

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI
INDUSTRIALI**

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN
INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA**

TESI DI LAUREA

**Studio e simulazione
agli elementi finiti
del processo di
cesoiatura**

*Relatore: Ch.mo Prof. Guido Berti
Correlatore: Dr. Ing. Manuel Monti*

*Laureando: ALBERTO DAL SOGLIO
Matricola: 613104*

ANNO ACCADEMICO 2012 – 2013

*Ciò che sappiamo è una goccia,
ciò che ignoriamo è un oceano!*

Isaac Newton

Indice

Sommario	1
<u>CAPITOLO 1</u>	
Introduzione	3
1.1 Strutturazione del progetto	3
1.2 Articolazione della tesi.....	4
<u>CAPITOLO 2</u>	
Il processo di cesoiatura	5
2.1 La tranciatura	7
2.2 La cesoiatura.....	9
<u>CAPITOLO 3</u>	
Simulazione agli elementi finiti del processo di cesoiatura	11
3.1 Funzionamento del metodo FEM	11
3.2 Fasi per arrivare al modello.....	12
3.3 Definizione della mesh	13
<u>CAPITOLO 4</u>	
Il materiale: il Weldox 700	15
4.1 Perché il Weldox 700?	16
4.2 Esempi di utilizzo del Weldox.....	17
4.3 Un acciaio alto resistenziale.....	21
4.4 Le implicazioni di essere un acciaio alto resistenziale	22
4.5 Il Weldox: un materiale di facile utilizzo.....	23
4.6 Il grafico.....	24
4.7 Proprietà del Weldox 700	25
4.7.1 Composizione chimica	25
4.7.2 Proprietà meccaniche	26
4.7.3 Proprietà generali.....	26
<u>CAPITOLO 5</u>	
Il comportamento elasto-plastico dei materiali	27
5.1 La teoria della plasticità.....	27
5.2 Lo snervamento del materiale	30

CAPITOLO 6

Il valore di danneggiamento Cockroft-Latham.....	33
6.1 Criterio di frattura.....	35
6.2 Danneggiamento di Cockroft-Latham.....	37
6.3 La prova di trazione e il valore di Cockroft-Latham	38
6.4 Criterio di rimozione del materiale.....	41

CAPITOLO 7

Modello FEM del processo di cesoiatura	43
7.1 Geometria	43
7.2 Materiale	48
7.3 Tipologia di movimento	48
7.4 L' attrito	49
7.5 Il mesher	51
7.6 Il tipo di mesh	53
7.7 Il gioco tra le lame	58
7.8 Definizione delle porzioni delle superfici tranciate.....	59

CAPITOLO 8

Il modello analitico per la forza di cesoiatura	63
8.1 L' analisi numerica con il foglio Excel	66
8.1.1 Prima parte dell'analisi numerica	68
8.1.2 Seconda parte dell'analisi numerica.....	69
8.1.3 Il grafico	70

CAPITOLO 9

Risultato delle analisi.....	71
9.1 Risultati al variare del tipo di mesher.....	71
9.2 Risultati al variare del tipo di mesh.....	73
9.3 Risultati al variare dell' attrito	75
9.4 Risultati al variare del tipo di spessore	76
9.5 Analisi risultati	80

Conclusioni.....	85
-------------------------	-----------

Bibliografia.....	87
--------------------------	-----------

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato coordinato dal Professor Guido Berti al quale esprimo la mia più sincera gratitudine.

Sono grato anche all' Ingegnere Manuel Monti per avermi permesso di conoscere con maggior dettaglio il programma Simufact.Forming.

La mia gratitudine quindi va a tutta la mia famiglia, per il loro meraviglioso supporto nel corso degli anni.

Questo obiettivo non sarebbe stato raggiunto senza di loro.

Alberto Dal Soglio

Vicenza, settembre 2013

Sommario

La cesoiatura è un processo industriale di taglio della lamiera e l'analisi di quest'ultimo è l'oggetto della tesi.

Questo progetto di ricerca si prefigge di sviluppare un modello numerico a partire da un'analisi agli elementi finiti, che permetta di aumentare la comprensione e contribuire alla qualità e produttività di questo processo di taglio.

Il metodo agli elementi finiti (FEM) viene utilizzato per modellare la cesoiatura con il fine di descrivere i fenomeni che si verificano nel processo: la deformazione elasto-plastica, il contatto tra la lamiera ed i coltelli e non di meno la frattura duttile del foglio tranciato.

Grazie all'utilizzo del software Simufact.Forming 10.0.1 si è riprodotto il processo produttivo, permettendo di prevederne il comportamento e convertendo il classico test fisico in un modo di agire più veloce e economico, il tutto per soddisfare gli standard di qualità sempre più elevati richiesti dal mercato industriale [1].

L'analisi FEM è stata utilizzata per studiare il modello di deformazione piana di taglio ortogonale del processo di cesoiatura.

Per analizzare il processo di taglio a lame inclinate, cioè in 3D, si è partiti quindi dalla simulazione del processo a lame orizzontali, in 2D, e solo in seguito tramite un modello numerico in Excel si è passati allo studio e all'osservazione dei dati del processo di cesoiatura a lame inclinate.

CAPITOLO 1

Introduzione

La tranciatura è un processo di separazione molto utilizzato nei settori industriali di taglio della lamiera.

Il più utilizzato è senza dubbio la cesoiatura e viene accompagnato da altri 4 tipi di processi come l'ossitaglio, il laser, il taglio al plasma e il taglio a getto d' acqua.

Questi sono i più conosciuti e i più utilizzati per il taglio della lamiera, anche se la cesoiatura rimane il processo più economico e più veloce, e per essa l'industria necessita di una potenza sempre più superiore insieme ad una maggiore e più costante qualità [2].

Con l'utilizzo dei software FEM le decisioni più importanti vengono prese a livello virtuale, consentendo di evitare quelle modifiche durante la produzione che potrebbero risultare dispendiose.

In questo progetto di ricerca verrà utilizzato come materiale di analisi il Weldox700, un classico acciaio strutturale.

1.1 Strutturazione del progetto

Lo scopo del lavoro di tesi è ricavare, attraverso analisi FEM e modellazione numerica, la forza necessaria a completare il processo di cesoiatura.

Partendo dalle simulazioni bidimensionali si ottengono i risultati tridimensionali attraverso un apposito modello analitico, ricavato direttamente osservando il modello tridimensionale del processo di taglio della lamiera.

La simulazione 2D permette solo di lavorare sulle cesoie a lame parallele, in quanto per quelle oblique, a 3D, ci vorrebbe un maggior numero di tempo e un alto livello di calcolo.

Per questo si è utilizzato il software Simufact.Forming 10.0.1 per le simulazioni 2D in deformazioni piana, cambiando i spessori della lamiera, il tipo di mesher, il grado di mesh, per avere un'analisi globale più accurata.

1.2 Articolazione della tesi

All' inizio di questo lavoro di tesi si è andato a spiegare il processo di cesoiatura come caso particolare della tranciatura.

Un ulteriore passo è stato affrontato verso la spiegazione del funzionamento del metodo FEM e quindi del programma Simufact.Forming 10.0.1.

Dopo di che si è parlato del materiale utilizzato per questo progetto, Il Weldox 700, e quindi delle sue caratteristiche e delle sue proprietà principali.

Per il materiale è stato definito un modello elasto-plastico, in quanto questo tipo di lavorazione prevede in un primo momento una deformazione elastica e poi una deformazione plastica fino a rottura.

L'approccio a rottura è stato integrato con l'utilizzo del parametro di Latham Cockroft e della spiegazione di come si è giunti a ricavarlo tramite metodo FEM.

Grazie a questo ultimo dato si sono poi impostati tutti i parametri all'interno del programma. Si è iniziato definendo la geometria e le costanti utili a far funzionare in maniera completa il programma: si sono stati creati gli stampi e la lamiera di dimensioni paragonabili a quelle di un processo reale e, una volta importati nel software di simulazione FEM, si è andati a posizionarli nello spazio definendo le superfici di contatto e la legge di moto per la lama superiore.

Dopo aver impostato una prima simulazione con validità generale, sono stati fatti variare alcuni parametri in modo da ottenere tutti i diversi casi reali.

Ottenuti i risultati in 2D si è poi utilizzato un modello analitico per convertirli in risultati 3D, così ottenendo un approccio più verosimile alla realtà.

Alla fine si sono mostrati i grafici ottenuti e i le conclusioni per questo progetto.

CAPITOLO 2

Il processo di cesoiatura



Figura 1: stoccaggio di coil

Essenzialmente il coil è un rotolo di lamiera realizzato utilizzando coppie di rulli poste a valle degli impianti di laminazione.

Il coil è la forma più vantaggiosa per il trasporto della lamiera.

Una volta giunto negli stabilimenti di lavorazione, il coil viene spianato in modo da annullare la curvatura che gli è stata impressa per poterlo trasportare e solo in seguito viene tagliato in fogli di dimensioni rispondenti alle esigenze delle lavorazioni da eseguire.



Figura 2: Fogli di lamiera ricavati dal coil

Le lavorazioni attraverso le quali viene ricavato l'oggetto finito dal foglio di lamiera si possono sinteticamente riassumere in operazioni di sagomatura, formatura, assemblaggio e finitura.

In prima approssimazione e per semplicità si definiscono operazioni di formatura quelle che trasformano il pezzo sagomato in un oggetto tridimensionale (per esempio un cofano per auto).

Entrambe le operazioni avvengono attraverso una serie di lavorazioni chiamate taglio, stampaggio e piegatura.

Il taglio è la prima operazione della fase di sagomatura della lamiera.

La tecnica tradizionale per il taglio della lamiera è la cesoiatura.

2.1 La tranciatura

La cesoiatura è un caso particolare di tranciatura. Partendo dal generale, la tranciatura ha lo scopo di ritagliare da una lamiera una figura geometrica piana.

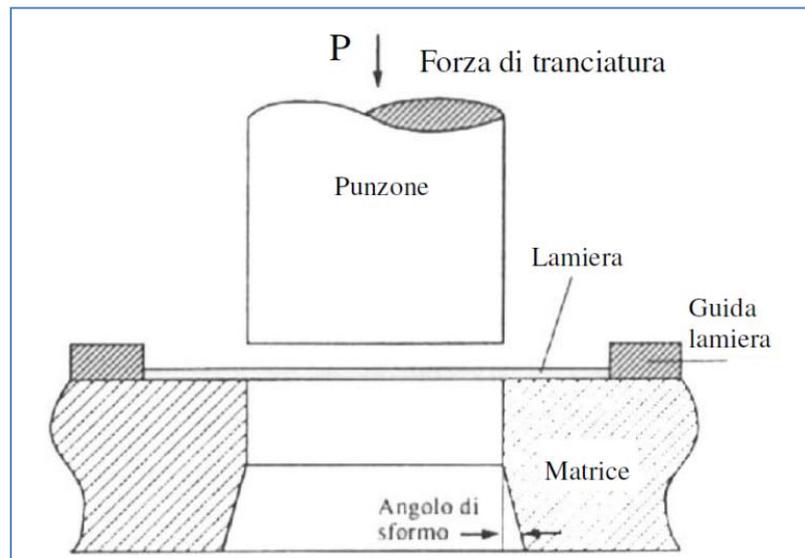


Figura 3: Principio della tranciatura

L'operazione di tranciatura si effettua con stampi montati su presse col seguente principio.

Un punzone, collegato attraverso una piastra alla slitta della pressa, penetra nella matrice tagliando la lamiera, secondo la figura corrispondente, alla forma data sia al punzone che alla matrice.

I contorni del punzone e del foro nella matrice costituiscono i taglienti.

L'oggetto tranciato cade liberamente in un raccogliatore al di sotto dello stampo, grazie all'angolo di sforno della matrice, che assume valori di 3° , 5° .

Per assicurare il corretto posizionamento della lamiera sopra la matrice è presente un sistema guida lamiera.

Nel caso di lamiere sottili è presente un prelamiera (non rappresentato in figura), per evitare che essa si pieghi durante la tranciatura.

Vediamo in dettaglio quali sono le fasi che portano alla tranciatura della lamiera.

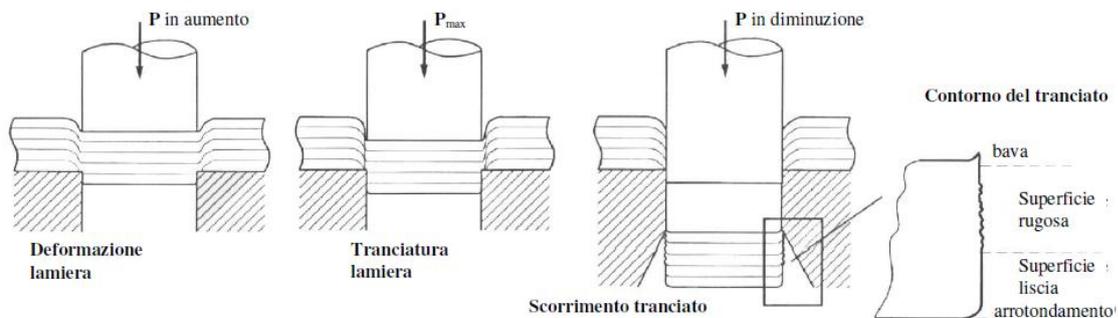


Figura 4: Fasi della tranciatura della lamiera

La forza di tranciatura, il cui calcolo è utile per la scelta della pressa e per la verifica della resistenza degli elementi dello stampo, non ha valore costante durante l'operazione, ma varia qualitativamente come rappresentato in figura.

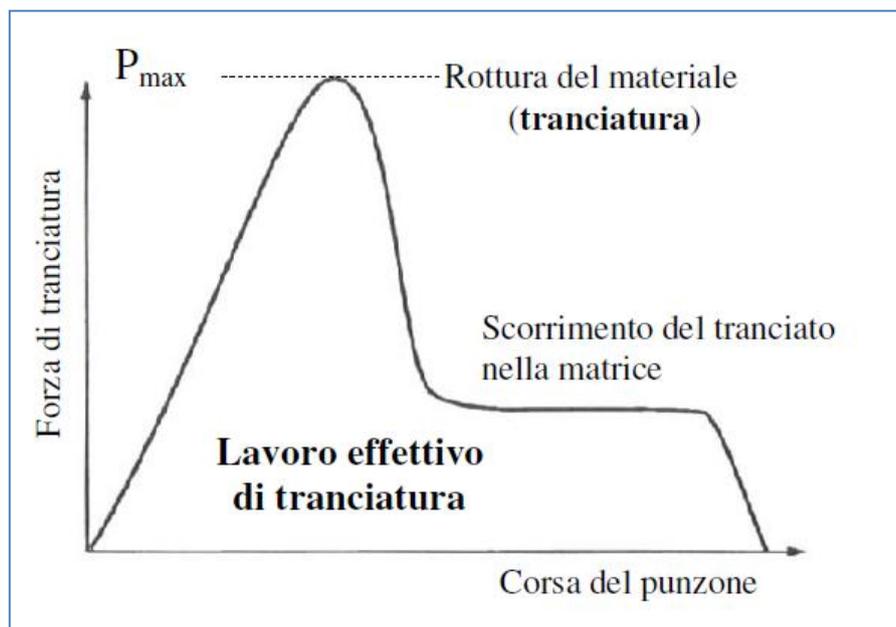


Figura 5: Andamento della forza di tranciatura

2.2 La cesoiatura

L'operazione di taglio per cesoiatura viene eseguita da macchine chiamate cesoie.

Le cesoie di impiego più frequente sono quelle a ghigliottina e a lame circolari. In entrambi i tipi, la separazione delle parti è prodotta dall'azione meccanica di due lame il cui sforzo supera la resistenza a rottura del materiale.



Figura 6: Cesoiatura a ghigliottina:
guida regolabile (A), la griglia paramani (B) e il comando a pedale (C).

La cesoia a ghigliottina è la più comune ed è composta da due lame, una fissa sotto il foglio di lamiera e l'altra, superiore, mossa da pistoni oleodinamici alimentati da una centralina idraulica (compressore idraulico).

Ogni macchina è dotata di un dispositivo chiamato premilamiera, che consente il bloccaggio del materiale durante il taglio, e da guide regolabili sulle quali viene appoggiata la lamiera.

Le cesoie a ghigliottina possono avere caratteristiche molto diverse, con lunghezza delle lame fino a 6 m e capacità di taglio fino a spessori della lamiera di 20-30 mm.

Spesso, specie nelle cesoie di grandi dimensioni, la lama superiore non è a profilo rettilineo ma è leggermente curva o inclinata in senso longitudinale.

Questi accorgimenti hanno lo scopo di ridurre lo sforzo di taglio sfruttando l'effetto forbice.

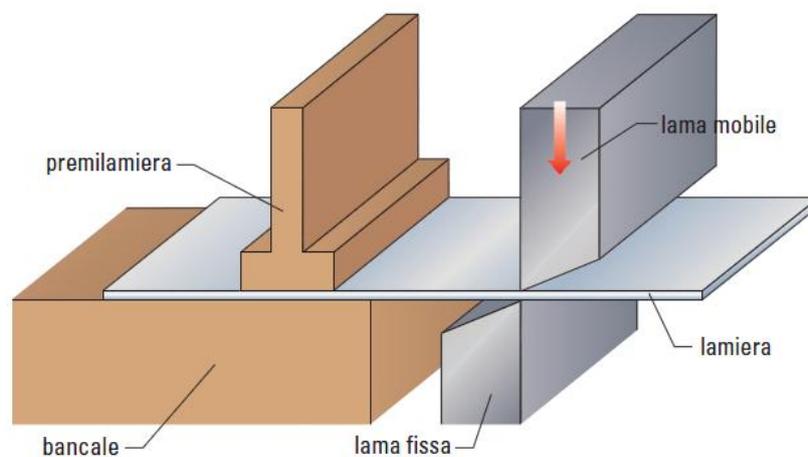


Figura 7: Principio di funzionamento della cesoia

L'effetto forbice sta a indicare una tranciatura che non avviene contemporaneamente lungo l'intera linea di taglio, ma impegna la lamiera in modo progressivo, proprio come fanno le forbici che tagliano un foglio di carta, evitando così pressioni eccessive.

CAPITOLO 3

Simulazione agli elementi finiti del processo di cesoiatura

Il software Simufact.Forming 10.0.1 utilizza il metodo degli elementi finiti (FEM, Finite Element Method).

Questa è una tecnica numerica atta alla ricerca di soluzioni approssimate a problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche.

Benchè esso competa in alcuni ambiti limitati con altre strategie numeriche (metodo delle differenze, metodo dei volumi finiti, metodo degli elementi al contorno, metodo delle celle, metodo spettrale, etc.), il metodo FEM mantiene una posizione dominante nel panorama delle tecniche numeriche di approssimazione e rappresenta il kernel di gran parte dei codici di analisi automatici disponibili in commercio.

3.1 Funzionamento del metodo FEM

Il Metodo FEM si applica a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute.

Nel continuum, ogni singolo elemento finito viene considerato un campo di integrazione numerica di caratteristiche omogenee.

La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia (*mesh*) composta da primitive (*elementi finiti*) di forma codificata (triangoli e quadrilateri per domini 2D, esaedri e tetraedri per domini 3D).

Nella sua forma originaria e tutt' ora più diffusa, il metodo agli elementi finiti viene utilizzato per risolvere problemi poggianti su leggi costitutive di tipo lineare. Tipici i problemi di sforzi - deformazioni in campo elastico, la diffusione del calore all'interno di un corpo materiale.

Alcune soluzioni più raffinate consentono di esplorare il comportamento dei materiali anche in campo fortemente non lineare, ipotizzando comportamenti di tipo plastico o visco-plastico.

3.2 Fasi per arrivare al modello

Per arrivare al modello agli elementi finiti si seguono delle fasi fondamentali, ognuna delle quali comporta l'inserimento di errori nella soluzione finale:

1. Modellazione: questa fase è presente in tutti gli studi di ingegneria: si passa dal sistema fisico ad un modello matematico, che astrae alcuni aspetti di interesse del sistema fisico, focalizzando l'attenzione su poche variabili aggregate di interesse e "filtrando" le rimanenti.

L'errore che può portare l'utilizzo di un modello deve essere valutato con prove sperimentali, operazione in genere dispendiosa per tempo e risorse.

2. Discretizzazione: in una simulazione per via numerica è necessario passare da un numero infinito di gradi di libertà (condizione propria del "continuum") ad un numero finito (situazione propria della mesh).

La discretizzazione, nello spazio o nel tempo, ha lo scopo di ottenere un modello discreto caratterizzato da un numero finito di gradi di libertà. Viene inserito un errore dato dalla discordanza con la soluzione esatta del modello matematico.

3.3 Definizione della mesh

Per i processi di formatura dei metalli esistono diverse formulazioni per definire la mesh in un programma agli elementi finiti, ad esempio l'Updated Lagrangian (UL), l'Eulerian o l'Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) [2].

Ognuno di questi metodi offre i propri vantaggi e i propri svantaggi e, in diverse condizioni, può essere scelta quella più adatta alle esigenze della simulazione.

Le tre tipologie di formulazione si caratterizzano così:

- 1. Formulazione Lagrangiana:** l' Updated Lagrangian (UL) è la più utilizzata nei processi di formatura, ed è una formulazione che può essere estesa come procedura di remesh.

Quindi la vecchia mesh è sostituita da una completamente nuova e le informazioni, di conseguenza, vengono trasferite dalla vecchia mesh a quella nuova. Il Remeshing è un metodo molto flessibile, infatti durante la simulazione la mesh può essere adattata per descrivere meglio la situazione attuale.

Può essere usato per evitare di avere una distorsione troppo elevata della mesh e per mantenere una mesh raffinata nelle aree critiche. Si hanno problemi nell'uso di remeshing quando bisogna andare a generare automaticamente una nuova mesh agli elementi finiti e nel mantenere una giusta precisione nel trasferimento delle informazioni tra la vecchia mesh vecchia e la nuova.

Questo modello per descrivere la mesh è stato quello usato nel lavoro di tesi dal Software.

- 2. Formulazione euleriana:** in una formulazione euleriana, invece, il materiale passa attraverso una mesh che è fissata nello spazio. Pertanto non si hanno più problemi per quanto riguarda l'eccessiva deformazione della mesh, ma in generale i confini del materiale non coincidono con i bordi degli elementi e bisogna usare procedimenti speciali per riuscire a seguire le superfici libere, o i confini tra i diversi materiali a contatto.

3. Formulazione ALE: La formulazione Arbitrary Lagrangian Eulerian è una combinazione della formulazione Lagrangiana e di quella Euleriana.

In tale formulazione lo spostamento della mesh non è necessariamente pari allo spostamento del materiale (formulazione Lagrangiana), né uguale a zero (formulazione Euleriana), ma lo spostamento della griglia della mesh è indipendente dallo spostamento del materiale.

Pertanto, lo spostamento dei nodi deve essere definito in modo tale che il movimento delle superfici libere possa essere seguito dalla mesh e deve essere impostato in modo tale che i valori delle variabili di stato possano essere calcolati nelle nuove posizioni nodali.

Il vantaggio di questa formulazione è che può essere usata sia per risolvere problemi con superfici libere usando l'approccio Euleriano, sia per evitare la distorsione degli elementi usando l'approccio Lagrangiano. Un altro vantaggio della formulazione ALE è che la topologia della mesh (numero di elementi e connessione tra di loro) è costante durante l'intera simulazione.

La formulazione Arbitrary Lagrangian Eulerian viene scelta per calcolare lo stato stazionario nei processi di formatura stazionari come la cesoiatura, mentre le altre formulazioni sono più utili nei transitori di inizio e di fine processo.

CAPITOLO 4

Il materiale: Weldom 700

Per il lavoro di tesi si è utilizzato il Weldom 700, un acciaio bonificato ad elevatissime caratteristiche resistenziali abbinate a buona tenacità, lavorabilità, saldabilità.

Le lavorazioni a freddo (piegatura, calandratura, cesoiatura) possono essere eseguite senza particolari difficoltà, purchè vengano tenuti presenti alcuni accorgimenti di lavorazione.

Questo materiale è facilmente saldabile a condizioni che vengano impiegati elettrodi appropriati.

Applicazioni del Weldom 700:

1. Mezzi di sollevamento
2. Macchine per il movimento della terra
3. Viabilità (cavalcavia, ponti)
4. Stoccaggio
5. Edilizia
6. Trasporto materiali (Betoniere, Autocarri e Rimorchi, Autocisterne)

Poiché il Weldom è più resistente dell'acciaio ordinario, è possibile ridurre il peso dei prodotti senza sacrificarne la robustezza meccanica.

In alternativa, è possibile realizzare un prodotto avente lo stesso peso ma dotato di caratteristiche avanzate (per esempio: allungando un braccio telescopico, aumentando la capacità di carico di una pala gommata o riducendo il numero di assali di una gru semovente).

Il Weldom è unanimemente considerato l'acciaio di qualità più elevata e uniforme.

4.1 Perché il Weldom?

L'acciaio da costruzione Weldom consente alle industrie di abbattere i costi [4].

Data la maggiore resistenza del Weldom rispetto all'acciaio ordinario, occorre meno materiale per ottenere prodotti di resistenza equiparabile.

Di conseguenza, si possono realizzare prodotti più leggeri (una caratteristica sempre molto apprezzata dall'utente finale).

Ciò consente alle aziende di vendere volumi maggiori e spuntare prezzi più elevati per ogni unità venduta.

Il prezzo per tonnellata del Weldom è superiore a quello dell'acciaio ordinario.

Ciò nonostante, passando al Weldom i costi del materiale possono diminuire.

