

- INDICE -

SOMMARIO	1
OBIETTIVI DELLO STUDIO	3
CAPITOLO 1:	
Il caso industriale	4
1.1 la progettazione dei processi industriali assistita dalla modellazione numerica	
1.2 la formatura delle molle	
CAPITOLO 2:	
Messa a punto del modello FEM per l'analisi del processo di formatura della molla	9
2.1 geometrie del modello	
2.2 parametri di processo	
2.3 parametri del materiale	
2.3.1 modello di danneggiamento di Lemaitre	
2.4 parametri della simulazione	
CAPITOLO 3:	
Piani delle simulazioni e risultati	31
3.1 simulazioni di screening	
3.2 piano DoE e risultati	
CAPITOLO 4:	
Conclusioni	55
BIBLIOGRAFIA e SITOLOGIA	58

SOMMARIO

L'elaborato riportato nel prosieguo si propone di esporre i risultati dello studio di simulazioni numeriche del processo di formatura di molle per sospensioni automobilistiche. Le simulazioni sono state condotte utilizzando il software FEM Simufact.forming 9.0.

Il progetto si articola in tre parti: il primo capitolo espone il caso industriale e il processo che viene utilizzato per la formatura precisando i punti più critici e le problematiche in cui si incorre. Nel secondo capitolo viene trattata la messa a punto del modello FEM per la formazione della molla. Verranno individuate le motivazioni e i fattori che conducono a rottura la spira, modificando eventualmente geometrie e parametri del modello e indagando le combinazioni migliori d'attrito al fine di ottimizzare il processo di formatura. Il danneggiamento a cui è soggetta la molla, studiato con il metodo del *"danneggiamento relativo di Lemaitre"*, è influenzato sia dalle tensioni a cui è sottoposto il filo d'acciaio, sia dalle caratteristiche intrinseche del materiale: per tale motivo, si rende necessario esporre brevemente la scelta del particolare tipo di acciaio usato. Dapprima si è presentata la composizione dell'acciaio martensitico 54SiCr6 per poi spiegarne il processo di formazione. Successivamente, grazie, a prove di trazione già svolte sul filo d'acciaio, si sono ricavati parametri, quali coefficiente ed esponente di incrudimento, danneggiamento critico e tensione massima usati dal software per elaborare i dati della simulazione.

Nella parte successiva viene presentato il percorso seguito per l'ottimizzazione delle geometrie del modello nonché i parametri specifici di ogni componente, quali attrito o leggi di moto; variando questi coefficienti si possono così analizzare i casi più critici della formatura allo scopo di indagare in che termini possano influenzare il processo.

Il terzo capitolo è suddiviso in due parti: la prima riguarda l'analisi dei dati ricavati dalle simulazioni di screening, verranno esposte considerazioni riguardanti il comportamento del processo e da questo saranno tratte le prime conclusioni della trattazione. Queste ultime saranno poi integrate, nella seconda parte, con la presentazione di un modello di regressione ottenuto dai dati ricavati da un piano di simulazioni numeriche pianificato mediante tecniche DoE. Partendo dai modelli di

regressione sono state ricavate delle superfici di risposta grazie alle quali si sono resi maggiormente leggibili ed interpretabili i risultati.

OBIETTIVI DELLO STUDIO

Gli obiettivi della trattazione sono:

- messa a punto di un modello FEM del processo di formatura della molla;
- valutare l'effetto della variazione di
 - a) parametri di processo
 - b) configurazione del macchinario sul danneggiamento del filo durante la sua formatura.

Nel laboratorio di Tecnologie e Sistemi di Lavorazione sito presso la Facoltà di Ingegneria Gestionale di Padova, nella sede di Vicenza, è stata avviata una postazione per simulazioni numeriche dotata del software Simufact.forming 9.0, un programma FEM per la simulazione di processi di formatura metallica a caldo e a freddo.

CAPITOLO 1

IL CASO INDUSTRIALE

1.1 la progettazione dei processi industriali assistita dalla modellazione numerica

Negli ultimi anni si è sviluppata una progettazione integrata di prodotto e di processo assistita da software CAD/CAE, allo scopo di limitare i costi elevati di errate progettazioni e test, la quale si è rivelata uno strumento vincente. Nel convenzionale processo di design, il prodotto veniva progettato disgiuntamente al processo: la suddetta modalità generava la necessità di apporre continue modifiche al progetto iniziale, anche a produzione già avviata. I costi dei cambiamenti apportati hanno, comprensibilmente, un valore minore nelle prime fasi del processo di engineering, quando ancora molte decisioni sono a livello virtuale e sono stati realizzati solo pochi componenti riguardanti il processo. Il grado di complessità dell'introduzione di un cambiamento, evidentemente, cresce proporzionalmente allo sviluppo del processo; apportare modifiche a geometrie o a materiale quando, ad esempio, gli stampi sono già stati realizzati, è molto complesso e dispendioso.

I software ad elementi finiti si stanno affermando come strumento fondamentale per realizzare una progettazione integrata di prodotto e processo; questi programmi sono in grado di riprodurre e simulare l'andamento di diversi tipi di processi produttivi permettendo di prevederne il comportamento e parte dei problemi che con metodologie standard di progettazione sarebbero emersi solo in seguito all'esecuzione di test fisici, i quali comportano notevole dispendio di tempo, materiale e danaro.

L'utilizzo di questo strumento, unitamente all'esperienza di operatori specializzati, permette un livello di progettazione innovativo e atto a soddisfare i tempi e gli standard di qualità sempre più esigenti richiesti dal mercato.

1.2 La formatura delle molle

Nella figura 1 viene presentato il macchinario per la formatura della molla prodotto da WAFIOS, azienda leader nella costruzione di questo tipo di macchinari.

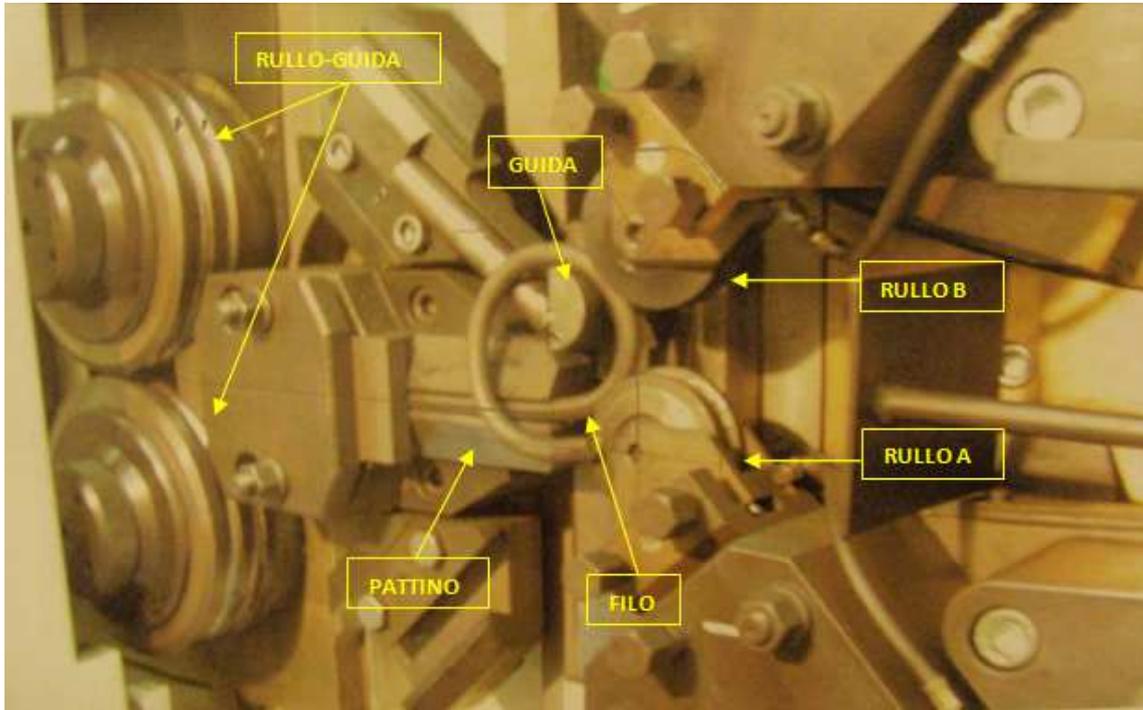


Fig.1 Macchina WAFIOS per la formatura di molle

In ambito industriale la tendenza è quella di produrre spire attraverso un processo di formatura a freddo mediante l'utilizzo di un filo d'acciaio sottoposto precedentemente a trattamenti termici. Questo sistema permette di evitare trattamenti successivi alla formatura della spira, nonostante si riveli comunque critico l'uso di un materiale ad alta resistenza già incrudito e temprato. Questo infatti ha una duttilità bassa che può condurre al danneggiamento della spira durante il processo.

Nell'industria automobilistica, attualmente, ha grande rilievo la ricerca dei materiali nonché dei componenti delle macchine e di conseguenza dei problemi derivanti da una scelta errata delle loro caratteristiche.

Nel caso di studio analizzato nella trattazione viene utilizzato un filo d'acciaio di diametro $d = 14,5$ mm per realizzare una molla avente diametro $\phi = 90$ mm e angolo di passo $\alpha = 60^\circ$ presentato in figura 3.



Fig.2 Esempio di molle per sospensioni automobilistiche

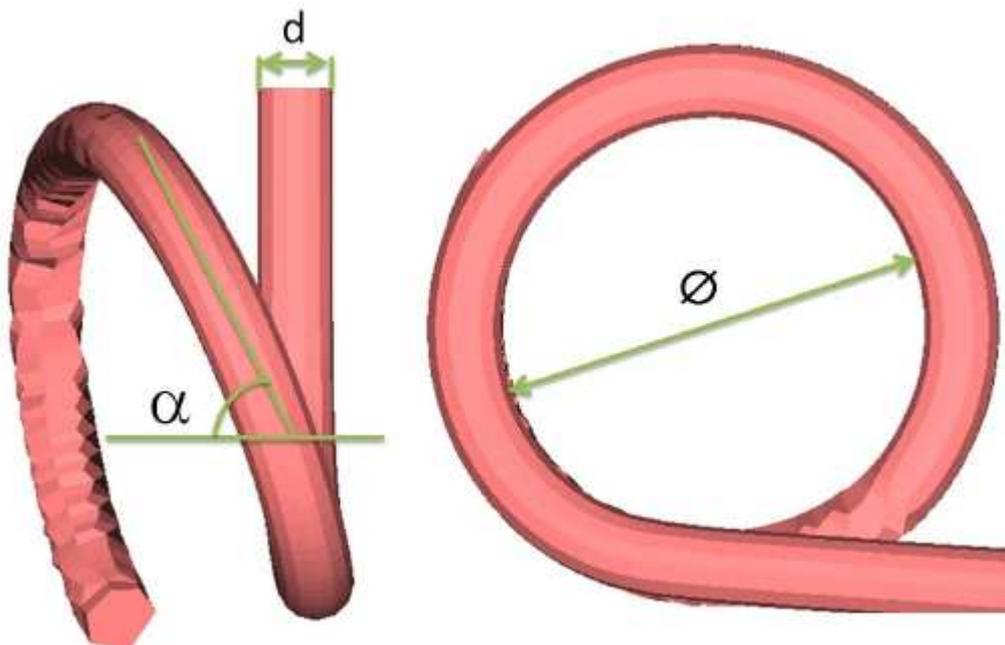


Fig.3 Parametri della molla

Le operazioni di formatura, così come molti altri processi metalmeccanici, necessitano inoltre di lubrificanti . A causa delle alte pressioni, infatti, si rende necessario l'uso di speciali lubrificanti per impedire sfregamenti, grippaggi, rotture del filo o un'eccessiva usura dello strumento. L'improprio uso di oli o miscele, però, interferisce spesso in modo distruttivo nel processo causando vibrazioni nel macchinario.

Il lubrificante più usato per questo tipo di processi è proprio l'ossido che si forma sulla superficie del filo successivamente ai trattamenti termici. Spessore, aderenza e friabilità dello strato ossidato giocano un ruolo fondamentale nella formatura.



Fig. Strato di ossido 14 [μm]



Fig. Strato di ossido 2 [μm]

E' quindi lo strato strato di ossido uno dei parametri fondamentali nello studio del danneggiamento della spira. Oltre alla configurazione del macchinario e quindi alle geometrie del modello di simulazione, infatti, l'aderenza dell'ossido, simulato attraverso vari spiattellamenti del filo, giocherà un ruolo chiave nel processo.

Il problema principale del processo è la possibile rottura della spira, un esempio è riportato in figura 4. Verranno quindi analizzate le cause del suddetto fenomeno indicando le combinazioni di fattori più favorevoli per la formatura.



Fig.4 Esempi di rottura della spira durante il processo di formatura

CAPITOLO 2

MESSA A PUNTO DEL MODELLO FEM PER L'ANALISI DEL PROCESSO DI FORMATURA DELLA MOLLA

La simulazione numerica è stata condotta utilizzando il software Simufact.forming 9.0 che utilizza il metodo degli elementi finiti (FEM). 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. Benché il metodo FEM (Finite Element Method) competa, in alcuni ambiti limitati, con altre strategie numeriche (metodo delle differenze finite, metodo dei volumi finiti, metodo degli elementi al contorno, metodo delle celle, metodo spettrale, etc.), mantiene una posizione dominante nel panorama delle tecniche numeriche di approssimazione.

Il software in questione analizza i processi di formatura a freddo o a caldo generando simulazioni di tipo 2D o 3D, queste ultime saranno utilizzate nel processo di formatura della molla. Il pezzo da lavorare viene virtualmente suddiviso in "elementi", nel caso 3D, di forma esaedrica, chiamati *mesh* dei quali è possibile decidere arbitrariamente la dimensione in funzione della tipologia di simulazione più o meno accurata che si intende realizzare.

Simufact.forming 9.0 richiede input parametri geometrici, come, ad esempio, la geometria della billetta e degli stampi; parametri di processo, come il moto della pressa, la temperatura di formatura, il coefficiente di attrito, e ancora parametri del materiale, il comportamento reologico.

Gli output sono svariati e molto utili per studiare il comportamento del processo al fine di ottimizzarlo, alcuni di questi sono il profilo di velocità, la distribuzione di deformazione e tensione nonché di temperatura e il danneggiamento, parametro fondamentale per questa trattazione.

La formatura della molla, in particolare, è sensibile sia alle condizioni del processo sia alla configurazione della macchina: proprio per questo motivo sono state considerate

sia differenti condizioni d'attrito che diverse configurazioni delle geometrie del modello per generare i piani di simulazioni.

L'obiettivo principale è la determinazione di soddisfacenti condizioni di lubrificazione e una configurazione del macchinario che permetta una corretta produzione della molla evitando la rottura del filo.

2.1. Geometrie del modello

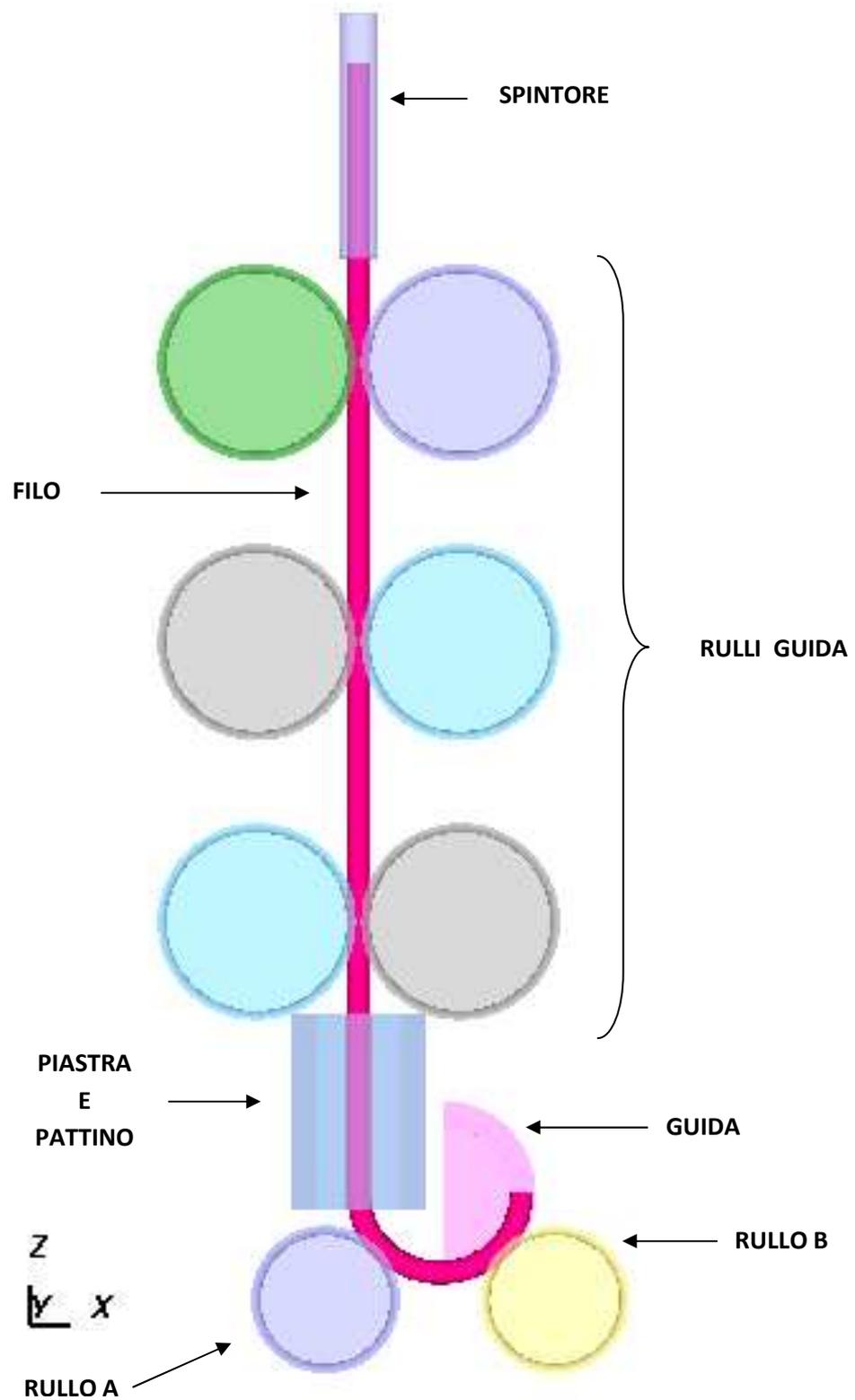


Fig. Modello del macchinario

Per poter eseguire l'anzidetta simulazione nel modo più realistico possibile si sono riprodotti nei minimi dettagli gli utensili e il filo della molla. Questi sono stati precedentemente disegnati con il software Pro engineer; le quotature mostrate in figura sono espresse in millimetri.

Il pattino, rappresentato in figura 5, è stato disegnato con una curvatura definita da semicirconferenze di raggio 3 mm.

