmente maggiori velocità di deposito, arco più stabile e penetrazioni più accentuate



Schematizzazione processo GMAW



Schematizzazione del processo FCAW

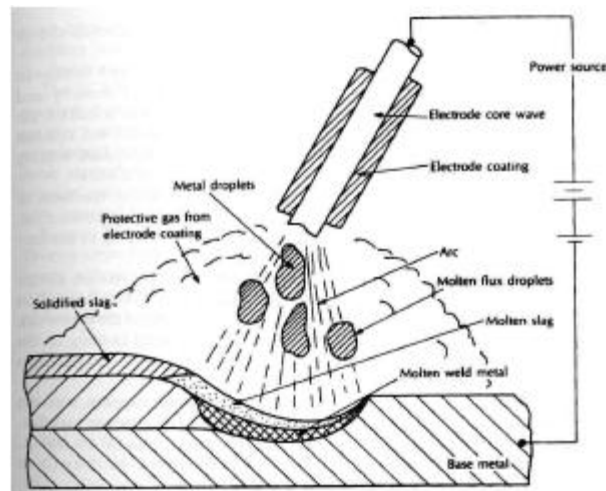
Questi processi sono facilmente automatizzabili, versatili, garantiscono un elevato tasso di deposizione e sono molto sviluppati nonostante il costo delle apparecchiature sia importante.

2.5.3 SMAW

Il procedimento SMAW (Shielded-Metal Arc Welding) è anche conosciuto come stick welding. Come mostrato in figura, l'arco elettrico si forma tra l'estremità di una bacchetta-elettrodo (di lunghezza finita) consumabile e la superficie del metallo da saldare. Normalmente la scelta dell'elettrodo è influenzata dal materiale base nel senso che il materiale d'apporto deve essere quanto più possibile simile al materiale base per quanto riguarda sia la composizione chimica che le caratteristiche meccaniche finali (eccezione fatta per giunzione di materiali diversi). Il calore raggiunto fa fondere anche l'estremità dell'elettrodo fornendo il metallo d'apporto alla giunzione.

Il rivestimento esterno dell'elettrodo interpreta diverse funzioni:

- Genera un fumo di gas di protezione per schermare il bagno di fusione dal contatto con l'aria.
- Fornisce deossidanti e agenti riducenti nel bagno di fusione come metallo fuso, per deossidare e pulire la saldatura. Una volta solidificata, la scoria protegge esternamente il metallo, anch'esso solidificato, ma ancora caldo e reattivo all'interno dei giunti da saldare.
- Provvede alla stabilizzazione dell'arco attraverso componenti facilmente ionizzanti (e.g., carbonato di litio) per aiutare l'inizio dell'arco elettrico e per mantenerlo costante e stabile nel tempo aiutando la conduzione di corrente.
- Infine fornisce elementi leganti per raffinare, aiutare e controllare la composizione e microstruttura della saldatura, aumentando anche il tasso di deposizione di materiale d'apporto fornito dal cuore della bacchetta-elettrodo.



Schematizzazione processo SMAW

Il processo è semplice, versatile, portatile, richiede un equipaggiamento poco costoso ma non offre un'adeguata protezione alla saldatura, il tasso di deposizione è limitato e per ottenere ottimi risultati l'operatore deve essere altamente qualificato.

2.5.4 SAW

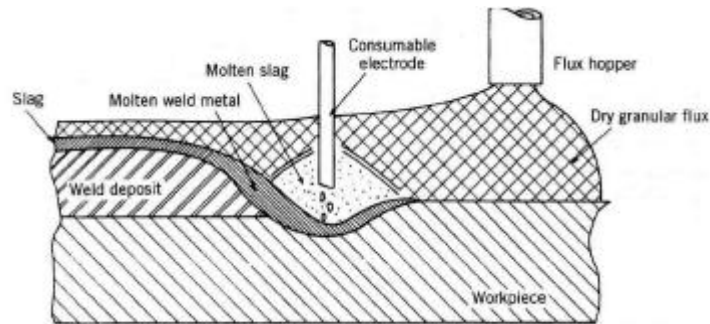
Nella saldatura SAW (Submerged Arc Welding), saldatura ad arco sommerso, l'arco ed il bagno di fusione sono protetti da:

- Un involucro di metallo fuso di protezione che solidificando si dispone sopra il cordone di saldatura (scoria);
- Una polvere granulare non-fusa, che viene fatta cadere con un'alimentazione in eccesso da apposita tramoggia di scarico sulla zona che precede la saldatura; in tal modo l'arco voltaico risulta completamente nascosto nella polvere granulare.

Il metallo d'apporto è un filo metallico che fonde e che, a mano a mano che si consuma, viene sostituito da un nuovo filo proveniente da un'apposita bobina.

Il nome del procedimento "ad arco sommerso" è giustificato dal fatto che effettivamente l'arco è nascosto dalla polvere granulare versata in eccesso, ma ciò non rappresenta un ostacolo dato che tutti i parametri del processo sono regolati automaticamente. Il procedimento SAW è sempre automatizzato a causa delle elevate correnti utilizzate e dall'alto tasso di deposizione. Talvolta può utilizzare molteplici fili

d'apporto con lo scopo di aumentare il tasso di deposizione.



Schematizzazione processo SAW

Il processo presenta un elevatissimo tasso di deposizione, grande affidabilità della saldatura, elevata efficienza, grandi volumi produttivi ma può essere impiegato solo per posizioni orizzontali o piane ed inoltre le attrezzature sono molto costose ed ingombranti.

2.6 Difettologie

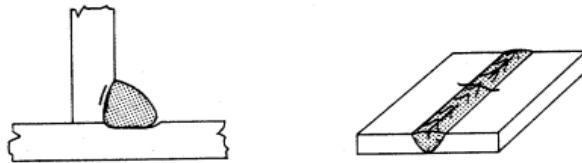
Le difettologie che si possono incontrare nei giunti saldati possono essere ricondotte a tre famiglie principali, ovvero, in conseguenza di fenomeni metallurgici, di fenomeni termici e mala esecuzione. L'esperienza impone determinati accorgimenti e controlli per cercare di evitare e monitorare la presenza di questi difetti che possono portare al vero e proprio collasso della struttura.

2.6.1 Fenomeni metallurgici

I fenomeni metallurgici sono essenzialmente due: la solidificazione del materiale fuso nelle varie passate di saldatura ed il trattamento termico della zona di materiale base circostante al cordone di saldatura.

La saldatura è caratterizzata da piccole masse di metallo portate rapidamente in fusione e rapidamente raffreddate per effetto dell'assorbimento di calore da parte del metallo circostante. Si tratta quindi di cicli termici con elevata velocità di

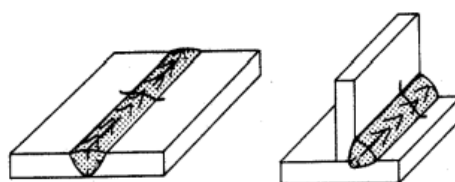
raffreddamento, che possono provocare, specie nel materiale adiacente alla saldatura, effetti simili a quelli della tempra, producendo zone di elevata durezza. Queste zone dure che si manifestano in genere nel materiale base ai margini della saldatura, possono essere sede d'incrinature chiamate cricche a freddo.



Cricche a freddo

La genesi di tali cricche è attribuita all'idrogeno assorbito dal materiale d'apporto allo stato fuso e dalla zona adiacente del materiale base portata ad alta temperatura; tale idrogeno proviene prevalentemente dall'atmosfera d'arco degli elettrodi rivestiti, salvo nel caso di elettrodi a rivestimento basilico. La prevenzione di questo inconveniente può ottenersi raddolcendo il ciclo termico mediante un adeguato preriscaldamento del pezzo da saldare ed usando elettrodi basilici; questi accorgimenti sono fortemente consigliati per saldare acciai ad elevato limite elastico in cui è facile la formazione di zone ad elevata durezza.

Un altro fenomeno pericoloso è costituito dalle cricche a caldo, che si generano nella zona fusa quando in essa è alto il tenore d'impurezze.



Cricche a caldo

Tali cricche si formano durante la solidificazione a causa di segregazioni di impurezze che si addensano in zone preferenziali della zona fusa e che solidificano a temperatura più bassa dell'acciaio dando luogo per effetto degli sforzi di ritiro ad una decoesione del materiale.

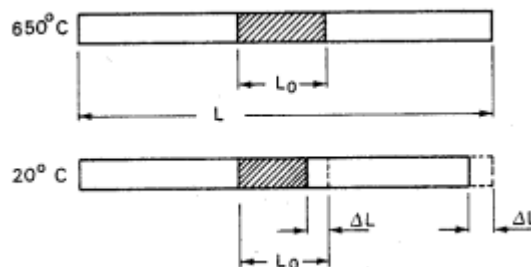
La struttura metallurgica della zona fusa è in stretta relazione con le sue caratteristiche meccaniche ed in particolare con la resilienza.

Una saldatura realizzata con poche e grosse passate presenta una ricristallizzazione grossolana cui corrisponde una resilienza bassa, che può eventualmente esser corretta mediante l'applicazione di speciali polveri reattive.

Una saldatura ottenuta invece con passate molteplici e di limitata sezione favorisce un'elevata resilienza, grazie anche alla benefica azione di normalizzazione che una passata esercita sulla precedente.

2.6.2 Fenomeni termici

I procedimenti di saldatura sono sempre accompagnati da uno sviluppo di grande quantità di calore che provoca rilevanti deformazioni termoplastiche negli elementi collegati, dovute all'abbassamento del limite di snervamento e del modulo elastico dell'acciaio ad elevate temperature. Per meglio evidenziare la natura fisica dei fenomeni si considerino i casi limite di deformazione da ritiro per contrazione trasversale e di formazione di autotensioni per contrazione totalmente impedita, con riferimento al modello di barretta lunga L con al centro un cordone di saldatura di dimensione L_0 .



A causa del raffreddamento susseguente le operazioni di deposizione del cordone (650°) alla temperatura ambiente (20°), il cordone subisce una contrazione trasversale pari a ΔL . Se la barretta è fin dall'inizio impedita di accorciarsi nasce una forza assiale N ottenibile dalla condizione di congruenza:

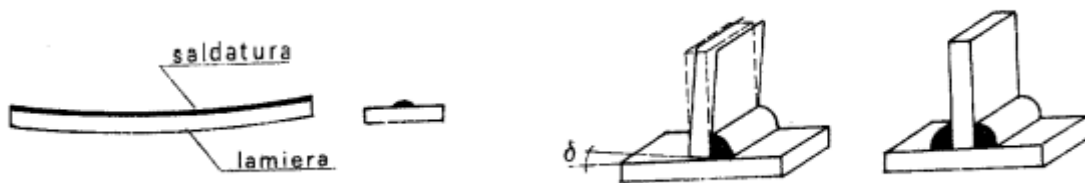
$$\Delta L = \frac{N L}{E_m A} = \frac{\sigma L}{E_m} \quad \sigma = 270 \times 10^2 \frac{L_0}{L} \quad (\text{N mm}^{-2}) \quad \text{con} \quad \begin{cases} \Delta L = 0.18 L_0 \\ E_m = 0.75 E \end{cases}$$

dove E_m rappresenta un valore medio del modulo elastico nell'intervallo di

temperatura considerato e nella quale la tensione dell'acciaio è prossima ai valori di snervamento non appena $L_0 = 10^{-2}L$.

Questo esempio ha messo in rilievo che come conseguenza termica della saldatura o si manifestano deformazioni relativamente importanti oppure nascono stati tensionali interni di notevole intensità.

Se i pezzi da saldare non sono vincolati si possono avere spostamenti relativamente importanti e nella pratica costruttiva bisogna adottare mezzi preventivi per contenere entro certi limiti queste tensioni e deformazioni quali : frecce inerziali di segno opposto, bloccaggio del pezzo, preriscaldi e studio delle sequenze di saldatura.



Deformazioni permanenti

2.6.3 Difetti da esecuzione

- Il difetto più grave che si può avere in una saldatura è la presenza di cricche.
- Ancora di origine metallurgica sono le soffiature, che provengono da impreviste reazioni che si formano nel bagno di fusione a causa di imperfezioni esecutive.
- Possono formarsi cavità localizzate contenenti scoria, detta inclusione di scoria e che sono in genere dovute a forma o a sequenza impropria delle varie passate.
- Si possono avere mancanza di penetrazione, di fusione al vertice degli smussi o al cuore. Il vertice di una preparazione a V o a X è sempre la parte in cui i lembi da saldare sono i più vicini e non è tanto facile ottenere una regolare e completa fusione del lembo cianfrinato mediante la prima passata. Per ovviare a tale inconveniente, quando è possibile, è opportuno fare una passata di ripresa a rovescio.



Difetti di esecuzione

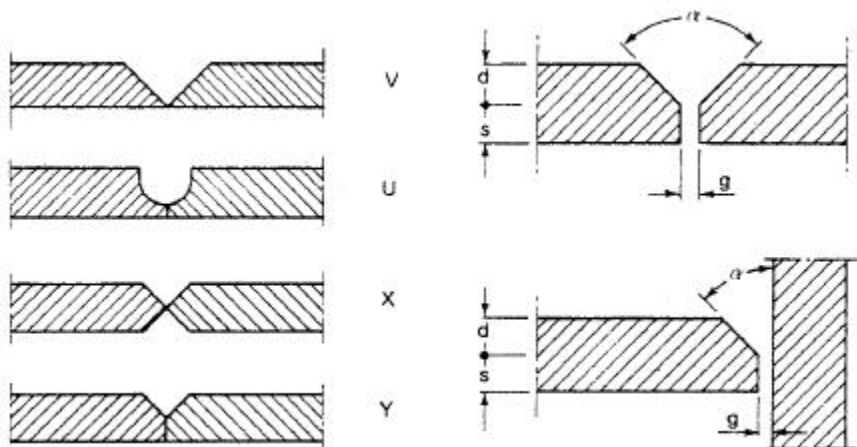
- Altro difetto è l'incollatura, cioè del materiale di riporto fuso che si deposita sul materiale base non ancora fuso e tra il lembo e la zona fusa è interposto uno strato di ossido.

2.7 Metodi di calcolo e Normative

Per quanto riguarda la progettazione e la verifica dei cordoni di saldatura innanzitutto bisogna specificare che vi è una netta distinzione nelle procedure se ci troviamo di fronte ad giunto a completa/piena penetrazione oppure giunto a cordone d'angolo.

2.7.1 Giunti a completa penetrazione

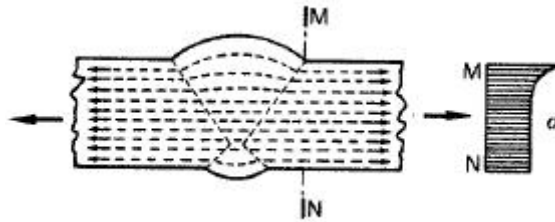
In questi giunti è indispensabile la preparazione dei lembi dei pezzi da saldare. Tale operazione è detta cianfrinatura, perché lo smusso è denominato cianfrino.



Preparazione dei pezzi da saldare

Gli elementi tipici della preparazione sono: l'angolo di smusso α , la sua profondità d , la spalla rettilinea s , la distanza tra i lembi g .

Da notare che per avere un giunto a completa penetrazione la spalla rettilinea deve essere piccola, in modo da essere fusa e far parte della saldatura. In caso contrario non vi è una completa unione tra i pezzi saldati, un giunto di tale tipo è detto a parziale penetrazione e viene di solito verificato come se fosse a cordone d'angolo.



Flusso delle tensioni in una saldatura a piena penetrazione

Il giunto a completa penetrazione ripristina la continuità tra i pezzi e perciò si assume come sezione resistente il prodotto tra la lunghezza e lo spessore minore delle parti da unire. Lo stato tensionale è quindi quasi uguale a quello del pezzo continuo. Poiché il materiale d'apporto ha una resistenza pari o superiore a quella del materiale base, la rottura teoricamente dovrebbe avvenire fuori dal giunto perciò solo la presenza d'imperfezioni può portare alla rottura nella sezione saldata.

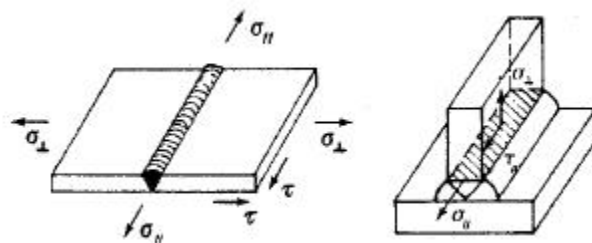
La verifica di una saldatura a completa penetrazione viene effettuata con lo stesso criterio utilizzato per la verifica delle sezioni, cioè determinando la tensione massima oppure, in presenza di sollecitazioni composte, la tensione ideale in base al criterio di resistenza di Hencky-Von Mises.

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + \sigma_{\parallel}^2 - \sigma_{\perp}\sigma_{\parallel} + 3\tau^2}$$

σ_{\perp} □ la tensione di trazione o compressione normale alla sezione longitudinale della saldatura

σ_{\parallel} □ la tensione di trazione o compressione parallela all'asse della saldatura

τ □ la tensione tangenziale nella sezione longitudinale della saldatura



Stato tensionale nelle saldature a piena penetrazione

Ai fini delle verifiche di collegamenti saldati a completa penetrazione, la normativa italiana fa riferimento a due classi di qualità della saldatura:

I classe: la saldatura è eseguita con elettrodi di qualità 3 o 4 secondo la norma UNI 2132 e soddisfa i controlli radiografici previsti dal raggruppamento B della UNI 7278;

II classe: la saldatura è eseguita con elettrodi di qualità 2, 3 o 4 secondo la norma UNI 2132 e soddisfa i controlli radiografici previsti dal raggruppamento F della UNI 7278.

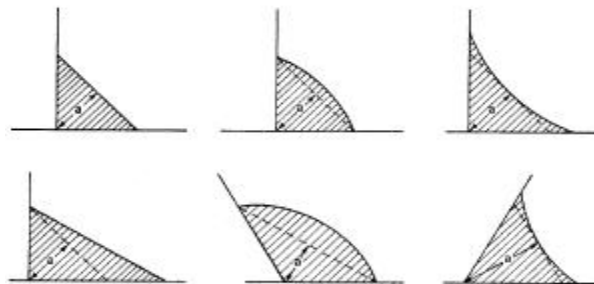
Il valore limite imposto dalla norma italiana per la tensione è fd (resistenza di progetto) se la saldatura è di prima classe, $0.85 fd$ se la saldatura è di seconda classe (per tenere conto del minor controllo delle imperfezioni che si ha in questo caso).

Secondo l'Eurocodice 3, la normativa europea vigente, la resistenza di una saldatura di testa a completa penetrazione è pari alla resistenza della parte più debole tra quelle giuntate. Non occorre in tal caso una specifica verifica della saldatura poiché la versione originale dell'Eurocodice 3 non fa distinzione tra saldature di prima o seconda classe.

2.7.2 Giunti a cordoni d'angolo

Il problema della verifica della resistenza di un cordone d'angolo una volta noto lo stato tensionale in esso indotto dai carichi esterni è stato soggetto di numerosi studi. I vari metodi di calcolo che ne sono derivati si basano tutti sull'ipotesi significativa di considerare le tensioni uniformemente distribuite nella sezione di gola del cordone ed inoltre la maggior parte di questi considera la sezione di gola ribaltata su di un lato del cordone.

La sezione resistente di una saldatura a cordoni d'angolo è la sua sezione di gola. Essa è 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.



Sezioni di gola

Le componenti di tensione nella sezione di gola:

$\sigma \perp$ componente normale alla sezione di gola

$\tau \perp$ componente tangenziale, ortogonale all'asse del cordone, sul piano della sezione di gola

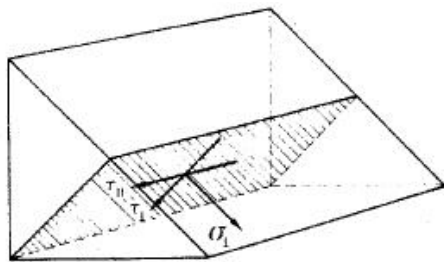
$\tau //$ componente tangenziale, parallela all'asse del cordone, sul piano della sezione di gola

Spesso si fa riferimento alle corrispondenti tensioni ribaltate su uno dei due lati del cordone:

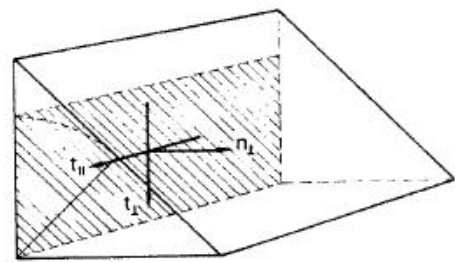
$n \perp$ componente normale alla sezione di gola

$t \perp$ componente tangenziale, ortogonale all'asse del cordone, sul piano della sezione di gola

$t //$ componente tangenziale, parallela all'asse del cordone, sul piano della sezione di gola

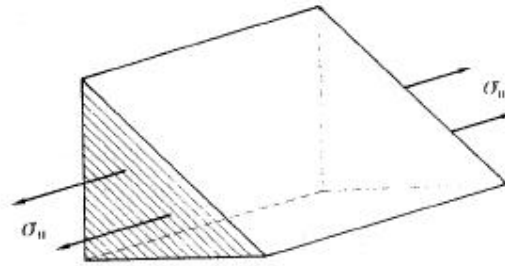


Stato tensionale nella sezione di gola



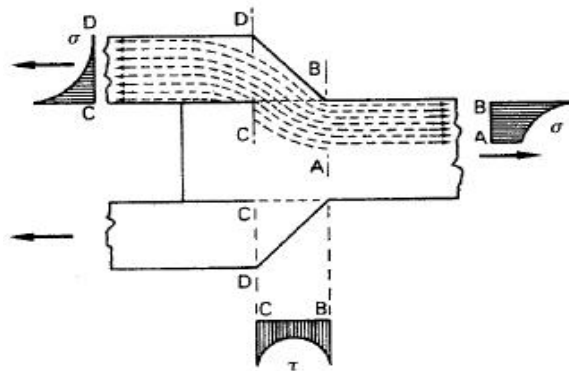
Stato tensionale ribaltato su uno dei lati del cordone

Normalmente alla sezione trasversale e parallela all'asse del cordone agisce la $\sigma //$. Tale componente di tensione è stata oggetto di numerosi studi i quali sono arrivati a concludere che questa componente non ha influenza considerevole sul comportamento del giunto e quindi non interviene nelle verifiche di resistenza.



Stato tensionale nella sezione trasversale del cordone di saldatura

A differenza che nei giunti di testa, in un cordone d'angolo la distribuzione reale delle tensioni nel piano della sezione trasversale del cordone è assai complessa. Lo stato tensionale cambia da punto a punto e si hanno, specialmente al vertice del cordone ed al margine di questo, notevoli punte di tensioni dovute alla deviazione sensibile del fascio di linee di forza che passa dal pezzo al coprigiunto. Ciò nonostante anche in questo caso di norma si considerano le tensioni uniformemente distribuite nella sezione di gola. Quest'assunzione è giustificata dal fatto che al crescere dei carichi, in seguito alla plasticizzazione del materiale, le punte di tensione si riducono e la non uniformità della loro distribuzione si attenua sensibilmente.



Flusso di tensioni attraverso la saldatura

2.7.3 Normative e metodi di calcolo

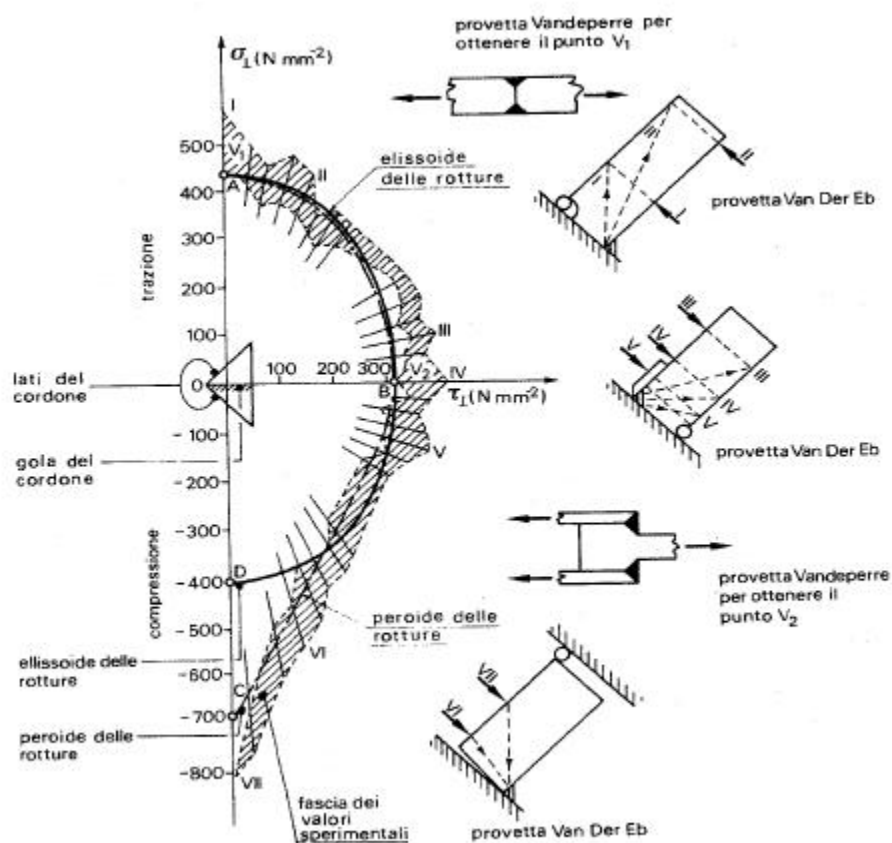
Numerose esperienze furono effettuate per analizzare la resistenza dei cordoni d'angolo al variare dello stato tensionale, allo scopo di tracciare il dominio spaziale delle resistenze nelle coordinate $\sigma \square$, $\tau \square$, $\tau //$ riferite alla sezione di gola nella sua reale posizione.

Fra le prime esperienze si ricordano quelle sui cordoni sollecitati solo normalmente e

tangenzialmente (Vandepierre, Belgio) e quelle su cordoni soggetti a sforzi interni comunque diretti nel piano normale all'asse del cordone (Van den Eb, Olanda, 1952-53). Il dominio spaziale corrispondente alle prove di Van den Eb fu chiamato "peroide".

Successivamente (1968) una serie internazionale di esperimenti su cordoni d'angolo fu promossa dalla Commissione XV dall' I.I.W. (International Institut of Welding) con la partecipazione di Francia, Belgio, Olanda, Italia, Svezia, Giappone e USA. L'esame dei corrispondenti risultati influenzò l'evoluzione dei vari metodi di calcolo di cui nel seguito viene riportata una sintesi.

Il metodo di calcolo ISO parte dal principio di considerare un dominio di resistenza del cordone d'angolo il più possibile vicino al peroide delle rotture.



Peroide e tipi di provini diversi per ottenere i diversi punti nel dominio di rottura

Poiché tale dominio si presentava male dall'essere rappresentato mediante un'equazione matematica, si ipotizzò di utilizzare al suo posto un ellissoide di

rotazione.

Detta f_{uw} la resistenza della saldatura, si è inizialmente proposto un ellissoide di rotazione intorno all'asse σ_{\perp} , con semiassi lungo $\tau_{//}$ e τ_{\perp} pari a $0.75 f_{uw}$. L'equazione di tale ellissoide è

$$\frac{\sigma_{\perp}^2}{f_{uw}^2} + \frac{\tau_{\perp}^2}{(0.75 f_{uw})^2} + \frac{\tau_{//}^2}{(0.75 f_{uw})^2} = 1$$

Oppure se si considera $\sigma_{id} < f_{uw}$

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 1.8(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \quad f_{uw} = \beta_w f_d$$

Ed essendo $\frac{1}{0.75^2} = 1.8$

Il coefficiente β_w , detto coefficiente di efficienza del cordone, serve a tenere conto del fatto che la resistenza del materiale di apporto della saldatura è diversa (uguale o maggiore) rispetto a quella del materiale base.

In sede ISO (International Standard Organization) fu proposta una formula più generale che meglio si adattava alle esigenze dei vari paesi, ossia

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + k_w(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \quad \text{con } k_w \text{ non minore di } 1.8$$

L'Italia con le raccomandazioni CNR-UNI 10011 adottò la seguente formulazione

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \beta_w f_d \quad \text{con } \beta_w = \begin{cases} 1 & \text{per acciai tipo 1} \\ 1.25 & \text{per acciai tipo 2} \end{cases}$$

A seguito di ulteriori campagne di prove sperimentali, risultò che il dominio di resistenza non poteva essere assimilato ad un ellissoide di rotazione in quanto si ottenne il valore di $0.58 f_{uw}$ per il semiasse minore τ_{\perp} e il valore $0.70 f_{uw}$ per il semiasse medio $\tau_{//}$.

Quindi il dominio di resistenza venne aggiornato in

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2 + 2\tau_{//}^2} \quad \text{essendo } 3 = \frac{1}{(0.58)^2} \text{ e } 2 = \frac{1}{(0.70)^2}$$

Tuttavia queste formule non erano di pratico utilizzo, poiché le componenti di tensione sulla sezione di gola nella posizione reale erano difficili da determinare. Sono invece di più rapido impiego quelle formule che consentono di effettuare la verifica facendo

riferimento alle tensioni n_{\perp} , t_{\perp} , $t_{//}$ che agiscono sulla sezione di gola ribaltata su uno dei due lati del cordone.

È possibile ricavare, mediante una trasformazione di coordinate, la tensione ideale σ_{id} in funzione

delle tensioni n_{\perp} , t_{\perp} , $t_{//}$. Utilizzando la trasformazione di coordinate

$$\begin{bmatrix} \sigma_{\perp} \\ \tau_{\perp} \\ \tau_{//} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{\perp} \\ t_{\perp} \\ t \end{bmatrix} \quad \text{essendo } \alpha \text{ l'angolo tra } \sigma_{\perp} \text{ e } n_{\perp}$$

Si perveniva ad un'equazione ancora molto complicata

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + k_w (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} = \sqrt{\frac{1}{2} (1+k_w) (n_{\perp}^2 + t_{\perp}^2) - (k_w - 1) n_{\perp} t_{\perp} + k_w t_{//}^2}$$

Tuttavia, se il dominio di resistenza fosse una sfera (ovvero se $k_w=1$) le relazioni non varierebbero rispetto al sistema di riferimento. È stato quindi proposto di utilizzare come dominio di resistenza una sfera di raggio r , che ha la stessa equazione rispetto a σ_{\perp} , τ_{\perp} , $\tau_{//}$ ed a n_{\perp} , t_{\perp} , $t_{//}$

$$\frac{\sigma_{\perp}^2}{r^2} + \frac{\tau_{\perp}^2}{r^2} + \frac{\tau_{//}^2}{r^2} = \frac{n_{\perp}^2}{r^2} + \frac{t_{\perp}^2}{r^2} + \frac{t_{//}^2}{r^2} = 1$$

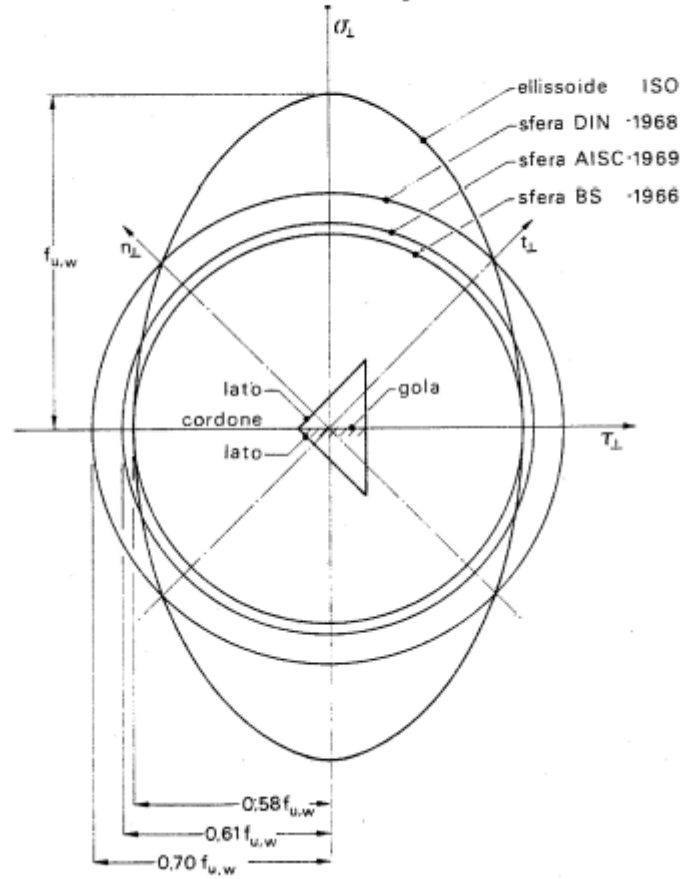
2.7.4 Normative straniere

Diverse furono le soluzioni proposte per il raggio della sfera r :

- $0.58 f_{uw}$ per gli inglesi
- $0.61 f_{uw}$ per gli americani
- $0.70 f_{uw}$ per i tedeschi

Generalizzando i risultati, il dominio di resistenza è dato dalla seguente equazione:

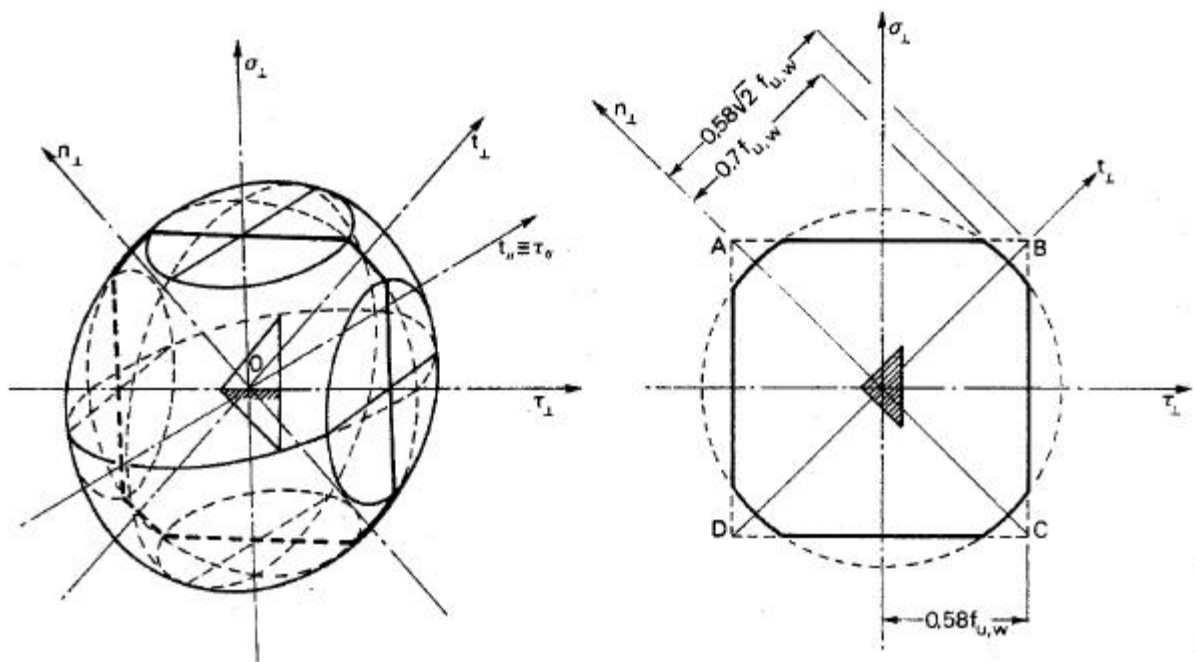
$$\sigma_{id} = \frac{1}{\chi} \sqrt{n_{\perp}^2 + t_{\perp}^2 + t_{//}^2} \leq \beta_w f_d \quad \text{con} \begin{cases} 0.58 \leq \chi \leq 0.70 \\ \beta_w = 1.25 \text{ per acciaio tipo 1} \\ \beta_w = 1.0 \text{ per acciaio tipo 2} \end{cases}$$



2.7.5 Normativa italiana

La normativa italiana scelse la sfera tedesca ($r=0.70 f_{uw}$), ma si cautelò nei confronti delle τ_{\square} e volle che nei casi più comuni la verifica fosse la più semplice possibile. Adottò pertanto il *criterio della sfera mozza*, ossia un dominio di resistenza costituito da una sfera tagliata da due coppie di piani rispettivamente ortogonali agli assi σ_{\square} e τ_{\square} e passanti per i punti $\sigma_{\square} = 0.58 f_{uw}^2$ e $\tau_{\square} = 0.58 f_{uw}^2$

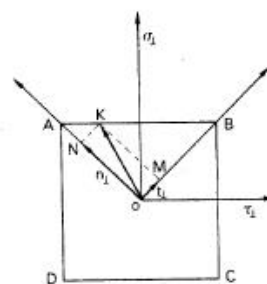
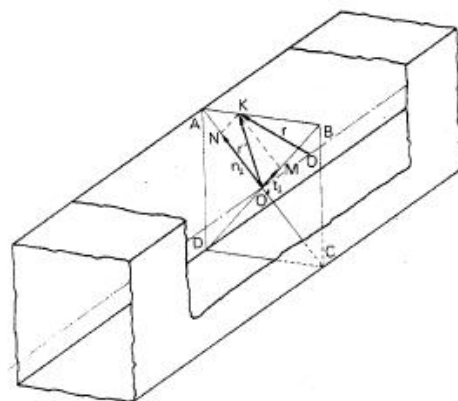
In linea generale la tensione ideale deve essere contenuta sia nella sfera di raggio $r=0.70 f_{uw}$ che nel cilindro a base quadrata di diagonale $2(0.58\sqrt{2} f_{uw})$.