Si utilizza, infatti, meno materiale (in alcuni casi, appena la metà). Se sono previste numerose operazioni di saldatura, è possibile ridurre sia la quantità di materiale d'apporto che il numero di ore di saldatura.

E conseguire in tal modo ulteriori risparmi.



Figura 8: Differenza prezzo-utile weldox/acciaio comune

4.2 Esempi di utilizzo del Weldom

Di seguito verranno mostrati alcuni esempi in cui il Weldom trova le sue applicazioni principali.



Figura 8: Escavatore

Azienda: Kocurek Excavators

Referente: David Kocurek

Località: Ipswich, Inghilterra

Prodotto: bracci extra lunghi per escavatrici

Sostituzione del materiale: da S355 a WELDOX 700 e WELDOX 900

Periodo: dieci anni di continui perfezionamenti

Risultati: bracci più lunghi grazie all'adozione di acciai più resistenti



Figura 9: Rimorchio

Azienda: VM Trailer AB

Referente: Peter Lindström

Località: Härryda, Svezia

Prodotto: rimorchi

Sostituzione del materiale: da WELDOX 500 a WELDOX 700

Risultati: riduzione dei pesi del 10% circa



Figura 10: Imbarcazione

Azienda: AMPM

Referente: Fabien Dillet

Località: La Motte Achard, Francia

Prodotto: Derive di imbarcazioni per regate

Sostituzione del materiale: da S355 a WELDOX 1100

Periodo: 1998-'99

Risultati: migliore distribuzione dei pesi, maggiore resistenza statica e all'affaticamento



Figura 11: Gru

Azienda: SM TRIPLEX AS

Referente: Jan Geir Kristiansen

Località: Averøy, Norvegia

Prodotto: gru da coperta

Sostituzione del materiale: da S355 a WELDOX 700

Periodo: 2001

Risultati: riduzione del 30% del peso della gru e della piattaforma consente di utilizzare meno zavorra, riducendo quindi il pescaggio della nave e il consumo di carburante



Figura 12: Pompe per calcestruzzo

Azienda: Sany Heavy Industry Co Ltd

Referente: Liang Wengen

Località: Changsha, Cina

Prodotto: pompe per calcestruzzo

Sostituzione del materiale: da bracci d'importazione finiti a bracci in WELDOX 900 realizzati in proprio

Periodo: 1999

Risultati: Grazie alla disponibilità di WELDOX in Cina, l'azienda è stata in grado di avviare una produzione autonoma nei propri impianti



Figura 13: gru

Azienda: Liebherr - Werk Ehingen GmbH

Referente: Josef Hauser

Località: Ehingen, Germania

Prodotto: gru semoventi

Sostituzione del materiale: da WELDOX 960 a WELDOX 1110

Periodo: 2001

Risultati: maggiore capacità di sollevamento e peso della gru invariato

4.3 Un acciaio alto resistenziale

Le tre proprietà che fanno del Weldox un acciaio alto resistenziale sono:

- 1. Tolleranze di spessore più contenute.** Grazie al fatto che la lamiera viene prodotta in uno dei laminatoi più avanzati al mondo, il Weldox ha le tolleranze di spessore più contenute fra i laminati esistenti sul mercato. Durante ogni passata, un sistema computerizzato controlla più di cento volte al secondo lo spessore della lastra. Tra una passata e l'altra, i cilindri vengono ricalibrati automaticamente per compensare eventuali deviazioni. Dopo che la lamiera è stata laminata, si misura e si registra lo spessore per garantire la conformità delle tolleranze di spessore rispetto alle specifiche di precisione.
- 2. Qualità più elevata della superficie.** Effettuando costantemente la messa a punto di ogni fase del processo, dalla lavorazione sino all'immagazzinamento, si assicura la massima qualità possibile della superficie per ogni lamiera prodotta. Prestando particolare attenzione al fenomeno della formazione dell'ossido superficiale, esso si riduce al minimo grazie al continuo miglioramento del processo e all'asportazione di tale strato prima della laminazione. Per far sì che la qualità della superficie si mantenga elevata anche dopo il trasporto o l'immagazzinamento, si applica alla lamiera una speciale vernice primer dopo l'ultima fase della lavorazione.
- 3. Migliore planarità.** Il Weldox ha una planarità eccezionale, un risultato il cui merito va ricercato nella perfetta laminazione. Inoltre se l'acqua di raffreddamento è distribuita uniformemente sull'intera superficie della lamiera, può raffreddarsi più uniformemente e mantenere la propria planarità durante l'intero processo di tempra. Ciò contribuisce a conferire al Weldox una planarità superiore alle lamiere della concorrenza.

4.4 Le implicazione di essere un acciaio alto resistenziale

La conseguenza diretta delle proprietà descritte nel paragrafo precedente sono:

- 1. Calcoli più precisi dei pesi.** Grazie alle tolleranze di spessore contenute, è possibile calcolare i pesi con precisione maggiore rispetto ad altri tipi di acciai. Quando i componenti da costruzione hanno dimensioni relativamente grandi, anche modeste deviazioni di spessore possono significare sprechi di molte tonnellate di materiale. Dal momento che lo spessore della lamiera del Weldox ha valori molto prossimi a quelli nominali, è inoltre possibile adottare margini di sicurezza minori. Ciò assicura un utilizzo più efficiente del materiale, oltre a consentire di ottimizzare le applicazioni.
- 2. Migliore rifinitura della superficie.** L'elevata finitura superficiale non dev' essere più considerata un requisito da soddisfare solo per prodotti di largo consumo quali le automobili. Sempre più spesso si richiede che la finitura superficiale sia tale da conferire un aspetto esteticamente gradevole al prodotto, anche quando si tratta di macchinari da costruzione o gru semoventi. La qualità superficiale elevata e uniforme del Weldox aiuta a soddisfare questa esigenza del mercato. La vernice primer assicura il mantenimento della qualità della superficie fino all'impianto di trasformazione e al tempo stesso contribuisce a rendere più pulito l'ambiente di lavoro.
- 3. Maggiore adattabilità.** L'eccellente planarità del Weldox attenua l'esigenza di spianare e serrare la lamiera prima della saldatura e del taglio, con conseguente semplificazione della produzione. Inoltre la planarità riduce al minimo gli effetti delle sollecitazioni termiche che possono verificarsi durante la saldatura, per cui consente di ottenere prodotti finiti con tolleranze geometriche più contenute.

4.5 Il Weldom: un materiale di facile utilizzo

È facile lavorare il Weldom in officina, soprattutto perché la lamiera è eccezionalmente pura e la composizione chimica è simile a quella di un acciaio da costruzione ordinario. Rispetto agli altri acciai alto resistenziali, il Weldom ha delle proprietà più uniformi del materiale, che contribuiscono a renderlo più facilmente lavorabile. Grazie a dei controlli di processo e dei trattamenti termici tra i più avanzati al mondo, la lamiera ha costantemente una bassa concentrazione di inclusioni non metalliche, delle tensioni interne distribuite in modo omogeneo e delle proprietà meccaniche uniformi.

- 1. Piegatura.** Poiché il Weldom è più resistente dell'acciaio ordinario, per piegare il materiale occorre una maggiore forza a parità di spessore della lamiera. Ma è anche vero che, grazie alla maggiore resistenza del Weldom, lo spessore della lamiera può essere inferiore. In pratica, ciò si traduce spesso nella riduzione della forza occorrente per piegare il materiale. Rispetto ad altri acciai alto resistenziali, il Weldom ha tolleranze di spessore minori e proprietà meccaniche più uniformi.
- 2. Saldatura.** Il Weldom può essere saldato con tutti gli altri tipi di acciaio, utilizzando tutti i metodi di saldatura e i materiali d'apporto più comuni. Tuttavia, per premunirsi contro il rischio di cricche a freddo, può essere necessario preriscaldare il materiale. La temperatura di preriscaldamento non deve essere così elevata come quando si saldano altri acciai alto resistenziali, perché nel Weldom la concentrazione di elementi leganti è inferiore.
- 3. Taglio.** È possibile tagliare il Weldom facendo ricorso a tutti i metodi comuni gas-plasma, laser e getto d'acqua abrasiva (AWJ). Il Weldom è più facile da tagliare della maggior parte degli altri acciai alto resistenziali. La lamiera non si sposta in modo significativo sul piano di taglio, perché le tensioni interne sono minori e distribuite più uniformemente.

4.6. Il grafico

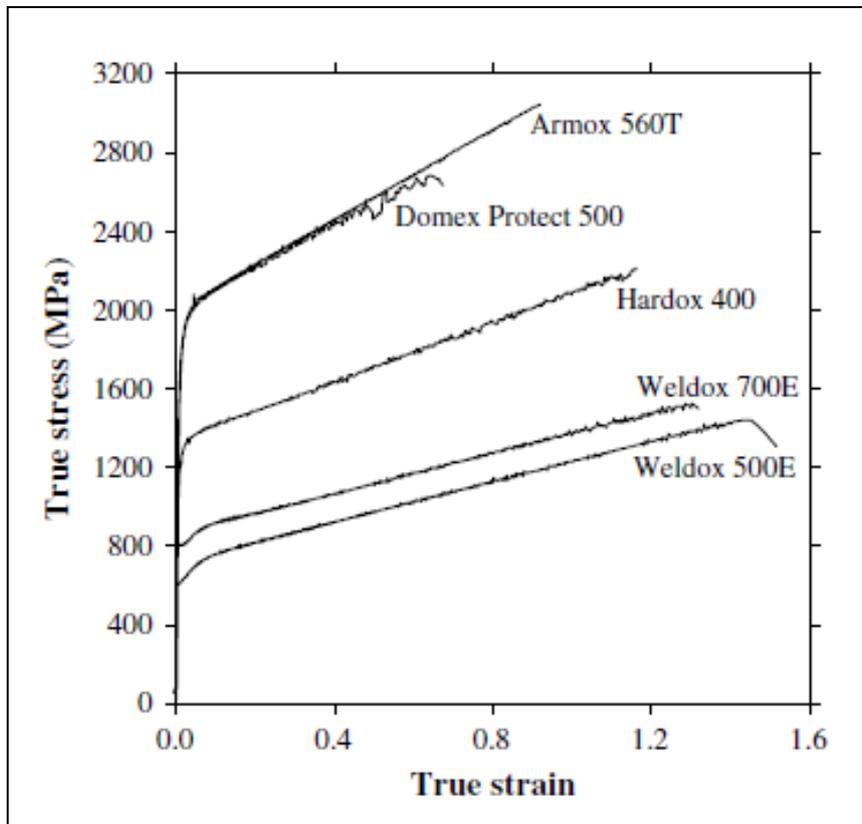


Figura 14: True stress su True strain per 4 tipi d'acciaio

Il grafico del Weldox 700 (figura 14), preso in letteratura [5], riguardante l'andamento del true stress sul true strain è stato direttamente inserito nel programma Simufact.Forming 10.0.1 per completare le caratteristiche del materiale ed avere una completa e accurata descrizione del comportamento del materiale.

Ogni singolo punto della curva true stress - true strain è stato inserito attraverso l'apposito programma presente in Simufact.Forming 10.0.1 che è possibile visualizzare nella figura 15.

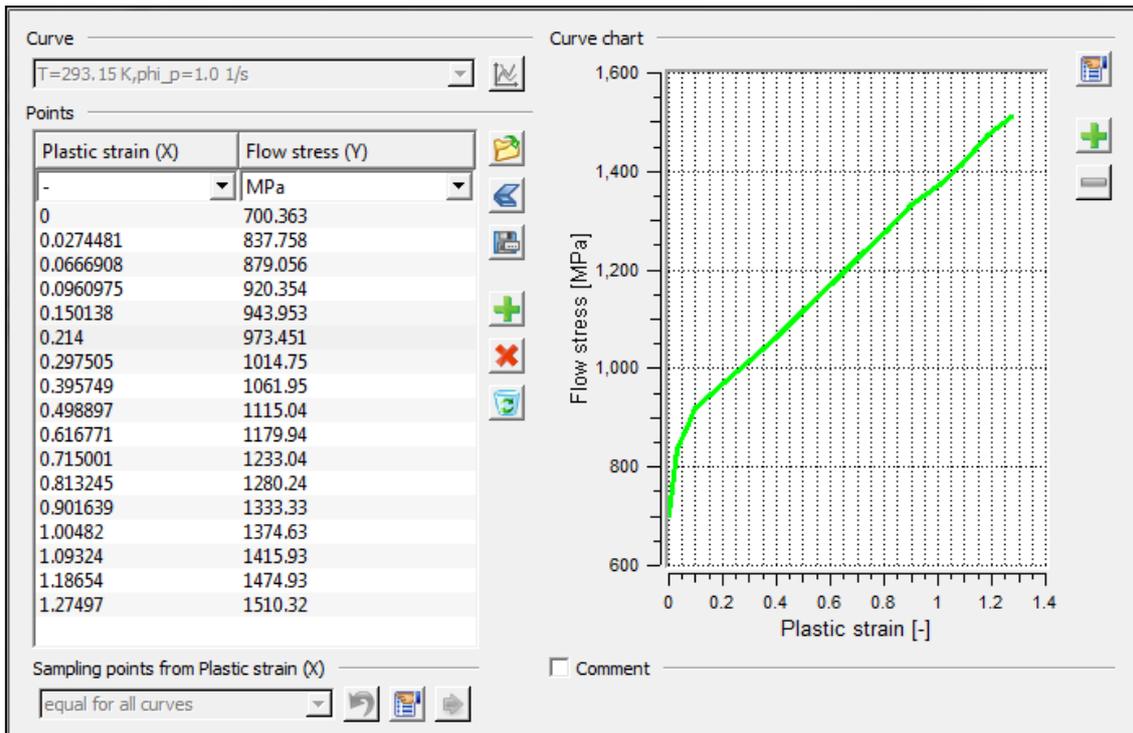


Figura 15: programma di inserimento grafici stress/strain in Simufact.Fforming 10.0.1

Si è preso punto per punto il grafico trovato in letteratura e quindi si sono inseriti i 17 punti visualizzabili nella tabella in Figura 15. Così facendo il programma di simulazione utilizzerà questa curva flow stress - plastic strain per la simulazione della cesoiatura.

4.7 Proprietà del Weldox 700

4.7.1 Composizione chimica

C ^{*)} Max %	Si ^{*)} Max %	Mn ^{*)} Max %	P Max %	S Max %	Cr ^{*)} Max %	Cu ^{*)} Max %	Ni ^{*)} Max %	Mo ^{*)} Max %	B ^{*)} Max %
0.20	0.60	1.60	0.020	0.010	0.70	0.30	2.0	0.70	0.005

The steel is grain refined. *)Intentional alloying elements.

Figura 16: Tabella delle proprietà chimiche del Weldox700

4.7.2 Proprietà meccaniche

Thickness mm	Yield strength ¹⁾ R _{p0.2} min MPa	Tensile strength ¹⁾ R _m MPa	Elongation A ₅ min %	Typical hardness HBW
4 - 53	700	780 - 930	14	260 - 310
(53) - 100	650	780 - 930	14	260 - 310
(100) - 160	650	710 - 900	14	240 - 290

Figura 17: Tabella delle proprietà meccaniche del Weldox 700

4.7.3 Proprietà generali

Modulo di elasticità	192 GPa
Coefficiente di Poisson	0,28
Densità	8027,2 Kg/m ³
Conducibilità termica	16,8626 W/mK
Calore specifico	502 J/kgK
Minima tensione di snervamento	90 MPa
Costante di snervamento	1451,9 MPa
Coefficiente di incrudimento	0,6

Figura 18: Tabella proprietà generali Weldox 700

CAPITOLO 5

Il comportamento elasto-plastico dei materiali

La teoria della plasticità indica la modellazione matematica atta a rappresentare il comportamento plastico dei materiali e delle strutture, definendo le relative relazioni costitutive [6].

La teoria attualmente a cui ci si riferisce più comunemente è la cosiddetta teoria incrementale della plasticità (o Flow theory), basata su relazioni costitutive scritte in termini di incrementi infinitesimi di tensioni, deformazioni e spostamenti.

La complessità del fenomeno è dovuta sia al carattere irreversibile del fenomeno plastico, sia al suo carattere anolonomo, nel senso che la deformazione finale raggiunta dipende non solo dal valore finale del carico, ma anche dal percorso di carico, cioè dalla storia passata della modalità di applicazione del carico stesso.

5.1 La teoria della plasticità

La teoria incrementale della plasticità si basa sui seguenti assiomi:

1. I materiali presentano una soglia di resistenza, cioè le tensioni possibili sono limitate. Ciò si formalizza assumendo che, per ciascun punto della struttura, sia possibile definire un dominio dello spazio delle tensioni, chiamato dominio elastico del materiale, i cui punti (interni e di frontiera) siano i soli rappresentativi di stati di tensione ammissibili. Tale dominio può essere rappresentato dalla condizione di ammissibilità plastica:

$$f(\sigma) \leq 0$$

mediante l'uso della la funzione di snervamento $f(\sigma)$.

2. Sono presenti deformazioni irreversibili, cioè in un ciclo di carico e scarico la struttura non recupera completamente la configurazione iniziale.

Ciò si formalizza separando gli incrementi di deformazione nelle due componenti elastica $\dot{\epsilon}^e$ e plastica $\dot{\epsilon}^p$, di cui solo la prima è legata all'incremento di tensione:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^p$$

3. Per bassi livelli di tensione il comportamento è schematizzabile come elastico.

Ciò si formalizza assumendo che la componente plastica $\dot{\epsilon}^p$ dell'incremento di deformazione possa essere diversa da zero solo se la tensione è disposta sulla frontiera del dominio elastico, cioè:

$$\dot{\epsilon}^p \neq 0 \iff f(\sigma) = 0$$

Tale modello elasto-plastico prevede le seguenti tipologie di comportamento:

fase elastica : $f(\sigma) < 0$;

fase plastica : $f(\sigma) = 0 \cup \dot{f}(\sigma) = 0$;

ritorno elastico : $f(\sigma) = 0 \cup \dot{f}(\sigma) < 0$.

Il modello non prevede invece una soglia delle deformazioni possibili, quindi non limita i valori delle deformazioni plastiche $\dot{\epsilon}^p$.

Nel modello elasto-plastico proposto si ammette inoltre che, come avviene per le deformazioni elastiche, le deformazioni plastiche siano istantanee, cioè siano assenti fenomeni viscosi di ritardo tra le deformazioni plastiche e le azioni che le hanno determinate (rate independent plasticity).

La rimozione di tale ipotesi porta ai modelli visco-plastici (rate dependent plasticity).

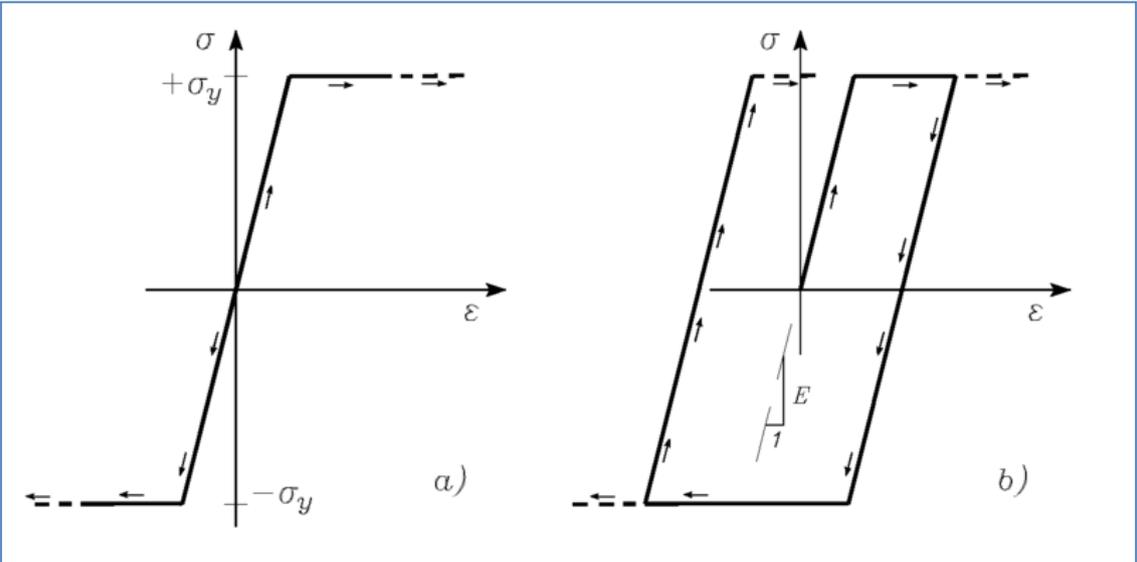


Figura 19: Modello elasto-plastico perfetto

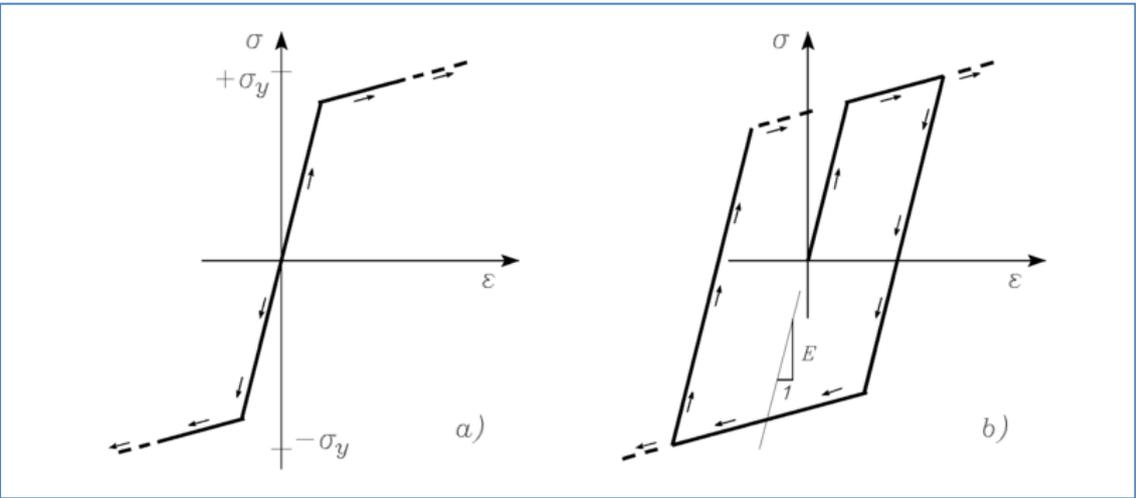


Figura 20: Modello elasto-plastico incrudente

Valgono infine le seguenti osservazioni:

Si è detto che il dominio elastico dipende in generale dalla storia di carico.

Se ciò effettivamente ha luogo si parla di legame elasto-plastico incrudente.

Se invece il dominio elastico è indipendente dalla storia di carico, si parla di legame elastico-plastico perfetto (o ideale).

La formulazione del legame costitutivo in termini di incrementi infinitesimi di tensione e deformazione permette di trattare più facilmente il differente comportamento in fase di carico e di scarico, ed è pertanto estendibile a processi di carico del tutto generici.

Il comportamento elasto-plastico è anomalo, nel senso che in generale dipende dal percorso di carico. Infatti la presenza di deformazioni plastiche irreversibili implica che lo stato di tensione e deformazione presente nel corpo a seguito dell'applicazione di un carico dipenda non solo dall'entità finale del carico ma anche dalle modalità di applicazione.

È la caratteristica di quei materiali in grado di deformarsi in modo permanente, e cioè di mantenere la deformazione anche quando la sollecitazione meccanica termina di agire.

5.2 Lo snervamento del materiale

Il punto di separazione tra il comportamento elastico e quello plastico è detto snervamento, e corrisponde al momento in cui alcuni legami chimici che tengono insieme le particelle costituenti il materiale cominciano a spezzarsi, ed insorge il fenomeno plastico.

Più aumenta il carico, maggiore è il numero di legami che si rompe: diretta conseguenza è l'aumento della deformazione plastica residua. Quando poi si rompono tutti i legami, il provino si spezza.

In generale un materiale plastico può avere tre comportamenti diversi, e cioè può essere:

1. perfettamente plastico;
2. plastico raddolcente;
3. plastico incrudente.

Un materiale perfettamente plastico, o a plasticità perfetta ha un tratto plastico parallelo all'asse delle deformazioni, cioè la tensione in fase plastica è costantemente uguale alla sua σ_y di snervamento.

Questa condizione è senza dubbio un'astrazione teorica, ma è molto utilizzata nei modelli di calcolo agli stati limite per l'acciaio.

Un materiale plastico incrudente è caratterizzato da una capacità residua del materiale plasticizzato di assorbire incrementi di tensione, e cioè di avere tensioni in fase plastica superiori al valore di snervamento σ_y .

In altre parole, il diagramma σ - ϵ è caratterizzato, dopo lo snervamento, da un altro tratto crescente; questo può continuare a crescere fino alla rottura, o arrivare ad un valore massimo per poi decrescere fino a raggiungere σ_y .

I metalli sono in genere dei materiali incrudenti, ed è il motivo per cui le lavorazioni plastiche a freddo come estrusione, imbutitura, laminazione, pallinatura, stampaggio, trafilatura conferiscono maggior durezza al semilavorato che si ottiene.

Questo però non comporta alcun incremento del modulo di elasticità longitudinale del materiale.

Come già detto, nei modelli di resistenza, al di là del comportamento reale, è frequente l'uso del comportamento perfettamente plastico; nel caso in cui sia significativo considerare anche il raddolcimento o l'incrudimento del materiale, la curva di plasticizzazione è sostituita con una retta inclinata (raddolcimento perfetto e incrudimento perfetto).