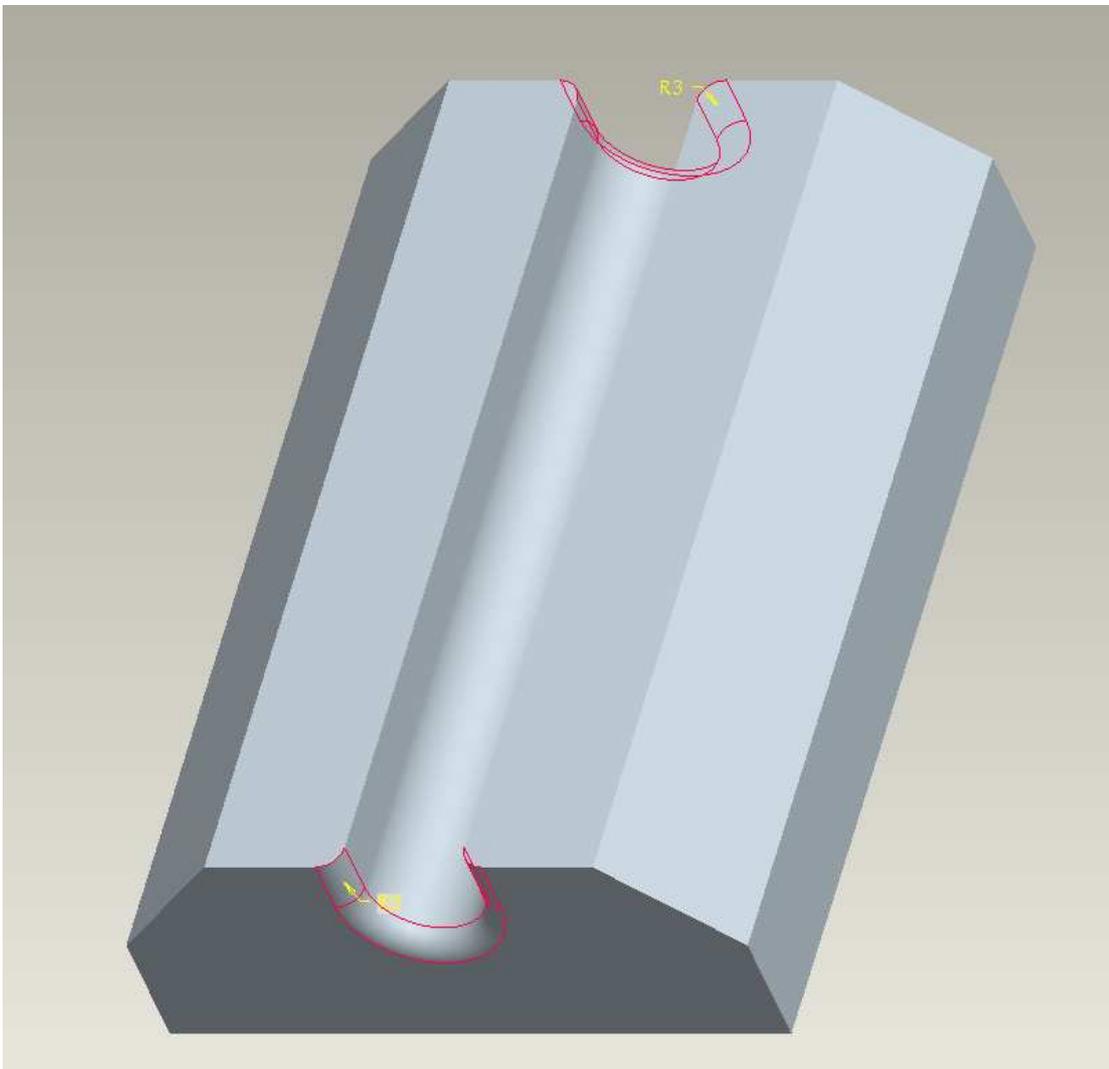


Fig. 5 Pattino

La piastra posta in corrispondenza del pattino permette al filo di evitare il fenomeno dell'inarcamento, ovvero di piegare nella zona compresa tra i rulli-guida e il pattino: questo elemento infatti vincola il movimento del filo mantenendo la sua corsa all'interno del pattino.

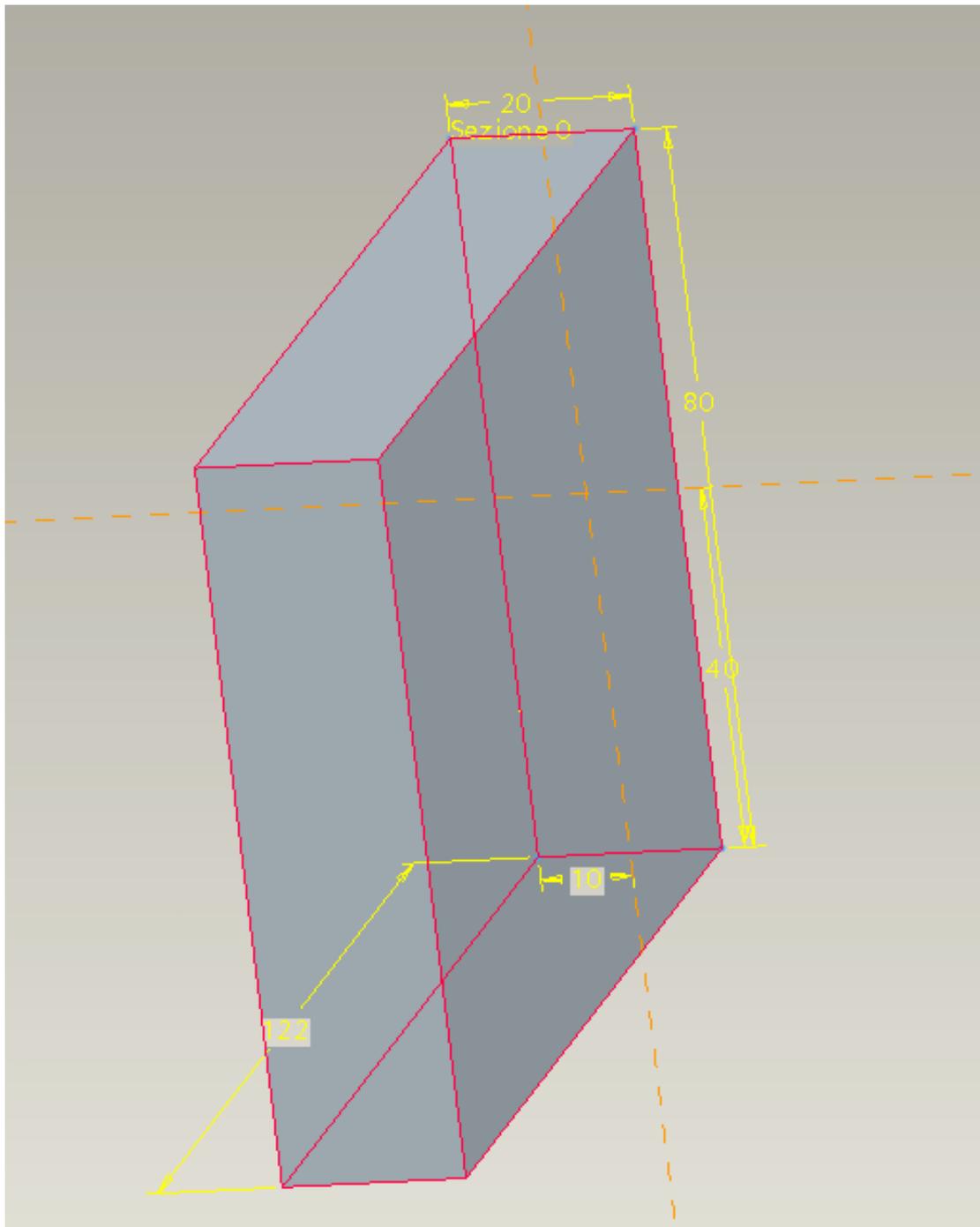


Fig. 6 Piastra

I rulli A e B sono stati progettati con una scanalatura a cui è stata data una profondità di 6.4 mm.

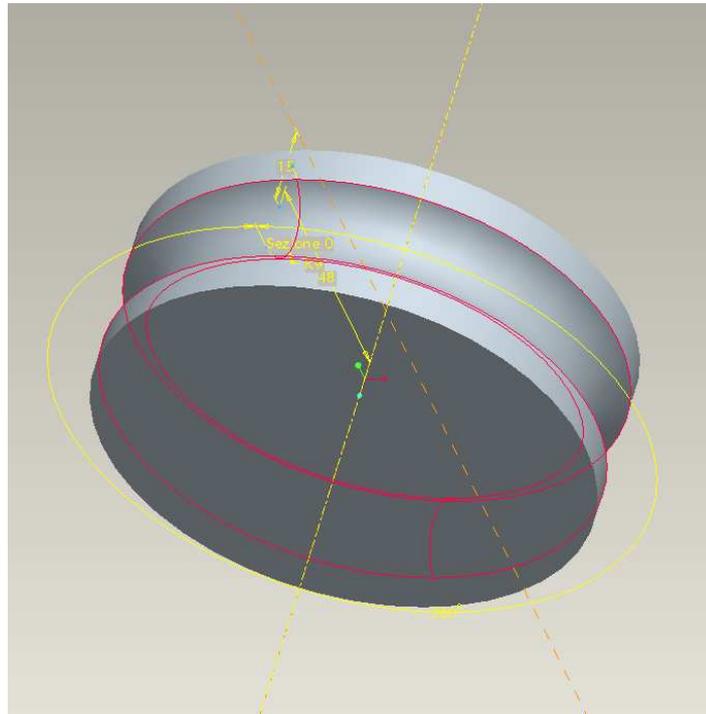


Fig. 7 Rulli A e B

Per i rulli-guida è stata utilizzata la stessa geometria dei rulli precedentemente presentati, ma con un aumento delle dimensioni.

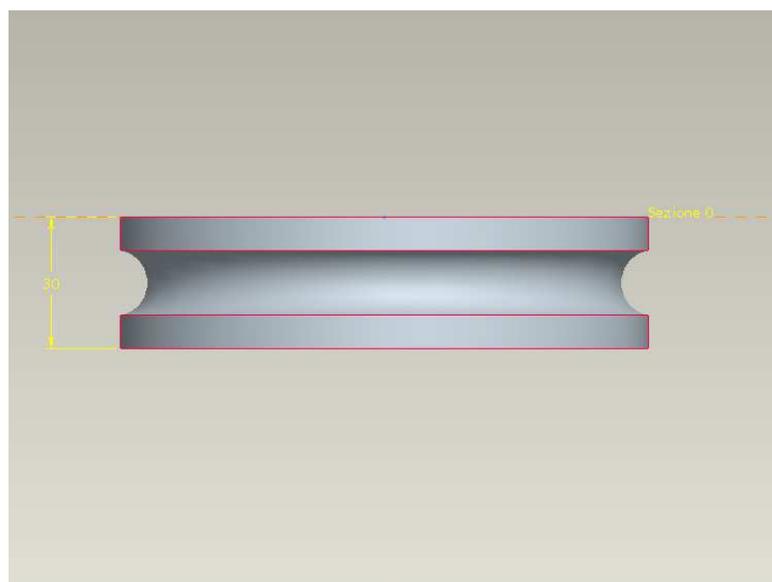


Fig. 8 Rulli-guida

La guida usata nelle prime simulazioni è stata poi modificata e resa di forma elicoidale allo scopo di agevolare il processo evitando strisciamenti dannosi per la corretta formatura della molla.

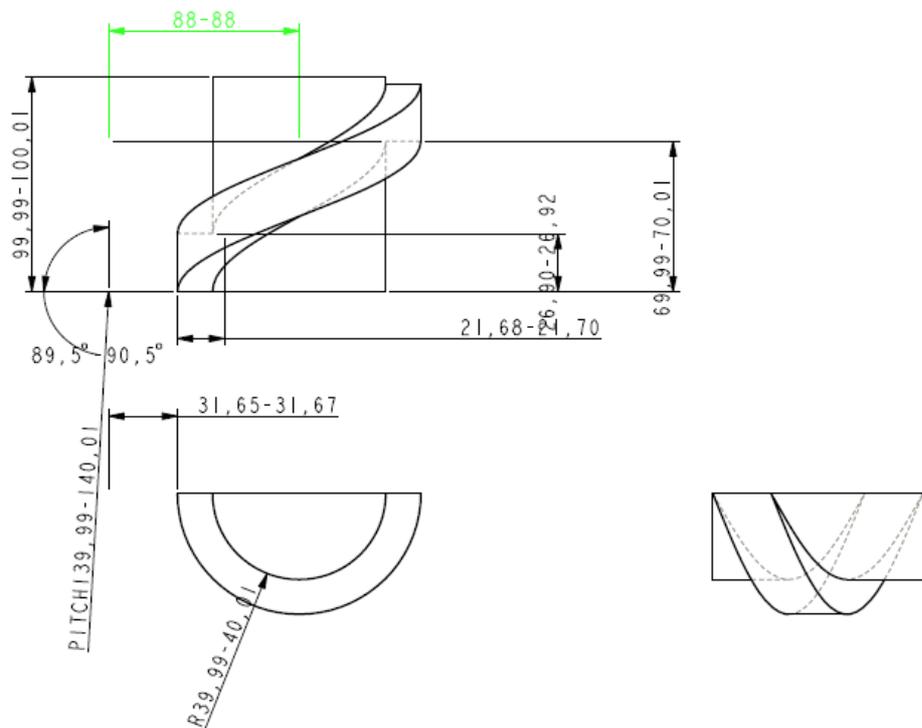
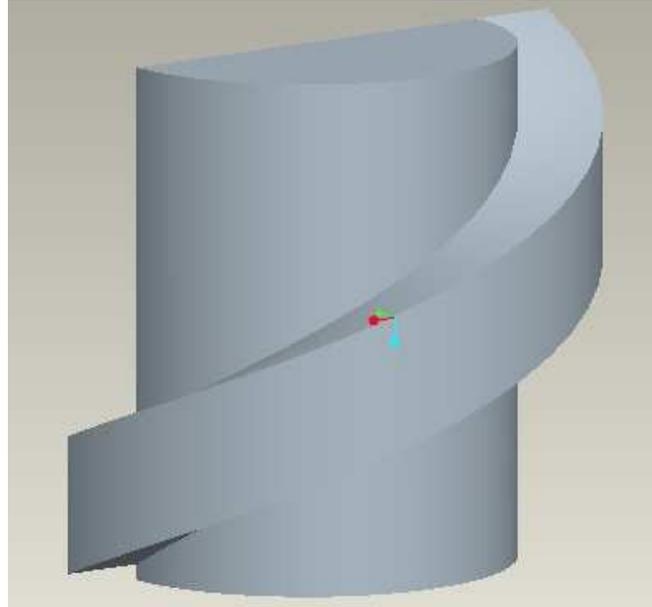


Fig. 9 Guida elicoidale

Il filo in acciaio ha un diametro di 14,5 mm ed è già stato piegato nella parte inferiore in modo tale da posizionarsi correttamente tra i rulli A e B facilitando così la formatura; se questo fosse rettilineo, infatti, mediante il solo ausilio dei rulli, difficilmente assumerebbe il raggio di curvatura corretto.

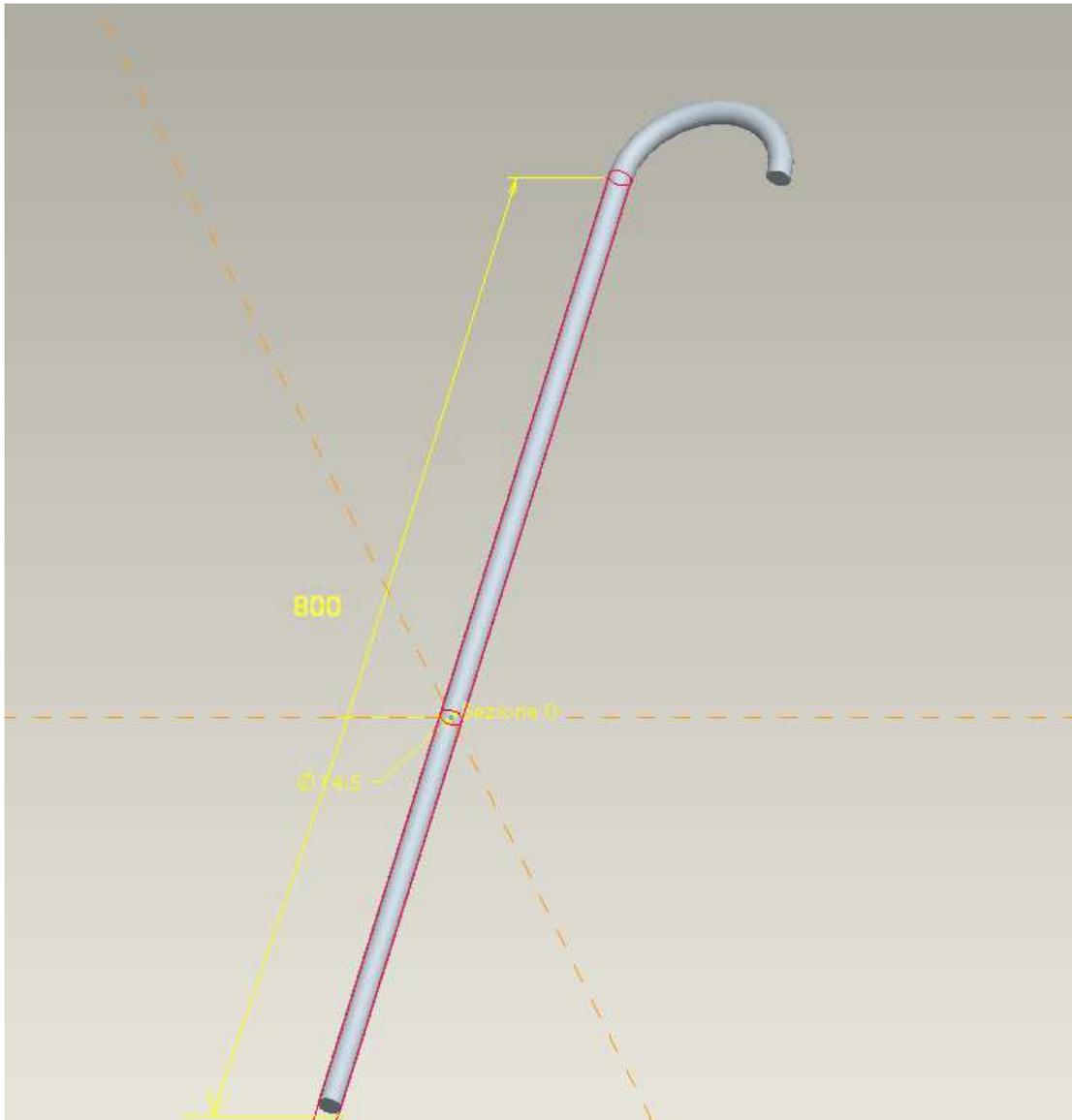
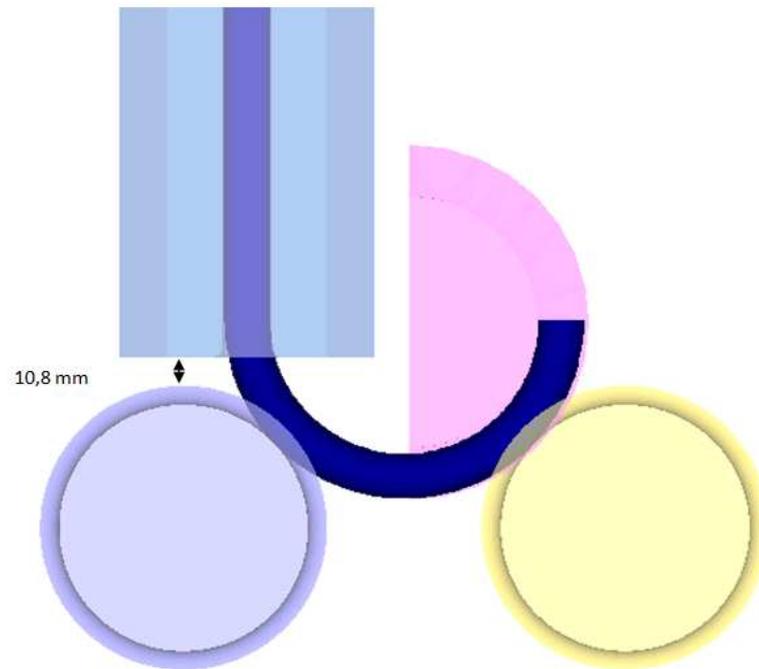
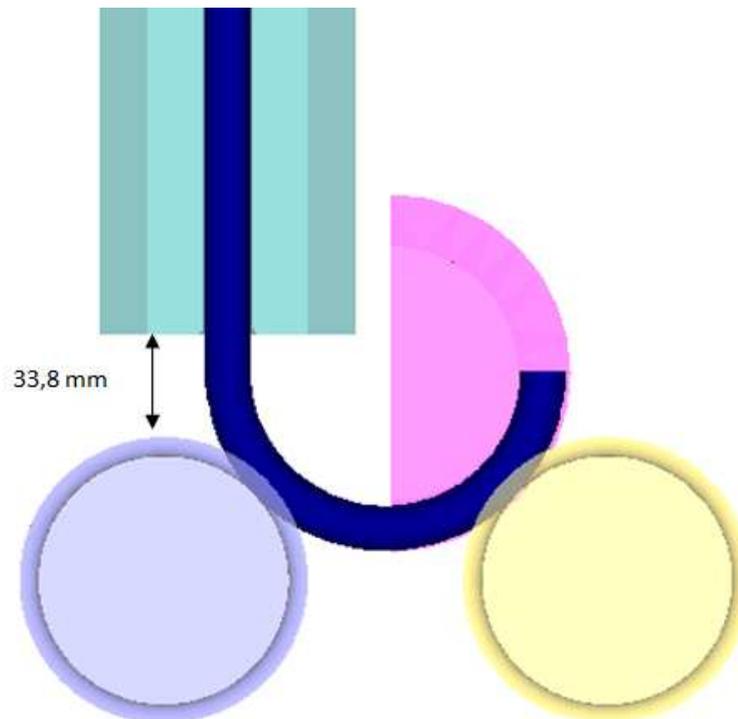