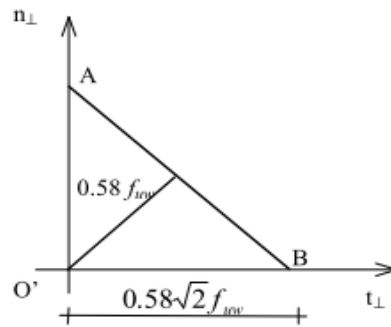


Limitare la σ_{id} dentro il cilindro significa che la componente $O'K$ non deve essere esterna al quadrato $ABCD$. Questo richiede che nel piano $n_{\perp}-t_{\perp}$ la componente $O'K$ sia interna o al massimo sulla retta AB , ossia

$$n_{\perp} + t_{\perp} \leq 0.58 \sqrt{2} f_{uw} \quad \text{che per quadranti diversi da quello positivo diventa}$$

$$|n_{\perp}| + |t_{\perp}| \leq 0.58 \sqrt{2} f_{uw}$$





In definitiva si richiede che siano soddisfatte le seguenti relazioni:

$$\sigma_{i,d,1} = \sqrt{n_{\perp}^2 + t_{\perp}^2 + t_{//}^2} \leq 0.70 \beta_w f_d = \alpha_{w1} f_d$$

$$\sigma_{i,d,2} = |t_{\perp}| + |n_{\perp}| = 0.58\sqrt{2} \beta_w f_d = \alpha_{w2} f_d$$

Acciaio	f_y MPa	α_{w1}	α_{w2}	β_w
Fe 360	235	0.85	1.00	1.25
Fe 430	275	0.70	0.85	1.00
Fe 510	355	0.70	0.85	1.00

2.7.6 Eurocodice 3

L'Eurocodice 3 in sostanza riprende il criterio della sfera inglese, perché richiede che la risultante delle tensioni sia minore della resistenza di progetto a taglio $f_{vw,d}$ che vale

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

La sfera ha quindi raggio $0.58 f_u / \gamma_{Mw}$

Il coefficiente β_w ha significato analogo a quello della norma italiana, anche se è sostanzialmente l'inverso perché sta al denominatore. Esso vale:

0.80 per acciaio Fe 360

0.85 per acciaio Fe 430

0.90 per acciaio Fe 510

La resistenza di una saldatura di lunghezza unitaria è quindi fornita dalla relazione

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} a$$

qualunque sia l'orientazione della forza da trasmettere. Moltiplicando per la lunghezza L del cordone si ottiene la resistenza totale della saldatura.

3. Servizio Controllo Qualità (SCQ)

Il mio percorso all'interno dell'azienda è iniziato proprio presso il Servizio Controllo Qualità (SCQ), ovvero il reparto interno Soilmec dedicato al controllo del materiale a disegno, quindi non di tipo commerciale, che arriva a magazzino dove ho svolto il tirocinio curriculare ed ho potuto iniziare a prendere confidenza con le diverse tecniche di controllo non distruttive utilizzate e con i vari componenti delle complesse macchine che vengono realizzate.

Soilmec per dare evidenza ai criteri di accettazione del materiale in ingresso e verificare che i requisiti siano rispettati, ha formalizzato una procedura interna.

All'arrivo del materiale tutte le bolle sono consegnate all'ufficio Accettazione Materiale che provvede a caricare sul programma gestionale l'arrivo a magazzino.

Le operazioni da eseguire all'ingresso del materiale sono:

- Verifica rispondenza ai requisiti d'ordine, controllo quantità e descrizione del prodotto sulla bolla con la descrizione anagrafica del codice al terminale.
- Registrazione informatica dell'entrata sul programma gestionale.
- Stampa dei cartellini adesivi riportanti il codice del particolare ed il relativo codice a barre.

A seconda del prodotto contrassegnato, l'ufficio accettazione materiale consegna le bolle ed i relativi cartellini adesivi ai servizi preposti al controllo della merce come di seguito descritto:

Il materiale commerciale viene controllato al ricevimento merce che provvede ad eseguire le seguenti operazioni:

- Verifica quantità e materiale indicato sulla bolla con i requisiti ordine.
- Verifica dell'imballaggio ed esame visivo del materiale per controllare la presenza di eventuali danni causati dal trasporto.
- Qualora il materiale risulti conforme, applicazione dei cartellini adesivi sullo stesso. In caso di non conformità sarà avvisato direttamente il SCQ per la compilazione del modulo NCR (rapporto di non conformità).

Il materiale a disegno è controllato da SCQ nell'apposito reparto, qualora il materiale risulti ingombrante la verifica sarà effettuata in officina o direttamente all'esterno. Tali controlli prevedono:

- Verifica quantità e materiale indicato sulla bolla con i requisiti ordine.
- Verifica dell'imballaggio ed esame visivo del materiale per controllare la presenza di eventuali danni causati dal trasporto.
- Verifica che le parti lavorate ed i filetti siano protetti e la verniciatura sia conforme.
- Controllo dimensionale
- Controlli non distruttivi (MT, UT, liquidi penetranti)
- Qualora il materiale risulti conforme, applicazione dei cartellini adesivi sullo stesso. In caso di non conformità compilazione del modulo NCR.
- Presenza di eventuali certificati come ad esempio certificati sull'origine del materiale, trattamenti superficiali, controlli fatti dal fornitore.

Il criterio adottato per il controllo è il seguente:

- Lotti da 1 a 3 pezzi si esegue il controllo dell'intera fornitura.
- Lotti di 4 o più pezzi si esegue il controllo del 30% della fornitura.

Se durante i controlli si evidenzia una non conformità, l'intera fornitura sarà controllata.

I particolari di carpenteria (bracci, trapezi, telai, ...) che sono controllati da SCQ sono identificati tramite la punzonatura del logo Soilmec a fianco del codice identificativo. Per tutti i materiali le cui parti hanno quote non controllabili con la strumentazione in dotazione al reparto, l'avvenuta conformità sarà data dalla bontà del montaggio dello stesso in officina.

In generale si può dire che in caso di non conformità dovrà essere il SCQ a prendere contatti col fornitore per accordarsi sulle modalità del ripristino.

Oltre a queste mansioni il SCQ ha il compito di controllare, tarare e collaudare periodicamente le strumentazioni che vengono utilizzate nei vari reparti; inoltre il personale del SCQ è costantemente in contatto sia con la produzione sia con l'ufficio

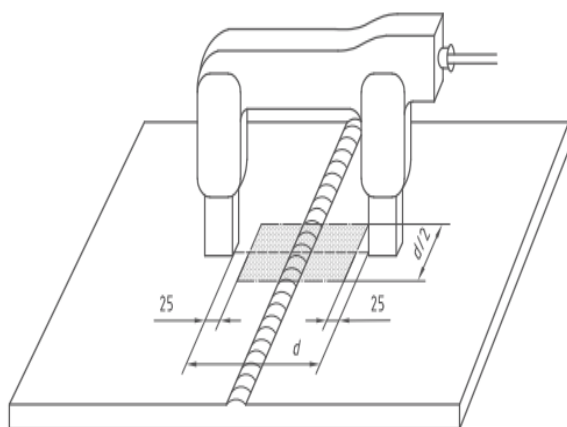
tecnico, creando così un collegamento fondamentale per trovare soluzioni veloci ed efficaci alle varie problematiche che si vengono a presentare quotidianamente.

I controlli che più frequentemente vengono fatti tramite l'utilizzo di tecniche di controllo non distruttive riguardano i cordoni di saldatura. I cordoni di saldatura presenti sulle macchine sono strutturali ovvero dalla loro corretta realizzazione dipende la tenuta della macchina sotto carico e quindi sono da monitorare con assoluta attenzione. Da non sottovalutare in fase di progetto, oltre al fatto di creare cordoni che il saldatore, o la macchina dedicata, possa realizzare senza eccessiva difficoltà, è il problema dell'ispezionabilità. L'ispezionabilità, parametro che ci tornerà molto utile, è la difficoltà che incontra chi controlla il componente nel riuscire a svolgere il proprio compito, quindi quando si progettano cordoni di saldatura critici per la struttura non si può prescindere dal tener presente che quello che viene progettato e poi realizzato dovrà esser controllato.

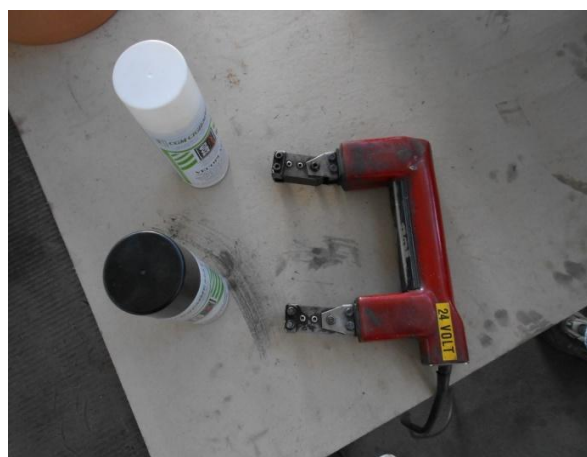
3.1 Magnetoscopia

Il controllo con particelle magnetiche è un metodo che viene utilizzato per la ricerca dei difetti superficiali e sub-superficiali esclusivamente sui materiali magnetici, con questo metodo si possono rilevare difetti fino a 2/3 mm di profondità se si utilizza corrente alternata mentre si arriva fino a 8/10 mm con corrente continua.

Per procedere ad un'analisi MT innanzitutto è necessario pulire e sgrassare le superfici da controllare, successivamente si spruzza un liquido di contrasto (di norma bianco), si accende il magnetoscopio e si spruzza sul pezzo il liquido rilevatore (olio + polvere metallica).

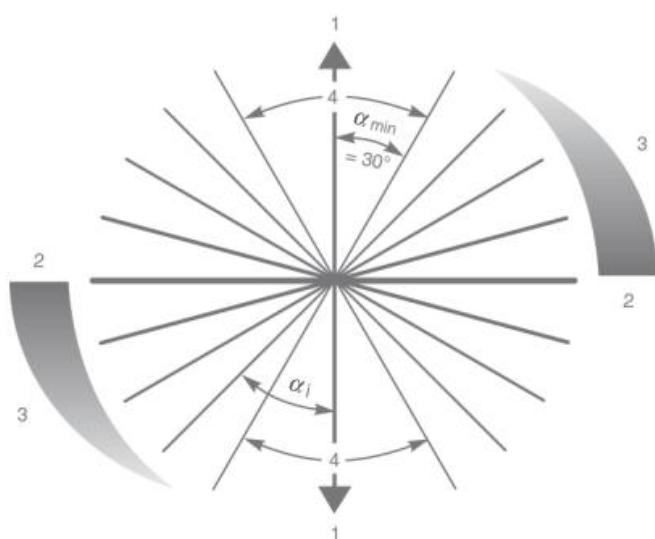


Posizionamento del giogo rispetto al cordone



Giogo, liquido di contratto e liquido rilevatore

Il magnetoscopio crea tramite il “giogo” un campo elettromagnetico una volta che questo è a contatto con la superficie del pezzo. Questo campo elettromagnetico, attraverso le linee di forza, è in grado di mettere in risalto eventuali difetti (cricche, scorie, incrinature, vuoti,...) infatti la polvere metallica tende ad orientarsi e concentrarsi su questi, da notare che riescono ad essere visualizzati solo difetti perpendicolari al verso di magnetizzazione. Per questo motivo durante l’ispezione è opportuno ruotare su se stesso il giogo per poter visualizzare al meglio la presenza di eventuali difetti nelle diverse direzioni.



- | |
|---|
| <p>α = angolo tra campo magnetico e direzione imperfezione</p> <p>1 = direzione campo magnetico</p> <p>2 = direzione sensibilità ottimale</p> <p>3 = zona riduzione sensibilità</p> <p>4 = zona insufficiente sensibilità</p> |
|---|

3.2 Ultrasuoni

Per un controllo completo su tutto lo spessore del pezzo è opportuno integrare controlli MT con controlli UT, ovvero ultrasuoni, che riescono a rilevare difetti solo in profondità.

La tecnica di controllo non distruttiva ad Ultrasuoni (UT) è forse la più complessa in assoluto poiché per riuscire ad ottenere risultati certi ed attendibili c'è bisogno di moltissima pratica ed esperienza da parte dell'operatore.

Questa tecnica di controllo, che rileva difetti in profondità e non in superficie, viene di norma utilizzata parallelamente ad un'altra tecnica di controllo ma questa volta di tipo superficiale (magnetoscopio) per ottenere una visione completa del pezzo e delle eventuali difettosità.

Secondo normativa tutte le volte che si utilizza apparecchiatura ad ultrasuoni bisogna fare operazioni di taratura e calibratura poiché il rilevatore (riceve, amplifica, filtra e visualizza i segnali) e le sonde sono componenti molto sensibili.



Centralina UT



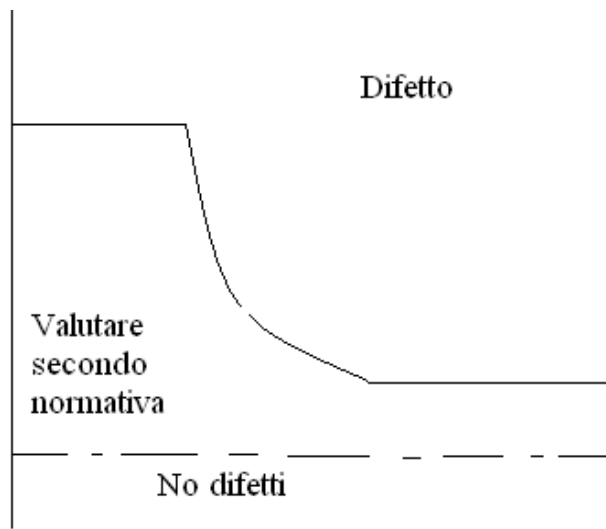
Sonda UT

- Calibratura

La calibratura serve per far sì che in presenza delle stesse condizioni si ottengano le stesse risposte. Si parte da un blocco campione di cui è nota la geometria e diversi parametri (angoli d'inclinazione, difetti artificiali ...), a questo punto se quello che leggiamo sul rilevatore non corrisponde ai dati del blocco campione si vanno a variare opportuni parametri sempre sul rilevatore fino a far combaciare i valori.

- Taratura

Per fare una taratura secondo normativa bisogna creare ogni volta un campione uguale al pezzo da analizzare (stessi materiali, stesso cianfrino e stessa saldatura) su cui andare a creare difetti artificiali al fine di analizzarli e creare le curve di taratura o “DAC” per il segnale.



Zone nella curva di taratura dove può finire il segnale

- Sonde

Si hanno due tipologie di sonde ovvero quelle piane (0°) e quelle inclinate (45° , 60° , 70° ...) che si differenziano dall'inclinazione in cui viene inviato il segnale.

Importante è la calibratura delle sonde, infatti, bisogna calibrare il centro sonda (da dove effettivamente parte il segnale) e l'inclinazione (verificare i gradi effettivi della sonda) poiché col tempo questi parametri possono variare anche sensibilmente a causa anche dell'usura della parte di sonda sempre a contatto col materiale.

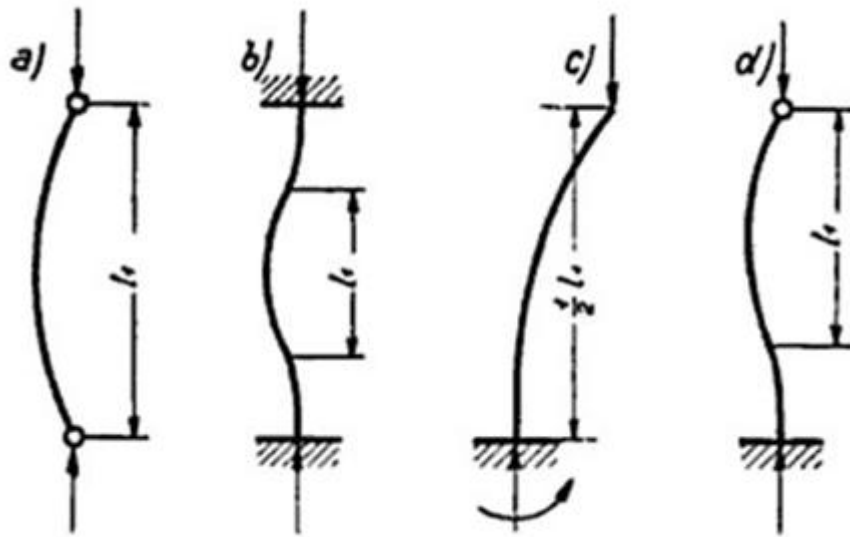
Durante le operazioni di acquisizione del segnale è fondamentale applicare sulla sonda del gel poiché il gel limita al massimo le perdite di trasferimento ovvero la diffrazione del segnale causato di norma dal passaggio attraverso l'aria.

4. Teoria carico di punta

4.1 Aste compresse

Le aste compresse oltre che a sforzo normale sono sollecitate a flessione dato che il carico agisce sempre con una certa eccentricità rispetto al baricentro della sezione compressa. Tale eccentricità può esser dovuta da molteplici aspetti, sia dal modo stesso di applicazione del carico (caso di colonne con sezione variabile), sia da una leggera inflessione preesistente nell'asta per un difetto di costruzione, sia dal momento flettente che il carico produce nella sezione del solido deformandolo. In altre parole, anche nel caso in cui il solido sia perfettamente diritto ed il carico esattamente centrato, se una causa esterna qualunque modifica anche di pochissimo l'asse dell'asta, il carico viene ad agire eccentricamente rispetto ad esso.

L'esperienza ha dimostrato che, quando un corpo è molto lungo rispetto alla sua sezione trasversale, sottoponendolo a sollecitazione di compressione, anche con una forza N applicata nel baricentro della sezione, tende inevitabilmente ad inflettersi lateralmente. Si manifesta quindi una sollecitazione composta di presso-flessione. Tale situazione, com'è stato accertato sperimentalmente, si verifica quando la lunghezza del corpo è circa dieci volte maggiore rispetto alla dimensione minima della sezione trasversale; i corpi che presentano tale caratteristica vengono definiti travi snelle e tale sollecitazione è detta carico di punta.



Lunghezza libera di flessione l_0 in relazione ai vincoli:

- a) *Trave incernierata a entrambi gli estremi*
- b) *Trave incastrata ad entrambi gli estremi*
- c) *Trave incastrata ad un estremo e libera all'estremo opposto*
- d) *Trave incastrata ad un estremo e incernierata all'estremo opposto*

Se si considera una trave rettilinea, supposta incernierata agli estremi e sottoposta alla forza di compressione N perfettamente centrata, se per una qualsiasi causa esterna la trave s'inflexe lateralmente, la forza di compressione N non agisce più in modo perfettamente assiale; si genera quindi un momento flettente esterno M_{est} che tende a incurvare maggiormente la trave e il cui valore è $M_{est} = N \cdot i$. L'eccentricità " i " della forza N rappresenta la distanza fra il punto di applicazione della forza e l'asse longitudinale della trave. Per effetto dell'inflexione, all'interno della trave si sviluppano reazioni elastiche, ossia tensioni interne, capaci di generare un momento flettente interno M_{int} che tende a riportare la trave alla configurazione rettilinea.

L'equilibrio della trave dipende dunque dall'intensità dei due momenti M_{est} ed M_{int} : se $M_{est} > M_{int}$, l'equilibrio è instabile e l'inflexione della trave aumenta ulteriormente, con conseguente collasso della stessa; se invece $M_{est} < M_{int}$, l'equilibrio è stabile e la trave riprende la configurazione iniziale. Esiste un valore della forza di compressione, detto carico critico N_{cr} , per il quale $M_{est} = M_{int}$. In questo caso la configurazione (curva o rettilinea) della trave corrisponde ad uno stato di equilibrio indifferente che per le

inevitabili imperfezioni della trave o dell'applicazione assiale della forza, non è detto che permanga, anzi, preannuncia il definitivo cedimento. E' questa la configurazione da esaminare per lo studio del carico di punta, perché è nello stato di equilibrio che inizia spontaneamente l'inflessione laterale della trave. Di conseguenza il fenomeno dell'inflessione laterale non è dovuto soltanto ai casi precedentemente messi in evidenza ma si verifica anche quando la forza N supera, seppure di poco, il valore critico, per cui la trave passa rapidamente dalla configurazione rettilinea a quella inflessa nel piano di minore rigidità.

4.2 Progettazione secondo normativa

Per quanto concerne la progettazione delle soluzioni alternative ancora una volta si fa riferimento alla UNI EN 10011 (anche se in realtà sarebbe stata ritirata a favore dell'Eurocodice 3) che approccia il problema del buckling, instabilità a carico di punta, come di seguito viene illustrato.

La norma vale solo se, per le modalità di progetto e senza apprezzabile errore, l'asta può considerarsi compressa lungo il suo asse; non è quindi applicabile quando lo sforzo normale agisce con eccentricità nota o l'asse dell'asta possiede curvatura propria ovvero vi siano azioni esterne flettenti. Le istruzioni quindi si riferiscono ad aste che, se scariche, si scostano dalla configurazione idealmente rettilinea di una quantità v_0 al massimo pari ad $1/1000$ della lunghezza di libera inflessione. Se tale condizione non dovesse essere verificata allora si dovrebbe passare alla verifica a pressoflessione ma questo non è il nostro caso.

Il primo parametro che viene definito è la lunghezza libera d'inflessione $L_c = \beta * L$, dove L è la lunghezza dell'asta ed il coefficiente β deve essere considerato valutando le effettive condizioni di vincolo dell'asta nel piano d'inflessione considerato.

Caso	I estremo	II estremo	β
a	Incernierato	Incernierato	1
b	Incastrato	Incastrato	0,7
c	Incastrato	Libero	2
d	Incastrato	Incernierato	0,2

Viene definita snellezza λ di un'asta il rapporto $\frac{L_c}{i}$ con L_c lunghezza libera di inflessione ed "i" raggio d'inerzia della sezione trasversale giacente nello stesso piano principale in cui si valuta L_c .

La normativa prevede due verifiche parallele, la prima verifica si effettua nell'ipotesi che la sezione trasversale sia uniformemente compressa.

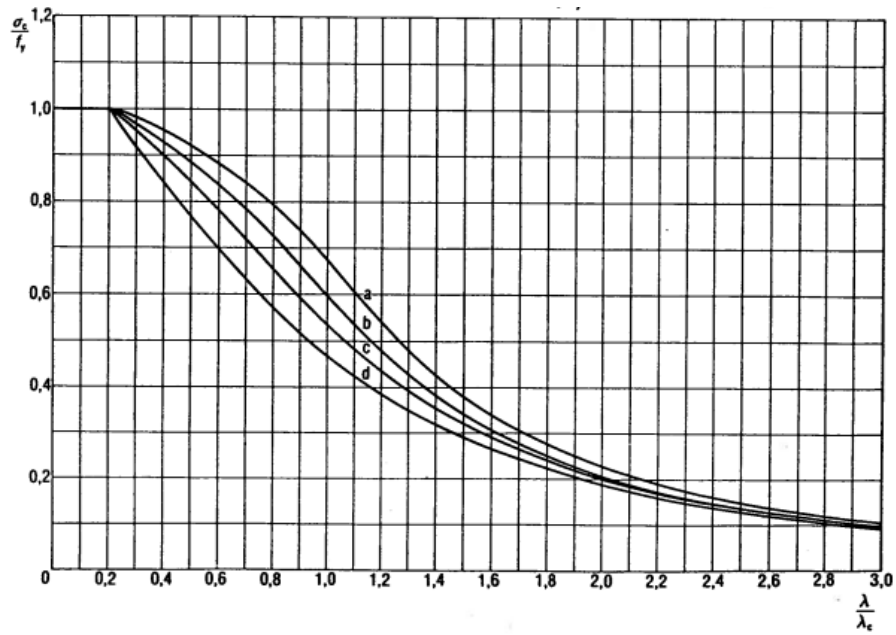
$$\frac{\sigma_c}{\sigma} \geq \nu$$

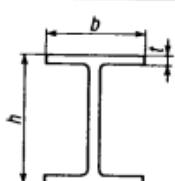
Dove:

- σ_c è la tensione critica
- $\sigma = F/A$ è la tensione agente
- ν è un coefficiente di sicurezza che dipende dalle condizioni di carico (da 1,5 ad 1,125)

Per trovare il valore della tensione critica σ_c , per poter arrivare a verificare la diseuguaglianza, è necessario introdurre ulteriori parametri ed utilizzare tabelle e grafici forniti in normativa.

Viene introdotto $\lambda_c = \pi * \sqrt{\frac{E}{\sigma_s}}$, dove σ_s è la tensione di snervamento, che corrisponde al limite di validità del comportamento in fase puramente elastica dell'asta.



λ/λ_c	σ_c/f_y				Aste	Forma della sezione	Curva	
	curva a	curva b	curva c	curva d				
0,00	1,000	1,000	1,000	1,000	Semplici	Profilati cavi quadri, rettangoli o tondi saldati o laminati $t \leq 40$ mm	a	
0,10	1,000	1,000	1,000	1,000				
0,20	1,000	1,000	1,000	1,000	Semplici	Profilati ad I laminati $\frac{h}{b} \geq 1,2$ $t \leq 40$ 	b	
0,30	0,978	0,965	0,951	0,917				
0,40	0,953	0,925	0,900	0,841				
0,50	0,923	0,885	0,843	0,769				
0,60	0,885	0,838	0,783	0,699				
0,70	0,844	0,785	0,719	0,633				
0,80	0,796	0,727	0,655	0,572				
0,90	0,739	0,663	0,593	0,517				
1,00	0,674	0,599	0,537	0,468				
1,10	0,606	0,538	0,486	0,424				
1,20	0,540	0,481	0,439	0,385				
1,30	0,480	0,429	0,395	0,350				
1,40	0,427	0,383	0,357	0,319				
1,50	0,381	0,343	0,323	0,290				
1,60	0,341	0,308	0,293	0,265				
1,70	0,306	0,277	0,266	0,242				
1,80	0,277	0,250	0,241	0,222				
1,90	0,251	0,226	0,219	0,204				
2,00	0,228	0,205	0,200	0,188				
2,10	0,208	0,188	0,183	0,173				
2,20	0,190	0,173	0,169	0,160				
2,30	0,175	0,159	0,158	0,148				
2,40	0,162	0,147	0,147	0,138				
2,50	0,149	0,137	0,137	0,129				
2,60	0,138	0,128	0,128	0,120				
2,70	0,128	0,119	0,119	0,112	Semplici o composte	Generica	$t \leq 40$ mm	c
2,80	0,119	0,110	0,110	0,105		Tutte	$t > 40$ mm	d
2,90	0,112	0,103	0,103	0,098				
3,00	0,105	0,096	0,096	0,092				

Prima di entrare nella tabella bisogna individuare in quale caso ci si trova: a, b, c, d. Successivamente si calcola il valore λ / λ_c , valori noti, e dall'intersezione curva-

rapporto si individua il valore σ_c / σ_s in modo tale da trovare, facendo semplicemente la formula inversa ($\sigma_c = \text{valore tabulato} * \sigma_s$), il valore della tensione critica.

Ottenuto il valore della tensione critica siamo in grado di vedere se l'asta è verificata.

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} \geq \nu$$

La seconda verifica che bisogna fare prevede che la forza assiale venga maggiorata da un coefficiente ω ricavabile da anch'esso da una tabella.

In questo caso per individuare la tabella opportuna per ricavare il parametro ω bisogna innanzi tutto stabilire il tipo di materiale utilizzato, nel nostro caso Fe 510, e la curva scelta per il caso precedente (a, b, c, d).

λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01	10
20	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	20
30	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	30
40	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15	40
50	1,16	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	50
60	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,31	1,32	1,33	1,35	1,36	60
70	1,38	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,48	1,50	1,53	1,55	70
80	1,57	1,59	1,61	1,64	1,66	1,69	1,71	1,74	1,77	1,79	80
90	1,82	1,85	1,88	1,91	1,94	1,97	2,00	2,03	2,06	2,10	90
100	2,13	2,16	2,19	2,23	2,26	2,30	2,33	2,37	2,41	2,44	100
110	2,48	2,52	2,56	2,60	2,63	2,67	2,71	2,75	2,79	2,83	110
120	2,88	2,92	2,96	3,00	3,05	3,09	3,13	3,18	3,22	3,27	120
130	3,31	3,36	3,40	3,45	3,49	3,54	3,59	3,63	3,68	3,73	130
140	3,78	3,83	3,88	3,93	3,98	4,03	4,09	4,14	4,19	4,24	140
150	4,30	4,35	4,40	4,46	4,51	4,57	4,63	4,68	4,74	4,80	150
160	4,86	4,91	4,96	5,02	5,07	5,13	5,19	5,25	5,31	5,37	160
170	5,43	5,49	5,56	5,62	5,68	5,74	5,80	5,86	5,93	5,99	170
180	6,05	6,12	6,19	6,25	6,32	6,39	6,45	6,52	6,59	6,66	180
190	6,72	6,78	6,85	6,92	7,00	7,07	7,14	7,21	7,28	7,36	190
200	7,43	7,50	7,57	7,65	7,72	7,79	7,87	7,95	8,03	8,10	200
210	8,15	8,26	8,33	8,41	8,48	8,56	8,64	8,72	8,79	8,87	210
220	8,95	9,02	9,10	9,18	9,26	9,33	9,42	9,49	9,57	9,65	220
230	9,73	9,81	9,90	9,99	10,08	10,17	10,25	10,33	10,42	10,50	230
240	10,60	10,67	10,76	10,85	10,94	11,03	11,11	11,21	11,30	11,40	240
250	11,49										250

Coefficienti ω per acciaio Fe 510 (curva "a")

Come si può vedere nella tabella si entra con il valore noto λ ed immediatamente si esce con il valore del coefficiente di amplificazione ω .

La disequaglianza che bisogna verificare è la seguente:

$$\frac{\omega * F}{A} \leq \sigma_{amm}$$

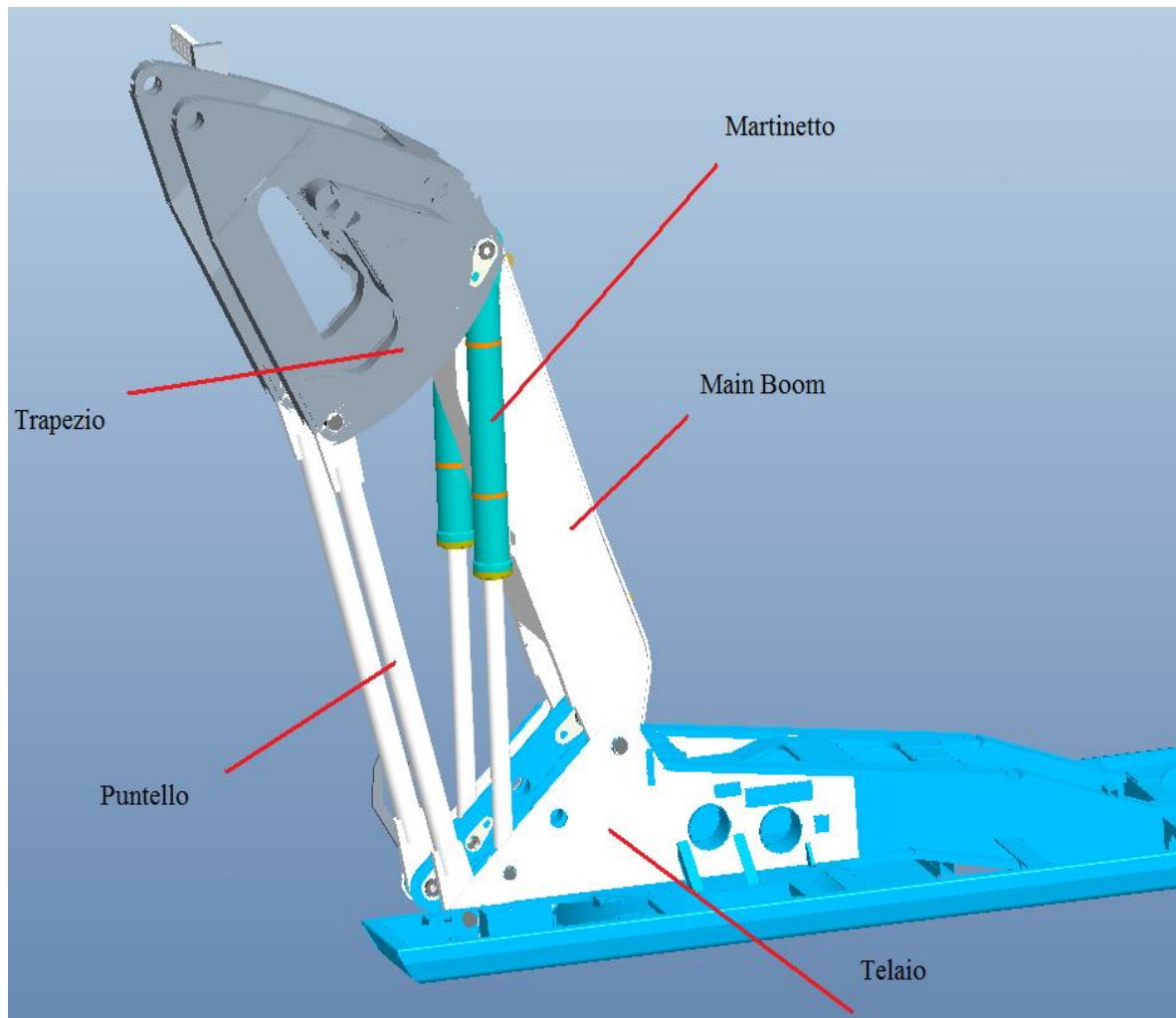
Dove σ_{amm} è la tensione ammissibile del materiale (240 MPa per Fe 510).

