

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi progettuale e sperimentale di una molla innovativa per applicazione spazio

Autore

Francesco Spinella

Relatrice

Prof.ssa Raffaella Sesana



Facoltà di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Politecnico di Torino

Italia, Torino

Luglio 2018

Sommario

In questo elaborato studieremo l'applicazione di una molla già esistente, molla Belleville, in un ambito ostico come lo spazio. Oltre al settore di applicazione oggi non è presente in commercio alcuna molla che possa osservare le dimensioni, le proprietà e le caratteristiche richieste dalla normativa, molto ristretta, dell'Agenzia spaziale europea comunemente identificata con l'acronimo: "ESA".

Questo progetto, grazie alla sua futura applicazione (Ariane 5 e Ariane 6) sarà unico in tutti i suoi particolari.

Ringraziamenti

Ai miei genitori che con il loro sostegno morale hanno permesso il raggiungimento di questo importantissimo traguardo.

Indice

Elenco delle tabelle	VI
Elenco delle figure	VII
1 Introduzione	1
1.1 Principi generali	1
1.2 Studio della molla Belleville	4
1.3 Serie di controlli per il calcolo della molla Belleville	5
1.3.1 Sollecitazione statica	5
1.3.2 Carico dinamico	5
1.3.3 Composizione delle molle	6
1.3.4 Temperatura	7
1.3.5 Fragilità dovuta ad incrudimento	7
2 Progettazione	9
2.1 Scelta delle dimensioni	10
2.2 Tipi di Materiale	15
2.2.1 Requisiti generali	15
2.2.2 Tipici materiali per molle	16
2.2.3 Materiali per particolari sollecitazioni	16
2.2.4 Lega 17-7PH composizione chimica e proprietà meccaniche	20
2.3 Scelta del trattamento termico	21
2.3.1 Meccanismo di indurimento per precipitazione	21
2.3.2 Trattamento termico TH950	22
2.3.3 Trattamento termico RH950	22
2.4 Analisi e calcoli	24
2.4.1 Analisi generali	24
2.4.2 Forza-Spostamento	27
2.5 Verifica statica	35
2.6 Verifica a fatica	38
2.6.1 Generalità	38
2.6.2 Fatica delle molle	38

2.6.3	Costruzione del grafico di fatica	40
2.7	Propagazione della cricca su dischi intagliati	45
2.7.1	Generalità	45
2.7.2	Previsione analitica della propagazione del difetto	47
2.8	Modello CAD e disegno tecnico	55
2.8.1	Modello 3D	55
2.8.2	Disegno 2D	56
2.9	Metodo degli elementi finiti	57
2.9.1	Generalità	57
2.9.2	Caratterizzazione curva Forza/Spostamento	58
2.9.3	Analisi statica	62
3	Industrializzazione	65
3.1	Generalità	65
3.2	Ciclo di Lavorazione	67
3.3	Controllo dimensionale	69
3.4	Trattamento termico	70
3.4.1	Preparazione	70
3.4.2	Atmosfera di trattamento	70
3.4.3	Raffreddamento	71
3.4.4	Tempo di trattamento per acciai acciai indurenti per precipitazione e Maraging	71
3.4.5	Solubilizzazione, condizionamento dell'austenite e invecchiamento	72
3.4.6	Distensione	72
3.4.7	Raddrizzatura	73
3.5	Controllo magnetoscopico	74
3.6	Stabilizzazione	75
3.7	Applicazione lubrificante solido	75
4	Sperimentazione	77
4.1	Generalità	77
4.2	Analisi Forza-Spostamento	78
4.2.1	TH950	80
4.2.2	RH950	81
4.3	Analisi propagazione di cricca	82
4.3.1	Generalità	82
4.3.2	Prima analisi	84
4.3.3	Seconda analisi	85
4.3.4	Terza analisi	87
4.3.5	Quarta analisi	88
4.3.6	Quinta analisi	89

4.3.7	Sesta analisi	90
4.3.8	Settima analisi (rottura)	92
4.3.9	Ricavo dei parametri di Paris	94
5	Conclusioni	97
	Bibliografia	99
A	Risultati analitici della Forza/spostamento	101
B	Risultati delle tensioni applicate alle molle	109

Elenco delle tabelle

2.1	valori per la scelta del diametro	13
2.2	Trattamenti degli acciai indurenti per precipitazione e maranging [7] .	23
2.3	Valori di t'/t	25
2.4	Regolazione molla	33
2.5	Sollecitazione di trazione per uno spostamento di 1,9mm	36
2.6	Tensione di snervamento e rottura del materiale trattato termicamente	37
2.7	cicli in funzione di a_0	51
2.8	cicli in funzione di a_0	53
3.1	Operazioni del ciclo di lavoro	67
3.2	Tempi di trattamento termico per solubilizzazione e austenitizzazione[15]	72
3.3	Trattamenti degli acciai indurenti per precipitazione e maranging [15]	72
A.1	Risultati analitici Forza/spostamento	101
B.1	Valori dei σ in funzione dello spostamento	109

Elenco delle figure

1.1	A sinistra il motore vulcain 2 e a destra il vettore spaziale Ariane 5	1
1.2	Schema fluidodinamico vulcain 2 [4]	3
1.3	Molle disposte in serie con $i=4$ e $n=1$	6
1.4	Molle disposte in parallelo con $i=1$ e $n=2$	7
2.1	Nomenclatura molla	10
2.2	Proprietà meccaniche dell'acciaio inossidabile 17-7 PH [7]	23
2.3	Punti tensionali I,II,III,IV [1]	24
2.4	Sezione di una molla a tazza con piani d'appoggio del gruppo 3 [1]	25
2.5	Andamento della curva caratteristica in funzione di $\frac{h_0}{t}$ e $\frac{s}{h_0}$ [1]	27
2.6	Curve caratteristiche di una molla singola con altezza h_0 diversa [1]	28
2.7	Molla a tazza caricata oltre la posizione di appiattimento [1]	29
2.8	Curva caratteristica calcolata ed equilibrata [1]	30
2.9	Forza-Spostamento singola molla	32
2.10	Forza/Spostamento pacco molla	33
2.11	Regolazione molla	34
2.12	Tensioni $\sigma_{OM}, \sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}, \sigma_{IV}$ in funzione dello spostamento s	36
2.13	punti della sezione con possibile rottura a fatica [1]	39
2.14	Diagramma di Goodman-Smith di un acciaio, riferito a cicli di trazione-compressione con differente tensione media[10]	40
2.15	Diagrammi di Goodman-Smith per flessione, trazione-compressione e torsione.[10]	42
2.16	diagramma di resistenza a fatica e durata 17-7PH[9]	43
2.17	diagramma di resistenza a fatica e durata 17-7PH[9]	44
2.18	Molla con intaglio trattata termicamente RH950	46
2.19	dettaglio dell'intaglio	46
2.20	Modello 3D	55
2.21	Modello 3D sezione	55
2.22	Vista frontale	56
2.23	Sezione C-C	56
2.24	Mesh	57
2.25	Caratterizzazione curva step 1	58
2.26	Caratterizzazione curva step 2	58

2.27	Caratterizzazione curva step 3	59
2.28	Caratterizzazione curva step 4	59
2.29	Caratterizzazione curva step 5	60
2.30	Caratterizzazione curva forza/spostamento tramite analisi FEM	60
2.31	Confronto curva forza/spostamento tra molla ideale, analitica e FEM	61
2.32	Analisi statica con carico di 6000N	62
2.33	Analisi statica con carico di 12000N	62
2.34	Analisi statica con carico di 16000N	63
2.35	Analisi statica con carico di 20000N	63
2.36	Confronto tra la tensione analitica e quella ricavata tramite FEM	64
3.1	tipologia di lavorazione per i 3 gruppi [1]	66
3.2	A sinistra il tastatori e a destra la macchina di misura a coordinate [20]	69
3.3	Esempio di presenza di cricche rilevabili con controllo magnetoscopico [21]	74
4.1	forza/spostamento delle varie prove	78
4.2	forza/spostamento primo ciclo TH950	80
4.3	forza/spostamento secondo ciclo TH950	80
4.4	forza/spostamento primo ciclo RH950	81
4.5	forza/spostamento secondo ciclo RH950	81
4.6	Dettaglio lunghezza difetto	83
4.7	Prima analisi innesco della cricca	84
4.8	Propagazione del difetto seconda analisi	86
4.9	Propagazione del difetto terza analisi	87
4.10	Propagazione del difetto quarta analisi	88
4.11	Propagazione del difetto quinta analisi	89
4.12	Propagazione del difetto sesta analisi	91
4.13	Propagazione del difetto settima analisi	92
4.14	Propagazione del difetto settima analisi rottura	93

trasportati. Il sistema di attuazione, sopra citato, è costituito da un circuito fluidodinamico al cui interno presenta una serie di valvole, ciascuna con una precisa funzione.

Alcune di esse hanno il compito di regolare la pressione del fluido di attuazione (come la valvola in cui verrà alloggiata la molla Belleville), mentre altre intervengono in casi di emergenza, come le valvole di sicurezza e di sfiato. Nel caso in esame la molla verrà installata all'interno di una valvola riduttrice di pressione con il ruolo fondamentale di abbassare la pressione del fluido di servizio (elio) da 400 bar a 70 bar. Obiettivo della presente ricerca sarà ,quindi, quello di progettare una molla che possa resistere a carichi elevati e che possa essere alloggiata all'interno della valvola riduttrice di pressione con geometrie prestabilite.

Si elenca di seguito, in modo sintetico e senza scendere troppo nel dettaglio, la composizione del micro circuito fluidodinamico PGD¹ che a sua volta, come illustrato nella Figura 1.2, è inserito all'interno del macro-circuito fluidodinamico del motore Vulcain 2:

- valvola utilizzata per caricare e scaricare il serbatoio di elio
- valvola di intercettazione
- valvola regolatrice di pressione (argomento di studio di questa tesi)
- valvola di controllo che controlla i sovraccarichi
- valvola di controllo
- filtro
- capacità
- capacità ad alta pressione
- linea alta pressione d'alimentazione al suolo
- linea di comando valvola

¹PGD è il circuito fluidodinamico in cui verrà installata la valvola contenente la molla Belleville, che nella Figura 1.2 è indicata con l'acronimo di "DPC"

1.2 Studio della molla Belleville

La molla Belleville è un guscio troncoconico il quale viene caricato lungo il suo asse staticamente o dinamicamente. I carichi sono normalmente applicati sulla superficie interna superiore e sulla superficie esterna inferiore. Questo tipo di molla, a differenza di altre, detiene proprietà che la rendono unica nella sua applicazione.

Di seguito ne elenchiamo alcune :

1. in ingombri ridotti si possono concentrare elevati carichi;
2. mediante le possibilità di combinazione delle molle Belleville, la lunghezza della pila può variare entro ampi limiti;
3. durata elevata del carico dinamico se dimensionata correttamente;
4. buon risultato nell'utilizzo come ammortizzatore;
5. non si verifica alcun rilassamento inammissibile se non si superano le tensioni consentite;
6. tramite la sua simmetria nella rotazione, il carico viene trasmesso concentricamente[1].

Grazie a tutti questi benefici la molla Belleville negli anni ha trovato una vasta gamma di applicazioni in diversi settori industriali, che vanno dall'industria dell'automobile a quella ferroviaria fino ad arrivare a quella aerospaziale.

1.3 Serie di controlli per il calcolo della molla Belleville

Il malfunzionamento della molla Belleville può essere causato da errori commessi in fase di progettazione, durante la quale si fa ricorso a calcoli complessi. Effettuando un calcolo accurato si ottiene un buon funzionamento della molla, scongiurando una serie di problemi spiacevoli che vanno dalla semplice rottura, alla mancata resistenza ad elevato numero di cicli. Quindi la maggior difficoltà sta nell'individuare i problemi già in fase di progettazione in modo da ottenere fin da subito una soluzione ottimale e funzionale.

Si riassumono di seguito gli aspetti principali che vanno osservati per ottenere una corretta progettazione della molla.

1.3.1 Sollecitazione statica

Per componenti costantemente sollecitati, come le molle Belleville, si deve tener conto della sollecitazione statica, onde evitare di superare una determinata soglia di tensione.

Questa soglia, indicata da un tensione di confronto σ_{om} , dovrà essere inferiore alla tensione di snervamento R_{P02} e di rottura del materiale R_m . Nel caso in cui $\sigma_{om} > R_{P02}$, si incorrerà nella deformazione plastica permanente, mentre, se $\sigma_{om} > R_m$, si perverrà a rottura.

1.3.2 Carico dinamico

Le molle Belleville, nella loro applicazione più comune, vengono sollecitate tramite carico dinamico.

Prima di applicare un tensione dinamica, si effettua un pre-assestamento¹ durante il quale, in seguito al superamento del limite di snervamento, nel punto più sollecitato della molla, si creano delle tensioni residue di trazione che contrastano le tensioni di carico generate nelle successive sollecitazioni, abbattendo i picchi di tensione.

Inoltre è necessaria l'applicazione di un pre-carico la cui corsa vari dal 15% fino al

¹Dopo il trattamento termico, ogni molla viene appiattita almeno una volta

20% dell'altezza della molla a riposo, in modo da evitare le sollecitazioni di trazione e compressione all'inizio della fase di carico.

1.3.3 Composizione delle molle

Le molle a tazza possono essere sovrapposte una sull'altra in serie o in parallelo. A seconda del tipo di sovrapposizione delle molle si ottengono diverse curve caratteristiche.

Vengono illustrate di seguito in modo riassuntivo le tipologie più comuni di sovrapposizione:

- **SERIE**: una pila di molle è assemblata in serie quando le singole molle sono sovrapposte in modo inverso (capovolte) tra loro, come possiamo osservare dalla Figura 1.3.



Figura 1.3. Molle disposte in serie con $i=4$ e $n=1$

Con questa disposizione la forza totale F_{tot} viene applicata con lo stesso modulo a tutte le singole molle, mentre lo spostamento totale del pacco molle in serie non è altro che lo spostamento della singola molla "s" moltiplicato per il numero di molle "i"².

$$F_{tot} = F \quad (1.1)$$

$$S_{tot} = i \cdot s \quad (1.2)$$

²Numero di molle singole disposte in senso opposto l'uno sull'altro in una pila o in un pacco di molle

- **PARALLELO**: una pila di molle è assemblata in parallelo quando le singole molle sono sovrapposte in modo non inverso tra loro, ma nello stesso verso come possiamo osservare nella Figura 1.4

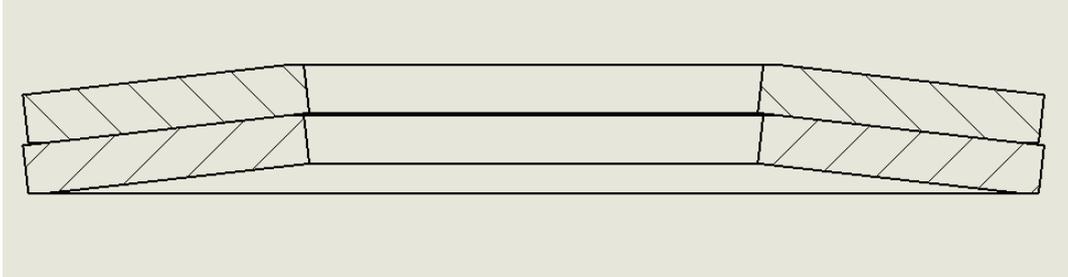


Figura 1.4. Molle disposte in parallelo con $i=1$ e $n=2$

$$F_{tot} = n \cdot F \quad (1.3)$$

$$S_{tot} = s \quad (1.4)$$

In questo caso, il carico deve essere moltiplicato per il numero "n"³ di molle a tazza sovrapposte parallelamente, mentre la corsa della singola molla rimane invariata.

1.3.4 Temperatura

Ogni tipo di materiale può essere impiegato solo nei rispettivi campi di temperatura. In caso di temperature troppo elevate avvengono delle riduzioni di resistenza del materiale, che in casi estremi possono portare alla deformazione plastica (afflosciamento).

1.3.5 Fragilità dovuta ad incrudimento

Impiegando alcuni procedimenti chimici o elettrochimici (per es. superficie trattata galvanicamente) può capitare che l'idrogeno penetri nel materiale provocando una rottura per incrudimento. Ciò non può essere ritenuto trascurabile nei trattamenti

³Numero di molle singole disposte nello stesso senso in un pacco

termici. Pertanto vanno sempre preferiti i procedimenti chimici ed elettrochimici che non creano problemi a riguardo.

Capitolo 2

Progettazione

Generalità

In questo capitolo verrà trattato tutto l'iter seguito per progettare la molla.

La procedura seguita comprende una prima parte di dimensionamento e scelta del materiale con i rispettivi trattamenti termici, e una seconda parte di analisi e calcoli.

Infine grazie all'utilizzo di un software di modellazione e simulazione (SolidWorks) è stata fatta un'analisi ad elementi finiti dei vari casi studiati.

La maggior parte delle informazioni bibliografiche riportate nel seguente capitolo sono state ottenute grazie all'ausilio del manuale "SCHNOOR"[1] e del manuale "SAE International, Spring Design Manual"[3].

2.1 Scelta delle dimensioni

Prima di esporre il procedimento che ha portato alla scelta definitiva delle misure dimensionali della molla, è opportuno, per una maggiore chiarezza, spiegare e illustrare graficamente i nomi delle parti geometriche interessate.

Di seguito sarà illustrata una sezione della molla che riporta la nomenclatura che si utilizzerà in tutto l'elaborato. (Figura 2.1)

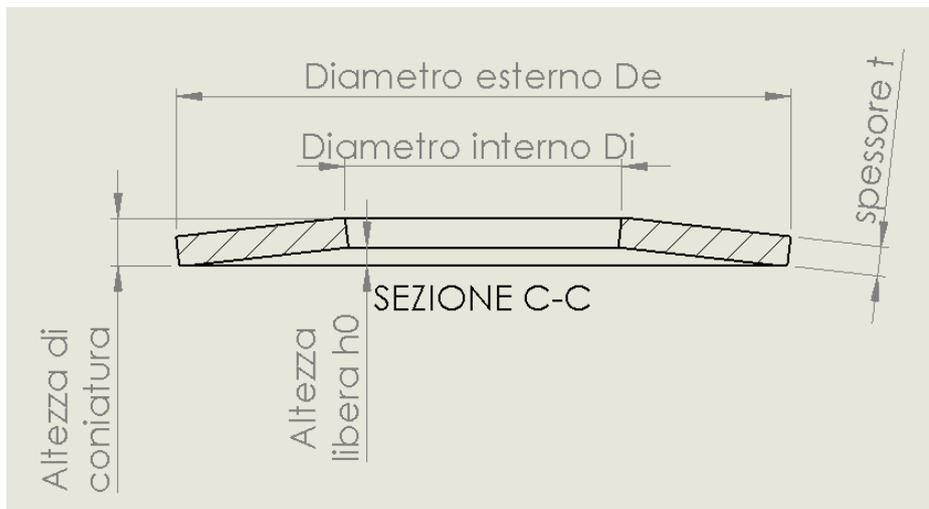


Figura 2.1. Nomenclatura molla

Le molle a tazza vengono sostanzialmente determinate per mezzo dei tre seguenti rapporti dimensionali:

$$\delta = \frac{\text{Diametro esterno } D_e}{\text{Diametro interno } D_i} \quad (2.1)$$

$$\frac{h_0}{t} = \frac{\text{Altezza libera } h_0 - t}{\text{Spessore molla } t} \quad (2.2)$$

$$\frac{D_e}{t} = \frac{\text{Diametro esterno } D_e}{\text{Spessore molla } t} \quad (2.3)$$

Per poter scegliere le dimensioni della molla occorre introdurre la formula che permette di valutare lo spostamento della molla in funzione della forza, fondamentale ai fini della regolazione.

Di seguito la formula della forza utilizzata :

$$F^1 = \frac{4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^4}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot K_4^2 \cdot \frac{s}{t'} \left[K_4^2 \cdot \left(\frac{h'_0}{t'} - \frac{s}{t'} \right) \cdot \left(\frac{h'_0}{t'} - \frac{s}{2t'} \right) + 1 \right] \quad (2.4)$$

Al fine di poter utilizzare la formula (2.4), i rapporti dimensionali sopra riportati devono rientrare nei seguenti campi:

- $\delta = 1.75 \div 2.5$
- $h_0/t = 0.4 \div 1.3$
- $D_e/t = 16 \div 40$

Nel caso in cui le molle a tazza non dovessero rientrare nei limiti sopra esposti, quindi molle molto sottili ($D_e/t > 50$), l'equazione (2.4) darebbe valori sovrastimati e di conseguenza tale formula non potrebbe essere utilizzata.

In caso di molle a tazza molto strette con un rapporto di diametri $D_e/D_i < 1,75$ è necessario prendere in considerazione, per il calcolo del carico, la riduzione del braccio di leva causata dalla forma rettangolare della sezione e dall'arrotondamento degli spigoli, poiché altrimenti verrebbero calcolati carichi troppo bassi.

Come esposto nei paragrafi precedenti, la molla in esame verrà alloggiata in una valvola regolatrice di pressione con il compito di ridurre la pressione da 400 bar a 70 bar. Da queste informazioni si possono ricavare la forza massima che potrà agire sulla molla, il suo ingombro massimo (alloggiamento della molla nella valvola), la sua altezza massima e la sua escursione massima consentita.

Si elencano sotto i valori che sono stati inseriti nella formula della forza (2.4), al fine di ottenere le dimensioni definitive della molla, che consentendo di iniziare una serie di calcoli e analisi.

Valori in ingresso:

1. $D_{e\max} = 82\text{mm}^2$

¹formula forza-spostamento per molle Belleville[3]

²massima larghezza consentita

2. $F = 19000N \pm 1000N^3$

3. $H_{pacco\ molla} = 54mm \pm 2mm^4$

4. $t = 3,9 \pm 0,1mm^5$

5. $\Delta s = 1.7mm \pm 0,1mm^6$

6. $l_0 = 6 \pm 0,1^7$

7. $E = 195GPa$

8. $\mu = 0,3$

Si riportano di seguito le formule dei parametri utilizzati all'interno dell'equazione (2.4):

$$\delta = \frac{D_e}{D_i} \quad (2.5)$$

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{\delta-1}{\delta}\right)^2}{\frac{\delta+1}{\delta-1} - \frac{2}{\ln \delta}} \quad (2.6)$$

$$K_4 = \sqrt{\frac{-C_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{C_1}{2}\right)^2 + C_2}} \quad (2.7)$$

$$C_1^8 = \frac{\left(\frac{t'}{t}\right)^2}{\left(\frac{1}{4} \cdot \frac{l_0}{t} - \frac{t'}{t} + \frac{3}{4}\right) \cdot \left(\frac{5}{8} \cdot \frac{l_0}{t} - \frac{t'}{t} + \frac{3}{8}\right)} \quad (2.8)$$

$$C_2 = \frac{C_1}{\left(\frac{t'}{t}\right)^3} \cdot \left[\frac{5}{32} \cdot \left(\frac{l_0}{t} - 1\right)^2 + 1 \right] \quad (2.9)$$

³forza esercitata dall'elio sulla superficie della valvola

⁴altezza pacco molla

⁵spessore singola molla

⁶scostamento verticale di regolazione della singola molla in funzione della forza esercitata dall'elio e del numero di molle (nove) inserite nella valvola

⁷altezza singola molla

⁸Il fattore C1 è funzione delle caratteristiche geometriche delle molle

Con questi dati a disposizione e usufruendo della formula inversa della forza F (2.4), si può ricavare il diametro esterno, il diametro interno di primo tentativo, tenendo in considerazione uno spessore del piattello $s \geq 3\text{mm}$ ⁹.

In funzione dei dati in ingresso sopra elencati, si sono ottenuti i valori riportati in tabella 2.1.

Imponendo due diametri esterni 75mm e 80mm e utilizzando un $\delta = 2,22$ si è prima variata l'altezza di coniatura di ciascuna molla non caricata e poi lo spessore della singola molla nel rispetto delle tolleranze prima elencate.

Tabella 2.1. valori per la scelta del diametro

l_0	t	F	$F+5\%$	De	Di
5,9	4	19914	21905	75	33,75
5,9	4	17502	19252	80	36
6,1	4	22780	25058	75	33,75
6,1	4	20021	22023	80	36
6	3,8	19914	21905	75	33,75
6	3,8	17502	19252	80	36
6	3,9	21214	23335	75	33,75
6	3,9	18645	20510	80	36
6	4	22610	24871	75	33,75
6	4	19872	21859	80	36

⁹Essendo molle realizzate per tornitura e non per stampaggio, non possiamo scendere al di sotto dei 3mm di spessore.

I valori ottenuti per ciascun singolo caso preso in considerazione sono riportati nella tabella 2.1 dove si nota una certa tendenza nello scegliere una altezza di coniazione l_0 ¹⁰ di 6mm e uno spessore t della molla tra 3,8mm e 3,9mm, per cui si è deciso di scegliere i seguenti dati:

- $l_0 = 6mm$
- $t = 3,85mm$
- $D_e = 80mm$
- $D_i = 36mm$

¹⁰altezza del disco a riposo

2.2 Tipi di Materiale

2.2.1 Requisiti generali

Mediante deformazione elastica una molla tende ad opporsi alle sollecitazioni esterne. Le molle, pur essendo strutturalmente piccole, devono possedere un elevato limite di elasticità ed elevata resistenza a trazione. Ciò si può ottenere grazie all'utilizzo di materiali che, trattati termicamente, acquisiscono queste caratteristiche. Le molle oltre a consentire grandi deformazioni in campo elastico, devono possedere una sufficiente deformabilità plastica, per evitare rotture dovute a sovraccarichi non previsti, e per permettere la lavorazione di molle formate a freddo. Per quanto riguarda la resistenza a fatica, sono richieste una struttura omogenea, un'elevata purezza e una superficie liscia.