Fig. 10 Filo

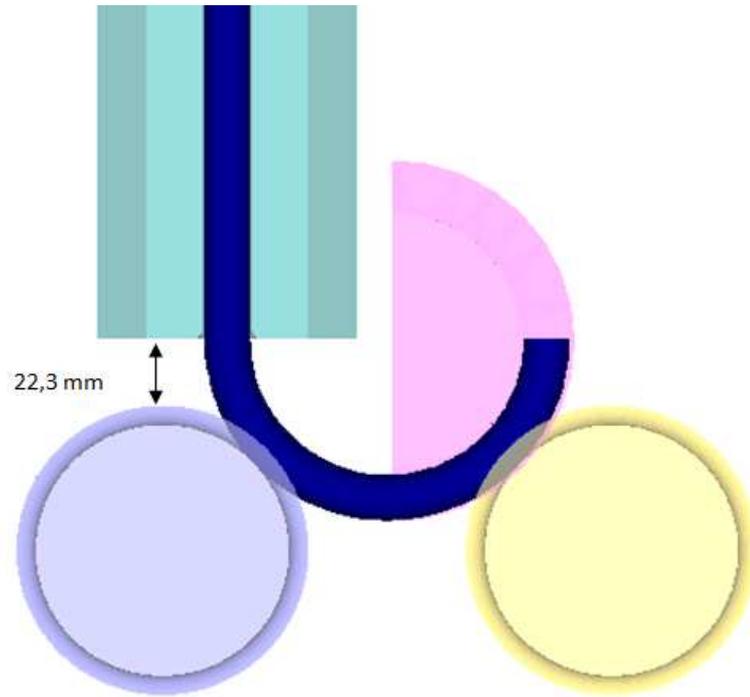
Sono state usate inoltre, per generare i piani delle simulazioni, tre diverse configurazioni del modello con distanze relative differenti tra pattino e rullo A.



Configurazione A



Configurazione B



Configurazione C

2.2. Parametri di processo (cinematica, tribologia, scambi termici e temperature iniziali di lavorazione)

Il moto di avanzamento del filo, nel reale processo industriale, è permesso da rulli di alimentazione. Al fine di semplificare il modello adottato si è deciso di utilizzare, in sostituzione ai suddetti rulli, uno spintore al quale è stata assegnata una pressa idraulica che permette di far avanzare il pezzo ad una velocità costante di 0,67 m/s .

Il fattore d'attrito (μ) tra il filo e i vari componenti del macchinario, guida, piastra, e pattino, nelle simulazioni di screening, assumono valori di 0,05 o 0,3. Sui rulli-guida questo parametro è costante in tutte le combinazioni studiate e pari a 0,1.

La formatura è una lavorazione che avviene a freddo, quindi la temperatura alla quale avviene il processo è fissata a 20°C.

Per quanto riguarda gli scambi termici tra filo, gli utensili e l'ambiente, i parametri del processo sono indicati nella sottostante tabella.

	Temperatura iniziale	Coefficiente di scambio termico con l'ambiente	Coefficiente di scambio termico con il pezzo
Filo	20°C	$50 \frac{W}{m^2 K}$	$50 \frac{W}{m^2 K}$
Utensili	20°C	-	$20000 \frac{W}{m^2 K}$

Tabella 1. Scambi termici

In alcuni casi si è simulato lo spiattellamento del filo attraverso allo schiacciamento dei rulli-guida A e B a velocità differenti in un range da 0 a 0.5 mm/s per 0.1 s.

2.3. Parametri del materiale

Il filo che subisce la formatura proviene da una trafilatura seguita da un trattamento termico e da rinvenimento. La struttura ottenuta è acciaio martensitico 54SiCr6 la cui composizione chimica è la seguente:

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,56	1,45	0,70	< 0,01	< 0,01	0,65

Tabella 2. Composizione chimica dell'acciaio 54SiCr6, le quantità esposte sono in percentuale

La martensite è una soluzione solida sovrassatura di carbonio nel reticolo del $Fe\alpha$, che pertanto risulta tensionato e deformato. La trasformazione martensitica, avviene pressoché istantaneamente, per l'impossibilità di fenomeni diffusivi sia da parte del carbonio sia da parte del ferro. La martensite può assumere due aspetti morfologici, lenticolare e massiva, in dipendenza dalla temperatura di trasformazione: più alta è tale temperatura, maggiore è la quantità di forma massiva.

La martensite lenticolare (fig.11) è caratteristica degli acciai ad alto carbonio (a partire dallo 0.6% di C); essa si forma a scapito di quella massiva, che invece non esiste al di sopra di 1% di C. Nell'intervallo tra 0.6 e 1% di carbonio, è possibile avere l'una o l'altra martensite oppure entrambe. In seguito a queste considerazioni, è possibile pertanto affermare che la martensite che forma il nostro acciaio è di tipo massivo.

La martensite massiva (fig.12) ha una microstruttura complessa a placchette e, a differenza di quella lenticolare, presenta un'elevata densità di dislocazioni attorno alle quali tendono a raccogliersi gli atomi di carbonio; ciò crea minori distorsioni reticolari e quindi minore fragilità. Qualunque sia la morfologia della martensite, le dimensioni dei suoi cristalli sono determinate solo dalla grandezza dei cristalli austenitici di partenza. Da questo fatto deriva che una grana austenitica grossolana genererà una martensite altrettanto grossolana per cui alla fragilità propria del reticolo martensitico si aggiunge quella dovuta a una grana grossa.



Fig. 11 Martensite lenticolare (C=1.55%)

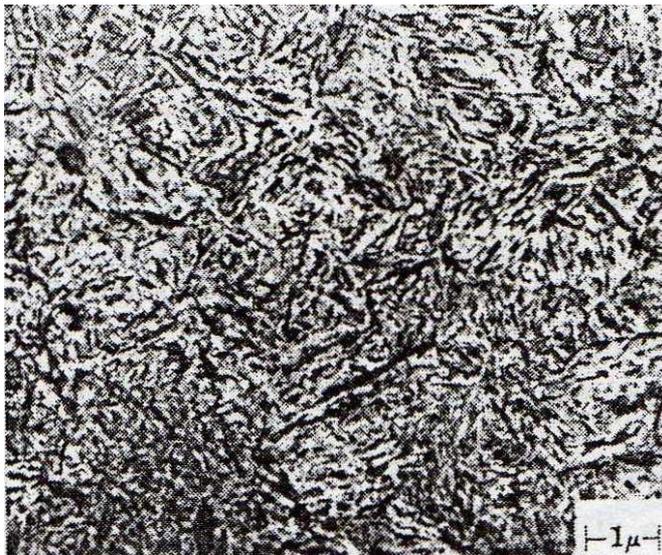


Fig. 12 Martensite massiva (C=0.55%)

La martensite, inoltre, è caratterizzata da elevata durezza e resistenza meccanica, in conseguenza delle distorsioni reticolari asimmetriche provocate dalla presenza forzata degli atomi di carbonio, dall'elevata densità dislocativa e dalle modificazioni di volume legate alla trasformazione $\gamma \rightarrow \alpha$.

La micrografia del filo è presentata in figura 13.

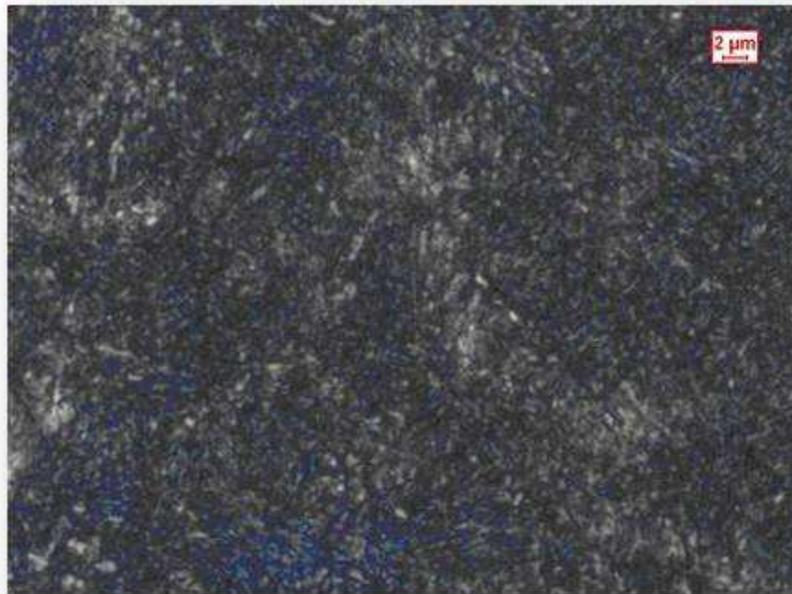


Fig. 13 Micrografia del filo d'acciaio di struttura prevalentemente martensitica lamellare

L'acciaio in questione viene deformato a freddo dopo aver subito un trattamento termico che consente la formazione di uno strato di ossido sulla superficie del filo. Questo funge da lubrificante durante l'operazione di formatura della molla; per evitare il danneggiamento di quest'ultima si è stimato che lo strato ottimale di ossido dovrebbe essere pari a circa 14 μm .

La curva ingegneristica tensione-deformazione dell'acciaio martensitico 54SiCr6 è riportata in figura 14.

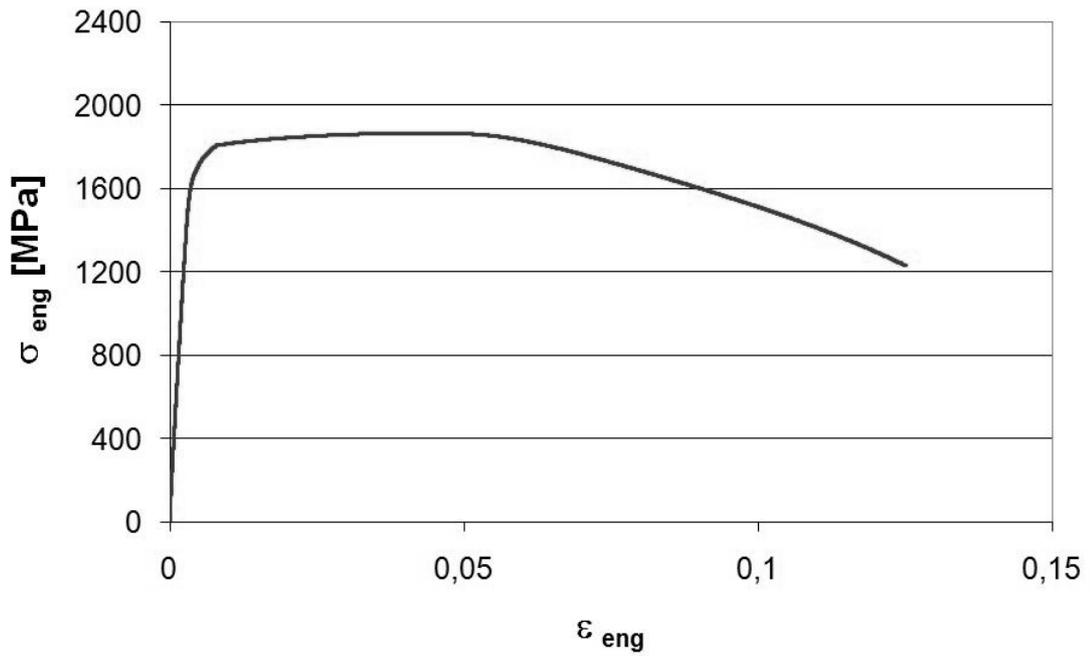


Fig. 14 Curva ingegneristica tensione-deformazione

Mentre la σ_{true} è ricavata dalla curva approssimata dalla legge $\sigma_f = K \cdot \epsilon^n$, in figura 15, dove ϵ è la deformazione vera, n esponente di incrudimento e K il coefficiente di incrudimento.

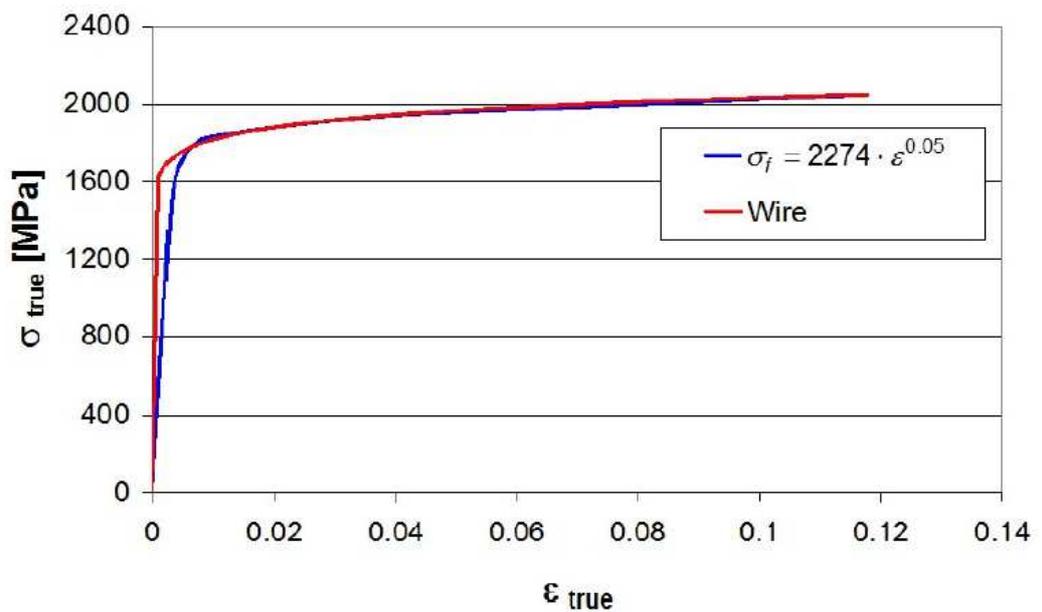


Fig. 15 Curva vera tensione-deformazione

Dai dati delle prove di trazione precedentemente svolti sul materiale si ricava la legge:

$\sigma_f = 2274 \cdot \epsilon^{0.05}$ il cui andamento è rappresentato in figura 16.

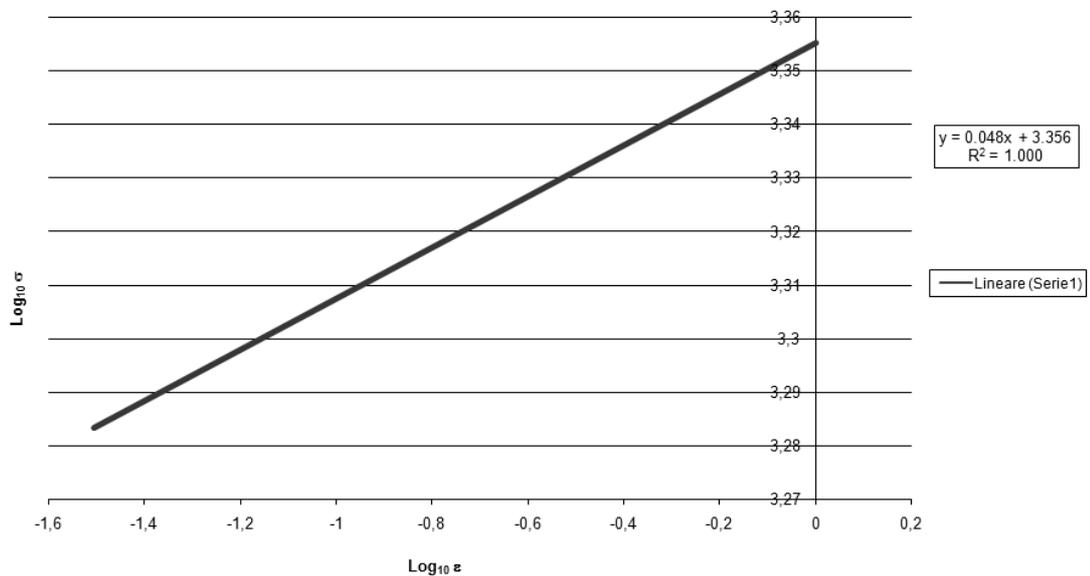


Fig. 16 Grafico dell'andamento di σ_f

Si possono a questo punto riassumere le costanti elasto-plastiche del materiale:

MODULO DI YOUNG	200 [GPa]
COEFFICIENTE DI POISSON	0.28
DENSITA'	8027 [kg/m ³]
TENSIONE MINIMA DI SNERVAMENTO	1663 [MPa]
DEFORMAZIONE ϵ	2274 [MPa]
ESPONENTE DI INCRUDIMENTO n	0.05

Tabella 3. Costanti elasto-plastiche del materiale

Come accennato nel precedente paragrafo, i dati delle prove di trazione sul materiale, di cui si disponeva già, possono essere usati anche per ricavare i parametri del modello di danneggiamento di Lemaitre. Questi ultimi sono utilizzati dal software per valutare l'andamento del danno durante la formatura della spira nelle varie combinazioni desiderate .