5. Caso aziendale

5.1 Cinematismo

Fino a questo punto della trattazione abbiamo descritto solo a parole le funzioni del pezzo in esame, in questo capitolo verranno mostrate nel dettaglio le principali caratteristiche di funzionamento del cinematismo per arrivare a giustificare il fatto che il puntello è stato definito componente critico per l'intera macchina.

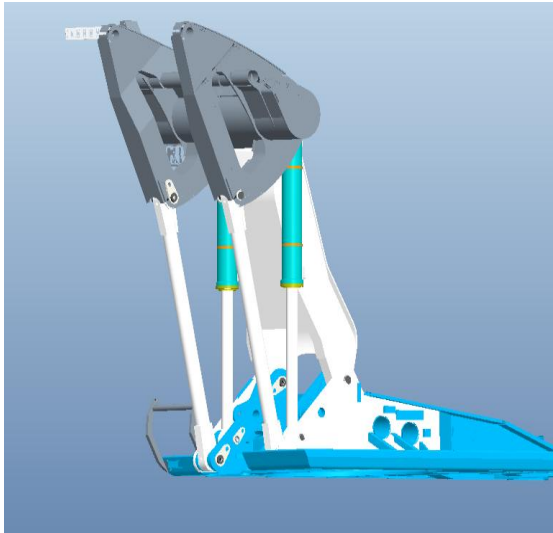




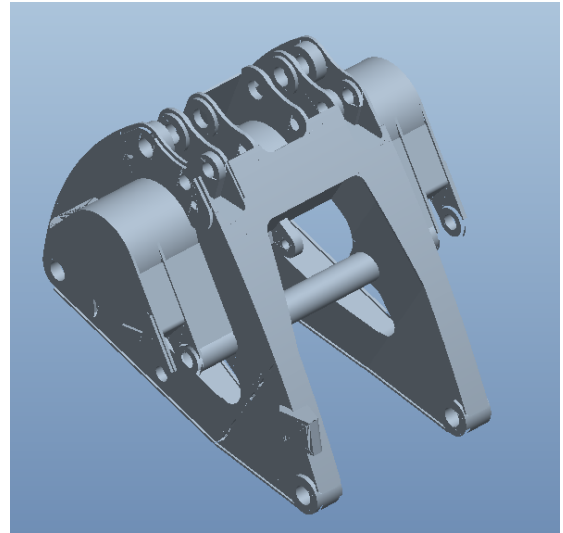
Vista dettagliata del cinematismo

Il cinematismo è un parallelogramma articolato a due bilancieri (considerandolo in 2D), il puntello ed il Main Boom, in cui la biella è costituita dal Trapezio ed un martinetto funge da motore.

Si può notare innanzitutto che sono presenti due cinematismi identici che lavorano parallelamente, questa soluzione è data dalla forma del Trapezio che è l'organo fondamentale per la trasmissione di tutte le azioni che partono dall'asse di perforazione e che si scaricano poi a terra grazie ai cingoli.



Due cinematismi

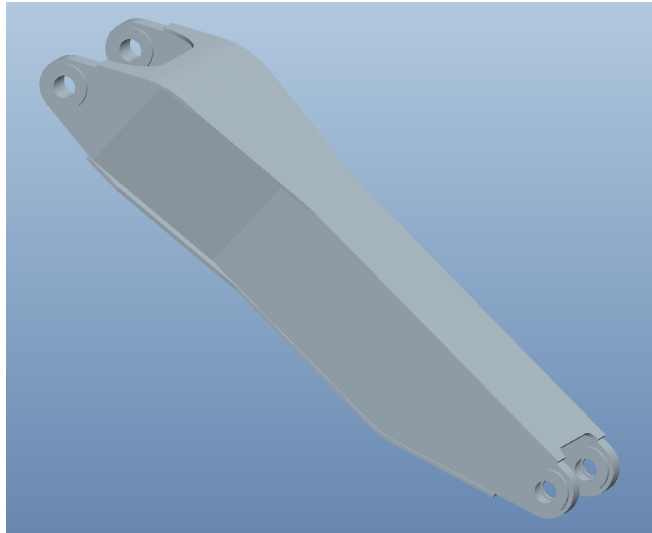


Trapezio

Le azioni principali presenti sulla macchina possono essere suddivise in due grandi categorie, azioni di tiro-spinta in fase di perforazione e coppia di perforazione. La struttura geometrica del Trapezio è quella ideale per trasmettere tutte queste forze e senza il quale la catena di trasmissione delle azioni s'interromperebbe e non si riuscirebbe a trasmettere alcuna coppia.

I due bilancieri del cinematismo, il puntello in esame e il Main Boom, dal punto di vista della movimentazione, facendo parte dello stesso cinematismo, hanno le stesse caratteristiche mentre dal punto di vista strutturale svolgono compiti profondamente diversi.

Il Main Boom, collegato come il Trapezio ad entrambi i cinematismi, è la parte della struttura che reagisce alla coppia di perforazione, infatti, questa si trasmette dall'asta di perforazione al trapezio ed attraversando lo stesso Main Boom si scarica sul telaio e quindi a terra.



Main Boom

Per quanto riguarda il puntello, questo può essere visto come il componente che chiude il parallelogramma, ricordando che quest'ultimo ha la funzione fondamentale di far traslare parallelamente a se stessa l'asta di perforazione.

Per quanto riguarda il martinetto si può dire che questo sia il motore, nello specifico un attuatore lineare, del cinematismo infatti a seconda della pressione dell'olio presente in esso si riesce a muovere l'intera struttura ed inoltre a sostenere gran parte delle componenti dovute alle azioni di tiro spinta. In caso di rottura del martinetto l'antenna di perforazione non crolla ma si abbassa fino a toccare il suolo sotto l'azione del proprio peso.

Si può concludere che sia più che lecito definire come componente critico il puntello in oggetto di questa tesi poiché questo fa parte della struttura indispensabile per la trasmissione di tutte le azioni principali della macchina e senza di questo non si avrebbe trasmissione di coppia. Con la rottura del puntello inoltre viene a mancare il vincolo che controlla la rotazione dell'antenna di perforazione che tenderebbe a crollare mettendo a rischio l'integrità della macchina stessa ma soprattutto degli operatori presenti nei pressi della macchina.

5.2 Criteri di valutazione

Per riuscire a portare a termine nel miglior modo possibile la missione che ci siamo posti, ovvero trovare una soluzione che possa essere una valida alternativa al puntello esistente, si è pensato di creare un metodo per valutare le diverse soluzioni che man mano verranno a svilupparsi. Questo per l'azienda è qualcosa d'innovativo, infatti troppo spesso capita di portare avanti idee e progetti che per certi aspetti sono ineccepibili ma, poiché molto facilmente si rischia di perdere di vista alcune peculiarità aziendali, talvolta sono nella realtà irrealizzabili. Per fare un esempio il progettista potrebbe creare la macchina "perfetta", più bella, più leggera e più performante ma a conti fatti due volte più costosa di quelle della concorrenza, oppure irrealizzabile nel vero senso della parola perché le tecnologie esistenti non sono in grado di svolgere determinate lavorazioni richieste per la produzione.

Questo mette in luce che non è la soluzione "perfetta" ad essere la migliore per l'azienda ma spesso, per non dire sempre, la soluzione finale sarà figlia di vari compromessi (tecnologici, progettuali, costi,...).

Dopo un'attenta analisi della realtà aziendale sono stati scelti alcuni parametri/filtri da vagliare per le varie soluzioni alternative e che saranno gli elementi fondamentali per riuscire a trovare quella che per Soilmec dovrebbe essere l'alternativa migliore a quella esistente.

I seguenti 6 filtri sono quelli scelti e che verranno analizzati caso per caso:

- Fattibilità pratica: questa voce vuole mettere in risalto le tecnologie da applicare per la realizzazione del componente e quindi mettere in evidenza i problemi tecnologici che si possono incontrare.
- Costi: questo è il filtro più importante dal punto di vista dell'azienda, ovvero si vuole trovare il costo totale che l'azienda deve sostenere per la realizzazione del componente (grezzo, lavorazioni, saldature,...) e confrontarle tra le varie soluzioni proposte ma soprattutto con quelli del pezzo esistente.

- Resistenza: questo filtro vuole dare un “peso” alla valutazione tra le diverse soluzioni proposte e mettere in evidenza le scelte progettuali (tramite analisi FEM).
- Ispezionabilità: questa voce vuole mettere in risalto la facilità con cui sul pezzo potranno esser svolti controlli non distruttivi sia dagli stessi fornitori esterni sia dal Servizio Controllo Qualità interno.
- Peso: questo filtro è importante poiché le macchine Soilmec sono già pesantissime e la direzione aziendale è quella di limitare al massimo i pesi superflui e anche piccoli risparmi di peso sono importanti vista la moltitudine dei componenti della macchina.
- Fattore estetico: questo filtro nasce dal fatto che sul mercato uno dei punti di forza delle macchine Soilmec è dato proprio dal fattore estetico (le macchine sono bianche e azzurre), infatti, nonostante debbano lavorare in luoghi ostili sono molto più accattivanti di quelle della concorrenza e la Proprietà aziendale ha sempre puntato moltissimo su questo fattore.

5.3 Ciclo produttivo ed analisi dei costi

Per riuscire a generare più soluzioni alternative, tipi di giunti e cordoni di saldatura, è indispensabile variare anche la geometria del puntello per non limitare il campo delle possibili scelte innovative. Variare la geometria comporta anche la progettazione vera e propria del puntello ma anche dover creare nuovi cicli produttivi e la conseguente analisi dei costi.

Come già è stato messo in rilievo i costi sono la componente più importante che un'azienda deve tenere costantemente monitorata per tutte le scelte che vengono compiute così anche le nuove proposte che vengono prodotte per cercare di migliorare le soluzioni esistenti, devono esser accompagnate da un'analisi di costo. Il concetto che deve esser chiaro è che un'azienda nell'ottica di rinnovamento e per mantenersi al passo con i tempi deve cercare sempre di trovare soluzioni alternative a quelle esistenti però mantenendo sotto controllo il budget a disposizione. Si può quindi dire che in

realtà la cosa più difficile non è trovare nuovi processi produttivi, nuove tecnologie o progettare pezzi più performanti ma la cosa realmente difficile è trovare alternative valide, dal punto di vista aziendale, ovvero che comportino un aumento dei costi estremamente contenuto.

All'interno dell'azienda è presente l'ufficio "Tempi e Metodi" o "Ingegneria di Processo" che ha il compito di realizzare i cicli produttivi dei pezzi completi anche di analisi economica. Per fare questo negli anni sono state compilate tabelle contenenti tutte le azioni che possono essere fatte in fase di produzione e/o montaggio, il tempo per eseguirle ed il costo orario. Queste tabelle talvolta sono fornite dai fornitori stessi ma molto spesso vi è stato un controllo diretto da parte del personale di Tempi e Metodi che controllava cronometro alla mano gli operai durante le singole operazioni e facendo più prove su elementi del personale diverso si è creato un database molto realistico. Queste informazioni risultano utili per:

- creare preventivi interni, ovvero farsi un'idea di quanto qualcosa può costare e quindi poter valutare in maniera critica i preventivi dei fornitori
- essere in grado di creare un costo macchina complessivo di montaggio da parte della manodopera interna

E' chiaro che nel corso degli anni le tabelle sono sempre in continuo aggiornamento e soprattutto la voce più soggetta a cambiamenti è quella del costo orario della manodopera, che può essere più o meno specializzata in base all'operazione in esame, e della macchina utensile.

L'analisi costi si sviluppa parallelamente alla stesura del ciclo produttivo e per fare quest'ultima operazione nella maniera più precisa e sistematica possibile si è pensato di creare un piccolo programma "Excel" strutturato in modo tale da seguire il pezzo durante tutto il suo ciclo.

Si possono distinguere 6 finestre differenti:

1. Materie prime, dove vengono elencati tutti i grezzi presenti (lamiera, tubo, tondo, tubolare, profilato,...), il peso ed il costo al kilo.
2. Preparazione materiale, in cui sono presenti le operazioni che servono per preparare il materiale alle successive lavorazioni (piegatura, taglio,

...), i tempi di preparazione macchina, i tempi di lavorazione ed il costo orario delle varie operazioni.

3. Pre lavorazioni a macchina utensile (tornio, trapano, roditrice, ...), sono intese tutte quelle operazioni che non sono finali ma necessarie durante il ciclo (cianfrinatura, pre fori, ...) e anche qui sono presenti i tempi preparazione macchina, tempi di lavorazione ed il costo orario.
4. Carpenteria, comprende le lavorazioni per assemblaggio, pre assemblaggio e puntatura dei vari componenti
5. Saldatura, ovvero vi è un foglio dedicato a questa operazione in cui viene specificato il tipo cordone, le dimensioni ed il tempo di deposizione materiale per unità di lunghezza (metro) in modo tale da ottenere il costo totale delle operazioni di saldatura una volta noto il costo orario.
6. Lavorazioni macchina utensile, sono le lavorazioni finali (fresa, barenò,...) ed anche qui usciamo con i costi una volta noti i tempi attrezzaggio, movimentazione e di esecuzione.

Una volta completato il ciclo del pezzo l'azienda è in grado di avere una stima molto attendibile di quanto potrà costare e quindi scendendo ad analizzare le singole voci, possono esser messe in evidenza le operazioni più onerose, le quali nel caso il costo sia troppo elevato saranno quelle su cui lavorare per cercare ulteriori alternative che meglio si adattino alle esigenze economiche.

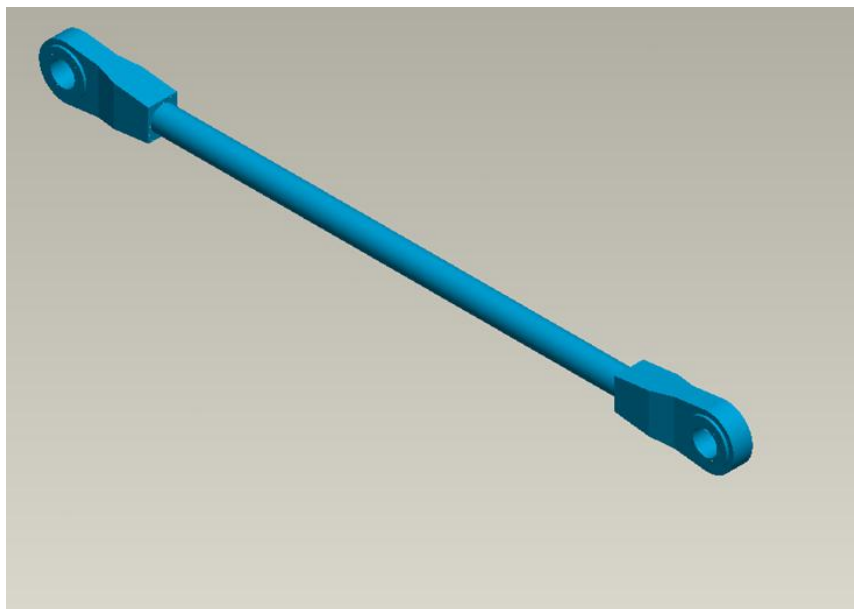
5.4 Soluzioni alternative

Dopo un iniziale ed accurata analisi del puntello esistente è iniziata l'attività principale di questo percorso, ovvero la ricerca di soluzioni alternative. Per trovare possibili varianti mi sono avvalso di ricerche in rete per vedere nel mondo che tipo di soluzioni vengono adottate in casistiche simili e soprattutto dell'esperienza interna Soilmec

poiché l'ambito di ricerca è ristretto a macchine molto specifiche, complesse ed il cui studio è ristretto a poche aziende che cercano in ogni modo di mantenere segrete le proprie scelte progettuali.

Il fatto di non aver mai visto prima macchine di questo tipo ha giovato per certi versi a mio favore, questa cosa può sembrare strana ma non aver la mente "inquinata" da un'esperienza aziendale pregressa ha fatto sì che sia riuscito a generare diverse soluzioni, talvolta irrealizzabili, ma anche interessanti ed innovative. La scelta iniziale, in accordo con il tutor aziendale, è stata proprio quella di pensare e realizzare al cad possibili soluzioni e verificarle dal punto di vista di tenuta strutturale con lo scopo di portarmi a sbagliare, capire le prerogative del pezzo e quindi farmi avvicinare a piccoli passi a trovare la soluzione ingegneristica migliore.

In figura è riportata la prima soluzione, denominata Soluzione 1, significativa per quanto sopra detto ma che non verrà trattata nei particolari come le successive, caratterizzata da un cilindro pieno (\varnothing 100 mm) e quindi non più un tubo (\varnothing 139.7 mm \neq 20).

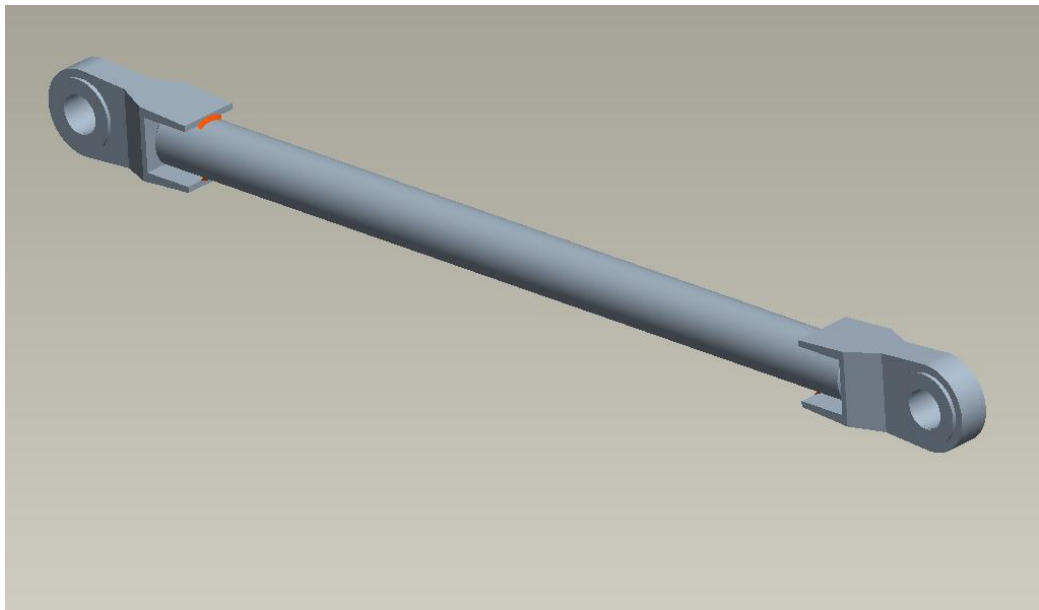


Soluzione 1

Dopo una preliminare analisi sulla teoria di aste compresse ovvero dei problemi di "buckling" o instabilità a carico di punta si può capire che soluzioni con parti piene e

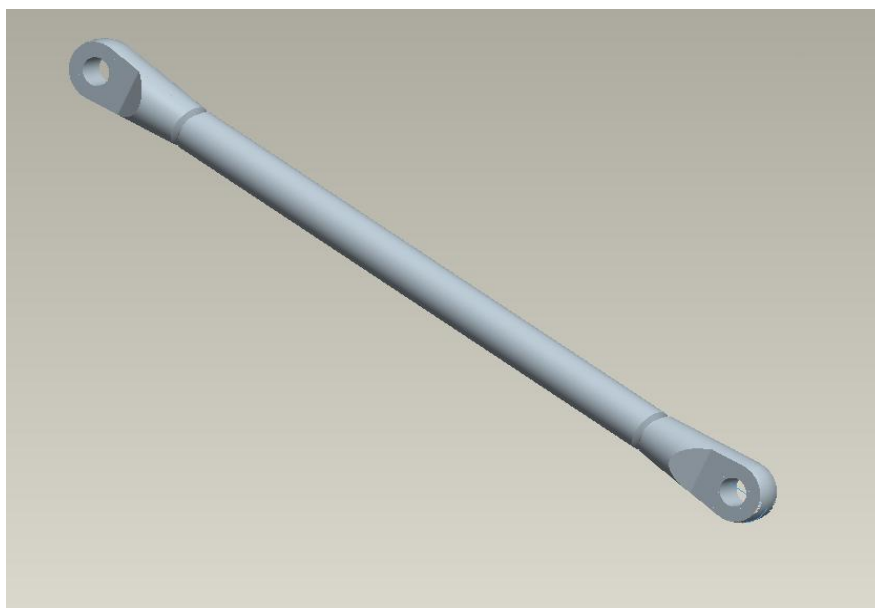
non tubi sono poco felici poiché il momento d'inerzia della sezione è nettamente inferiore nel primo caso e questo è proprio uno dei parametri che influenzano maggiormente questo genere d'instabilità.

Di seguito vengono elencate e brevemente descritte le principali “famiglie” di soluzioni che sono state realmente analizzate sotto ogni aspetto e messe al vaglio dei criteri di valutazione proposti. Ogni famiglia di soluzione genera soluzioni sempre più affinate col passare del tempo grazie all'analisi del ciclo produttivo e di fattibilità.



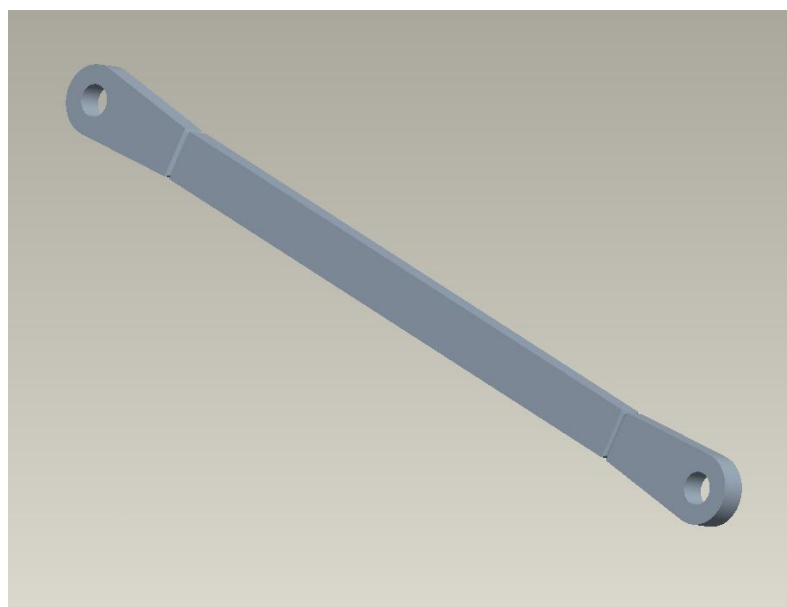
Soluzione 2

La Soluzione 2 è caratterizzata da un tubo uguale a quello utilizzato nel codice esistente ($\varnothing 139.7 \text{ mm} \neq 20$, L 2220 mm) ma in questo caso è il terminale ad esser tagliato ed avere dimensioni più grandi rispetto al tubo.



Soluzione 3

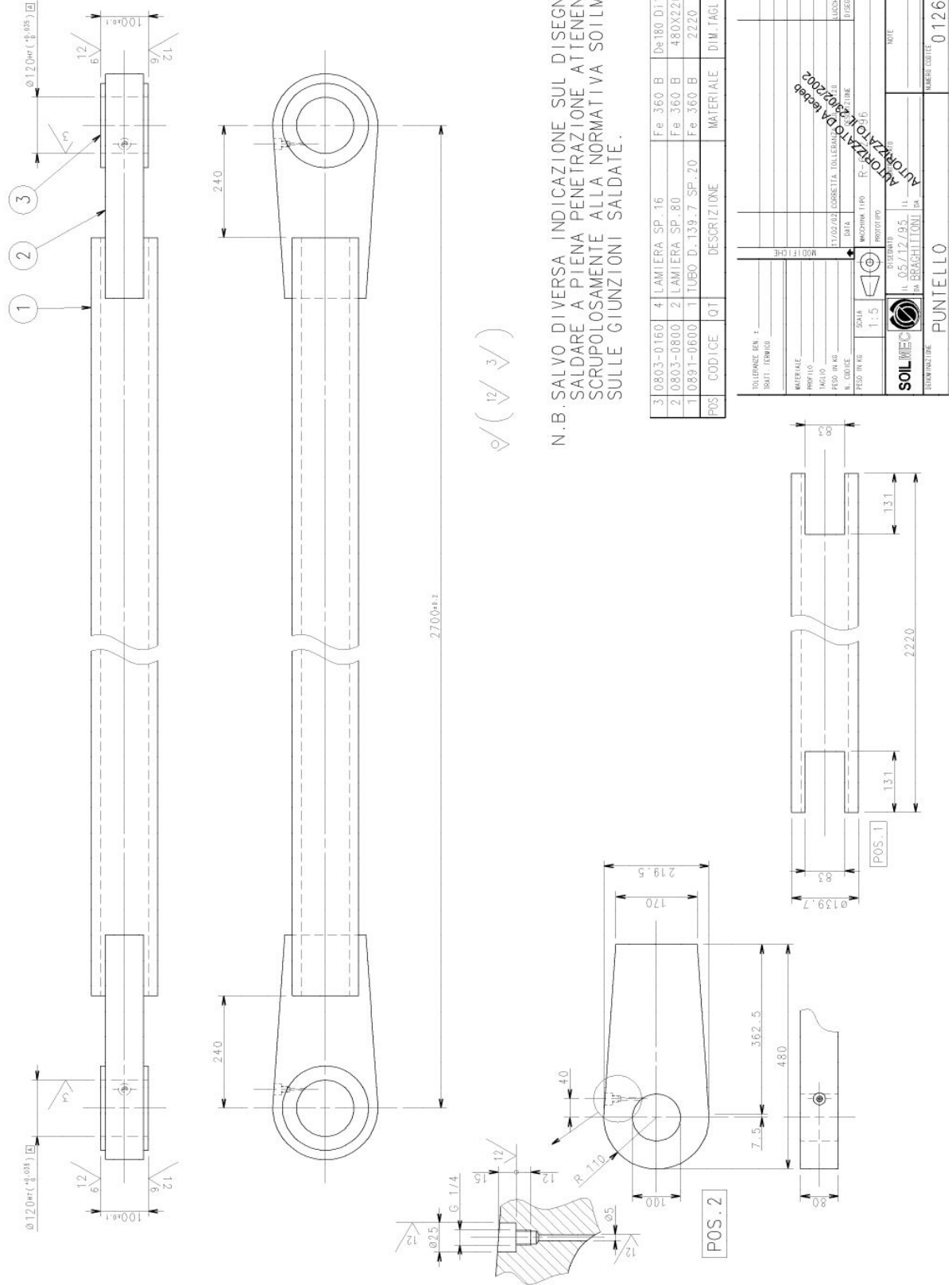
La Soluzione 3 è caratterizzata da un tubo (\varnothing 146 mm \neq 20, L 1958 mm) che è più grosso di quello esistente ma più corto poiché il giunto realizzato è di testa con saldatura in piena penetrazione.

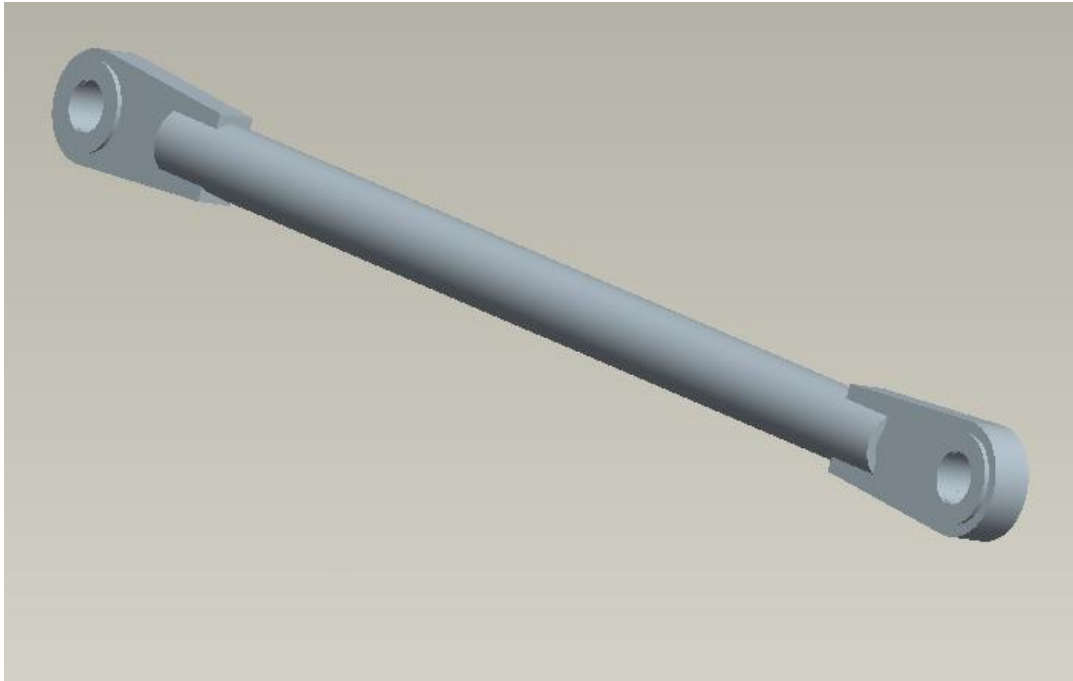


Soluzione 4

La soluzione 4 presenta un tubolare a sezione rettangolare (160 x 80 x 2.5), saldatura sempre di testa a piena penetrazione e sfrutta il terminale del codice esistente.

6. Codice esistente





Prima di iniziare a trovare ed a progettare soluzioni alternative si è deciso di studiare e fare le dovute verifiche sul codice esistente. Questa operazione innanzitutto è stata svolta per avere una visione più approfondita del problema e quindi per avere un'idea delle tensioni in gioco sia sul pezzo sia sui cordoni di saldatura.

I calcoli che sono sviluppati e che poi ritorneranno per tutte le soluzioni alternative prese in esame, sono:

- Verifica a buckling ovvero verifica su aste compresse a carico di punta (UNI EN 10011)
- Verifiche sul terminale (pressione di contatto, strappo in direzione parallela e perpendicolare al tiro)
- Verifica dei cordoni di saldatura (UNI EN 10011)

6.1 Geometria base

Diametro	Spessore	Lunghezza	Peso
139.7 mm	20 mm	2220 mm	59 Kg/m

Caratteristiche geometriche tubo (DIN 1629-3)

Dopo l'analisi del cinematismo si è visto che il caso più sfavorevole prevede un carico sul pezzo di 700000 N e questo sarà il nostro carico di riferimento per lo svolgimento dei dimensionamenti.

Il materiale utilizzato è Fe 510 noto anche come St 52 o S 355 J0, in base alla normativa a cui si fa riferimento (UNI, DIN, EN), le cui caratteristiche principali sono:

σ_s	σ_{amm}	ρ	E
355 MPa	240 MPa	$7850 \frac{Kg}{m^3}$	210000 MPa

6.2 Verifica a carico di punta secondo UNI EN 10011

Per prima cosa bisogna individuare come gli estremi della nostra ipotetica asta sono vincolati in modo tale da poter ricavare da tabella il parametro β che è indispensabile per trovare la lunghezza libera d'inflessione; essendo $L_c = \beta * L$

Caso	I estremo	II estremo	β
a	Incernierato	Incernierato	1
b	Incastrato	Incastrato	0,7
c	Incastrato	Libero	2
d	Incastrato	Incernierato	0,2

Nel nostro caso possiamo assumere che entrambi i terminali siano vincolati in maniera tale da essere considerati come due cerniere ovvero β risulta esser pari a 1. Per quanto riguarda il valore di L, lunghezza dell'asta, si è deciso di fare un'ipotesi che ci mette in una condizione di calcolo più sfavorevole, ovvero, non assumere $L = 2220$ mm come da geometria ma prendere L pari a 2700 mm cioè l'interasse che c'è tra i fori dei terminali.

Per riuscire a quantificare "i", raggio d'inerzia, ed il grado di snellezza λ , bisogna individuare e calcolare l'area della sezione resistente ed il suo momento d'inerzia.

L'area resistente è quella del tubo e vale: $A = \frac{\pi(De^2 - Di^2)}{4}$

Il momento d'inerzia della sezione : $I = \frac{\pi(De^4 - Di^4)}{64}$

Si ricorda che il raggio d'inerzia ed il grado di snellezza si ricavano dalle seguenti formule:

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad \lambda = \frac{Lc}{i}$$

Con i dati a nostra disposizione si ottengono i seguenti valori:

A	7521 mm ²
I	13846196 mm ⁴
i	42.9
λ	62.9

A questo punto si calcola la quantità $\lambda_c = \pi * \sqrt{\frac{E}{\sigma_s}} = \pi * \sqrt{\frac{210000}{355}} = 76.41$

Adesso si può ricavare il rapporto $\frac{\lambda}{\lambda_c} = \frac{62.9}{76.41} = 0.82$

Con questo valore entriamo in tabella nella colonna “curva a” , ovvero quella che rappresenta il nostro caso.