Insieme a tutte le richieste sopra elencate si aggiungono, in alcuni casi, la resistenza alla corrosione, la resistenza alle alte temperature e un comportamento antimagnetico. Tutte queste esigenze possono essere soddisfatte dalle molle realizzate in acciaio. Una delle più importanti caratteristiche del materiale è il modulo di elasticità "E" detto anche modulo di Young. Questo modulo misura l'entità della deformazione elastica di un materiale in funzione del carico applicato, come enunciato da Hooke: "In campo elastico per piccole deformazioni ε_n , la deformazione è proporzionale allo sforzo applicato σ_n " ¹

$$\sigma_n^2 = E \cdot \varepsilon_n \quad (2.10)$$

Infine il modulo E non viene modificato dalla bonifica, ma esiste una relazione con la temperatura, che deve essere presa in considerazione nel caso in cui superi un certo valore.

¹Legge di Hooke

²Equazione della Legge di Hook

2.2.2 Tipici materiali per molle

- C60 e C75: sono acciai di qualità³, il loro utilizzo maggiore è per le rondelle di sicurezza o ranelle superelastiche⁴ poiché questi componenti vengono sottoposti esclusivamente a carico statico.
- Ck67, Ck75 e Ck85: tipi di acciai speciali³ usati sottoforma di nastro laminato a freddo per molle a tazza del gruppo 1⁵ e per molle soggette a ridotta sollecitazione.
- 50 CrV 4 (1.8159): è un acciaio in lega di cromo-vanadio di alta qualità. Anche questo materiale viene in un primo momento laminato a freddo³, successivamente laminato a caldo e infine fucinato⁶. Assicura, anche in casi di sezioni con spessore fino a 50mm, buona temprabilità raggiungendo profondità importanti. A differenza degli acciai non legati presenta minor rilassamento. Ciò ne consente l'utilizzo a temperature elevate (fino a 250°C con ridotta sollecitazione)

2.2.3 Materiali per particolari sollecitazioni

L'impiego di materiali speciali è preferibile nei casi o di sollecitazioni elevate, come quelle dovute alla corrosione, o di temperature elevate. Poiché questi tipi di materiali non raggiungono una resistenza a trazione pari a quella raggiunta dagli acciai comunemente usati per le molle, ci si deve focalizzare su questo aspetto in fase di calcolo della molla. Ciò si traduce in una riduzione dell'altezza di coniatura a parità delle altre dimensioni, il che consente di raggiungere un carico massimo finale inferiore.

³Secondo normativa DIN 17222

⁴Secondo normativa DIN 6796

⁵Approfondiremo meglio i gruppi 1,2,3 nel capitolo "industrializzazione"

⁶Secondo normativa DIN 17221

Acciai anticorrosivi

- X 7 CrNiAl 17 7 (1.4568): L'acciaio X7CrNiAl17-7 ha una struttura austenitico-ferritica⁷ e può essere sottoposto ad indurimento per invecchiamento. Dopo l'incrudimento viene lavorato, e successivamente per mezzo di un trattamento termico può essere invecchiato. In relazione alle condizioni della struttura, una minor resistenza alla corrosione, e la sensibilità alla tensocorrosione, rappresentano degli svantaggi rispetto all'acciaio 1.4310. Questo tipo di acciaio viene consigliato per molle con spessore superiore a 2.5mm.
- X 5 CrNiMo 17 12 2 (1.4401): E' un acciaio che rispetto ai due precedenti ha una resistenza a trazione inferiore, ma presenta una buona resistenza alla corrosione e una bassa magnetizzabilità. Data la sua scarsa reperibilità, non trova molta applicazione nell'industria manifatturiera.
- X 12 CrNi 17 7 (1.4310): L'acciaio Nichel-Cromo presenta una buona resistenza alla corrosione, ragion per cui risulta essere l'acciaio più utilizzato nell'industrializzazione delle molle. A causa della sua struttura austenitica e della presenza di strati ferritici, questo acciaio non può essere bonificato secondo la procedura comune, ma bisogna prima portarlo alla resistenza che garantisce una elevata deformabilità plastica, necessaria per le molle, mediante formatura a freddo. Con questo tipo di acciaio si possono realizzare molle fino a uno spessore di 2,5mm.

Acciai resistenti alle alte temperature

- X 22 CrMoV 12 1 (1.4923): Questo acciaio permette di avere buoni risultati alle alte temperature grazie alla sua matrice composta da cromo-molibdeno-vanadio. Le molle che usano questo materiale vengono realizzate da nastro per spessori che vanno da 1,5mm a 6mm, mentre per spessori che superano i 6mm si utilizzano pezzi grezzi fucinati.

⁷Secondo normativa DIN 17224

- X39 CrMo 17 (1.4122): La lega di cromo-molibdeno sottoposta a bonifica martensitica manifesta, grazie alla presenza di molibdeno, dei buoni valori di resistenza alla corrosione e alle alte temperature rispetto agli acciai al cromo.

Leghe di rame

Il rame è antimagnetico, possiede un alta conducibilità elettrica ed è resistente alla corrosione. Questa serie di caratteristiche rende le leghe in rame fondamentali in molte applicazioni delle molle Belleville.

- CuSn 8 (2.1030): La lega bronzo-stagno⁸ acquisisce le sue proprietà elastiche dalla formatura a freddo. Il modulo di elasticità raggiunge circa il 50% del valore dell'acciaio, ciò consente di avere resistenza inferiore. Questo è importante nei calcoli per consentire un dimensionamento della molla per carichi minimi.
- CuBe 2 (2.1247): La lega rame-berillio dopo l'invecchiamento raggiunge valori di resistenza confrontabili con quelli dell'acciaio, anche se il valore del modulo elastico è pari solo al 60% di quello dell'acciaio. Infine queste leghe possono essere applicate in campi in cui le temperature sono basse e prossime allo zero assoluto.

Leghe di nichel e cobalto

Queste leghe con l'aggiunta di titanio, niobio, alluminio riescono ad acquisire un indurimento per invecchiamento, sono abbastanza plastiche da avere una dilatazione elevata e un basso rapporto di snervamento, il che comporta un cedimento della molla che non può essere sottovalutato in fase di progettazione.

Grazie alla loro composizione mostrano un'ottima resistenza a molte sostanze.

Per quanto riguarda la fatica si comportano in modo quasi perfetto lavorando in campo elastico.

- NIMONIC 90 (2.4632, 2.4969): Presenta una buona caratteristica di resistenza alle alte temperature e se dimensionata correttamente può essere usata fino a temperature di 700 °C.

⁸Secondo la normativa DIN 17670

- INCONEL⁹ X 750 (2.4669) e INCONEL 718 (2.4668): Le nichel-cromo sono prive di cobalto e per questo vengono scelte nella tecnologia dei reattori. A causa dei costi eccessivi per il loro indurimento, l'applicazione è molto limitata.
- DURATHERM¹⁰ 600: E' una lega induribile usata per molle a base di nichel e cobalto con buone proprietà di resistenza.
Con temperature maggiori di zero gradi, il materiale inizia a essere amagnetico. Questa lega viene usata per temperature superiori ai 600°C.

⁹NIMONIC e INCONEL sono marchi del gruppo Inco.

¹⁰DURATHERM è un marchio di fabbrica della Vacuumschmelze GmbH, Hanau.

2.2.4 Lega 17-7PH composizione chimica e proprietà meccaniche

Gli acciai che presentano l'acronimo PH (Precipitation Hardening)¹¹ hanno la possibilità di migliorare le proprie caratteristiche meccaniche grazie all'uso dei trattamenti termici di invecchiamento, che permettono la precipitazione all'interno della matrice metallica degli elementi il cui compito è di migliorare le proprietà meccaniche del materiale. Oltre a migliorare le caratteristiche meccaniche del materiale questi "Precipitation Hardening" possiedono un'apprezzabile resistenza alla corrosione confrontabile agli acciai austenitici. Questi tipi di acciai trovano applicazione in una vasta varietà di settori, quali: ingranaggi, reattori nucleari, fasteners o raccordi aerei, eppure il loro utilizzo è limitato a causa della scarsa durezza e delle pessime proprietà tribologiche. Pertanto è molto importante l'applicazione di trattamenti termici superficiali o rivestimenti che possano aumentare le proprietà meccaniche in questi tipi di acciaio[5].

In questo elaborato sono stati studiati due tipi di trattamento termico, RH950 e TH950, che permettono di modificare la struttura del materiale al fine di ottenere un componente resistente a elevate sollecitazioni.

In particolare si è cercato di ottenere condizioni operative che garantiscano:

- buona lavorabilità;
- alta resistenza;
- eccellente resistenza a fatica;
- minime deformazioni dopo trattamento termico;
- mantenere un contenuto di cromo elevato non legato che garantisca alta resistenza alla corrosione.

Proprietà meccaniche, valori tipici

Tipo	Condizione	Rottura	Snervamento 0.2% [MPa]	Allungamento (%)	Strizione (%)
17-7 PH	TH950	1207	1069	12	34
	RH950	1379	1207	10	30

¹¹In italiano sta per indurenti per precipitazione

2.3 Scelta del trattamento termico

La scelta di utilizzare il materiale 17-7PH è stata presa in seguito ad uno studio approfondito sulle proprietà meccaniche che questo materiale, trattato termicamente, potesse offrire. A tal proposito sono stati consultati articoli scientifici, puntualmente citati, fatti da terzi sul materiale in questione.

2.3.1 Meccanismo di indurimento per precipitazione

Normalmente la lega 17-7PH viene fornita nella condizione A¹, dove il materiale ha una struttura austenitica. Nella struttura austenitica la lega 17-7PH possiede una resistenza bassa ed è la condizione in cui la formabilità è più semplice. Per aumentare la resistenza, la lega subisce un trattamento termico. Nella prima fase del trattamento si ha la trasformazione dell'austenite (stabile) in martensite tramite condizionamento e trasformazione austenitica; nella seconda fase si ha un trattamento indurente per precipitazione che serve a rafforzare ulteriormente il materiale. La condizione TH950 è il risultato di un trattamento in cui nella prima fase si riscalda il materiale fino a 760°C (1400°F), nella seconda fase viene raffreddato fino a temperatura ambiente, in modo da favorire la trasformazione dell'austenite in martensite, e infine, nella terza fase si effettua l'indurimento per precipitazione a 510°C (950°F).

La condizione RH950 è il risultato di un trattamento in cui nella prima fase si riscalda il materiale fino a 955°C (1750°F), nella seconda fase viene raffreddato per un certo Δt a -100°C (-73°F), in modo da ottenere una trasformazione martensitica incompleta, e infine, nella terza fase si effettua l'indurimento per precipitazione a 510°C (950°F)[6].

Da un punto di vista puramente chimico si può dire che nel primo stadio di rafforzamento dell'acciaio 17-7PH si ha la trasformazione dell'austenite in martensite. A 760°C l'acciaio è in condizione austenitica γ . La solubilità del carbonio in γ -Fe è significativamente più alta che in α -Fe. A causa della grande velocità di raffreddamento, il carbonio non è in grado di lasciare il reticolo bcc² di α -Fe, ovvero il reticolo bcc si deforma in reticolo tetragonale a corpo centrato. Nella fase tetragonale corpo

¹condizione ricotta

²cubico corpo centrato

centrato si ha martensite dove il carbonio solido supersaturo nella soluzione $\alpha - Fe$, è più duro e più forte rispetto all'austenite[7].

2.3.2 Trattamento termico TH950

- "**Condizionamento:** l'austenite viene portata a temperatura di 760°C per 90 minuti. Durante questo trattamento, i carburi di cromo precipitano nei bordi di grano o nei piani di slittamento. La precipitazione riduce il contenuto di carbonio efficace e di cromo nell'austenite, il che porta alla trasformazione in martensite durante il raffreddamento[7]."
- "**Trasformazione:** il raffreddamento viene effettuato a partire da 760°C dove si inizia a convertire l'austenite in martensite fino a temperature di circa 95°C. In un secondo momento è stata abbassata ulteriormente la temperatura fino a 15°C per 30 minuti. È importante sottolineare che il raffreddamento da 760°C a 15°C venga effettuato entro un'ora, al fine di eseguire una trasformazione completa[7]."
- "**Invecchiamento** : per ottenere un miglioramento strutturale del materiale sia a livello di durezza che di resistenza, si effettua l'invecchiamento dello stesso, cioè precipitazione di fasi secondarie e un'ulteriore precipitazione di carburi. Durante questa fase si raggiungono temperature di 510°C, che conducono a una bassa duttilità[7]."

2.3.3 Trattamento termico RH950

- "**Condizionamento:** L'austenite viene portata a temperatura di 955°C per 10 minuti. L'effetto di questo trattamento è l'aumento della temperatura M_s^3 , fino al raggiungimento di un valore vicino alla temperatura ambiente che permetta di mantenere la microstruttura austenitica senza che avvenga la trasformazione[7]."

³Temperatura a cui inizia la trasformazione da austenite a martensite

- **"Trasformazione:** dopo il condizionamento a 955°C e raffreddamento a –75°C, la trasformazione da austenite a martensite avviene mantenendo per 8 ore questa temperatura. La trasformazione è per lo più raggiunta durante durante la prima ora del processo di raffreddamento[7]."
- **"Invecchiamento :** l'invecchiamento avviene alla temperatura di 510°C per un'ora. In caso di invecchiamento a temperature più alte o più basse, il risultato è una resistenza più bassa. A temperature più elevate si ha una migliore duttilità[7]."

Tabella 2.2. Trattamenti degli acciai indurenti per precipitazione e maranging [7]

Materiali	Condizione	solubilizzazione	Raffreddamento	Condizionamento e trasformazione dell'austenite	invecchiamento °C	invecchiam. ore
17-7PH	RH950	1030	In Aria	950°C, raffreddare in aria -60 per circa 8 ore, riscaldare in aria fino a temp. ambiente	510	1,1
	TH950	1030	In Aria	720°C per 84 minuti, raffreddare fino a 13 gradi entro 50 minuti mantenere a 13 °C per almeno 35 minuti	510	1,4

Literature		Mechanical properties at room temperature				
		Rm, MPa	Rp _{0.2} , MPa	A, %	HRB	HRC
BAS EN 10088-3:2010	condition +AT ¹⁾	≤1030	-	>19	-	-
	condition +P ¹⁾	≥1450	>1310	>2	-	-
Hitemp 17-7PH	A	896	276	35	85	-
	TH 1050	1379	1276	9	-	43
	RH 950	1620	1517	6	-	48
	CH 900	1828	1793	2	-	49
Metals Handbook	TH 1050 ²⁾	1170	965	6	-	25-38
	RH 950 ²⁾	1275	1030	6	-	41

Figura 2.2. Proprietà meccaniche dell'acciaio inossidabile 17-7 PH [7]

2.4 Analisi e calcoli

2.4.1 Analisi generali

Almen e László supposero che quando avveniva il molleggio la sezione della molla ruotasse intorno al punto centrale di rovesciamento "S". Come possiamo vedere nella Figura 2.3 il punto S si trova al centro della sezione, sul diametro D_0 .

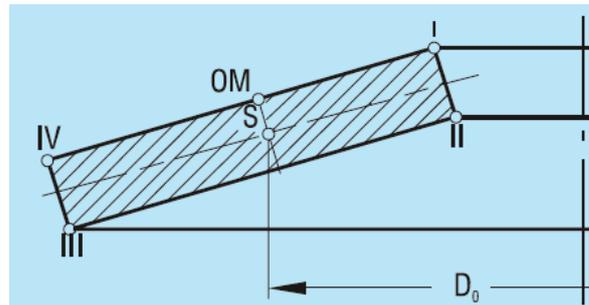


Figura 2.3. Punti tensionali I,II,III,IV [1]

$$D_0 = \frac{D_e - D_i}{\ln \frac{D_e}{D_i}} \quad (2.11)$$

Si parte dalle seguenti ipotesi:

- vale la legge di Hooke, cioè il materiale è elastico in maniera lineare;
- la sezione è rettangolare con spigoli vivi e rimane omogenea anche durante il molleggio;
- i nodi di applicazione del carico corrispondono a I e III.

La norma¹ prevede per le molle Belleville con spessore maggiore o uguale a 6 mm, oltre all'arrotondamento degli spigoli, piani di appoggio nei punti I e III. Grazie a questi piani di appoggio, il punto di introduzione del carico è meglio definito, e nel caso di pile di molle, si riduce l'attrito negli elementi di guida. Ciò permette un notevole accorciamento del braccio di leva e di conseguenza un aumento del carico.

¹DIN 2093

Il carico è nuovamente compensato per mezzo della riduzione dello spessore della molla da t a t' .

Per le molle a tazza con piani d'appoggio e spessore ridotto è fondamentale il calcolo del fattore K_4 in conformità all'equazione (2.7); nelle equazioni da (2.5) a (2.9), t deve essere sostituito da t' e h_0 da $h_0' = l_0 - t'$.

Per le molle Belleville inserite nella norma DIN 2093 è prescritta la quota t' . In media il fattore t'/t è pari ai seguenti valori:

Tabella 2.3. Valori di t'/t

Serie	A	B	C
t'/t	0.94	0.94	0.96

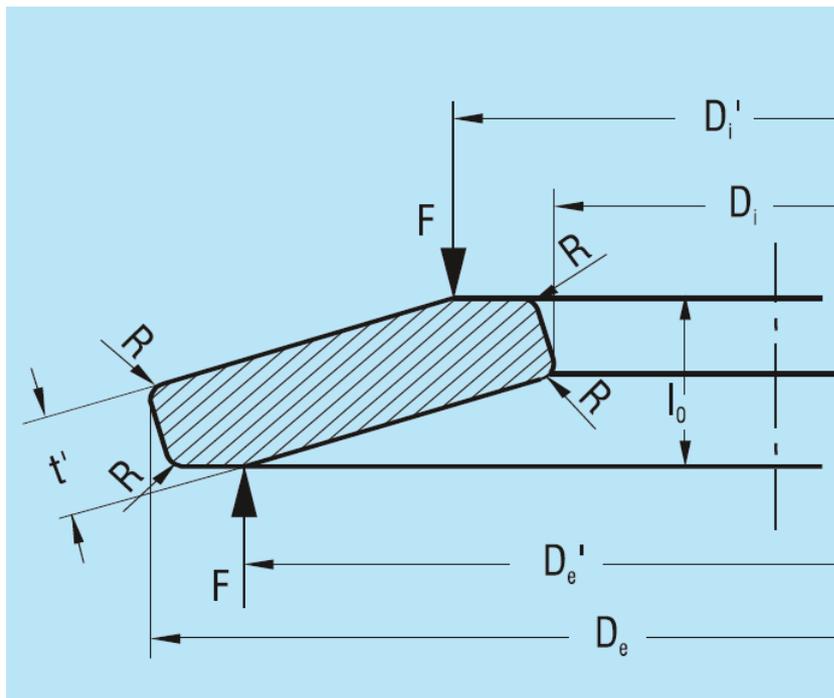


Figura 2.4. Sezione di una molla a tazza con piani d'appoggio del gruppo 3 [1]

Lo spessore t' si definisce in funzione delle seguenti condizioni:

- altezza di coniatura l_0 invariata
- larghezza del piano di appoggio di circa 1/150 del diametro esterno

- il carico della molla ridotta dovrà essere uguale, se $s = 0,75h_0$, a quello della molla non ridotta.

2.4.2 Forza-Spostamento

Il carico applicato alla molla non aumenta in maniera lineare con la corsa, ma segue per un primo tratto un andamento crescente per poi decrescere all'aumentare del molleggio s/h_0 .

Ciò lo si può verificare analizzando la formula del molleggio (2.12) dove si può concludere che l'aumento della quota di molleggio 2R si riduce con l'aumentare del molleggio stesso.

$$R = \frac{dF}{ds} = \frac{4E}{1-\mu^2} \cdot \frac{t^2}{k_1 D_e^2} \cdot K_4^2 \left\{ K_4 \left[\left(\frac{h_0}{t} \right)^2 - 3 \cdot \frac{h_0}{t} \cdot \frac{s}{t} + \frac{3}{2} \cdot \left(\frac{s}{t} \right)^2 \right] + 1 \right\} \quad (2.12)$$

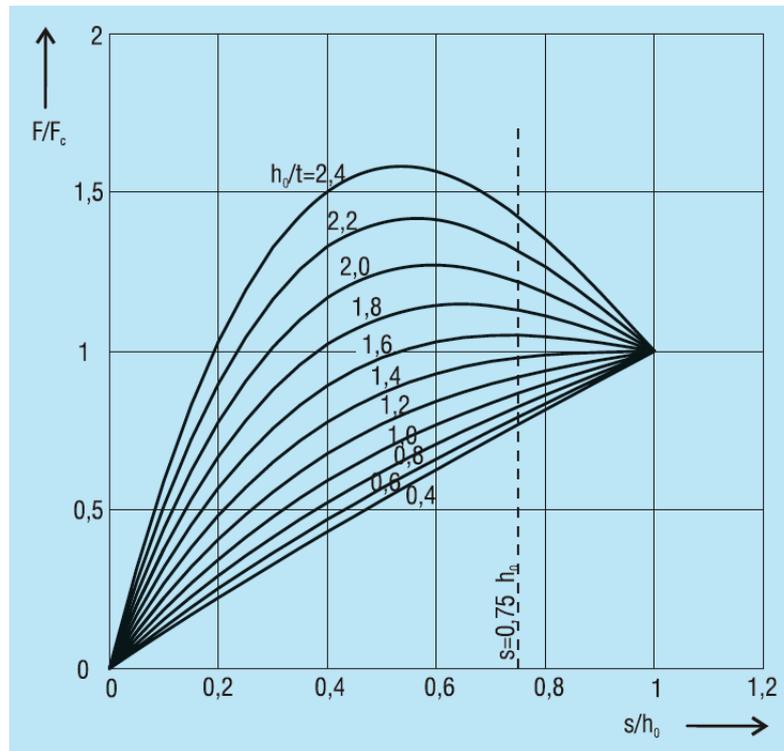


Figura 2.5. Andamento della curva caratteristica in funzione di $\frac{h_0}{t}$ e $\frac{s}{h_0}$ [1]

²R rappresenta la pendenza della curva

L'andamento della curva viene determinato esclusivamente dal rapporto h_0/t , come risulta dalla Figura 2.5.

Osserviamo che con $h_0/t < 0,4$ la curva è lineare, e con la crescita del rapporto h_0/t si accentua l'andamento discendente. Se $h_0/t = \sqrt{2}$ la curva ha un tratto quasi orizzontale in prossimità di $s = h_0$.

Questo permette di sviluppare molle con una curva caratteristica vicina all'orizzontale in cui il carico aumenta leggermente. Le pile di molle molto lunghe, ovvero con $h_0/t > 1,3$ sono scarsamente utilizzate, questo perchè le singole molle interne alla pila si caricano in modo irregolare sovraccaricandosi. Dunque queste molle devono essere usate come singole molle.

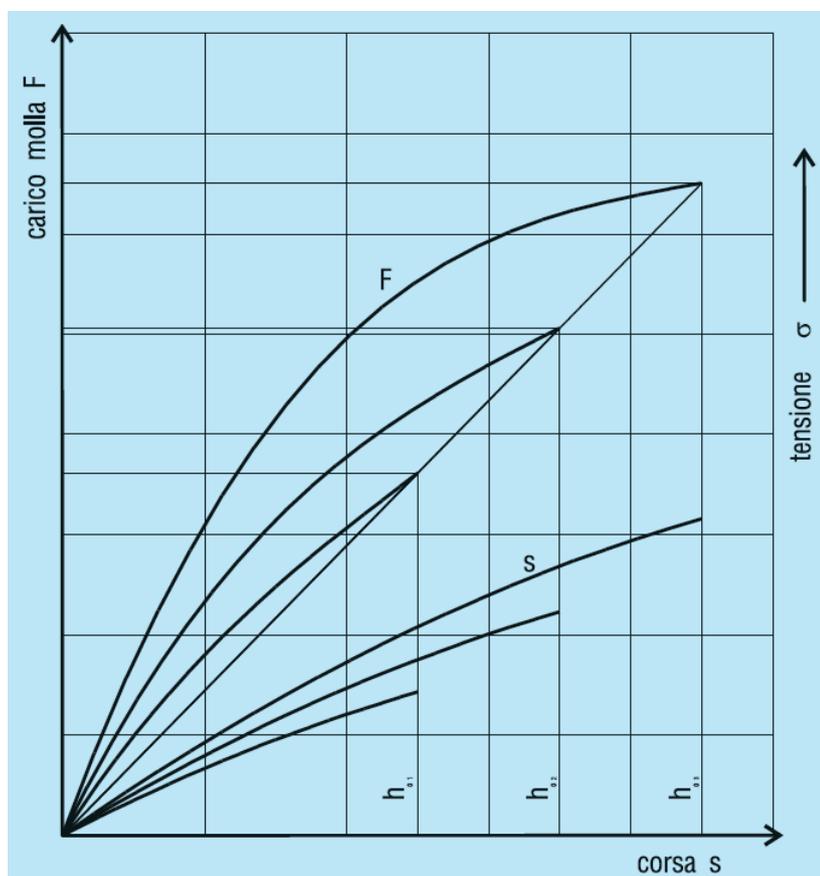


Figura 2.6. Curve caratteristiche di una molla singola con altezza h_0 diversa [1]

Osservando la Figura 2.6 notiamo che a parità di dimensioni l'andamento della curva caratteristica in funzione del rapporto h_0/t cambia se e solo se hanno altezza di coniazione differente.

Mentre, nel caso in cui l'altezza h_0 è uguale, una molla che ha lo spessore piccolo presenterà una elevata accentuazione della curva rispetto ad una molla con uno spessore elevato (Figura 2.6).

Se dopo aver effettuato i calcoli sulle molle, questi, non danno un risultato soddisfacente, allora, come prima operazione si modifica l'altezza libera h_0 generando la curva caratteristica vicina a quella desiderata.

In funzione di ciò occorre tenere sotto controllo le tensioni consentite, questo perché, le tensioni aumentano col crescere dell'altezza h_0 .