CAPITOLO 6

Il valore di danneggiamento Cockroft-Latham

Per progettare correttamente un' operazione di formatura è necessario comprendere il comportamento a rottura del materiale desiderato sotto una particolare condizione di lavoro [7].

Al fine di valutare il potenziale di frattura di un materiale durante un particolare processo, è necessario combinare un test di laboratorio con un criterio di frattura :

1. la prima stabilisce la duttilità del materiale in condizioni standard (cioè prova di trazione , prova di compressione , prova di torsione , etc...)
2. la seconda estende i risultati della prova di lavorabilità allo stress e alle condizioni di deformazione esistenti nel processo di deformazione.

Dal punto di vista tecnico esistono due tipi di fratture , duttile e fragile , rispetto alla quantità di deformazione plastica che il materiale subisce prima della rottura.

Solo la frattura duttile sarà considerata per ora, poiché questa è la principale che si verifica durante le operazioni di lavorazione dei metalli.

Per un dato materiale, la frattura è molto influenzata dalla temperatura e dalla velocità di deformazione, dalla storia di carico del pezzo e dalle condizioni di processo.

Il problema dell'approccio numerico è di riuscire a prevedere la frattura duttile e riuscire poi a eliminare o separare gli elementi della mesh per simulare la nascita delle micro cricche.

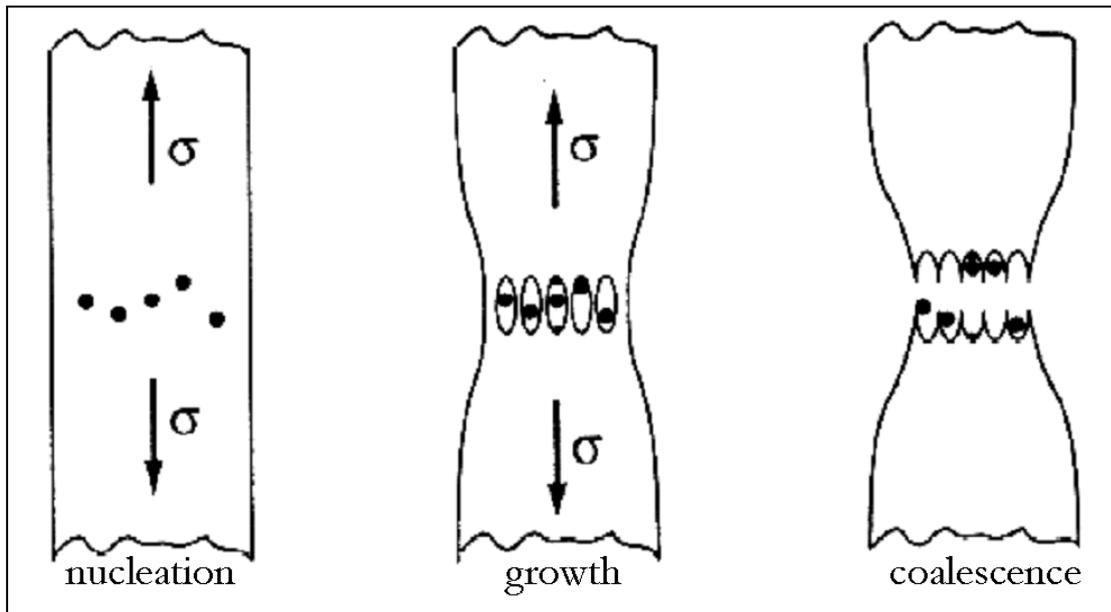


Figura 21: Nucleazione, crescita e coalescenza dei micro-vuoti

In micro-meccanica la frattura duttile è composta da tre diverse fasi :

1. **Nucleazione** dei micro vuoti in corrispondenza di inclusioni, particelle di seconda fase, confini dei grani, attraverso il distaccamento tra particelle e matrice o attraverso la cricatura delle particelle quando il materiale è deformato.
2. **Crescita** , i microvuoti possono crescere sotto l'influenza di una tensione applicata e i campi di deformazione crescono di una dimensione che eccede quella delle particelle originarie: cambia sia il volume che la forma dei vuoti.
3. **Coalescenza** , non appena viene raggiunta o una frazione volumetrica critica di micro vuoti o una distanza critica tra di essi, la matrice compresa tra i difetti cede, portando alla formazione di micro cricche. Le cricche poi propagano aggregando al loro apice altri microvuoti.

6.1 Criterio di frattura

Lo scopo principale di un criterio di frattura è predire il sito di inizio e il livello di deformazione in cui si verifichi la cricca di in un materiale durante una particolare lavorazione dei metalli.

Viene introdotto il concetto di "danno" ed è definito come il deterioramento della capacità del materiale di portare carichi.

Da un punto di vista generale, un criterio di frattura deve rappresentare il degrado del materiale dovuto alla formazione di vuoti e dovrebbe rilevare la quantità precisa di danni causando così la rottura del materiale.

L'obiettivo è di stabilire un parametro significativo che descrive la quantità del danno nel materiale durante la deformazione, e questo parametro particolare raggiunge il valore critico quando si verifica frattura.

Quando un criterio di frattura è scelto, il valore critico del suo significativo parametro è determinato sperimentalmente da un test di lavorabilità (sotto condizioni standard) e rappresenta la condizione in cui si verifica una frattura anche nel processo reale da analizzare.

Al giorno d'oggi, i modelli di danno sono spesso implementati in codici numerici al fine di prevedere il fallimento del materiale e di ottimizzare i processi.

I modelli di danno possono essere distinti in due categorie principali , a seconda dell'approccio utilizzato per derivare la loro formulazione :

- 1. modelli di danno non accoppiati** , in cui il danno non riguarda direttamente le proprietà del materiale ma rappresenta un calcolo di post- trattamento dell' analisi agli elementi finiti.
- 2. modelli di danno accoppiati** , in cui il degrado del materiale è dovuto alla deformazione (e quindi alla formazione di vuoti) ed è quindi progressivamente preso in considerazione e utilizzato per ridurre la resistenza del materiale. La resistenza del materiale per ogni calcolo dipende dalla quantità di danni subiti.

Di seguito si mostrerà il diverso comportamento in termini di proprietà elasto-plastiche, quando un modello di danno è implementato in simulazione numerica.

Solitamente, per materiali metallici, esiste una soglia (ϵ_{th}) per cui inizia la differenza tra materiale danneggiato e l'integrale delle proprietà del materiale interessato; mentre il danno aumenta, la resistenza del materiale (in termini di tensione di flusso) viene progressivamente diminuita a causa della formazione di vuoti.

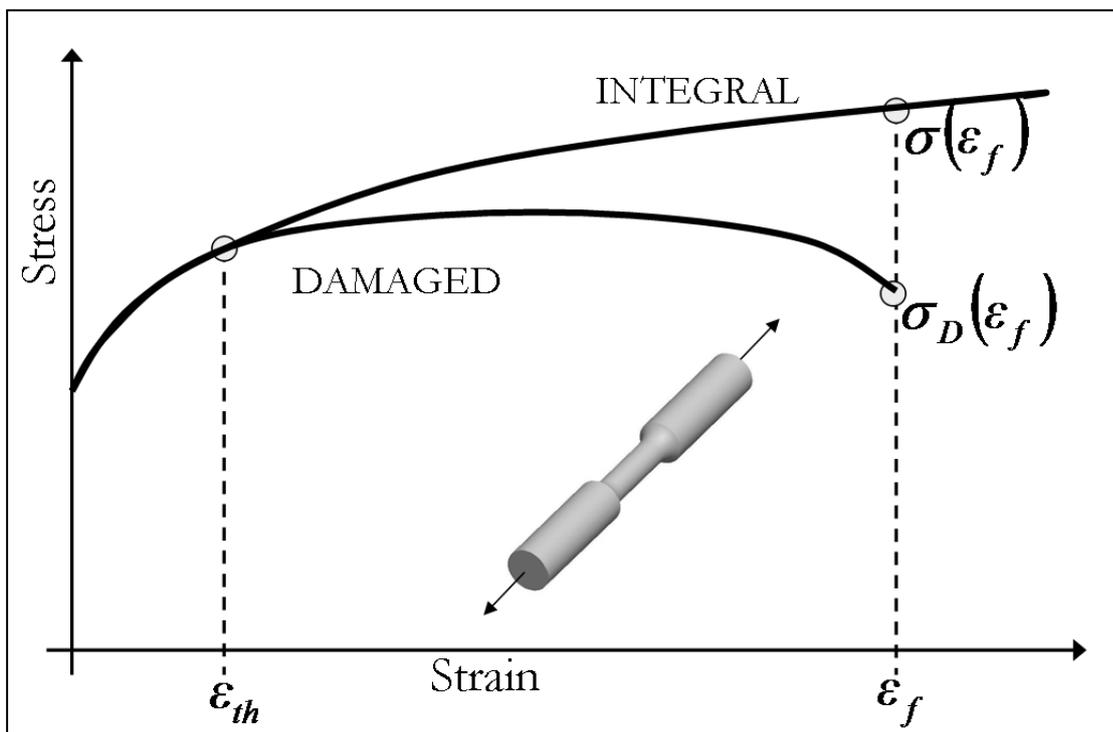


Figura 22: Differenza tra damaged curve e integral curve

6.2 Danneggiamento di Cockfort e Latham

In molti processi come ad esempio la forgiatura o l'estrusione, il criterio di danneggiamento di Cockcroft e Latham viene usato per riuscire a prevedere l'eventuale formazione di cricche durante la lavorazione e cercare di evitarle. Questo criterio di danneggiamento è definito empirico perché deriva da osservazioni fatte su specifici processi di formatura.

Normalmente, l'attuazione di questo tipo di approccio nella simulazione numerica è semplice e veloce, e può dare una buona predizione della frattura nei casi analoghi a cui sono derivati, ma quando lo stato di stress o la storia dell'affaticamento è troppo diversa da quella di riferimento tali modelli non possono predire accuratamente la propagazione della cricca.

Il criterio di Cockcroft e Latham proposto è probabilmente il danno più diffuso in applicazioni che formano il metallo:

$$C = \int_0^{\varepsilon_f} \sigma_1 d\varepsilon$$

La variabile di danno C rappresenta l'energia interna di deformazione plastica necessaria a deformare il materiale fino al raggiungimento della frattura a ε_f .

Il ruolo fondamentale della trazione (rappresentato dalla prima componente della tensione principale) sulla formazione di cricche è alla base dell'espressione.

In considerazione della limitata gamma di situazioni in cui la formula di Cockcroft e Latham fornisce un modello previsionale di frattura affidabile, una versione normalizzata è stata introdotta al fine di migliorare le sue capacità quando lo stato di stress non è puramente a trazione:

$$C = \int_0^{\varepsilon_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\varepsilon$$

Freudenthal ha proposto una formulazione diversa rispetto a Cockcroft e Latham, basandosi sul lavoro di deformazione plastica calcolato e utilizzando la sollecitazione equivalente che si verifica grazie alla prima componente principale della tensione:

$$C = \int_0^{\varepsilon^f} \bar{\sigma} (d\varepsilon)$$

Ma quella che si è utilizzata è la tensione effettiva moltiplicata per un fattore di concentrazione delle tensioni adimensionale:

$$C = \int_0^{\varepsilon^f} \sigma^* d\varepsilon$$

dove σ^* è la massima tensione principale nel pezzo e C è la costante di Cockcroft Latham.

6.3 La prova di trazione e il valore di Cockcroft-Latham

Il potenziale di frattura, definito come il rapporto tra il fattore di crescita dei microvuoti della frattura duttile e il danneggiamento C, risulta essere in un campo variabile che rappresenta il danneggiamento locale nel materiale.

Il potenziale di frattura è una variabile tempo dipendente e può essere trattata come una variabile interna extra durante il remeshing.

Per ricavare il valore C di danneggiamento si è effettuata una prova di trazione del materiale utilizzato per la tesi, cioè il Weldox 700.

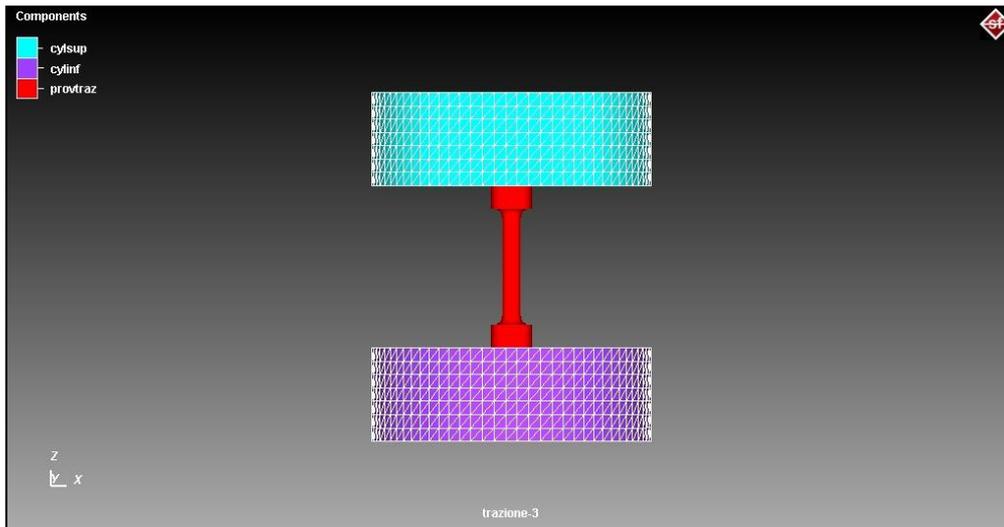


Figura 23: Prova di trazione per il Weldox 700 in Simufact.Formin 10.0.1

Nella figura 23 si possono notare il sistema formato dallo stampo superiore e dallo stampo inferiore a cui è attaccato il provino in Weldox700 per la trazione.

Tra i parametri più importanti impostati sono:

1. il tipo di materiale usato per lo stampo superiore e inferiore: X40CrMo
2. l'attrito statico coulombiano: 0,18
3. il fattore di attrito interfacciale: 0,3

E di seguito l'albero dei comandi utilizzato per impostare la prova di trazione per il Weldox 700.

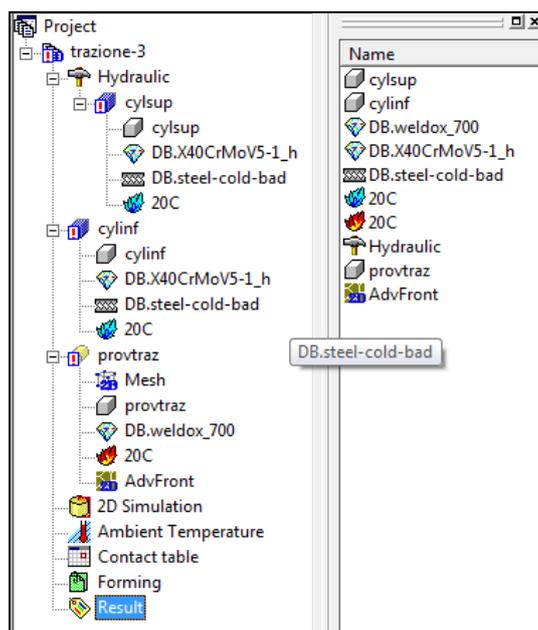


Figura 24: Albero dei comandi per la prova di trazione del Weldox 700

A fine simulazione si può andar a vedere il danneggiamento di Cockroft e Latham direttamente in Simufact.Forming 10.0.1

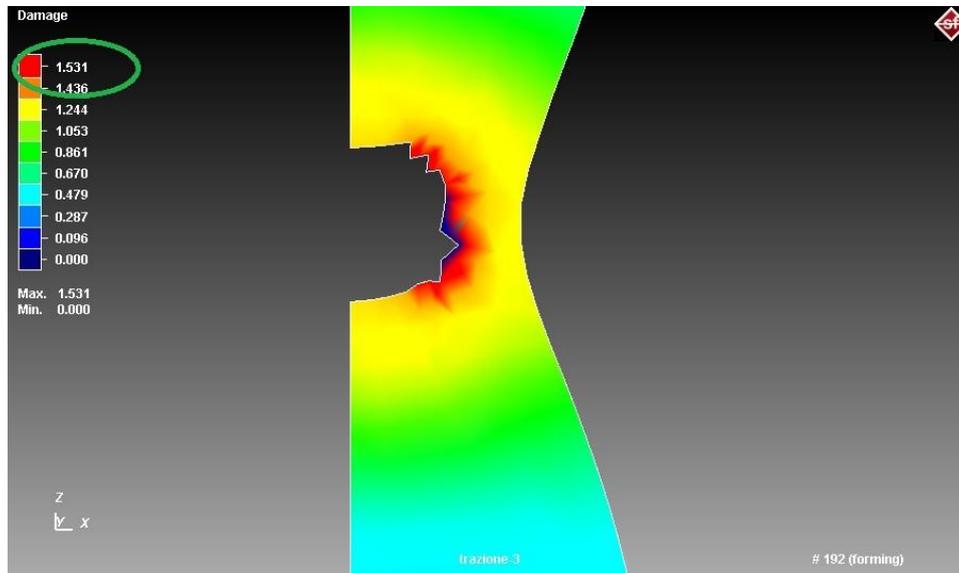


Figura 25: Inizio rottura del provino di trazione con valore C in evidenza

Finita la simulazione, per ricavare il coefficiente di danneggiamento si deve andar ad osservare i risultati. Nella parte damage dei risultati è sufficiente andar nel momento in cui inizia a rompersi il provino, e di lì andar ad osservare il valore con lo stesso colore. Nel caso preso in esame 1,531.

Il valore di danneggiamento Cockroft e Latham ricavato dalla simulazione e arrotondato analiticamente è quindi inserito nella simulazione FEM del processo di cesoiatura :

Costante C	1,5
------------	-----

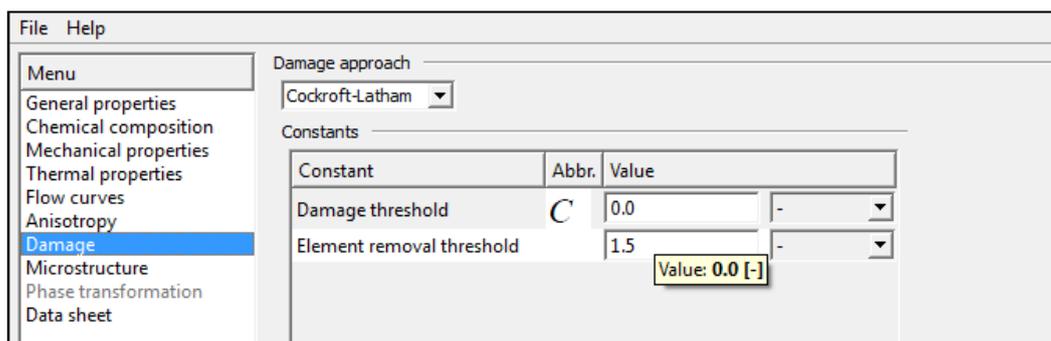


Figura 26: Tabella per l'inserimento del valore di rimozione per il danneggiamento materiale

6.4 Criterio di rimozione del materiale

Nel processo di cesoiatura studiato attraverso il programma Simufact.Forming, 10.0.1 è stato attribuito il valore di danneggiamento di Cockcroft -Latham pari a 1,5 al Weldox 700.

Ad ogni incremento della simulazione, i campi di deformazione sono impiegati nella valutazione del criterio frattura di Cockcroft e Latham per stimare se e dove inizia la frattura.

Quindi, se il valore del danneggiamento all'interno della lamiera raggiunge quello critico del materiale, si arriva ad avere frattura, che avviene nel punto preso in esame [8].

Il diagramma in figura 27 schematizza la discesa della cesoia nel laminato:

1. fase elastica
2. fase elastoplastica
3. fase elastoplastica con inizio del danno
4. fase di inizio e propagazione della cricca con finale rottura

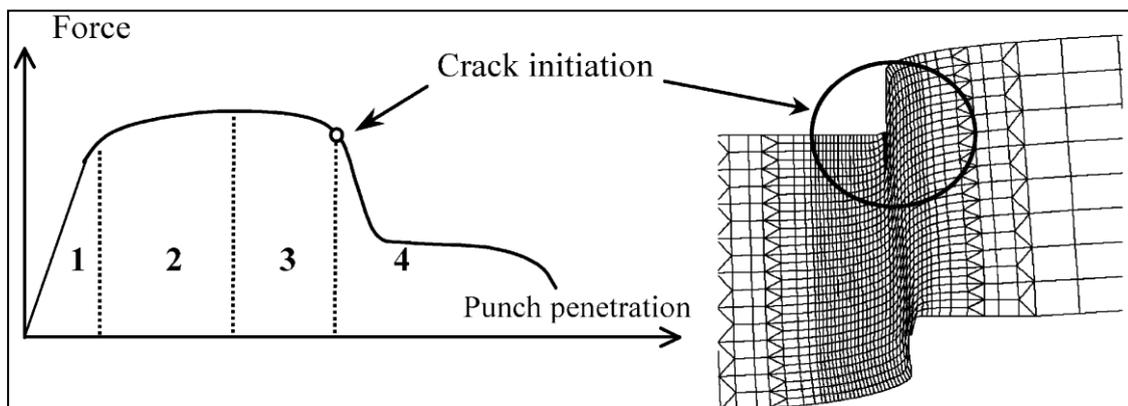


Figura 27: Diagramma delle 4 fasi dovute al processo di cesoiatura

In figura 28 si può osservare la differenza tra le curve sperimentali e teoriche di forza-penetrazione:

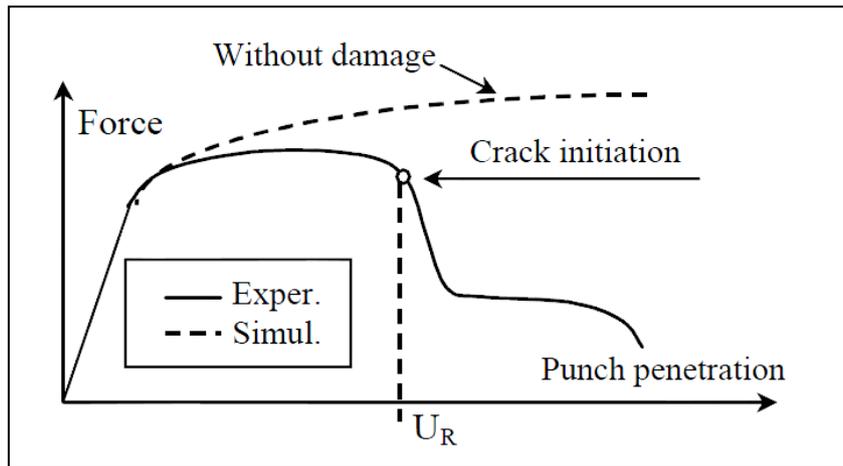


Figura 28: Differenza curve con/senza danno materiale

Invece la figura 29 spiega come lavora il programma agli elementi finiti per il criterio di danneggiamento:

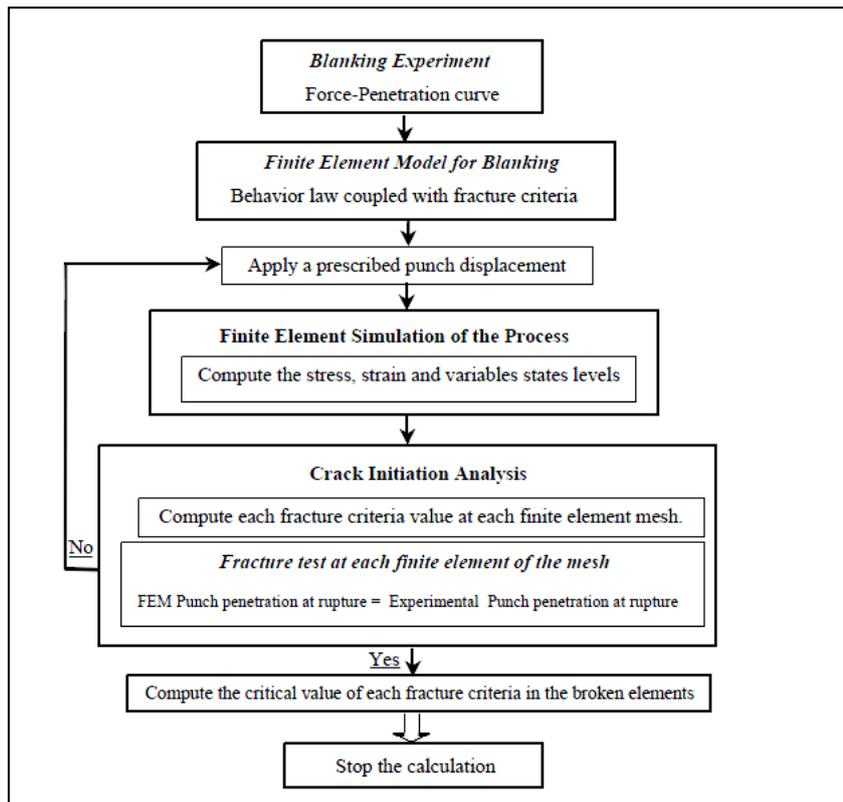


Figura 29: Il modello agli elementi finiti con il criterio di rottura

CAPITOLO 7

Modello FEM del processo di cesoiatura

Per la creazione del modello numerico nel software di simulazione Simufact.Forming 10.0.1 bisogna impostare un apposito upsetting, che di seguito viene illustrato.

7.1 Geometria

Grazie ad un programma di disegno preesistente in Simufact.Forming è stato possibile creare le geometrie della nostra simulazione senza dover usare programmi come AutoCad o SolidWorks.