λ/λ_c	σ_c/σ_y				Aste	Forma della sezione	Curva	
	curva a	curva b	curva c	curva d				
0,00	1,000	1,000	1,000	1,000	Semplici	Profili cavi quadri, rettangoli o tondi saldati o laminati $t \leq 40$ mm	a	
0,10	1,000	1,000	1,000	1,000				
0,20	1,000	1,000	1,000	1,000	Semplici	Profili ad I laminati $\frac{h}{b} \geq 1,2$ $t \leq 40$	b	
0,30	0,978	0,965	0,951	0,917				
0,40	0,953	0,925	0,900	0,841				
0,50	0,923	0,885	0,843	0,769				
0,60	0,885	0,838	0,783	0,699				
0,70	0,844	0,785	0,719	0,633				
0,80	0,796	0,727	0,655	0,572				
0,90	0,739	0,663	0,593	0,517				
1,00	0,674	0,599	0,537	0,468				
1,10	0,606	0,538	0,486	0,424				
1,20	0,540	0,481	0,439	0,385				
1,30	0,480	0,429	0,395	0,350				
1,40	0,427	0,383	0,357	0,319				
1,50	0,381	0,343	0,323	0,290				
1,60	0,341	0,308	0,293	0,265				
1,70	0,306	0,277	0,266	0,242				
1,80	0,277	0,250	0,241	0,222				
1,90	0,251	0,226	0,219	0,204				
2,00	0,228	0,205	0,200	0,188				
2,10	0,208	0,188	0,183	0,173				
2,20	0,190	0,173	0,169	0,160				
2,30	0,175	0,159	0,158	0,148				
2,40	0,162	0,147	0,147	0,138				
2,50	0,149	0,137	0,137	0,129				
2,60	0,138	0,128	0,128	0,120				
2,70	0,128	0,119	0,119	0,112				
2,80	0,119	0,110	0,110	0,105				
2,90	0,112	0,103	0,103	0,098				
3,00	0,105	0,096	0,096	0,092				
					Semplici o composte	Generica	$t \leq 40$ mm	c
						Tutte	$t > 40$ mm	d

Dalla tabella usciamo con il valore del rapporto $\frac{\sigma}{\sigma_c}$, pari a 0.796, ed applicando la formula inversa riusciamo ad ottenere il valore della tensione critica σ_c che risulta essere 282.6 MPa poiché il valore di σ , che vale $\frac{F}{A}$, è noto.

Ottenuto il valore della tensione critica siamo in grado, note le condizioni di carico ovvero del coefficiente di sicurezza v pari a 1.5, di fare la prima verifica secondo normativa:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} \geq v \text{ quindi } \sigma_c \geq v * \sigma \text{ ottenendo } 282.6 \geq 1.5 * \frac{700000}{7521} \text{ ovvero } 282.6 \geq 139.6$$

Verificata questa disuguaglianza si può proseguire con il secondo ed ultimo passo richiesto entrando nella seguente tabella, sempre nella casistica "a", con il valore di λ noto.

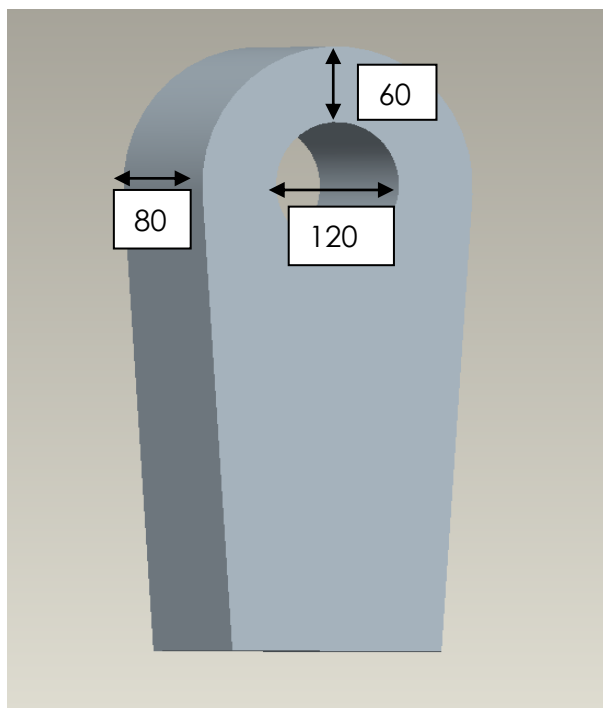
λ	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	λ
0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0
10	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,01	10
20	1,01	1,02	1,02	1,02	1,03	1,03	1,03	1,04	1,04	1,04	20
30	1,05	1,05	1,06	1,06	1,06	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	30
40	1,10	1,10	1,11	1,11	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,15	40
50	1,16	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,21	1,22	1,23	1,24	50
60	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,31	1,32	1,33	1,35	1,36	60
70	1,38	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,48	1,50	1,53	1,55	70
80	1,57	1,59	1,61	1,64	1,66	1,69	1,71	1,74	1,77	1,79	80
90	1,82	1,85	1,88	1,91	1,94	1,97	2,00	2,03	2,06	2,10	90
100	2,13	2,16	2,19	2,23	2,26	2,30	2,33	2,37	2,41	2,44	100
110	2,48	2,52	2,56	2,60	2,63	2,67	2,71	2,75	2,79	2,83	110
120	2,88	2,92	2,96	3,00	3,05	3,09	3,13	3,18	3,22	3,27	120
130	3,31	3,36	3,40	3,45	3,49	3,54	3,59	3,63	3,68	3,73	130
140	3,78	3,83	3,88	3,93	3,98	4,03	4,09	4,14	4,19	4,24	140
150	4,30	4,35	4,40	4,46	4,51	4,57	4,63	4,68	4,74	4,80	150
160	4,86	4,91	4,96	5,02	5,07	5,13	5,19	5,25	5,31	5,37	160
170	5,43	5,49	5,56	5,62	5,68	5,74	5,80	5,86	5,93	5,99	170
180	6,05	6,12	6,19	6,25	6,32	6,39	6,45	6,52	6,59	6,66	180
190	6,72	6,78	6,85	6,92	7,00	7,07	7,14	7,21	7,28	7,36	190
200	7,43	7,50	7,57	7,65	7,72	7,79	7,87	7,95	8,03	8,10	200
210	8,15	8,26	8,33	8,41	8,48	8,56	8,64	8,72	8,79	8,87	210
220	8,95	9,02	9,10	9,18	9,26	9,33	9,42	9,49	9,57	9,65	220
230	9,73	9,81	9,90	9,99	10,08	10,17	10,25	10,33	10,42	10,50	230
240	10,60	10,67	10,76	10,85	10,94	11,03	11,11	11,21	11,30	11,40	240
250	11,49										250

Si ottiene il valore “ ω ” presente nella disequazione da verificare $\frac{\omega * F}{A} \leq \sigma_{amm}$.

$$\frac{1.28 * 700000}{7521} \leq 240 \quad \text{che viene verificata in quanto} \quad 119.1 \leq 240$$

6.3 Verifiche sul terminale

Una delle parti critiche da verificare del pezzo è sicuramente il terminale, denominato internamente all’azienda anche orecchio, e perciò sono state fatte 3 tipologie differenti di prove di resistenza della parte in modo tale da riuscire ad avere un’analisi la più completa possibile (seguendo indicazione UNI EN 10011).



Terminale/orecchio con misure caratteristiche

6.3.1 Verifica a pressione di contatto

Spessore	Diametro foro	Area proiettata	P ammissibile
80 mm	120 mm	9600 mm ²	160 MPa

La pressione media di contatto vale $\frac{F}{A} = \frac{700000}{9600} = 72.9 \text{ MPa}$

Poiché la pressione media di contatto è inferiore a quella ammissibile ($\frac{2}{3}$ della tensione ammissibile) si ha esito positivo per la verifica.

6.3.2 Verifica a strappo in direzione del tiro

Spessore	Altezza radiale	Sezione resistente	σ amm
80 mm	50 mm	4000 mm ²	240 MPa

La tensione a strappo che si ottiene vale $\frac{F}{A} = 175 \text{ MPa}$ e poiché risulta inferiore a quella ammissibile si ha buon esito della verifica.

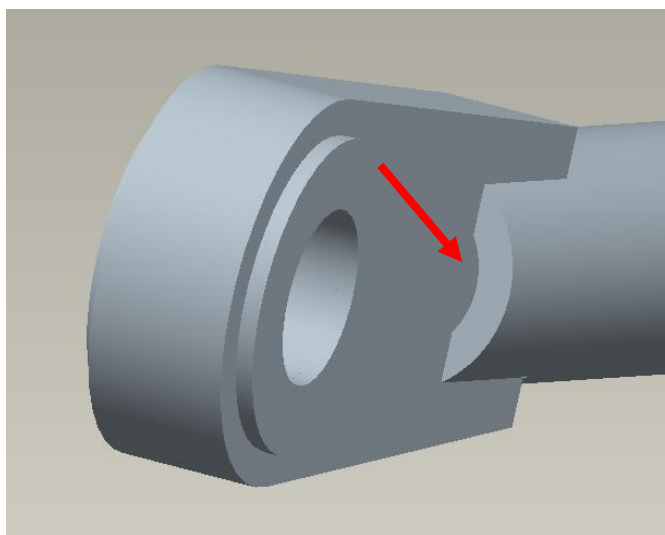
6.3.3 Verifica a strappo in direzione perpendicolare al tiro

Spessore	Altezza radiale	Sezione resistente	σ_{amm}
80 mm	50 mm	8000 mm ²	240 MPa

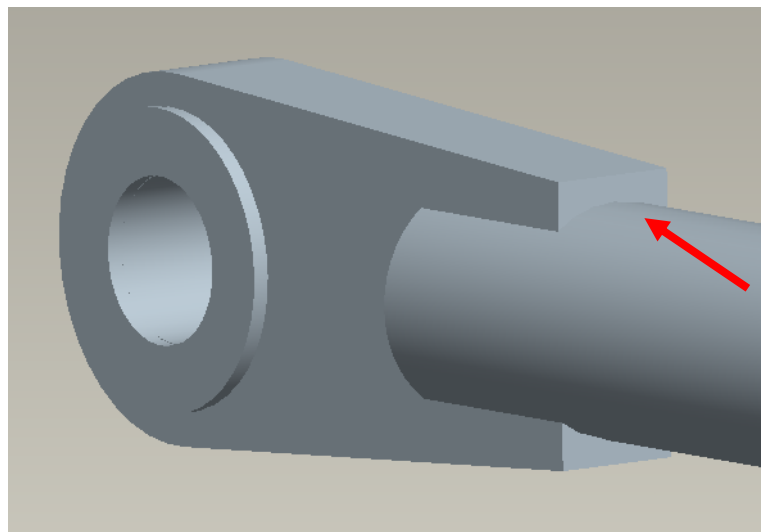
La tensione a strappo che si ottiene vale $1.4 \frac{F}{A} = 122.5 \text{ MPa}$ e poiché risulta inferiore a quella ammissibile si ha buon esito della verifica.

6.4 Progettazione e verifica dei cordoni di saldatura

Il problema principale riscontrato sul pezzo, causa principale delle rotture, è dato dalla realizzazione dei cordoni di saldatura così come vengono imposti a disegno. La difficoltà principale consta nel fatto che viene richiesta piena penetrazione su tutti i cordoni ma ciò risulta impossibile dal punto di vista realizzativo.



La freccia mette in risalto la zona dove la piena penetrazione è irrealizzabile infatti si può notare che vi è luce tra il tubo tagliato ed il terminale quindi è impossibile saldare nella maniera richiesta, al più potrà esser realizzato un cordone d'angolo che però avrà tenuta assolutamente inferiore a quello effettivamente voluto.



In questa immagine viene messa in risalto la parte in cui la piena penetrazione è effettivamente realizzabile tecnologicamente parlando, infatti facendo un opportuno cianfrino sul tubo tagliato si potrebbe ottenere una piena penetrazione da 20 mm. In realtà il cianfrino richiesto non è comunque di facile realizzazione e tramite controlli effettuati dal Servizio Controllo Qualità si è notato che il cianfrino realizzato è sempre inferiore a quello richiesto (cianfrino scarso) e quindi anche in questo caso non si ha una saldatura perfettamente in piena penetrazione.

Nonostante queste difficoltà di realizzazione però bisogna dire che questo codice è montato da anni sulle macchine e sono davvero pochi gli inconvenienti che storicamente si sono riscontrati, dimostrando il fatto che il pezzo è sovradimensionato. E' stato fatto, anche per questo caso, un calcolo di verifica del cordone di saldatura anche se in maniera un po' approssimativa proprio per le ragioni sopra elencate, ovvero poiché non sono facili da individuare le effettive sezioni resistenti.

Per il calcolo non si è tenuto conto dei cordoni laterali che possono essere classificati come cordoni di sicurezza ma abbiamo tenuto conto solo di un contributo extra.

La sezione resistente più facile da individuare è quella che più o meno viene effettivamente realizzata e che vale 1600 mm^2 (20 mm saldatura x 80 mm spessore lamiera) ed essendo presente su due lati l'area resistente totale A_1 vale 3200 mm^2 .

Il secondo contributo è dato dal cordone che non è possibile realizzare in piena penetrazione a cui viene sommato un contributo dei 4 cordoni laterali, per questo

motivo si è approssimata questa sezione resistente a 2794 mm^2 (20×139.7) che essendo presente su due lati si ottiene A_2 pari a 5588 mm^2 .

L'area totale resistente dei cordoni di saldatura è così stimata in 8788 mm^2 .

Essendo richiesta piena penetrazione secondo la UNI EN 10011 il materiale può essere considerato come continuo e basta verificare per la tenuta del cordone che:

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp} + \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp} \sigma_{\parallel} + 3\tau^2} \leq \sigma_{amm} \quad (\text{I classe})$$

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp} + \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp} \sigma_{\parallel} + 3\tau^2} \leq 0.85 * \sigma_{amm} \quad (\text{II classe})$$

Per i nostri calcoli si farà riferimento alla II classe ovvero cordoni di saldatura a piena penetrazione che vengono sì controllati ma non in maniera tale da poter assumere come tensione ammissibile quella del materiale base.

Nel caso in esame, e poi in tutti quelli seguenti, la σ ideale si riduce semplicemente ad una σ_{\perp} che è facilmente individuabile da $\frac{F}{A}$ ovvero $\frac{700000}{8788} = 79.65 \text{ MPa}$.

Per la verifica secondo normativa del cordone si ha che:

$\sigma_{\perp} \leq 0.85 * \sigma_{amm}$ ovvero che $79.65 \leq 0.85 * 240$ risultando $79.65 \leq 204$ e quindi la tenuta del cordone è verificata.

Dai dati numerici ottenuti s'intuisce che il pezzo nella realtà tiene poiché la struttura è abbastanza sovradimensionata e quindi solo in casi di realizzazione veramente di bassa qualità del cianfrino e dei cordoni di saldatura la struttura rischia di cedere.

6.5 Ciclo produttivo ed analisi di costo

Di seguito viene proposto il ciclo produttivo del pezzo realizzato da Tempi e Metodi ovvero il ciclo produttivo reale, presente in archivio, dal quale l'azienda riesce ad ottenere il costo effettivo del pezzo finito. L'indicazione di quanto l'azienda spende per produrre l'attuale codice è un'indicazione fondamentale, infatti sarà uno dei filtri decisivi per riuscire a trovare l'alternativa ideale.

6.5.1 Materiale grezzo di partenza

Tubo (DIN 1629.3)	Ø 139,7 ± 20	59 Kg/m	1.60 €/Kg
Lamiera	480*220 ± 80	66.35 Kg	1.50 €/Kg *

*Il prezzo della lamiera è compreso di taglio secondi accordi commerciali dell'azienda

Il tubo è lungo 2220 mm per un peso totale di 131 Kg mentre in terminali tagliati pesano complessivamente 132.7 Kg. Il costo dei materiali grezzi risulta essere:

Tubo: $131 \text{ Kg} * 1.60 \text{ €/Kg} = 209.6 \text{ €}$

Terminali: $132.7 \text{ Kg} * 1.50 \text{ €/kg} = 199.05 \text{ €}$

Per un costo totale di 408.65 € per il solo materiale grezzo.

La prima lavorazione sarà quella della preparazione del materiale ovvero il taglio a misura del tubo (2220 mm) sulla troncatrice e la realizzazione delle restanti lavorazioni sul tubo stesso.

Le successive operazioni sono quelle di pre lavorazione a macchina utensile ovvero operazioni di cianfrinatura alla smussatrice.

Finite queste lavorazioni i pezzi sono pronti per essere assemblati, per fare ciò è presumibile che venga utilizzata una maschera di montaggio. La maschera è una struttura di carpenteria appositamente realizzata per creare appoggi che diano riferimenti utili a facilitare il posizionamento relativo dei pezzi. La maschera di carpenteria ha un costo molto basso se si considera il tempo che fa risparmiare ad ogni operazione e quindi per un certo volume produttivo come il nostro, che comunque giustifica la realizzazione di tale struttura, il costo della maschera non viene addebitato. Queste operazioni seguendo la tabella riassuntiva del ciclo risultano impiegare molto tempo perciò si è pensato che siano state inglobate sotto questa voce anche operazioni finali, come il montaggio delle rondelle. Ultimate le operazioni di assemblaggio e di pre saldatura, posso essere applicati punti di saldatura, si passa al reparto di saldatura finale.

Nel ciclo produttivo la fase di saldatura è sicuramente la più critica anche perché i cordoni sono in piena penetrazione quindi si presuppone che vi siano più passate e quindi il rischio di presenza di difetti aumenta considerevolmente.

Ultimate le operazioni di saldatura si eseguono le lavorazioni a macchina utensile, nel caso un'alesatrice, con spianatura delle superfici mediante fresa e realizzazione dei fori tramite l'utilizzo di più baren.

Reparto	Centro lavoro	T prep (min)	T lav (min)	€ / ora	€
Prep. materiale	Troncatrice	28	15	35	46.84
	Taglio	20	10	35	
Macc utensile	Smussatrice	6	40	32	26.99
Carpenteria	Assemblaggio	65	102	32	103.93
	Saldatura		90.8	34	90.90
Lav macchina utensile	Alesatrice	84	56	60	72
				Tot	340.66

N.B. I tempi in tabella vengono maggiorati di un 10% nel calcolo finale del costo

La tabella è realizzata mediante le tabelle che l'ufficio Tempi e Metodi si è costruito negli anni tramite l'esperienza o che sono fornite dai fornitori stessi. Nel costo delle lavorazioni manca la verniciatura che viene realizzata internamente nell'apposito reparto ed i costi dei trasporti che vengono di volta in volta stabiliti direttamente col fornitore al momento dell'ordine.

Il totale dei costi risulta essere $408.65 + 304.66 = 749.31$ € ed è un costo attendibile poiché gli ultimi lotti in entrata sono stati pagati 771 € al pezzo.

6.6 Peso

Per quanto riguarda la stima del peso del pezzo finito, altro fattore da tenere sotto controllo, si è scelto di utilizzare una potenzialità del programma CAD utilizzato in azienda che fornisce un valore di 235 Kg, dato del tutto attendibile e riscontrato nella realtà.

Componente	Peso unitario(Kg)	Quantità	Peso totale (Kg)
Tubo	123.5	1	123.5
Terminali	53	2	106
Rondelle	1.38	4	5.52
		Tot	235.02

6.7 Fattibilità pratica

E' chiaro che la concezione del pezzo mirasse ad ottenere le prestazioni richieste con il minimo sforzo ovvero creando un pezzo economico e, almeno all'apparenza, facile da realizzare.

Il codice esistente presenta scelte realizzative che non sembrano le ottimali come ad esempio la scelta di tagliare il tubo mantenendo il terminale intero o saldare tutto a piena penetrazione ma il pezzo è realizzato tramite un ciclo produttivo impeccabile. Il fatto che il ciclo produttivo sia teoricamente impeccabile non vuole dire che nella realtà i fornitori riescano a portare a termine tutte le lavorazioni richieste a regola d'arte, infatti, si è visto che è difficoltoso per il saldatore realizzare le saldature richieste.

6.8 Ispezionabilità

Il pezzo non presenta grossi problemi in fase di controlli non distruttivi poiché i cordoni di saldatura risultano essere ben accessibili all'operatore.

6.9 Fattore estetico

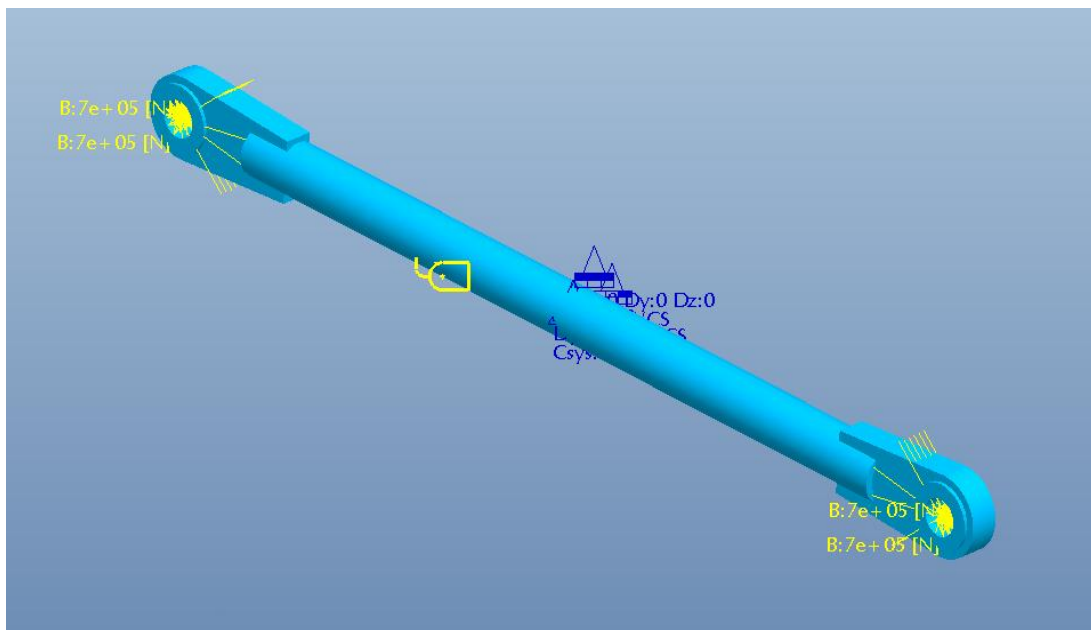
La concezione del pezzo esistente ha come priorità la funzionalità e l'economicità ma non sicuramente il fattore estetico. La scelta di avere un tubo tagliato e saldato in più parti su un terminale ottenuto direttamente dal taglio di una lamiera vanno in un'unica

direzione, ovvero la praticità. Questo avviene anche perché all'epoca del progetto l'azienda non aveva ancora tra le sue priorità la realizzazione di pezzi funzionali ed allo stesso tempo esteticamente accattivanti.

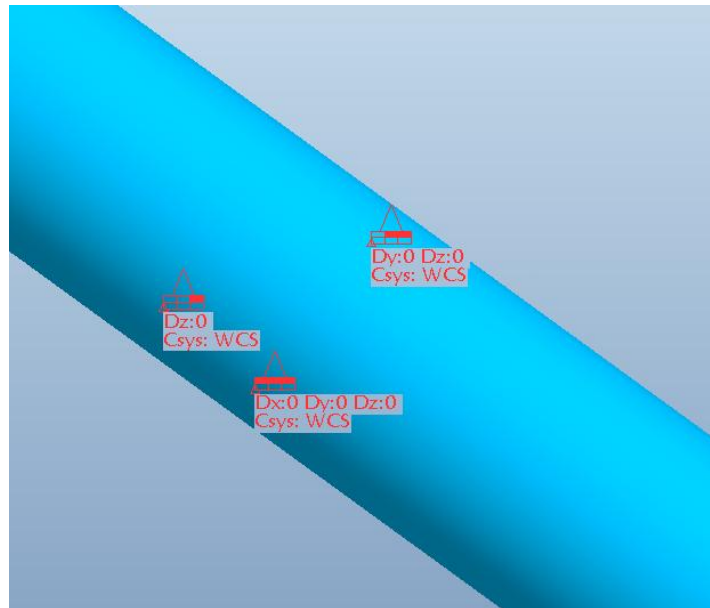
6.10 Analisi FEM

Per quanto riguarda le analisi FEM si è utilizzato il programma Mechanical, applicazione presente nel pacchetto Pro-Engineering.

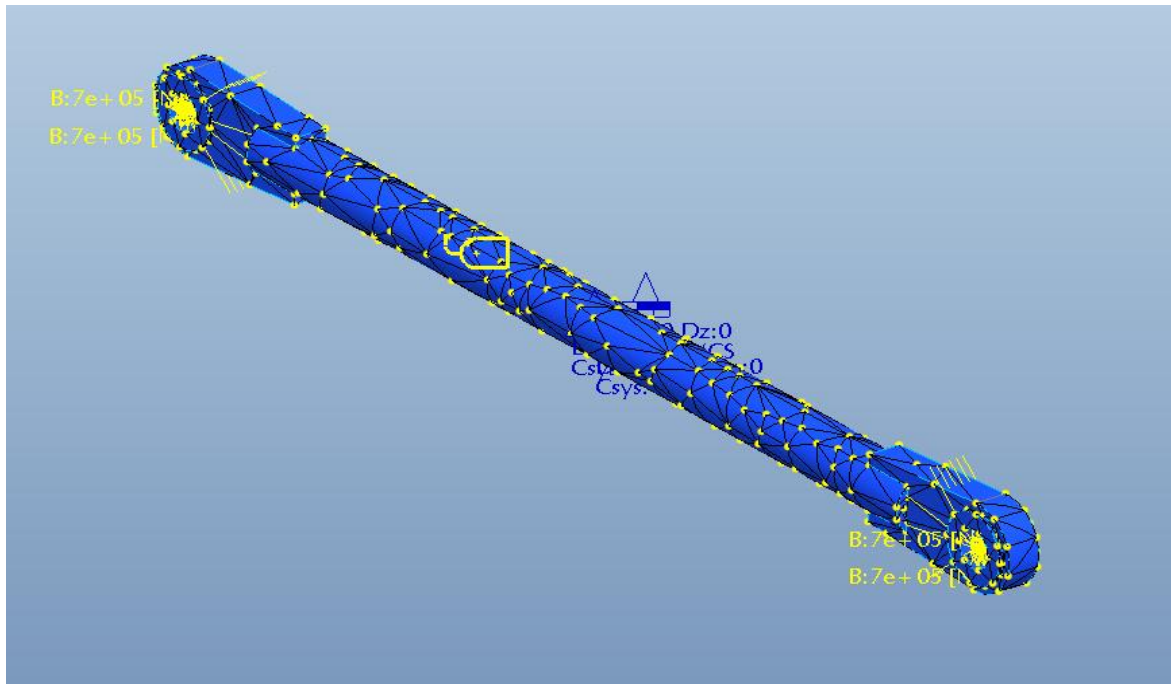
Le analisi fatte forniscono risultati significativi per quanto riguarda le tensioni e deformazioni del pezzo; per ognuna di queste si troveranno immagini riguardanti: carichi-vincoli, mesh, tensioni e deformazioni.



In figura si può notare un cartellino giallo che simboleggia il fatto che al pezzo è stato assegnato un materiale, al centro vi sono 3 triangoli blu che rappresentano i vincoli ed alle estremità si possono notare, in giallo, i carichi applicati (700000 N) all'interno del foro sul terminale.



I vincoli sono apparentemente in una posizione insolita, al centro del pezzo, quando invece è noto che nella realtà i vincoli sono agli estremi di questo. Questa soluzione prende il nome di “modello auto equilibrato” poiché i vincoli fisici vengono sostituiti dalle reazioni vincolari. Si può notare, nella figura soprastante, che per generare un modello auto equilibrato bisogna prendere 3 punti di cui: ad un punto vengono bloccate tutte e tre le traslazioni, al secondo punto viene liberata una traslazione che non sia quella dell’asse del tubo ed infine al terzo punto viene liberata anche l’altra traslazione lasciando quindi vincolata solo quella lungo l’asse.

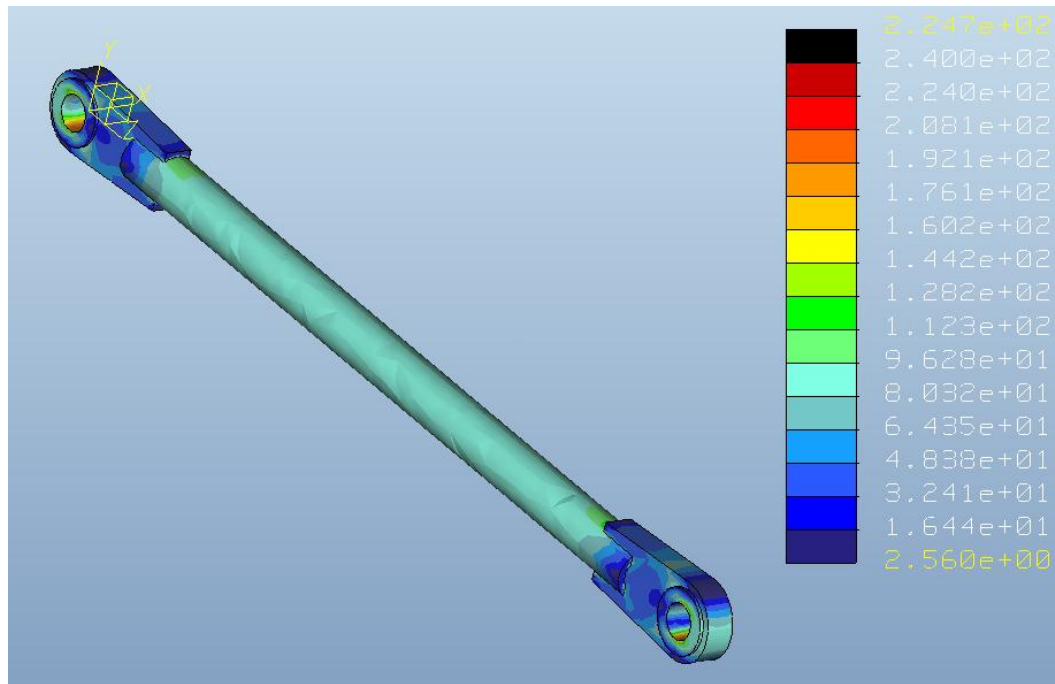


Nella figura soprastante è visualizzata la mesh che il programma genera per l'analisi tensionale e delle deformazioni sul pezzo. La mesh, formata da elementi tetra (tetragonali), è generata automaticamente dal programma ed attualmente il controllo sulla meshatura può esser fatto globalmente o al più su zone estese del pezzo ma non puntualmente.

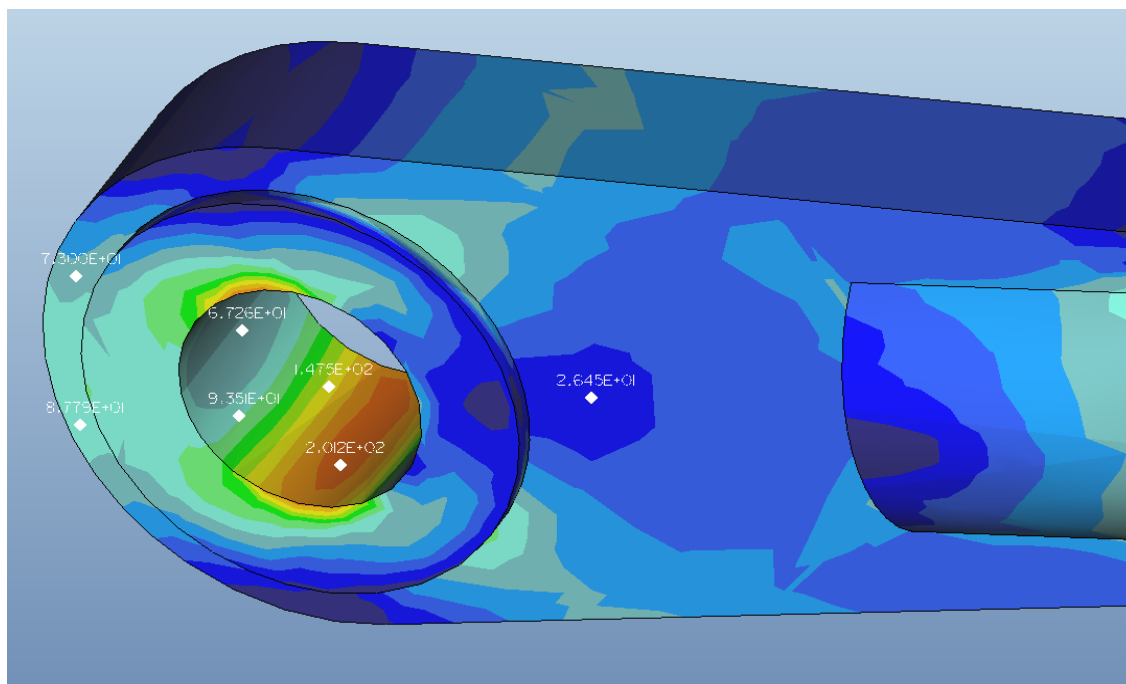
AutoGEM Summary			
Entities Created:			
Beam:	0	Edge:	-224
Tri:	0	Face:	-313
Quad:	0	Face-Face Link:	0
Tetra:	-134	Edge-Face Link:	0
Wedge:	0		
Brick:	0		
Criteria Satisfied:			
Angles (Degrees):			
Min Edge Angle: 5.03		Max Edge Angle: 167.81	
Max Aspect Ratio: 8.74			
Elapsed Time: 0.02 min CPU Time: 0.00 min			
Close			

Dopo aver generato la mesh, il programma fornisce un rapporto sulla meshatura dove ne vengono riportate le principali caratteristiche. Si può notare che sono stati generati

solo elementi tetra, c'è la possibilità di generare anche elementi wedge (prismatici) o brick (mattoni), e possiamo visualizzarne il numero di bordi, di facce, l'angolo minimo e quello massimo d'apertura dei tetragoni.



Per quanto riguarda l'analisi delle tensioni questa è la schermata che ci fornisce il programma. Sulla destra vi è la legenda dell'analisi dove è impostato come valore massimo il valore della σ_{amm} del materiale (240 MPa) e di conseguenza il programma genera la scala cromatica, dove si passa dal color nero (valore critico) al blu (valore meno critico).



In figura si possono notare alcuni valori puntuali delle tensioni e si può vedere come questi siano assolutamente accettabili rispetto al valore minimo prefissato.

Prima di fare quest'analisi FEM si ricorda che sono state fatte tutte le dovute verifiche secondo normativa, come mostrato all'inizio del capitolo, sia sul terminale sia sul tubo. Le verifiche secondo normativa forniscono valori medi delle tensioni mentre tramite l'analisi FEM riusciamo ad ottenere valori puntuali che dovranno esser analizzati criticamente. La valutazione critica dei valori ottenuti mediante questo tipo di analisi consiste nel valutare se zone con livelli di tensione puntuale elevata (colore rosso o nero) possono generare reali problemi oppure sono punti o zone poco estese ed isolate dove vi è una concentrazione degli sforzi accettabile. Nel caso in esame la tensione massima è minore di quella ammissibile quindi non vi sono problemi.

Ma cosa dovremo concludere se la tensione nella zona rossa fosse 250 MPa invece di 202 MPa ? In questo caso, anche superando il valore di tensione ammissibile, non dovremo preoccuparci di questa ipotetica "macchia nera" infatti la zona (attualmente rossa) è poco estesa ma soprattutto è solo superficiale e non si espande sullo spessore del terminale. Un campanello d'allarme deve scattare se la zona sospetta si estende

anche sullo spessore del pezzo oppure se puntualmente si raggiungono tensioni molto più elevate rispetto a quelle ammissibili.