Se $\frac{h_0}{t} > \sqrt{2}$, il carico applicato alla molla raggiungerebbe il suo valore massimo per poi ridursi nuovamente. In alcune applicazioni, viene sfruttata la parte discendente della curva caratteristica. Detto ciò la molla dovrà essere caricata oltre la posizione di appiattimento, in questo caso, si dovranno garantire determinati presupposti costruttivi (Figura 2.7).

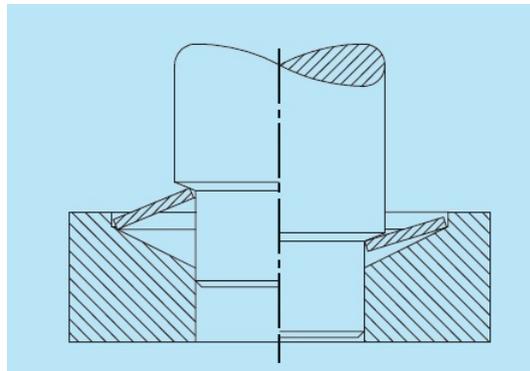


Figura 2.7. Molla a tazza caricata oltre la posizione di appiattimento [1]

Nel caso di normale disposizione delle molle Belleville, con una corsa $s > 0,75$ h_0 si verifica uno scostamento della curva determinata sperimentalmente da quella ottenuta analiticamente, in particolare si ha un aumento graduale del carico Figura 2.8. Ciò è dovuto allo spostamento dei punti d'applicazione della forza in bracci di leva ridotti poiché le molle Belleville ruotano una sull'altra o sul piano d'appoggio. Si consiglia quindi di sfruttare la corsa della molla disponibile solo al 75-80%

circa. Per questo motivo, nella norma DIN 2093 i carichi vengono indicati solo con $s \approx 0,75h_0$.

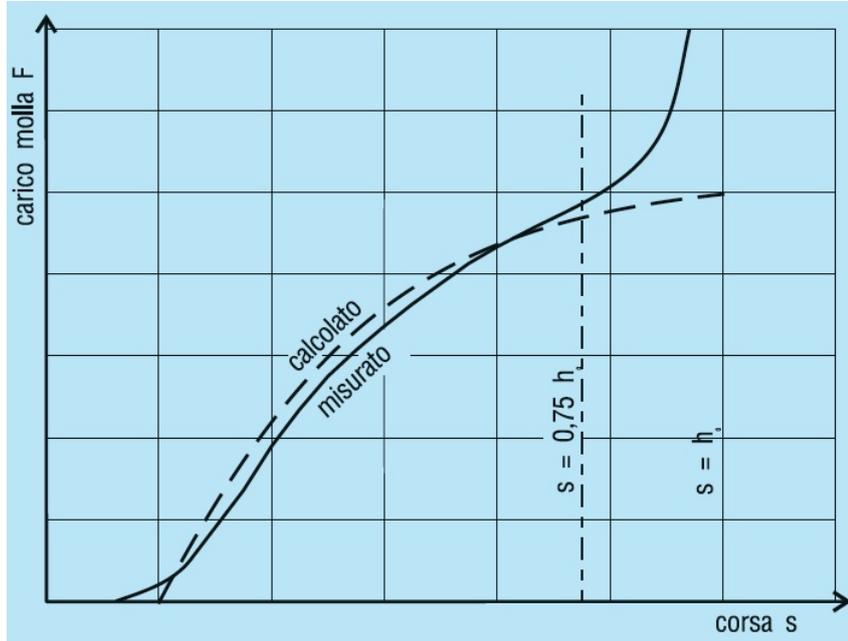


Figura 2.8. Curva caratteristica calcolata ed equilibrata [1]

Di seguito si applicherà la teoria riportata sopra inserendo i dati in possesso con l'obiettivo di estrapolare e valutare gli andamenti delle curve caratteristiche Forza-spostamento.

dati

- $D_e = 80mm$
- $D_i = 36mm$
- $l_0 = 6mm$
- $L_0 = 54mm$
- $t = 3,85mm$
- $t' = 3,67mm$
- $h_0 = 2,15mm$

- $E = 195GPa$
- $\mu = 0,3$
- $R = 2,22$
- $N_{dischi} = 9$

Formule

$$\delta = \frac{D_e}{D_i}$$

$$K_1 = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{\left(\frac{\delta-1}{\delta}\right)^2}{\frac{\delta+1}{\delta-1} - \frac{2}{\ln \delta}}$$

$$K_2 = \frac{6}{\pi} \cdot \frac{\frac{\delta-1}{\ln \delta} - 1}{\ln \delta} \quad (2.13)$$

$$K_3 = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{\delta - 1}{\ln \delta} \quad (2.14)$$

$$K_4 = \sqrt{\frac{-C_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{C_1}{2}\right)^2 + C_2}}$$

$$C_1 = \frac{\left(\frac{t'}{t}\right)^2}{\left(\frac{1}{4} \cdot \frac{l_0}{t} - \frac{t'}{t} + \frac{3}{4}\right) \cdot \left(\frac{5}{8} \cdot \frac{l_0}{t} - \frac{t'}{t} + \frac{3}{8}\right)}$$

$$C_2 = \frac{C_1}{\left(\frac{t'}{t}\right)^3} \cdot \left[\frac{5}{32} \cdot \left(\frac{l_0}{t} - 1\right)^2 + 1 \right]$$

- $\delta = 2,22$
- $C_1 = 9,94$
- $C_2 = 12,04$
- $K_1 = 0,73$
- $K_4 = 0,73$

$$F = \frac{4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t'^4}{K_1 D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{s}{t'} \left[K_4 \left(\frac{h'_0}{t'} - \frac{s}{t'} \right) \left(\frac{h'_0}{t'} - \frac{s}{2t'} \right) + 1 \right]$$

I risultati della forza in funzione dello spostamento sono riportati nella Tabella A.1 in Appendice.

Sotto si riportano gli andamenti delle curve forza/spostamento, della singola molla e del pacco molla.

Grafici

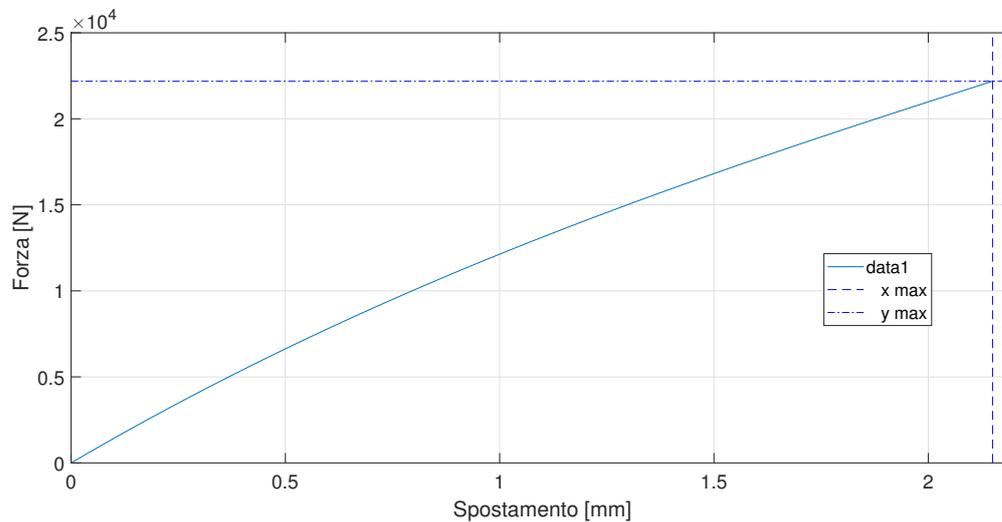


Figura 2.9. Forza-Spostamento singola molla

Si nota dal Grafico 2.9 che la curva caratteristica presenta un andamento quasi lineare dovuto al fatto che in questa applicazione particolare il rapporto $h_0/t' \approx 0,558$ è di poco maggiore al valore di andamento lineare di $h_0/t'=0,4$.

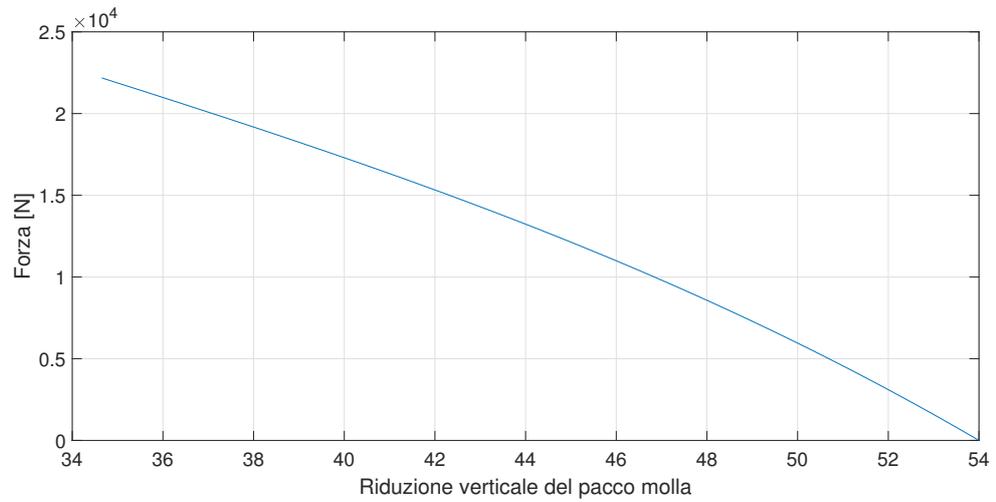


Figura 2.10. Forza/Spostamento pacco molla

Nella concessione di questo lavoro di progettazione sono state fornite le forze e gli spostamenti verticali con cui la molla dovrebbe lavorare per effettuare la regolazione. I dati forniti dall'azienda sono:

- *scostamento verticale* = $38mm \div 39.5mm$
- *range di forza* = $17500N \div 19000N$

In funzione dei calcoli sopra effettuati, riguardanti il calcolo della forza in funzione dello spostamento abbiamo ricavato la tabella (2.4).

Tabella 2.4: Regolazione molla

Spostamento [mm]	Forza [N]
39,51	17765
39,42	17850
39,33	17935
39,24	18020
39,15	18105
39,06	18190
38,97	18274

38,88	18359
38,79	18443
38,7	18527
38,61	18610
38,52	18694
38,43	18778
38,34	18861
38,25	18944
38,16	19027

Dalla tabella si può notare che, per quanto riguarda i calcoli, si è in linea con le richieste pervenute in fase di progettazione.

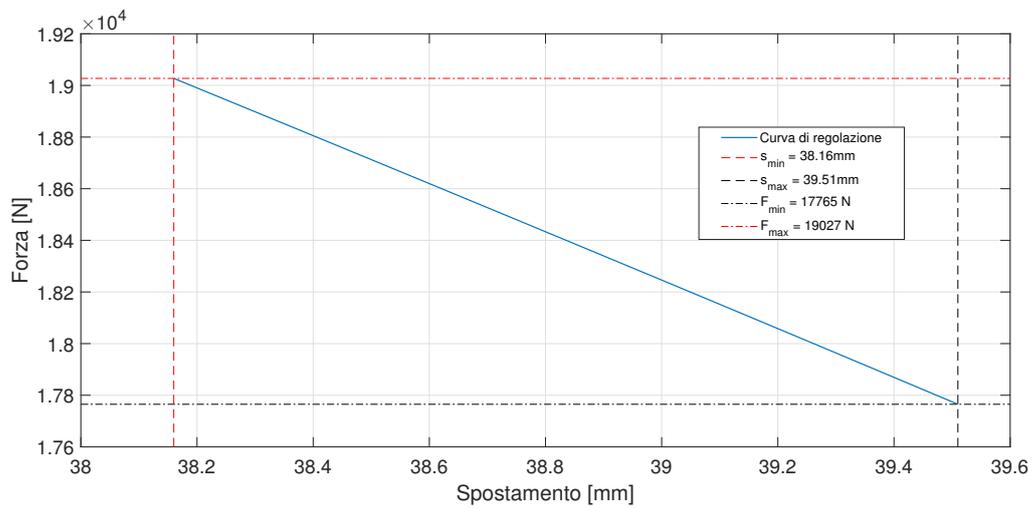


Figura 2.11. Regolazione molla

2.5 Verifica statica

Si è in presenza di sollecitazione statica:

1. quando le molle Belleville sono caricate solo staticamente senza alcuna variazione del carico;
2. quando le molle Belleville subiscono variazioni occasionali di carico, con ampi intervalli di tempo.

L'altezza di coniatura l_0 di una molla Belleville è calcolata in modo tale che in presenza di carico statico o poco variabile, la molla stessa possa essere totalmente appiattita senza che l'altezza di coniatura l_0 si riduca oltre gli scostamenti consentiti. Detto ciò è importante la determinazione della tensione σ_{OM} nel punto OM, come illustrato nell'equazione (2.15) [1].

Quando si supera il limite di snervamento del materiale si passa dalla zona elastica alla zona plastica, causando una deformazione permanente. Per valutare ciò viene usata una tensione di riferimento equivalente σ_{OM} , il cui valore non dovrà superare, nella condizione di appiattimento, la resistenza a trazione R_m del materiale da lavorare. Per gli acciai per molle secondo DIN 17221 e DIN 17222 vale $R_m = 1600N/mm^2$.

Si elencano di seguito le formule adoperate per lo studio statico.

$$\sigma_{OM} = \frac{-4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{s}{t} \cdot \frac{3}{\pi} \quad (2.15)$$

$$\sigma_I = \frac{-4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{s}{t} \cdot \left[K_4 \cdot K_2 \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t} \right) + K_3 \right] \quad (2.16)$$

$$\sigma_{II} = \frac{-4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{s}{t} \cdot \left[K_4 \cdot K_2 \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t} \right) - K_3 \right] \quad (2.17)$$

$$\sigma_{III} = \frac{-4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{s}{t} \cdot \frac{1}{\delta} \left[K_4 \cdot (K_2 - 2K_3) \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t} \right) - K_3 \right] \quad (2.18)$$

$$\sigma_{IV} = \frac{-4E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{t^2}{K_1 D_e^2} \cdot K_4 \cdot \frac{s}{t} \cdot \frac{1}{\delta} \left[K_4 \cdot (K_2 - 2K_3) \cdot \left(\frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t} \right) + K_3 \right] \quad (2.19)$$

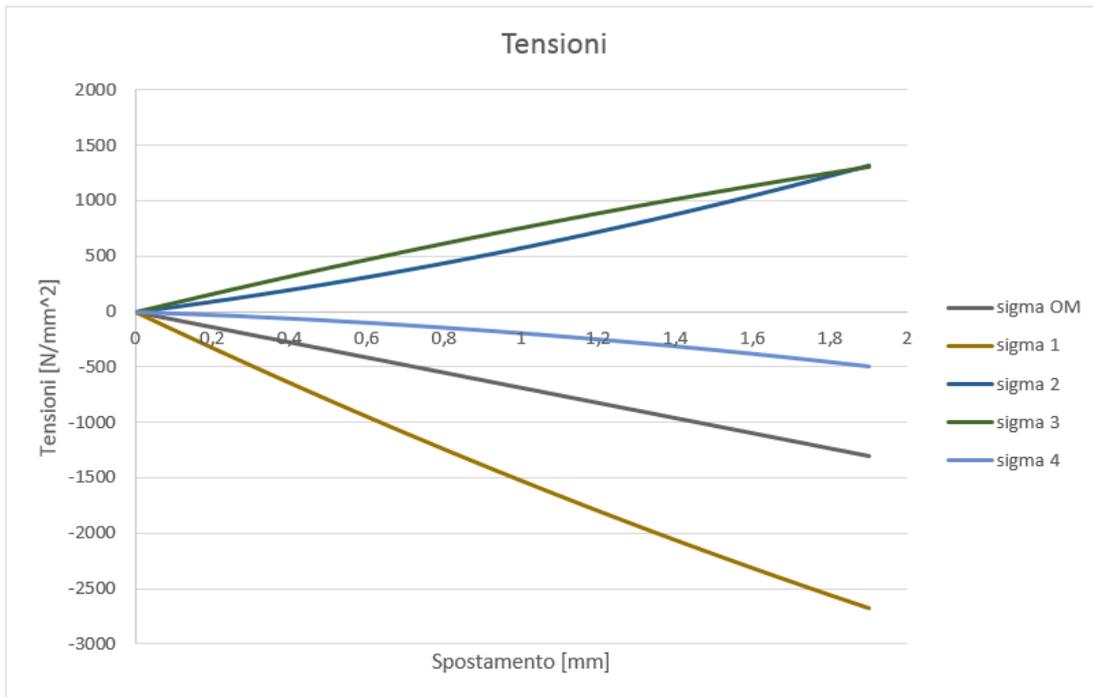


Figura 2.12. Tensioni $\sigma_{OM}, \sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}, \sigma_{IV}$ in funzione dello spostamento s

I risultati delle tensioni $\sigma_{OM}, \sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}, \sigma_{IV}$ sono riportati nella tabella B.1 in appendice.

Dai calcoli e dai grafici sopra esposti si può notare che le sigma da tenere sotto controllo sono la σ_2 e σ_3 , ovvero quelle sigma con segno positivo, che, cioè, fanno riferimento a carichi a trazione. Queste tensioni vengono applicate nei punti più sollecitati, dove si potrebbe verificare la rottura del componente.

Tabella 2.5. Sollecitazione di trazione per uno spostamento di 1,9mm

S[mm]	F[N]	σ_{II}	σ_{III}
1,9	20176,61	1317,14	1300,63

In riferimento alla tabella sottostante 2.6, in cui sono riportati i valori di tensione di rottura e snervamento del materiale trattato con T.T. RH950 e con T.T. TH950, è possibile prevedere, applicando la forza $\cong 20000N^1$ relativa allo spostamento di 1,9mm se la molla trattata sia in grado di resistere a tale sollecitazione.

Tabella 2.6. Tensione di snervamento e rottura del materiale trattato termicamente

Materiale	T.T.	Rm	$R_{P0,2\%}[MPa]$	Allung. (%)	Strizione (%)
17-7 ph	TH950	1379	1276	12	34
	RH950	1620	1517	10	30

Confrontando i dati ottenuti dai calcoli e riportati nelle tabelle precedentemente viste possiamo concludere dicendo che trattando il materiale con T.T. TH950 avremo:

$$R_{P0,2\%} < \sigma_{III} < \sigma_{II} < R_m$$

questo significa che il materiale è passato dalla zona elastica alla zona plastica con la possibilità di deformazione del materiale in modo permanente. Questo non significa che il trattamento termico TH950 sia da scartare, ma che può essere utilizzato in applicazioni meno sollecitate di quella in esame.

Per quando riguarda il Trattamento Termico RH950 notiamo, confrontando la tabella B.1 con la tabella 2.6, che le σ_2 e le σ_3 risultano inferiori alle tensioni di snervamento e di rottura del materiale. Questo permette di prevedere, in fase di sperimentazione, un esito positivo per la molla trattata con RH950, mentre è molto probabile un esito negativo di superamento per la prova statica della molla con trattamento termico TH950 nel caso in cui lavorasse con uno spostamento verticale maggiore di 1,8mm.

¹anche se la forza massima di regolazione è $\approx 19000N$, ai fini dell'analisi statica, si è preferito aggiungere un coefficiente di sicurezza pari a 1,1

2.6 Verifica a fatica

2.6.1 Generalità

In questo capitolo è stato trattato lo studio dell'analisi di fatica per le molle con trattamento termico RH950 e per quelle con trattamento termico TH950.

In particolar modo è stata posta una maggiore attenzione sul trattamento termico TH950, in seguito all'esito negativo della prova statica.

In sostanza si cerca di progettare una molla che possa resistere a un numero di cicli elevato, o addirittura illimitato. Proprio in questo studio, grazie all'ausilio dei diagrammi di fatica, è stato valutato il numero di cicli a cui la molla può resistere prima di giungere a rottura.

2.6.2 Fatica delle molle

Le molle per loro naturale applicazione sono soggette a deformazione alternata fra due valori di forza che sono F_{min} ed F_{max} e tra una corsa di precarico s_1 e una corsa s_2 con $s_2 > s_1$.

Oltre alla sua applicazione di tipo statico, essa viene utilizzata in applicazioni di tipo dinamico, dove sono presenti carichi oscillanti sinusoidali. Di regola, il dimensionamento della molla dovrebbe garantire un numero di cicli elevato, di oltre 2 milioni. E' importante, per l'ottenimento di tale risultato, il rispetto della forza minima di precarico. Le molle Belleville soggette a sollecitazione dovuta alle oscillazioni possono essere suddivise in due gruppi in base alla loro lunga o limitata durata[11]:

- **le molle a tazza di lunga durata** devono sopportare senza rottura almeno $2 \cdot 10^6$ o più alternanze;
- **le molle a tazza di breve durata** devono raggiungere, nel campo della resistenza a durata $10^4 < N < 2 \cdot 10^6$, ovvero, un numero limitato di cicli di carico prima della rottura.

In caso di sollecitazioni dinamiche, si determinano tensioni di trazione calcolate sulla superficie inferiore della molla, poiché è da lì che si nucleano cricche che portano alla rottura. In funzione dei rapporti dimensionali $\delta = De/Di$ e h_0/t e del carico

relativo s/h_0 , la tensione freccia σ_h ¹ massima può verificarsi sia nel punto II che nel punto III. Dalla Figura 2.13 è possibile rilevare se per le molle con e senza piano d'appoggio è determinante il punto II o III.

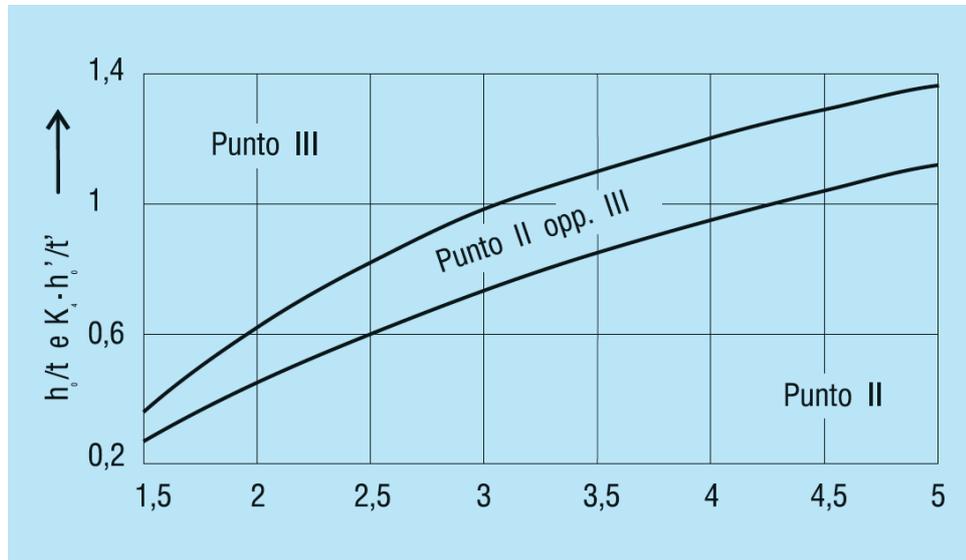


Figura 2.13. punti della sezione con possibile rottura a fatica [1]

Dalla figura soprastante possiamo osservare che il punto più sollecitato nel nostro studio di tesi è il "PuntoII", infatti nelle ordinate si avrà un valore di ≈ 0.5 mentre nelle ascisse il δ (equazione (2.5)) ha un valore di ≈ 2.222 . Dopo la bonifica, le molle Belleville vengono compresse, il che comporta una deformazione plastica nel punto I della sezione. In questa zona si verificano sollecitazioni di trazione interne sulla molla non caricata. Con l'applicazione del carico si verifica un'alternanza tra sollecitazione di trazione e di compressione che, in presenza di sollecitazione dinamica oscillante, quindi in presenza di un carico applicato in modo continuo a una determinata frequenza, può provocare incrinature. Per evitare quanto detto, le sollecitazioni di trazione interne devono essere compensate per mezzo di un precarico adeguato che dovrà essere almeno di uno spostamento s dal 15% fino al 20% dell'altezza di coniatura.

¹Tensione freccia riferita alla corsa di lavoro nelle molle a tazza con sollecitazione dovuta ad oscillazioni

2.6.3 Costruzione del grafico di fatica

Il diagramma che verrà utilizzato è quello di Goodman-Smith. Questo tipo di diagramma consente di ottenere per una qualsiasi tensione σ_m (2.20), i corrispettivi valori della tensione limite per i differenti tipi di sollecitazione. Per la sua realizzazione si fa uso di una serie di provini del materiale studiato sottoposte a cicli di compressione-trazione (sforzo assiale) di diversa tensione media, ottenendo un diagramma di fatica (in questo caso quello di Goodman-Smith) illustrato nella Figura 2.14.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (2.20)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.21)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = 2\sigma_a \quad (2.22)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (2.23)$$

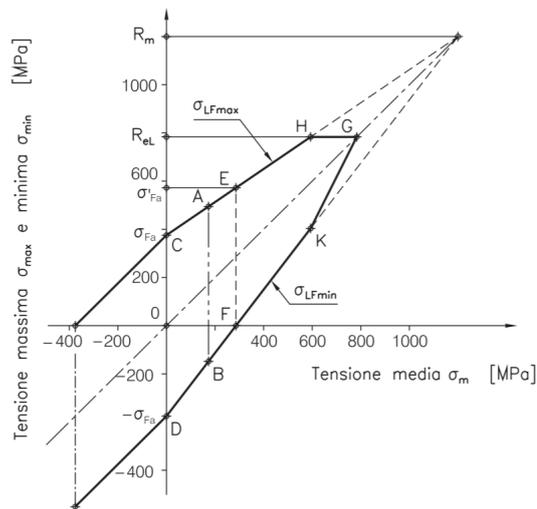


Figura 2.14. Diagramma di Goodman-Smith di un acciaio, riferito a cicli di trazione-compressione con differente tensione media[10]

Sull'asse delle ascisse, si riportano le σ_m ², mentre sull'asse delle ordinate si riportano: R_m ³, R_{eL} ⁴, σ'_{Fa} ⁵, σ_{Fa} ⁶.