DANNEGGIAMNETO CRITICO	0,34
TENSIONE MASSIMA	1867 [MPa]
PARAMETRO DI DANNEGGIAMENTO	1,76
DEFORMAZIONE EQUIVALENTE ALLA MASSIMA TENSIONE	0,05

Tabella 4. Parametri del modello di danneggiamento di Lemaitre

2.3.1 Il modello di danneggiamento di Lemaitre

Nella simulazione numerica di processi di formatura, sono ormai ampiamente utilizzati modelli di danneggiamento per lo studio dell'insorgenza e la propagazione di fratture in seno al pezzo formato, a stampi o attrezzature.

L'applicazione di criteri di frattura nel codice di calcolo, con particolare attenzione al materiale in deformazione, permette di prevederne i limiti di lavorabilità.

Poiché il concetto di lavorabilità è fortemente dipendente sia dalle caratteristiche del materiale che dalle condizioni di processo, risulta necessario, al fine di calibrare correttamente un modello di frattura, fare riferimento ad entrambi gli aspetti e quindi descrivere il comportamento del materiale quando questo viene sottoposto a sollecitazioni il più possibile simili a quelle di formatura.

La frattura del materiale costituisce, in numerosi processi, un difetto da evitare nel prodotto formato; sono altresì numerosi i procedimenti in cui essa svolge una parte attiva e proprio per questo motivo la modellazione della sua evoluzione mediante simulazione numerica è un aspetto fondamentale per lo studio e l'ottimizzazione delle condizioni di lavorazione.

Durante il processo di formatura della molla, il materiale subisce dei danneggiamenti che portano a rottura la spira come documentato dalle immagini 17 e 18.

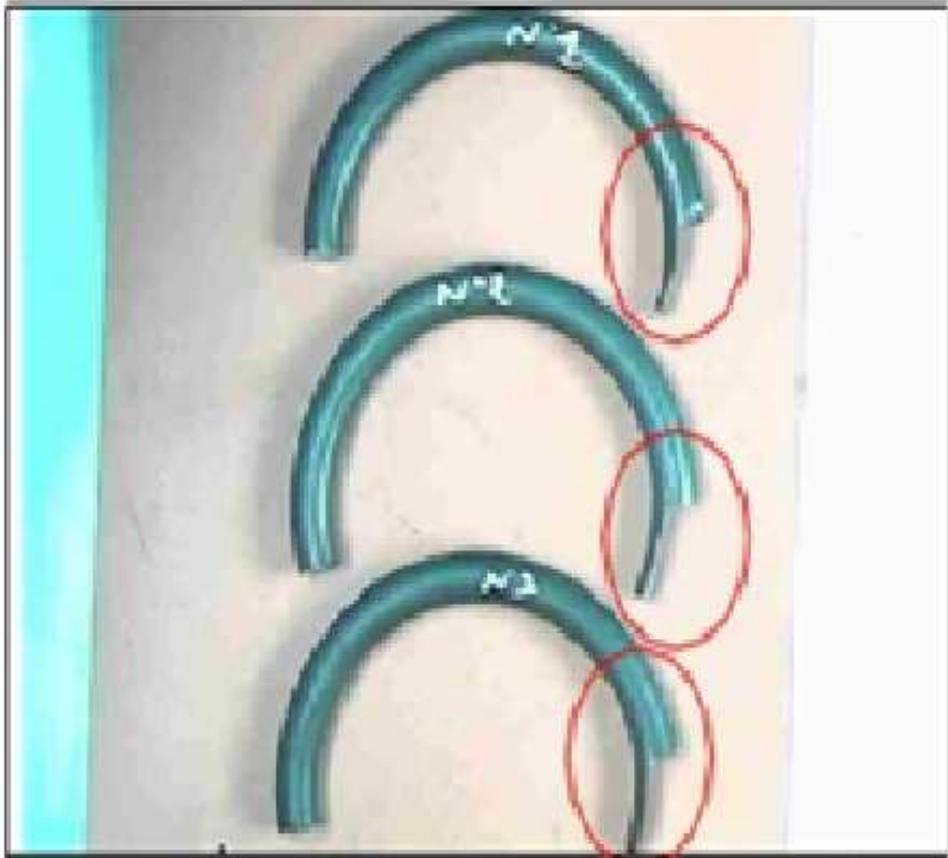


Fig. 17 Esempi di rottura delle molle

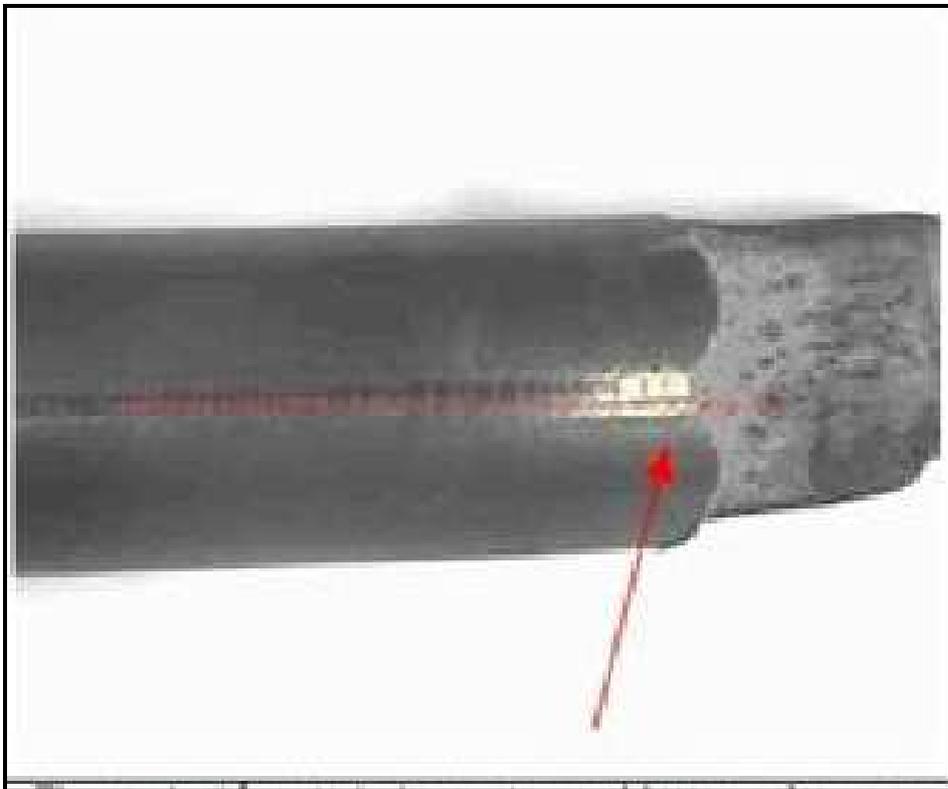
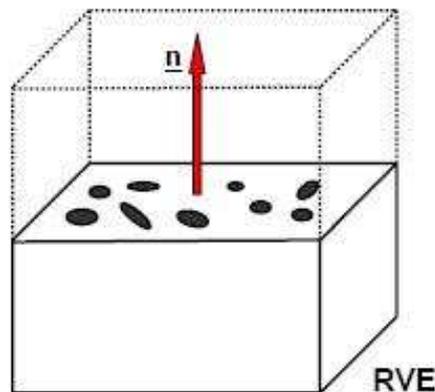


Fig. 18 Rottura del filo d'acciaio

Mediante lo studio dei meccanismi e delle sinergie sviluppatesi nella combinazione di diverse simulazioni del processo effettuate si è cercato sia di individuare il motivo per il quale si sviluppa questo fenomeno sia di ricercare le tecniche più idonee ad evitarlo o quantomeno ad apportarvi miglioramenti.

L'utilizzo degli strumenti della meccanica del continuo per lo studio della rottura duttile è stato proposto per la prima volta da Lemaitre. Si considera un volume elementare di riferimento (RVE), una porzione di solido sufficientemente grande da poter considerare omogeneo il materiale al suo interno.

Il danno (D) può essere definito in termini della riduzione relativa della sezione resistente di un volume elementare di riferimento (RVE) come $D_{(n)} = 1 - A_{\text{eff}}^{(n)} / A_0^{(n)}$.



Nell'ipotesi di danneggiamento isotropo il danno diventa uno scalare $D = 1 - A_{\text{eff}} / A_0$.

In presenza di materiale danneggiato, la tensione effettiva nell'RVE è definita da $\sigma_{\text{eff}} = \sigma / (1 - D)$.

Il danneggiamento critico D_c ($0 \leq D_c \leq 1$) è influenzato, come accennato sopra, sia dalle σ che dai parametri propri del materiale. Non si generano rischi di rottura del materiale quando $D < D_c$; al contrario, quando $D = D_c$, si ravvisa una situazione critica che può portare anche alla rottura del filo (quando $D = D_c$).

Il danneggiamento relativo di Lamaitre si ricava come $D_{\text{rel}} = D / D_c$ con $0 \leq D_{\text{rel}} \leq 1$.

- Tensile test with round specimen
- if needed determine from FE simulation of a tensile test

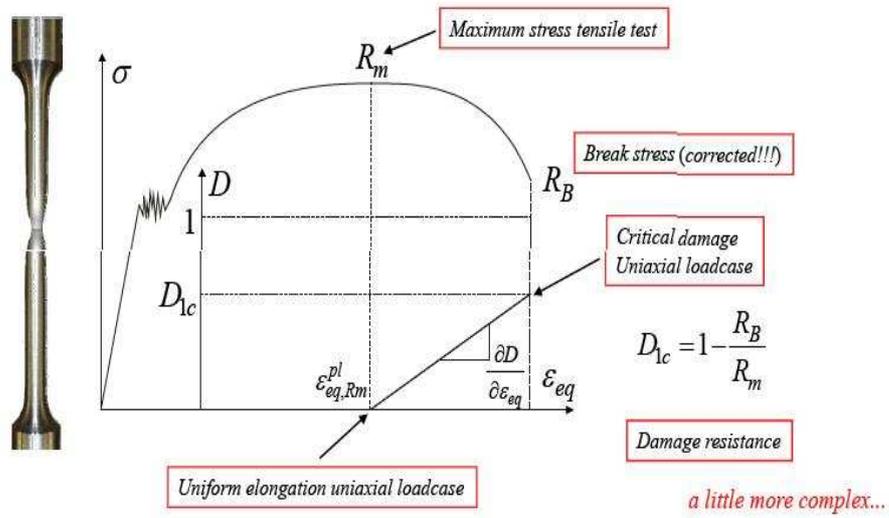


Fig. 19 Grafico tensione-deformazione

Material parameters – Lemaitre in simufact.forming 8.1

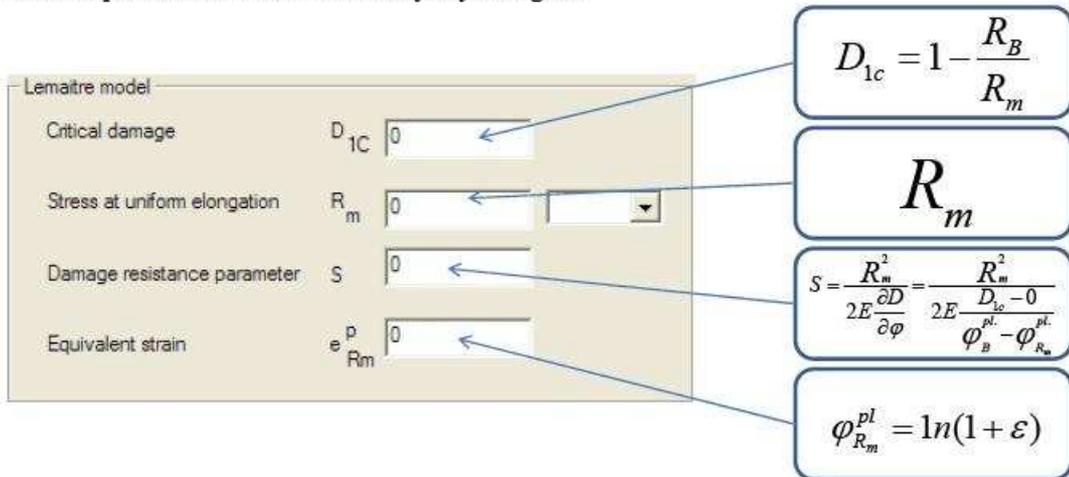


Fig.20 Parametri di Lemaitre

2.4. Parametri della simulazione

La meshatura è la tecnica di suddivisione del dominio oggetto d'indagine in elementi discreti: la simulazione 3D, in questo caso, genera elementini esaedrici di taglia 2,5 mm. Il numero di elementi risultati dalla discretizzazione è 10062.

Nella sezione del filo sotto riportata si evidenziano 35 elementi e una decina sul diametro che permettono una sufficiente precisione nell'analisi.

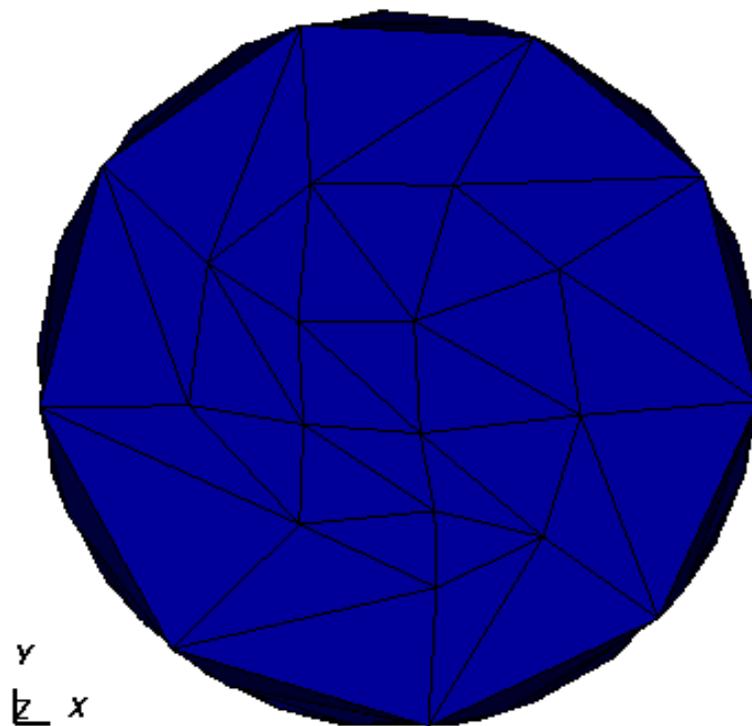


Fig.21 Sezione del filo d'acciaio meshata

Il tipo di mesher è Overlay Hex e il modello di remesh è Remesh&Relax.

E' stato inoltre utilizzato un Adaptive time step che genera 312 step a simulazione.

CAPITOLO 3

PIANI DELLE SIMULAZIONI E RISULTATI

3.1. Simulazioni di screening

Antecedenti studi in materia [1] hanno rilevato una forte dipendenza tra il danneggiamento della molla e la configurazione del modello.

La posizione relativa tra il rullo A e il pattino, infatti, costituiva il criterio principale di discriminazione tra i danneggiamenti. Dai dati ricavati tramite un modello DoE, che ha determinato il piano delle simulazioni, si nota infatti che nella configurazione A, con rullo e pattino ad una distanza relativa pari a 10.8 mm, il danneggiamento era sempre massimo (0.99). Ciò sottintendeva la rottura della molla per tutte le combinazioni di attrito tra filo e componenti del modello.

Una seconda configurazione di quest'ultimo, con distanza relativa degli elementi sopra citati pari a 33.8 mm, in alcuni dei casi indagati, abbassava il danneggiamento fino a renderlo nullo.

Si è quindi deciso di studiare una terza configurazione con distanza intermedia tra le due precedenti generando un ulteriore piano di simulazioni con le stesse combinazioni di attriti. Il modello utilizzato è presentato in figura 22.

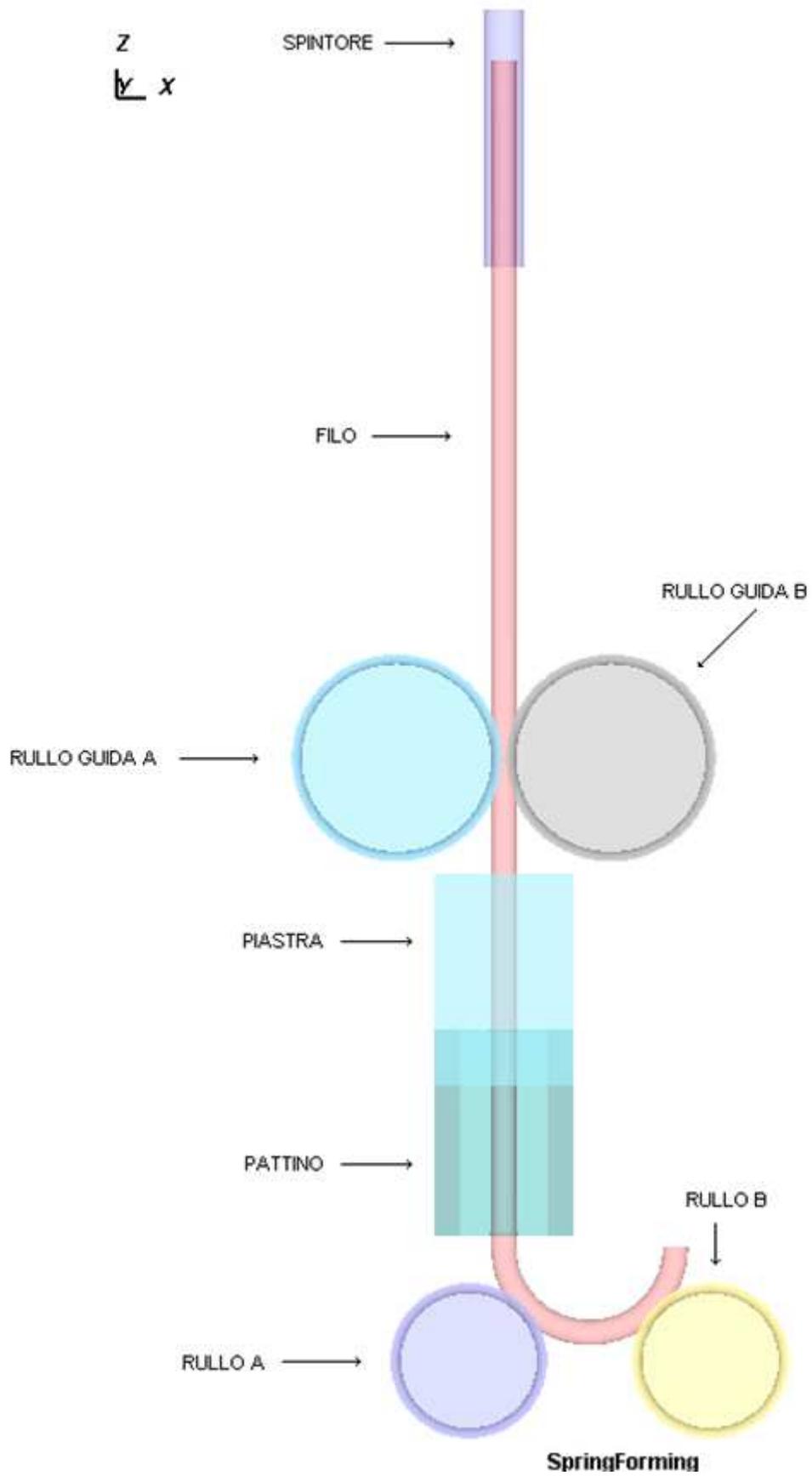


Fig. 22 Primo modello per la formatura della molla

Nella seguente immagine è raffigurata la formatura della molla a processo completato.