Le deformazioni sul pezzo in esame, poiché siamo in un caso di pura trazione-compressione, sono solo allungamento o contrazione. Prima di ottenere dei risultati, poiché il pezzo non ha una sezione costante e manualmente non è immediato calcolarne le deformazioni, abbiamo verificato la validità dei valori forniti dall'analisi FEM creando un modello campione di cui siamo in grado di calcolare le deformazioni. Si è scelto di prendere un tubo di lunghezza 1958 mm, diametro 146 mm, spessore 20 mm, area 7916.8 mm^2 e lo abbiamo caricato agli estremi con una forza di 700000 N. Ci siamo così ricondotti al caso della molla di trazione in filo continuo dove vale la relazione $F = k * \Delta L$, dove k, la costante elastica della molla, vale $\frac{E * A}{L}$.

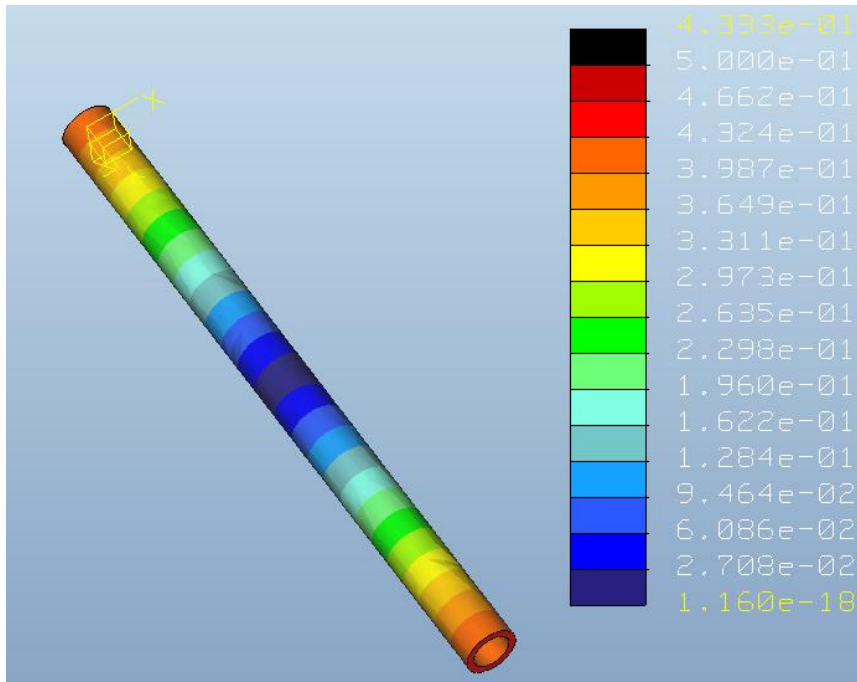
Per ottenere valori confrontabili con quelli forniti da Mechanica è opportuno controllare il valore delle costanti che utilizza il programma. All'acciaio scelto il programma associa un modulo di elasticità E pari a $199948 \frac{N}{\text{mm}^2}$.

Si ottiene che k vale:

$$k = \frac{E * A}{L} = \frac{199948 * 7916.8}{1958} = 808452 \frac{N}{\text{mm}} \quad \text{da cui}$$

$$\Delta L = \frac{F}{k} = \frac{700000}{808452} = 0.866 \text{ mm}$$

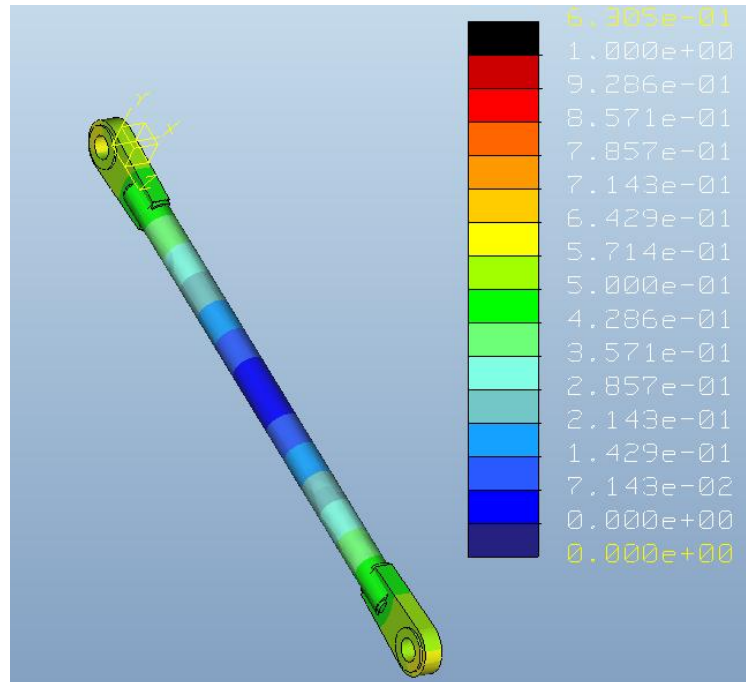
Si ottiene così che applicando la forza di trazione il tubo subisce un allungamento di 0.866 mm. Vogliamo verificare che il risultato ottenuto tramite questo procedimento di calcolo manuale coincida alla perfezione con i risultati forniti dall'analisi FEM.



Possiamo vedere che l'analisi FEM fornisce un ΔL pari a 0.433 mm ovvero esattamente la metà di quanto da noi calcolato. In realtà non vi è nessun errore ma questa differenza è dovuta dal fatto che il tubo è stato vincolato come modello auto-equilibrato al centro ed il sistema di riferimento è posizionato in mezzeria, quindi viene rilevato un allungamento che è la metà di quello dell'intero tubo.

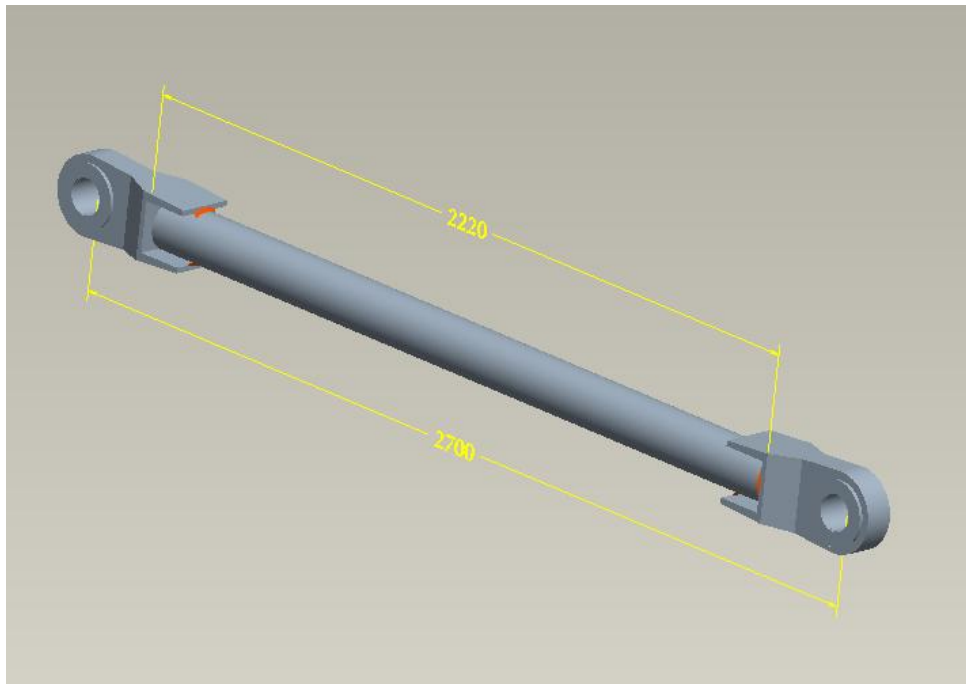
Una volta ottenuti i risultati sperati siamo in grado di poter affermare che i risultati forniti dal programma anche nel caso delle deformazioni sono assolutamente attendibili, ovvero abbiamo ottenuto una sorta di taratura del modello.

Passiamo quindi ai risultati ottenuti per il codice esistente.

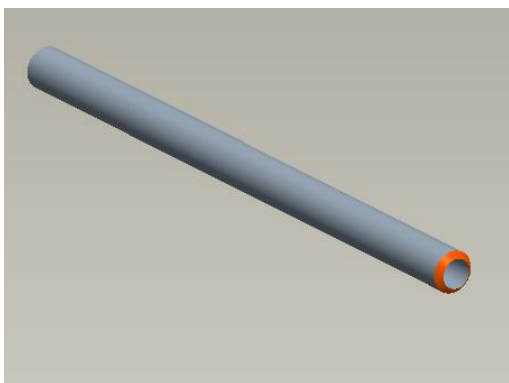


Si può notare che l'analisi FEM fornisce, per quanto riguarda le deformazioni sul pezzo, un allungamento ΔL totale pari a 1.261 mm (il valore a video va moltiplicato per 2). Si può concludere dicendo che un allungamento di questa entità è del tutto accettabile poiché ai fini dello spostamento il valore ottenuto è di un ordine di grandezza inferiore rispetto ai valori di ammissibili sulle macchine in esame.

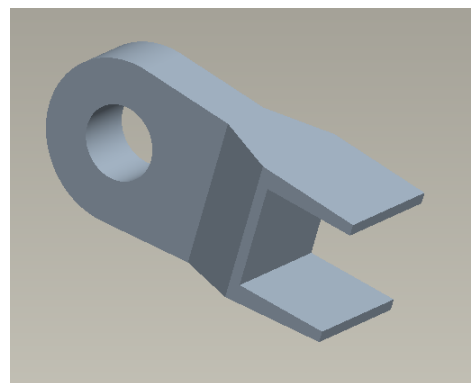
7. Soluzione 2



La soluzione denominata “Soluzione 2” è la prima tra quelle generate ad esser stata analizzata completamente. La concezione di base parte dall’idea di voler cambiare concettualmente il progetto esistente, infatti si può notare che non è più il tubo ad esser tagliato per esser saldato sulla lamiera piena ma il tubo è intero ed i terminali tagliati opportunamente.



Tubo con in rilievo il cianfrino (rosso)



Terminale nuova concezione

Le dimensioni del pezzo sono le medesime di quello esistente

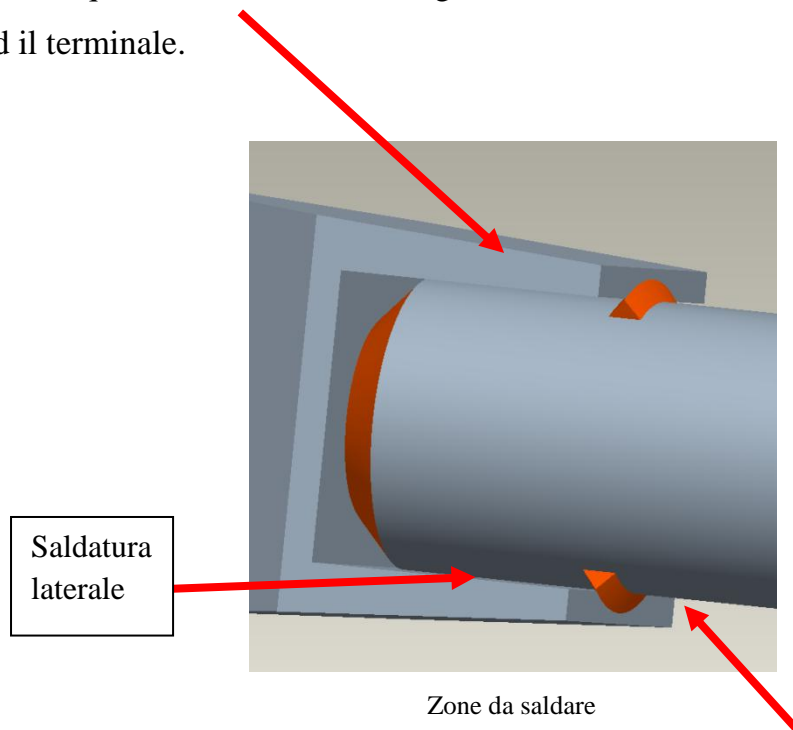
Diametro	Spessore	Lunghezza	Peso
139.7 mm	20 mm	2220 mm	59 Kg/m

Poiché la geometria base del pezzo è la medesima si possono saltare le verifiche a buckling e passare direttamente alla progettazione ed alla verifica dei cordoni di saldatura.

7.1 Progettazione e verifica dei cordoni di saldatura

Essendo una soluzione completamente innovativa lo studio della disposizione e del tipo di cordoni da dimensionare è fondamentale poiché da ciò dipende la tenuta del pezzo.

La soluzione ideata prevede un cianfrino agli estremi del tubo spessore 20 mm ed angolo 45°, quindi si vuole avere un giunto di testa dove vi è contatto tra la fine del tubo ed il terminale.



Una zona a piena penetrazione può essere realizzata dove finisce il terminale mentre possono essere realizzati dei cordoni extra, di sicurezza, sulle pareti laterali e sfruttando come cianfrino naturale la geometria stessa del terminale.

Si possono quindi ora individuare le sezioni resistenti:

- Saldatura di testa tubo-terminale prendiamo come area la corona circolare del tubo.

$$A1 = \frac{\pi}{4} * (De^2 - Di^2) = \frac{\pi}{4} * (139.7^2 - 99.7^2) = 7520.9 \text{ mm}^2$$

- Per l'altra saldatura a piena penetrazione (2 lati) e tenendo conto della presenza dei cordoni di saldatura laterali si è stimata un'area data dallo spessore della penetrazione (20 mm) per uno sviluppo di 75 mm.

$$A2 = 20 * 75 * 2 = 3000 \text{ mm}^2$$

L'area resistente totale che viene stimata è quindi pari a 10521 mm^2 . Anche in questo caso in fase di verifica si ha che la σ ideale si riduce alla sola componente normale,

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp} + \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp} \sigma_{\parallel} + 3\tau^2} \leq 0.85 * \sigma_{amm}, \text{ quindi}$$

$$\sigma_{id} = \sigma_{\perp} = \frac{F}{A} = \frac{700000}{10521} = 66.53 \text{ MPa}$$

Si verifica che $66.53 \leq 204 = (0.85 * \sigma_{amm})$

7.2 Ciclo produttivo ed analisi dei costi

Per ottenere una stima attendibile del costo di realizzazione della soluzione proposta è necessario generare un ciclo produttivo il più fedele possibile a quello reale.

In primo luogo bisogna individuare il materiale grezzo di partenza, che in questo caso consiste in:

Tubo (DIN 1629.3)	Ø 139,7 ≠ 20	59 Kg/m	1.60 €/Kg
Lamiera	480*220 ≠ 160	130 Kg	1.51 €/Kg

Il tubo è lungo 2220 mm per un peso totale di 131 Kg mentre i terminali tagliati pesano complessivamente 264 Kg. Il costo dei materiali grezzi risulta essere:

Tubo: $131 \text{ Kg} * 1.60 \text{ €/Kg} = 209.6 \text{ €}$

Terminali: $260 \text{ Kg} * 1.50 \text{ €/kg} = 416.0 \text{ €}$

Il costo totale di 625.60 € per il solo materiale grezzo risulta essere molto maggiore rispetto al codice esistente poiché si parte da una lamiera di spessore 160 mm e non più 80 mm.

Le lavorazioni, molto simili al caso precedente, possono essere così descritte:

- La preparazione del materiale consiste nel taglio a misura richiesta del tubo (2220 mm) che commercialmente viene acquistato in verghe di lunghezza minima 6 metri. Quest'operazione avviene sulla postazione di una troncatrice ma bisogna tenere conto anche dei tempi di carico e scarico della verga e poi della successiva movimentazione del tubo tagliato.

Fase	Macchina o reparto	Quantità	T preparazione (min)	T lavorazione (min)
Preparazione macchina	Troncatrice		10	
Carico barra	Troncatrice	1	10	
Taglio	Troncatrice	2		15
Scarico barra	Troncatrice	1	8	

- Ottenuto il tubo delle misure idonee si passa sulla smussatrice per ottenere il cianfrino richiesto. La macchina viene quindi preparata, il pezzo messo in posizione e lavorato opportunamente.

Fase	Macchina o reparto	T preparazione (min)	T lavorazione (min)
Preparazione macchina	Smussatrice	10	
Esecuzione lavorazione	Smussatrice		30

- A questo punto il pezzo è pronto per essere assemblato. Come visto per applicazioni del genere è consigliabile produrre una maschera di carpenteria per facilitare, velocizzare e realizzare opportunamente queste operazioni

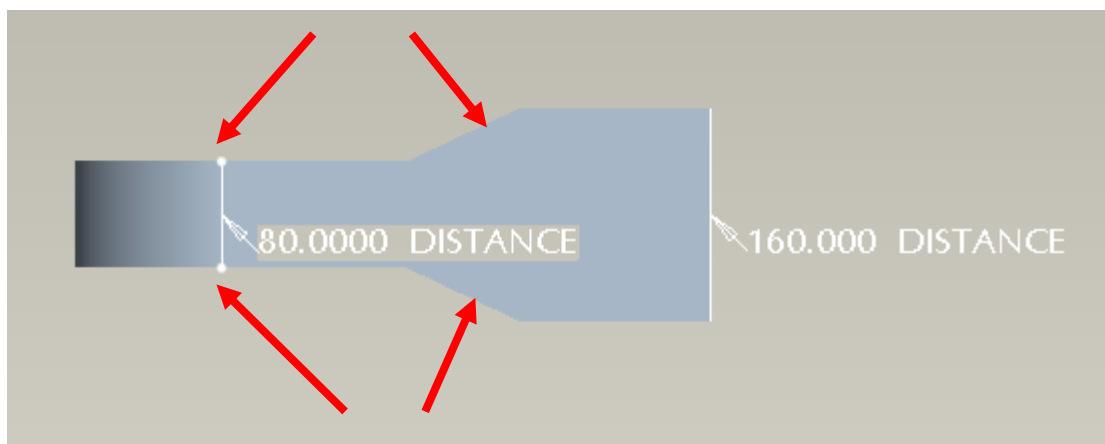
Fase	Macchina o reparto	T preparazione (min)	T assemblaggio (min)
Preparazione materiale	Carpenteria	10	
Maschera	Carpenteria	15	
Assemblaggio	Carpenteria		30
Movimentazione	Carpenteria	10	

La voce maschera comprende i tempi di trasporto, montaggio e smontaggio della maschera stessa in reparto ogni volta che si inizia a produrre un lotto.

- A questo punto il pezzo è pronto ed in posizione ideale per esser saldato. Per stimare opportunamente i tempi impiegati per la saldatura e quindi del costo per queste operazioni si può fare riferimento a tabelle che riportano il tipo di cordone da realizzare e il tempo impiegato al metro.

Tipo cordone	Lunghezza	Tempo (min/m)	Tempo saldatura (min)
½ V 20	880	66.4	58.4
Z 20	240	45.2	10.8

- Ultimate le operazioni di saldatura si eseguono le lavorazioni a macchina utensile, nel caso un' alesatrice, con spianatura delle superfici mediante fresa e realizzazione dei fori tramite l'utilizzo di baren. In questo caso la spianatura delle superfici è molto dispendiosa poiché bisogna riportare in molte zone lo spessore della lamiera ad 80 mm partendo da uno spessore di 160 mm.



Per queste operazioni si è scelto di utilizzare una fresa ad 8 taglienti $\varnothing 125$ che garantisce un'asportazione di materiale di circa 6 mm a passata se si considera di impiegare l' 80 % del diametro utile della fresa. Scendendo nei particolari bisogna asportare 13400 mm^2 di materiale ovvero un'area planare di $250 * 40$ più un'area inclinata $85 * 40$ per ogni lato del terminale. In queste condizioni la fresa impiega 25 secondi a compiere una singola passata mediante la quale asporta 600 mm^2 di materiale e quindi si possono stimare 23 passate per asportare il materiale sulla singola faccia.

$$\frac{13400}{600} = 22.3 \text{ ovvero } 23 \text{ passate; } 23 * 25 = 575 \text{ secondi per realizzare una faccia}$$

4*25 = 2300 secondi per ultimare le operazioni sui due terminali

$\frac{2300}{60} = 38.33$ minuti che corrispondono a circa 0.67 ore di lavorazione che per un costo

orario macchina di $60 \frac{\text{€}}{\text{h}}$ comporta un esborso di 40.20 €.

Tabella riepilogativa costi

Reparto	Centro lavoro	T prep (min)	T lav (min)	€ / ora	€
Prep. materiale	Troncatrice	28	15	35	27.59
Macc utensile	Smussatrice	10	30	32	23.47
Carpenteria	Assemblaggio	35	30	32	38.13
	Saldatura		138	34	79.6
Lav macchina utensile	Alesatrice	84	96	60	112.20
				Tot	281

N.B. I tempi sono maggiorati del 10%, fattore cautelativo, nel calcolo dei costi.

Il costo totale, non tenendo conto della verniciatura e dei costi di trasporto, risulta essere pari a

$625.60 + 281 = 906.60 \text{ €}$

7.3 Pesì

Per quanto riguarda il peso, sempre grazie l'utilizzo dell'applicazione del programma CAD, si ottiene 237 Kg.

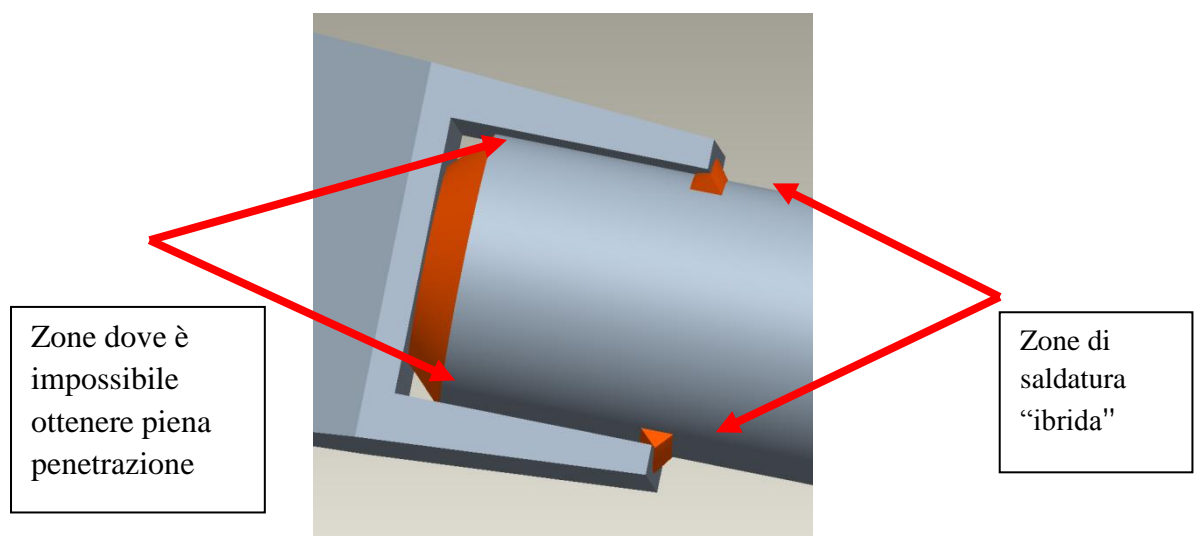
Componente	Peso unitario(Kg)	Quantità	Peso totale (Kg)
Tubo	129.8	1	129.8
Terminali	51.1	2	102.2
Rondelle	1.38	4	5.52
		Tot	237.52

Sia la voce costi sia la voce peso risultano essere peggiorative rispetto al codice esistente fanno intuire che questa soluzione non potrà essere quella migliorativa però verrà completamente analizzata perché comunque come visto introduce novità interessanti.

7.4 Fattibilità pratica

In realtà questa disposizione delle saldature e quindi la valutazione delle sezioni resistenti non è delle più felici, ma nonostante tutto l'unica possibile seguendo la geometria, poiché in fase di realizzazione si possono incontrare i seguenti problemi:

- La saldatura di testa più importante in realtà non è possibile realizzarla su tutta la corona circolare poiché il saldatore non è in grado di riuscire a fondere completamente il materiale nei pressi delle zone di tangenza.
- Viene richiesta una saldatura di testa importante e quindi forte è il rischio di cuocere il materiale dove gli spessori si fanno meno importanti.
- I restanti cordoni richiedono un cianfrino elaborato e costoso che però non viene sfruttato al massimo poiché la saldatura che nella realtà l'operatore riesce a realizzare è un "ibrido" tra piena penetrazione e saldatura ad angolo.

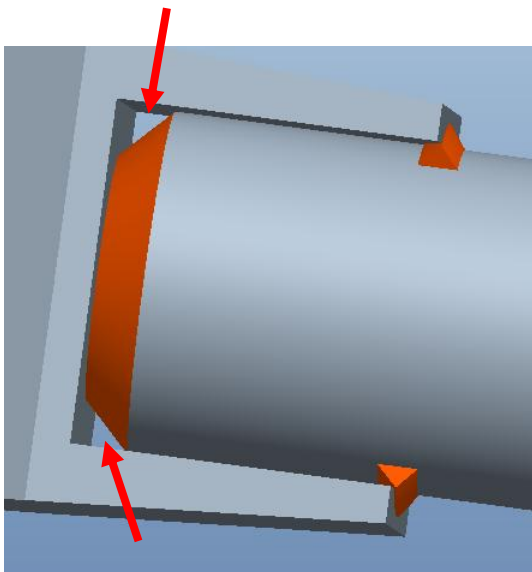


Queste valutazioni sono dei campanelli d'allarme sul fatto che questo tipo di soluzione possa essere quella ideale, però essendo la prima stabilisce già punti su cui basare poi le idee successive e mette ulteriormente in luce strade da abbandonare.

7.5 Ispezionabilità

La geometria proposta non è sicuramente favorevole all'operatore che si accinge a fare controlli non distruttivi sulle saldature.

Per quanto riguarda controlli visivi e tramite magnetoscopio, ovvero controlli quasi esclusivamente superficiali, non si riscontrano grosse difficoltà mentre per avere un controllo accurato in profondità, utilizzando apparecchiatura ad ultrasuoni, s'incontrano numerose difficoltà.



Nelle zone indicate è difficile se non impossibile controllare la profondità di saldatura poiché:

- Zona difficile da saldare
- Lo spazio a disposizione per l'ingombro e per i movimenti della sonda dell'apparecchiatura per cercare difettologie è estremamente limitato

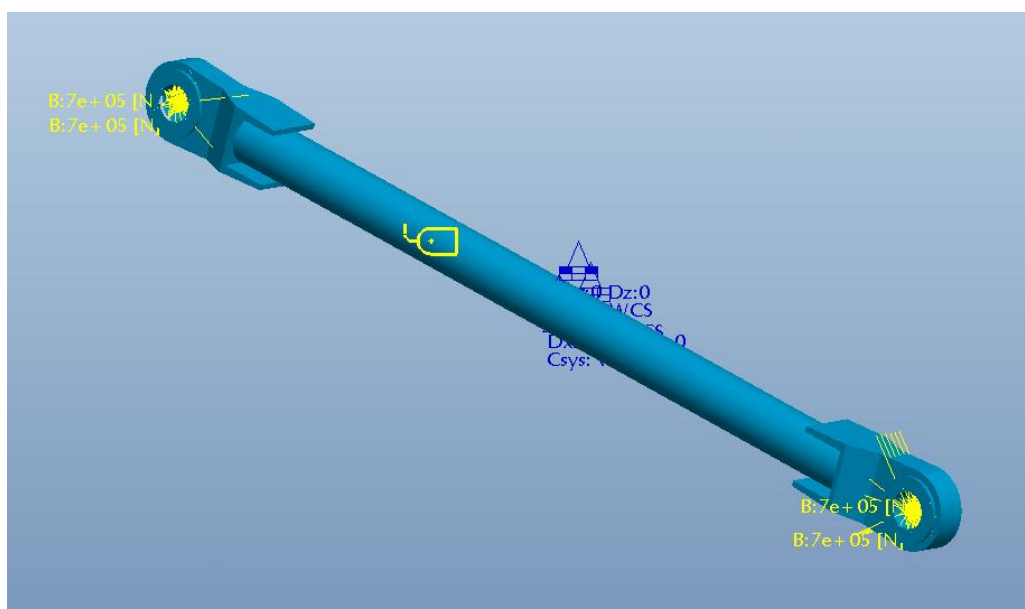
7.6 Fattore estetico

Dal punto di vista delle scelte per la realizzazione del pezzo non si hanno grandi differenze rispetto al codice esistente, infatti, ci troviamo di fronte a terminali ottenuti da lamiera tagliata e le saldature sono distribuite su più punti del pezzo. La differenza principale è che il tubo non è più tagliato ma è il terminale a subire ulteriori operazioni

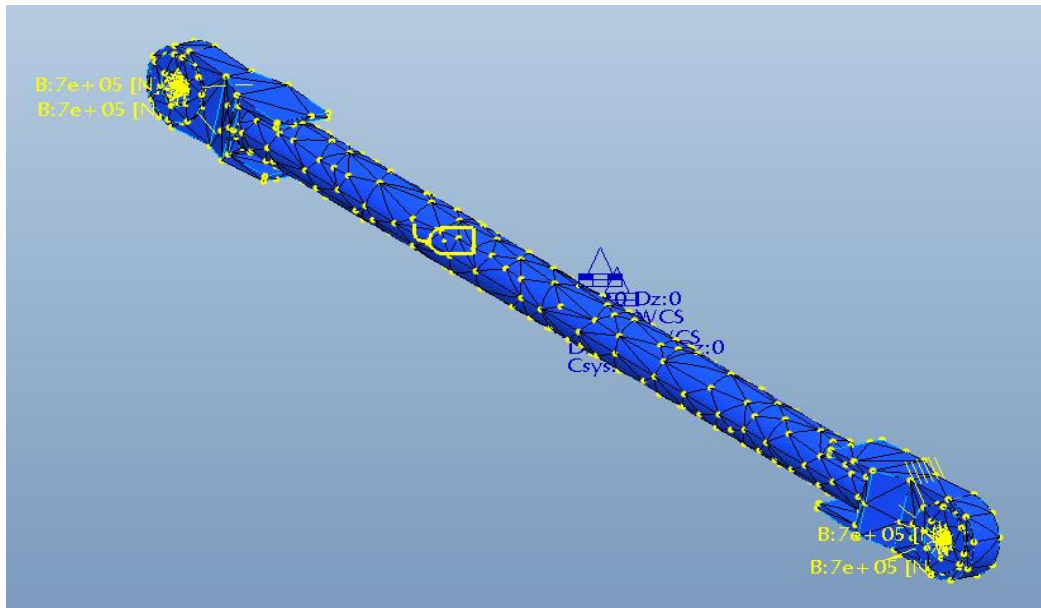
di taglio per consentire l'alloggiamento del tubo ma la sostanza della geometria non cambia.

Come detto la Proprietà punta molta sul fattore estetico e poiché siamo partiti da un pezzo che sicuramente non ritrova in questa voce le sue caratteristiche migliori si può concludere dicendo che questa soluzione non può ricercare su questo fattore punti a suo favore.