Unendo i punti D, F, K, G, si ottiene la retta σ_{LFmin} delle tensioni limite minime di fatica, mentre unendo i punti C, E, H, G, si ottiene la retta σ_{LFmax} delle tensioni limite massime di fatica;

Infine, le due linee σ_{LFmax} e σ_{LFmin} sono limitate all'altezza della tensione di snervamento.

Nella Figura 2.14, pertanto, si può osservare che:

- AB è il ciclo alterno asimmetrico;
- CD è il ciclo alterno simmetrico;
- EF è il ciclo pulsante dallo zero;
- HG è la retta della deformazione plastica, a cui corrisponde il raggiungimento della tensione di snervamento R_{eL} .

Per un qualunque valore della tensione media, possiamo leggere grazie al diagramma di Goodman-Smith i corrispondenti valori delle tensioni limite di fatica, riferiti ai diversi modi di sollecitazione. Il diagramma dell'acciaio è simmetrico, questo perchè presenta simili carichi di rottura a compressione e a trazione e simile resistenza a compressione e a trazione, quindi, i diagrammi di Goodman-Smith per i cicli di fatica a flessione e a torsione hanno forma simile a quelli di trazione-compressione (Figura 2.15)[10].

²valori delle tensioni medie

³valori del carico di rottura statico

⁴valori del carico di snervamento

⁵valori di carico del limite di resistenza a fatica pulsante dallo zero

⁶valori di carico del limite di resistenza a fatica alternata

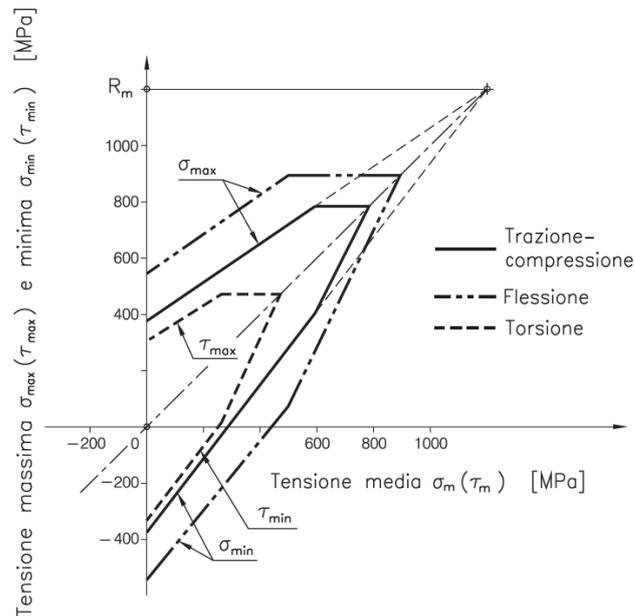


Figura 2.15. Diagrammi di Goodman-Smith per flessione, trazione-compressione e torsione.[10]

Le tensioni calcolate per il campo di lavoro delle molle vengono confrontate con gli schemi di resistenza a fatica e durata come si può vedere nella Figura 2.16. La fabbricazione delle molle a tazza richiede processi di lavorazione molto diversi che vanno dalla semplice tranciatura, alla lavorazione con asportazione di truciolo, fino alla lavorazione di pezzi grezzi, che acquisiranno la loro forma finale mediante tornitura o rettifica.

In base alle diverse lavorazioni attuabili per la realizzazione della molla e in conformità alla norma DIN 2093 si distinguono 3 gruppi di lavorazioni a cui è associato uno specifico diagramma di resistenza a fatica:

- Gruppo 1: $t < 1,25\text{mm}$
- Gruppo 2: $1,25\text{mm} < t < 6\text{mm}$
- Gruppo 3: $6\text{mm} < t < 14\text{mm}$.

Il gruppo su cui si porrà attenzione sarà il secondo dove lo spessore della molla non supera i 6 mm. Questi diagrammi di resistenza a fatica e durata sono stati determinati in base a prove di laboratorio su macchine di prova con carico sinusoidale

uniforme, e mediante analisi statistica, si è ipotizzata una probabilità di sopravvivenza del 99%. Ciò significa che su un numero di molle pari a 100, solo una può presentare guasti precoci a causa di rottura da fatica.

I diagrammi ottenuti valgono sia per le singole molle che per le pile di molle, fino a un massimo di dieci sovrapposte in senso inverso, funzionanti a temperatura ambiente, con guida interna o esterna sottoposta a indurimento superficiale e perfettamente lavorata.

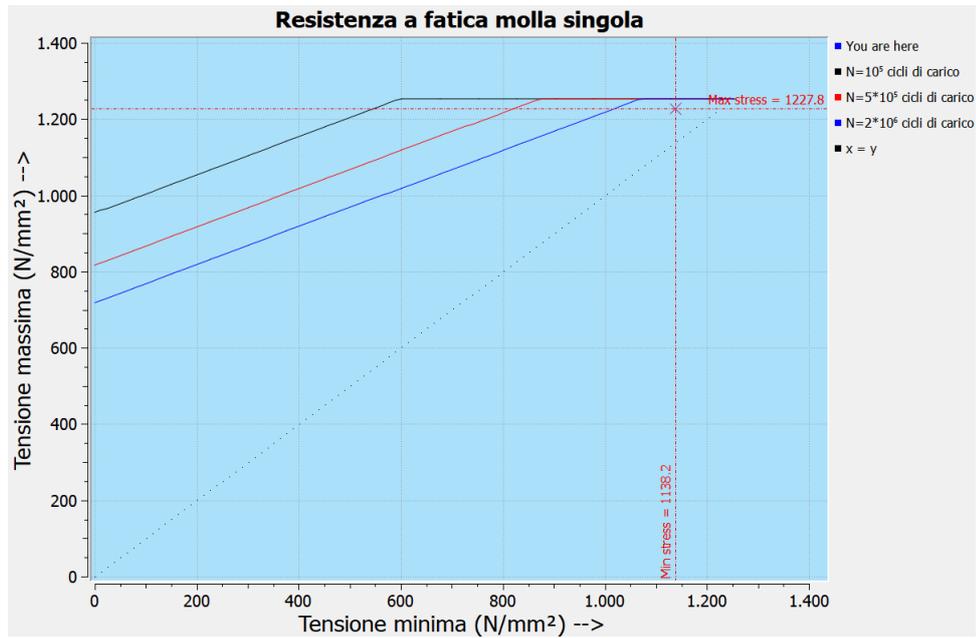


Figura 2.16. diagramma di resistenza a fatica e durata 17-7PH[9]

Resistenza a fatica				
Precarico:	17800.00	N,	4004.34	lbs
Precorsa:	1.63	mm,	0.064	in
Carico finale:	19110.00	N,	4299.04	lbs
Corsa finale:	1.79	mm,	0.070	in
σ Inferiore:	1138.2	N/mm ² ,		
σ Superiore:	1227.8	N/mm ² ,		

Figura 2.17. diagramma di resistenza a fatica e durata 17-7PH[9]

Grazie al grafico ottenuto da prove sperimentali effettuate su molle a tazza costruite con il materiale 17-7PH, si è potuto valutare, inserendo all'interno del grafico di fatica e durata i valori di tensione massimo e minimo, il numero di cicli ad un determinato carico applicato. Come esposto nel paragrafo precedente la molla regola in un range di forza che va da 17800N a 19110N che corrispondono rispettivamente a una corsa massima della molla di 1.79mm e a una corsa minima di 1.63mm. Da ciò è stato ricavato il numero di cicli che può effettuare la molla in quelle determinate condizioni di carico. Occorre stabilire se effettivamente la molla in questione resista a tale sollecitazione dinamica. Osservando la Figura 2.16 notiamo che il punto di incrocio tra la σ_{max} e la σ_{min} ricade nella zona con numero di cicli pari a $2 \cdot 10^6$, questo significa che per la sua specifica applicabilità non dovremmo avere particolari problemi di rottura a fatica.

2.7 Propagazione della cricca su dischi intagliati

2.7.1 Generalità

Nel caso di componente in cui non sono presenti difetti di alcun genere, per lo studio di fatica vengono utilizzati i diagrammi di Wöhler e di Smith in cui viene limitato il valore delle tensioni al di sotto di un determinato valore. Questo procedimento non è applicabile nel caso in cui sia presente un difetto. In merito a ciò possono essere utili le procedure correlate alle metodologie della Meccanica della Frattura. Queste permettono di studiare l'evoluzione del difetto nella sua fase subcritica (cioè dalla fase di innesco alla fase di rottura), fase che peraltro rappresenta una percentuale significativa del periodo di vita utile del componente. Nella curva di Wöhler questo comportamento è descritto in funzione di $\sigma - N$ e viene normalmente attribuito al caso di tensione simmetrica alterna ($R = -1$). Applicando un ciclo di tensione dall'origine ($R=0$) è possibile ricavare i dati della propagazione dei difetti arrivando alla conclusione che, durante la fase di compressione, il difetto tende a richiudersi in se stesso non permettendo la propagazione e quindi rendendo inesistente il fattore di intensificazione delle tensioni K . Sperimentalmente si è dimostrato che la tensione di compressione ha un'influenza bassa sulla propagazione del difetto nel caso in cui il carico sia ad ampiezza costante, mentre, nel caso in cui il carico abbia un'ampiezza variabile, l'influenza della compressione non può essere trascurata.[12] Quello che si è fatto in sede sperimentale è stato di valutare la velocità di propagazione del difetto sottoponendo la molla a un carico ciclico dall'origine di ampiezza costante.



Figura 2.18. Molla con intaglio trattata termicamente RH950

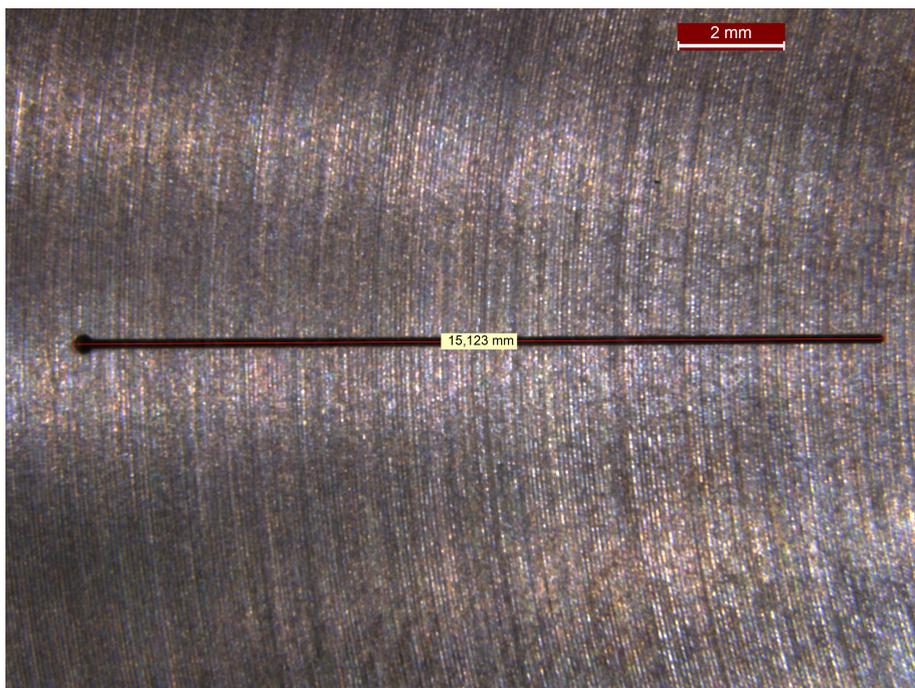


Figura 2.19. dettaglio dell'intaglio

2.7.2 Previsione analitica della propagazione del difetto

Nei calcoli a seguire si è analizzata la propagazione del difetto in funzione di un carico ad ampiezza costante, facendo successivamente opportune valutazioni sui risultati ottenuti.

Principalmente sono stati analizzati due casi, in ognuno dei quali si sono utilizzati come dati in ingresso gli estremi di forza con cui la molla regola:

- scostamento verticale = $1.6mm \div 1.79mm$;
- range di forza = $17765N \div 19027N$.

Applicando la legge di Paris (2.24) che integrata¹ dà (2.25) e scegliendo l'esponente $n = 3$ si può, in funzione dei dati sperimentali ottenuti tramite le prove in laboratorio, ottenere il coefficiente C.

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (2.24)$$

$$N = \frac{a_c^{1-\frac{n}{2}} - a_0^{1-\frac{n}{2}}}{1 - \frac{n}{2} \cdot C \cdot Y^n \cdot \Delta \sigma^n} \quad (2.25)$$

L'equazioni sopra riportate sono valide se $\Delta K > \Delta K_0$ ² e $K_{I_{max}}$ ³ $< K_{Ic}$.

Si elencano di seguito i dati in ingresso utilizzati per fare i calcoli della prima e seconda analisi:

- $a_0 = 0,01 \div 1mm$
- $W = 22mm$
- $B = 6mm$
- $\sigma_{min} = 30MPa$
- $K_{Ic} = 72MPa\sqrt{m}$

¹Per la sua integrazione si considera carico ad ampiezza costante e si suppone Y costante

² ΔK_0 è il valore di soglia, al di sotto del quale il difetto non si propaga

³ $K_{I_{max}}$ deve avere un valore inferiore al K_{Ic} per evitare la propagazione instabile del difetto

- $C \cdot Y^n = 6,06 \cdot 10^{-10}$
- $n = 3$
- $E = 195GPa$
- $R_{P02} = 1517MPa$

Formule

$$b_{min} = \left(\frac{K_{Ic}}{R_{P02}} \right)^2 \quad (2.26)$$

$$b_{min} = \left(\frac{72}{1517} \right)^2 = 2,25mm < B = 6mm \quad (2.27)$$

Per il calcolo della durata a rottura è necessario determinare la lunghezza finale a_f del difetto in corrispondenza della quale si ha il collasso o per snervamento o per frattura fragile. Tale parametro rappresenta, quindi, il valore minimo tra a_p e a_c , essendo a_p la lunghezza del difetto per la quale la tensione in corrispondenza della sezione netta raggiunge il valore della tensione di snervamento, e a_c la lunghezza del difetto per la quale il fattore di intensificazione delle tensioni K_I raggiunge il valore critico K_{Ic} .

Il valore di a_p si ricava da:

$$a_p = \frac{1}{2} \cdot \left(W - \frac{P_{max}}{\sigma_s \cdot B} \right) \quad (2.28)$$

Dove P_{max} si ottiene applicando la formula (2.29):

$$P_{max} = \sigma_s \cdot B (W - 2a) \quad (2.29)$$

La lunghezza critica del difetto per cedimento a frattura fragile, per la tipologia di difetto ipotizzata, si ricava dalla :

$$K_{Ic} = Y \cdot \sigma_{max} \cdot \sqrt{a_c} \quad (2.30)$$

Supponendo trascurabile la variazione del coefficiente Y in funzione di a , e assumendo un valore uguale a quello in corrispondenza di a_o , si ha:

$$Y = \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \cdot a}{W}\right)} \quad (2.31)$$

L'equazione (2.31) poiché $\frac{a}{W} < 1$ si semplifica in $Y = \sqrt{\pi}$ quindi avremo:

$$Y = \sqrt{\pi} = 1,77 \quad (2.32)$$

Sapendo che $C \cdot Y^n = 6,09 \cdot 10^{-10}$ e che $n = 3$ mentre $Y=1,77$ possiamo ricavare che $C = 1,1 \cdot 10^{-10}$.

Dall'equazione (2.30) possiamo ricavare, tramite formula inversa, il valore di a_c :

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{Y_0 \cdot \Delta\sigma}\right)^2 \quad (2.33)$$

$$N = \frac{a_c^{1-\frac{n}{2}} - a_0^{1-\frac{n}{2}}}{1 - \frac{n}{2} \cdot C \cdot Y_0^n \cdot \Delta\sigma^n}$$

Prima analisi

Nella prima analisi è stato ipotizzato un difetto iniziale a_0 di 0,01 mm con un carico ad ampiezza costante, con un sigma massimo, corrispondente alla forza minima con cui regola la molla, di 1137,75 Mpa (17765N) e una sigma minima, dovuta alla forza di precarico, 30 MPa (500N).

Si elencano di seguito i dati in ingresso utilizzati per fare i calcoli della prima analisi:

- $a_0 = 0,01 \div 1mm$
- $W = 22mm$
- $B = 6mm$
- $\sigma_{min} = 30MPa$
- $\sigma_{max} = 1137,75MPa$
- $K_{Ic} = 72MPa\sqrt{m}$
- $C \cdot Y^n = 6,06 \cdot 10^{-10}$
- $n = 3$
- $E = 195GPa$
- $R_{P02} = 1517MPa$

$$a_c = \left(\frac{72}{1,77 \cdot 1107,75} \right)^2 = 1,35mm$$

$$N = \frac{a_c^{1-\frac{n}{2}} - a_0^{1-\frac{n}{2}}}{1 - \frac{n}{2} \cdot C \cdot Y_0^n \cdot \Delta\sigma^n}$$

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dai calcoli:

Tabella 2.7: cicli in funzione di a_0

corsa [mm]	a_0 [mm]	N[cicli]
1,6	0,01	697
1,6	0,02	474
1,6	0,03	375
1,6	0,04	316
1,6	0,05	275
1,6	0,06	246
1,6	0,07	223
1,6	0,08	204
1,6	0,09	189
1,6	0,1	176
1,6	0,2	105
1,6	0,3	74
1,6	0,4	55
1,6	0,5	42
1,6	0,6	33
1,6	0,7	25
1,6	0,8	20
1,6	0,9	15
1,6	1	11

Seconda analisi

Nella seconda analisi si ipotizza un difetto iniziale a_0 di 0,01 mm con un carico ad ampiezza costante, con un sigma massimo, corrispondente alla forza massima con cui regola la molla, di 1223,60 Mpa (19027N) e una sigma minima, dovuta alla forza di precarico, di 30 MPa (500N).

Si elencano di seguito i dati in ingresso utilizzati per fare i calcoli della prima analisi:

- $a_0 = 0,01 \div 1mm$
- $W = 22mm$
- $B = 6mm$
- $\sigma_{min} = 30MPa$
- $\sigma_{max} = 1223,60MPa$
- $K_{Ic} = 72MPa\sqrt{m}$
- $C \cdot Y^n = 6,06 \cdot 10^{-10}$
- $n = 3$
- $E = 195GPa$
- $R_{P02} = 1517MPa$

$$a_c = \left(\frac{72}{1,77 \cdot 1107,75} \right)^2 = 1,16mm$$

$$N = \frac{a_c^{1-\frac{n}{2}} - a_0^{1-\frac{n}{2}}}{1 - \frac{n}{2} \cdot C \cdot Y_0^n \cdot \Delta\sigma^n}$$

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dai calcoli:

Tabella 2.8: cicli in funzione di a_0

corsa [mm]	a_0 [mm]	N[cicli]
1,79	0,01	530
1,79	0,02	359
1,79	0,03	283
1,79	0,04	238
1,79	0,05	207
1,79	0,06	184
1,79	0,07	166
1,79	0,08	152
1,79	0,09	140
1,79	0,1	130
1,79	0,2	76
1,79	0,3	52
1,79	0,4	37
1,79	0,5	28
1,79	0,6	21
1,79	0,7	15
1,79	0,8	10
1,79	0,9	7
1,79	1	3

Dalle analisi precedentemente esposte e con l'aiuto delle tabelle 2.7 e 2.8 si può concludere dicendo che:

- Nella **prima analisi** il massimo numero di cicli per un carico di 17765N con la frequenza di 1Hz è 697, quindi la durata massima prima della rottura della molla è di 697 secondi.
- Nella **seconda analisi** il massimo numero di cicli per un carico di 19027N con la frequenza di 1Hz è 530, quindi la durata massima prima della rottura della molla è di 530 secondi.

Ciò comporterebbe il verificarsi, laddove non fosse stata notata una cricca in fase di montaggio, di un'anomalia al sistema che fermerebbe l'avanzamento della procedura di lancio alle prove di pre-lancio, evitando il peggio.

2.8 Modello CAD e disegno tecnico

2.8.1 Modello 3D

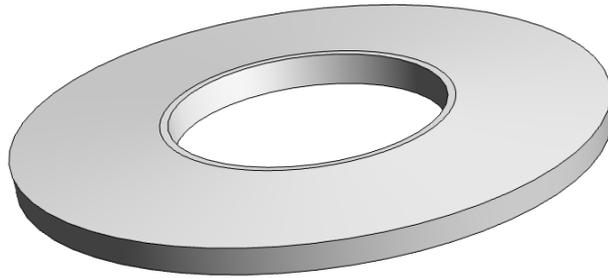


Figura 2.20. Modello 3D



Figura 2.21. Modello 3D sezione

2.8.2 Disegno 2D

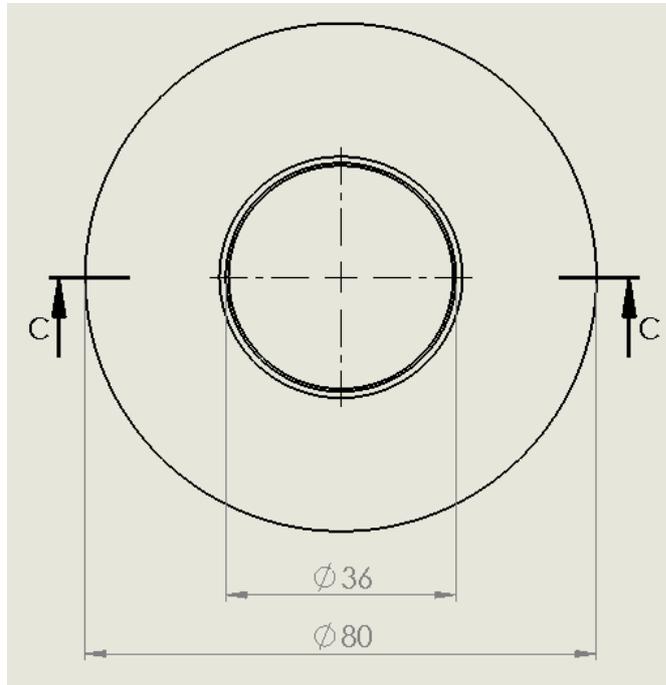


Figura 2.22. Vista frontale

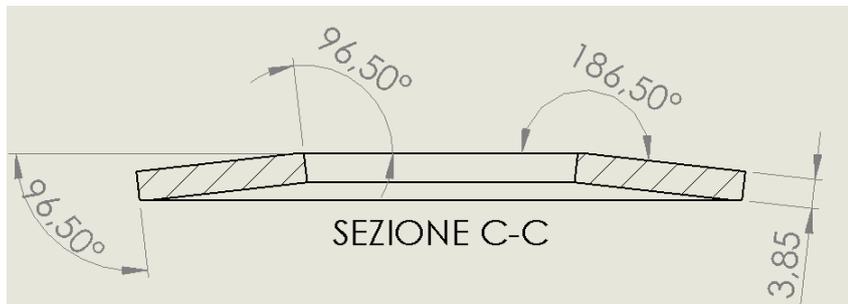


Figura 2.23. Sezione C-C

2.9 Metodo degli elementi finiti

2.9.1 Generalità

Nel seguente paragrafo sono stati confrontati i risultati analitici, ottenuti dai calcoli dei paragrafi precedenti, con i risultati delle analisi ad elementi finiti ottenuti tramite software¹.

Si è effettuato uno studio di tipo statico, dove nella prima analisi è stata caratterizzata la curva forza/spostamento, confrontandola con la curva ottenuta dai calcoli analitici (Tabella A.1), mentre nella seconda analisi è stato studiato il corpo dal punto di vista tensionale, confrontando anche in questo caso i risultati ottenuti con quelli emersi precedentemente dai calcoli analitici (riportati nella Tabella B.1).

Il metodo F.E.M.² non fa altro che discretizzare il corpo attraverso la suddivisione in piccoli triangolini (elementi finiti o comunemente chiamate mesh Figura 2.24) in modo da poter risolvere problemi di calcolo in corpi con geometrie poco regolari. Si discretizzerà il corpo in entrambi gli studi in un numero di nodi pari a 72886.