Le geometrie sono state disegnate tenendo conto dei parametri generalmente usati nei processi industriali e in particolare per la lama superiore l'angolo di cesoiatura α non ci interessa.

Nel caso della nostra simulazione 2D si considera solo un piano trasversale alla lama superiore e quindi non ha nessuna influenza l'angolo α (si può modellare solo un processo di tranciatura a lame parallele) ai fini di questa simulazione.

Normalmente la geometria 3D delle lame è determinata da tre parametri:

1. **Angolo di cesoiatura:** la lama superiore è inclinata di un dato angolo α rispetto alla lama fissa per ridurre il più possibile la sezione del taglio. Ha un notevole effetto sulla forza di taglio e un effetto importante sulla distorsione che può verificarsi al taglio di nastri di spessore ridotto. L'angolo di taglio è inferiore a 3° .

- 2. Angolo di spoglia delle lame:** è' ottenuto montando la lama superiore inclinata rispetto allo slittone di 1 o 2 gradi. Ha il compito di ridurre la deformazione della striscia tagliata in senso trasversale. Unico inconveniente è che, in prossimità del taglio, si ha inevitabilmente uno schiacciamento più o meno pronunciato sia sulla striscia tagliata che sulla lamiera. Influenza leggermente la forza di taglio. Questo angolo è tipicamente pari a 3 °.
- 3. Angolo di discesa dello slittone portalama superiore:** ha come scopo l'inclinazione della lama mobile rispetto alla lama fissa per evitare l'attrito tra le stesse diminuendo la forza di cesoiatura e aumentando la durata delle lame. E' un parametro importante per la lavorazione delle lamiere.

Per comodità di simulazione l'angolo di spoglia non è stato attribuito alla stampo superiore ma a tutto il sistema stampo inferiore, premilamiera e lamiera, in modo tale che la corsa della stampo superiore sia completamente verticale.

L'angolo totale di spoglia delle lame pari a 6° e raggio di raccordo 0,002 mm.
Di seguito le figure con le geometrie del modello:

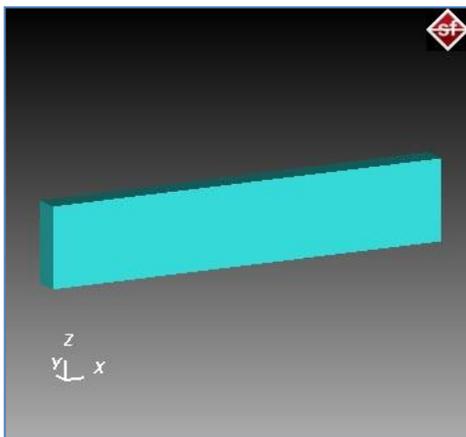


Figura 30: stampo superiore

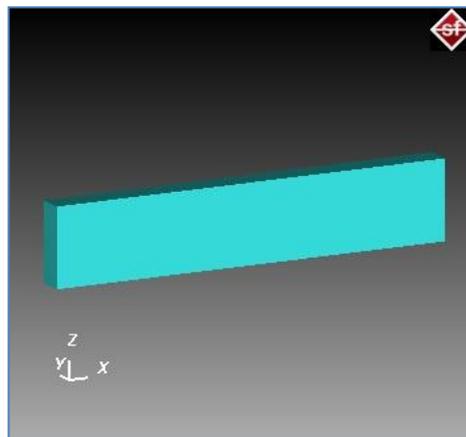


Figura 31: stampo inferiore

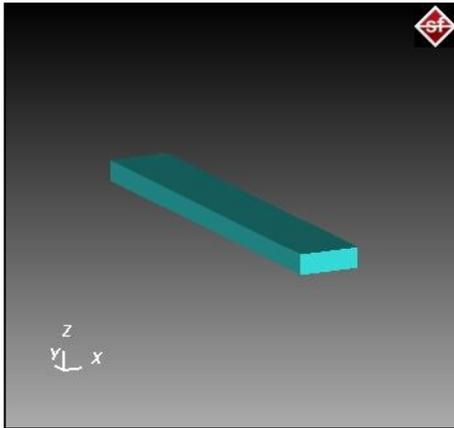


Figura 32: prelamiera

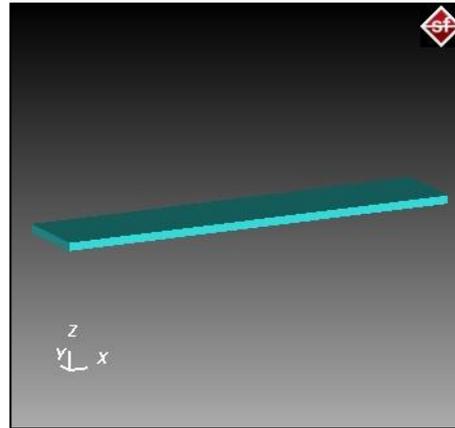


Figura 33: lamiera

Le successive tabelle descrivono le dimensioni degli oggetti utilizzati per la simulazione:

stampo superiore		
larghezza	lunghezza	altezza
20 mm	300 mm	60 mm

stampo inferiore		
larghezza	lunghezza	altezza
20 mm	300 mm	60 mm

prelamiera		
larghezza	lunghezza	altezza
30 mm	200 mm	10 mm

	lamiera		
	larghezza	lunghezza	altezza
1	30 mm	150 mm	3 mm
2	30 mm	150 mm	6 mm
3	30 mm	150 mm	8 mm
4	30 mm	150 mm	10 mm
5	50 mm	150 mm	15 mm
6	50 mm	150 mm	20 mm

Di seguito in figura 34 la sezione zx del modello, e in figura 35 una vista di profondità del modello:

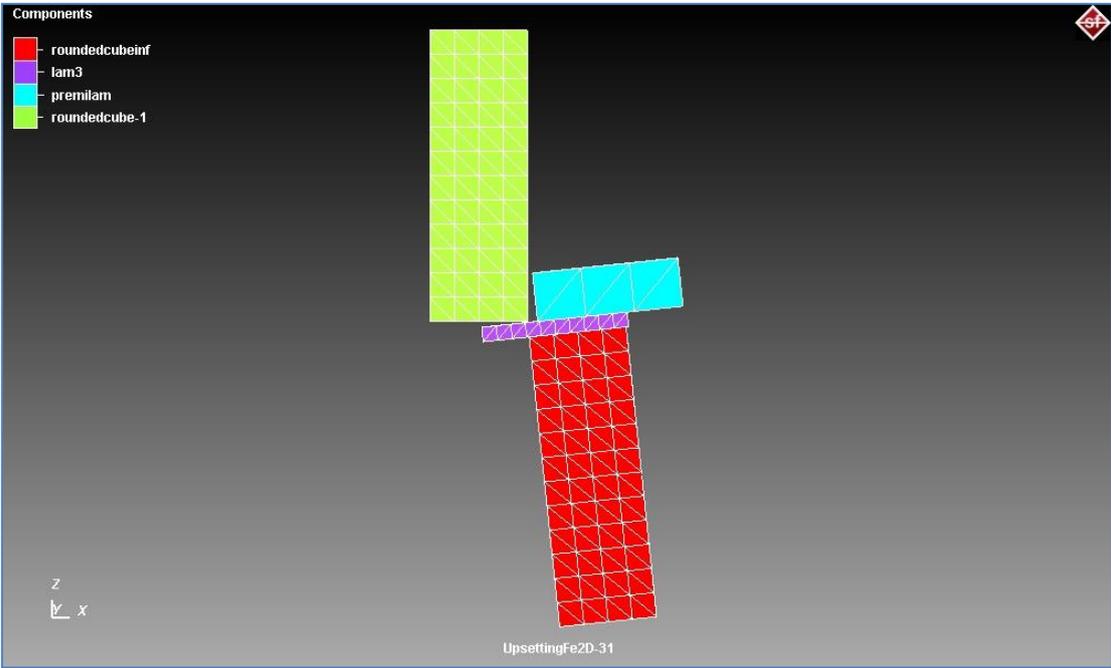


Figura 34: Sezione zx del modello

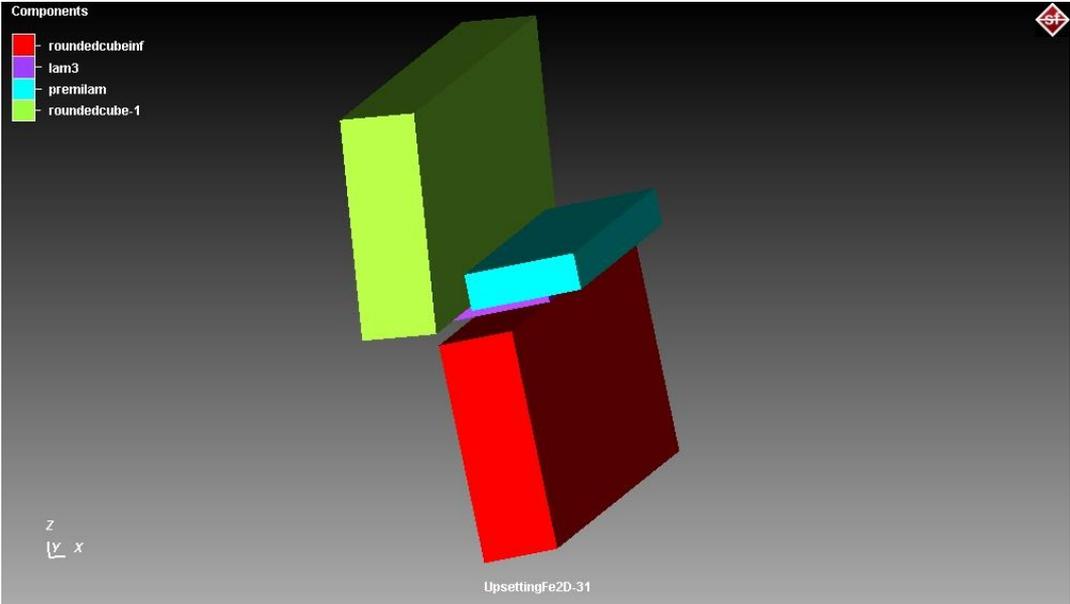


Figura 35: Vista di profondità del modello

In figura 36 viene presentata una visione schematica del processo di cesoiatura:

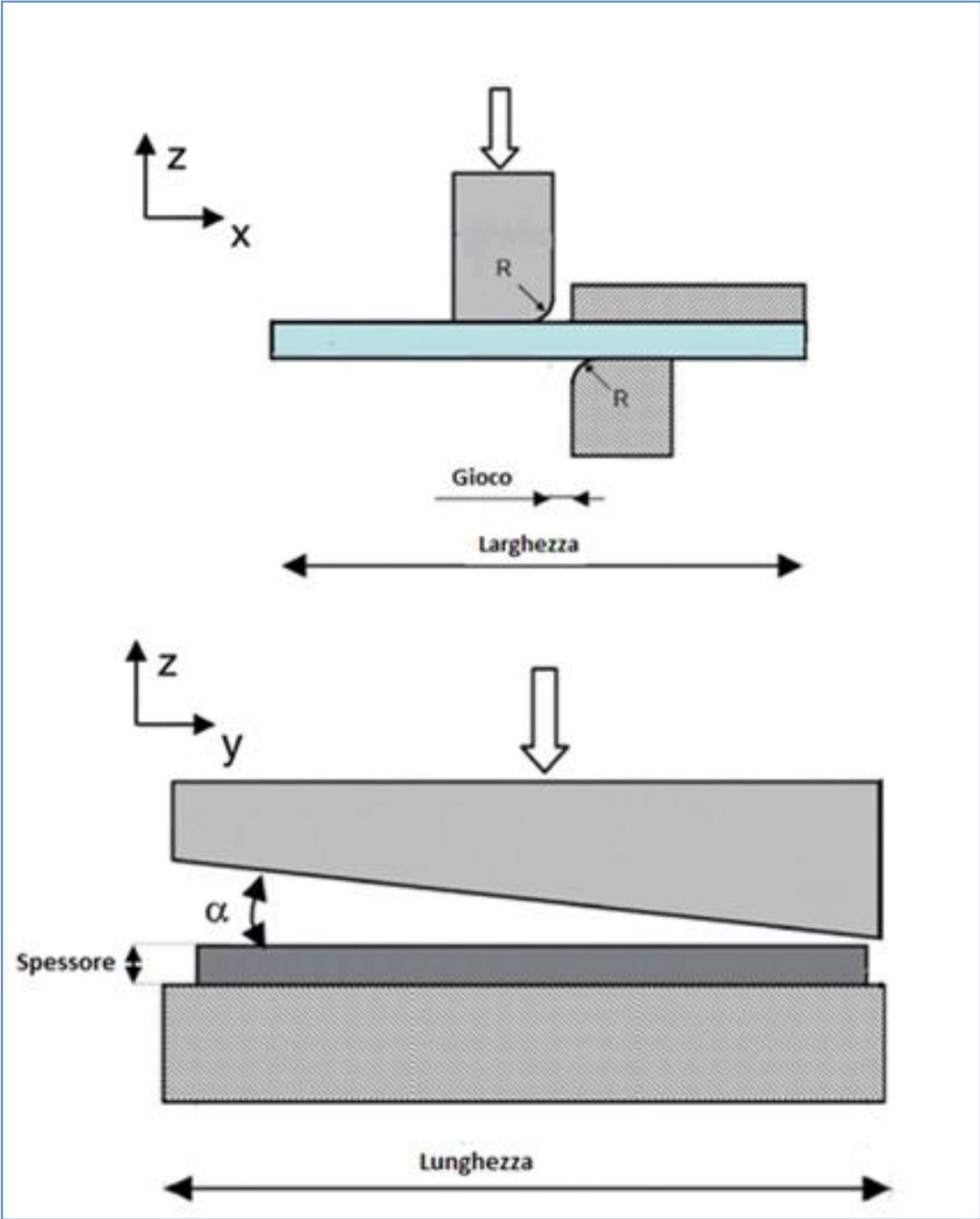


Figura 36: Schema del processo di cesoiatura

7.2 Materiale

Grazie al lavoro fatto a priori con l'utilizzo dei grafici in letteratura, della composizione chimica e delle proprietà meccaniche, è stato possibile trovare il Weldox 700 direttamente nella libreria di Simufact.Forming:

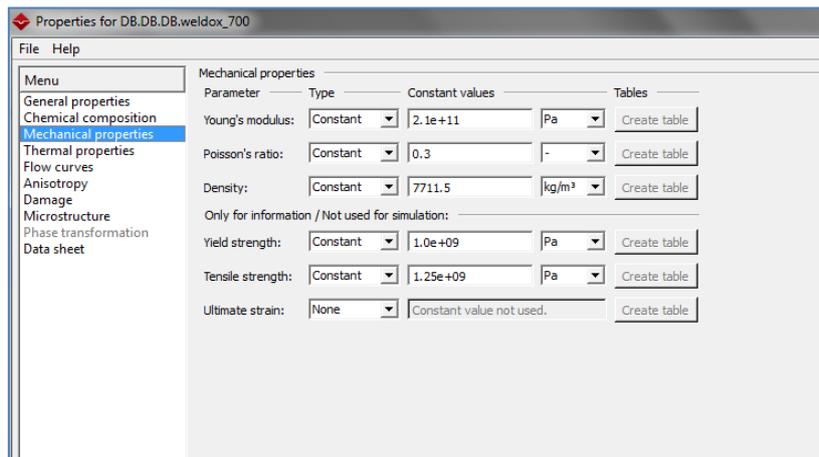


Figura 37: Tabella delle proprietà del materiale Weldox 700 in Simufact

7.3 Tipologia di movimento

Per le simulazioni 2D si è posta come velocità di discesa dello stampo superiore il valore di 128 mm/s che è una velocità tipicamente usata dalle aziende per questo tipo di processo.

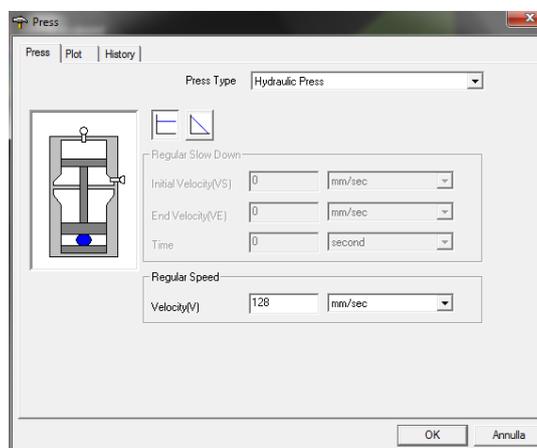


Figura 38: Tabella per l'inserimento della velocità di lavorazione in Simufact

7.4 L' attrito

L'attrito radente è dovuto allo strisciamento, ad esempio l'interazione tra due superfici piane che rimangono a contatto mentre scorrono l'una rispetto all'altra. Si esercita tra le superfici di corpi solidi a contatto ed è espresso dalla formula:

$$F_r = \mu_r \cdot F_{\perp}$$

dove F_r è la forza di attrito radente, μ_r il coefficiente di attrito radente e F_{\perp} la componente perpendicolare al piano di appoggio della risultante delle forze agenti sul corpo.

Per un corpo appoggiato su un piano orizzontale F_{\perp} è semplicemente uguale a F_p , forza peso del corpo; per un corpo appoggiato su un piano inclinato di un angolo α rispetto all'orizzontale risulta invece:

$$F_{\perp} = F_p \cos \alpha$$

Il coefficiente d'attrito è una grandezza adimensionale e dipende dai materiali delle due superfici a contatto e dal modo in cui sono state lavorate.

Esso corrisponde al rapporto tra la forza di attrito tra due corpi (F_r) e la forza che li tiene in contatto (F_{\perp}).

Il coefficiente di attrito statico μ_{rs} è sempre maggiore o uguale al coefficiente d'attrito dinamico μ_{rd} per le medesime superfici.

Dal punto di vista microscopico, esso è dovuto alle forze di interazione tra gli atomi dei materiali a contatto.

Questo implica che la forza necessaria al primo distacco (cioè per far sì che i corpi inizino a strisciare) è superiore a quella necessaria a tenerli in strisciamento.

Il coefficiente di attrito statico è uguale alla tangente dell'angolo massimo raggiungibile tra le due forze prima che uno dei due corpi cominci a scivolare lungo l'altro (angolo di attrito).

Per questo lavoro di tesi è stato utilizzato il modello di attrito statico di Coulomb, e si distinguono un coefficiente di attrito "bad" e uno "good".

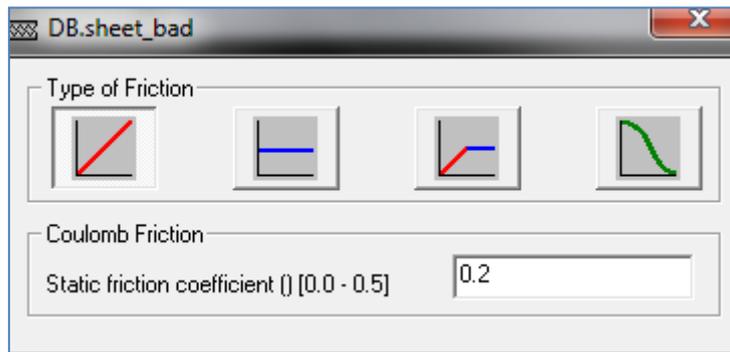


Figura 39: Tabella del coefficiente di attrito statico “bad”

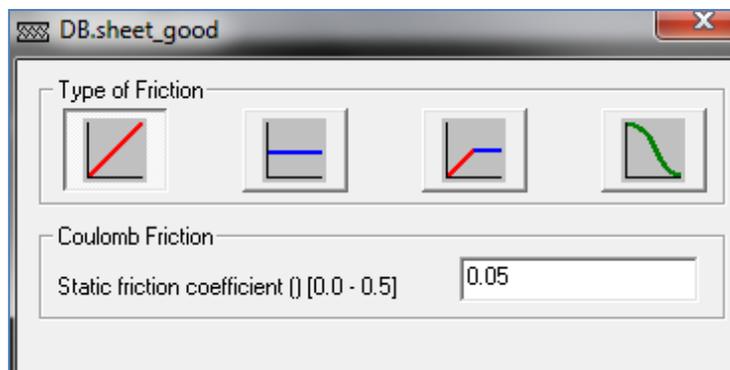


Figura 40: Tabella del coefficiente di attrito statico “good”

In tutte le simulazioni a parte una (verrà spiegata successivamente) la combinazione di attrito usata è:

1. coefficiente di attrito statico tra lamiera e stampo inferiore pari a 0,05
2. coefficiente di attrito statico tra lamiera e stampo superiore pari a 0,05
3. coefficiente di attrito statico tra lamiera e prelamiera pari a 0,2

Solamente in una prova specifica (6mm bad) verrà utilizzata la formula :

1. coefficiente di attrito statico tra lamiera e stampo inferiore pari a 0,2
2. coefficiente di attrito statico tra lamiera e stampo superiore pari a 0,2
3. coefficiente di attrito statico tra lamiera e prelamiera pari a 0,2

7.5 Il mesher

Esistono diversi tipi di Mesher che si utilizzano per discretizzare il materiale:

1. **L' Advancing Front** genera gli elementi partendo dallo spigolo esterno ed arrivando al centro del pezzo.
Cerca di rendere gli elementi normali ai bordi che delimitano la regione da meshare. Il fronte di avanzamento della mesh può essere utilizzato per generare elementi quadrangolari, triangolari, o una rete mista.
2. **L' Overlay Quad** viene usata nel metodo degli elementi finiti (FEM) per risolvere i problemi PDE (equazione differenziale alle derivate parziali). Questo Mesher funziona creando un quadrilatero di mesh regolare all'interno del pezzo da meshare ed in seguito vengono tracciate le proiezioni dei nodi sui bordi del pezzo e vengono creati gli elementi dello strato esterno che risultano avere una forma non rettangolare.

Per scegliere quale tipo di mesh fosse più adatta ad una buona formulazione del modello si sono confrontati due tipi di meshatori.

Si è usato il "Overlay Quad" e l' "Advancing Front" e si sono confrontati i risultati.

Per il confronto si è usato un solo spessore, da 6mm, e con l'osservazione e l'analisi dei risultati si è giunti alla conclusione che per il nostro tipo di simulazione 2D il mesher più esauriente è l'Advancing Front.

Di seguito nella figura 41 e 42 si possono visualizzare i due tipi di mesher differenti. Il resto delle osservazioni verranno affrontate nella parte di elaborazioni dati.

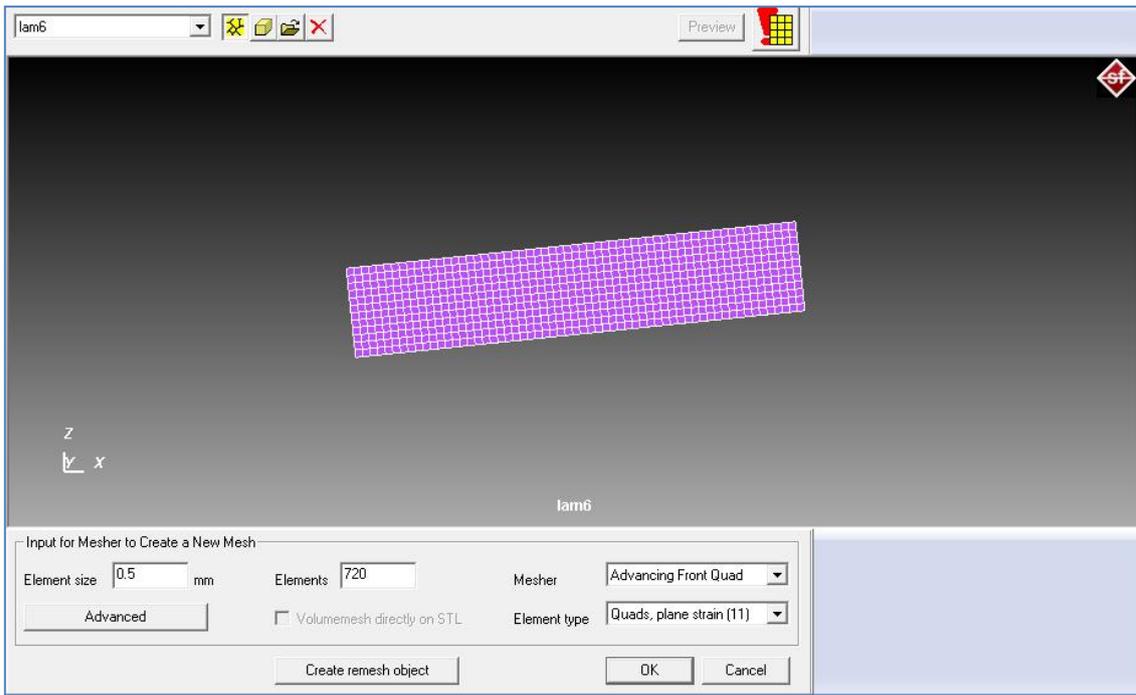


Figura 41: mesh dovuta all' Advancing Front

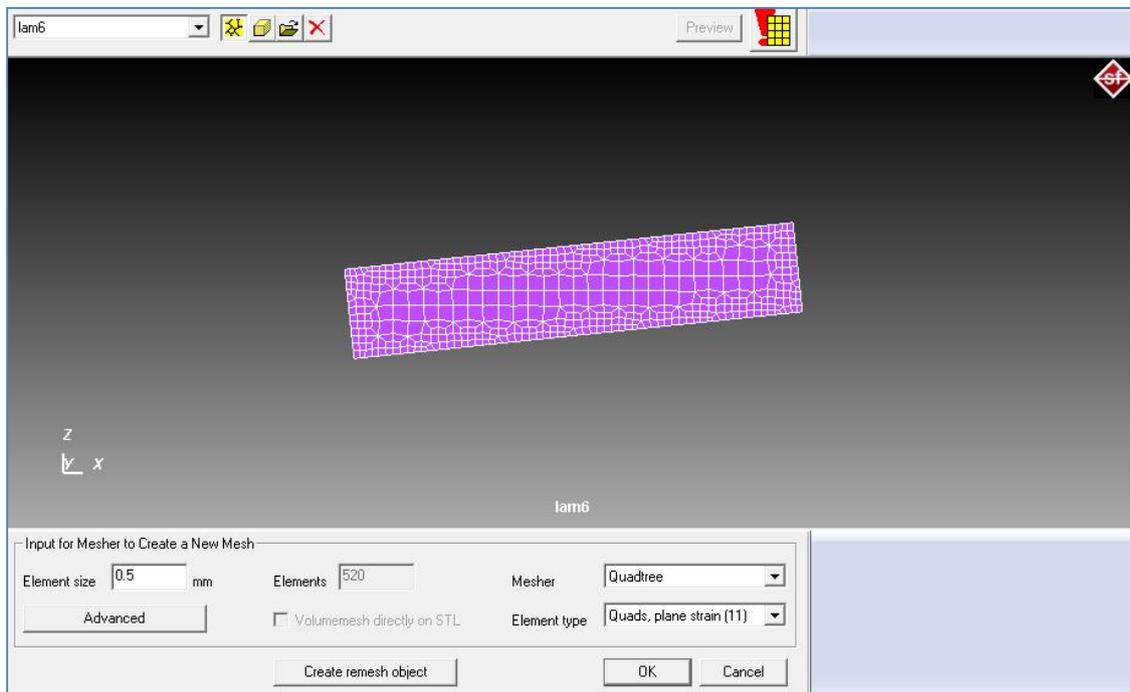


Figura 42: mesh dovuta all' Overlay Quadtree

7.6 Il tipo di mesh

Il sistema mesher Advancing Front non ha la possibilità di creare subito il refinement box, ma lo si deve creare all' interno del rimestatore.