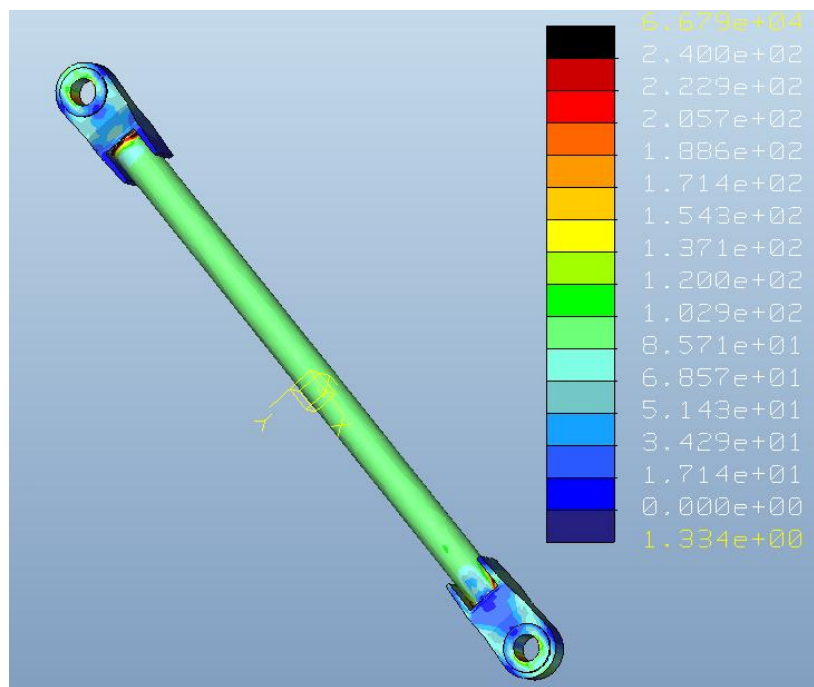
7.7 Analsisi FEM



Carichi e vincoli

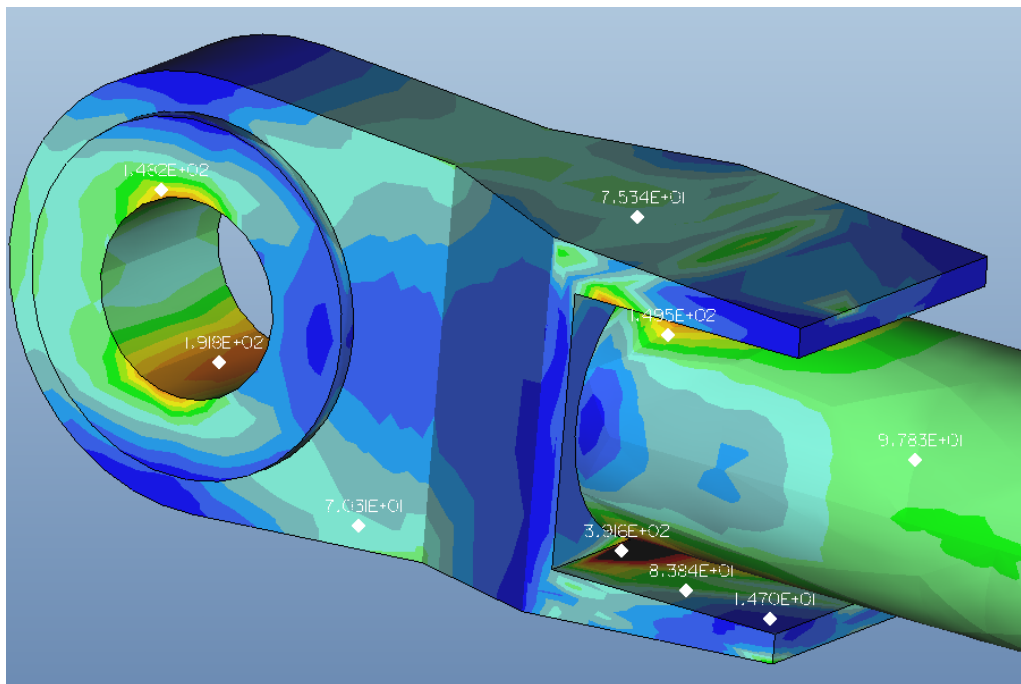
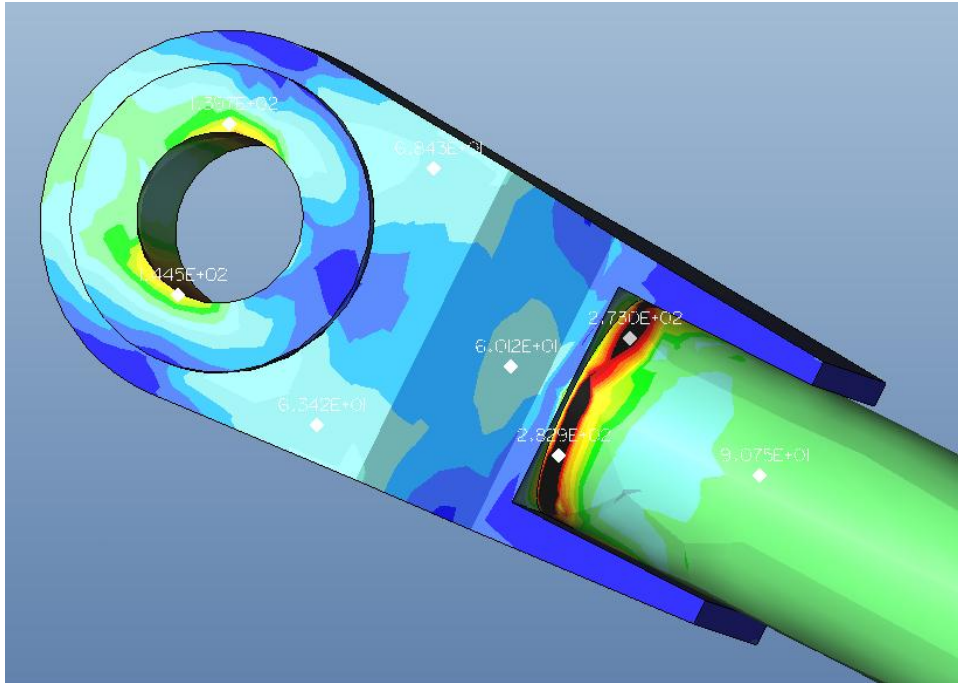


Mesh



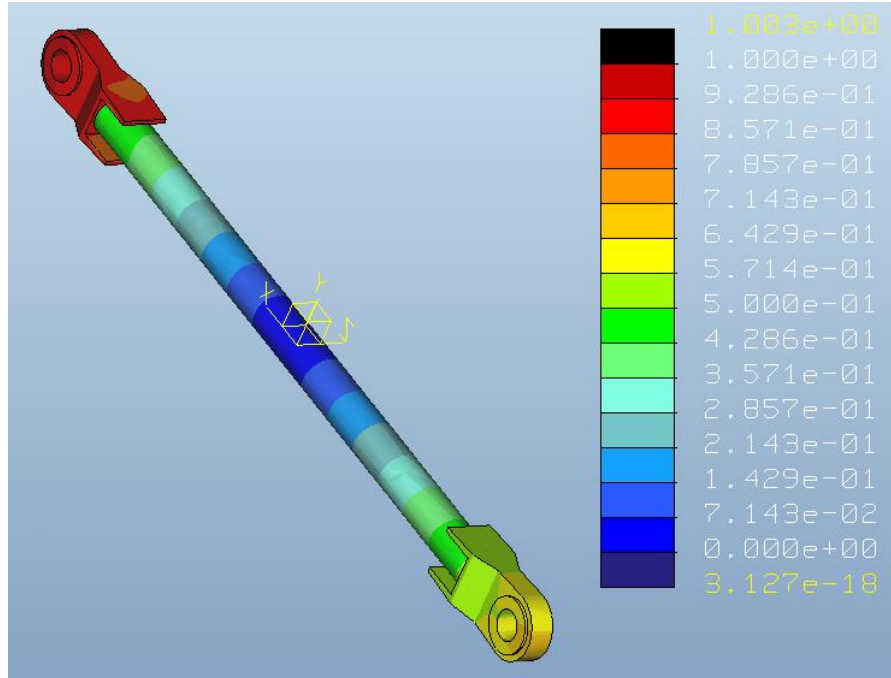
Tensioni

Per quanto riguarda le tensioni si può notare che sono presenti zone in cui c'è una forte concentrazione degli sforzi.



Nelle due immagini precedenti si possono notare zoom sulle zone più critiche. Queste zone sono nei pressi della saldatura di testa e questo è un campanello d'allarme che ci fa capire quanto sia critica la zona in cui deve esser eseguita la saldatura. Le zone

critiche sono abbastanza estese in superficie ma non in profondità però le tensioni raggiunte risultano importanti.

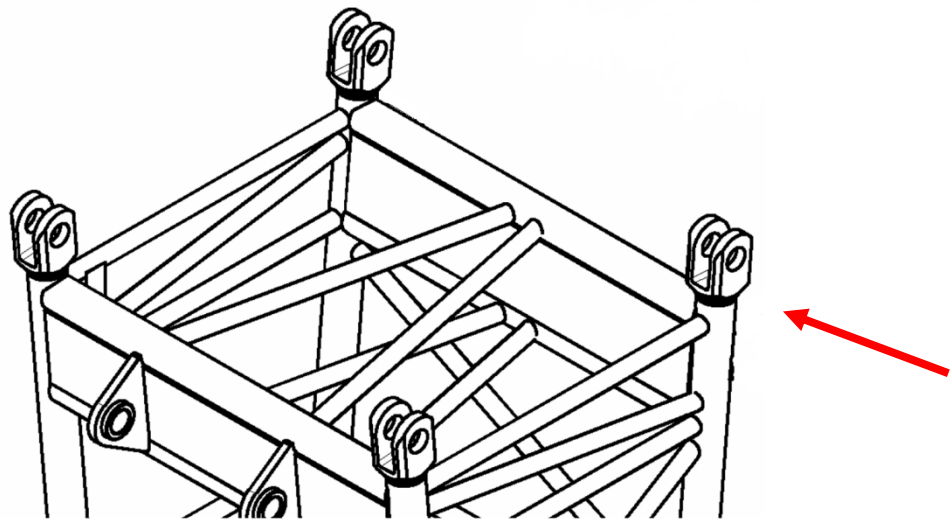


Per quanto riguarda l'allungamento viene riscontrato un ΔL totale pari a 2,01 mm, un po' superiore a quello predente ma comunque tollerabile nel contesto macchina.

8. Soluzione 3

L'idea, già introdotta nella Soluzione 2, su cui sono basati tutti gli studi è quella di non voler tagliare il tubo e non ottenere cordoni di saldatura complessi sotto tutti i punti di vista, progettuali e soprattutto realizzativi.

L'intuizione per lo sviluppo iniziale di quest' ulteriore alternativa, che porterà alla Soluzione 3, è data dall'analisi dei tralicci delle gru dove tubi e relativi terminali sono saldati di testa.



Giunti di testa nei tralicci delle gru

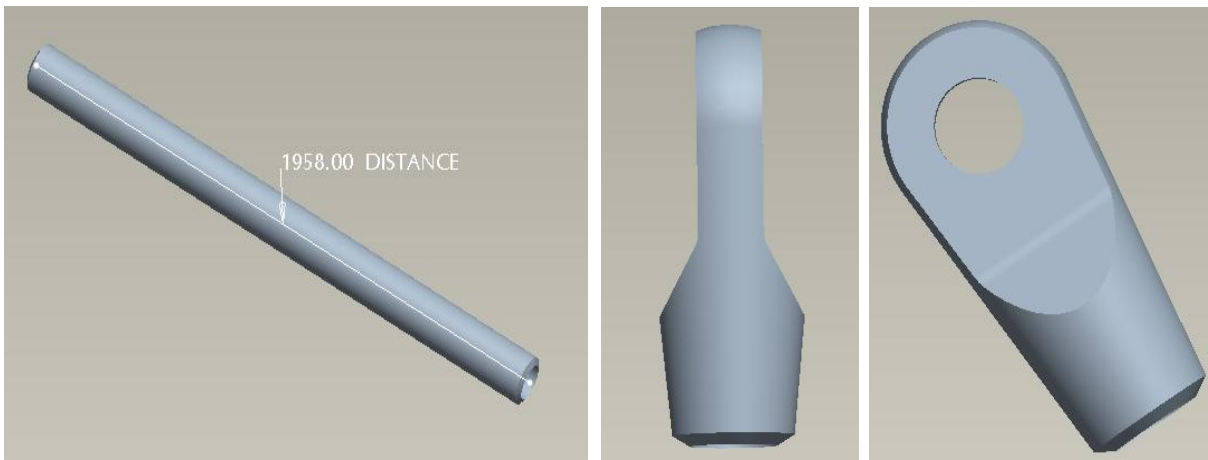
Questo tipo di giunto è un giunto di testa con saldatura a piena penetrazione che per esser realizzata richiede un cianfrino di qualità. Il fatto di avere un giunto di testa tra sezioni circolari rende ancora migliore la configurazione sotto il punto di vista tensionale poiché vengono eliminati tutti quei fastidiosi intagli e cambi secchi di sezione che non fanno altro che diventare punti d'ineschi di cricche di frattura. Le tensioni in questa configurazione passano in maniera più graduale tra terminale e tubo facendo diminuire il rischio di concentrazione di tensioni che potrebbero causare rotture che nel nostro caso, trattandosi di macchine di grande portata, potrebbero risultare catastrofiche.

Per questi motivi questo tipo di giunto ha catturato la nostra attenzione e si è iniziato a studiare se questa soluzione potesse fare al caso nostro, ovvero esser adattata alla nostra geometria.

Per passare ad una soluzione di questo tipo per prima cosa si è pensato di mantenere inalterate le misure dei terminali e poiché si vuole ottenere un giunto di testa è immediato capire che il tubo di partenza dovrà necessariamente essere più corto per mantenere un interasse di 2700 mm.

Poiché gli intagli presenti sul tubo nelle precedenti versioni erano di una lunghezza pari a 131 mm si ottiene così che il tubo dovrà esser lungo: $2220 - (2*131) = 1958$ mm

Sui terminali, che sono a sezione rettangolare poiché ottenuti tramite taglio di lamiera, è sorto il problema di come ottenere una sezione circolare dove deve essere realizzato il giunto. Il problema principale, come poi verrà ampiamente messo in luce, non riguarda la geometria in sé ma riguarda la realizzazione dal punto di vista tecnologico.



Tubo

Due viste della nuova geometria del terminale

Poiché come prima cosa abbiamo visto che il tubo risulta esser più corto, per stabilire il diametro esterno del tubo si è pensato di tirare in ballo il peso.

Il tubo lungo 2220 mm intagliato pesa 123.5 Kg quindi poiché è nota la densità dell'acciaio è immediato trovare la sezione massima per non superare tale peso:

$$m = \rho * V = \rho * (A*L) \text{ ovvero } A_{\max} = \frac{m}{\rho*L} = \frac{123.5}{7850*1.958} = 8035 \text{ mm}^2$$

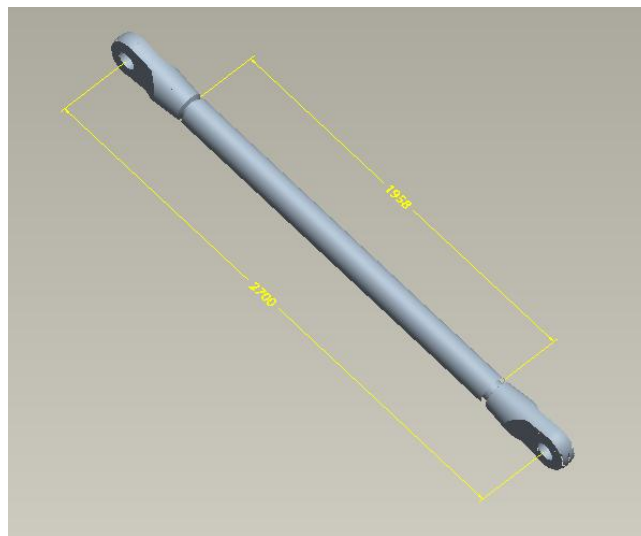
Mantenendo lo spessore del tubo pari a 20 mm, ovvero si è ipotizzato che una saldatura a piena penetrazione di questa entità possa tenere, si può trovare il diametro esterno massimo del tubo.

$$A_{\max} = \pi * (R^2 - (R - 20)^2) \text{ da cui } R_{\max} = 73.9 \text{ mm e quindi } D_{e \max} = 147.8 \text{ mm}$$

Poiché i tubi sono componenti commerciali che seguono la norma DIN 1629.3 basta entrare in tabella e scegliere il tubo più piccolo più vicino a 147.8 mm, che corrisponde a $D = 146 \text{ mm}$.

Diametro	Spessore	Lunghezza	Peso
146 mm	20 mm	1958 mm	62.1 Kg/m

Dopo aver impostato la geometria di base si è potuto iniziare a verificare la nuova soluzione.



8.1 Verifica a carico di punta secondo UNI EN 10011

Imponiamo anche in questo caso la lunghezza dell'asta pari all'interasse tra i fori quindi sempre pari a 2700 mm, la lunghezza critica d'inflessione $L_c = L * \beta$, dove β è sempre pari a 1.

A	7916.8 mm ²
I	16106757 mm ⁴
i	45.1
λ	59.9

Dove si ricorda che:

$$A = \frac{\pi(De^2 - Di^2)}{4} ; I = \frac{\pi(De^4 - Di^4)}{64} ; i = \sqrt{\frac{I}{A}} ; \lambda = \frac{Lc}{i}$$

A questo punto si calcola la quantità $\lambda_c = \pi * \sqrt{\frac{E}{\sigma_s}} = \pi * \sqrt{\frac{210000}{355}} = 76.41$

Adesso si può ricavare il rapporto $\frac{\lambda}{\lambda_c} = \frac{59.9}{76.41} = 0.784$

Ottenuto il valore di questo rapporto, entrando nell'opportuna tabella ed in corrispondenza della "curva a" siamo in grado di individuare il rapporto $\frac{\sigma}{\sigma_c}$. Il valore del rapporto risulta essere 0.796 ed applicando la formula inversa, in cui l'unica incognita è la tensione critica otteniamo che σ_c vale 282.6 MPa .

Ottenuto il valore della tensione critica siamo in grado, note le condizioni di carico ovvero del coefficiente di sicurezza ν pari a 1.5, di fare la prima verifica secondo normativa:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} \geq \nu \text{ quindi } \sigma_c \geq \nu * \sigma \text{ ottenendo } 282.6 \geq 1.5 * \frac{700000}{7916.8} \text{ ovvero } 282.6 \geq 132.6$$

Verificata questa disuguaglianza si può proseguire con il secondo ed ultimo passo richiesto entrando nella seconda tabella presente nella normativa, sempre nella casistica "a", con il valore di λ noto.

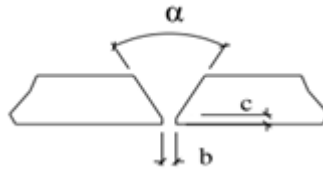
Si ottiene il valore "ω" presente nella disequazione da verificare $\frac{\omega * F}{A} \leq \sigma_{amm}$.

$$\frac{1.25 * 700000}{7916.8} \leq 240 \text{ che viene verificata in quanto } 110.5 \leq 240$$

Questo procedimento porta alla verifica al buckling della nostra ipotetica asta, si può notare che rispetto al caso iniziale si ottengono risultati ancora più cautelativi e ciò era facile aspettarselo poiché L_c è invariata, secondo le ipotesi introdotte, mentre il tubo ha un diametro più grande ovvero si ha un'asta meno snella.

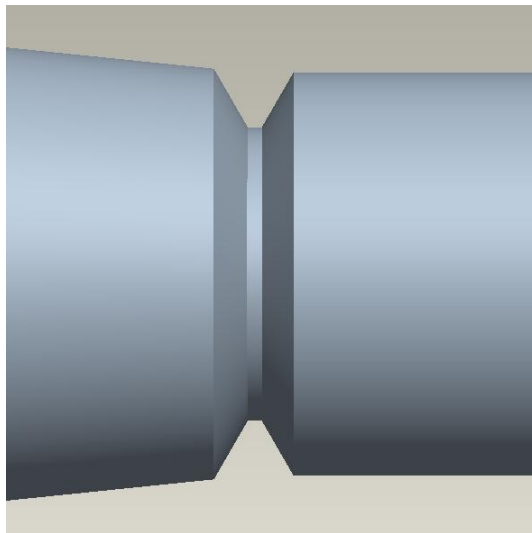
8.2 Progettazione e verifica dei cordoni di saldatura

Per la progettazione di questo tipo di giunto si è fatto riferimento alla specifica interna Soilmec



che si ricorda impone per giunti a “V” a piena penetrazione una luce “b” non inferiore a 2 mm ed un angolo di cianfrino α non inferiore a 60° .

Nello specifico si ha un V da 20 mm con angolo di cianfrino di 60° ed una luce tra i lembi di 5 mm. Si può notare nella figura seguente che non vi è realmente luce tra i lembi ma vi è un “bicchiere” di sostegno per il bagno di saldatura. Questo accorgimento è necessario per evitare che il bagno di saldatura coli e comunque crea un appoggio fondamentale al saldatore oltre che ad aiutare il centraggio tra i pezzi. L'utilizzo del “bicchiere” vedremo poi verrà trattato più nel dettaglio, lasciando spazio ad altre soluzioni.



Cianfrino giunto di testa in primo piano

La sezione resistente in questo caso è la corona circolare del tubo ovvero

$$A = \frac{\pi(De^2 - Di^2)}{4} = \frac{\pi(146^2 - 106^2)}{4} = 7916.8 \text{ mm}^2.$$

Trattandosi di un giunto di testa a piena penetrazione e considerando sempre giunti di II classe dovremo ancora una volta verificare che:

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp} + \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp} \sigma_{\parallel} + 3\tau^2} \leq 0.85 * \sigma_{amm}$$

dove la σ ideale si riduce alla sola σ_{\perp} che vale $\frac{700000}{7916.8} = 88.4 \text{ MPa}$.

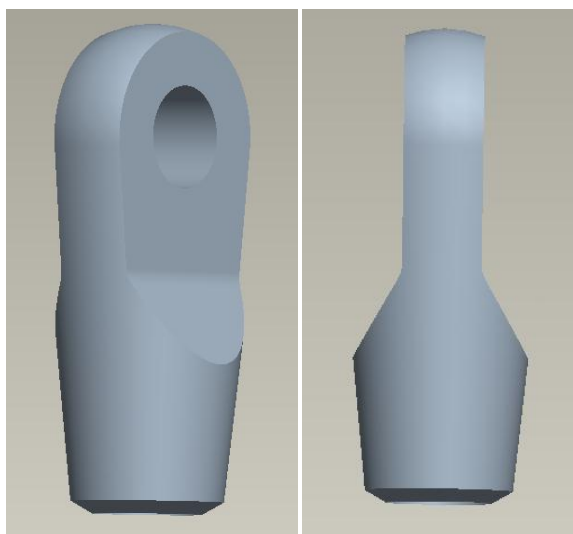
$$88.4 \leq 0.85 * 240 \text{ ovvero che } 88.4 \leq 204$$

La verifica di tenuta del giunto di testa ha dato esito positivo ma con lo studio del ciclo produttivo ed i costi saremo in grado di valutare in maniera più accurata questa soluzione che sembra avere introdotto già molti aspetti positivi.

8.3 Ciclo produttivo ed analisi di costo

Fino a questo punto della trattazione si può dire che abbiamo trovato solo punti a favore di questa soluzione ma appena ci si concentra sul ciclo produttivo vediamo che iniziano i problemi.

La nuova concezione di terminale è sicuramente esteticamente più bella ed ingegneristicamente migliore sotto il punto di vista della trasmissione delle tensioni ma questo tipo di terminale non è ottenibile partendo da una lamiera. Non è possibile partire da una lamiera a causa della geometria tondeggianti e conica che richiederebbero troppe ore di lavorazione su macchine automatiche che hanno un costo orario molto elevato e quindi farebbero schizzare in alto il costo.



In evidenza le parti “coniche” ed arrotondate del terminale

Poiché si è deciso di portare avanti questa idea non ci si è fermati di fronte a questo ostacolo ma si è iniziato a vedere come poter produrre questa geometria utilizzando altre tecnologie.

L’attenzione si è focalizzata sin da subito sulla fusione infatti si è pensato che con uno stampo relativamente semplice si sarebbe potuto ottenere la geometria desiderata. A questo punto sono stati presi contatti con un’azienda del settore e preso atto che la geometria effettivamente è facilmente realizzabile abbiamo atteso un preventivo.

Stampo	Fusione	Lotto
2000 €	4.50 €/Kg	20 – 25 pz

- Per quanto riguarda il costo delle sole materie prime si ottiene

Materiale	Quantità	Peso	Peso grezzo tot	€/Kg	Costo tot con sfrido
Tubo Ø 146 ≠ 20	1	121.6	121.6	1.60	194.56 €
Fusione	2	60.4	120.8	4.50	543.60 €

Non si è tenuto conto in prima battuta dell'ammortamento dello stampo, poiché quest'ulteriore studio verrà fatto solo nel caso che la soluzione venga presa in considerazione come quella finale da adottare. Il costo totale dei materiali grezzi ammonta a 738.16 €

- Preparazione materiale, ovvero taglio del tubo a misura 1958 mm

Fase	Macchina o reparto	Quantità	T preparazione (min)	T lavorazione (min)
Preparazione macchina	Troncatrice		10	
Carico barra	Troncatrice	1	10	
Taglio	Troncatrice	2		15
Scarico barra	Troncatrice	1	8	

- Preparazione lavorazioni a macchina utensile

Fase	Macchina o reparto	T preparazione (min)	T lavorazione (min)
Preparazione macchina	Smussatrice	10	
Esecuzione lavorazione	Smussatrice		25

- Carpenteria

Fase	Macchina o reparto	T preparazione (min)	T assemblaggio (min)
Preparazione materiale	Carpenteria	10	
Maschera	Carpenteria	15	
Assemblaggio	Carpenteria		40
Movimentazione	Carpenteria	10	

- Saldatura

Tipo cordone	Lunghezza	Tempo (min/m)	Tempo saldatura (min)
V 20	917*	80	73.4

* $= 2 * (2 * \pi * r)$ ovvero circonferenza massima del tubo

A cui bisogna aggiungere le seguenti operazioni

Fase	Tempo (min)
Preparazione attrezzatura	30
Movimentazione	15
Pulizia del pezzo	10

- Lavorazioni a macchina utensile

Nel preventivo la fonderia non prevede la realizzazione dei fori, poiché di dimensioni importanti e richiedenti ottime finiture, quindi dobbiamo mettere il

pezzo su alesatrice automatica per la realizzazione dei fori ed una leggera spianatura delle superfici.

Tabella riepilogativa dei costi

Reparto	Centro lavoro	T prep (min)	T lav (min)	€ / ora	€
Prep. materiale	Troncatrice	28	15	35	27.59
Pre lavorazione	Smussatrice	10	25	32	20.53
Carpenteria	Assiemaggio	35	40	32	44
	Saldatura	55	73.4	34	80.01
Lav macchina utensile	Alesatrice	10	62	60	72
Tot					244.13

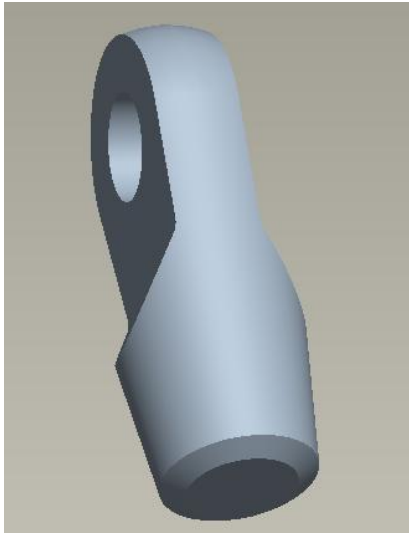
N.B. I tempi sono maggiorati del 10%, fattore cautelativo, nel calcolo dei costi.

Il costo totale per la realizzazione dell'intero pezzo risulta essere 982.29 €.

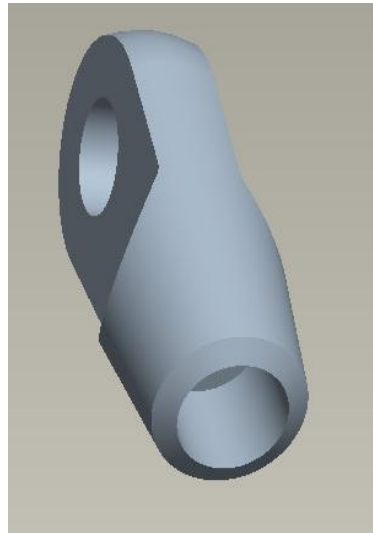
Il costo ottenuto risulta esser troppo elevato e la voce causa di quest'aumento è individuabile nel prezzo al Kg della fusione infatti solo questa voce richiede un esborso di 543.60 € mentre si ricorda che l'intero ciclo del codice esistente richiede un costo di 750 €.

Dando un'occhiata anche ai pesi si ottiene che il peso del pezzo è aumentato infatti si ottiene 252.8 Kg ovvero 18.4 Kg in più della soluzione esistente.

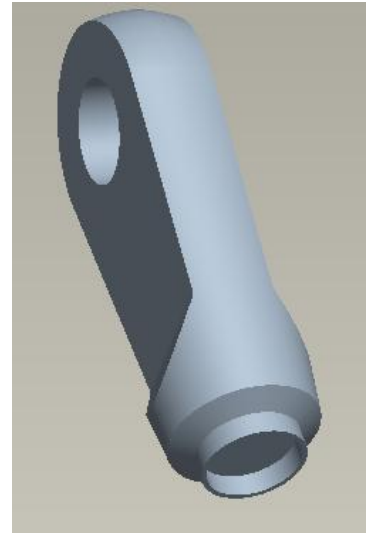
A questo punto si è cercato di alleggerire i terminali giungendo a queste soluzioni:



60.4 Kg



52.8 Kg

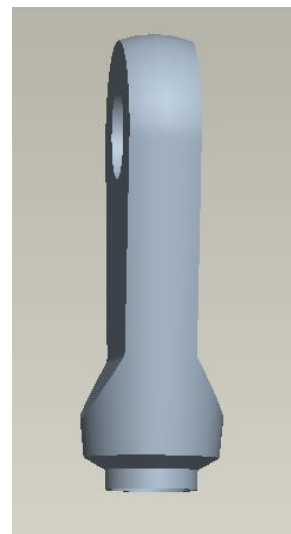
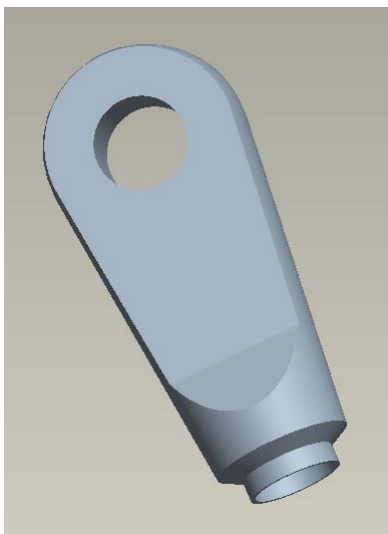


52.7 Kg

La soluzione centrale prevede ancora l'utilizzo del bicchiere per il sostegno del bagno di saldatura mentre la soluzione di destra oltre ad essere la più leggera ha il vantaggio di non richiedere più il bicchiere ma predispone già da fusione l'appoggio per la saldatura.

Bisogna tenere conto che la fusione presenta inevitabili impurezze che si dispongono purtroppo in maniera casuale sul pezzo quindi si può dire che la soluzione centrale, che prevede un alleggerimento grazie ad un foro che assottiglia di molto i bordi, potrebbe risultare abbastanza critica se le impurezze si dovessero concentrare proprio su queste pareti.

La soluzione di destra innanzitutto non richiede un'anima dispendiosa come nel caso precedente per creare la cavità ed inoltre avendo la predisposizione per il sostegno del bagno di saldatura si evita di dover assemblare 2 pezzi (bicchieri).



Con questa soluzione, che possiamo definire alleggerita, si riescono a guadagnare 7.7 Kg a terminale ovvero 15.4 Kg in totale e questo risparmio in peso comporta una riduzione del costo di 69.3 € per quanto riguarda il materiale base. Tuttavia questo risparmio riduce i costi fino a circa 910 € e questo valore essendo di 160 € superiore a quello attualmente pagato è ancora evidentemente troppo elevato.

Si può concludere che il costo della fusione a 4.50 € al Kg nel nostro caso non è giustificabile, rispetto a 1.50 €/Kg della lamiera, poiché con la fusione non risparmiamo praticamente niente in termini di lavorazioni meccaniche, infatti siamo sempre costretti a dover utilizzare macchine come l'alesatrice automatica. Di norma la fusione risulta essere molto conveniente quando si vogliono realizzare geometrie anche molto complesse e quindi si riesce a risparmiare molto denaro in termini di lavorazioni su macchine aventi un costo orario elevato.

8.3.1 Stampato

Per questa serie di motivazioni la strada della fonderia è stata abbandonata e si è iniziato a ragionare sulla possibilità di realizzare il pezzo per stampaggio a caldo.

Anche in questo caso si sono presi contatti con un'azienda del settore, sono state chieste informazioni sulla fattibilità dell'oggetto e dopo aver ricevuto risposta affermativa è stato richiesto un preventivo.

Il preventivo inviatoci è così organizzato:

Quantità	Descrizione	Prezzo unitario
40	Stampati allo stato normalizzato atti a ricavare il particolare finito secondo disegno “Soluzione 3” in acciaio EN 10025 S 355 J2 G3	122 €
1	Spesa compartecipazione stampo	5 000 €

La voce che ci ha favorevolmente sorpresi è il prezzo del pezzo stampato poiché 122 € per un pezzo che pesa 52.7 Kg vuole dire che l'acciaio stampato ci viene venduto a 2.32 €/Kg per un lotto di 40 pezzi.

Alla pari si può notare che il costo dello stampo in questo caso è molto più oneroso rispetto alla fonderia ovvero si parla di un esborso iniziale di 5 000 € e perciò bisogna creare un piano di ammortamento per poter valutare in maniera obiettiva l'offerta.

8.3.2 Piano ammortamento stampo

Per creare un piano di ammortamento il più fedele possibile è stato necessario fare una previsione della vendita delle macchine che montano il puntello in questione; si ricorda che il codice viene montato su 3 macchine differenti SR 65, SR70 ed SR 80.

Per fare questa previsione ci si è basati sui dati storici di vendita di queste macchine e facendo una previsione cautelativa, visto anche il periodo di crisi globale, si è concluso che assumere 30 come numero totale di macchine vendute all'anno possa essere una buona stima.

Poiché si stima di vendere 30 macchine all'anno vorrà dire che la richiesta di puntelli sarà pari a 60 mentre quella dei terminali sarà di 120 all'anno.

A questo punto bisogna stabilire la durata dello stampo e l'ipotetico fornitore ci ha informati che di norma uno stampo per un'applicazione del genere ha una vita utile di 400 – 500 pezzi.

Ipotizzando una durata dello stampo pari a 480 pezzi si decide di fare un piano di ammortamento a quota costante a 4 anni. Per questo motivo si ottiene che annualmente la quota di ammortamento è pari a 1250 € (5000/4).

Possiamo assumere di richiede al fornitore di stampare due volte l'anno lotti da 60 pezzi e quindi sarebbe come dover spalmare 625 € ogni 6 mesi.

Si ottiene che sul singolo terminale l'ammortamento ammonta a $\frac{625}{60} = 10.42$ €

Di conseguenza su 1 puntello la quota di ammortamento è di 20.84 € e quindi complessivamente su una singola macchina, che monta 2 puntelli, di € 41.68.

Partendo quindi da un esborso abbastanza importante, pari a 5000 €, si può notare che in realtà l'ammortamento dello stampo che incide sul singolo pezzo è assolutamente ragionevole in quanto pari a 20.84 €.

Per quanto riguarda il materiale base si ha così:

Materiale	Quantità	Peso (Kg)	Peso grezzo tot	€/Kg	Costo tot con sfrido
Tubo Ø 146 ≠ 20	1	121.6	121.6	1.60	194.56 €
Stampato	2	52.7	105.4	2.32	244 €
Ammortamento	2				20.48 €
				Tot	459.04

Il ciclo produttivo è esattamente il medesimo del precedente che si è visto comporta una spesa pari a 244.13 €. Si ottiene così che la Soluzione 3 ottenuta tramite stampaggio a caldo richiede una spesa di 703.17 €.

8.4 Peso

Per quanto riguarda i pesi, si ricorda che il valore di riferimento è pari a 235 Kg, si ottiene secondo applicazione CAD per questa soluzione un totale di 232 Kg.

Componente	Peso unitario(Kg)	Quantità	Peso totale (Kg)
Tubo	120.9	1	120.9
Terminali	52.8	2	105.6
Rondelle	1.38	4	5.52
		Tot	232.02

Queste conclusioni sono a favore della Soluzione 3 ottenuta tramite stampaggio a caldo dei terminali che risulta essere più economica e leggermente più leggera di quella esistente.

Si può inoltre aggiungere che rispetto a componenti ottenuti tramite fusione o laminazione, quelli stampati a caldo presentano queste caratteristiche:

- Maggiore resistenza meccanica dovuta alla disposizione delle fibre e alla compattazione del materiale
- Riduzione delle lavorazioni per asportazione di truciolo perché si lascia un sovrametallo minimo sul pezzo grezzo che va poi eliminato tramite lavorazioni meccaniche successive
- Risparmio di materiale perché la bava e il sovrametallo sono di quantità nettamente inferiori rispetto alle materozze che devono essere scartate nel processo di fusione
- Eliminazione dei difetti interni dovuta alla grande compressione che si ottiene mediante lo stampaggio

8.5 Fattibilità pratica

Questa soluzione riesce a combinare esigente tecniche, tecnologiche e realizzative infatti una volta individuata la tecnologia ideale per fabbricare i terminali, per quanto riguarda la realizzazione delle saldature non si riscontrano problemi. Questo tipo di giunto e la geometria tondeggianti dell'intero pezzo fanno sì che in fase di saldatura il

pezzo dopo esser stato fissato possa esser facilmente ruotato e quindi l'operatore messo nelle condizioni ideali per poter effettuare una saldatura a regola d'arte. Il fatto di realizzare i terminali tramite stampaggio limita al massimo le operazioni di macchina utensile successive grazie alla scarsa presenza di sovrametallo.