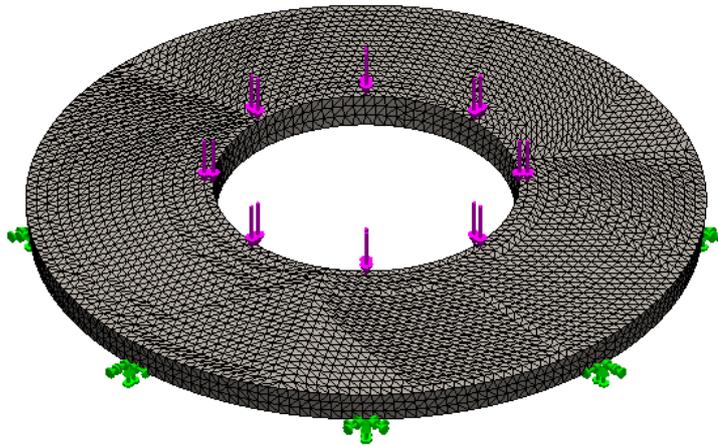


Figura 2.24. Mesh

¹SolidWorks student version

²"Finite Element Method" in italiano "metodo degli elementi finiti"

2.9.2 Caratterizzazione curva Forza/Spostamento

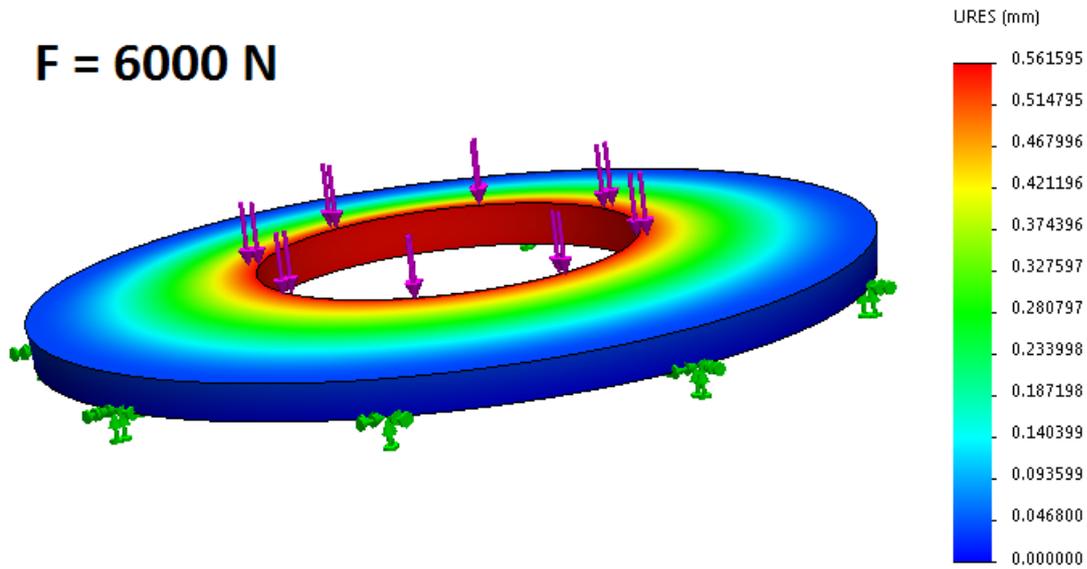


Figura 2.25. Caratterizzazione curva step 1

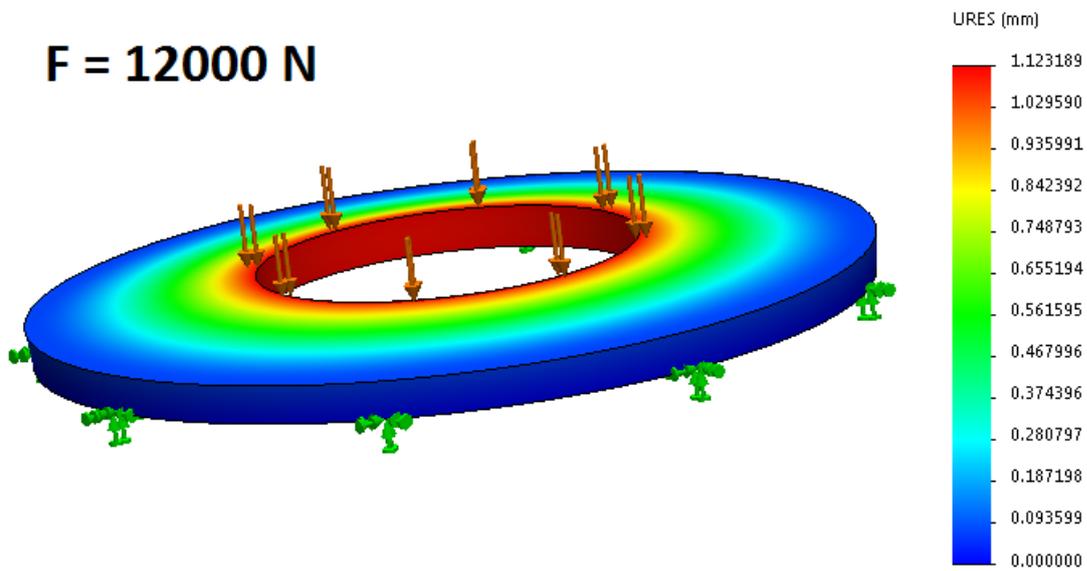


Figura 2.26. Caratterizzazione curva step 2

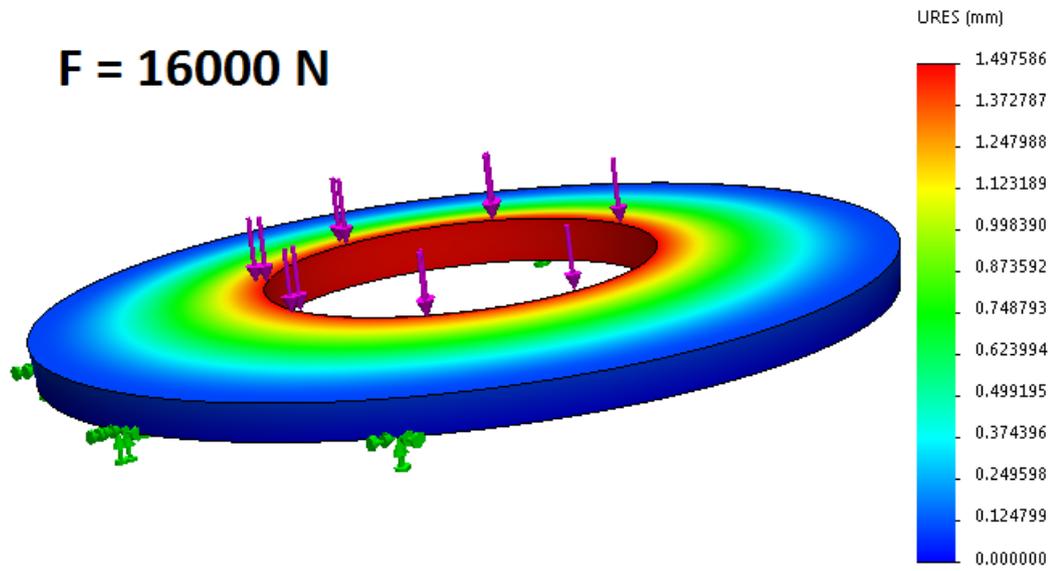


Figura 2.27. Caratterizzazione curva step 3

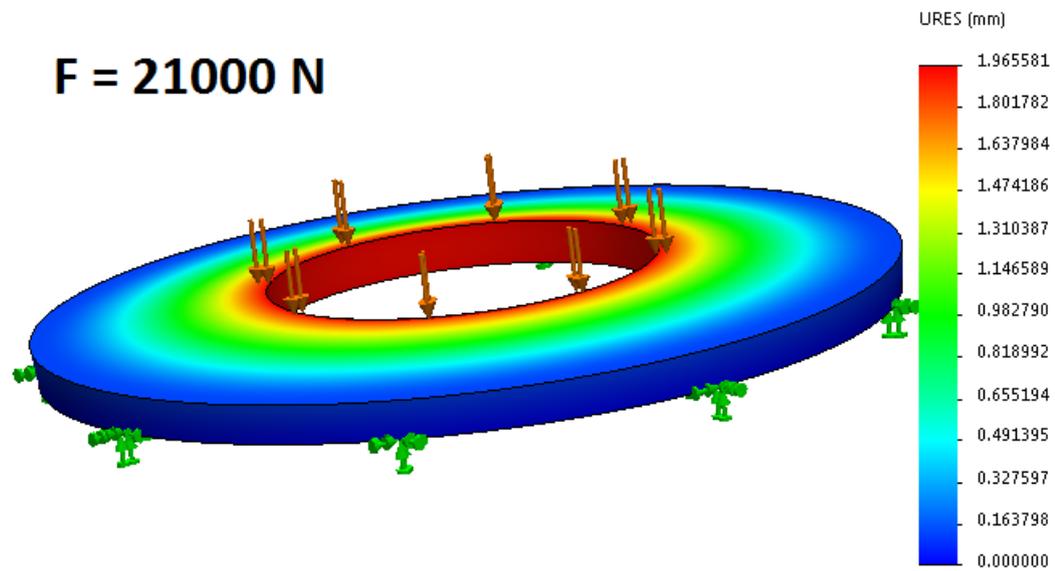


Figura 2.28. Caratterizzazione curva step 4

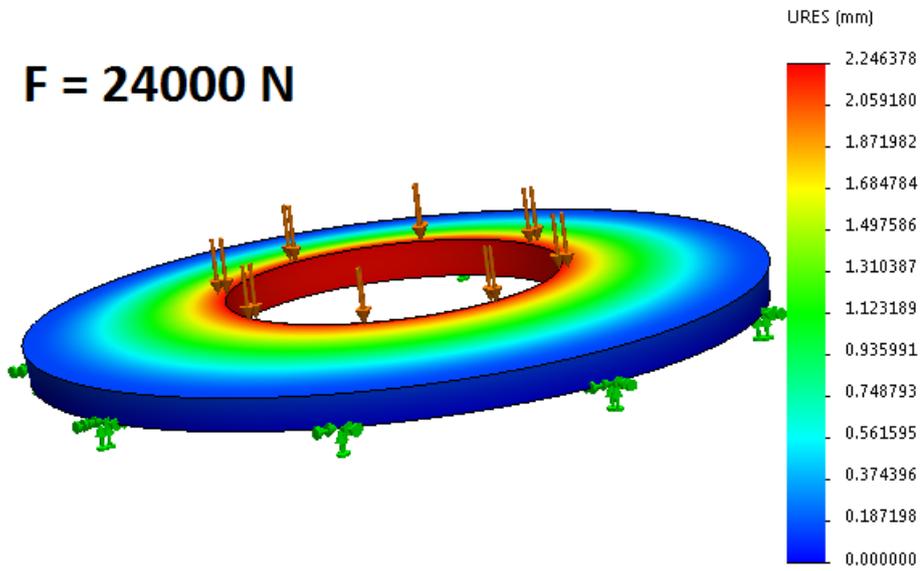


Figura 2.29. Caratterizzazione curva step 5

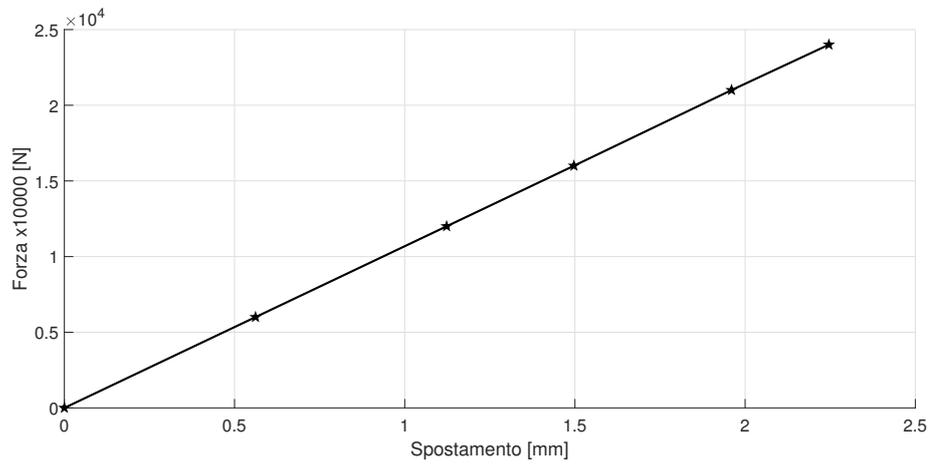


Figura 2.30. Caratterizzazione curva forza/spostamento tramite analisi FEM

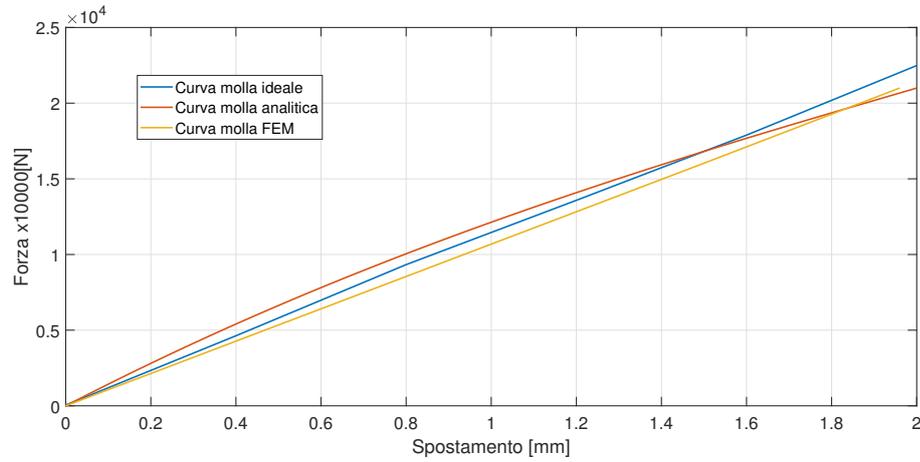


Figura 2.31. Confronto curva forza/spostamento tra molla ideale, analitica e FEM

Nella Figura 2.30 è riportata la curva ottenuta tramite analisi F.E.M. con studio statico dello spostamento in funzione della forza applicata.

Dalla Figura 2.31 si osserva che la curva ideale (curva di colore blu) si trova tra la curva della molla ricavata tramite calcoli analitici (curva di colore rosso) e la curva della molla ottenuta tramite analisi F.E.M. (curva di colore giallo).

Valutando i risultati ottenuti si osserva graficamente, che le tre curve non si discostano molto tra di loro, quindi l'analisi statica tramite il metodo degli elementi finiti conferma che i calcoli eseguiti nei precedenti paragrafi sono attendibili.

2.9.3 Analisi statica

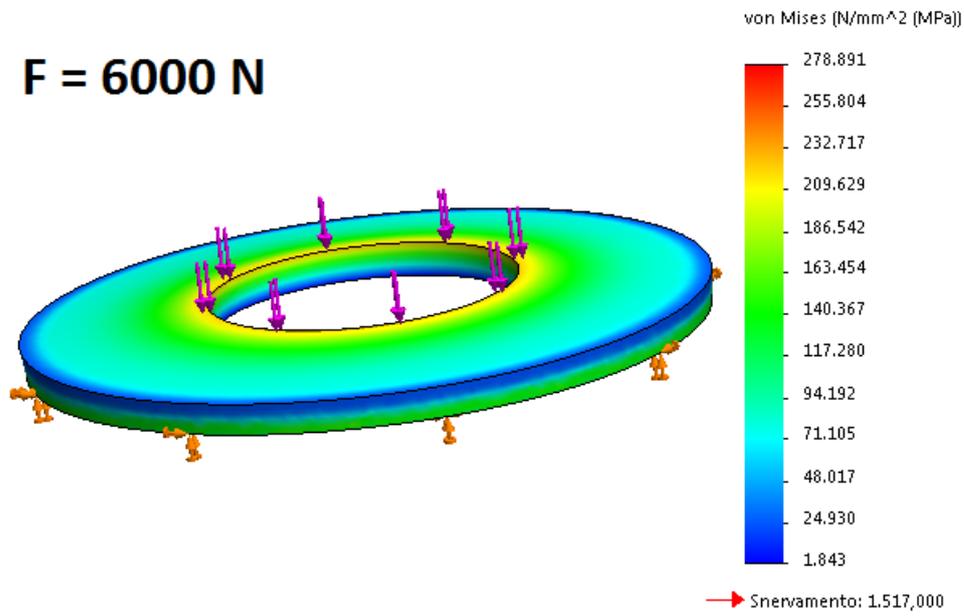


Figura 2.32. Analisi statica con carico di 6000N

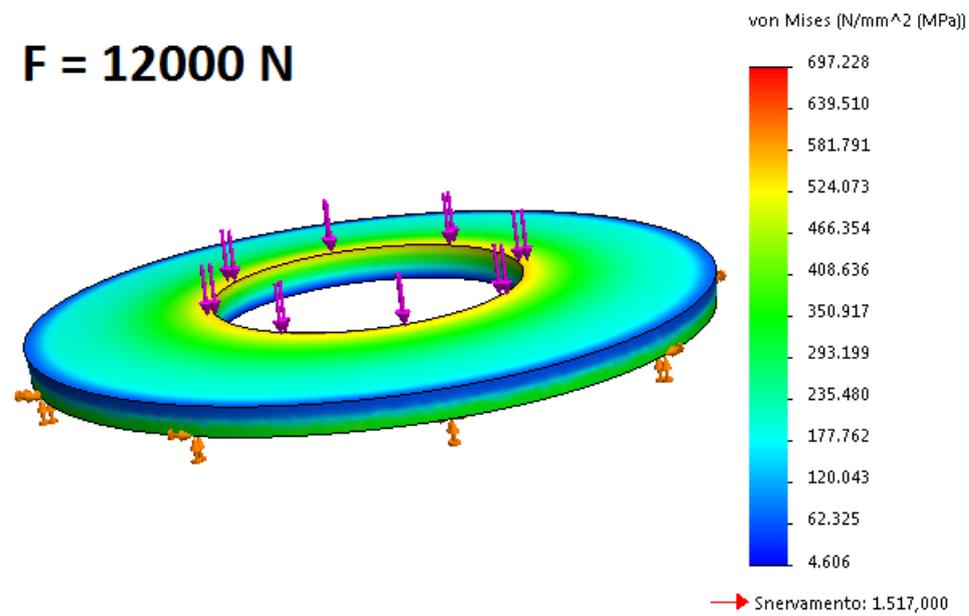


Figura 2.33. Analisi statica con carico di 12000N

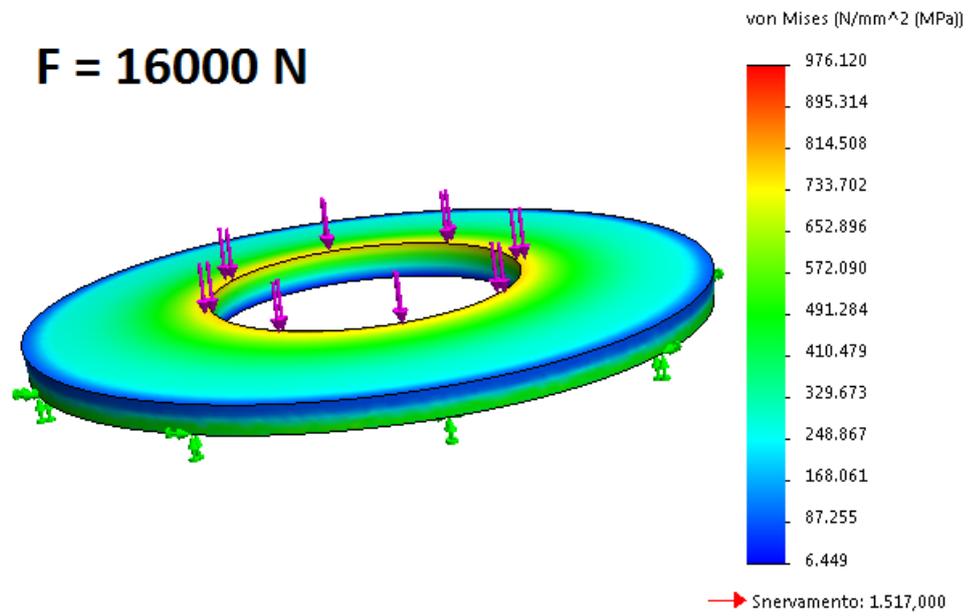


Figura 2.34. Analisi statica con carico di 16000N

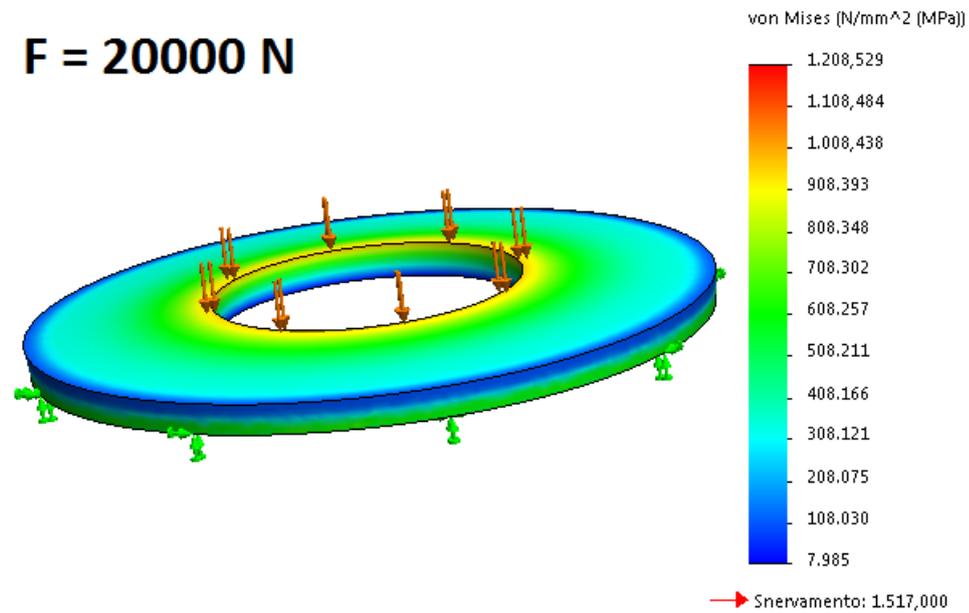


Figura 2.35. Analisi statica con carico di 20000N

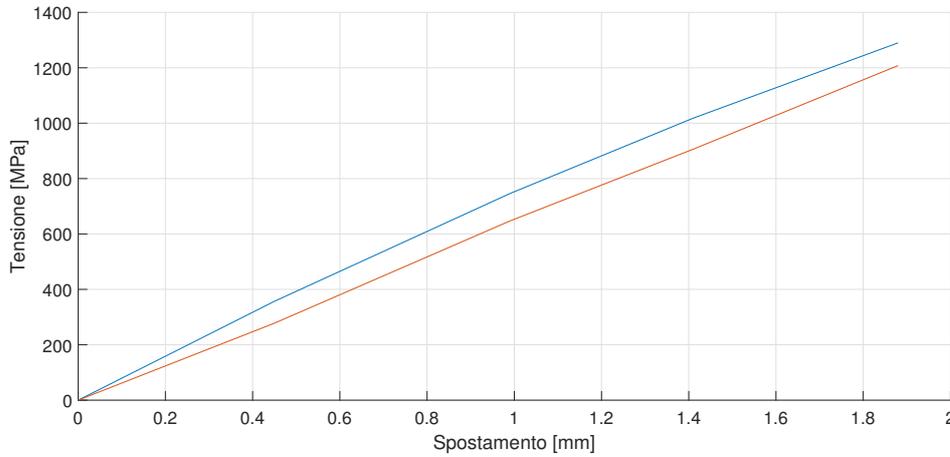


Figura 2.36. Confronto tra la tensione analitica e quella ricavata tramite FEM

Nella Figura 2.36 vengono confrontate due curve. Quella chiamata "curva 1" (di colore blu), è stata elaborata tramite i calcoli riportati nella Tabella B.1 mentre quella indicata con "curva 2", (di colore rosso), è stata elaborata tramite l'analisi statica effettuata con SolidWorks, utilizzando il metodo degli elementi finiti.

Analizzando i risultati ottenuti si possono osservare nella curva 2 dei valori inferiori di tensione, a parità di spostamento, rispetto alla curva 1. Questo comunque non risulta essere un problema dal punto di vista funzionale perchè, in entrambi i casi, la tensione di snervamento del materiale risulta essere maggiore del valore delle tensioni ottenute. Ciò comporta un'ulteriore conferma dell'affidabilità strutturale della molla in esame.

Capitolo 3

Industrializzazione

3.1 Generalità

In funzione delle dimensioni con cui devono essere fabbricate le molle Belleville si richiedono processi di lavorazione diversi, che vanno dalla semplice tranciatura, alla lavorazione ad asportazione di truciolo fino ad arrivare alla lavorazione di pezzi grezzi fucinati.

In correlazione alla norma¹ si distinguono 3 gruppi di lavorazioni:

- **Gruppo 1:** spessore molla t inferiore a 1,25 mm
 - **processi di lavorazione:**
 - * stampato
 - * formato a freddo
 - * spigoli arrotondati

- **Gruppo 2:** spessore molla t = da 1,25 a 6 mm
 - **processi di lavorazione:**
 - * stampato,
 - * formato a freddo,
 - * spigoli arrotondati

¹DIN 2093

* D_e e D_i torniti

- **Gruppo 3:** spessore molla t da 6 a 14 mm

– **processi di lavorazione:**

- * tornito su tutte le superfici,
- * formato a freddo,
- * spigoli arrotondati
- * con piani d'appoggio

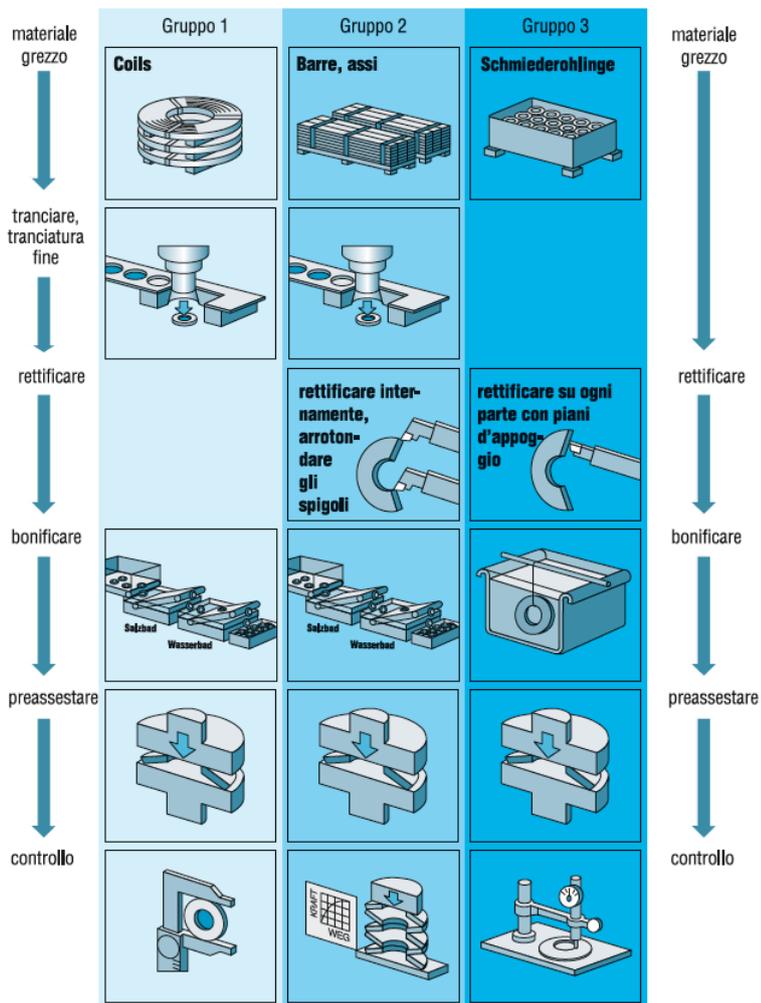


Figura 3.1. tipologia di lavorazione per i 3 gruppi [1]

3.2 Ciclo di Lavorazione

In questo capitolo si elencano nella tabella 3.1 le operazioni previste dal ciclo di lavorazione, mentre, nei capitoli successivi sono state approfondite le operazioni più importanti.