Appena si effettua la remesh, compare il refinement box che permette di creare una mesh più fitta nella zona di maggior interesse.

Nelle seguenti figure si può notare come sia stato definito il box sia a livello di coordinate, sia a livello di refinement level.

Per comprendere quale livello di refinement sia il più adatto si sono fatte delle simulazioni apposite.

La figura 43 mostra il mesher utilizzato, l'Advancing Front, mentre le figure 44,45,46 mostrano in successione i 3 livelli di refinement box più utilizzati, dal livello 1 fino al livello 3.

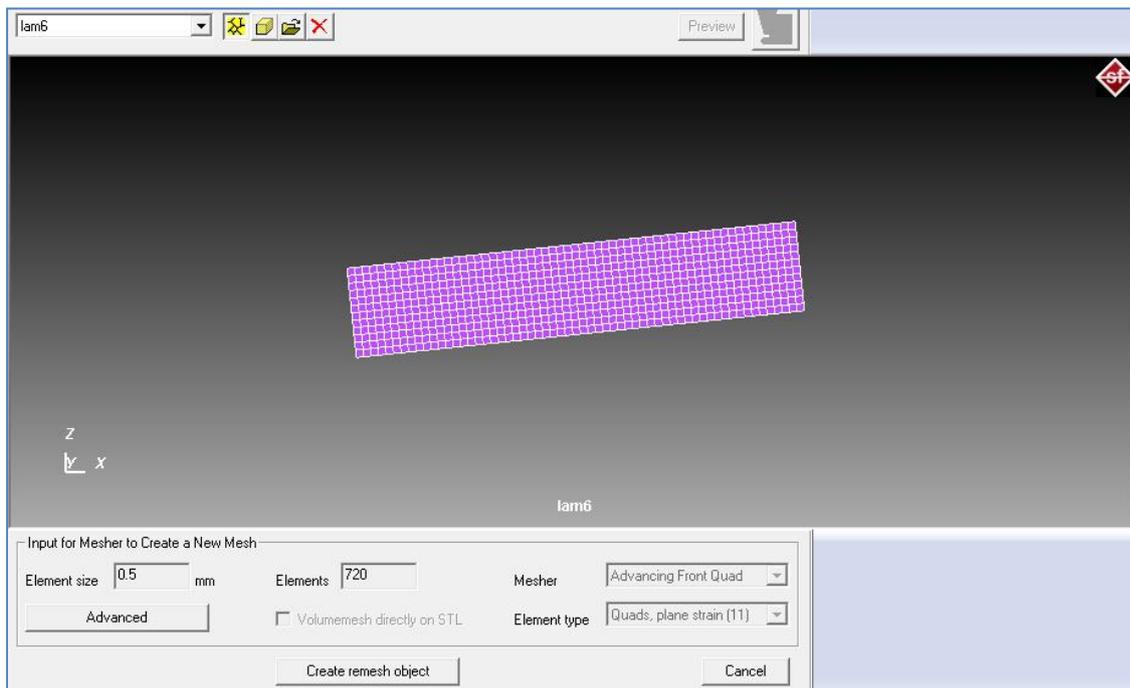


Figura 43: mesh dell'Advancing Front

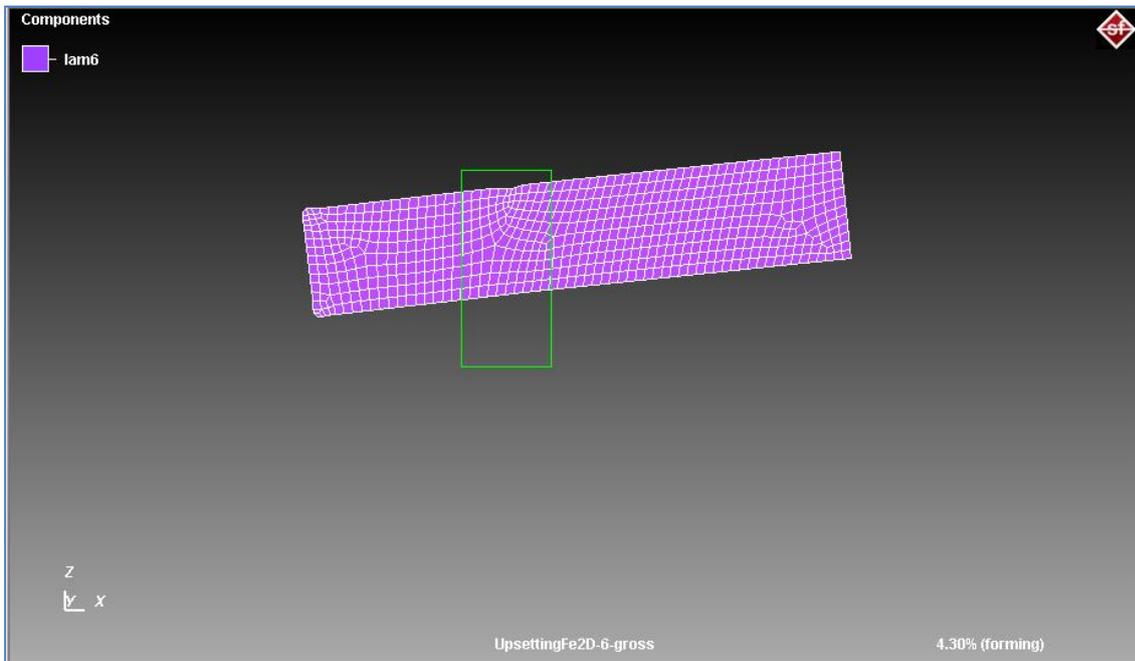


Figura 44: Mesh con refinement box di livello 1 grossolana

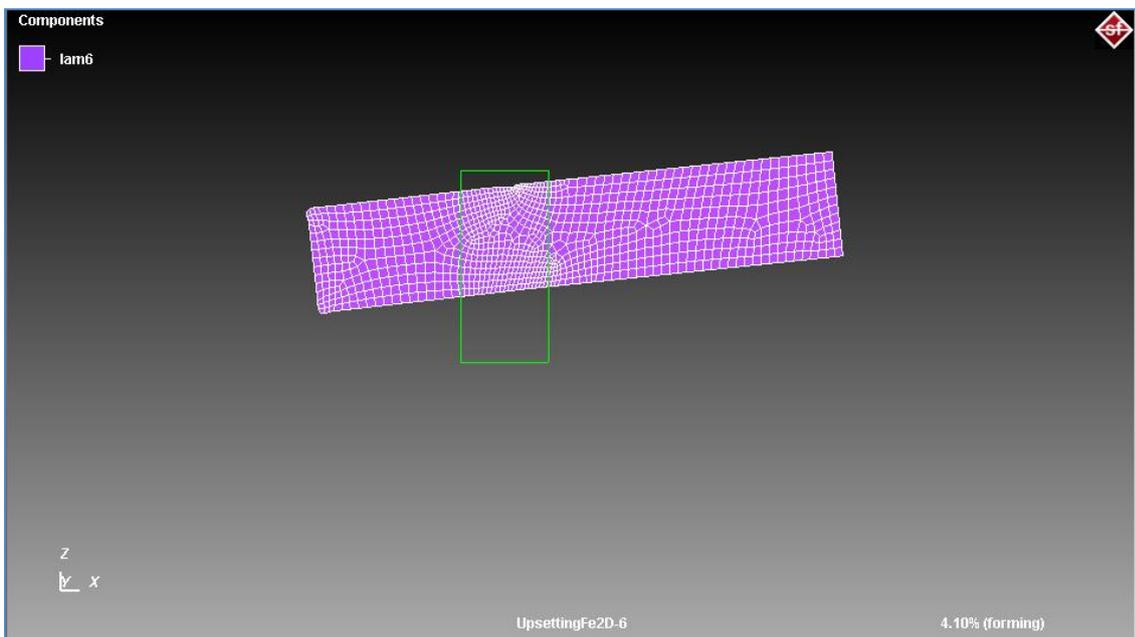


Figura 45: Mesh con refinement box di livello 2 intermedia

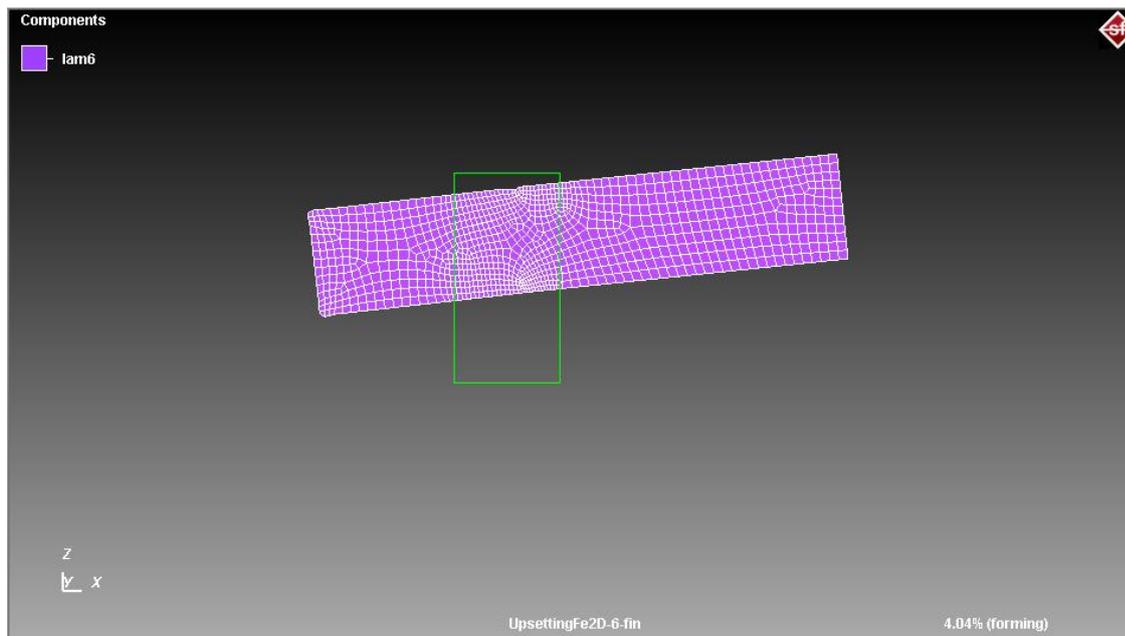


Figura 46: Mesh con refinement box di livello 3 fine

Le figure 47,48,49 mostrano le impostazioni delle coordinate e del livello di refinement per creare il box:

<input checked="" type="checkbox"/> Box1		<input type="button" value="+"/>
		<input type="button" value="-"/>
		<input type="button" value="📄"/>
Base attributes		Color
Name	Box1 <input type="checkbox"/>	
Type	Refine	<input type="button" value="Reset all"/> <input type="button" value="Set for all"/>
Level	1	
Corner 1		Corner 2
X	0.0 mm	X 5.0 mm
Y	0.0 mm	Y 0.0 mm
Z	74.0 mm	Z 85.0 mm
Reference body	None	Reference body None

Figura 47: Tabella per l'inserimento coordinate e livello refinement 1

<input checked="" type="checkbox"/> Box1		
Base attributes		Color
Name	Box1 <input checked="" type="checkbox"/>	
Type	Refine	<input type="button" value="Reset all"/>
Level	2	<input type="button" value="Set for all"/>
Corner 1		Corner 2
X	0.0 mm	X 5.0 mm
Y	0.0 mm	Y 0.0 mm
Z	74.0 mm	Z 85.0 mm
Reference body	None	Reference body None

Figura 48: Tabella per l'inserimento coordinate e livello refinement 2

<input checked="" type="checkbox"/> Box1		
Base attributes		Color
Name	Box1 <input checked="" type="checkbox"/>	
Type	Refine	<input type="button" value="Reset all"/>
Level	3	<input type="button" value="Set for all"/>
Corner 1		Corner 2
X	-0.5 mm	X 5.5 mm
Y	0.0 mm	Y 0.0 mm
Z	73.0 mm	Z 85.0 mm
Reference body	None	Reference body None

Figura 49: Tabella per l'inserimento coordinate e livello refinement 3

Una volta impostato l'Upsetting per la simulazione 2D quello che si vede alla sinistra del programma Simufact.Forming 10.0.1 è il seguente menù a tendina.

Si possono modificare le varie impostazioni solo nel caso non siano state effettuate delle simulazioni, evidenziabili dalla presenza della casella "Results" alla fine di ogni colonna.

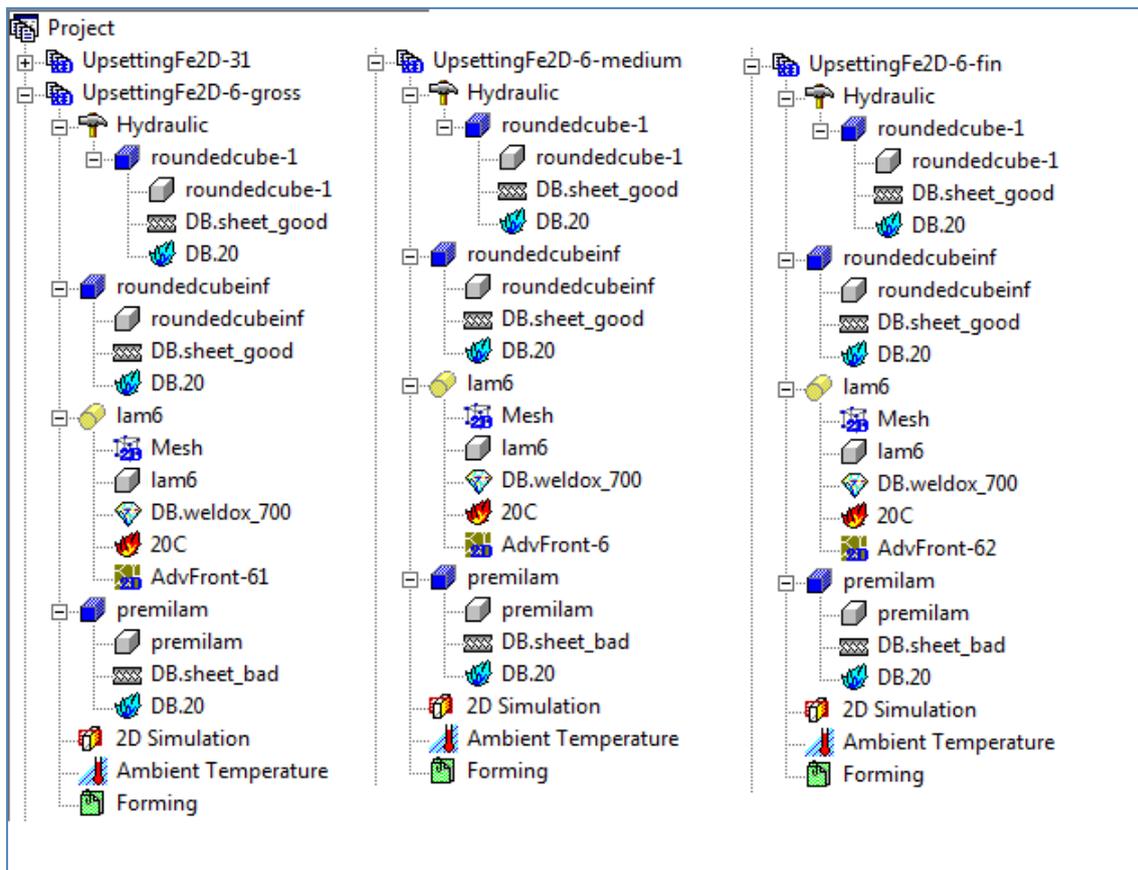


Figura 50: Menù dell' Upsetting di Simufact.Forming

Attraverso le tre simulazioni per il tipo di mesh, si è arrivati alla conclusione che il box di refinement di livello 2 è soddisfacente (verrà spiegato nella parte di elaborazione dati).

7.7 Il gioco tra le lame

Il gioco è la distanza perpendicolare tra le lame.

La distanza di taglio esatta dipende dallo spessore della piastra e dalla resistenza del materiale.

Se la distanza di taglio è troppo piccola aumenta l'usura degli utensili e le forze in gioco e quindi i costi di lavorazione.

Se è troppo grande, il materiale viene tirato tra le due lame. Il risultato sarà un bordo tagliato con maggiore rastremazione e maggiore deformazione plastica.

Per il Weldox 700 si è utilizzata l'equazione di riferimento trovata in letteratura [5] nella figura 51:

	Clearance, Δ in % of t	Rake angle, λ [°]
S 355 – EN 10025	8-10	1-5
WELDOX 700	12-15	3-5
WELDOX 900	14-16	3-5
WELDOX 960	14-16	3-5
HARDOX 400	16-18	3-5

Figura 51: tabella che esprime il gioco tra le lame in funzione dello spessore

Per il nostro materiale si ha un range tra il 12% e 15 % dello spessore della lamiera.

Si è preso il valore medio, il 13,5 %, per le simulazioni 2D.

E quindi mettendo in tabella tutti gli spessori si può determinare analiticamente il gioco tra le lame:

Spessore lamiera (mm)	Gioco tra le lame (mm)
3	0,405
6	0,810
8	1,080
10	1,350
15	2,025
20	2,700

7.8 Definizione delle porzioni delle superfici tranciate

Il gioco tra le lame di ciascuna simulazione è diversa dalle altre, questo comporta una differente porzione di superficie tranciata [9].

Si possono individuare 4 zone principali, presenti nel bordo tagliato, ottenute grazie al processo di cesoiatura:

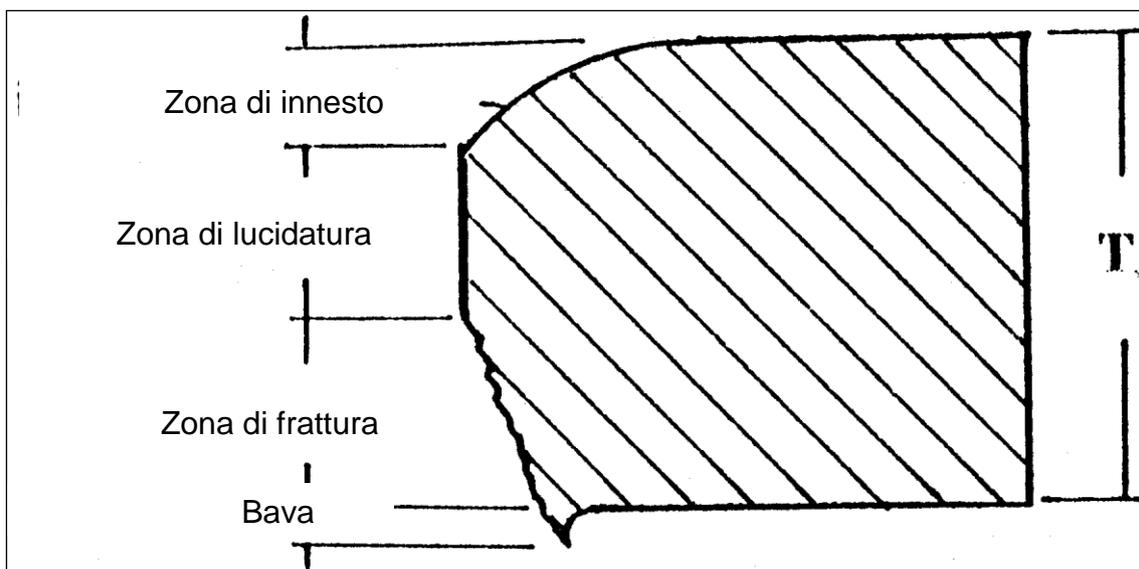


Figura 52: Differenti zone presenti nel bordo tranciato

Le zone si distinguono così:

1. **Zona di innesto:** zona in cui si inserisce la lama superiore, questo provoca una leggera flessione della parte iniziale
2. **Zona di lucidatura:** il materiale viene tagliato e sfregando con il materiale ne provoca la lucidatura
3. **Zona di frattura:** ad un certo punto parte la cricca che provoca la frattura del materiale
4. **Bava:** dovuta al gioco tra le lame, mentre la lama superiore scende si porta dietro del materiale che crea questo tipo di ricciolo.

Queste 4 zone si possono notare nella figura 53 a simulazione conclusa nel programma Simufact.Forming 10.0.1:

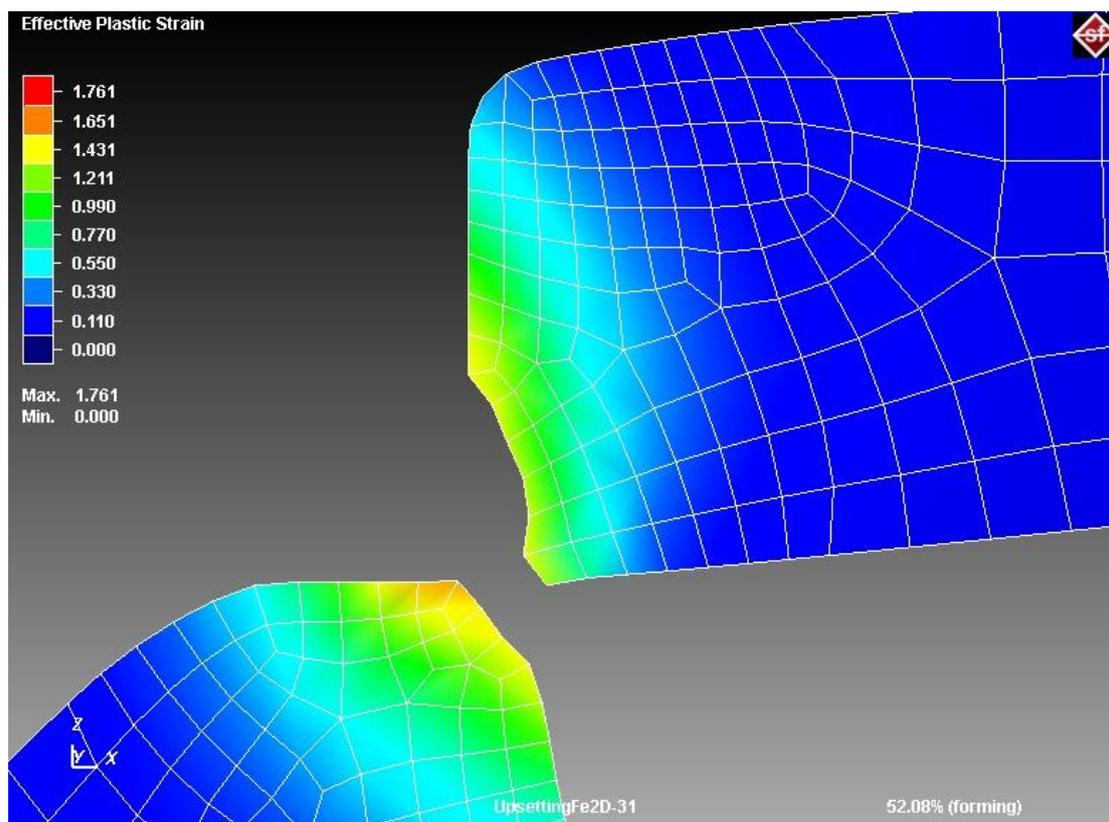


Figura 53: Fase a fine simulazioni: da osservare le 4 zone nel bordo appena tranciato

In letteratura [10] si può trovare l'altezza della bava in funzione del raggio di raccordo e dell'angolo di taglio della lama superiore.

Il grafico in figura 54 è per un processo di cesoiatura con angolo di spoglia pari a 0° , cioè a lame parallele.