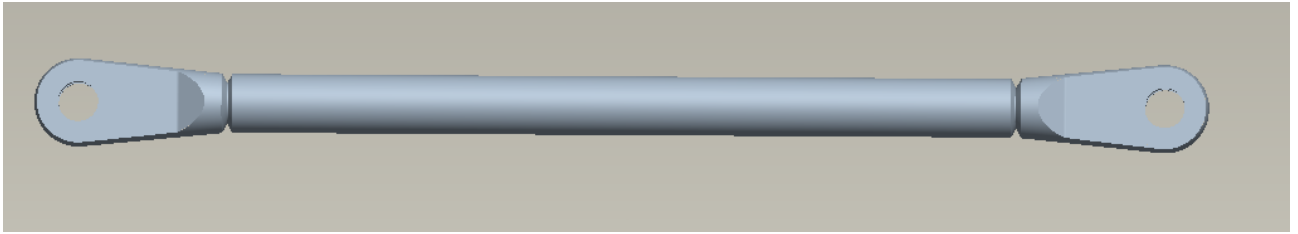
8.6 Ispezionabilità

La scelta di cercare di realizzare un giunto di testa a piena penetrazione trova sicuramente fondamento nella mia esperienza presso il SCQ. L'addetto di fronte ad una soluzione di questo tipo non trova difficoltà a svolgere controlli non distruttivi neanche UT. Si può notare che la presenza del sostegno del bagno di saldatura può tornare utile durante controllo ad ultrasuoni poiché fornisce un riferimento sicuro e abbastanza preciso sulla profondità d'ispezione. Nel caso in esame l'operatore sa che a 20 mm di profondità c'è materiale e non del vuoto quindi ha un riferimento molto più preciso per poter individuare eventuali picchi di segnale (vuoti di materiale) a profondità diverse da quella richiesta.

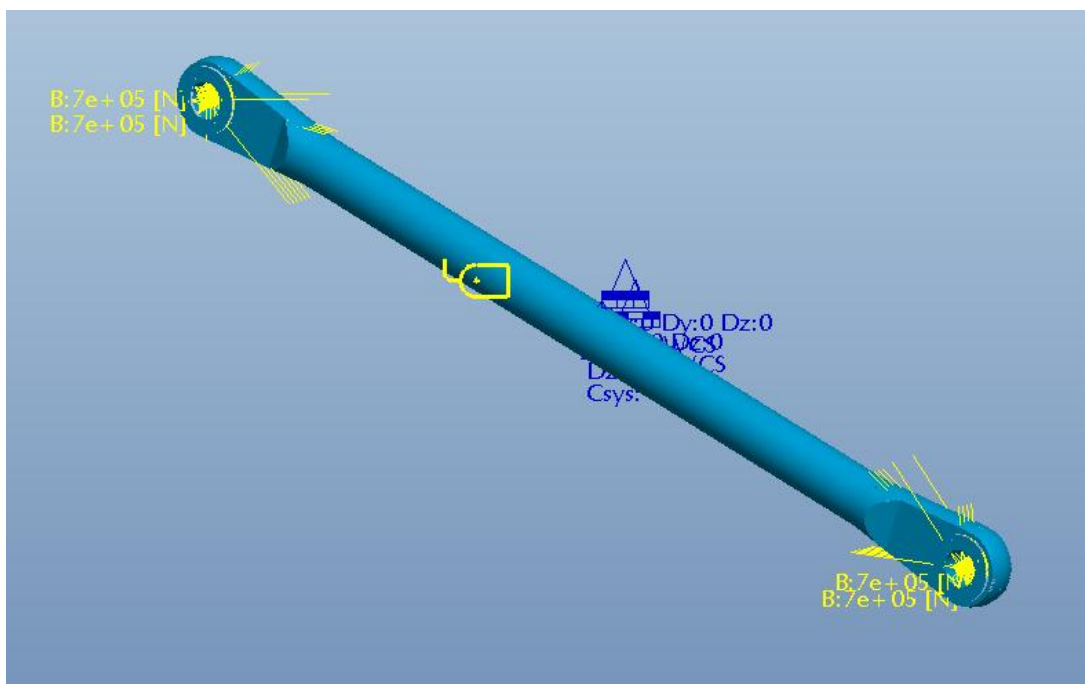
8.7 Fattore estetico

La soluzione si basa su una geometria quasi totalmente tondeggiante e saldature a piena penetrazione che costituiscono giunti di testa che una volta realizzati se molati, sabbiati e verniciati risultano quasi invisibili ad occhio nudo. Questo fa sì che questa soluzione sia più bella da vedere proprio grazie alla maggior armonia geometrica che c'è tra le diverse parti. Anche nello sviluppo dei terminali si è giunti ad una soluzione più leggera e snella che contribuisce a conferire alla struttura snellezza, armonia ma allo stesso tempo solidità.

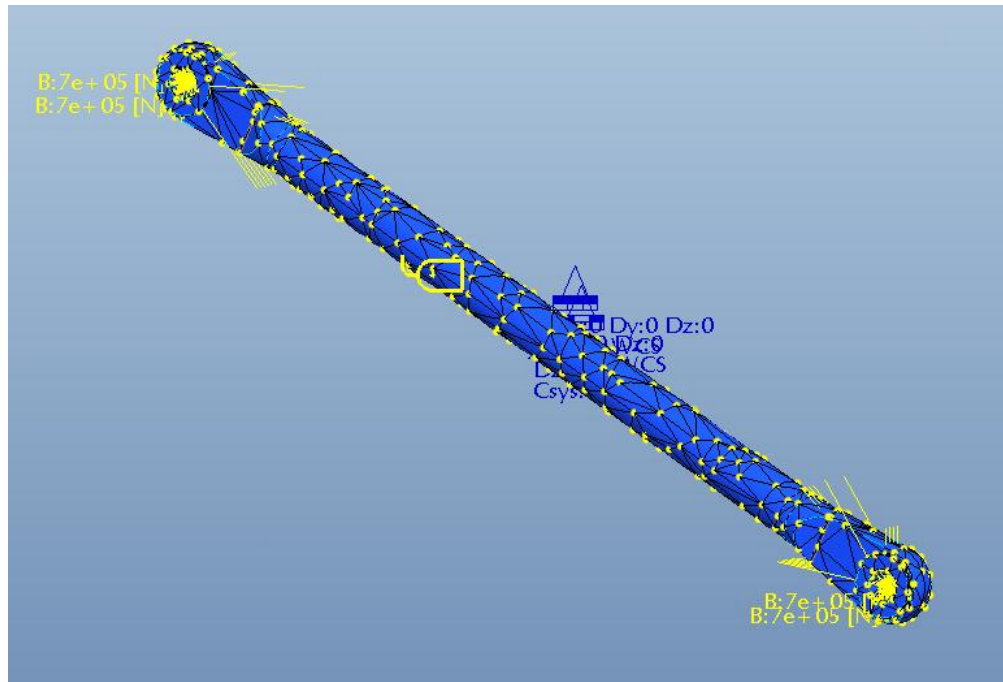
Si può concludere, grazie a queste considerazioni, che questo tipo di soluzione è sicuramente migliorativa per quanto riguarda l'estetica.



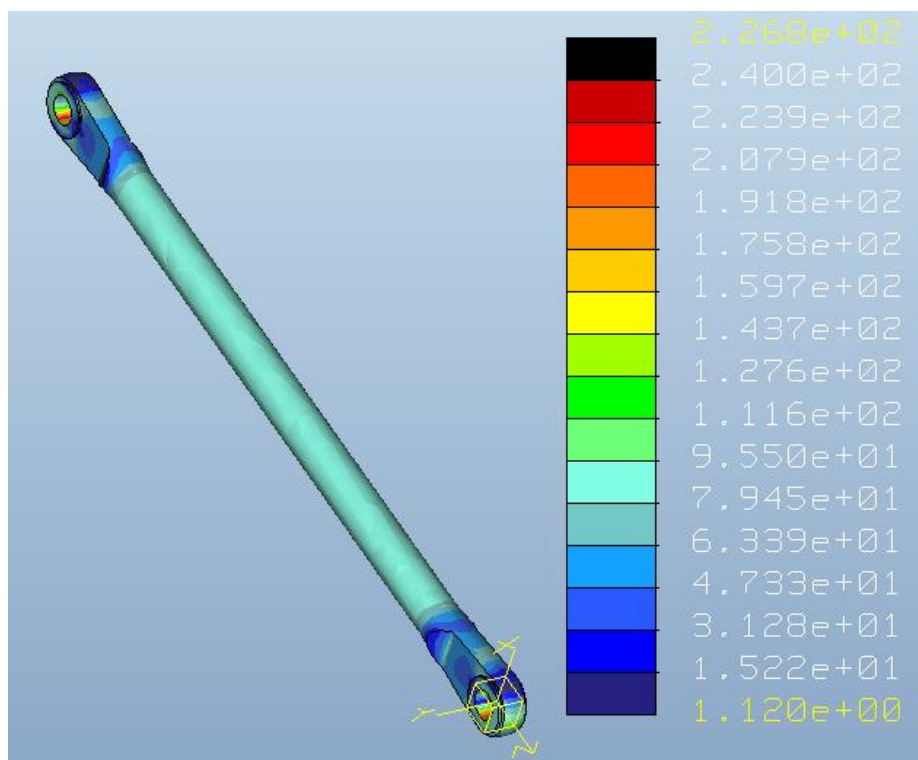
8.8 Analisi FEM



Carichi e vincoli

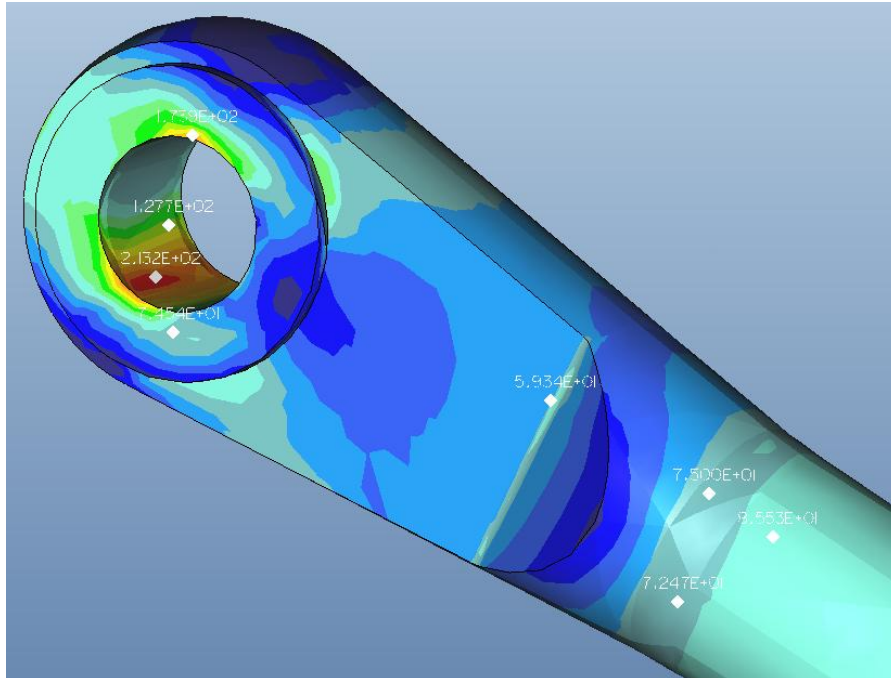


Mesh

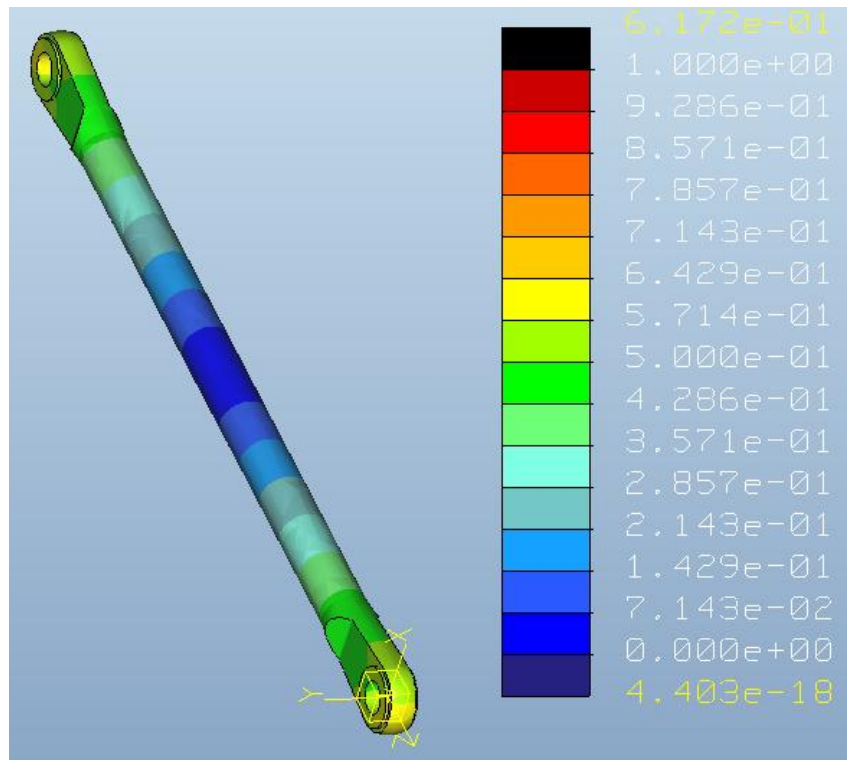


Per quanto riguarda le tensioni possiamo innanzitutto notare che ai fini dell'analisi è indispensabile riprodurre il cordone di saldatura, infatti, non è visibile il cianfrino. La

tensione puntuale massima risulta esser inferiore a quella ammissibile ed i picchi sono concentrati ancora una volta nella zona in cui viene applicata la forza.



In questa immagine possiamo notare come sono distribuite puntualmente le tensioni: sul tubo le tensioni sono uniformi, sul terminale vi sono certe fluttuazioni causate dalla geometria stessa mentre il picco massimo di tensione si trova all'interno del foro in una zona molto localizzata che non deve generare allarmismi.



Per quanto riguarda l'allungamento si ottiene un ΔL pari a 1.234 mm, del tutto accettabile poiché in linea con i valori ottenuti nel caso del codice esistente.

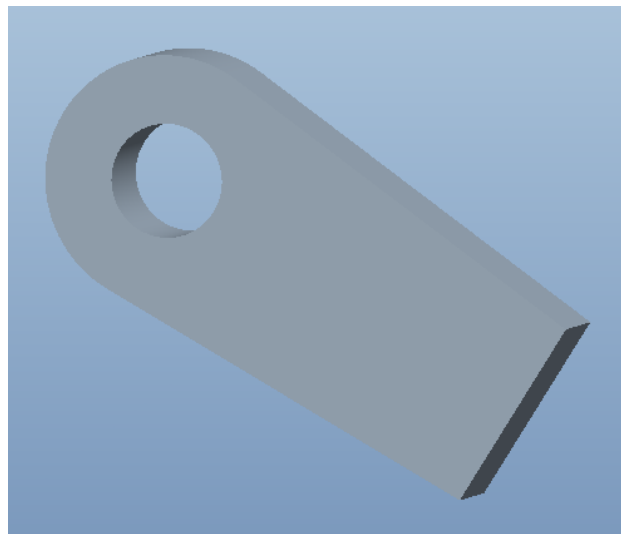
9. Soluzione 4

Durante l'attesa della consegna dei preventivi della fonderia e dello stampato a caldo si è iniziato a sviluppare parallelamente un'ulteriore soluzione.

Dagli studi che si stavano sviluppando era chiaro che il giunto di tesa comporta importanti vantaggi quindi si è pensato di variare la geometria mantenendo però sempre questo tipo di giunto.

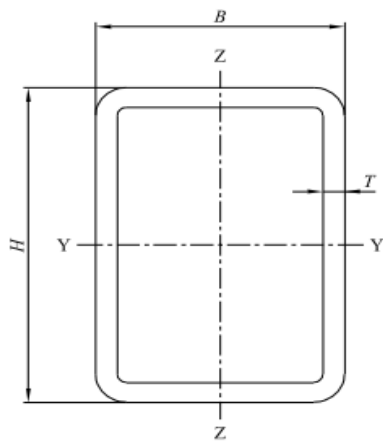
Il problema principale riscontrato nella Soluzione 3 è quello di trovare una tecnologia opportuna ed economica per riuscire a realizzare la geometria dei terminali, perciò l'idea di partenza della Soluzione 4 è quella di partire dal tipo di terminale più economico e successivamente adattare gli altri componenti.

Il modello di terminale più economico e tecnologicamente più facile da realizzare è quello del codice esistente,



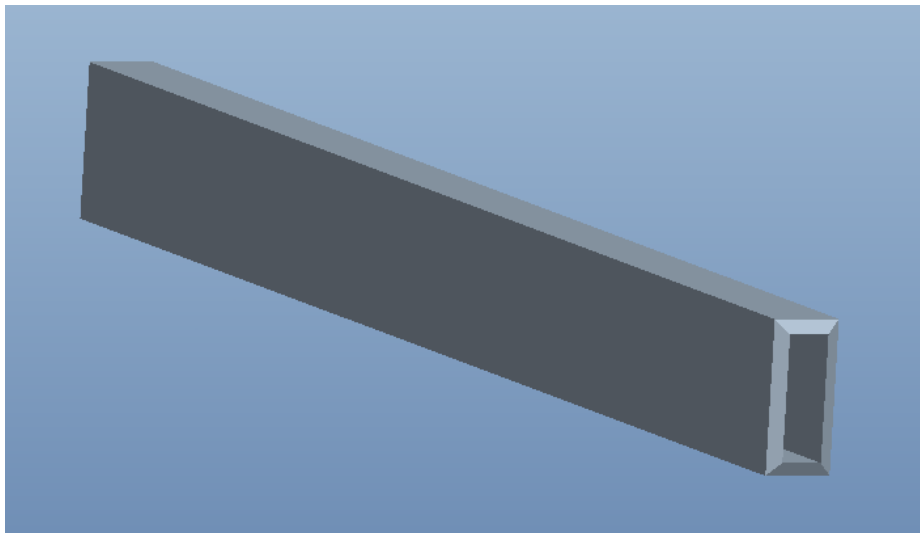
Terminale su lamiera spessore 80 mm, lunghezza 480 mm

per ottenere un giunto di testa dobbiamo cercare tubolari rettangolari che possano fare al caso nostro. I tubolari sono componenti commerciali e sono normati secondo la UNI EN 1020-2 (2006) dove possiamo trovare i profili possibili e le principali caratteristiche geometriche.



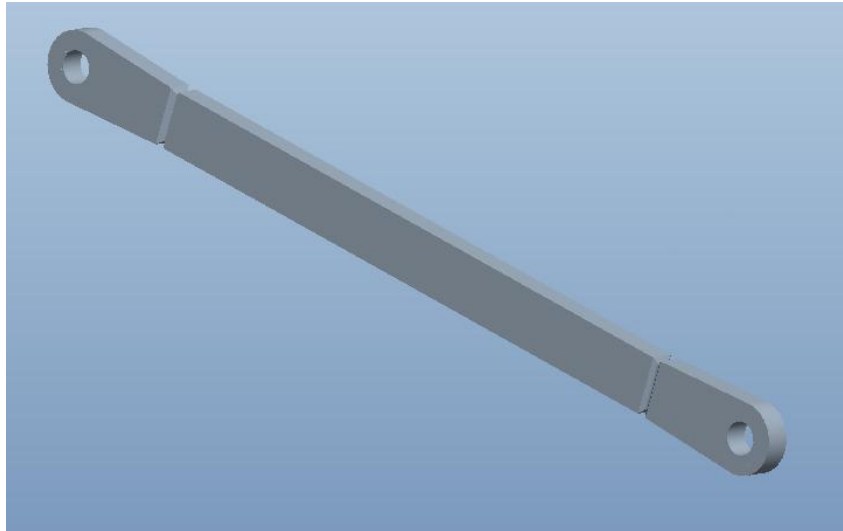
H = 180 mm; B = 80 mm ; T = 16 mm

Area = 7020 mm² ; I_{max} = 5810000 mm⁴ ; Peso = 55 $\frac{Kg}{m}$



Tubo a sezione rettangolare (180x80 ≠ 16; L = 1958mm)

Con la scelta del tubolare a sezione rettangolare riusciamo ad ottenere un giunto di testa dove però la sezione, non essendo più circolare, presenta spigoli che dal punto di vista della trasmissione degli sforzi potrebbero causare problemi. Questo fattore peggiorativo rispetto alla sezione circolare fin da subito ci è stato chiaro però si è deciso di continuare le valutazioni e successivamente attraverso analisi FEM entrare più nel dettaglio per quanto riguarda la presenza di spigoli.



9.1 Verifica a carico di punta secondo UNI EN 10011

Come nei casi precedenti imponiamo la lunghezza critica L_c 2700 mm ed il coefficiente β pari a 1.

A	7020 mm ²
I _{max}	5810000 mm ⁴
i	28.77
λ	93.85

Dove si ricorda ancora una volta che:

$$A = \frac{\pi(De^2 - Di^2)}{4} ; I = \frac{\pi(De^4 - Di^4)}{64} ; i = \sqrt{\frac{I}{A}} ; \lambda = \frac{Lc}{i}$$

A questo punto si calcola la quantità $\lambda_c = \pi * \sqrt{\frac{E}{\sigma_s}} = \pi * \sqrt{\frac{210000}{355}} = 76.41$

Adesso si può ricavare il rapporto $\frac{\lambda}{\lambda_c} = \frac{93.85}{76.41} = 1.23$

Ottenuto il valore del rapporto, entrando nella tabella di normativa nella sezione della “curva a”, siamo in grado di individuare il valore $\frac{\sigma}{\sigma_c}$ pari a 0.522.

Si ottiene immediatamente, invertendo la formula, il valore della tensione critica σ_c che risulta essere 185.3 MPa.

Ottenuto il valore della tensione critica siamo in grado, note le condizioni di carico ovvero del coefficiente di sicurezza ν pari a 1.5, di fare la prima verifica secondo normativa:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma} \geq \nu \quad \text{quindi} \quad \sigma_c \geq \nu * \sigma \quad \text{ottenendo} \quad 185.3 \geq 1.5 * \frac{700000}{7020} \quad \text{ovvero} \quad 185.3 \geq 149.6$$

Verificata la disuguaglianza si può proseguire con la seconda ed ultima verifica entrando nella seconda tabella presente nella normativa, sempre nella casistica “a”, con il valore di λ noto.

Si ottiene il valore “ ω ” presente nella disequazione da verificare $\frac{\omega * F}{A} \leq \sigma_{amm}$.

$$\frac{1.94 * 700000}{7020} \leq 240 \quad \text{che viene verificata in quanto} \quad 193 \leq 240$$

Anche in questo caso si ottiene esito positivo per la verifica a buckling della struttura e quindi possiamo continuare a sviluppare la soluzione attraverso i rimanenti passi.

9.2 Progettazione e verifica dei cordoni di saldatura

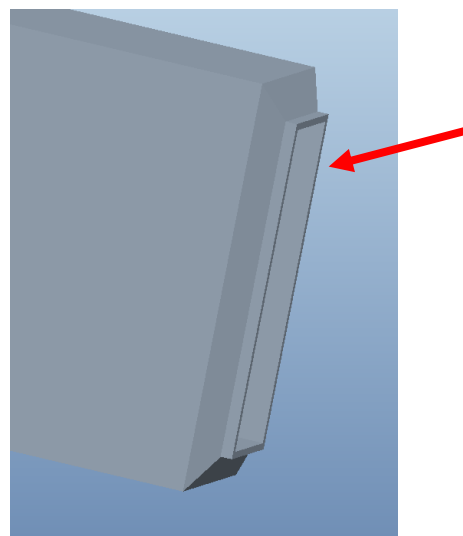
Il giunto di testa da realizzare è un V a piena penetrazione da 16 mm, l’angolo di cianfrino scelto è 75° (45° dalla parte del terminale, 30° dalla parte del tubo) e si lascia una luce tra i lembi di 5 mm.

La scelta di lasciare anche in questo caso luce tra i lembi è da ricondurre sempre al fatto di cercare di facilitare la realizzazione delle saldature e si può notare ancora la presenza di una lamiera per il sostegno del bagno, questa volta ci serviamo di un tubolare commerciale di spessore 3 mm e lunghezza 100 mm che si riesca ad inserire all’interno del tubo più grande.

Si può notare che partendo da una sezione rettangolare il cianfrino stesso non è uniforme ma presenta, in presenza degli angoli, spigoli più sporgenti e questo fa sì che localmente si avrà meno materiale fuso.



Cianfrino



Lamiera sostegno bagno di saldatura

La sezione resistente in questo caso è tabulata, 7020 mm^2 , poiché nella realtà la sezione rettangolare non è a spigolo vivo ma presenta spigoli smussati.

Trattandosi di un giunto di testa a piena penetrazione e considerando sempre giunti di II classe dovremo ancora una volta verificare che:

$$\sigma_{id} = \sqrt{\sigma_{\perp} + \sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp} \sigma_{\parallel} + 3\tau^2} \leq 0.85 * \sigma_{amm}$$

dove la σ ideale si riduce alla sola σ_{\perp} che vale $\frac{700000}{7020} = 99.7 \text{ MPa}$.

$$99.7 \leq 0.85 * 240 \text{ ovvero che } 99.7 \leq 204$$

La verifica dei cordoni di saldatura ha dato ancora una volta esito positivo quindi può esser interessante approfondire ulteriormente lo sviluppo della soluzione tramite l'analisi del ciclo produttivo e dei relativi costi.

9.3 Ciclo produttivo ed analisi costi

Fino a questo punto l'analisi non ha trovato intoppi però siamo consapevoli che la geometria scelta è peggiore rispetto alla precedente per quanto riguarda la distribuzione delle tensioni e la realizzazione del cordone di saldatura, però solo analizzando il ciclo produttivo avremo una visione più chiara e ulteriori termini di paragone.

- Materie prime

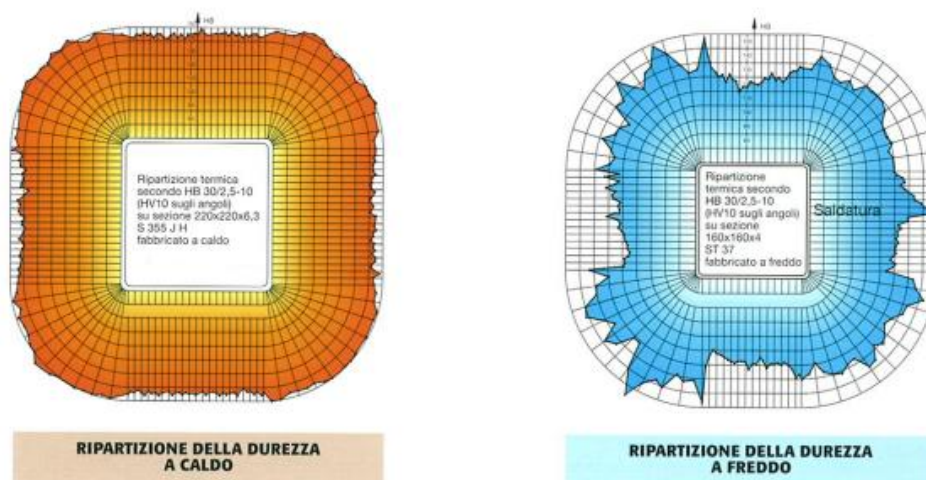
Materiale	Quantità	Peso	Peso grezzo tot	€/Kg	Costo tot con sfrido
Tubolare 180x80 \neq 16	1	107.7	107.7	2	215.40
Lamiera \neq 20 (480x220)	2	66.4	132.2	1.50	198.90

Il costo totale ammonta a 414.30 €, si può notare che il tubolare pesa meno rispetto al tubo ma costa di più al kilo poiché si tratta sempre di un componente commerciale ma non di facile reperibilità.

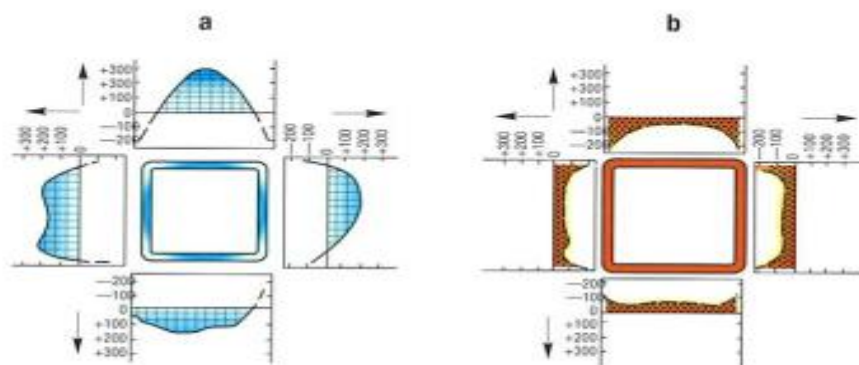
Il tubolare è un profilato a caldo che segue la normativa UNI EN 10210 ovvero si tratta di profilo cavo senza saldature ottenuto inizialmente per perforazione di un prodotto pieno (lingotto o billetta, quadrata/circolare) e successivamente trasformato nel prodotto finale tramite laminazione, estrusione o trafilatura su mandrino.

Sul mercato si possono trovare profilati a caldo o a freddo e questi si differenziano per ripartizione della durezza, tensioni interne e saldabilità.

Come si può notare dai diagrammi di ripartizione della durezza sulla sezione sottoesposti, la differenza tra le caratteristiche dei profilati cavi fabbricati a caldo ed a freddo è notevole. Il profilato a caldo denota una regolare omogeneità di ripartizione termica di durezza su tutta la sezione, il profilato a freddo evidenzia una ripartizione disomogenea di durezza con dei picchi rilevanti in particolare negli spigoli e nella zona del cordone di saldatura.



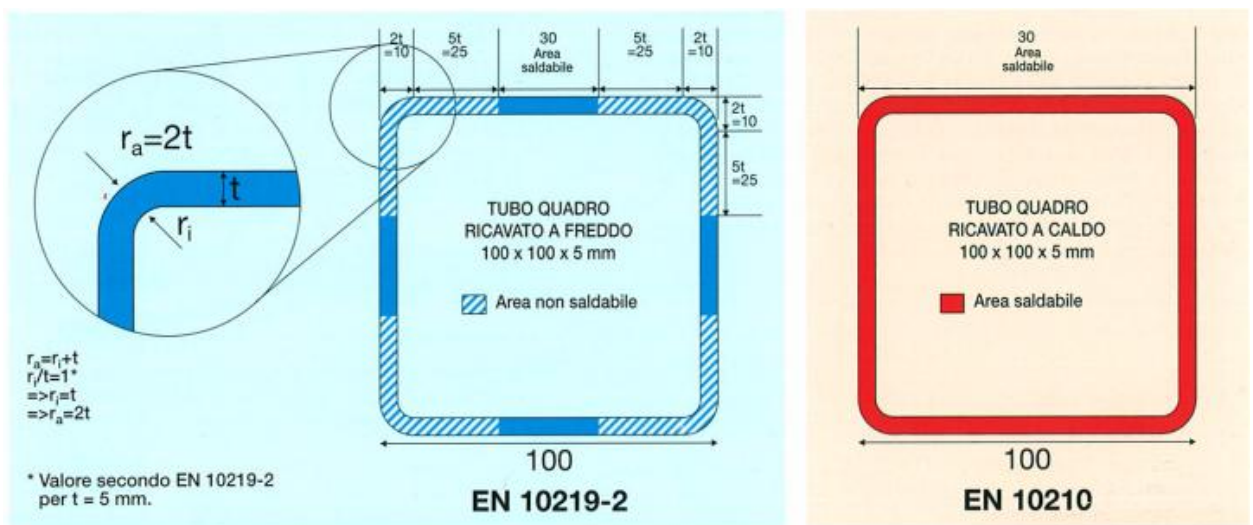
Per quanto riguarda la ripartizione delle tensioni interne ci troviamo di fronte ad un'immagine simile a quella di ripartizione di durezza sulla sezione, i grafici rivelano nettamente che mentre per i profilati fabbricati a caldo il livello di tensioni, molto contenuto, è estremamente regolare sull'insieme della sezione, i profilati a freddo presentano delle tensioni interne di trazione disomogenee ed elevate. Queste tensioni interne possono liberarsi al momento della lavorazione (es. saldatura, zincatura, curvatura ...) e causare una deformazione dei profili o della costruzione.



Ripartizione delle tensioni interne longitudinali su profilati fabbricati "a freddo" (a) e "a caldo" (b) in St 37. Valori in N/mm^2

Molto importanti le differenze che si possono rilevare per quanto riguarda la saldabilità poiché le differenze tra le proprietà meccanico/tecnologiche tra profili a caldo o a freddo diventano particolarmente sensibili quando si deve procedere ad operazioni di saldatura.

I profilati cavi fabbricati a caldo offrono unitamente ad un'ottima saldabilità la possibilità di eseguire la saldatura su tutta la superficie del prodotto, anche sugli angoli, garantendo così le massime prestazioni meccaniche e la massima affidabilità. La formatura a freddo è invece uno dei motivi principali che compongono la tendenza riscontrata a rotture per fragilità, infatti le norme applicabili in questo caso oltre ad includere raccomandazioni sull'utilizzo di determinati gruppi di acciai, specificano che non è possibile la saldatura su tutta la superficie e soprattutto sugli angoli.



Saldabilità tubolari

- Preparazione materiale, taglio del tubolare a misura (1958 mm)

Fase	Macchina o reparto	Quantità	T preparazione (min)	T lavorazione (min)
Preparazione macchina	Troncatrice		10	
Carico barra	Troncatrice	1	10	
Taglio	Troncatrice	2		20
Scarico barra	Troncatrice	1	8	

- Preparazione lavorazioni a macchina utensile

Fase	Macchina o reparto	T preparazione (min)	T lavorazione (min)
Preparazione macchina	Smussatrice	20	
Esecuzione lavorazione	Smussatrice		75

In questo caso bisogna creare cianfrino anche sul terminale e non solo sul tubolare quindi i tempi diventano più importanti.

- Carpenteria

Fase	Macchina o reparto	T preparazione (min)	T assemblaggio (min)
Preparazione materiale	Carpenteria	10	
Maschera	Carpenteria	15	
Assemblaggio	Carpenteria		40
Movimentazione	Carpenteria	10	

- Saldatura

Tipo cordone	Lunghezza	Tempo (min/m)	Tempo saldatura (min)
V 16	1040*	70	72.8

* = $2 \cdot (2 \cdot (180 + 80))$

A cui bisogna aggiungere le seguenti operazioni

Fase	Tempo (min)
Preparazione attrezzatura	30
Movimentazione	15
Pulizia del pezzo	15

Si può notare che è aumentato il tempo per la movimentazione poiché in fase di saldatura s'impiega più tempo a girare un pezzo a sezione rettangolare rispetto ad un pezzo a sezione circolare come nei casi precedenti.

- Lavorazioni a macchina utensile

Nel preventivo la fonderia non prevede la realizzazione dei fori, poiché di dimensioni importanti e richiedenti ottime finiture, quindi dobbiamo mettere il pezzo su alesatrice automatica per la realizzazione dei fori ed una leggera spianatura delle superfici.