Ciclo di lavoro

Tabella 3.1: Operazioni del ciclo di lavoro

Operazione	Descrizione operazione	Note
0010	Emissione materiale	Materiale 17-7PH
0020	Tornitura	
0030	Trattamento termico	TH950/RH950
0040	Controllo Durezza	Eseguire controllo durezza (42 HRC min)
0050	Controllo Magnetoscopico	Controllo al 100%
0060	Controllo dimensionale	Controllo al 100%
0070	Test di compressione	eseguire 10 compressioni sui dischi applicando 39000N
0080	Controllo dimensionale	Controllo al 100%
0090	Eventuale rilavorazione	
0095	Eventuale ricontrollo	Eventuale ricontrollo al 100% sulla zona rilavorata e controllo rugosità sul profilo conico
0100	Controllo Magnetoscopico	Controllo al 100%
0110	Passivazione	
0120	Applicazione lubrificante solido	
0130	Caratteristica curva forza/spost	Caratterizzare curva forza/spostamento come da calcoli

Table 3.1 continued from previous page

Operazione	Descrizione operazione	Note
0140	Caratteristica a fatica	Caratterizzare a fatica 50 cicli con spostamento di 1,35mm su 2 pacchi da 9 molle
0150	Controllo Finale	

Nella costruzione delle molle in esame, come si può notare dal ciclo di lavorazione sopra esposto, si è effettuata una lavorazione per tornitura, caratteristica del terzo gruppo di lavorazione, sebbene la normativa prescriva per la molla in oggetto, in virtù delle sue proprietà dimensionali, la lavorazione del secondo gruppo.

3.3 Controllo dimensionale

Il controllo dimensionale viene effettuato per misurare le caratteristiche dimensionali di un determinato pezzo di definita geometria, questo al fine di standardizzare e attivare una produzione di massa ad elevata qualità.

Naturalmente, se la costruzione del prodotto avviene con una certa accuratezza, mantenendosi il più possibile nei limiti della qualità produttiva, anche le ispezioni dimensionali risultano essere più semplici e veloci.

In tutte le molle fabbricate si è ritenuto opportuno un controllo dimensionale al 100% dopo la tornitura, e un controllo al 100% dopo i test sperimentali nella pressa. La macchina utilizzata per effettuare un controllo accurato è una Zeiss Accura (vedi Figura 3.2)[19].

Macchine di misura (CMM, Coordinate Measuring Machines)

Le macchine di misura sono apparecchi ad altissima precisione che, servendosi di tastatori o sensori, riescono a costruire in tempi molto brevi la forma geometrica del pezzo, questo anche se il pezzo presenta delle geometrie molto complesse (Figura 3.2). Queste tipi di macchine di misura e tracciatura tridimensionali presentano una struttura a portale aperta, con colonna verticale e braccio orizzontale[19].

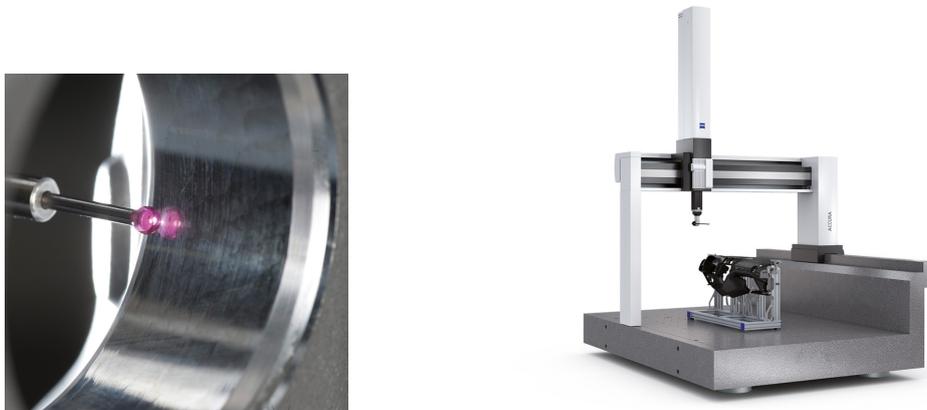


Figura 3.2. A sinistra il tastatori e a destra la macchina di misura a coordinate [20]

3.4 Trattamento termico

Nel caso in cui non è specificato sui disegni, i trattamenti termici devono rispettare le specifiche dei materiali per il settore aeronautico.

Per questo motivo in questa sezione ci si è occupati del lato pratico del trattamento termico, ovvero della sua esecuzione, e si è fatto uso della specifica AMS2759, in particolar modo delle seguenti versioni:

- AMS 2759D [13]
- AMS 2759/1D [14]
- AMS 2759/3D [15]
- AMS 2759/4B [16]
- AMS 2759/9D [17]

Si riporta di seguito il contenuto delle specifiche sopra citate, senza variarne il contenuto.

3.4.1 Preparazione

"Pulizia e posizionamento delle parti deve essere in accordo a quanto specificato nella procedura (interna aziendale) e nelle istruzioni di lavoro. Le parti in acciaio PH con superfici finite devono essere maneggiate con guanti puliti dopo la fase di pulizia. Le parti non devono essere caricate in un forno a temperatura più alta di quella di set point."¹

3.4.2 Atmosfera di trattamento

"Le atmosfere vengono classificate in:

- **Classe A:** Argon, idrogeno, elio, azoto, vuoto o Sali neutri. L'azoto proveniente da ammoniacca dissociata non è ammesso.
- **Classe B:** Endotermica, esotermica o a base di azoto contenente carbonio.

¹AMS2759

- **Classe C:** Aria.

Le parti devono essere trattate in aria o atmosfera protettiva².

Atmosfere protettive accettabili includono argon, elio, idrogeno, sali neutri e vuoto. Al di sopra di 677 °C è permesso trattare in aria (Classe C) solo parti di Tipo 1. L'azoto e le miscele azoto-idrogeno come atmosfere protettive sono permessi al di sotto dei 774 °C, mentre sono ammessi a 774 °C o più solo su parti di Tipo 1. L'azoto e le miscele azoto-idrogeno usate come mezzo di spegnimento nei forni a vuoto sono permessi fino a 1052 °C. L'azoto ottenuto dalla dissociazione dell'ammoniaca è proibito. Evitare i trattamenti e i raffreddamenti in aria su parti che richiedono superfici prive di corrosione o perdite di colore"[15].

3.4.3 Raffreddamento

"Quando è richiesto raffreddamento in aria questo si ottiene estraendo la carica dal forno e lasciandola in aria. Nel caso in cui il raffreddamento avviene in forno con gas di raffreddamento (GFC) la velocità di raffreddamento (cooling rate) deve essere minimo 20 °C/min fino sotto ai 200 °C."¹

3.4.4 Tempo di trattamento per acciai acciai indurenti per precipitazione e Maraging

"Il tempo del trattamento comincia dal momento in cui la termocoppia di controllo del forno raggiunge la temperatura entro 3°C dalla temperatura di set specificata³. In alternativa, se viene usata una termocoppia di carica, il tempo di trattamento comincia quando la temperatura delle parti raggiunge il minimo del range di uniformità. Il trattamento termico deve essere eseguito senza interruzioni.

E' possibile aumentare il tempo di invecchiamento al massimo del 50% di quanto specificato in Tabella 3.2 per compensare il ritardo causato da specifiche caratteristiche della carica (spessore delle parti, peso della carica, schermatura o interferenza dovuta alla configurazione delle parti).

Il tempo di trattamento termina quando una delle termocoppie di processo (o di carica se usate) esce dal range di uniformità di temperatura richiesto (limite inferiore)

²atmosfere Classe A o Classe C

³Per acciai semiaustenitici la temperatura di set è $\pm 14^{\circ}\text{C}$

, oppure quando il forno viene aperto e/o la carica estratta."¹

Tabella 3.2: Tempi di trattamento termico per solubilizzazione e austenitizzazione[15]

Materiale	Forma	Tempo del trattamento [minuti]	
		Solubilizzazione	Condizionamento dell'austenite
17-7PH	Lamiere	3+1 ogni 25mm	10+1 per ogni 0.25mm
	Altro	30 ogni 25mm	30 ogni 25mm

3.4.5 Solubilizzazione, condizionamento dell'austenite e invecchiamento

"Devono essere eseguiti secondo le temperature riportate in Tab.3.3 e i tempi riportati in Tab. 2 raffreddando senza interruzioni secondo il metodo indicato in Tab.3.3. E' permessa una sola risolubilizzazione."¹

Tabella 3.3. Trattamenti degli acciai indurenti per precipitazione e maranging [15]

Materiale	Condizione	solubilizzazione	Raffreddamento	Condizionamento e trasformazione dell'austenite	invecchiamento °C	invecchiam. ore
17-7PH	RH950	1052	In Aria	954°C, raffreddare in aria -68°C per circa 8/9 ore, riscaldare in aria fino a temp. ambiente	510	1
	TH950	1052	In Aria	760°C per 90 minuti, raffreddare fino a 16 gradi entro 60 minuti mantenere a 16 °C per almeno 30 minuti	510	1,5

3.4.6 Distensione

"Quando richiesto, le parti trattate devono essere distese riscaldandole a una temperatura di almeno 56 °C inferiore a quella di invecchiamento per almeno un'ora più un'ora per ogni 25 mm di spessore. Se vengono usate termocoppie di carica, il tempo di trattamento è di minimo un'ora. La distensione è proibita su parti che hanno subito shot peening o rullatura della filettatura dopo invecchiamento."¹

3.4.7 Raddrizzatura

"Quando richiesto, la raddrizzatura deve essere eseguita a temperatura ambiente, oppure durante l'invecchiamento, o riscaldando a non più di 56 °C sotto la temperatura di invecchiamento. La raddrizzatura deve essere seguita da distensione."¹

3.5 Controllo magnetoscopico

Il controllo magnetoscopico sfrutta il ferromagnetismo ovvero la capacità di alcuni metalli di non opporsi al passaggio del campo magnetico, ma di concentrarlo in un determinato luogo ai fini di evidenziare i difetti superficiali. I controlli tramite questa strumentazione possono essere effettuati solo se la permeabilità dei materiali ferromagnetici è maggiore di 100 μr come per esempio: fusioni di ghisa, acciaio e ferro. Questi campi magnetici si formano o attorno a un conduttore percorso da corrente elettrica o all'interno di un magnete permanente.

Nelle zone in cui si verificano microcricche le linee di flusso che attraversano il metallo presenteranno una discontinuità, addensandosi localmente, e creando un'anomalia del campo magnetico vicino al difetto stesso, cosa che non succede nel caso di metallo esente da cricche.[18]



Figura 3.3. Esempio di presenza di cricche rilevabili con controllo magnetoscopico [21]

Il controllo magnetico è basato, quindi, su due fasi:

- "Un brusco cambiamento nella permeabilità che distorce le linee di forza creando un flusso disperso"[18];
- applicazione di particelle magnetiche che, attratte da questi flussi dispersi, fungono da rivelatore, indicando così posizione ed entità del difetto superficiale.

Per le molle oggetto di studio è stato previsto un controllo magnetoscopico prima e dopo la tornitura, prima e dopo il trattamento termico e infine prima e dopo la stabilizzazione. In relazione a ciò le molle che presentavano microcricche sono state immediatamente scartate. Il più delle volte la presenza di microcricche è stata rilevata a seguito del trattamento termico che ha provocato stress termici dovuti a veloci raffreddamenti.

3.6 Stabilizzazione

La molla, dopo essere stata trattata termicamente, viene sottoposta a una compressione, che comporta una deformazione plastica in modo da ridurre l'altezza di coniatura. In occasione delle successive sollecitazioni si creano delle tensioni di carico che vengono contrastate da tensioni interne di trazione formatesi sul lato superiore, che permettono di abbattere i picchi di tensione. Viene così evitata un'ulteriore deformazione plastica nelle successive sollecitazioni delle molle. Ogni molla Belleville, secondo la normativa DIN 2093, deve essere compressa in modo tale che, dopo la sollecitazione con il carico doppio $F_{s=0,75h_0}$, vengano rispettati gli scostamenti limite per carico.

3.7 Applicazione lubrificante solido

Il lubrificante solido applicato nelle molle è la Grafite.

La grafite non è altro che una forma elementare del carbonio, a cui corrisponde una struttura covalente e proprietà fisiche diverse. La struttura è formata da strati di atomi (planari tra loro) di carbonio che formano un reticolo a maglie esagonali. Questi strati di atomi di carbonio, posti in modo parallelo a una certa distanza tra loro, formano il cristallo di grafite. Proprio la distanza del legame, che nella grafite è minore, differenzia quest'ultima dal diamante. Il legame atomico sui piani è forte, mentre il legame tra piani è molto debole, di conseguenza i piani scorrono facilmente gli uni sugli altri conferendo alla grafite untuosità e scivolosità al tatto.[\[22\]](#)

Nel nostro caso il lubrificante solido è richiesto esplicitamente dalla normativa interna aziendale con la funzione di salvaguardare gli accoppiamenti metallo-metallo (molla-molla) con movimento da lento a medio/veloce con l'applicazione di carichi elevati.

Capitolo 4

Sperimentazione

4.1 Generalità

Nei capitoli precedenti è stata esposta un'introduzione della parte progettuale che permette, in funzione dei risultati ottenuti, di comprendere se è possibile procedere all'industrializzazione oppure riprogettare analizzando nuovi risultati. Infine, si è trattata la parte di industrializzazione del prodotto trattando il ciclo di lavorazione e approfondendo le operazioni fondamentali.

In questo capitolo si tratterà principalmente la verifica della corrispondenza tra i risultati derivanti dai calcoli progettuali e quelli ottenuti dai test in laboratorio.

Si elencano di seguito le prove che sono state eseguite in laboratorio:

- caratterizzazione della curva forza/spostamento delle molle trattate termicamente¹ e di quella non trattata;
- caratterizzazione del ciclo di isteresi delle molle trattate termicamente;
- studio della propagazione del difetto per molle intagliate.

¹Tratt. termico TH950 e RH950

4.2 Analisi Forza-Spostamento

La prima prova effettuata in laboratorio ha avuto come scopo la caratterizzazione delle curve forza/spostamento della molla non trattata termicamente e di quelle trattate termicamente (TH950 e RH950) per poi confrontare i risultati ottenuti con la curva della molla ideale¹ come riportato nel grafico della Figura 4.1.

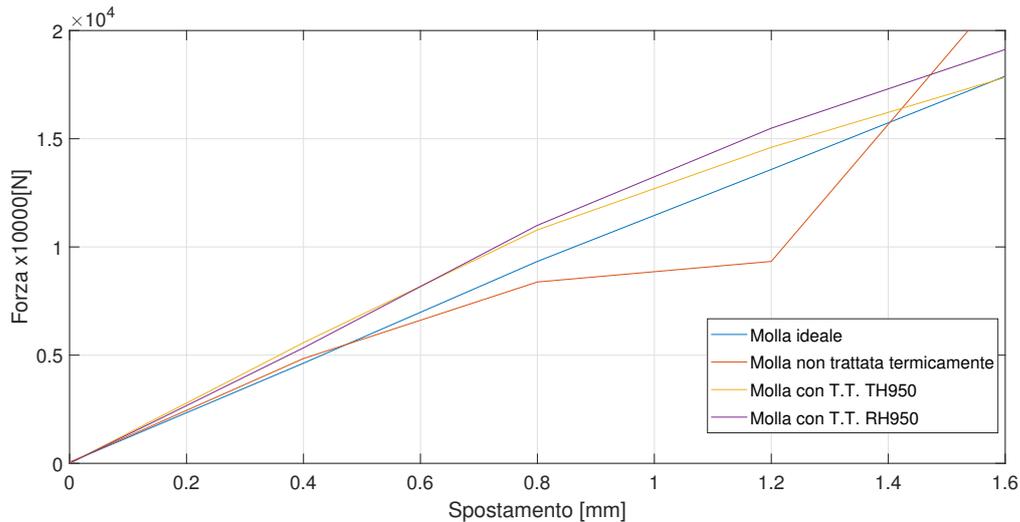


Figura 4.1. forza/spostamento delle varie prove

Analizziamo di seguito i risultati ottenuti e riportati nella Figura 4.1:

- **Molla non trattata termicamente:** si può notare che la curva della molla non trattata (di colore rosso) fino a uno spostamento di 0.6mm segue l'andamento della molla ideale, dopo di che, nel tratto tra 0.6mm e 1.2mm, comincia a distaccarsi dalla curva ideale, ovvero a uguale spostamento la molla non trattata ha bisogno di una forza inferiore. Questo è dovuto principalmente al modulo elastico del materiale che, non essendo stato modificato tramite trattamento termico, non ha cambiato le sue proprietà meccaniche ed elastiche.
- **Molla con trattamento TH950:** la curva inerente alla molla con trattamento termico TH950 (di colore giallo) ha un andamento molto simile alla curva ideale.

¹Curva di riferimento ottenuta tramite i calcoli fatti nel capitolo 2.4.2

L'unica differenza che possiamo osservare è che da 0.2mm a 1.5mm la molla necessita, a uguale spostamento, di una forza superiore di qualche migliaio di Newton alla forza riferita alla curva ideale.

Infine si può notare che le curve relative alla molla con T.T. TH950 e alla molla ideale presentano un punto di intersezione per uno spostamenti di 1,6mm.

- **Molla con trattamento RH950:** la curva inerente la molla con trattamento termico RH950 (di colore viola) ha un andamento simile alla curva con trattamento TH950 fino a uno spostamento di 0.8mm; dopo si discosta quasi parallelamente dalla curva ideale di un $\Delta F \approx 2000N$.

4.2.1 TH950

Primo ciclo

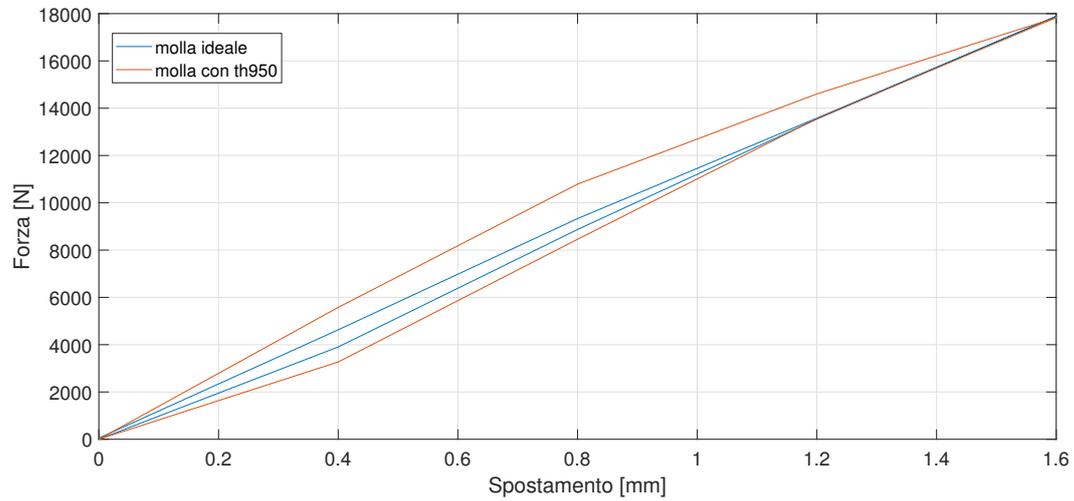


Figura 4.2. forza/spostamento primo ciclo TH950

Secondo ciclo

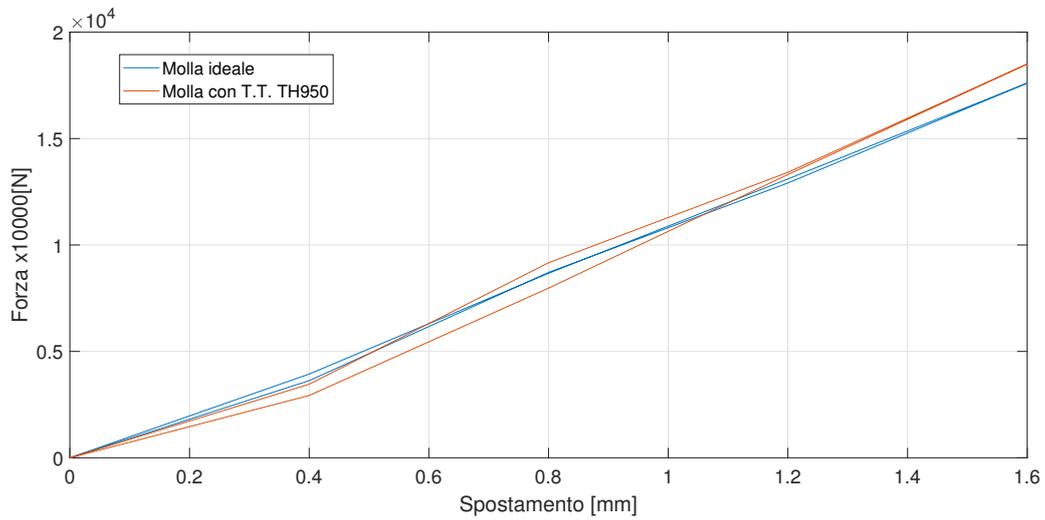


Figura 4.3. forza/spostamento secondo ciclo TH950

4.2.2 RH950

Primo ciclo

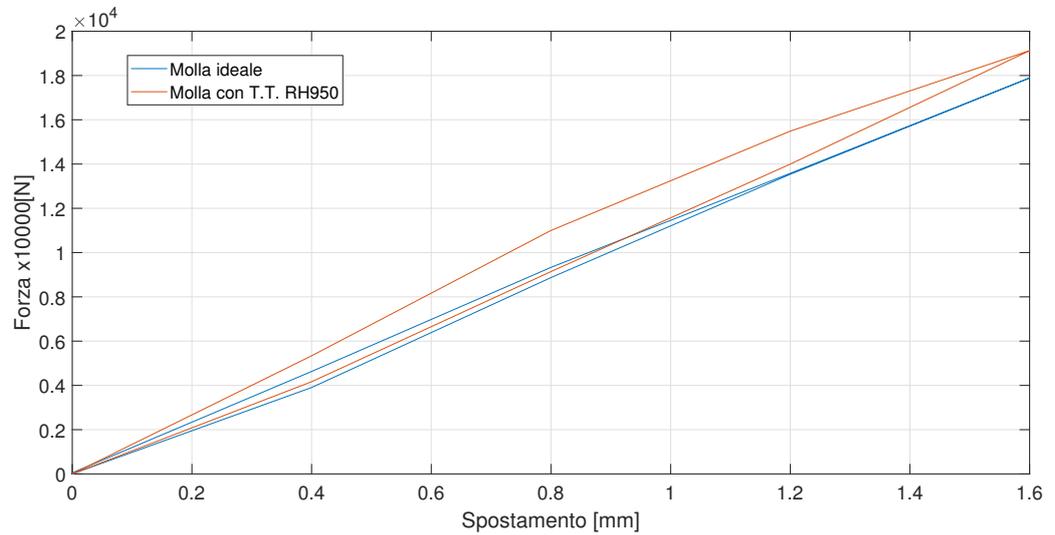


Figura 4.4. forza/spostamento primo ciclo RH950

Secondo ciclo

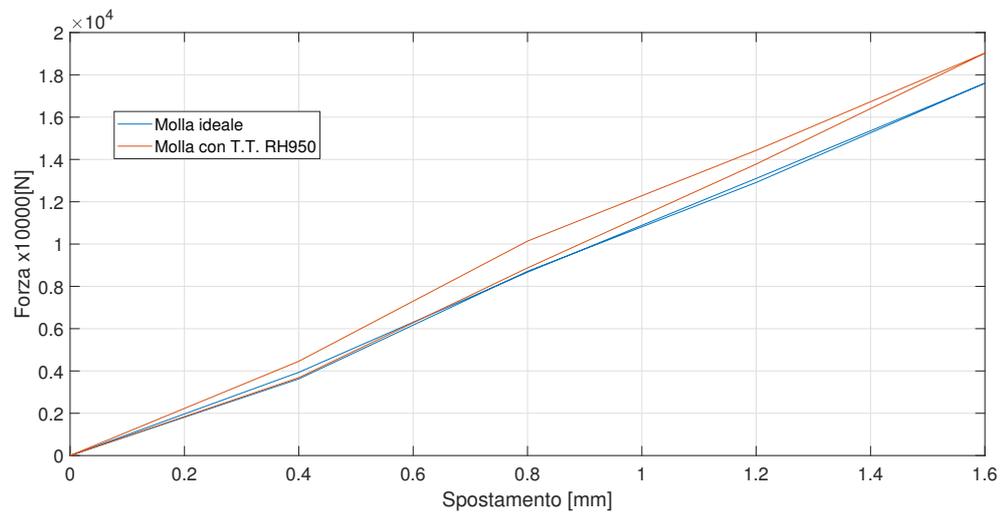


Figura 4.5. forza/spostamento secondo ciclo RH950

4.3 Analisi propagazione di cricca

4.3.1 Generalità

In questo capitolo si è trattato in modo sperimentale lo studio della propagazione dei difetti sotto carichi ciclici ad ampiezza e valore medio costanti applicati alle molle Belleville.

Quello che si fatto essenzialmente, è stato di portare la molla a cedimento per fatica. Prima del cedimento del materiale, e quindi prima della rottura, si verificano altri fenomeni che in ordine di avvenimento sono:

1. **nucleazione di un difetto**¹;
2. **Propagazione della cricca**²: dopo una certa lunghezza il difetto comincia a propagare internamente al materiale secondo un meccanismo differente da quello che lo ha generato;
3. **rottura finale**: avviene in seguito al collasso plastico, oppure secondo le modalità della meccanica della frattura elastica (MFLE).