Le 5 fasce di valori si distinguono per la differenza di angolo di raccordo della lama superiore:

inches	mm
0,001	0,0254
0,002	0,0508
0,005	0,1270
0,010	0,2540
0,020	0,5080

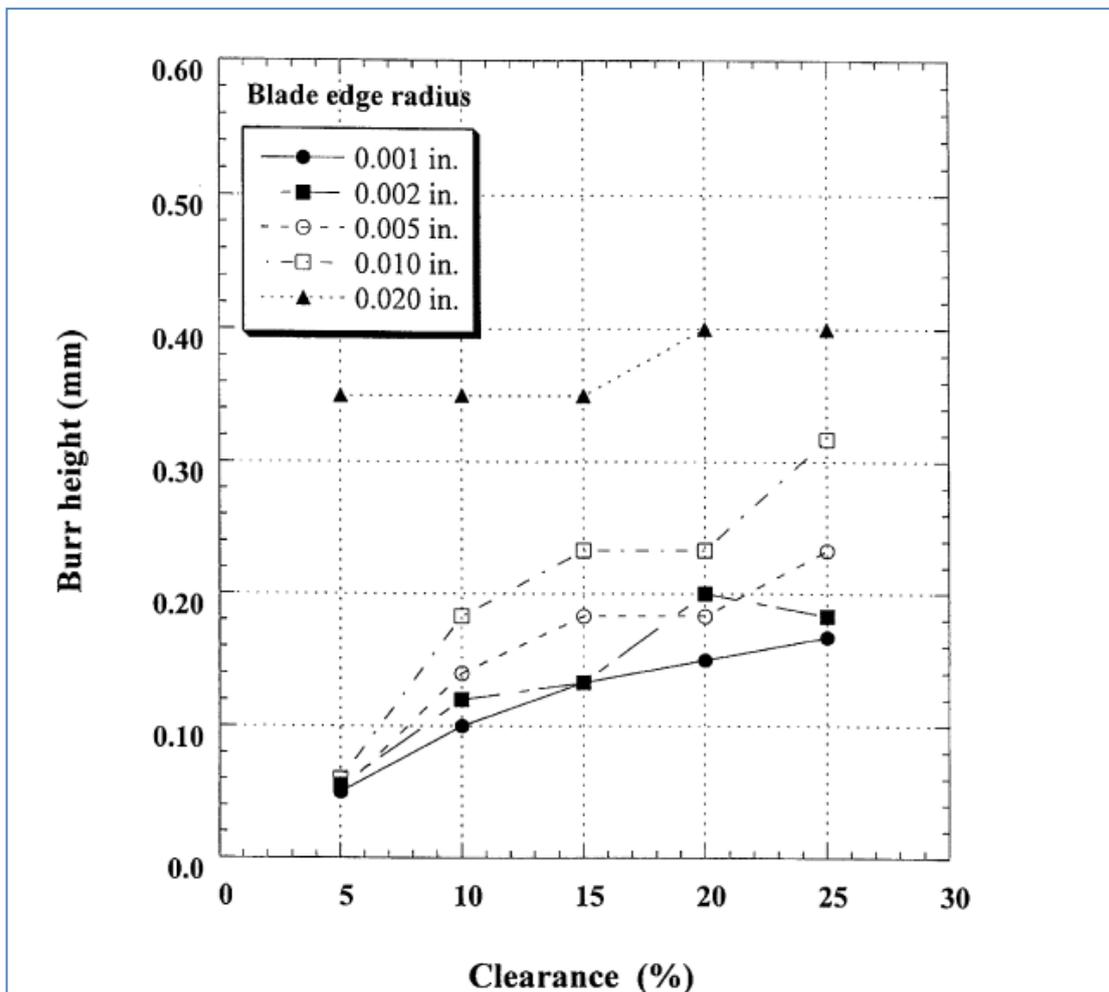


Figura 54: grafico che esprime l'altezza della bava in funzione del gioco tra le lame

Nelle 6 figure successive si osservano le zone di fratture causate dalla discesa della lama superiore nella lamiera per nelle 6 simulazioni in Simufact.Forming 10.0.1:

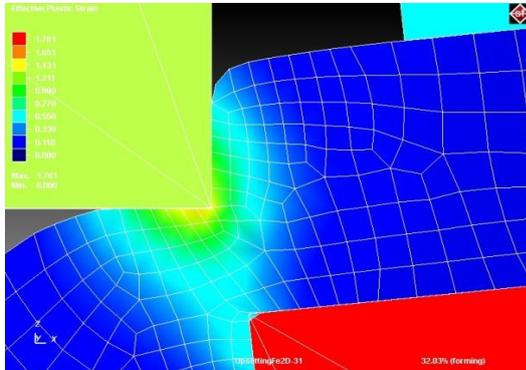


Figura 55: lamiera 3mm

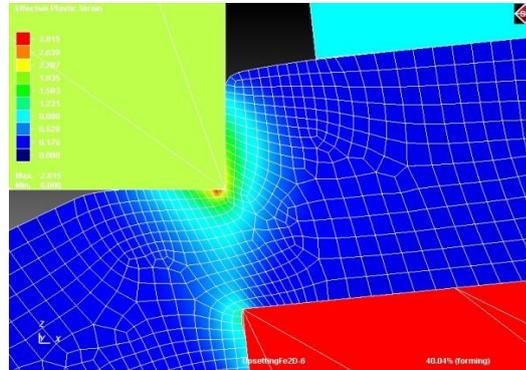


Figura 56: lamiera 6mm

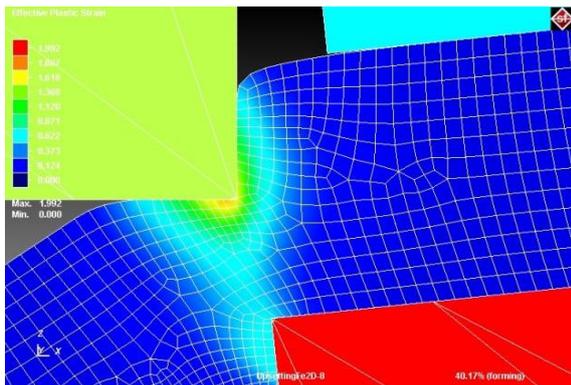


Figura 57: lamiera 8mm

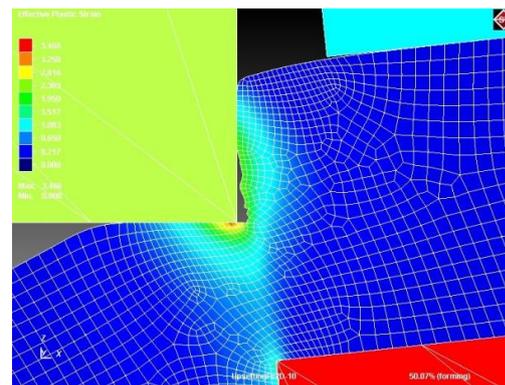


Figura 58: lamiera 10mm

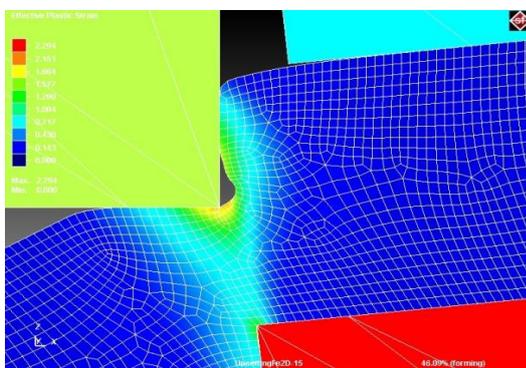


Figura 59: lamiera 15mm

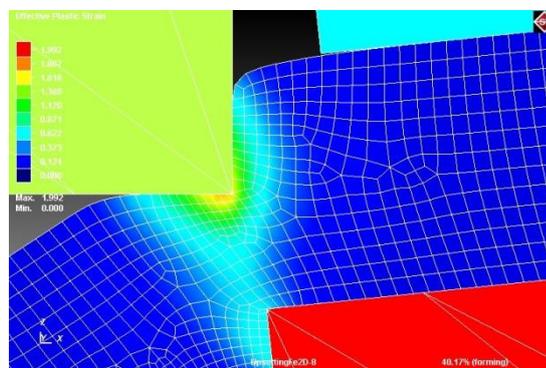


Figura 60: lamiera 20mm

CAPITOLO 8

Il modello analitico per la forza di cesoiatura

Nel processo di cesoiatura 3D la forza di taglio è quasi costante durante la maggior parte della corsa se l'inizio e la fine del processo vengono tralasciati. Nella parte iniziale dell'operazione di taglio l' utensile viene gradualmente inserito nello spessore del foglio di lamiera e la porzione di materiale deformato aumenta da 0 ad un valore max dovuto all'incrudimento del materiale, che dipende dall' altezza del pezzo e dall' angolo di inclinazione della lama. Raggiunto il valore massimo inizia il decremento della porzione di materiale deformato fino a 0 raggiungendo così la frattura del laminato.

L'angolo di inclinazione della lama è di solito limitata a 1-5 ° e, come ipotesi accettabile, il materiale viene deformato in condizioni di deformazione piana. Sotto questa ipotesi il processo può essere modellato come un processo di deformazione piana 2D, che è un modello molto semplice e computazionalmente efficiente [11].

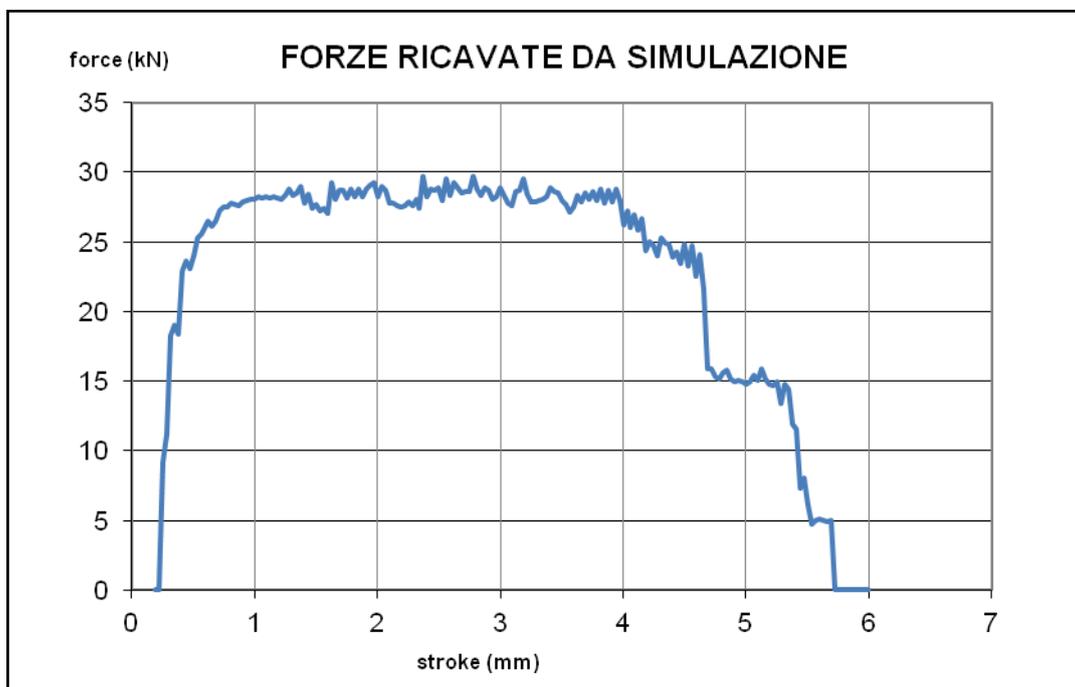


Figura 61: Curva ottenuta in una simulazione: forza su corsa

Dividendo la forza sulla lama superiore, ottenuta dal modello 2D, per la profondità del modello bidimensionale in deformazione piana (nel programma Simufact è posta a 10 mm) si ottiene la forza necessaria per avere una deformazione corrispondente alla penetrazione della lama nello spessore della lamiera (ForceNew):

$$ForceNew, j = \frac{F_{2D, j}}{lunghezza_{plain\ strain}}$$

Viene chiamata X_j la posizione j-esima lungo la profondità di taglio che può essere calcolata come la corsa della lama superiore diviso la tangente dell' angolo di taglio α :

$$stroke_j = corsa_j \frac{1}{tg\alpha}$$

Ottenendo così in figura 62:

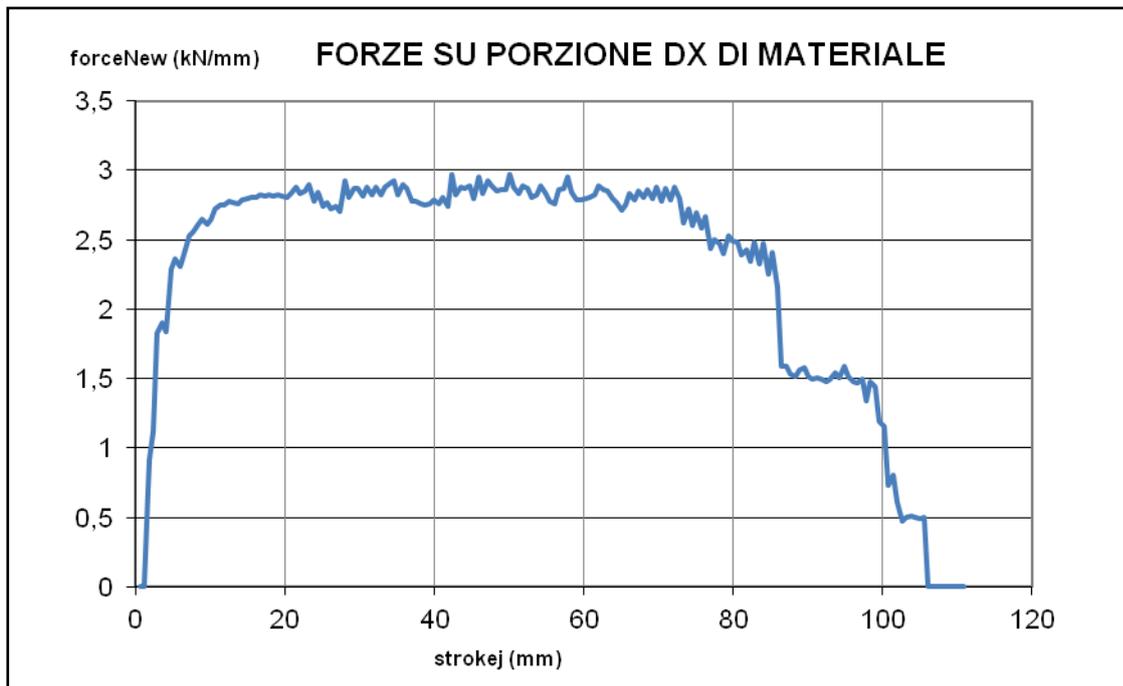


Figura 62: Curva ForceNew su Strokej

Diagrammando ForceNew_j in funzione di stroke_j si trova il contributo alla forza di taglio di una porzione dx di materiale coinvolto nel processo di taglio.

Pertanto la forza di taglio necessaria può essere stimata come l'area sotto la curva calcolata tra 0 e x_{fin} :

$$F_{3D} = \int_0^{x_{fin}} ForceNew_j dx$$

$$x_{fin} = penetrazione_j \frac{1}{tg\alpha}$$

Naturalmente x_{fin} che è la lunghezza di lamiera tagliata in un dato momento è minore o al massimo uguale a $\frac{\text{spessore}_j}{tg\alpha}$.

Nel lavoro di tesi tutte le formule sono importate in un foglio di calcolo e l'integrale che permette di prevedere la forza 3D è stato approssimato attraverso la regola dei trapezi:

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{n} \left(\frac{f(a) + f(b)}{2} + \sum_{k=1}^{n-1} f\left(a + k \frac{b-a}{n}\right) \right)$$

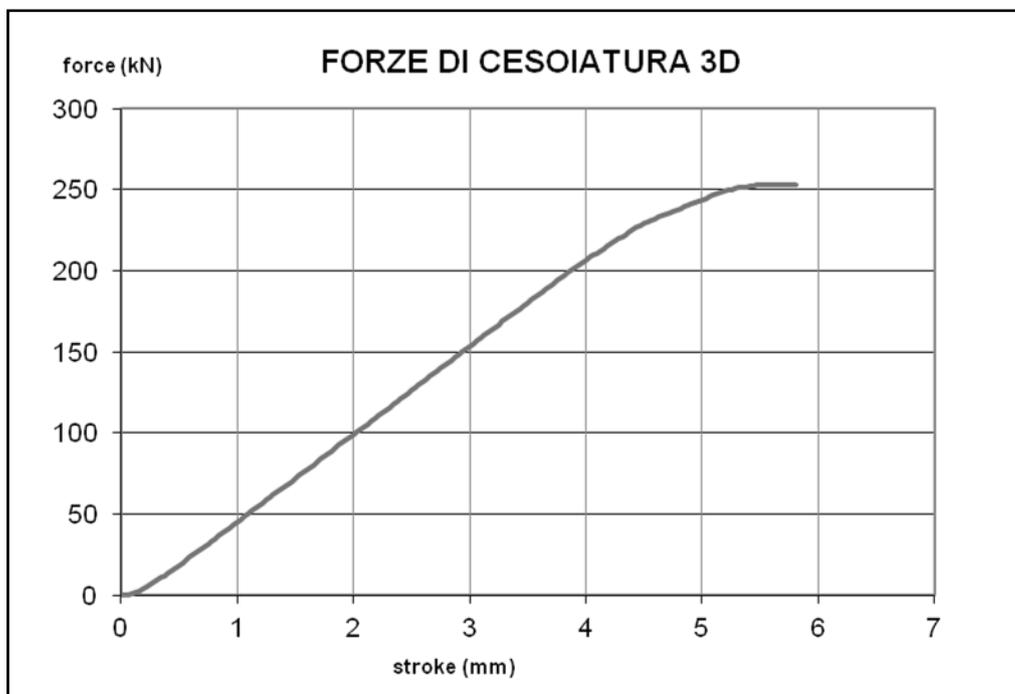


Figura 63: Curva della forza di cesoiatura 3D su corsa

8.1 L'analisi numerica con il foglio Excel

Attraverso la modellazione numerica descritta nel paragrafo precedente si è potuto creare un foglio Excel per l'analisi dei dati.

Il primo passo è effettuare la simulazione in 2D del processo di cesoiatura tramite il programma Simufact.Forming 10.0.1:

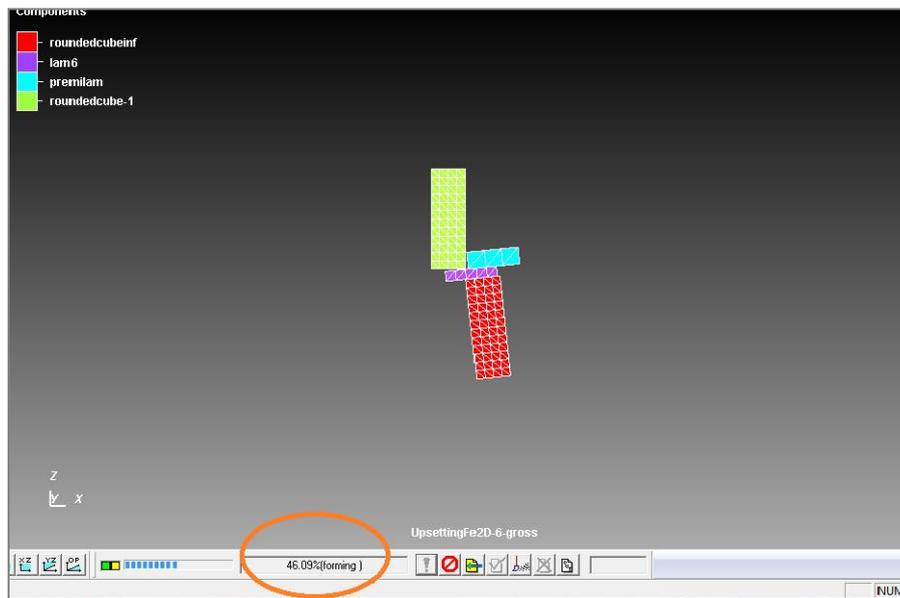


Figura 64: Simulazione in corso: in evidenza la percentuale eseguita

A simulazione completata si osservano i risultati:

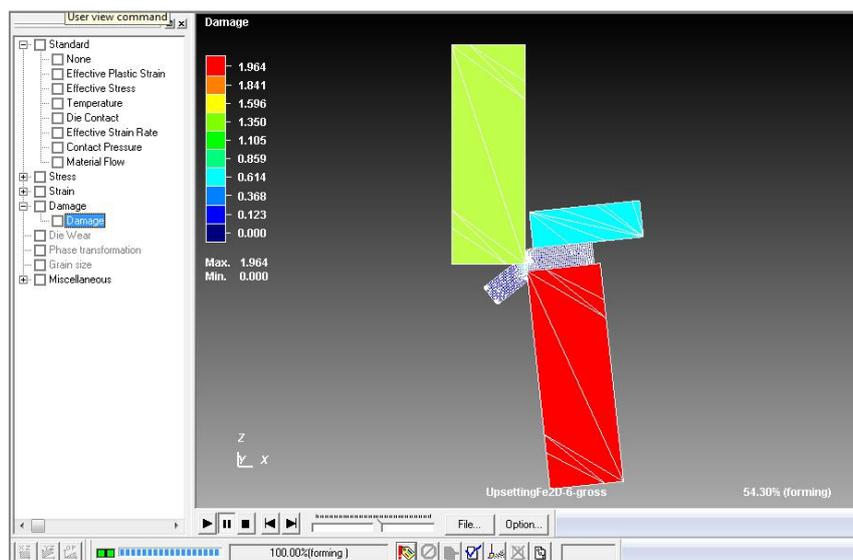


Figura 65: Osservazione dei risultati, nel menù a tendina si possono selezionare i vari risultati

L'analisi con modellazione numerica richiede dei dati per studiare il processo, cioè il grafico della forza che lo stampo superiore imprime per ogni mm di corsa dello spessore della lamiera da tranciare.

Quindi in figura 66:



Figura 66: Curva della forza su corsa nel programma Simufact

E con un apposito programma si estrapolano i dati del grafico e si passano nel foglio Excel:

	Stroke	roundedcube-1 (Z Force)
1	Stroke	roundedcube-1 (Z Force)
2	0,2031	0
3	0,2188	0,807633
4	0,2344	5,34513
5	0,25	8,37021
6	0,2656	8,92487
7	0,2813	9,65804
8	0,2969	10,7723
9	0,3125	11,0786
10	0,3281	11,7156
11	0,3438	12,0315
12	0,3594	11,6828
13	0,375	12,6634
14	0,3906	12,839
15	0,4063	12,607
16	0,4219	13,0236
17	0,4375	13,1504
18	0,4531	12,7815
19	0,4688	13,2526
20	0,4844	12,9876

Figura 67: Foglio Excel in cui sono presenti i dati di forza e corsa

Arrivati a questo punto si può utilizzare tutto il modello analitico per ricavare la Forza3D:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		angolo (°)	3		max F plane (kN)	36,682		punto rottura (mm)	1,344	
2		lung PlaneStrain (mm)	10		riga max	93		posizione trovata (mm)	25,640	
3										
4										
5		corsa cutter (mm)	forza cutter2D (KN)	stroke azzerato	posizione carico	Carico Distribuito	Delta_area	ForzaCutter3D	ForzaPlaneStrain	Cutter3D(mod)
6		mm	KN	mm	mm	KN/mm	KN	KN	KN	KN
7		0,203125	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
8		0,21875	0,807633	0,0156	0,2981	0,0808	0,0120	0,0120	2,0708	0,0120
9		0,234375	5,34513	0,0313	0,5963	0,5345	0,0917	0,1038	13,7050	0,1038
10		0,25	8,37021	0,0469	0,8944	0,8370	0,2045	0,3082	21,4614	0,3082
11		0,265625	8,92487	0,0625	1,1926	0,8925	0,2578	0,5660	22,8835	0,5660
12		0,28125	9,65804	0,0781	1,4907	0,9658	0,2770	0,8431	24,7634	0,8431
13		0,296875	10,7723	0,0938	1,7889	1,0772	0,3046	1,1476	27,6204	1,1476
14		0,3125	11,0786	0,1094	2,0870	1,1079	0,3257	1,4733	28,4058	1,4733
15		0,328125	11,7156	0,1250	2,3851	1,1716	0,3398	1,8131	30,0390	1,8131
16		0,34375	12,0315	0,1406	2,6833	1,2032	0,3540	2,1671	30,8490	2,1671
17		0,359375	11,6828	0,1563	2,9814	1,1683	0,3535	2,5207	29,9549	2,5207
18		0,375	12,6634	0,1719	3,2796	1,2663	0,3629	2,8836	32,4692	2,8836
19		0,390625	12,839	0,1876	3,5777	1,2839	0,3802	3,2638	32,9196	3,2638

Figura 68: Foglio di Excel in cui sono presenti tutte le voci per l'analisi numerica in 3D

8.1.1 Prima parte dell'analisi numerica

	A	B	C	D
1		angolo (°)	3	
2		lung PlaneStrain (mm)	10	
3				
4				
5		corsa cutter (mm)	forza cutter2D (KN)	stroke azzerato
6		mm	KN	mm
7		0,203125	0	0,0000
8		0,21875	0,807633	0,0156
9		0,234375	5,34513	0,0313
10		0,25	8,37021	0,0469
11		0,265625	8,92487	0,0625

Figura 69: Prima parte del foglio di Excel per l'analisi dei dati di ingresso dalla simulazione

Descrizione delle voci presenti nella prima parte:

- A. Giallo:** nel riquadro giallo c'è l'angolo di taglio α e la lunghezza plane strain.
- B. Viola:** la "corsa cutter" e la "forza cutter2D" sono i dati raccolti attraverso la simulazione 2D in Simufact.Forming 10.0.1.
- C. Rosa:** lo "stroke azzerato" serve a far partire la corsa cutter dal punto 0 per comodità di analisi.
- D. Azzurro:** la "posizione carico" è lo stroke j spiegato precedentemente.