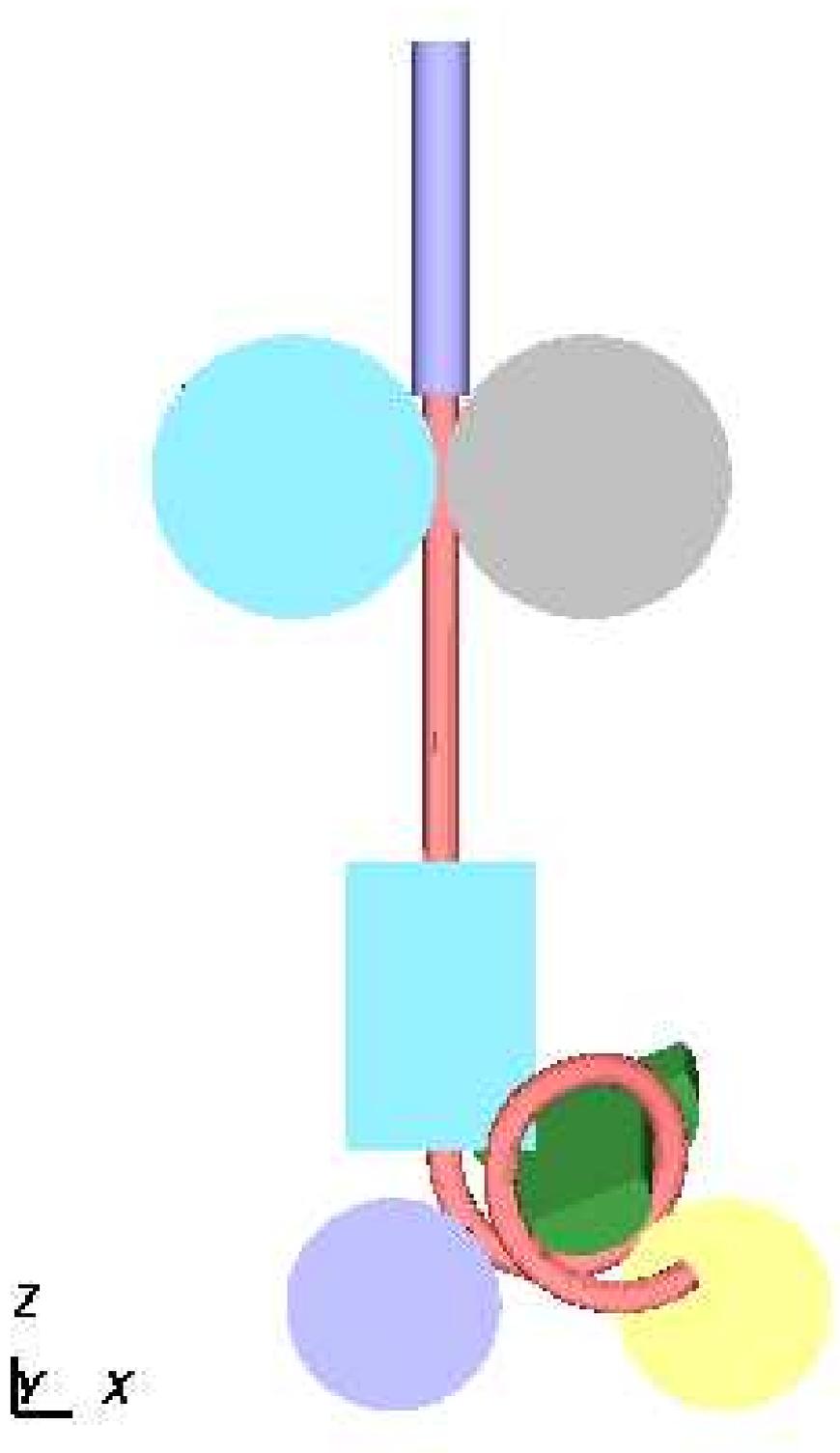


Fig. 23 Primo modello per la formatura della molla a processo completato

Dai risultati di questa serie non è stato possibile individuare una correlazione precisa tra posizione delle geometrie del modello e danneggiamento.

Anche per questo motivo si è optato per la realizzazione di un nuovo modello di formatura caratterizzato non da due ma da sei rulli, due dei quali in grado di creare spiattellamento al filo. Ciò avrebbe permesso, effettuando una previsione ex ante, di riprodurre la perdita di ossido superficiale causata dall'attrito. Il nuovo modello, nella figura sottostante, ha consentito di indagare, attraverso schiacciamenti diversificati dei rulli, la correlazione tra posizione, attrito e spiattellamento. Un'ulteriore modifica riguardante il modello è costituita dalla creazione di una guida elicoidale che potesse essere in grado di agevolare il processo di formatura costringendo il filo ad incanalarsi correttamente nella scanalatura del rullo.

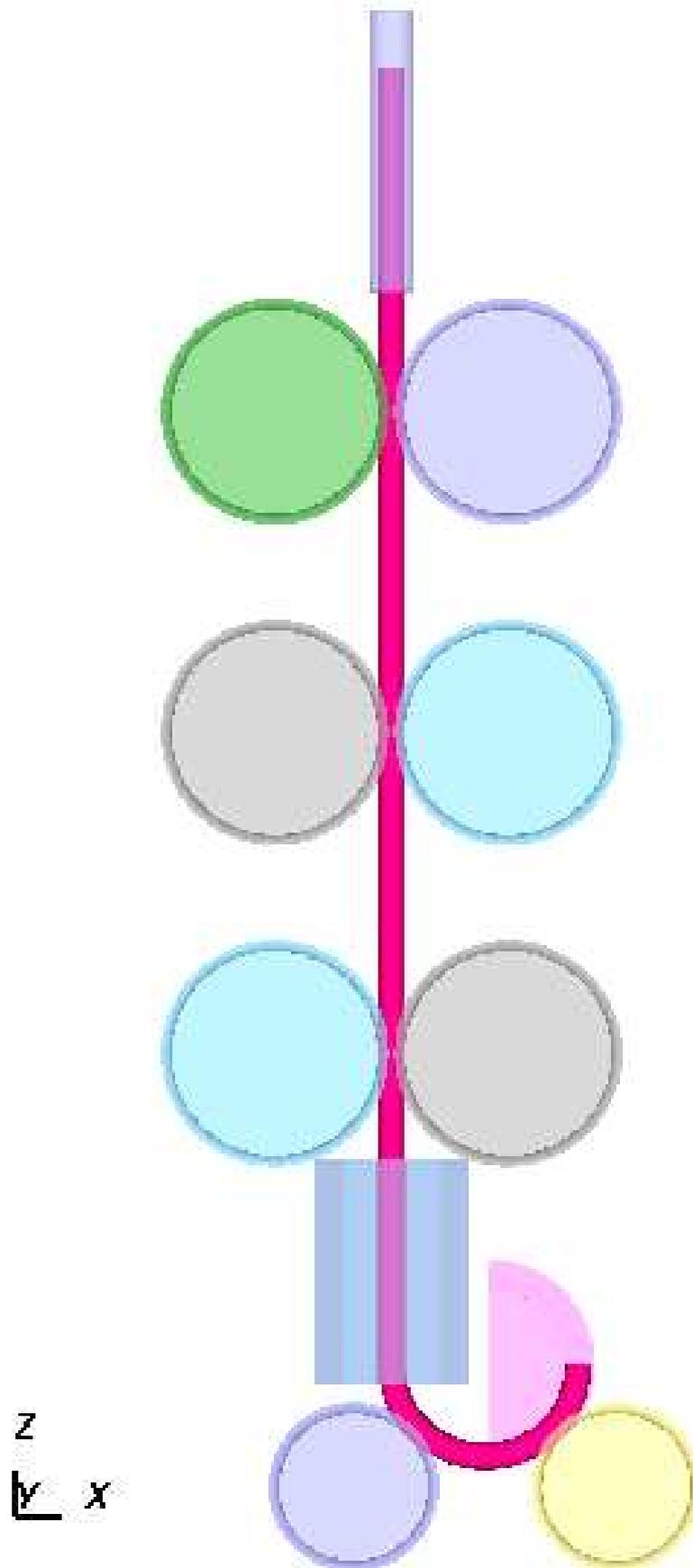


Fig. 24 Secondo modello per la formatura della molla

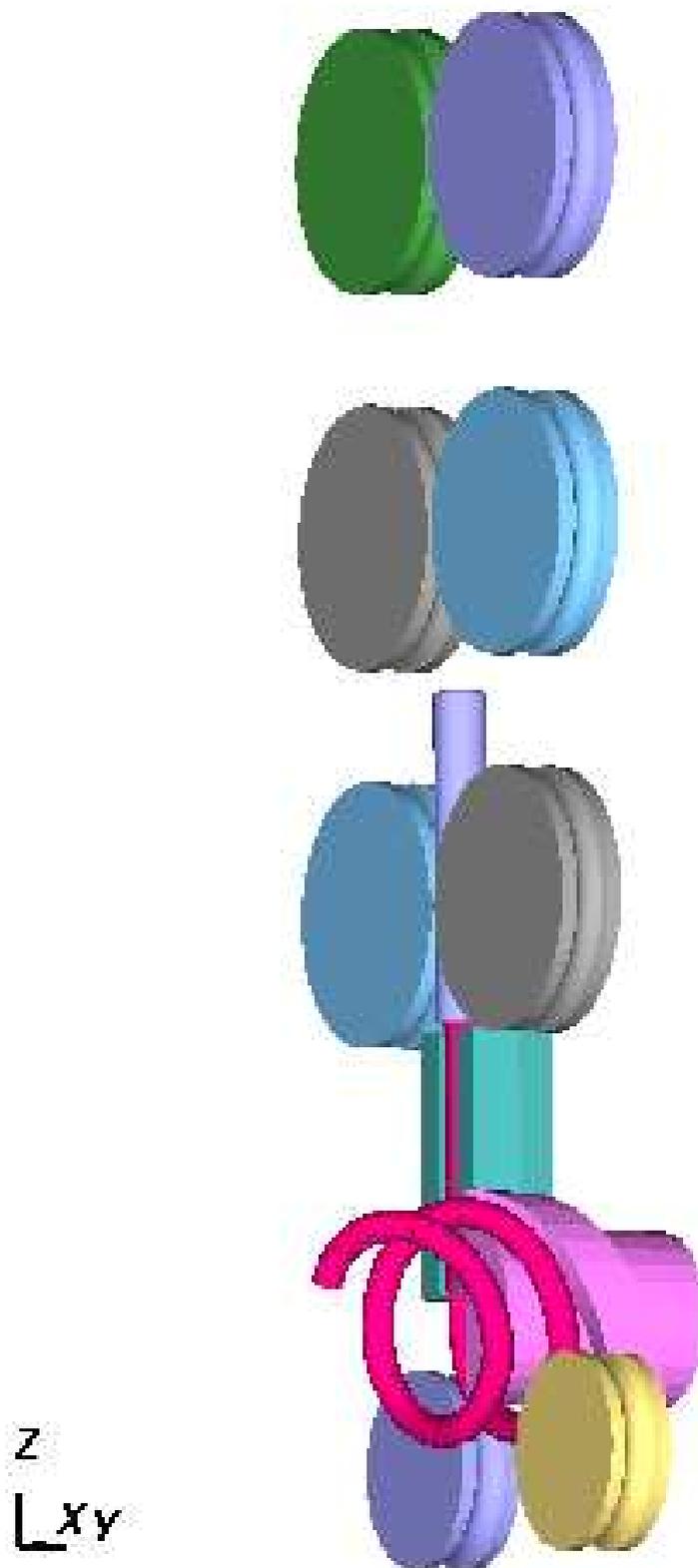


Fig. 25 Secondo modello per la formatura della molla a processo ultimato

Il modello sopra raffigurato è stato utilizzato per generare un piano di dodici simulazioni create da combinazioni tra le tre configurazioni del modello e diversi schiacciamenti dei rulli (0, 0.1, 0.3 e 0.5 [mm/s]) riassunto della tabella 5. I dati sono stati poi elaborati con grafici 3D che hanno consentito di formulare conclusioni più specifiche sulla tendenza e sulla correlazione tra i vari parametri del processo, individuando le situazioni più critiche e le loro cause.

SIMULAZIONE	POSIZIONE	SPIATTELLAMENTO [mm/s]	STRAIN	STRESS [Pa]	DAMAGE EXTRADOS	DAMAGE INTRADOS
1	A	0	0,342	2155	0	0,538
2	B	0	0,17	2081	0	0
3	C	0	0,174	2080	0	0
4	A	0.1	0,363	2161	0	0,48
5	B	0.1	0,176	2084	0	0
6	C	0.1	0,179	2086	0	0
7	A	0.3	0,34	2232	0	0,09
8	B	0.3	0,2	2238	0,035	0,2
9	C	0.3	0,195	2095	0	0
10	A	0.5	1,162	2291	0,07	0,124
11	B	0.5	1,219	2297	0,07	0,184
12	C	0.5	1,319	2303	0,16	0,008

Tabella 5. Piano di simulazioni

Nei diversi casi, a causa del diverso schiacciamento dei rulli, si avranno valori differenti della forza applicata allo spintore per generare il processo. Si presentano gli andamenti della forza nei casi limite, ossia quello con schiacciamento nullo e quello con schiacciamento massimo (0,5 mm/s).

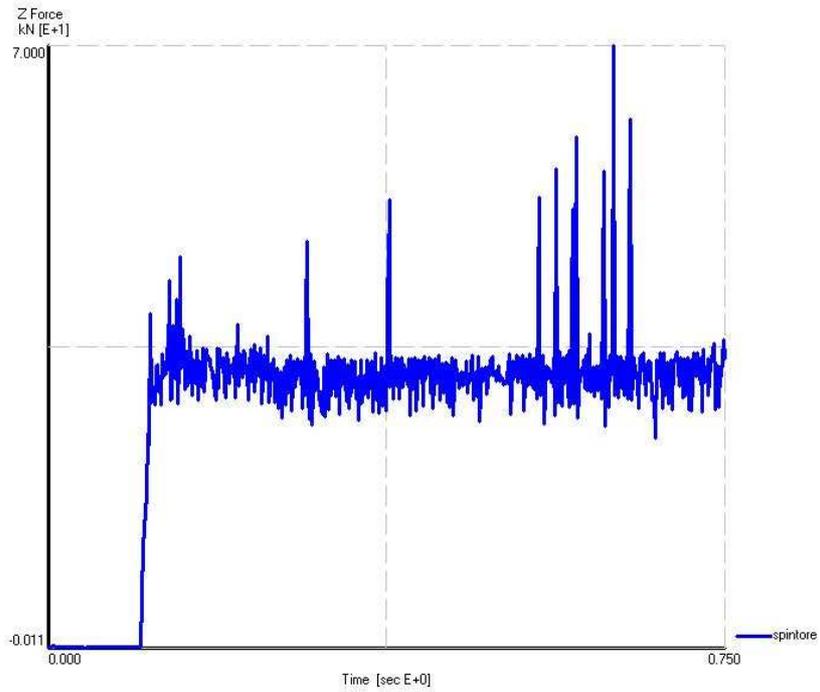


Grafico forza-tempo dello spintore con spiattellamento nullo

Nel caso senza spiattellamento si ha una forza media di 30 KN con picchi che raggiungono i 70 KN.

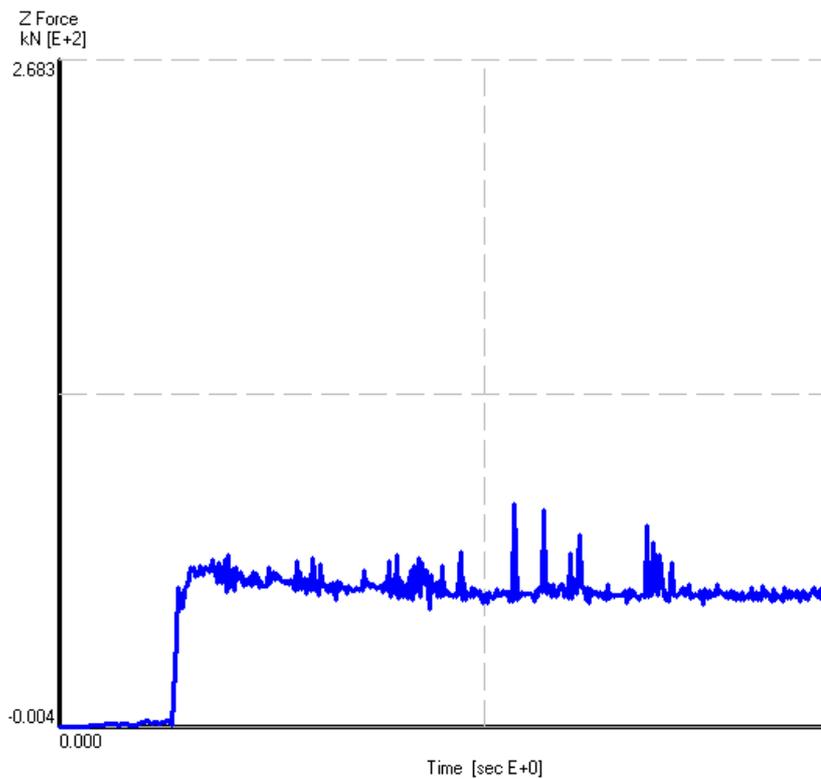


Grafico forza-tempo dello spintore con spiattellamento 0,5 mm/s

Con lo spiattellamento massimo, invece, la forza applicata allo spintore diminuisce, ed è in media 50 KN; il picco rappresentato nel grafico esula dall'analisi poiché il processo è già terminato.

I diversi valori della forza applicata allo spintore sono fortemente legati alle diverse tensioni e deformazioni dei vari casi studiati.

Nella figura 21 sono rappresentate le tensioni. E' possibile notare una forte dipendenza di queste dallo spiattellamento più che dalla posizione. Quest'ultimo parametro infatti non sembra incidere sul loro valore, come neppure lo spiattellamento inferiore a 0,5 mm/s.