Tabella riepilogativa dei costi

Reparto	Centro lavoro	T prep (min)	T lav (min)	€/ora	€
Prep. materiale	Troncatrice	28	20	35	30.80
Macc utensile	Smussatrice	20	75	32	55.73
Carpenteria	Assemblaggio	65	10	32	44
	Saldatura	75	72.8	34	92.1
Lav macchina utensile	Alesatrice	84	56	60	72
				Tot	294.63

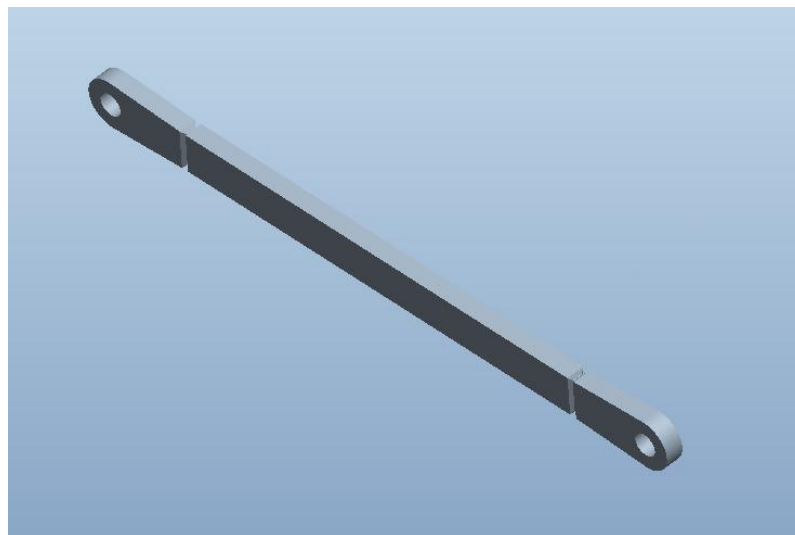
N.B. I tempi sono maggiorati del 10%, fattore cautelativo, nel calcolo dei costi.

In totale si ottiene che il pezzo costa 708.93 €, ovvero una cifra molto competitiva rispetto ai valori ottenuti per la soluzione precedente.

9.4 Peso

Per quanto riguarda l'analisi del peso risulta che il pezzo pesa 220 Kg ed è la soluzione che pesa di meno fino a questo momento.

Componente	Peso unitario(Kg)	Quantità	Peso totale (Kg)
Tubo	107	1	107
Terminali	53	2	106
Rondelle	1.38	4	5.52
Lamiere sostegno	0.9	2	1.8
		Tot	220.32

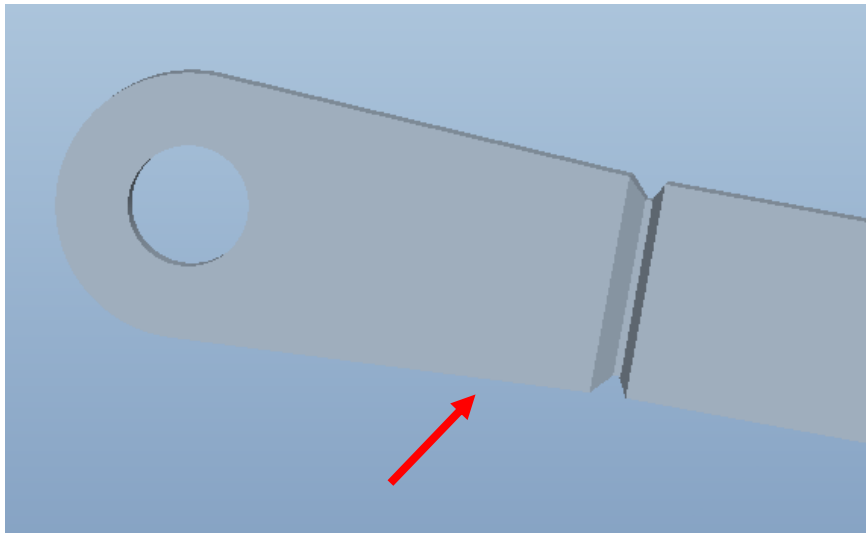


Poiché si è visto che gli spigoli possono creare diversi problemi sia dal punto di vista della trasmissione delle tensioni, della realizzazione del cianfrino e delle saldature, si è pensato di variare leggermente la geometria per limitare almeno una di queste problematiche.

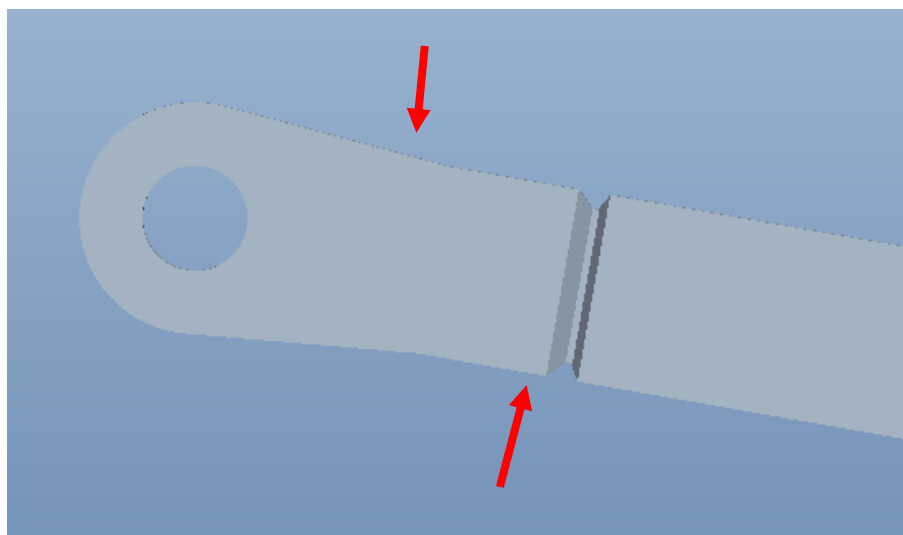
La variazione che è stata apportata riguarda la geometria con cui il terminale arriva alla zona di saldatura, infatti si è pensato di far assumere al terminale nella sua parte finale le stesse dimensioni del tubolare in modo tale che la variazione di sezione fosse

limitata al massimo ovvero evitare un ulteriore fattore di concentrazione degli sforzi direttamente sulla saldatura.

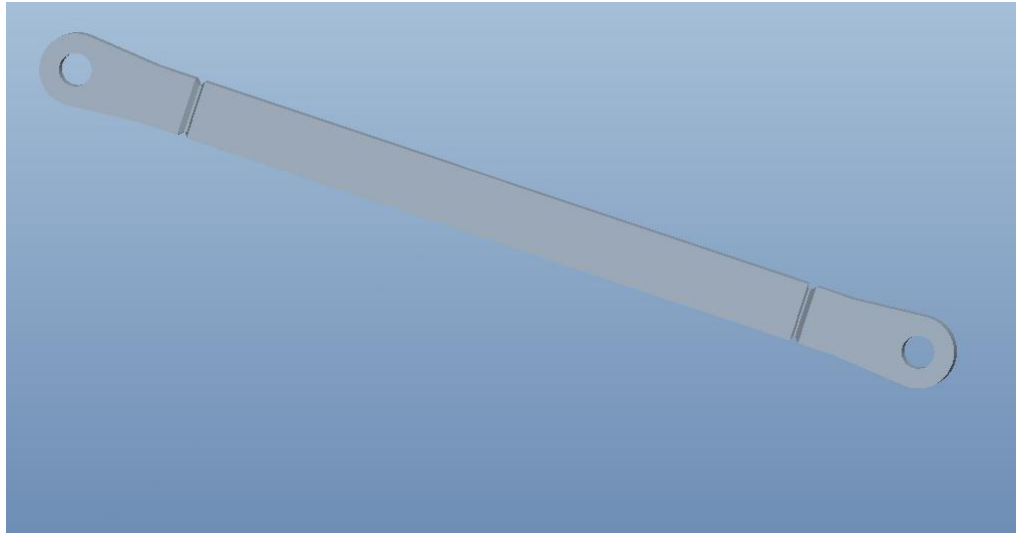
Da notare che quest'operazione, che fondamentale non comporta variazioni per la tenuta del pezzo, non comporta neanche variazioni sul costo totale poiché si ricorda che nel costo della lamiera, grazie a contratti commerciali aziendali, è compreso il taglio.



Terminale con prima geometria



Terminale con sezione costante nei pressi della sezione di saldatura



Soluzione 4 con terminali modificati

9.5 Fattibilità pratica

Si può notare che in questo caso i terminali sono ottenuti semplicemente dal taglio della lamiera, la saldatura è un giunto di testa su una sezione rettangolare e non si è scelto un tubo ma un tubolare che è un prodotto commerciale anche se per le dimensioni richieste non può essere definito come di facile reperibilità. Il fatto che il tubolare non sia di facile reperibilità ma presente solo nei cataloghi di pochi fornitori deve essere un fattore da tener bene sotto controllo poiché in genere l'azienda ha più fornitori per lo stesso componente e di norma uno di questi deve essere nelle vicinanze della sede aziendale stessa.

Per quanto riguarda la saldatura, la realizzazione dei cianfrini su sezione rettangolare è più onerosa rispetto ad una sezione circolare ma si riescono comunque ad ottenere tutte le condizioni per una saldatura a regola d'arte.

9.6 Ispezionabilità

Anche in questo caso, poiché siamo di fronte ad un giunto di testa a piena penetrazione, non si riscontrano problemi per quanto riguarda lo svolgimento di controlli non distruttivi. La presenza della lamiera per il sostegno del bagno di

saldatura aiuta anche in questo caso l'operatore nel controllo della reale profondità di saldatura nella zona più critica ovvero quella centrale dove si trova la profondità massima di 16 mm.

9.7 Fattore estetico

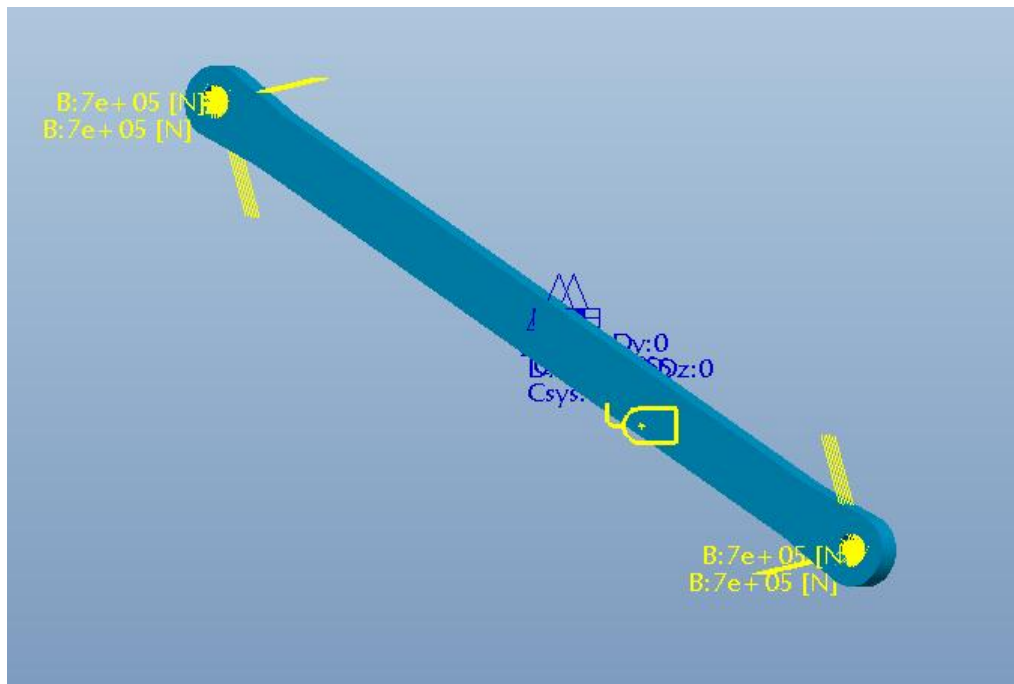
L'intera struttura presenta una certa continuità come nella soluzione precedente però in questo caso la scelta del tubolare a sezione rettangolare non conferisce la stessa armonia geometrica garantita con una sezione circolare.

I terminali sono molto più grezzi infatti vengono ricavati direttamente dal taglio della lamiera e quindi esteticamente molto inferiori rispetto a quelli ottenuti tramite stampaggio.

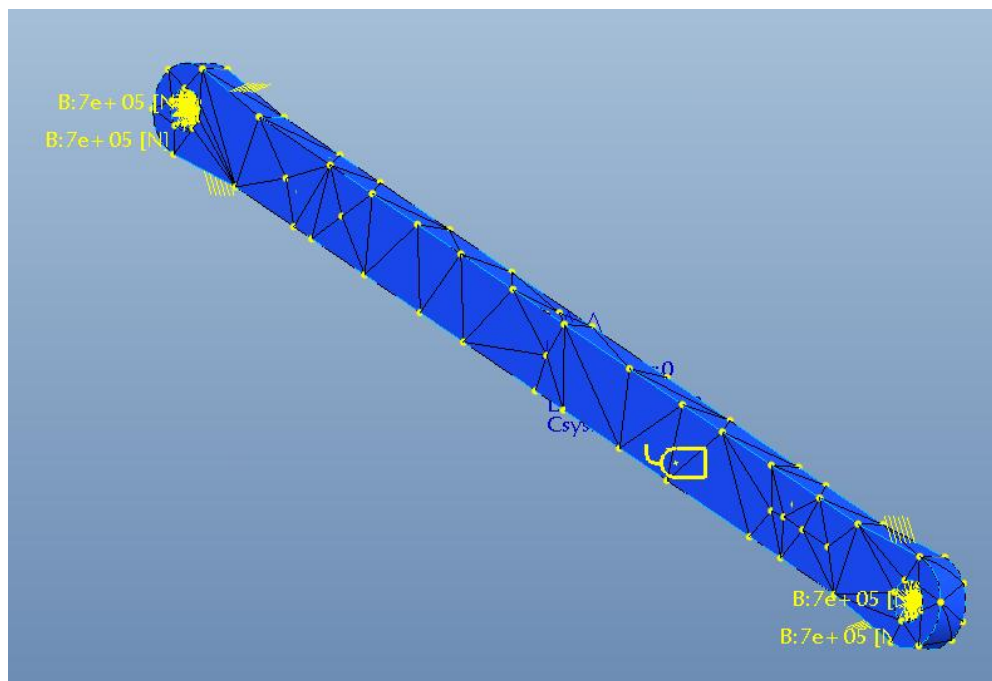
Nonostante la soluzione conferisca una sensazione di continuità e solidità del materiale dal punti di vista dell'estetica questa si pone in una fascia intermedia tra il codice esistente e la Soluzione 3.



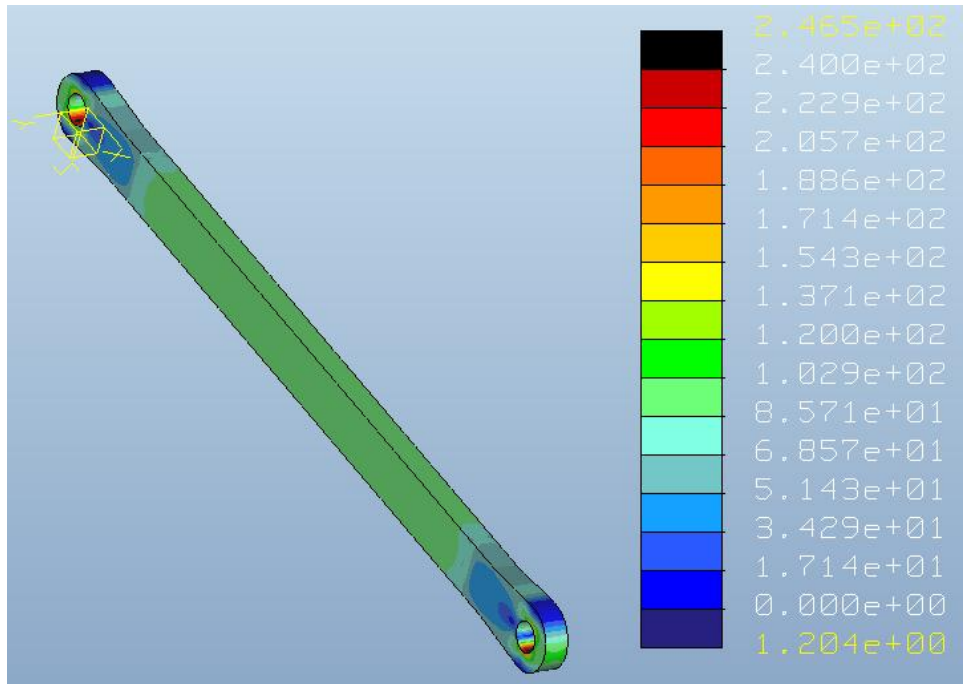
9.8 Analisi FEM



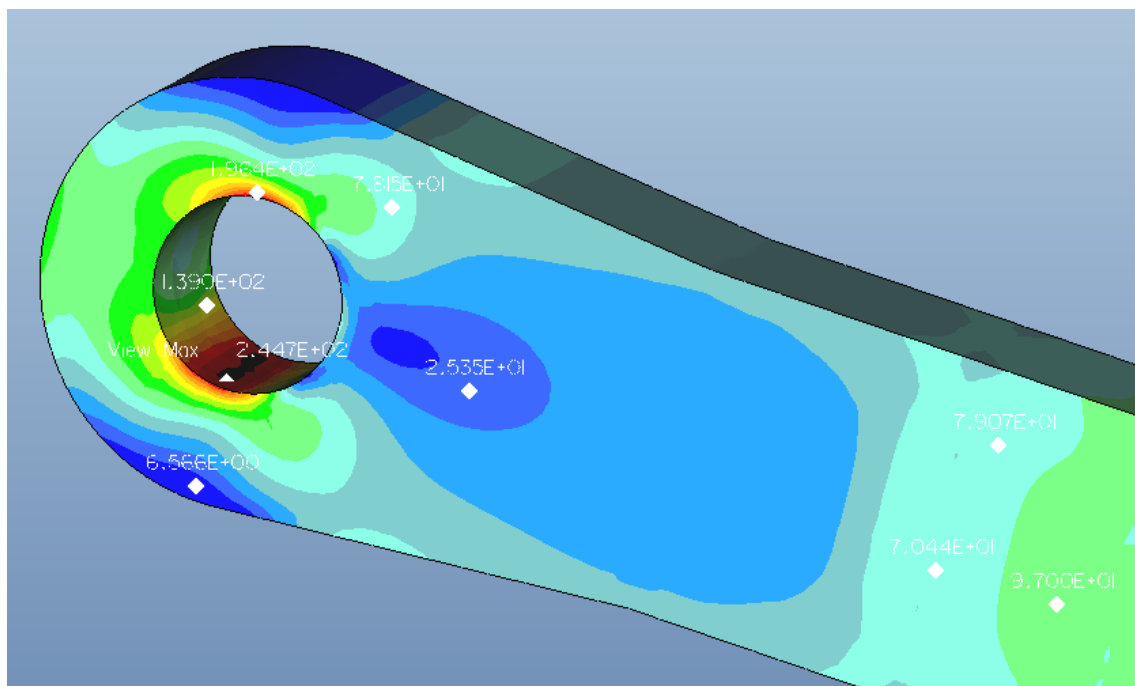
Carichi e vincoli



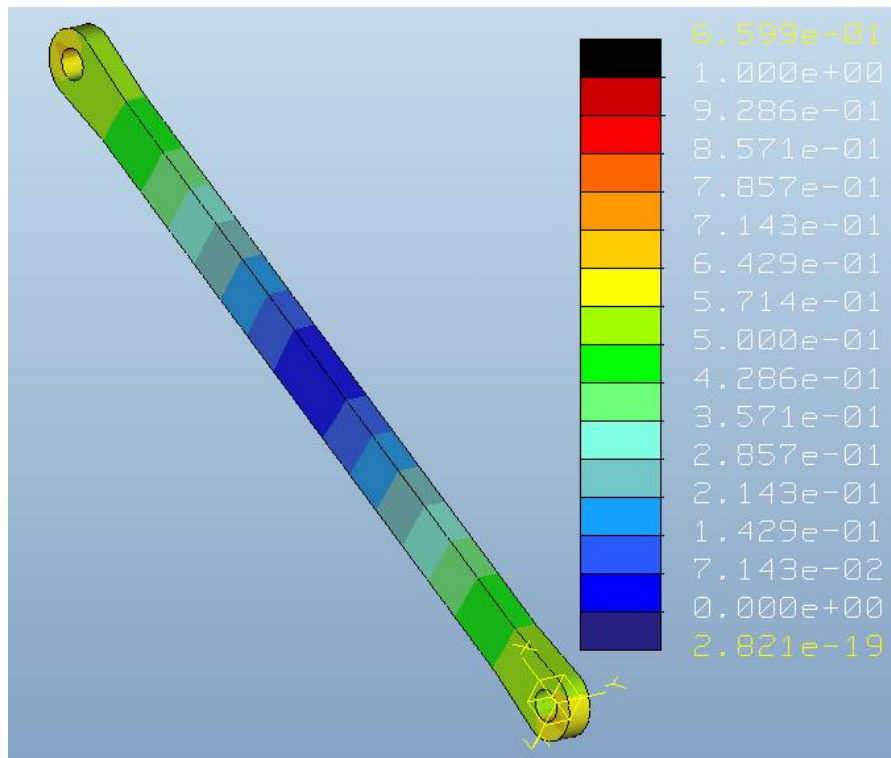
Mesh



Per quanto riguarda le tensioni si ottiene un'analisi molto simile a quella del caso precedente, ovvero tensione costante sul tubolare, con l'unica differenza che il picco di tensione puntuale questa volta supera, anche se di poco, il valore della tensione ammissibile.



In questa immagine possiamo vedere alcuni valori puntuali delle tensioni e si può notare che la zona in cui queste sono più alte, superando il valore ammissibile, è sempre all'interno del foro ma ancora una volta non si estende allo spessore del terminale, quindi non desta particolari preoccupazioni per l'integrità del pezzo.



Per quanto riguarda l'allungamento l'analisi fornisce un valore ΔL pari a 1.320 mm, assolutamente in linea con i risultati precedentemente ottenuti e quindi accettabile.

10. Confronto alternative

Dopo aver esposto l'evoluzione delle diverse soluzioni, messo in luce i vari pregi e difetti, si vuole fare un quadro riassuntivo del percorso svolto per riuscire ad individuare quella che potrebbe realmente essere una valida alternativa per l'azienda.

Per riuscire in questo intento nella maniera meno soggettiva possibile si è scelto di creare un criterio di valutazione, che richiamasse i filtri di cui ci siamo già serviti in fase di progettazione. Il criterio di valutazione consiste nel conferire un peso ad ogni singolo filtro (fattibilità pratica, ispezionabilità, costo, fattore estetico, peso) ovvero si vuole stabilire una gerarchia tra questi e successivamente valutarli nelle singole soluzioni proposte.

Si è così deciso di fornire un punteggio da 1 a 5 ad ogni singolo filtro in base all'importanza che questo assume nella valutazione finale della soluzione dal punto di vista dell'azienda.

Filtro	Punteggio
Fattibilità pratica	5
Costo	5
Peso	5
Fattore estetico	4
Ispezionabilità	3

Si può notare che alla “fattibilità pratica” si attribuisce punteggio 5 poiché si vuole creare una soluzione che sia allo stesso tempo migliorativa ma tecnologicamente non troppo complessa.

Il “costo” è in assoluto la voce più importante dal punto di vista dell'azienda, infatti, anche a causa del momento non florido dell'economia globale, le aziende tendono a risparmiare ed a cambiare solo se in effetti conviene anche in termini di danaro.

Anche il filtro “peso” ha punteggio massimo poiché, soprattutto negli ultimi anni, la direzione presa è quella della riduzione dei pesi per creare macchine all’apparenza più snelle.

Il “fattore estetico” si posiziona subito dietro poiché sempre negli ultimi anni, come già detto, la direzione aziendale ha imposto di creare pezzi e quindi macchine che abbiano un forte impatto visivo.

Il filtro “ispezionabilità” è stato individuato come quello meno critico, ma non per questo poco importante, perciò prende un punteggio leggermente più basso.

Per la valutazione delle soluzioni si è pensato di stabilire un punteggio (da un * a cinque *****) per il buon esito di ciascun filtro. In questo caso si è deciso di utilizzare come metro di paragone il codice esistente ovvero si sono attribuite *** alla valutazione del codice esistente e così un numero di asterischi inferiore simboleggia un’alternativa peggiore mentre un numero di asterischi maggiore sta a significare un miglioramento.

Soluzione	Fattibilità pratica	Costo	Peso	Fattore estetico	Ispezionabilità
2	***	*	***	***	**
3	*****	*****	*****	*****	*****
4	*****	*****	*****	*****	*****

Per poter confrontare realmente le varie proposte si procede a moltiplicare ogni singolo punteggio (gli * valgono 1 punto ciascuno) per il peso del rispettivo filtro.

Si ottiene così:

Soluzione 2

Fattibilità pratica	Costo	Peso	Fattore estetico	Ispezionabilità	Totale
$3 \times 5 = 15$	$1 \times 5 = 5$	$3 \times 5 = 15$	$3 \times 4 = 12$	$2 \times 3 = 6$	49

Soluzione 3

Fattibilità pratica	Costo	Peso	Fattore estetico	Ispezionabilità	Totale
$5 \times 5 = 25$	$5 \times 5 = 25$	$4 \times 5 = 20$	$5 \times 4 = 20$	$5 \times 3 = 15$	105

Soluzione 4

Fattibilità pratica	Costo	Peso	Fattore estetico	Ispezionabilità	Totale
$4 \times 5 = 20$	$5 \times 5 = 25$	$5 \times 5 = 25$	$4 \times 4 = 16$	$5 \times 3 = 15$	101

Senza grande sorpresa, viste le conclusioni già tratte durante lo sviluppo del lavoro, si arriva alla conclusione che la Soluzione 3 è quella che al termine di questa analisi comparativa potrebbe esser presa in considerazione dall'azienda per poter sostituire il codice esistente.

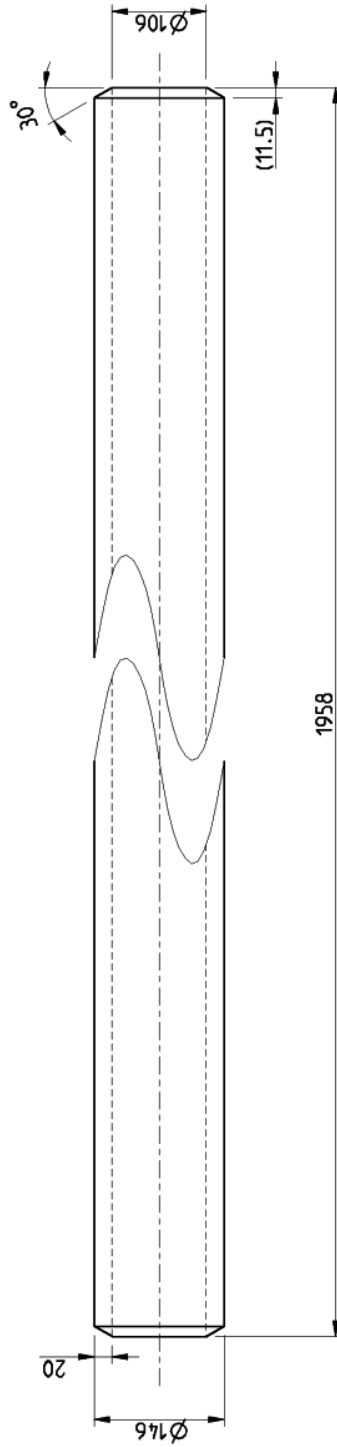
11. Conclusioni

L'elaborato di tesi documenta tutti i passaggi che sono stati svolti per riuscire a portare a termine la missione prefissata, ovvero fare un'analisi comparativa di soluzioni alternative rispetto a quella esistente in azienda visto che nel recente passato ha fatto registrare alcune anomalie.

Sulle diverse soluzioni proposte sono state fatte verifiche strutturali, ne è stato fatto il progetto, è stato analizzato nel dettaglio l'intero ciclo produttivo con l'intento di riuscire ad individuare la soluzione che dal punto di vista aziendale potesse esser più interessante.

Non è mai stato perso di vista quest'obiettivo, ovvero che la soluzione finale dovesse esser quella più vantaggiosa per l'azienda e per fare ciò si è cercato di fare valutazione oggettive e non soggettive. Seguendo questo metodo, ovvero utilizzando filtri opportunamente scelti, alla fine dello studio si è arrivati all'individuazione dell'alternativa più valida.

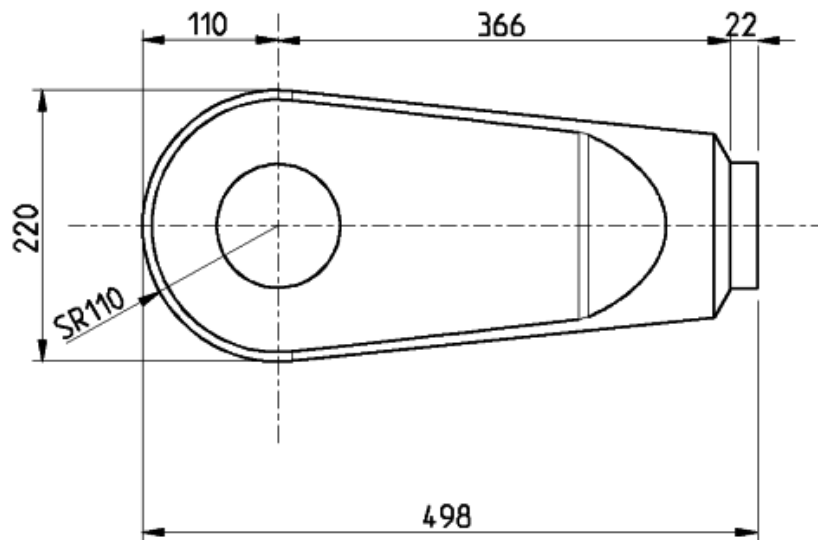
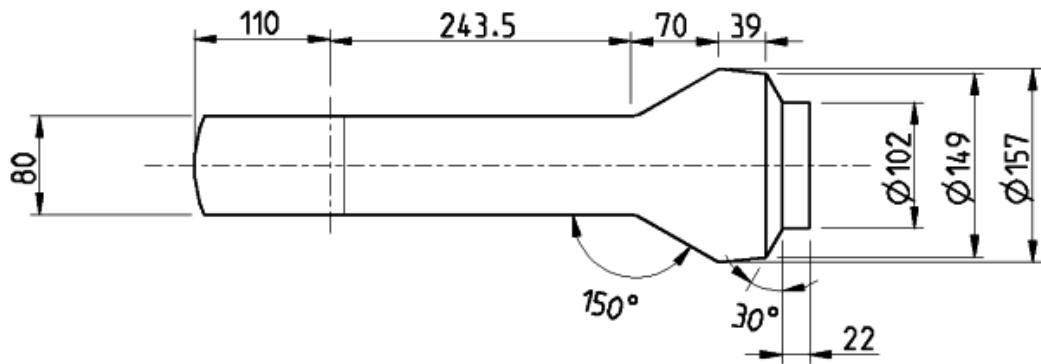
Di seguito viene presentato il disegno costruttivo di carpenteria della Soluzione 3 come ultimo step dell'elaborato.



✓

001	08920083	TUBO D.146	SP.20	S355JR
POS	REVISIONE	CODICE	DESCRIZIONE	MATERIALE
TOLLERANZE GENERALI: SOILMEC IL. 6.4		TRATTAMENTO TERMICO	-	CARATT. MATERIALE
FUETTI: 6H/69		BONIFICA	-	DUREZZA SUPERFICIALE HRC
SALDATURE SECONDO: SOILMEC IL. 9.13		RICOTTURA	-	PROFONDITA' EFFICACE mm
		FINITURA SUPERFICIALE	-	RESISTENZA NUCLEO N/mm2
PESO (kg)		MACCHINA TIPO	GRUPPO	STATO
120.9		-	-	-
DISEGNATO		IL	CONTROLLATO	REVISIONE-VER.
IL		DA	IL	FOGLIO
DA		DA	VEDERE ASSIEME	2 di 3
SCALA				1:5

soilmeco



002	- NC -	STAMPATO	S355J0			
POS	REVISIONE	CODICE	DESCRIZIONE	MATERIALE		
TOLLERANZE GENERALI: SOILMEC IL. 6.4		TRATTAMENTO TERMICO	-	CARATT. MATERIALE		
FILETTI: 6H/6g		BONIFICA	-	DUREZZA SUPERFICIALE HRC		
SALDATURE SECONDO: SOILMEC IL. 9.13		RICOTTURA	-	PROFONDITA' EFFICACE mm		
		FINITURA SUPERFICIALE	-	RESISTENZA NUCLEO N/mm2		
	PESO (Kg)	MACCHINA TIPO	GRUPPO	STATO		
	52.8	-	-			
soilmec		DISEGNATO	CONTROLLATO	REVISIONE-VER.	FOGLIO	SCALA
	IL	-	IL	- 0	3 di 3	1:5
	DA	-	DA			
			VEDERE ASSIFME			

12. Bibliografia

- G. Ballio, F. Mazzolani, *Strutture in acciaio*, Hoepli, 06/1987
- G. Niemann, *Elementi di macchine Vol.I*, Est-Springer, 1986
- Istituto italiano della saldatura, “*Tecnologia della saldatura*”, Algraphy, 2004
- CNR-UNI 10011, “Costruzioni di acciaio, istruzioni per il calcolo, l’esecuzione, il collaudo e la manutenzione”, 1998
- UNI EN 970, “Controllo non distruttivo di saldature per fusione, esame visivo”, 1997
- UNI EN 10210-2, “Profilati cavi finiti a caldo di acciai non legati e a grano fine per impieghi strutturali”, 2006
- UNI EN 1435, “Controllo non distruttivo delle saldature, controllo radiografico dei giunti saldati”, 2004
- UNI EN 22553, “Rappresentazione simbolica delle saldature sui disegni”, 1997
- UNI EN ISO 4063, “Saldatura e tecniche affini, nomenclatura e codificazione numerica dei processi”, 2011
- UNI EN ISO 5817, “Giunti saldati per fusione di acciaio, nichel, titanio e loro leghe, livelli di qualità delle imperfezioni”, 2008
- UNI EN ISO 6520-1, “Saldatura e procedimenti connessi, classificazione delle imperfezioni geometriche nei materiali metallici”, 2008
- UNI EN ISO 9692-1, “Saldatura e procedimenti connessi, raccomandazione per la preparazione dei giunti parte 1-2”, 2005-2001
- UNI EN ISO 13916, “Giuda per la misurazione della temperatura di preriscaldamento, della temperatura tra le passate e della temperatura di mantenimento del preriscaldamento”, 1997
- UNI EN ISO 17638, “Controllo non distruttivo delle saldature, controllo con particelle magnetiche”, 2010
- UNI EN ISO 17640, “Controllo non distruttivo delle saldature, controllo mediante ultrasuoni”, 2011