8.1.2 Seconda parte dell'analisi numerica

E	F	G	H	I
<i>max F plane (kN)</i>	36,682		<i>punto rottura (mm)</i>	1,344
<i>riga max</i>	93		<i>posizione trovata (mm)</i>	25,640
Carico Distribuito	Delta_area	ForzaCutter3D	ForzaPlaneStrain	Cutter3D(mod)
<i>kN/mm</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0808	0,0120	0,0120	2,0708	0,0120
0,5345	0,0917	0,1038	13,7050	0,1038
0,8370	0,2045	0,3082	21,4614	0,3082
0,8925	0,2578	0,5660	22,8835	0,5660
0,9658	0,2770	0,8431	24,7634	0,8431
1,0772	0,3046	1,1476	27,6204	1,1476
1,1079	0,3257	1,4733	28,4058	1,4733
1,1716	0,3398	1,8131	30,0390	1,8131

Figura 70: Seconda parte del foglio di Excel per l'analisi dei dati elaborati nella prima parte

Descrizione delle voci presenti nella seconda parte:

- E. Grigio:** la “*max F Plane*” esprime la massima forza massima utilizzata nel processo FEM, e la “*riga max*” la riga in cui si trova la forza max.
- F. Arancione:** il “*carico distribuito*” è la $ForceNew_j$.
- G. Azzurro:** la “*Delta_area*” utilizza la formula dell' area del trapezio:

$$\Delta_{area} = \frac{(ForceNew_j + ForceNew_{j-1})(stroke_j - stroke_{j-1})}{2}$$

- H. Verde scuro:** la “*ForzaCutter3Dj*” è esprimibile come :

$$F_{3Dj} = Delta_area_j + Delta_area_{j-1}$$

- I. Rosso:** la “*ForzaPlaneStrain*” è il prodotto tra il carico distribuito j-esimo e la la posizione trovata (**verde**). Esprime la forza necessaria che la cesoia a lame parallele riesca a rompere e far partire la cricca nello stesso punto della forza con lame oblique.
- J. Azzurro scuro:** la “*ForzaCutter3Dmod*” è una modifica effettuata alla forza cutter 3D. Dopo l'avvenuta rottura (**giallo**) del pezzo la forza non aumenta, ma si stabilizza sul valore trovato.

8.1.3 Il grafico

Una volta completata l'elaborazione tramite foglio Excel si passa alla visualizzazione dei risultati tramite grafico:

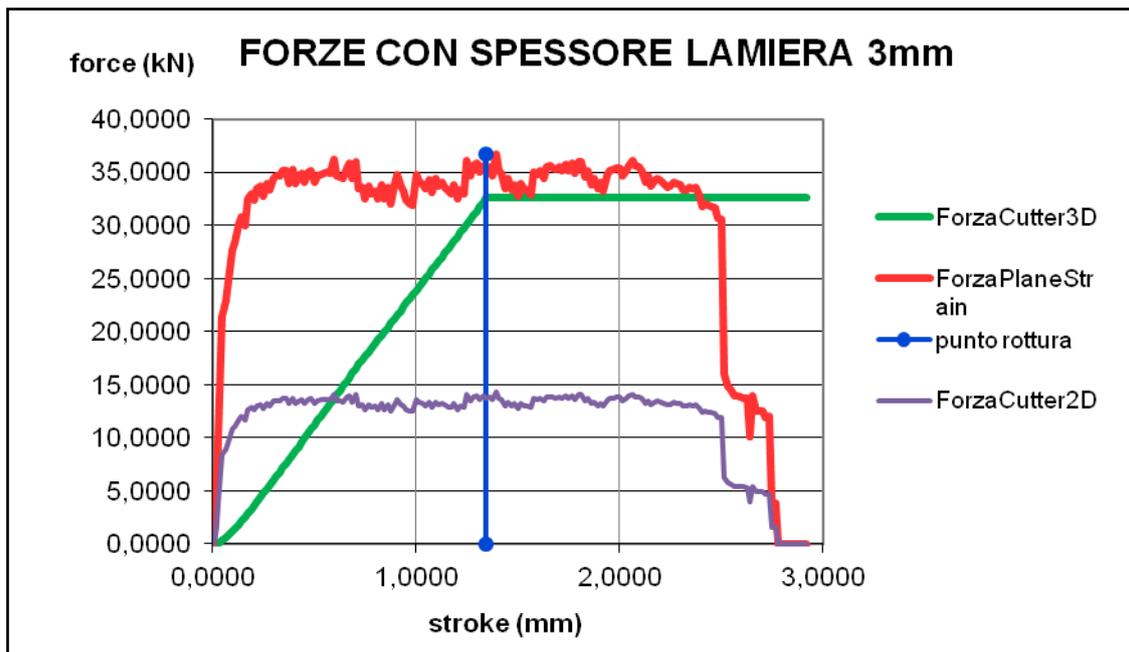


Figura 71: esempio di grafico risultate dall'analisi numerica in Excel

Tramite grafico è molto più facile osservare i risultati acquisiti:

1. La riga blu indica il punto di rottura
2. La curva viola indica la forza cutter 2D ricavata da Simufact.Forming
3. La curva rossa indica la forza Plain Strain ricavata con l'analisi numerica
4. La curva verde la forza cutter 3D ricavata sempre con l'analisi numerica.

CAPITOLO 9

Risultato delle analisi

Di seguito vengono riportati i risultati delle simulazioni 2D del processo di cesoiatura e i relativi grafici.

Successivamente verranno mostrati i risultati dell'analisi numerica, grazie cui si sono ricavate le forze 3D e i relativi grafici.

9.1 Risultati al variare del tipo di Mesher

Come prima cosa si è andati a valutare quale potesse essere il miglior metodo per meshare, sia a livello di mesher sia considerando il numero di elementi necessari.

Come meshatori si sono confrontati l'Overlay Quad e l'Advancing Front Quad.

Si è fatta la simulazione con la lamiera di spessore da 6mm e con lo stesso livello di refinement box.

Per questo tipo di simulazioni si è andati ad utilizzare la lamiera da 6mm.

Mesher	Overlay quad
Element size	0,5 mm
Mesh	Intermedia
Refinement level	2
Corsa alla forza max	2,312 mm
Forza max	145,254 kN

Mesher	Advancing Front
Element size	0,5 mm
Mesh	Intermedia
Refinement level	2
Corsa alla forza max	2,531 mm
Forza max	149,419 kN

Di seguito in figura 72 il diagramma dei due mesher messi a confronto:

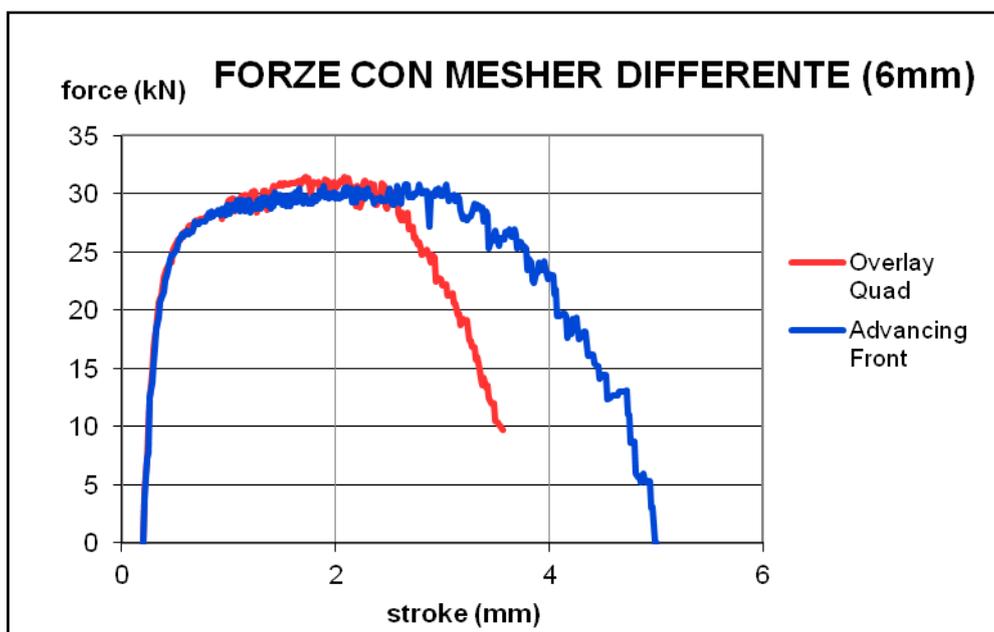


Figura 72: Overlay Quadtree e Advancing Front a confronto

Una volta confrontati i risultati si è notato che usando il mesher Advancing Front, oltre ad ottenere risultati praticamente corrispondenti a quelli ottenuti con il mesher Overlay Quad, non si hanno errori computazionali con conseguente blocco delle simulazioni.

Il software risulta anche molto più veloce e meno caricato durante le simulazioni.

9.2 Risultati al variare del tipo di Mesh

Grazie alla simulazione precedente si è visto che per questo tipo di lavoro conviene utilizzare il mesher Advancing Front.

Il numero di elementi iniziali discretizzati dal mesher per la lamiera da 6mm sarà sempre 800 ma con il refinement box che viene introdotto dal rimestatore il numero sale fino ad un numero più elevato specificato in tabella.

Simulazione	Livello Mesh	Numero elementi
grossolana	1	800
intermedia	2	1214
fine	3	1346
bad	2	1346

Simulazione	Forza Max (kN)	Corsa Max (mm)
grossolana	145,534	2,501
intermedia	149,419	2,531
fine	153,597	2,552
bad	165,989	2,781

La prima tabella ci mostra come il numero di elementi cresca in funzione del livello di refinement acquisito, mentre la seconda tabella esprime il grado di precisione a secondo del livello di mesh impostato per la forza e per la corsa.

Si nota che la differenza tra i risultati è pressoché minima, per questo per il resto delle simulazioni si è utilizzato l' Advancing Front con livello 2.

Anche il grafico in Figura 73 ci dimostra che non c'è una così grande variabilità nei risultati:

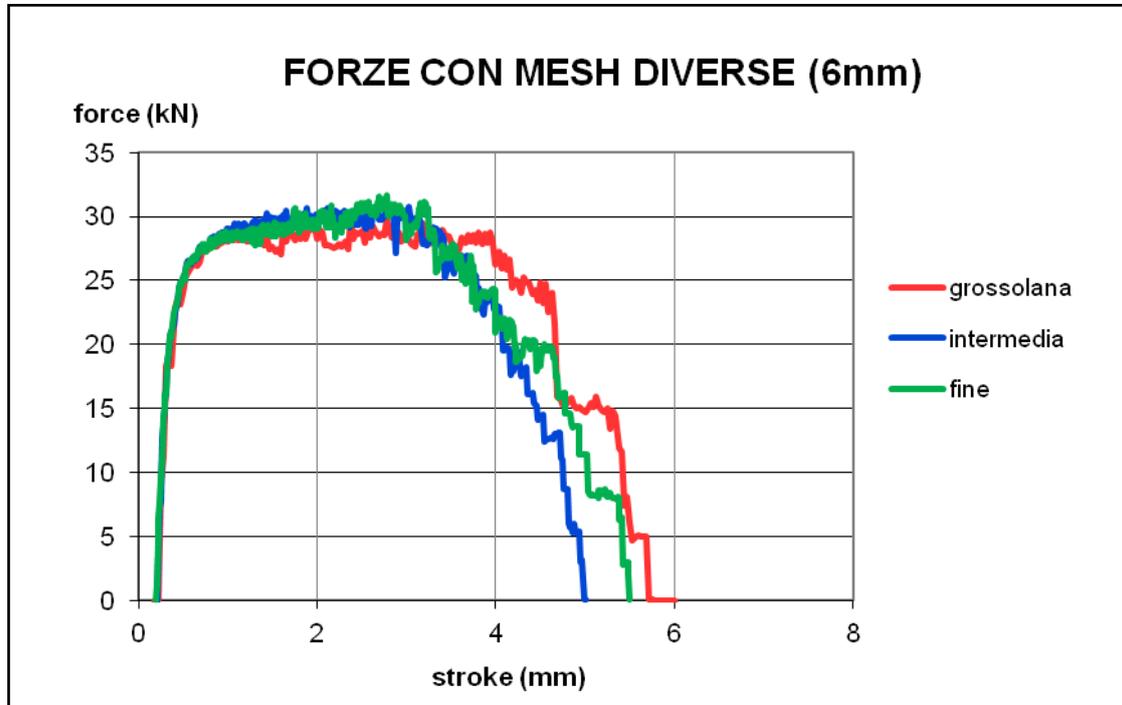


Figura 73: curve dei tre tipi di mesh messi a confronto

Si osserva che è anche possibile ricavare il rapporto tra corsa max e spessore della lamiera, per ottenere una media percentuale di 0,42:

Simulazione	% corsa su spessore
grossolana	0,42
intermedia	0,42
fine	0,43
bad	0,46

9.3 Risultati al variare dell' attrito

Nei grafici e tabelle precedenti si è inserito un ulteriore elemento per la mesh: la riga di simulazione “bad”.

I risultati in generale si sono discussi in condizione di attrito “good”, cioè nel caso in cui l'attrito tra le varie componenti della simulazione hanno un coefficiente statico pari a 0,05.

Eccezione solo per prelamiera che deve assicurare la mancanza di scorrimento della lamiera, che sennò porterebbe ad avere dei difetti di lavorazione causati dal trascinamento (attrito pari a 0,2).

Mentre il caso “bad” indica la situazione in cui tutti i componenti, a causa dell'usura, assumano il valore di attrito statico pari a 0,2.

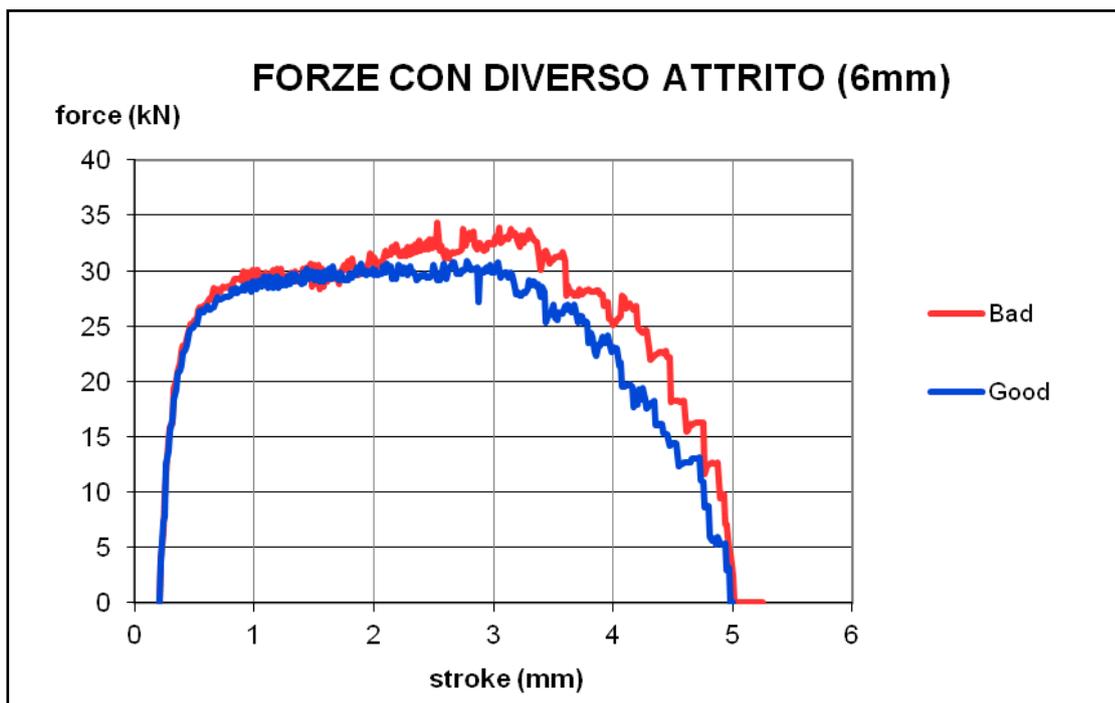


Figura 74: curve con i due tipi di attrito messi a confronto

9.4 Risultati al variare del tipo di spessore

I risultati delle precedenti simulazioni hanno permesso di impostare dei parametri definiti:

1. **Mesh**: Advancing Front
2. **Element size**: 0,5 mm
3. **Refinement box**: livello 2
4. **Attrito statico**: “good” a 0,05 (per il premi lamiera “bad” a 0,02)

Gli spessori analizzati per il Weldox 700 sono:

3mm	6mm	8mm	10mm	15mm	20mm
-----	-----	-----	------	------	------

In figura 75 è evidente che raddoppiando lo spessore la forza circa raddoppia, come previsto dalla formula nel caso di tranciatura a lame parallele dove il legame tra forza e spessore della lamiera è lineare.

La corsa aumenta in quanto lo spessore da tagliare è maggiore.

La forma dei grafici è praticamente uguale e scalata.

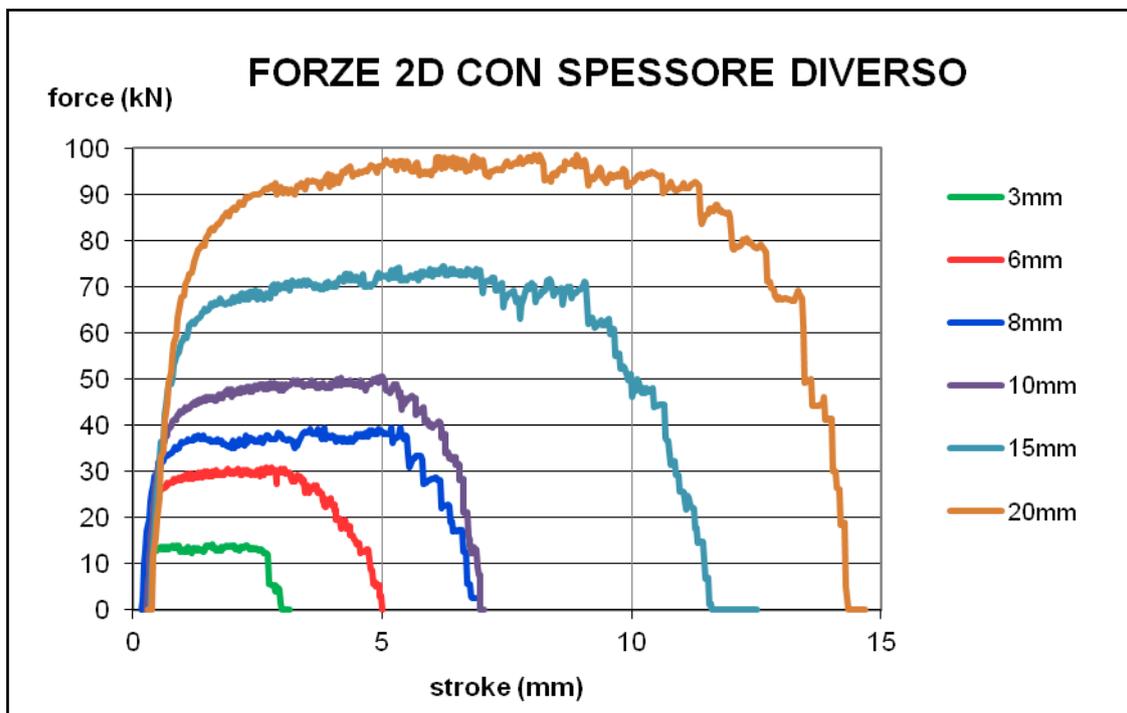


Figura 75: curve delle forze delle sei simulazioni ottenute in Simufact messe a confronto

Di seguito dalla figura 76 alla figura 81 i grafici ottenuti da tutte e 6 le simulazioni: 3mm, 6mm, 8mm, 10mm, 15mm, 20mm.