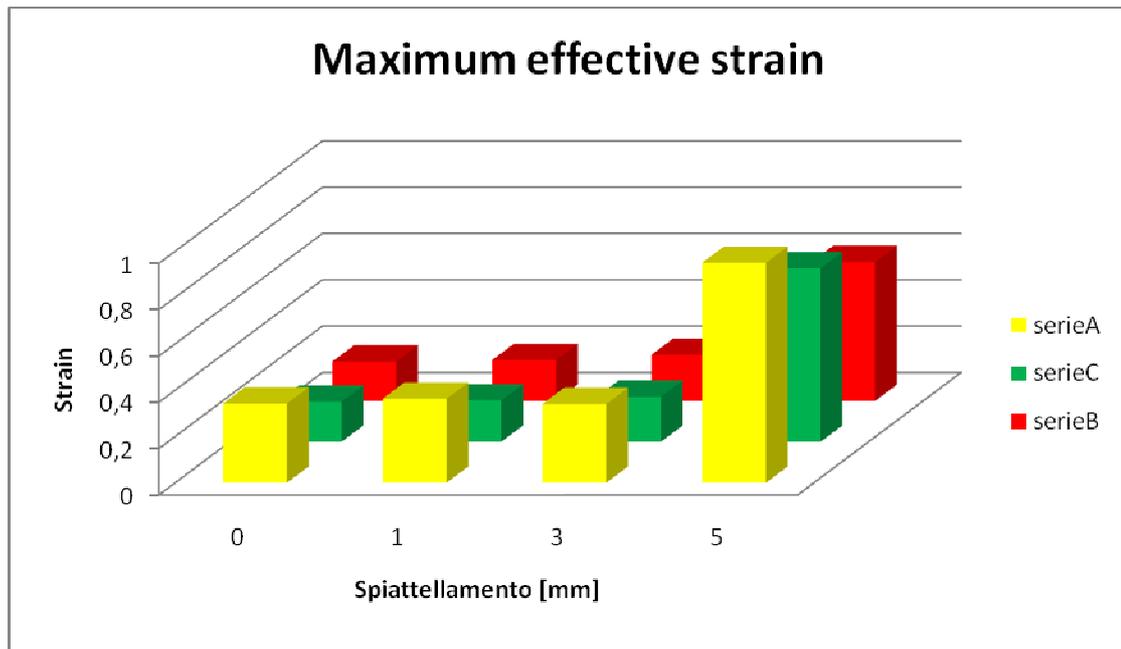


Fig. 26 Maximum effective strain

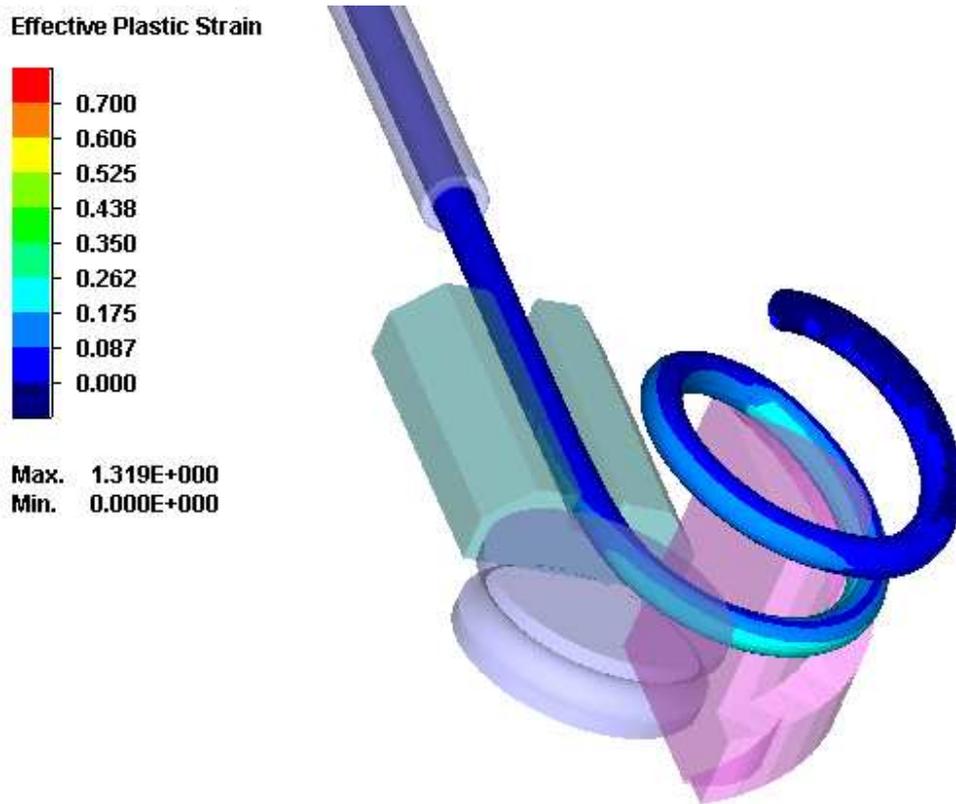


Fig. 27 Maximum effective strain configurazione C con spiattellamento 0,5 mm/s

L'elemento che ha suscitato maggiore interesse tecnico è il danneggiamento. Nelle precedenti simulazioni non si era effettuato discriminare tra le due tipologie di danneggiamento, di intradosso ed estradosso; dagli ultimi risultati ottenuti, però, è emersa una notevole differenza tra i due parametri.

Nel grafico sottostante si individua con facilità una forte dipendenza del danneggiamento dell'estradosso dallo spiattellamento che a 0,5 mm/s raggiunge picchi di 0.16 nella configurazione intermedia.

Valori inferiori di questo parametro non sembrano influire sui risultati di danno che risultano essere sensibili allo spiattellamento solo da un certo valore in avanti.

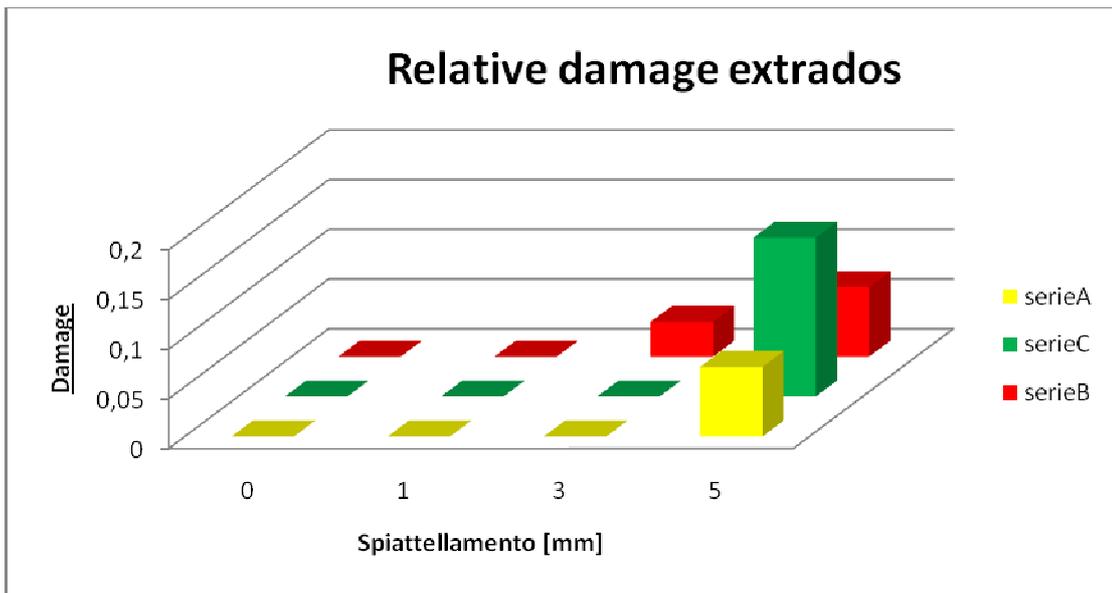


Fig. 28 Relative damage estrados

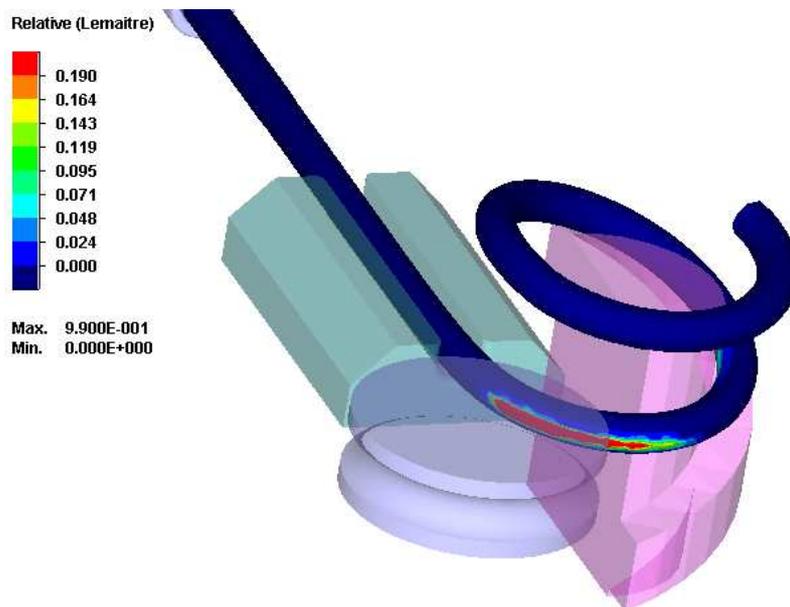


Fig. 29 Relative damage estrados configurazione C con spiattellamento 0,5 mm/s

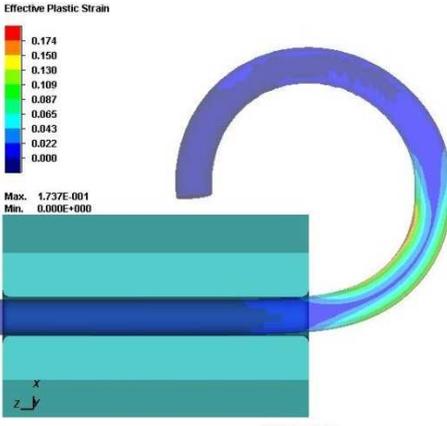
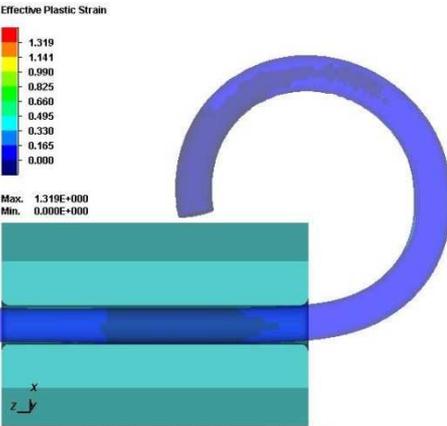
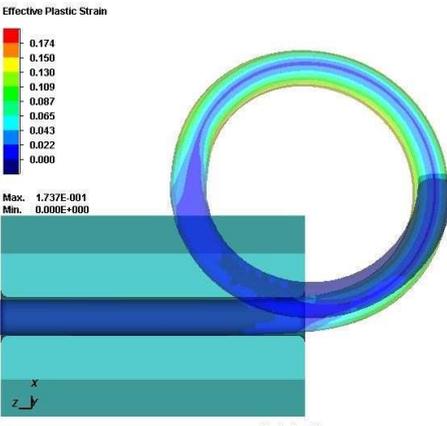
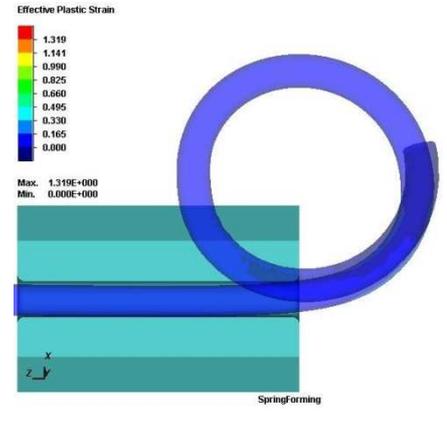
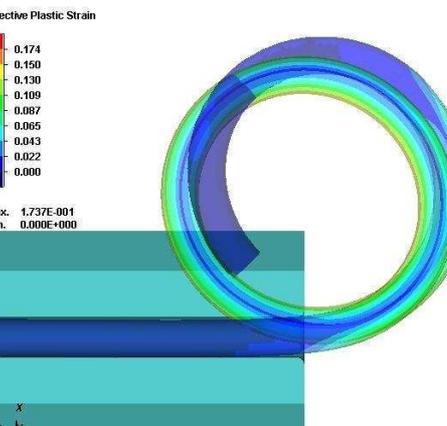
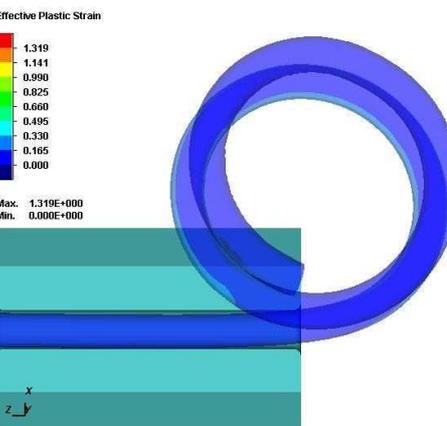
Il danneggiamento dell'intradosso, in generale, presenta valori più alti rispetto all'estradosso e non sembra dipendere in modo esclusivo dallo spiattellamento. Ciò che invece influenza in modo preponderante questo valore è la configurazione della macchina per la formatura.

Nella configurazione A, quella con distanza relativa minore, il danno è più elevato e diminuisce con lo spiattellamento.

Il fenomeno anzidetto è causato da un minore sfregamento del filo sul pattino dovuto alla diminuzione del diametro dello stesso. L'attrito, pertanto, risulta la causa il danneggiamento con bassi spiattellamenti.

Nelle seguenti immagini si evidenziano i contatti dell'intradosso con le geometrie. Sono state poi riassunte ed evidenziate nella tabella le simulazioni con spiattellamento 0,5 mm/s e nullo alle varie percentuali del processo.

E' possibile notare come lo spiattellamento diminuisca il diametro del filo che di conseguenza non striscia più sulla piastra dalla parte dell'intradosso agevolando così il processo; questo fenomeno provoca una diminuzione dei valori delle tensioni del filo d'acciaio che influenzano in modo positivo anche i danneggiamenti della spira, ridotti rispetto al caso senza spiattellamento .

PERCENTUALE PROCESSO	CONFIGURAZIONE C CON SPIATTELLAMENTO NULLO	CONFIGURAZIONE C CON SPIATTELLAMENTO 0,5 mm/s
30%	<p>Effective Plastic Strain</p>  <p>Max. 1.737E-001 Min. 0.000E+000</p> <p>SpringForming</p>	<p>Effective Plastic Strain</p>  <p>Max. 1.319E+000 Min. 0.000E+000</p> <p>SpringForming</p>
60%	<p>Effective Plastic Strain</p>  <p>Max. 1.737E-001 Min. 0.000E+000</p> <p>SpringForming</p>	<p>Effective Plastic Strain</p>  <p>Max. 1.319E+000 Min. 0.000E+000</p> <p>SpringForming</p>
100%	<p>Effective Plastic Strain</p>  <p>Max. 1.737E-001 Min. 0.000E+000</p> <p>SpringForming</p>	<p>Effective Plastic Strain</p>  <p>Max. 1.319E+000 Min. 0.000E+000</p> <p>SpringForming</p>

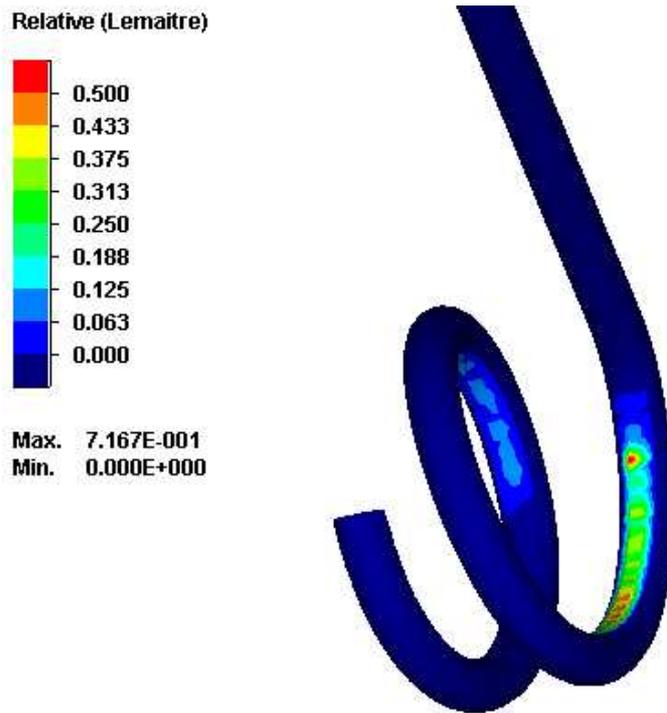


Fig. 30 Relative damage intrados configurazione A senza spiatellamento

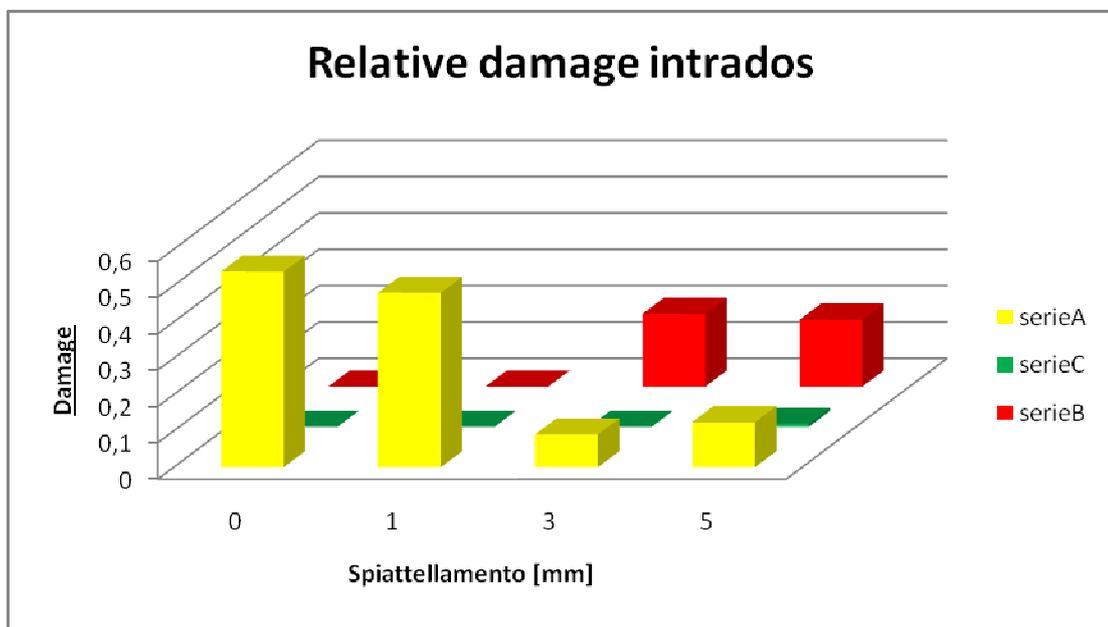


Fig. 31 Relative damage intrados

3.2. Piano DoE e risultati

Per approfondire lo studio tecnico si è generato tramite il software Design_experiment 7.0 un nuovo piano DoE in grado di riassumere i risultati con grafici lineari e superfici 3D migliorandone quindi la comprensione e di conseguenza l'analisi.

La tabella 6 presenta il nuovo piano.

ORDINE	POSIZIONE	SPIATTELLAMENTO	ATTRITO	DAMAGE EXTRADOS	DAMAGE INTRADOS	STRAIN EXTRADOS	STRAIN INTRADOS
1	33,8	2,5	0,05	0	0	0,13	0,18
2	22,3	2,5	0,175	0	0	0,16	0,19
3	22,3	0	0,05	0	0	0,17	0,15
4	22,3	5	0,05	0,23	0,01	0,19	0,21
5	33,8	5	0,175	0,11	0,08	0,21	0,23
6	10,8	2,5	0,05	0	0,09	0,19	0,32
7	22,3	5	0,3	0,2	0,01	0,2	0,19
8	22,3	0	0,3	0	0	0,15	0,17
9	10,8	5	0,175	0,02	0,05	0,2	0,21
10	33,8	0	0,175	0	0	0,16	0,13
11	33,8	2,5	0,3	0,13	0,04	0,16	0,18
12	10,8	0	0,175	0	0,1	0,16	0,33
13	10,8	2,5	0,3	0	0,18	0,25	0,52

Tabella 6. Piano DoE di simulazioni

Sono state diversificate, oltre al danneggiamento, anche le tensioni presenti in estradosso ed intradosso al fine di comprendere al meglio la relazione tra i vari risultati e la loro influenza relativa. E' possibile avvalorare, mediante grafici generati da software, la tesi sostenuta nel paragrafo precedente in modo tale da perfezionare e completare le conclusioni attraverso uno studio più dettagliato dei risultati.