L'esperimento è stato effettuato nel laboratorio di meccanica del Politecnico di Torino attraverso l'utilizzo di una pressa³ idraulica.

Per effettuare l'esperimento si è utilizzata una molla intagliata artificialmente tramite lavorazione per elettroerosione a filo (Figura 4.6), che ha permesso di realizzare un difetto iniziale pari a 15mm. Successivamente la molla intagliata è stata studiata applicando di volta in volta un numero di cicli pari a 1000 con una frequenza di 1 Hz, e con un carico oscillante con valore massimo di 7000 N.

Al termine dei mille cicli, grazie all'ausilio di un microscopio, si è analizzata la variazione del difetto Δ_a e, di conseguenza, si è calcolata la velocità media di propagazione della cricca in funzione del numero di cicli.

La molla è stata ciclata fino alla rottura per ottenere dei dati quanto più possibile attinenti alla realtà.

¹Nel caso in esame è già presente l'intaglio

²il tema di cui ci si è occupati principalmente

³Instron 8801, capacità della forza assiale da ± 100 kN



Figura 4.6. Dettaglio lunghezza difetto

4.3.2 Prima analisi

La prima prova è quella in cui si forma la nucleazione del difetto.

Si era deciso di applicare un carico oscillante con valore massimo di 7000 N alla frequenza di 1 Hz, per un numero di cicli pari a 1000 e ispezionare la molla al fine di trovare la nucleazione del difetto, ma in questa particolare analisi, prima di aver riscontrato l'innesco della cricca, si è dovuta prolungare la prova di ulteriori 400 cicli.

Il risultato ottenuto alla fine della prima prova è stato un innesco della cricca sulla superficie superiore della molla, nella parte dell'intaglio vicino al foro centrale, con lunghezza pari a 0.099mm come illustrato nella Figura 4.7.



Figura 4.7. Prima analisi innesco della cricca

4.3.3 Seconda analisi

Dati

- $F = 7000N$
- Frequenza = 1Hz
- $N_0^4 = 1400$
- $\Delta N^5 = 1250$
- $N_{TOT}^6 = 2650$

Risultato

- $a_0^7 = 0.099$ mm
- $\Delta a^8 = 0.042$ mm
- $a_f^9 = 0.141$ mm

Nella seconda analisi come riportato nella Figura 4.8 la cricca si propaga per altri 0,042mm.

⁴Cicli iniziali

⁵Cicli effettuati nell'analisi attuale

⁶Cicli totali = $N_0 + \Delta N$

⁷Difetto iniziale

⁸Variazione del difetto

⁹Lunghezza finale del difetto

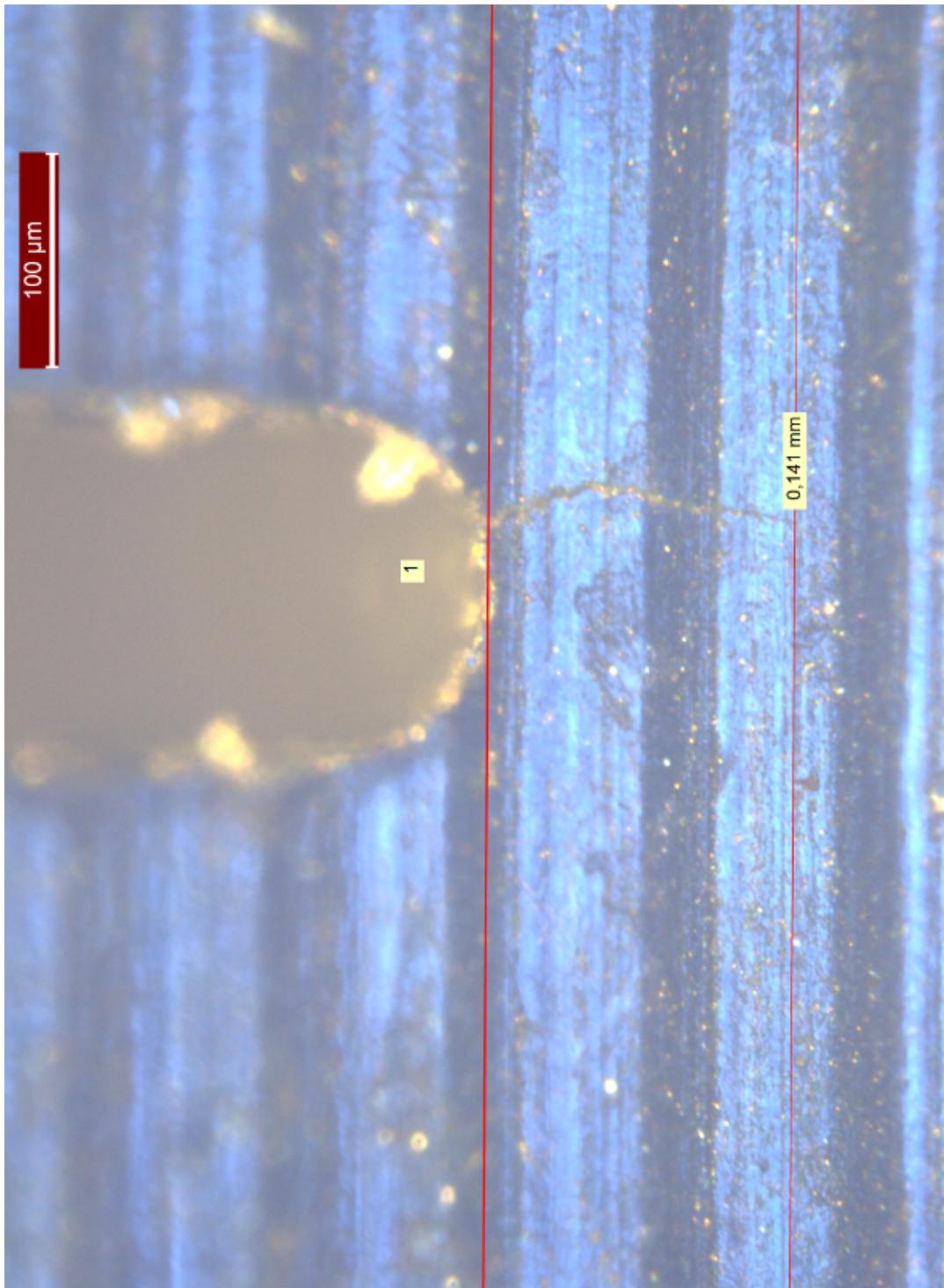


Figura 4.8. Propagazione del difetto seconda analisi

4.3.4 Terza analisi

Dati

- $F = 7000N$
- Frequenza = 1Hz
- $N_0 = 2650$
- $\Delta N = 500$
- $N_{TOT} = 3150$

Risultato

- $a_0 = 0.141$ mm
- $\Delta a = 0.042$ mm
- $a_f = 0.183$ mm

Nella terza analisi, come nella seconda, la cricca si propaga per altri 0,042mm.

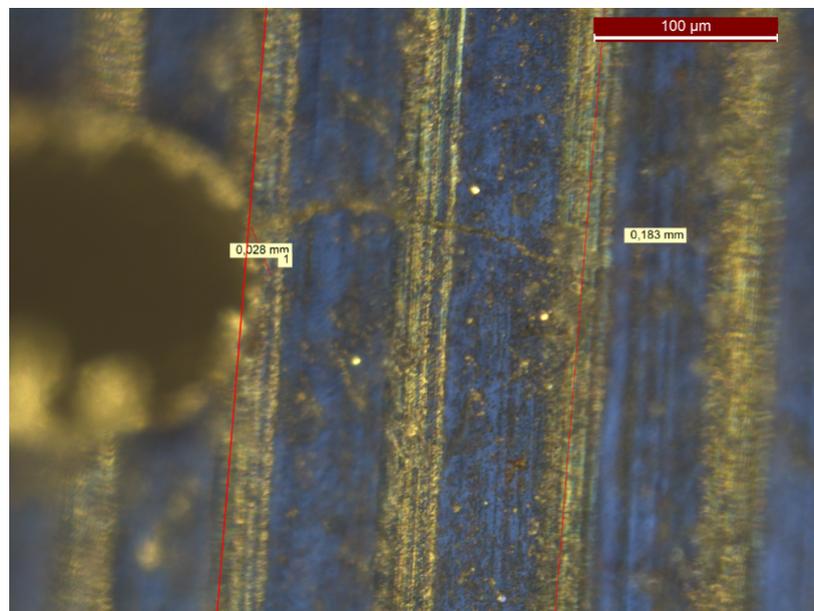


Figura 4.9. Propagazione del difetto terza analisi

4.3.5 Quarta analisi

Dati

- $F = 7000N$
- Frequenza = 1Hz
- $N_0 = 3150$
- $\Delta N = 2000$
- $N_{TOT} = 5150$

Risultato

- $a_0 = 0.183 \text{ mm}$
- $\Delta a = 0.01 \text{ mm}$
- $a_f = 0.193 \text{ mm}$

Nella quarta analisi la velocità di propagazione della cricca rallenta aumentando di solo 0,01mm la lunghezza della cricca precedente.

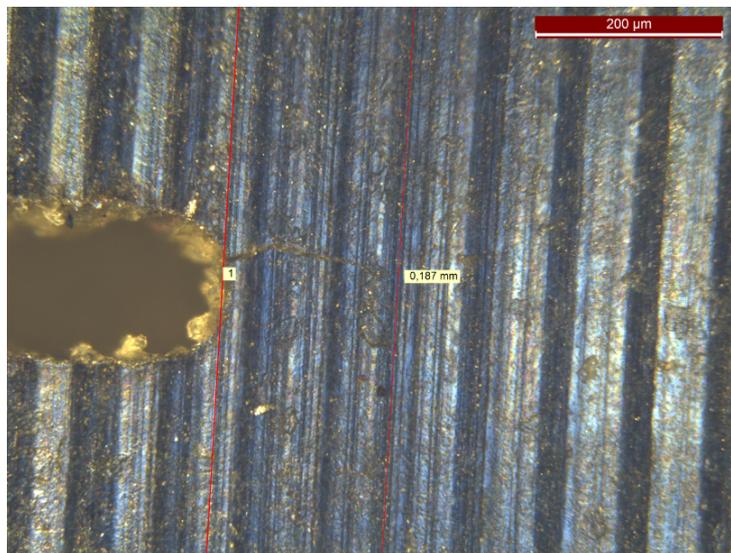


Figura 4.10. Propagazione del difetto quarta analisi

4.3.6 Quinta analisi

Dati

- $F = 7000N$
- Frequanza = 1Hz
- $N_0 = 5150$
- $\Delta N = 850$
- $N_{TOT} = 9000$

Risultato

- $a_0 = 0.193 \text{ mm}$
- $\Delta a = 0.067 \text{ mm}$
- $a_f = 0.260 \text{ mm}$

Nella quinta analisi la velocità di propagazione della cricca aumenta leggermente rispetto alla prova precedente, e la lunghezza della cricca varia di 0,067mm.

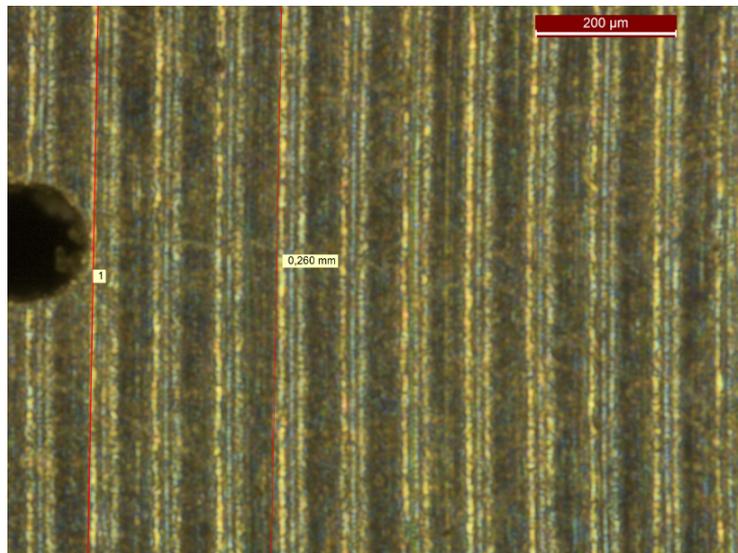


Figura 4.11. Propagazione del difetto quinta analisi

4.3.7 Sesta analisi

Durante la sesta prova si è nucleata una nuova cricca dalla parte esterna della molla. Tale cricca, durante la medesima prova, ha avuto una velocità di propagazione elevatissima, tanto da raggiungere una lunghezza di 2,067mm (Figura 4.12). Questa è stata rilevata una volta finita la prova, dopo un N_{totale} di 10000 cicli. In questa analisi la prima cricca nucleata non ha subito variazioni di lunghezza.

Dati

- $F = 7000N$
- Frequanza = 1Hz
- $N_0 = 9000$
- $\Delta N = 1000$
- $N_{TOT} = 10000$

Risultato

- $a_0 = 0.260$ mm
- $\Delta a = 0$ mm
- $a_f = 0.260$ mm
- $a'_0{}^{10} = 0$ mm
- $\Delta a'^{11} = 2.067$ mm
- $a'_f{}^{12} = 2.067$ mm

¹⁰Innesco iniziale del difetto nella parte esterna dell'intaglio

¹¹Variazione del nuovo difetto

¹²Lunghezza finale del nuovo difetto

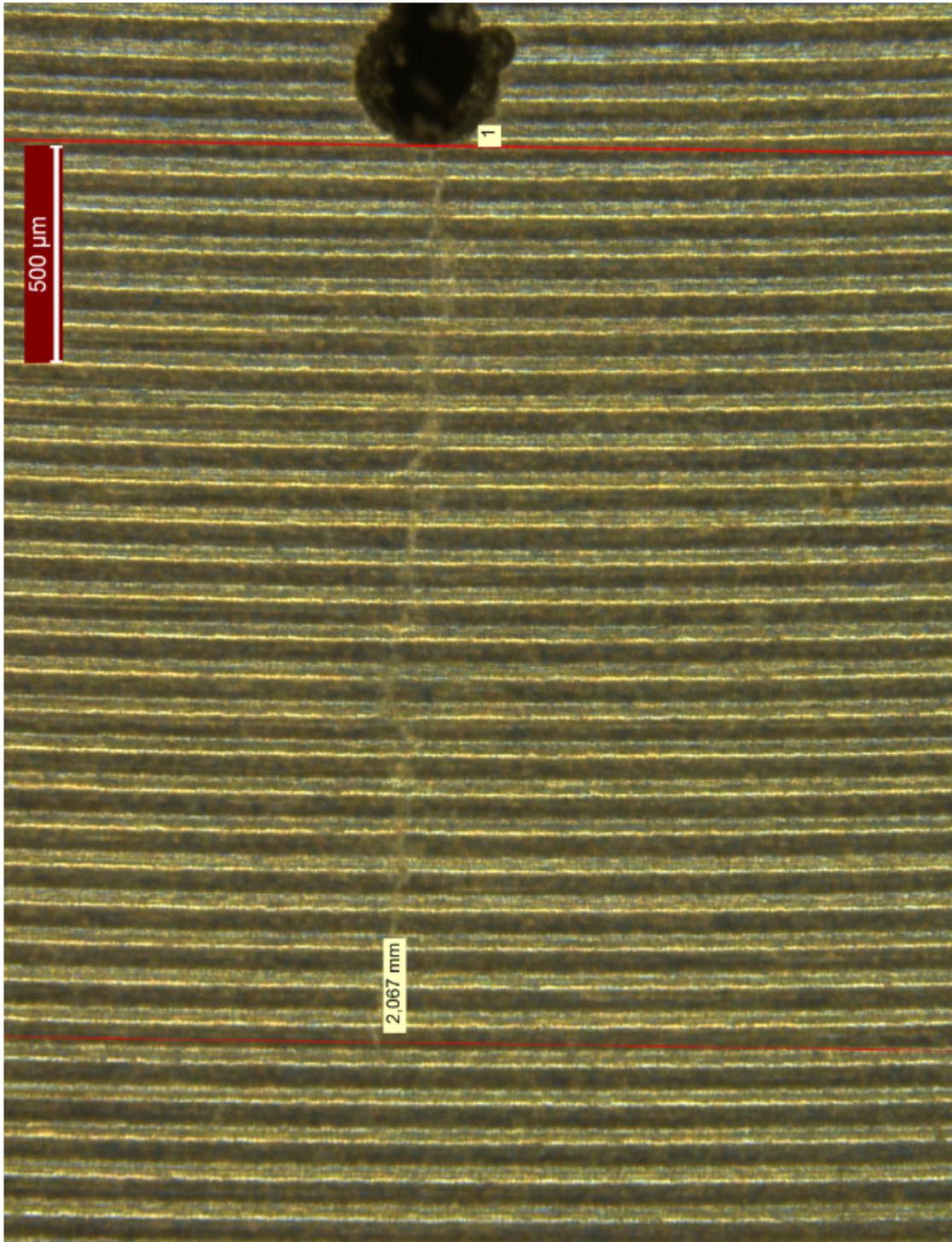


Figura 4.12. Propagazione del difetto sesta analisi

4.3.8 Settima analisi (rottura)

Come facilmente prevedibile, dopo aver misurato l'elevata lunghezza della cricca formatasi nella sesta prova, alla settima prova, dopo 435 cicli, è avvenuta la rottura della molla da entrambi i lati (come illustrato nella Figura 4.13 e Figura 4.14).

Dati

- $F = 7000N$
- Frequanza = 1Hz
- $N_0 = 10000$
- $\Delta N = 435$
- $N_{TOT} = 10435$

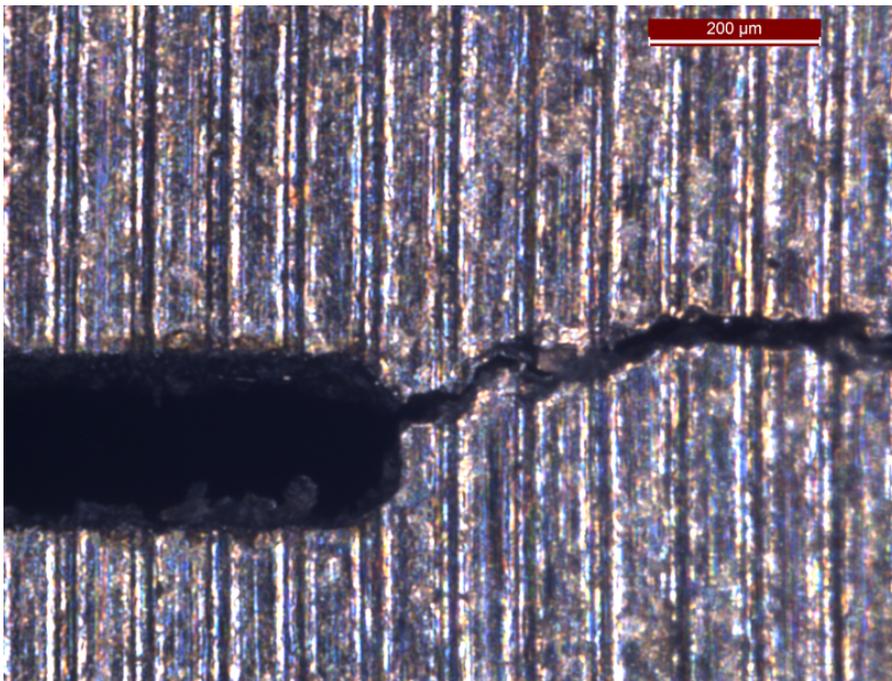


Figura 4.13. Propagazione del difetto settima analisi

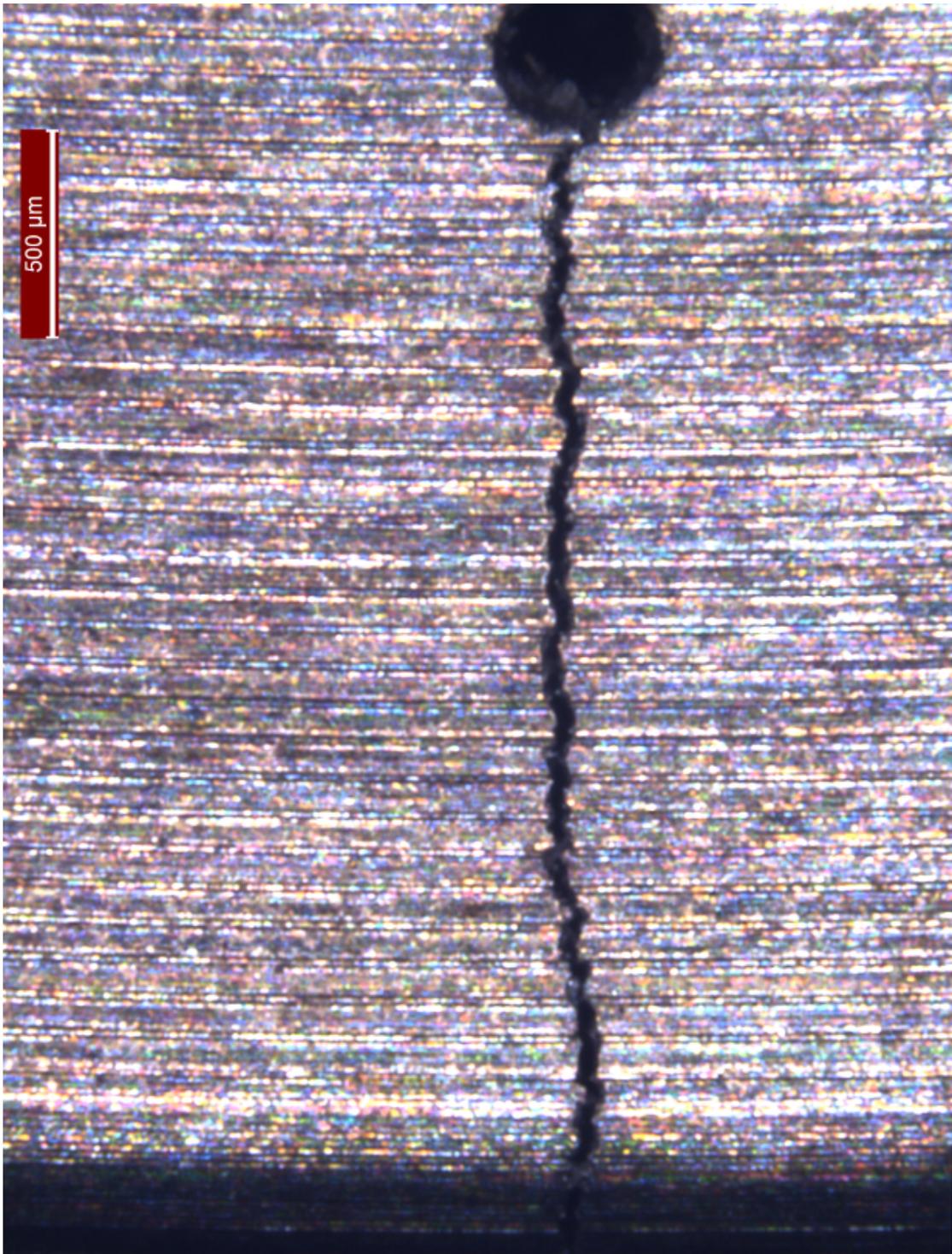


Figura 4.14. Propagazione del difetto settima analisi rottura

4.3.9 Ricavo dei parametri di Paris

Alla fine delle prove sperimentali, si è valutata la velocità di propagazione della cricca " da/dN " in funzione del numero di cicli.

Per ricavare tale velocità si è innanzitutto presa in considerazione la formula della legge di Paris dove l'avanzamento per ciclo vale:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (4.1)$$

in cui C ed n sono parametri dipendenti dal materiale, dal rapporto $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$, e da altre variabili.

L'esponente di Paris "n" varia normalmente tra 3 e 4, e nel caso specifico assumerà il valore di 3; il coefficiente C sarà invece ricavato analiticamente.

Note le costanti di Paris si può procedere con integrare l'equazione (4.1) in modo da poter calcolare il numero di cicli a cui si verificherà il cedimento, quindi la rottura.

$$N_f = \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{C(Y \sigma_{max} \sqrt{a_c})^n} da. \quad (4.2)$$

La lunghezza critica del difetto per cedimento a frattura fragile, per la tipologia di difetto ipotizzata, si ricava dalla:

$$K_{Ic} = Y \cdot \sigma_{max} \cdot \sqrt{a_c} \quad (4.3)$$

Supponendo trascurabile la variazione del coefficiente Y in funzione di a, e assumendo un valore uguale a quello in corrispondenza di a_0 , si ha:

$$Y = \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{\sec\left(\frac{\pi \cdot a}{W}\right)} \quad (4.4)$$

L'equazione (4.4) poiché $\frac{a}{W} < 1$ si semplifica in $Y = \sqrt{\pi}$ quindi avremo:

$$Y = \sqrt{\pi} = 1,77 \quad (4.5)$$

Risolvendo l'integrale (4.2) otteniamo la formula (4.6):

$$N = \frac{a_c^{1-\frac{n}{2}} - a_0^{1-\frac{n}{2}}}{1 - \frac{n}{2} \cdot C \cdot Y_0^n \cdot \Delta\sigma^n} \quad (4.6)$$

dove il valore di a_c si ricava tramite la formula inversa dell'equazione (4.3):

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{Y_0 \cdot \Delta\sigma} \right)^2 \quad (4.7)$$

Ricavando la formula inversa di (4.6) e sapendo il numero di cicli si ottiene $C \cdot Y^n = 6,09 \cdot 10^{-10}$, il che significa $C = 1,1 \cdot 10^{-10}$.

Capitolo 5

Conclusioni

Obbiettivo di questo lavoro è stata la progettazione di una molla in grado di operare sotto sollecitazioni elevate mantenendo una buona resistenza statica e a fatica.