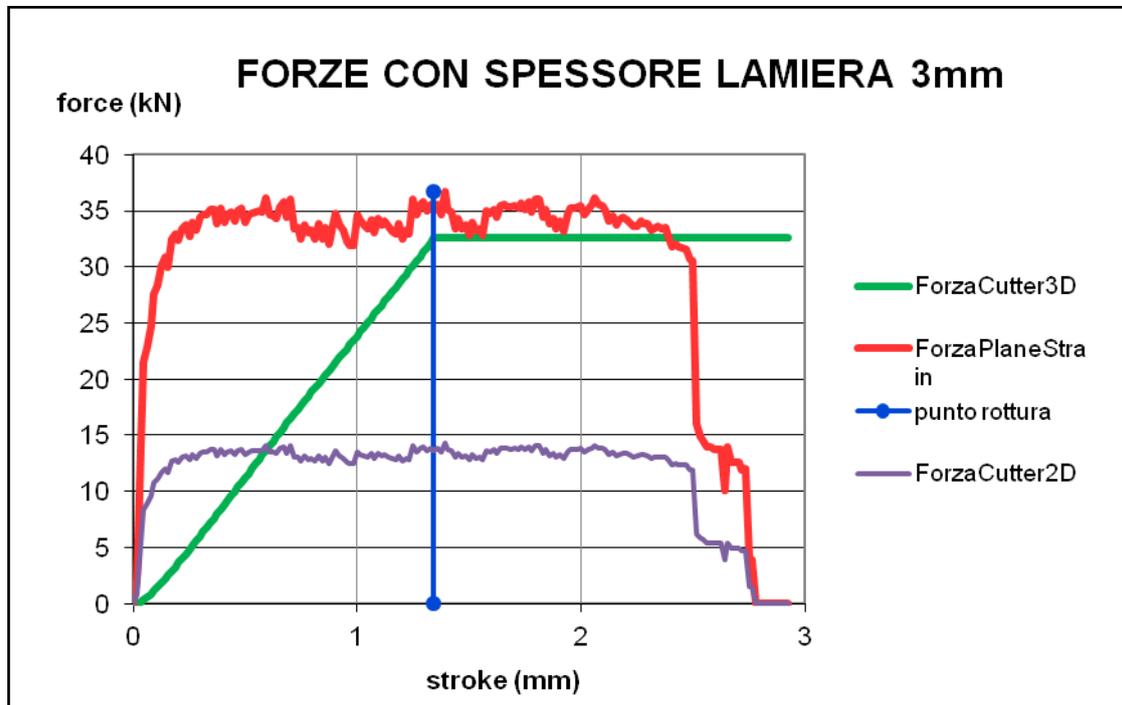


Figura 76: Curve per il 3mm ottenute dall'analisi numerica in Excel

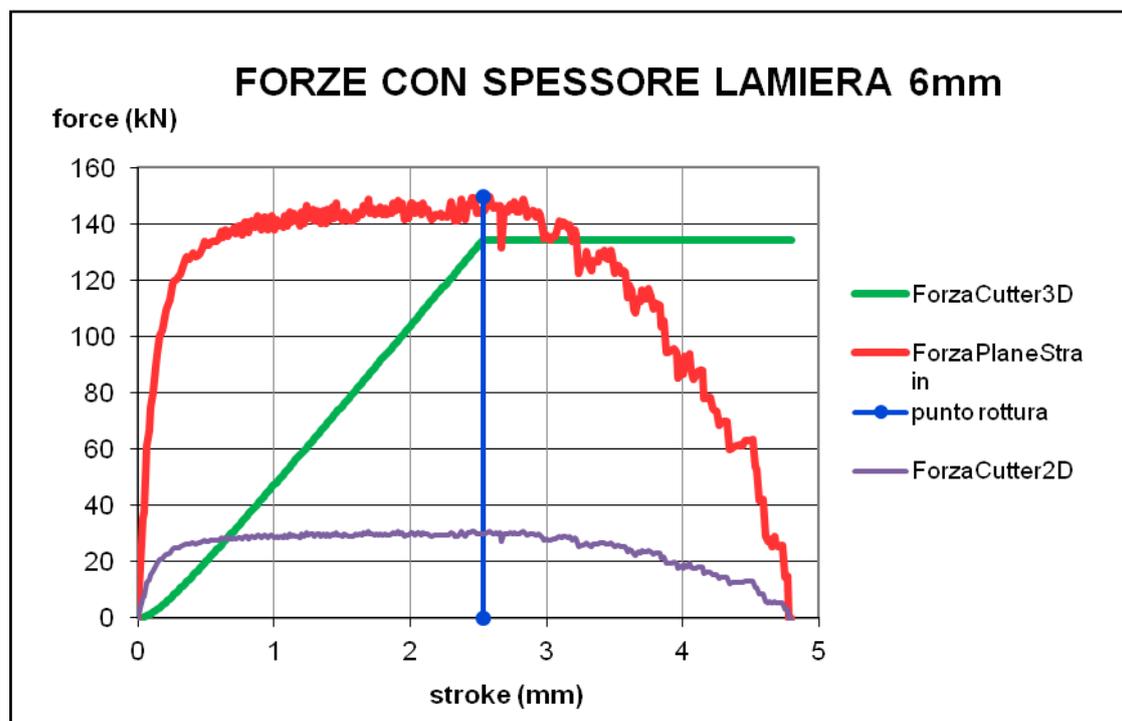


Figura 77: Curve per il 6mm ottenute dall'analisi numerica in Excel

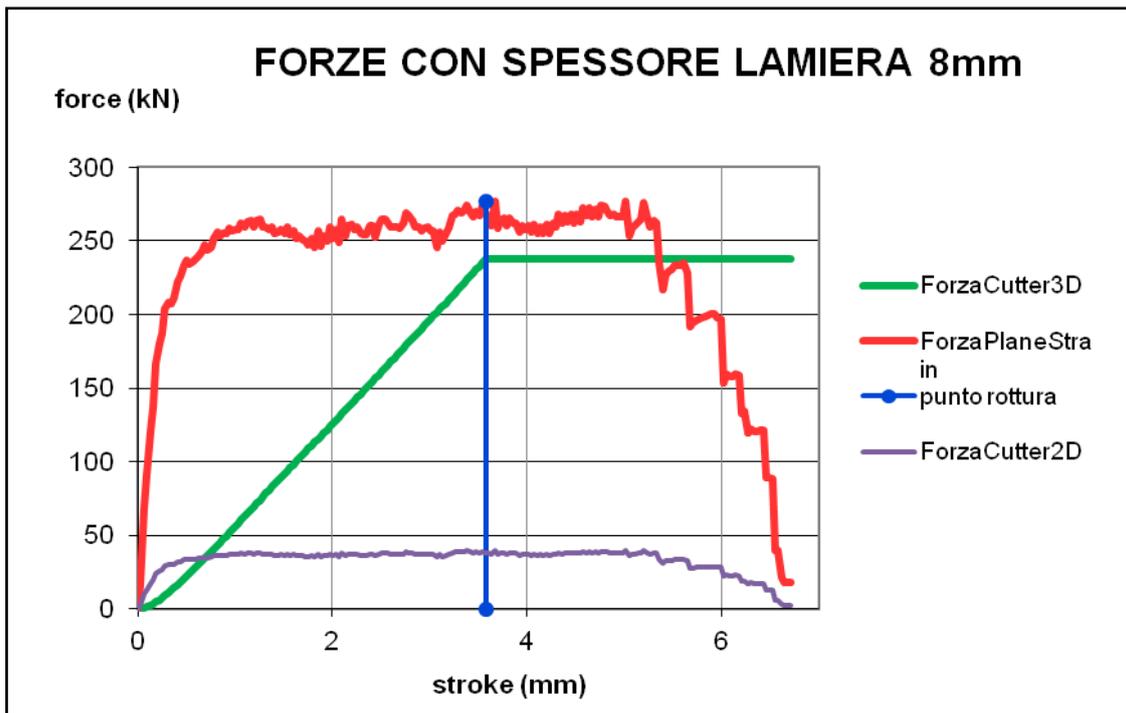


Figura 78: Curve per l' 8mm ottenute dall'analisi numerica in Excel

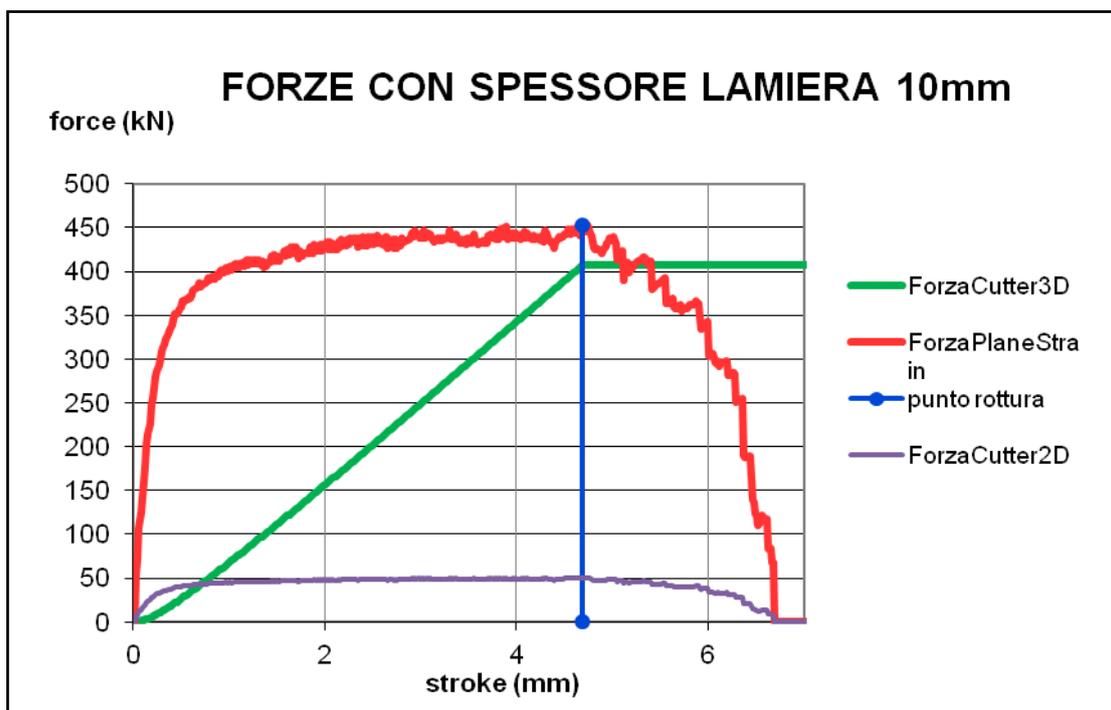


Figura 79: Curve per il 10mm ottenute dall'analisi numerica in Excel

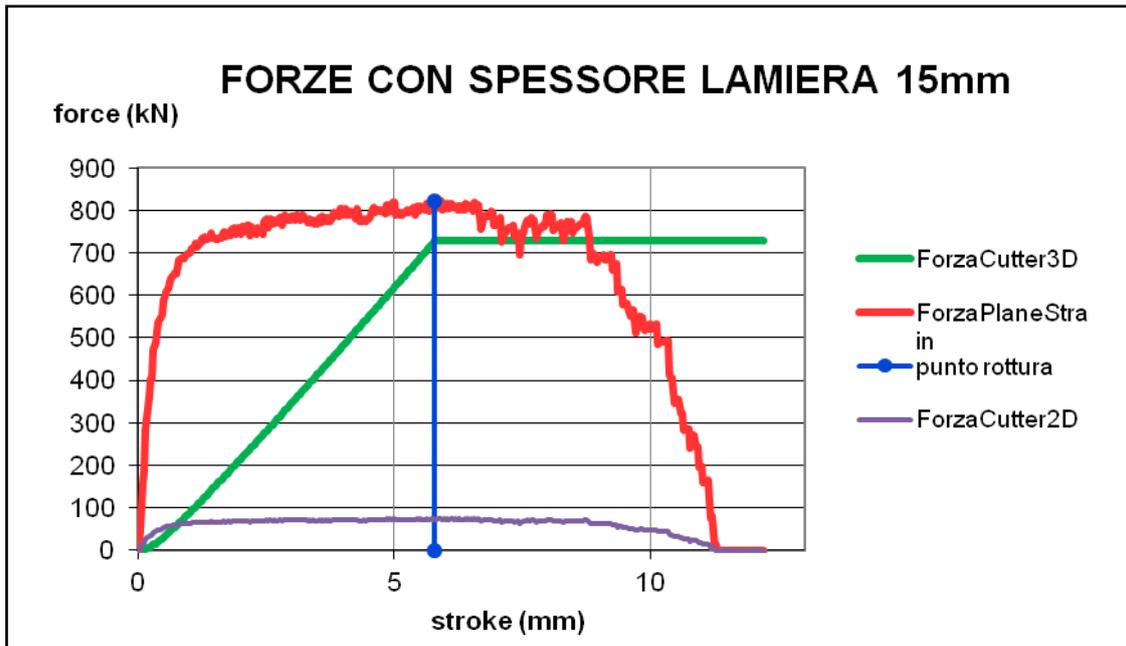


Figura 80: Curve per il 15mm ottenute dall'analisi numerica in Excel

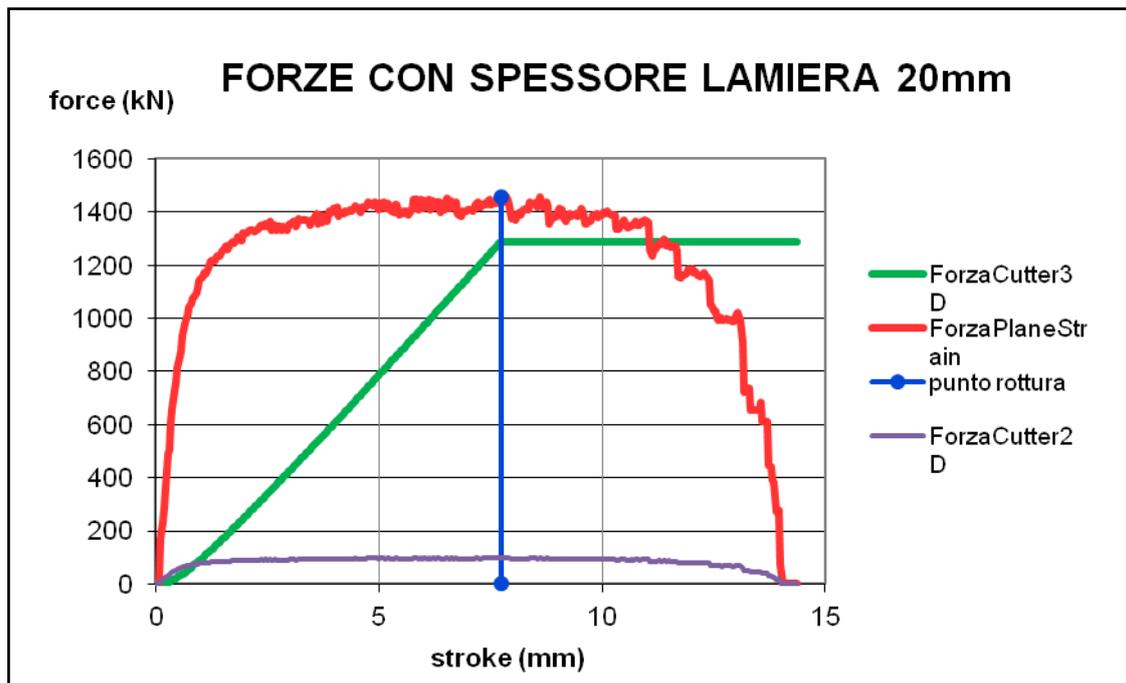


Figura 81: Curve per il 20mm ottenute dall'analisi numerica in Excel

9.5 Analisi risultati

Per aver una visione più allargata dei risultati si uniscono le forze cutter 3D e le forze plane strain di ogni singola simulazione:

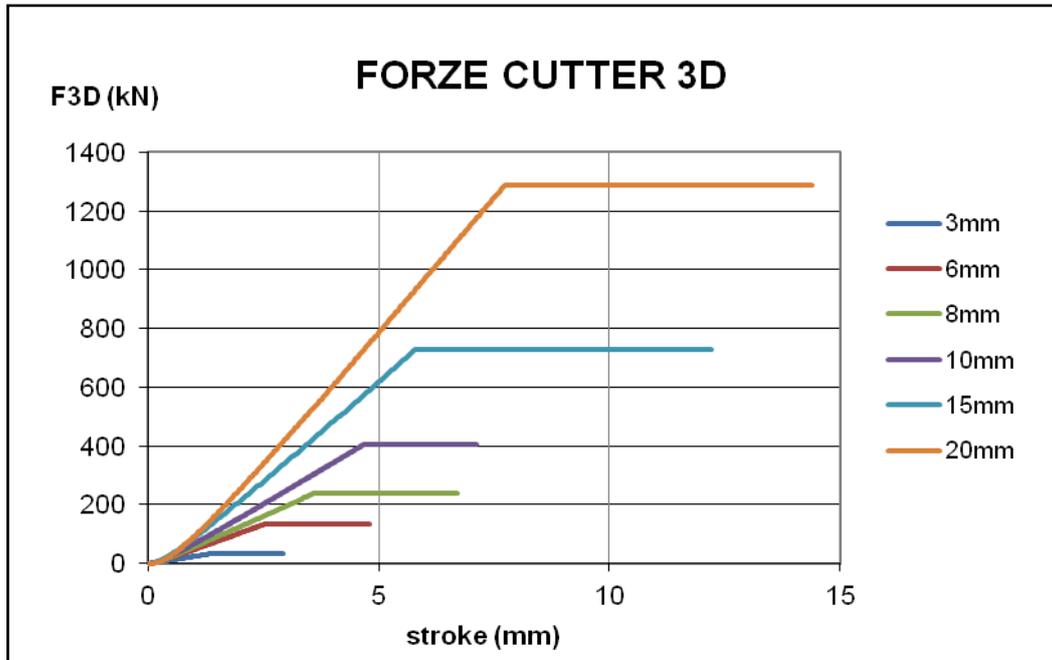


Figura 82: Curve forze cutter 3D per le 6 simulazioni

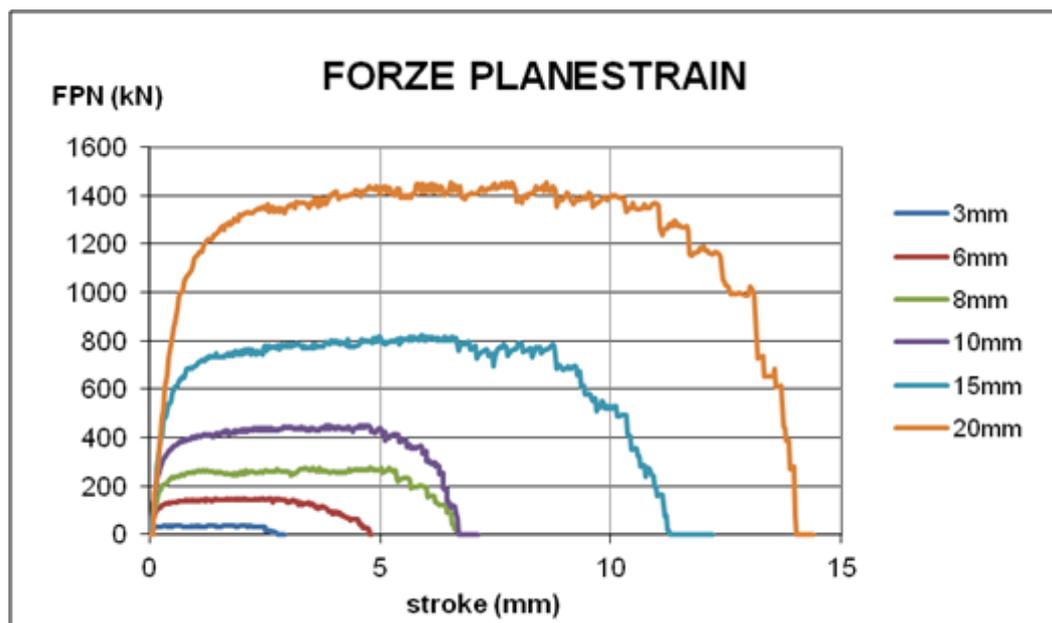


Figura 83: Curve forze cutter plane strain per le 6 simulazioni

Per ogni simulazione, sia nel caso cutter 3D che nel caso plain strain, si possono estrapolare la forza max e il punto in cui nella corsa della cesoiatura si ha la rottura del laminato.

Con queste due informazioni si può estrapolare una percentuale corsa su spessore, che informa in quale punto nella corsa si ha l' inizio della cricca da rottura.

Di seguito le due tabelle per la forza plain strain e per la forza cutter 3D messe a confronto.

Simulazione	Forza PlainStrain Max (kN)	Corsa Max (mm)	% corsa su spessore
3mm	36,682	1,344	0,45
6mm	149,419	2,531	0,42
8mm	276,605	3,575	0,45
10mm	452,829	4,694	0,47
15mm	823,371	5,791	0,39
20mm	1455,762	7,734	0,39

Simulazione	Forza Cutter 3D Max (kN)	Corsa Max (mm)	% corsa su spessore
3mm	32,563	1,344	0,45
6mm	134,110	2,531	0,42
8mm	237,596	3,575	0,45
10mm	407,150	4,694	0,47
15mm	727,499	5,791	0,39
20mm	1289,316	7,734	0,39

Dalle due tabelle precedenti prendendo punto per punto si può creare un grafico con una curva forza max corsa max.

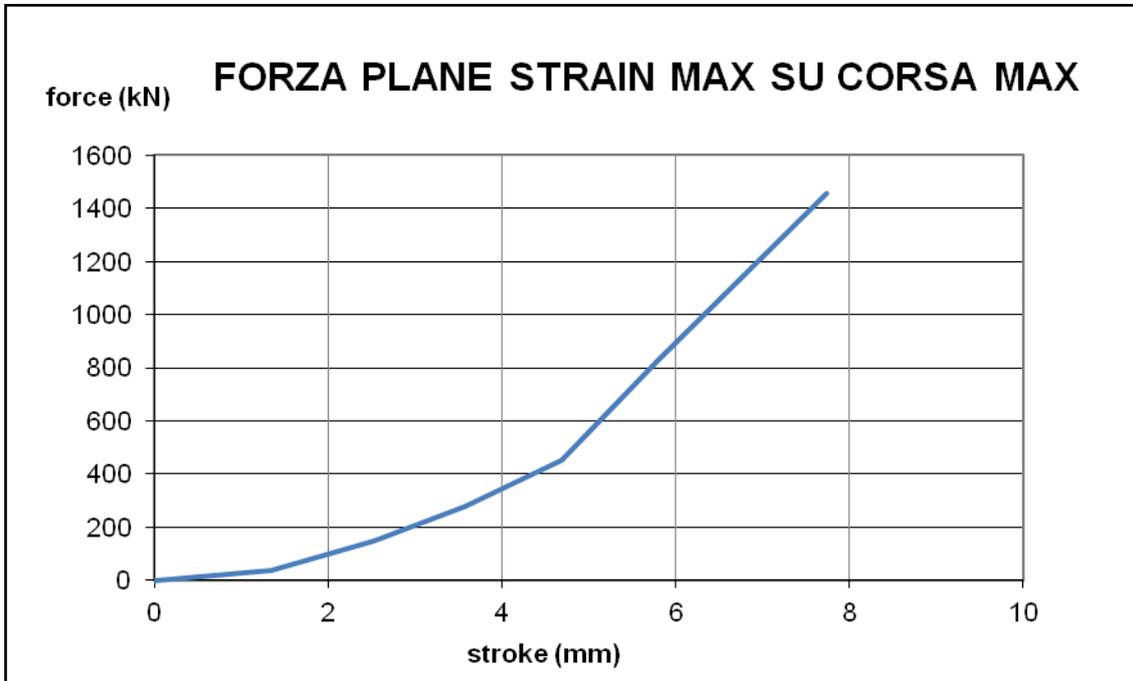


Figura 84: Curva plane strain max su corsa max

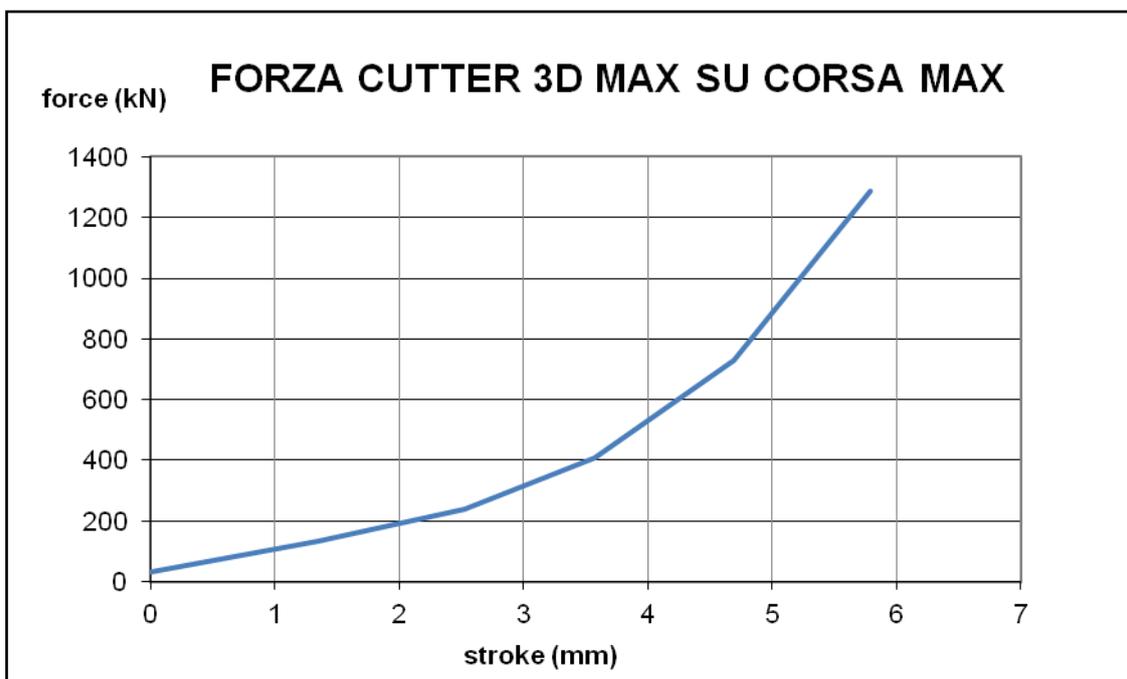


Figura 85: Curva cutter 3D max su corsa max

Interpolando le curve presenti nelle figura 84 e 85 è possibile ricavare due funzioni di ordine quadrato:

$$ForzaPlaneStrainMax = 27,02 * CorsaMax^2 - 21,65 * CorsaMax + 9,27$$

$$ForzaCutter3DMax = 44,95 * CorsaMax^2 - 57,43 * CorsaMax + 69,51$$

dove le due forze dipendono direttamente dalla corsa max. Grazie all'analisi effettuata precedentemente si è ricavato tramite media aritmetica che la corsa max è esprimibile come:

$$CorsaMax = 0,428 * Spessore Materiale$$

A partire dallo spessore del pezzo posso ricavarli le due forze principali.

Conclusioni

Lo scopo iniziale di questo progetto di ricerca è stato quello di imparare ad utilizzare il programma Simufact.Forming 10.0.1 e quello di sviluppare un modello FEM in grado di prevedere le forze agenti in un processo di cesoiatura. Dopo questo l'obiettivo si è focalizzato sul modello analitico che ha permesso di ricavare i risultati tridimensionali attraverso le simulazioni in 2D.

L'analisi post simulazione ha permesso di notare una diminuzione della forza necessaria al taglio, se nella lama è presente un angolo di cesoiatura.

Il software Simufact.Forming 10.0.1 è stato un buono strumento di simulazione, grazie alle sue molteplici funzioni ha permesso di eseguire numerose prove in cui si sono andati a cambiare o settare i parametri principali del progetto permettendo di comprendere quali fossero i più efficienti.

Con esso è stato possibile modellare tutte le fasi del processo di cesoiatura della lamiera e manipolare i risultati per considerazioni e confronti.

Grazie all'aiuto del professore Guido Berti si è costruito un ottimo modello analitico per convertire i valori ottenuti mediante simulazione 2D a lame parallele in forze di taglio 3D con un proprio angolo di cesoiatura; poi si è andato a ricavare il valore di danneggiamento di Cockroft-Latham tramite prova di trazione del Weldox700.

Si può pensare che un'applicazione di questo metodo, con le opportune modifiche, possa essere usata per una stima delle forze in altri processi concettualmente simili come punzonatura, piegatura.

Per gli sviluppi futuri di questo tipo di progetto si vede la necessità di verificare sperimentalmente quando provato. Si raccomanda di concentrarsi sui parametri che influenzano la deformazione, e quindi la forza richiesta:

- le proprietà del materiale ed in particolare il modulo elastico e l'UTS;
- il gioco tra stampo superiore e stampo inferiore;
- la sporgenza della lamiera;
- lo spessore lamiera;
- il parametro di danneggiamento.

Bibliografia

- [1] Francesco Giaretta, *Studio e modellazione numerica del processo di tranciatura*. Thesis in Padua (2012).
- [2] Wisselink, Hendrik Herman, *Analysis of guillotining and slitting, finite element simulations*. Thesis in University of Twente, The Netherlands (2000).
- [3] C. Amerio, R. De Ruvo, S. Simonetti, *Lavorazioni della lamiera*. In: *Elementi di tecnologia*, © SEI (2011).
- [4] Ssab Oxelösund, *Bending/Shearing*. A Sweden industry. Allegato Brochure.
- [5] T. Børvik, S. Dey, A.H. Clausen, *Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles*. In: *International Journal of Impact Engineering* 36 (2009) 948–964.
- [6] R. Baldacci, G. Ceradini, E. Giangreco, *Plasticità*. In CISIA, Milano (1974)
- [7] Silvio Fanini, *Modelling of the Mannesmann effect in tube piercing*. Thesis in Padua (2008).
- [8] Ridha Hambli, Marian Reszka, *Fracture criteria identification using an inverse technique method and blanking experiment*. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 44 (2002) 1349–1361.
- [9] M. Samuel, *FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process*. In: Faculty of Engineering, Mansoura University, Post No. 35516, Mansoura, Egypt Received (8 July 1997).
- [10] Ming Li, *An experimental investigation on cut surface and burr in trimming aluminum autobody sheet*. In: Material Mechanics and Microstructure Center, Alcoa Technical Center (2002).
- [11] G. Berti, M. Monti, *Numerical modelling of sheet metal guillotining process*. In Vicenza (2012).