Nella tabella successiva sono stati riportati tutti i fattori che influenzano tensioni e danneggiamenti; dopo una breve presentazione di ogni grafico verranno discussi in modo più approfondito quelli più rilevanti.

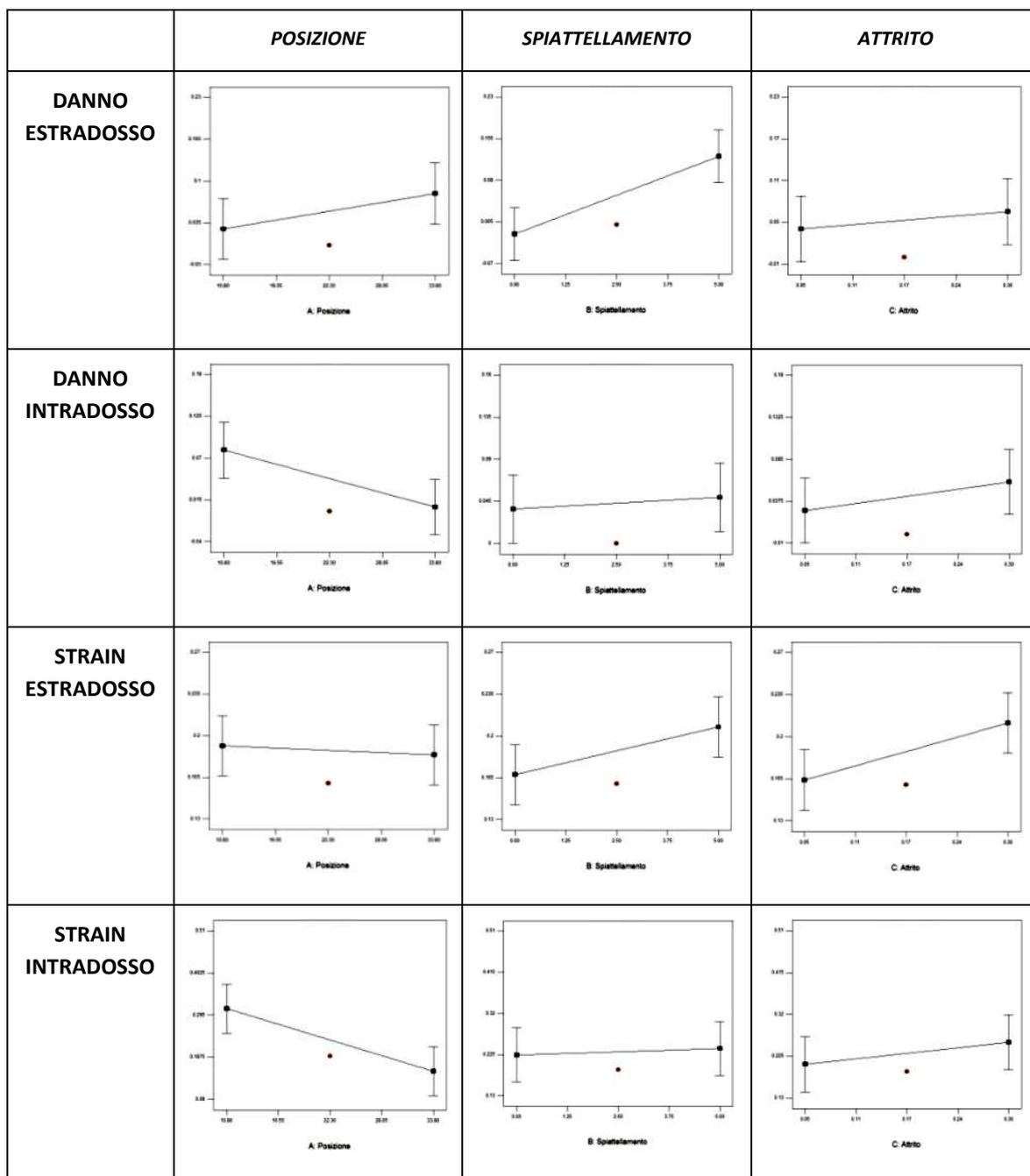


Tabella 7. Grafici lineari dei singoli fattori(posizione,spiattellamento,attrito)

I grafici che riportano sulle ascisse la posizione relativa tra piastra e rullo A interpolano i risultati tra le tre configurazioni precedentemente presentate. Il primo grafico mostra un leggero aumento del danno nell'estradosso con l'allontanamento delle geometrie sopra citate, al contrario il danno e lo strain dell'intradosso diminuiscono. La posizione sembra non influenzare in modo particolare lo strain dell'estradosso.

Lo spiattellamento che raggiunge i 0,5 mm/s è direttamente proporzionale alla crescita del danno e dello strain dell'estradosso mentre non sembra avere effetti rilevanti sui parametri dell'intradosso.

I grafici dell'attrito evidenziano una crescita generalizzata di danno e strain sia dell'estradosso che dell'intradosso.

Si discuteranno ora nel particolare alcune delle rappresentazioni grafiche, le più significative, presentate nella tabella 7.

Il danneggiamento, in particolare dell'estradosso, è notevolmente influenzato dallo spiattellamento del filo.

Dal grafico che segue è possibile evincere come, al crescere dello spiattellamento, vi sia una crescita del danno della spira. Con le medesime modalità tale parametro è influenzato pure dall'attrito che condiziona, però, in maniera più blanda il processo.

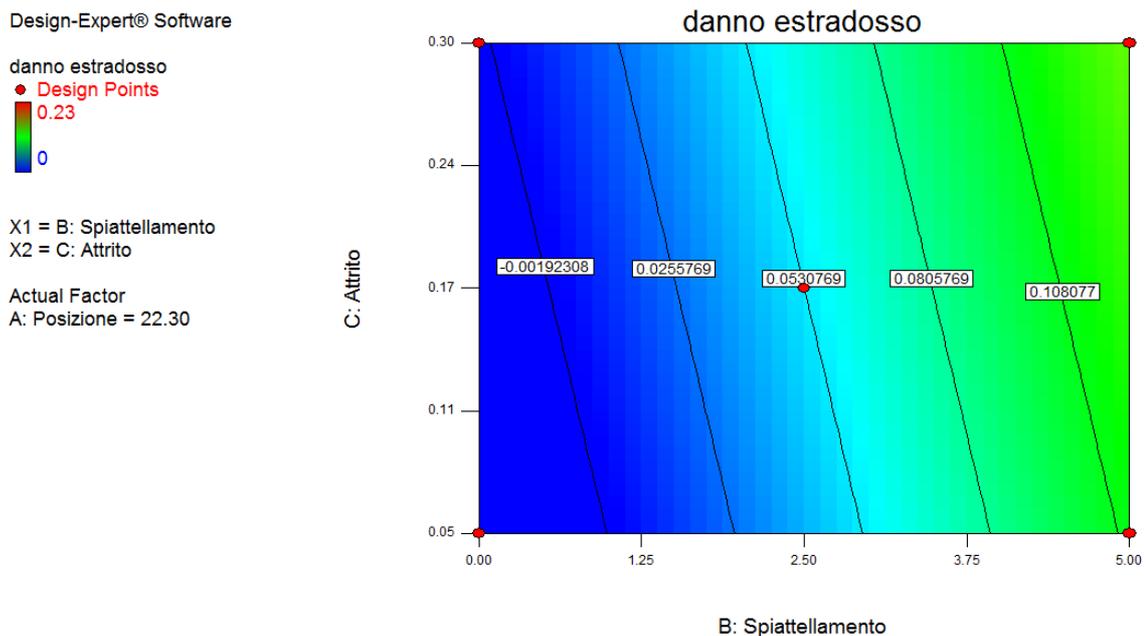


Fig. 32 Grafico attrito-spiattellamento per il danno dell'estradosso

E' possibile concludere, dunque, che il danneggiamento dell'estradosso è dovuto principalmente allo spiattellamento, mentre attrito e posizione delle geometrie del modello giocano un ruolo secondario.

Design-Expert® Software

danno estradosso

◆ Design Points

X1 = B: Spiattellamento

Actual Factors

A: Posizione = 22.30

C: Attrito = 0.17

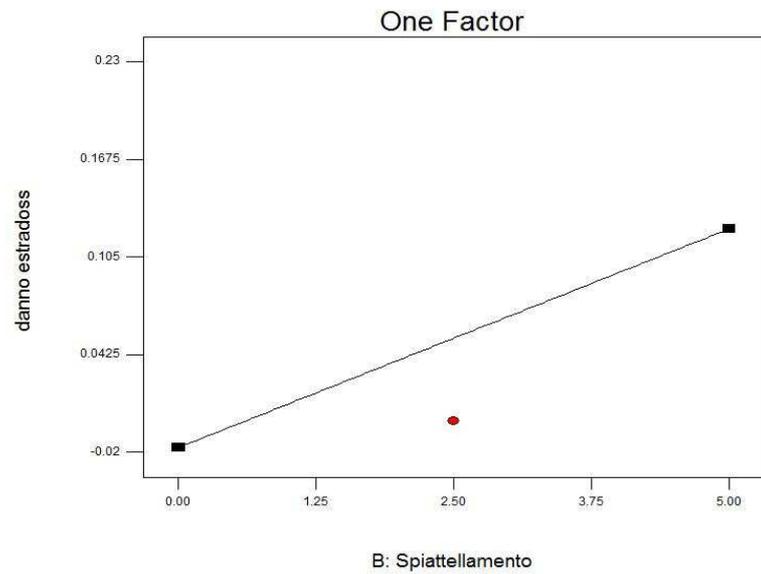


Fig. 33 Grafico spiattellamento per il danno dell'estradosso

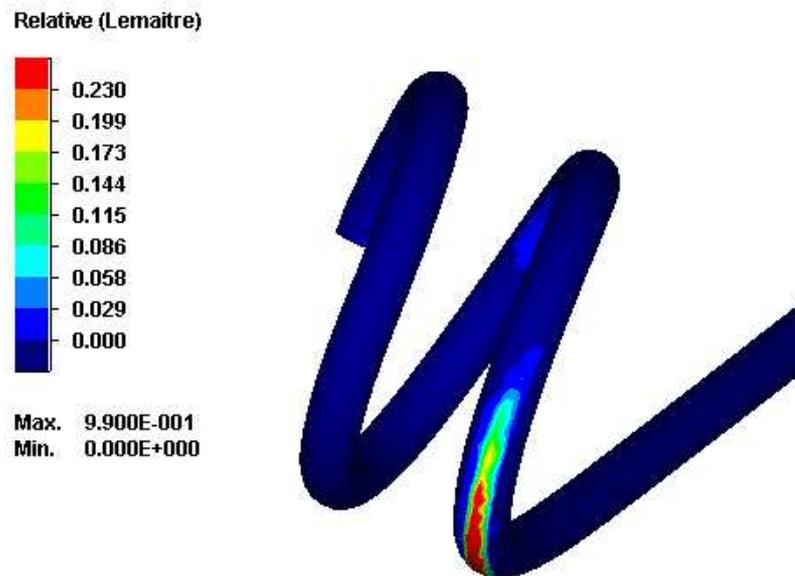


Fig. 34 Damage relative estrados configurazione 4 piano DoE

Per quanto riguarda il danneggiamento dell'intradosso invece si evidenzia una lieve dipendenza dall'attrito e dallo spiattellamento: al crescere di questi parametri il danno aumenta.

Design-Expert® Software

danno intradosso

● Design Points

0.18

0

X1 = B: Spiattellamento

X2 = C: Attrito

Actual Factor

A: Posizione = 22.30

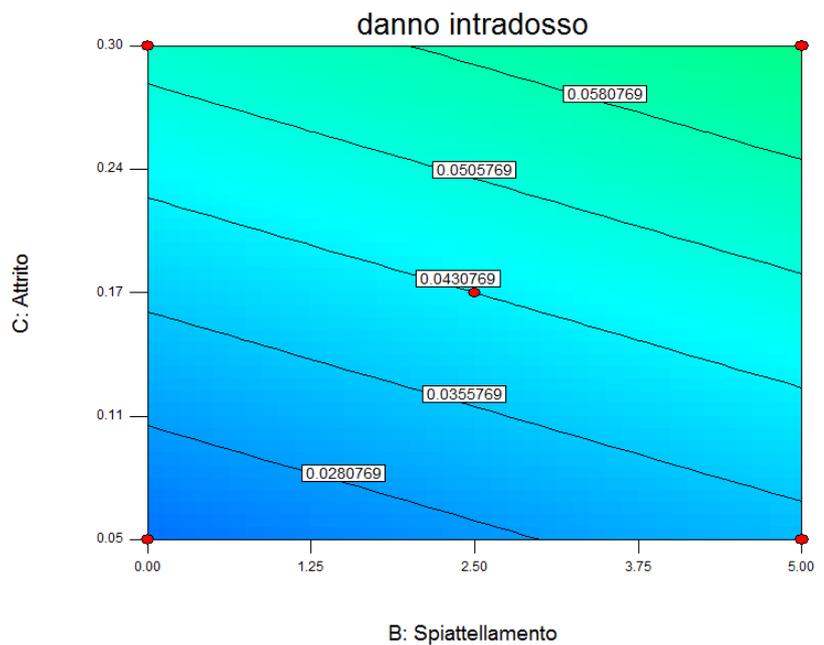


Fig. 35 Grafico attrito-spiattellamento per il danno dell'intradosso

Il danneggiamento dell'intradosso, invece, con l'allontanamento del pattino dai rulli diminuisce in modo considerevole; pertanto il fattore che influenza in modo preponderante il risultato del processo è la posizione.

Design-Expert® Software

danno intradosso

● Design Points

0.18

0

X1 = A: Posizione

X2 = B: Spiattellamento

Actual Factor

C: Attrito = 0.17

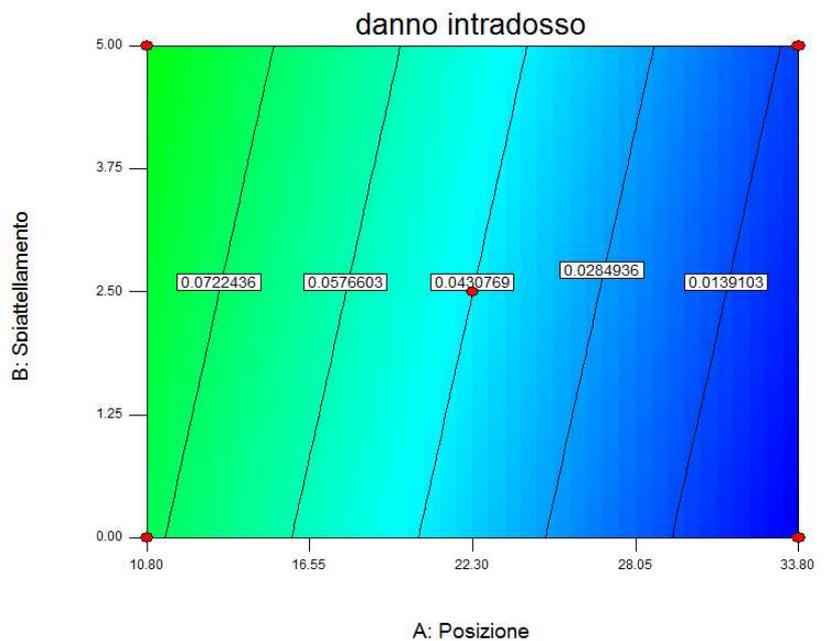


Fig. 36 Grafico posizione-spiattellamento per il danno dell'intradosso

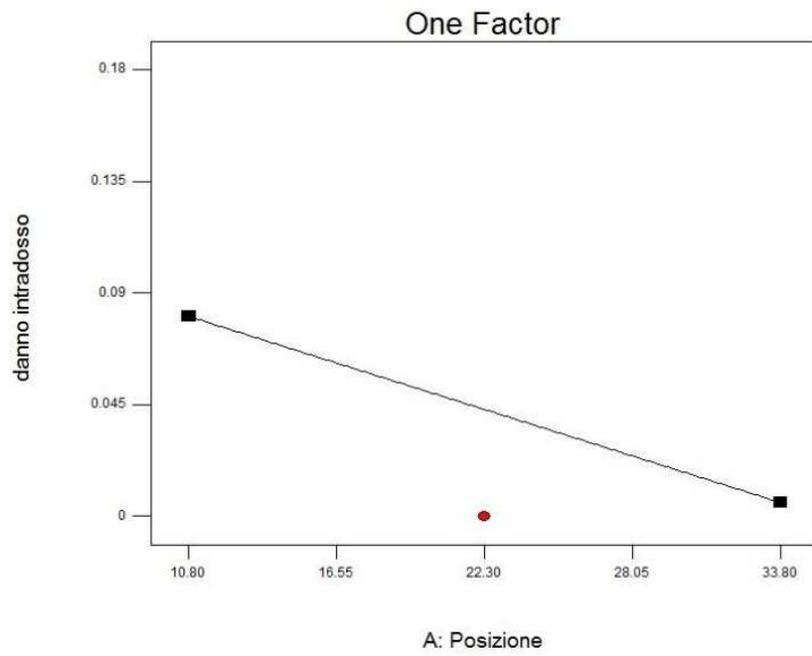


Fig. 37 Grafico posizione per il danno dell'intradosso

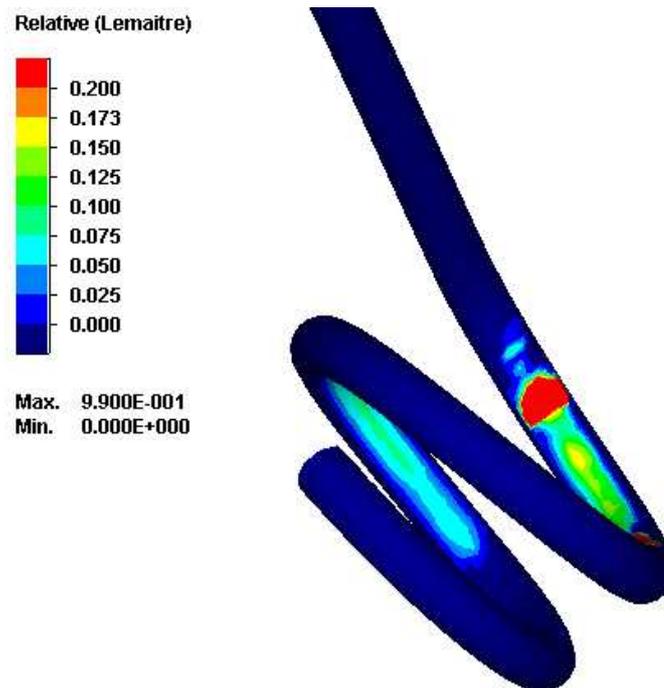


Fig. 38 Damage relative intrados simulazione 13

Dai risultati ottenuti mediante il software design_experiment è possibile evidenziare una forte dipendenza delle tensioni dell'estradosso dall' attrito e dallo spiattellamento, come viene confermato nella superficie sottostante.

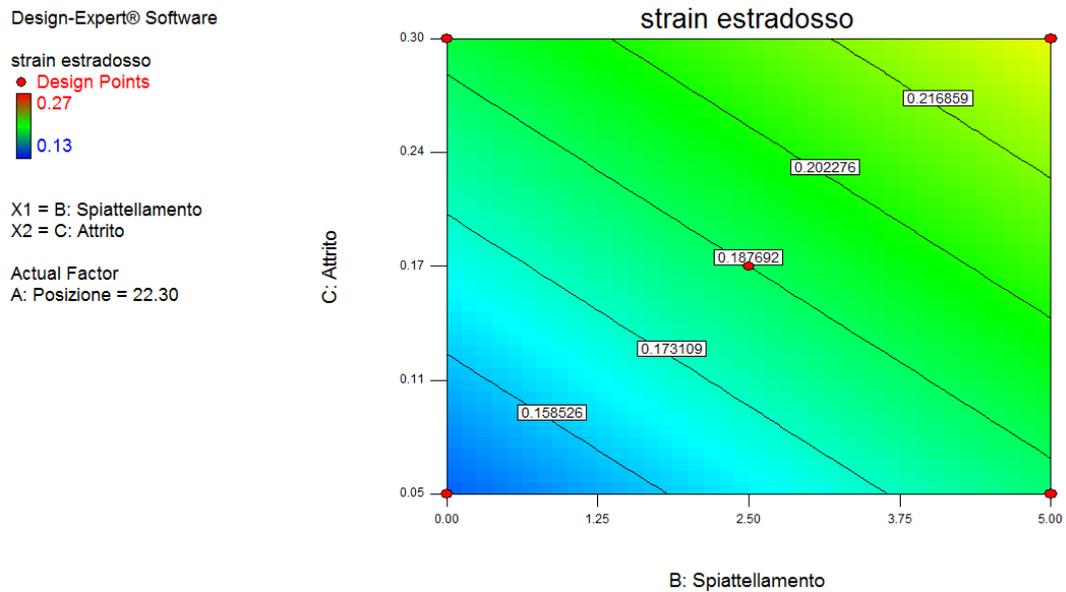


Fig. 39 Grafico attrito-spiattellamento per le strain dell'estradosso

Le tensioni dell'intradosso invece sono fortemente dipendenti dalla posizione, come il danneggiamento, mentre l' attrito e lo spiattellamento rivestono un ruolo marginale per questo aspetto del processo.

Design-Expert® Software

strain intradosso
● Design Points
0.51
0.13

X1 = A: Posizione
X2 = B: Spiattellamento

Actual Factor
C: Attrito = 0.17

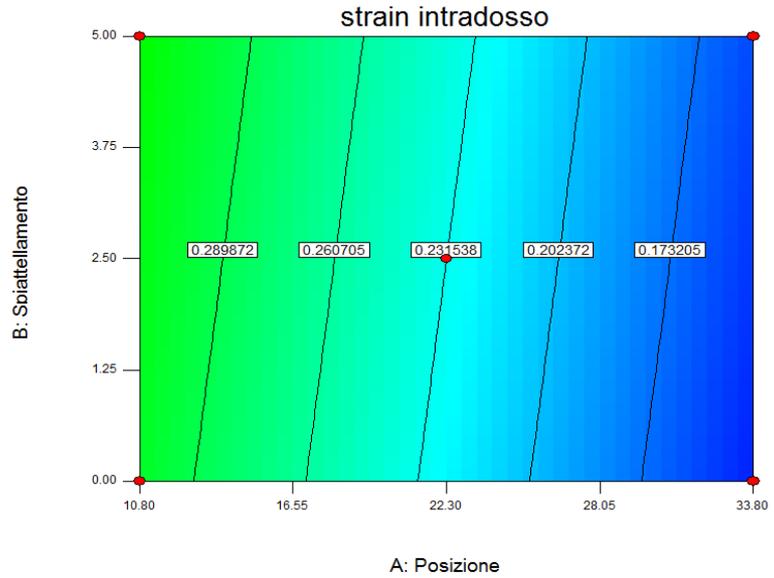


Fig. 40 Grafico posizione-spiattellamento per le tensioni dell'intradosso

All'aumentare della distanza relativa tra pattino e rulli infatti le tensioni diminuiscono in modo consistente come rappresentato in figura.

Design-Expert® Software

strain intradosso
● Design Points

X1 = A: Posizione

Actual Factors
B: Spiattellamento = 2.50
C: Attrito = 0.17

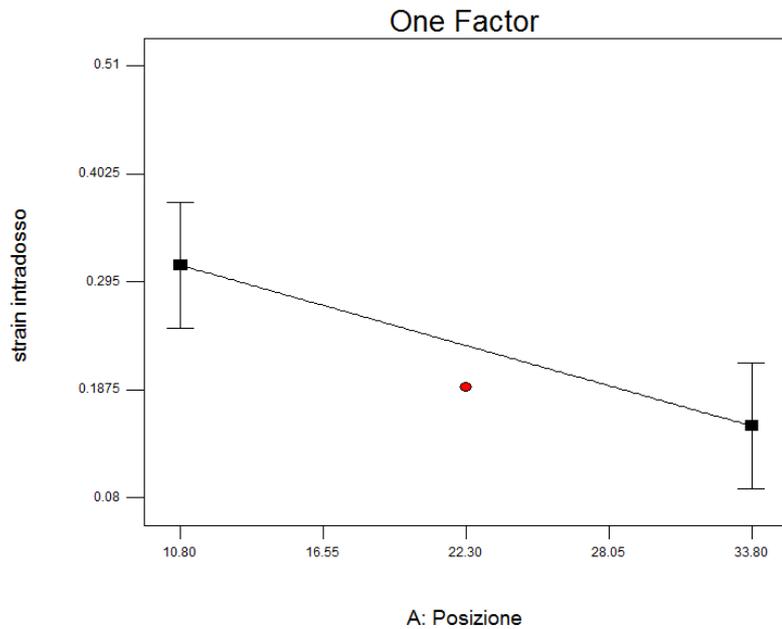


Fig. 41 Grafico posizione per le strain dell'intradosso

Uno strumento interessante di analisi messo a disposizione dal software design_experiment 7.0 è la superficie 3D: essa, nonostante permetta una visione d'insieme dei risultati, è di complessa interpretazione.

Design-Expert® Software

danno estradosso



X1 = A: Posizione

X2 = B: Spiattellamento

Actual Factor

C: Attrito = 0.17

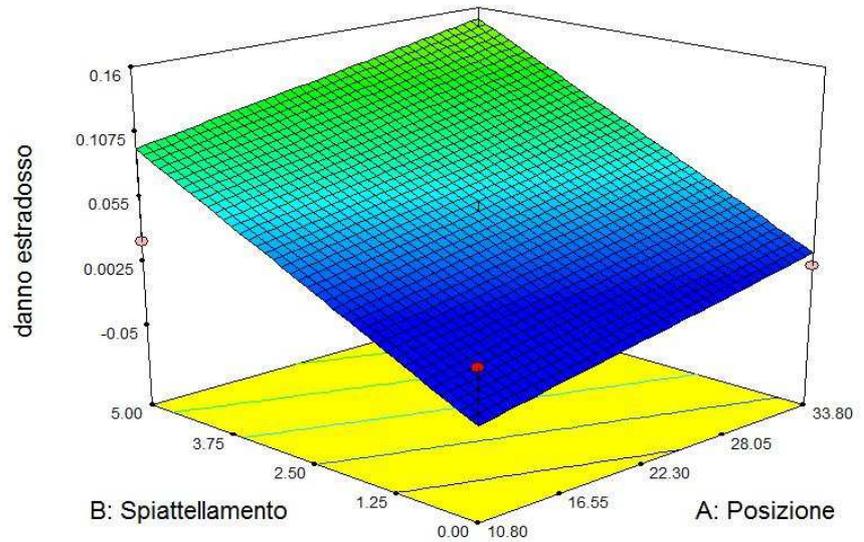


Fig. 42 Superficie 3D per il danno dell'estradosso

Design-Expert® Software

danno intradosso



X1 = A: Posizione

X2 = B: Spiattellamento

Actual Factor

C: Attrito = 0.17

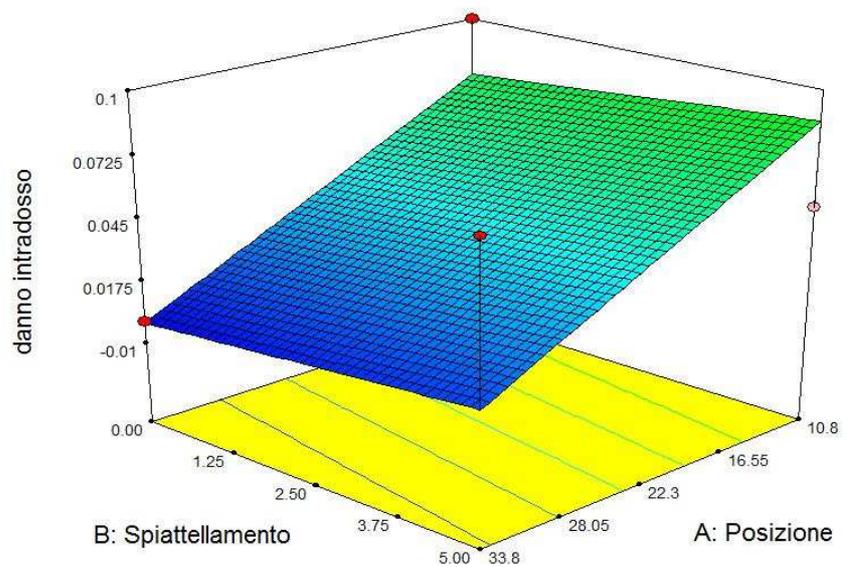


Fig. 43 Superficie 3D per il danno dell'intradosso

Design-Expert® Software

strain estradosso



X1 = A: Posizione

X2 = B: Spiattellamento

Actual Factor

C: Attrito = 0.17

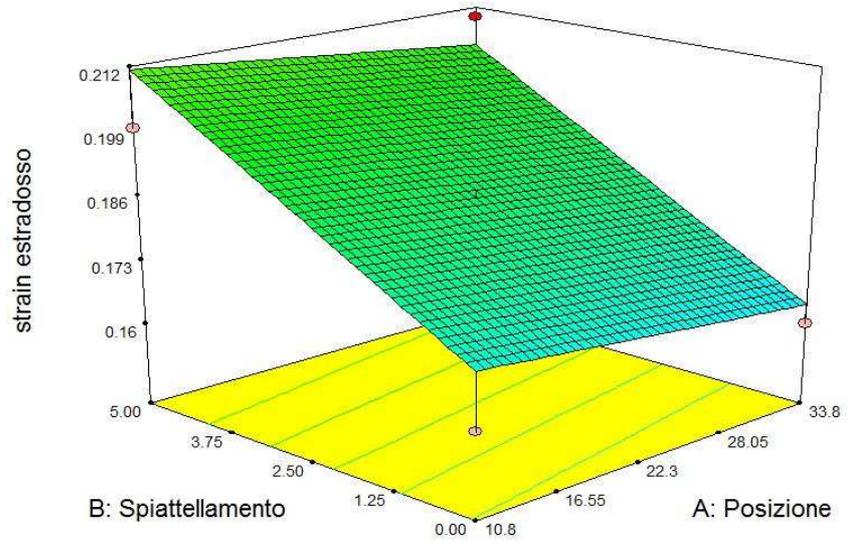


Fig. 44 Superficie 3D per le tensioni dell'estradosso

Design-Expert® Software

strain intradosso



X1 = A: Posizione

X2 = B: Spiattellamento

Actual Factor

C: Attrito = 0.17

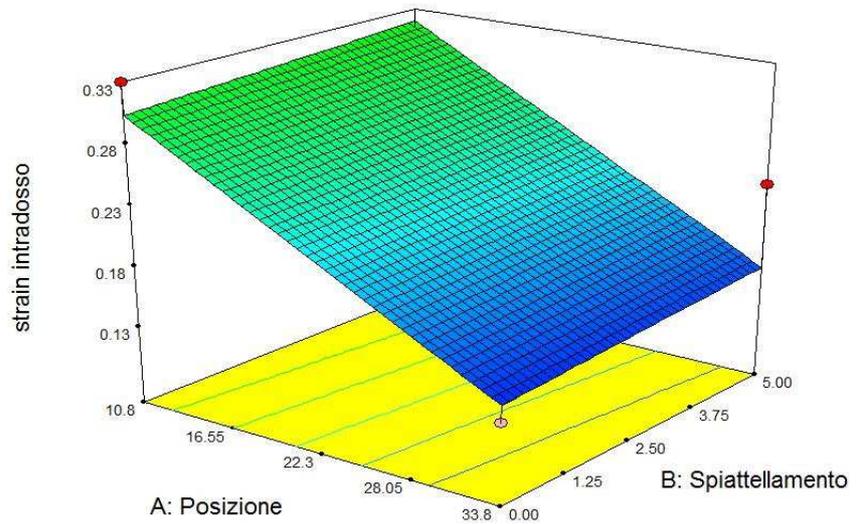


Fig. 45 Superficie 3D per le tensioni dell'intradosso

CAPITOLO 4

CONCLUSIONI

In questa tesi sono state studiate mediante software di simulazione numerica le principali cause di danneggiamento dei fili d'acciaio durante il processo di formatura di molle.

I principali risultati ottenuti vengono sintetizzati di seguito.

L'analisi del processo di formatura della molla è stata svolta partendo da un piano DoE che evidenziava un forte legame tra il danneggiamento della spira e la posizione relativa tra rullo A e il pattino. Nella configurazione con distanza maggiore, infatti, i coefficienti di danno erano molto bassi, mentre nella configurazione con distanza minore (10.8mm), il danneggiamento portava la molla a rottura in tutte le combinazioni d'attrito.

In seguito, pertanto, si è giunti alla decisione di studiare una configurazione del modello con una distanza intermedia, la configurazione C, con le stesse combinazioni d'attrito usate nel piano precedente. Dai dati ricavati non è stato possibile, però, ricavare una legge che governasse il fenomeno e nemmeno una relazione tra i vari fattori.

Successivamente, quindi, si è pensato di valutare, oltre all'attrito e alla posizione, anche lo spiattellamento del filo come possibile fattore in grado di condurre al danneggiamento.

Si è costruito un piano di dodici simulazioni combinando le tre configurazioni del modello con diversi valori di spiattellamento. Si è ritenuto opportuno, per analizzare i risultati, distinguere il danneggiamento dell'estradosso da quello dell'intradosso notando come i due comportamenti differenti siano dominati da fattori diversi.

Per quanto riguarda il danno nell'intradosso infatti, nella configurazione A, la più vicina, si nota una forte dipendenza dall'attrito e dallo spiattellamento; infatti, tale parametro diminuisce all'aumentare dello spiattellamento. Il suddetto fenomeno può essere spiegato mediante la considerazione del fatto che il filo diminuisce di diametro e sfrega nel pattino solamente dalla parte dell'estradosso. L'intradosso in questa

condizione non è soggetto ad attrito e ciò favorisce la formatura della spira diminuendo altresì le tensioni.

Il danneggiamento dell'estradosso, invece, ha un comportamento differente: è infatti quasi nullo per spiattellamenti piccoli, mentre assume valori rilevanti quando i rulli schiacciano di 0,5 mm/s. Da queste considerazioni è possibile desumere che le probabilità che la spira si danneggi nell'estradosso aumentano con lo spiattellamento, ma il fattore diventa sensibile solo da certi valori della diminuzione del diametro del filo.

Questo comportamento non è differente nelle varie posizioni del modello quindi questo fattore non va considerato come elemento discriminatorio nella trattazione dei risultati.

Per quanto riguarda le tensioni, esse aumentano con lo spiattellamento, e diminuiscono, come era agevole ipotizzare, con la distanza relativa tra le geometrie del modello.

Per ottenere un'analisi più approfondita del comportamento del modello di formatura si è generato un piano DoE attraverso il software statistico design_expert 7.0 grazie al quale è stato possibile studiare più dettagliatamente il processo.

Il software citato offre, infatti, come output delle superfici che interpolano i risultati e li riassumono in grafici i quali possono agevolare la lettura.

In quest'ultima analisi si sono differenziate anche le tensioni di estradosso ed intradosso al fine di comprendere se questo parametro fosse influenzato dagli stessi fattori e nello stesso modo in cui è condizionato il danneggiamento.

Il danneggiamento dell'estradosso, dal detto studio, risulta aumentare principalmente per lo spiattellamento, e in modalità inferiore con posizione e attrito.

Nella medesima maniera viene incrementata anche la tensione dell'estradosso e, come poteva essere previsto, aumenta per gli stessi motivi sopra enucleati.

Il danneggiamento e le tensioni dell'intradosso, invece, diminuiscono con l'allontanamento tra rullo A e pattino, mentre aumentano con l'attrito, analogamente al piano di simulazioni precedente.

In conclusione è possibile affermare che l'ottimizzazione del processo di formatura della molla è condizionato dalla triplice combinazione di fattori: la posizione, l'attrito e lo spiattellamento.

La spira giunge a rottura laddove non sia possibile trovare un giusto equilibrio tra i tre fattori, in modo tale da limitare il danno sia dell'estradosso che dell'intradosso del filo. Durante la campagna di analisi numeriche svolte, il software Simufact.forming 9.0 si è rivelato un valido strumento da utilizzare ai fini dello studio delle problematiche connesse alla realizzazione, in campo industriale, di un processo di formatura.

Il programma utilizzato fornisce un ambiente di lavoro professionale, grazie al quale è stato possibile in particolare:

- modellare il processo di formatura della molla e modificarne le geometrie dove si è ritenuto opportuno, ai fini della miglior resa possibile;
- attribuire leggi di moto, proprietà agli utensili e condizioni al contorno;
- manipolare i risultati per considerazioni e confronti.

Gli obiettivi dello studio sono stati centrati: è stato, infatti, possibile realizzare un modello in grado di migliorare la formatura attraverso la modifica e costruzione di nuove geometrie atte a ottimizzare il processo.

Si sono infatti rintracciate le cause principali delle rotture analizzando particolari condizioni del processo che hanno generato dei piani di simulazioni attraverso diverse combinazioni dei fattori, posizione, spiattellamento e attrito .

Da questi ci si è basati per formulare un rapporto causa-effetto tra i parametri del modello e i danneggiamenti subiti dalle spire e di conseguenza un criterio di danno.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] *Berti G., Monti M., 2010. FEM analysis of the forming process of automotive suspension springs. In: Tagungsband - 12. RoundTable - Simulation in der massivumformung - 2010, p. 73-84;*
- [2] *Y.Prawoto, M.Ikeda, S.K. Manville, A.Nichikawa, "Design and failure modes of automotive suspension springs" Engeneering Failure Analisis pp.1155-1174, 2007;*
- [3] *Bui H.D. "Mècanique de la rupture fragile", Masson, paris ,1978 ;*
- [4] *Liebowitz, "Fracture", Academic Press, New York ,1968-9;*
- [5] *Paolucci G.M., "Lezioni di metallurgia" ,Edizione libera progetto Padova, 2001;*
- [6] *A.M.Whal "Mechanical springs", McGraw-Hill Book Company,1884.*

SITOGRAFIA:

- [1] www.sciencedirect.com
- [2] www.wikipedia.it