Nell'analisi di resistenza statica si è osservato che la molla che ha subito il trattamento termico TH950, diversamente da quella trattata con RH950, possedeva un limite di snervamento inferiore al carico di regolazione. Pertanto si è preferito continuare gli studi sulla molla trattata con RH950 con un'analisi a fatica, in modo da valutare, in caso di difetto iniziale, la propagazione dello stesso.

Dai risultati di quest'ultima analisi è emerso che l'eventuale presenza di un difetto non riscontrato in fase di montaggio porterebbe all'interruzione del lancio del vettore spaziale nelle fasi di test antecedenti al lancio stesso.

A seguito dell'esito positivo delle analisi condotte sperimentalmente si può concludere di aver conseguito l'obbiettivo prefissato: la molla con trattamento termico RH950 ha superato tutte le fasi di collaudo ed è stata effettivamente installata nella valvola riduttrice di pressione.

Bibliografia

- [1] Ing. Eberhard Fromm, Ing. Wolfgang Kleiner, *SCHNORR Disc Spring Engineering, Padronanza della molla a tazza*;
- [2] Ariane group Holding <https://www.ariane.group/fr/>;
- [3] SAE International, *Spring Design Manual (Advances in Engineering)*;
- [4] capcome space, <https://www.capcomespace.net>;
- [5] R. Giovanardi, G. Poli, P. Veronesi, g. Parigi, N. Raffaelli, *Trattamenti termochimici di nitrurazione e post-ossidazione su acciai 17-4PH: ottimizzazione dei parametri di processo per massimizzare la resistenza a corrosione*;
- [6] Allegheny Technologies Incorporated, https://www.atimetals.com/Products/Documents/datasheets/stainless-specialty-steel/precipitationhardening/ati_17-7_tds_en_v2.pdf;
- [7] Belma Fakić, Diana Čubela, *Review of the development of research in the design of semi austenitic stainless steel 17-7 PH*;
- [8] H. J. Hucek *Structural alloys handbook Mechanical Properties Data Center, Battelle Columbus Laboratories, Ohio 1982*;
- [9] Disc Spring Solver, <http://www.discspringsolver.com>;
- [10] Giuseppe Anzalone, Paolo Bassignana, Giuseppe Brafa Musicoro, *Meccanica, Macchine ed Energia – articolazione Energia 2*
- [11] DIN 50100;
- [12] Antonio Gugliotta, *Meccanica della Frattura Lineare Elastica Propagazione del difetto sotto carichi ciclici*;
- [13] SAE Aerospace AMS2759D <http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2016/03/AMS-2759D.pdf>
- [14] SAE Aerospace AMS2759/1D <http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2016/03/AMS-2759-1D.pdf>
- [15] SAE Aerospace AMS2759/3D <http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2016/03/AMS-2759-3D.pdf>
- [16] SAE Aerospace AMS2759/4B <http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2016/03/AMS-2759-4B.pdf>
- [17] SAE Aerospace AMS2759/9D <http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2016/12/AMS-2759-9D.pdf>
- [18] Appunti Metodologie 2 UNICAS, <http://www.metallurgia.unicas.it>;

- [19] G. Cunsolo, *Tecnologia meccanica, Strumenti di paragone cap.4.2*;
- [20] Zeiss macchina di misura a portale, <https://www.zeiss.it/metrologia/prodotti/sistemi/cmm-a-portale/accura.html>;
- [21] Tec-Eurolab.com, *prove non distruttive-controllo magnetoscopico(MT) con giogo*;
- [22] La struttura della grafite, <http://didattica-online.polito.it/CHIMICA/dismic/scorm/r620/s1917/a6955.htm>;

Appendice A

Risultati analitici della Forza/spostamento

Tabella A.1: Risultati analitici Forza/spostamento

Spostamento [mm]	Spostamento pacco molla [mm]	Riduzione verticale del pacco molla	Forza [N]
0	0	54	0
0,01	0,09	53,91	146
0,02	0,18	53,82	291
0,03	0,27	53,73	435
0,04	0,36	53,64	579
0,05	0,45	53,55	723
0,06	0,54	53,46	865
0,07	0,63	53,37	1008
0,08	0,72	53,28	1149
0,09	0,81	53,19	1290
0,1	0,9	53,1	1431
0,11	0,99	53,01	1571
0,12	1,08	52,92	1711
0,13	1,17	52,83	1850
0,14	1,26	52,74	1988
0,15	1,35	52,65	2126
0,16	1,44	52,56	2263
0,17	1,53	52,47	2400
0,18	1,62	52,38	2536
0,19	1,71	52,29	2672

Table A.1 continued from previous page

Spostamento [mm]	Spostamento pacco molla [mm]	Riduzione verticale del pacco molla	Forza [N]
0,2	1,8	52,2	2807
0,21	1,89	52,11	2942
0,22	1,98	52,02	3076
0,23	2,07	51,93	3210
0,24	2,16	51,84	3343
0,25	2,25	51,75	3475
0,26	2,34	51,66	3607
0,27	2,43	51,57	3739
0,28	2,52	51,48	3870
0,29	2,61	51,39	4001
0,3	2,7	51,3	4131
0,31	2,79	51,21	4260
0,32	2,88	51,12	4389
0,33	2,97	51,03	4518
0,34	3,06	50,94	4646
0,35	3,15	50,85	4774
0,36	3,24	50,76	4901
0,37	3,33	50,67	5027
0,38	3,42	50,58	5153
0,39	3,51	50,49	5279
0,4	3,6	50,4	5404
0,41	3,69	50,31	5529
0,42	3,78	50,22	5653
0,43	3,87	50,13	5777
0,44	3,96	50,04	5900
0,45	4,05	49,95	6023
0,46	4,14	49,86	6145
0,47	4,23	49,77	6267
0,48	4,32	49,68	6389
0,49	4,41	49,59	6510
0,5	4,5	49,5	6630
0,51	4,59	49,41	6750
0,52	4,68	49,32	6870
0,53	4,77	49,23	6989
0,54	4,86	49,14	7108
0,55	4,95	49,05	7226
0,56	5,04	48,96	7344

Table A.1 continued from previous page

Spostamento [mm]	Spostamento pacco molla [mm]	Riduzione verticale del pacco molla	Forza [N]
0,57	5,13	48,87	7461
0,58	5,22	48,78	7578
0,59	5,31	48,69	7695
0,6	5,4	48,6	7811
0,61	5,49	48,51	7927
0,62	5,58	48,42	8042
0,63	5,67	48,33	8157
0,64	5,76	48,24	8271
0,65	5,85	48,15	8385
0,66	5,94	48,06	8499
0,67	6,03	47,97	8612
0,68	6,12	47,88	8725
0,69	6,21	47,79	8837
0,7	6,3	47,7	8949
0,71	6,39	47,61	9061
0,72	6,48	47,52	9172
0,73	6,57	47,43	9283
0,74	6,66	47,34	9393
0,75	6,75	47,25	9503
0,76	6,84	47,16	9613
0,77	6,93	47,07	9722
0,78	7,02	46,98	9831
0,79	7,11	46,89	9939
0,8	7,2	46,8	10047
0,81	7,29	46,71	10155
0,82	7,38	46,62	10262
0,83	7,47	46,53	10369
0,84	7,56	46,44	10476
0,85	7,65	46,35	10582
0,86	7,74	46,26	10688
0,87	7,83	46,17	10793
0,88	7,92	46,08	10898
0,89	8,01	45,99	11003
0,9	8,1	45,9	11107
0,91	8,19	45,81	11211
0,92	8,28	45,72	11315
0,93	8,37	45,63	11418

Table A.1 continued from previous page

Spostamento [mm]	Spostamento pacco molla [mm]	Riduzione verticale del pacco molla	Forza [N]
0,94	8,46	45,54	11521
0,95	8,55	45,45	11624
0,96	8,64	45,36	11726
0,97	8,73	45,27	11828
0,98	8,82	45,18	11930
0,99	8,91	45,09	12031
1	9	45	12132
1,01	9,09	44,91	12233
1,02	9,18	44,82	12333
1,03	9,27	44,73	12433
1,04	9,36	44,64	12533
1,05	9,45	44,55	12632
1,06	9,54	44,46	12731
1,07	9,63	44,37	12830
1,08	9,72	44,28	12929
1,09	9,81	44,19	13027
1,1	9,9	44,1	13125
1,11	9,99	44,01	13222
1,12	10,08	43,92	13319
1,13	10,17	43,83	13416
1,14	10,26	43,74	13513
1,15	10,35	43,65	13609
1,16	10,44	43,56	13705
1,17	10,53	43,47	13801
1,18	10,62	43,38	13896
1,19	10,71	43,29	13991
1,2	10,8	43,2	14086
1,21	10,89	43,11	14181
1,22	10,98	43,02	14275
1,23	11,07	42,93	14369
1,24	11,16	42,84	14463
1,25	11,25	42,75	14557
1,26	11,34	42,66	14650
1,27	11,43	42,57	14743
1,28	11,52	42,48	14836
1,29	11,61	42,39	14928
1,3	11,7	42,3	15020

Table A.1 continued from previous page

Spostamento [mm]	Spostamento pacco molla [mm]	Riduzione verticale del pacco molla	Forza [N]
1,31	11,79	42,21	15112
1,32	11,88	42,12	15204
1,33	11,97	42,03	15295
1,34	12,06	41,94	15387
1,35	12,15	41,85	15478
1,36	12,24	41,76	15568
1,37	12,33	41,67	15659
1,38	12,42	41,58	15749
1,39	12,51	41,49	15839
1,4	12,6	41,4	15929
1,41	12,69	41,31	16018
1,42	12,78	41,22	16108
1,43	12,87	41,13	16197
1,44	12,96	41,04	16286
1,45	13,05	40,95	16374
1,46	13,14	40,86	16463
1,47	13,23	40,77	16551
1,48	13,32	40,68	16639
1,49	13,41	40,59	16727
1,5	13,5	40,5	16814
1,51	13,59	40,41	16902
1,52	13,68	40,32	16989
1,53	13,77	40,23	17076
1,54	13,86	40,14	17163
1,55	13,95	40,05	17249
1,56	14,04	39,96	17336
1,57	14,13	39,87	17422
1,58	14,22	39,78	17508
1,59	14,31	39,69	17594
1,6	14,4	39,6	17680
1,61	14,49	39,51	17765
1,62	14,58	39,42	17850
1,63	14,67	39,33	17935
1,64	14,76	39,24	18020
1,65	14,85	39,15	18105
1,66	14,94	39,06	18190
1,67	15,03	38,97	18274

Table A.1 continued from previous page

Spostamento [mm]	Spostamento pacco molla [mm]	Riduzione verticale del pacco molla	Forza [N]
1,68	15,12	38,88	18359
1,69	15,21	38,79	18443
1,7	15,3	38,7	18527
1,71	15,39	38,61	18610
1,72	15,48	38,52	18694
1,73	15,57	38,43	18778
1,74	15,66	38,34	18861
1,75	15,75	38,25	18944
1,76	15,84	38,16	19027
1,77	15,93	38,07	19110
1,78	16,02	37,98	19193
1,79	16,11	37,89	18794
1,8	16,2	37,8	18874
1,81	16,29	37,71	18955
1,82	16,38	37,62	19035
1,83	16,47	37,53	19115
1,84	16,56	37,44	19195
1,85	16,65	37,35	19275
1,86	16,74	37,26	19354
1,87	16,83	37,17	19434
1,88	16,92	37,08	19513
1,89	17,01	36,99	19593
1,9	17,1	36,9	19672
1,91	17,19	36,81	19751
1,92	17,28	36,72	19830
1,93	17,37	36,63	19909
1,94	17,46	36,54	19988
1,95	17,55	36,45	20067
1,96	17,64	36,36	20146
1,97	17,73	36,27	20224
1,98	17,82	36,18	20303
1,99	17,91	36,09	20381
2	18	36	20460
2,01	18,09	35,91	20538
2,02	18,18	35,82	20616
2,03	18,27	35,73	20694
2,04	18,36	35,64	20773

Table A.1 continued from previous page

Spostamento [mm]	Spostamento pacco molla [mm]	Riduzione verticale del pacco molla	Forza [N]
2,05	18,45	35,55	20851
2,06	18,54	35,46	20928
2,07	18,63	35,37	21006
2,08	18,72	35,28	21084
2,09	18,81	35,19	21162
2,1	18,9	35,1	21240
2,11	18,99	35,01	21317
2,12	19,08	34,92	21395
2,13	19,17	34,83	21472
2,14	19,26	34,74	21550
2,15	19,35	34,65	21627
2,16	19,44	34,56	21705
2,17	19,53	34,47	21782
2,18	19,62	34,38	21859
2,19	19,71	34,29	21936
2,2	19,8	34,2	22014
2,21	19,89	34,11	22091
2,22	19,98	34,02	22168

Appendice B

Risultati delle tensioni applicate alle molle

Tabella B.1: Valori dei σ in funzione dello spostamento

s[mm]	sigma OM	sigma 1	sigma 2	sigma 3	sigma 4
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	-6,88	-16,58	4,47	8,29	-1,19
0,02	-13,76	-33,14	8,97	16,56	-2,39
0,03	-20,63	-49,67	13,50	24,82	-3,60
0,04	-27,51	-66,17	18,05	33,06	-4,84
0,05	-34,39	-82,65	22,62	41,29	-6,08
0,06	-41,27	-99,10	27,23	49,50	-7,35
0,07	-48,14	-115,52	31,85	57,70	-8,62
0,08	-55,02	-131,92	36,51	65,88	-9,92
0,09	-61,90	-148,30	41,19	74,04	-11,23
0,1	-68,78	-164,64	45,90	82,19	-12,55
0,11	-75,65	-180,96	50,63	90,33	-13,89
0,12	-82,53	-197,26	55,39	98,45	-15,24
0,13	-89,41	-213,53	60,17	106,55	-16,61
0,14	-96,29	-229,77	64,98	114,64	-18,00
0,15	-103,16	-245,99	69,82	122,72	-19,40
0,16	-110,04	-262,18	74,68	130,78	-20,81
0,17	-116,92	-278,35	79,57	138,82	-22,24
0,18	-123,80	-294,48	84,49	146,85	-23,69
0,19	-130,67	-310,60	89,43	154,86	-25,15
0,2	-137,55	-326,68	94,39	162,86	-26,62
0,21	-144,43	-342,75	99,39	170,84	-28,12
0,22	-151,31	-358,78	104,41	178,81	-29,62

Table B.1 continued from previous page

s[mm]	sigma OM	sigma 1	sigma 2	sigma 3	sigma 4
0,23	-158,18	-374,79	109,45	186,76	-31,14
0,24	-165,06	-390,77	114,52	194,70	-32,68
0,25	-171,94	-406,73	119,62	202,62	-34,23
0,26	-178,82	-422,66	124,74	210,53	-35,80
0,27	-185,69	-438,56	129,89	218,42	-37,39
0,28	-192,57	-454,44	135,07	226,30	-38,98
0,29	-199,45	-470,30	140,27	234,16	-40,60
0,3	-206,33	-486,12	145,50	242,00	-42,23
0,31	-213,20	-501,92	150,75	249,83	-43,87
0,32	-220,08	-517,70	156,03	257,65	-45,53
0,33	-226,96	-533,45	161,33	265,45	-47,20
0,34	-233,84	-549,17	166,67	273,23	-48,89
0,35	-240,71	-564,86	172,02	281,00	-50,60
0,36	-247,59	-580,53	177,41	288,75	-52,32
0,37	-254,47	-596,18	182,82	296,49	-54,06
0,38	-261,35	-611,80	188,25	304,22	-55,81
0,39	-268,22	-627,39	193,71	311,92	-57,57
0,4	-275,10	-642,96	199,20	319,62	-59,35
0,41	-281,98	-658,50	204,71	327,29	-61,15
0,42	-288,86	-674,01	210,25	334,96	-62,96
0,43	-295,73	-689,50	215,82	342,60	-64,79
0,44	-302,61	-704,96	221,41	350,23	-66,63
0,45	-309,49	-720,40	227,03	357,85	-68,49
0,46	-316,37	-735,81	232,67	365,45	-70,36
0,47	-323,24	-751,19	238,34	373,04	-72,25
0,48	-330,12	-766,55	244,04	380,61	-74,16
0,49	-337,00	-781,88	249,76	388,16	-76,08
0,5	-343,88	-797,19	255,51	395,70	-78,01
0,51	-350,75	-812,47	261,28	403,23	-79,96
0,52	-357,63	-827,72	267,08	410,74	-81,92
0,53	-364,51	-842,95	272,91	418,23	-83,90
0,54	-371,39	-858,15	278,76	425,71	-85,90
0,55	-378,26	-873,33	284,64	433,17	-87,91
0,56	-385,14	-888,48	290,54	440,62	-89,94
0,57	-392,02	-903,60	296,47	448,06	-91,98
0,58	-398,90	-918,70	302,43	455,47	-94,03
0,59	-405,77	-933,77	308,41	462,88	-96,11
0,6	-412,65	-948,82	314,42	470,26	-98,19
0,61	-419,53	-963,84	320,45	477,64	-100,29

Table B.1 continued from previous page

s[mm]	sigma OM	sigma 1	sigma 2	sigma 3	sigma 4
0,62	-426,41	-978,83	326,51	484,99	-102,41
0,63	-433,28	-993,80	332,60	492,33	-104,54
0,64	-440,16	-1008,74	338,71	499,66	-106,69
0,65	-447,04	-1023,65	344,85	506,97	-108,86
0,66	-453,92	-1038,54	351,02	514,27	-111,03
0,67	-460,79	-1053,41	357,21	521,55	-113,23
0,68	-467,67	-1068,24	363,42	528,81	-115,44
0,69	-474,55	-1083,06	369,67	536,06	-117,66
0,7	-481,43	-1097,84	375,93	543,30	-119,90
0,71	-488,30	-1112,60	382,23	550,52	-122,16
0,72	-495,18	-1127,33	388,55	557,72	-124,43
0,73	-502,06	-1142,04	394,90	564,91	-126,71
0,74	-508,94	-1156,72	401,27	572,08	-129,01
0,75	-515,81	-1171,38	407,67	579,24	-131,33
0,76	-522,69	-1186,01	414,09	586,39	-133,66
0,77	-529,57	-1200,61	420,54	593,51	-136,01
0,78	-536,45	-1215,19	427,02	600,63	-138,37
0,79	-543,32	-1229,74	433,52	607,72	-140,74
0,8	-550,20	-1244,26	440,05	614,81	-143,14
0,81	-557,08	-1258,76	446,61	621,87	-145,54
0,82	-563,96	-1273,24	453,19	628,92	-147,97
0,83	-570,83	-1287,68	459,79	635,96	-150,40
0,84	-577,71	-1302,10	466,43	642,98	-152,86
0,85	-584,59	-1316,50	473,09	649,99	-155,33
0,86	-591,47	-1330,87	479,77	656,98	-157,81
0,87	-598,34	-1345,21	486,48	663,95	-160,31
0,88	-605,22	-1359,53	493,22	670,91	-162,82
0,89	-612,10	-1373,82	499,98	677,86	-165,35
0,9	-618,98	-1388,08	506,77	684,79	-167,90
0,91	-625,85	-1402,32	513,59	691,70	-170,46
0,92	-632,73	-1416,53	520,43	698,60	-173,03
0,93	-639,61	-1430,72	527,29	705,48	-175,62
0,94	-646,49	-1444,88	534,19	712,35	-178,23
0,95	-653,36	-1459,02	541,11	719,20	-180,85
0,96	-660,24	-1473,13	548,05	726,04	-183,49
0,97	-667,12	-1487,21	555,02	732,86	-186,14
0,98	-674,00	-1501,26	562,02	739,67	-188,81
0,99	-680,87	-1515,29	569,04	746,46	-191,49
1	-687,75	-1529,30	576,09	753,24	-194,19

Table B.1 continued from previous page

s[mm]	sigma OM	sigma 1	sigma 2	sigma 3	sigma 4
1,01	-694,63	-1543,28	583,17	760,00	-196,90
1,02	-701,51	-1557,23	590,27	766,75	-199,63
1,03	-708,39	-1571,16	597,40	773,48	-202,37
1,04	-715,26	-1585,06	604,55	780,19	-205,13
1,05	-722,14	-1598,93	611,73	786,89	-207,90
1,06	-729,02	-1612,78	618,94	793,58	-210,69
1,07	-735,90	-1626,60	626,17	800,25	-213,50
1,08	-742,77	-1640,40	633,43	806,90	-216,32
1,09	-749,65	-1654,17	640,71	813,54	-219,15
1,1	-756,53	-1667,91	648,02	820,17	-222,00
1,11	-763,41	-1681,63	655,36	826,78	-224,87
1,12	-770,28	-1695,32	662,72	833,37	-227,75
1,13	-777,16	-1708,99	670,11	839,95	-230,64
1,14	-784,04	-1722,63	677,52	846,51	-233,56
1,15	-790,92	-1736,24	684,96	853,06	-236,48
1,16	-797,79	-1749,83	692,43	859,59	-239,42
1,17	-804,67	-1763,39	699,92	866,11	-242,38
1,18	-811,55	-1776,93	707,44	872,61	-245,35
1,19	-818,43	-1790,44	714,98	879,10	-248,34
1,2	-825,30	-1803,92	722,55	885,57	-251,34
1,21	-832,18	-1817,38	730,15	892,02	-254,36
1,22	-839,06	-1830,81	737,77	898,46	-257,40
1,23	-845,94	-1844,22	745,42	904,89	-260,44
1,24	-852,81	-1857,60	753,09	911,30	-263,51
1,25	-859,69	-1870,95	760,79	917,70	-266,59
1,26	-866,57	-1884,28	768,52	924,08	-269,68
1,27	-873,45	-1897,58	776,27	930,44	-272,79
1,28	-880,32	-1910,86	784,05	936,79	-275,92
1,29	-887,20	-1924,11	791,85	943,12	-279,06
1,3	-894,08	-1937,33	799,68	949,44	-282,21
1,31	-900,96	-1950,53	807,54	955,75	-285,38
1,32	-907,83	-1963,70	815,42	962,03	-288,57
1,33	-914,71	-1976,84	823,33	968,31	-291,77
1,34	-921,59	-1989,96	831,26	974,56	-294,99
1,35	-928,47	-2003,06	839,22	980,81	-298,22
1,36	-935,34	-2016,12	847,21	987,03	-301,47
1,37	-942,22	-2029,17	855,22	993,25	-304,73
1,38	-949,10	-2042,18	863,26	999,44	-308,01
1,39	-955,98	-2055,17	871,33	1005,62	-311,30

Table B.1 continued from previous page

s[mm]	sigma OM	sigma 1	sigma 2	sigma 3	sigma 4
1,4	-962,85	-2068,13	879,42	1011,79	-314,61
1,41	-969,73	-2081,07	887,53	1017,94	-317,93
1,42	-976,61	-2093,98	895,68	1024,08	-321,27
1,43	-983,49	-2106,87	903,84	1030,20	-324,62
1,44	-990,36	-2119,73	912,04	1036,30	-327,99
1,45	-997,24	-2132,56	920,26	1042,39	-331,38
1,46	-1004,12	-2145,37	928,51	1048,46	-334,78
1,47	-1011,00	-2158,15	936,78	1054,52	-338,19
1,48	-1017,87	-2170,90	945,08	1060,57	-341,62
1,49	-1024,75	-2183,63	953,40	1066,60	-345,07
1,5	-1031,63	-2196,34	961,75	1072,61	-348,53
1,51	-1038,51	-2209,01	970,13	1078,61	-352,01
1,52	-1045,38	-2221,66	978,53	1084,59	-355,50
1,53	-1052,26	-2234,29	986,96	1090,56	-359,01
1,54	-1059,14	-2246,89	995,42	1096,51	-362,53
1,55	-1066,02	-2259,46	1003,90	1102,45	-366,06
1,56	-1072,89	-2272,01	1012,41	1108,37	-369,62
1,57	-1079,77	-2284,53	1020,94	1114,28	-373,18
1,58	-1086,65	-2297,02	1029,50	1120,17	-376,77
1,59	-1093,53	-2309,49	1038,08	1126,04	-380,37
1,6	-1100,40	-2321,93	1046,70	1131,90	-383,98
1,61	-1107,28	-2334,35	1055,33	1137,75	-387,61
1,62	-1114,16	-2346,74	1064,00	1143,58	-391,25
1,63	-1121,04	-2359,11	1072,69	1149,39	-394,91
1,64	-1127,91	-2371,44	1081,40	1155,19	-398,59
1,65	-1134,79	-2383,76	1090,14	1160,98	-402,28
1,66	-1141,67	-2396,04	1098,91	1166,75	-405,98
1,67	-1148,55	-2408,30	1107,70	1172,50	-409,70
1,68	-1155,42	-2420,54	1116,52	1178,24	-413,44
1,69	-1162,30	-2432,75	1125,37	1183,96	-417,19
1,7	-1169,18	-2444,93	1134,24	1189,67	-420,95
1,71	-1176,06	-2457,08	1143,14	1195,36	-424,74
1,72	-1182,93	-2469,22	1152,06	1201,04	-428,53
1,73	-1189,81	-2481,32	1161,01	1206,70	-432,35
1,74	-1196,69	-2493,40	1169,99	1212,35	-436,17
1,75	-1203,57	-2505,45	1178,99	1217,98	-440,02
1,76	-1210,44	-2517,48	1188,02	1223,60	-443,87
1,77	-1217,32	-2529,48	1197,07	1229,20	-447,75
1,78	-1224,20	-2541,45	1206,15	1234,79	-451,63

Table B.1 continued from previous page

s[mm]	sigma OM	sigma 1	sigma 2	sigma 3	sigma 4
1,79	-1231,08	-2553,40	1215,26	1240,36	-455,54
1,8	-1237,95	-2565,32	1224,39	1245,91	-459,46
1,81	-1244,83	-2577,22	1233,55	1251,45	-463,39
1,82	-1251,71	-2589,09	1242,73	1256,98	-467,34
1,83	-1258,59	-2600,93	1251,94	1262,49	-471,31
1,84	-1265,46	-2612,75	1261,18	1267,98	-475,29
1,85	-1272,34	-2624,54	1270,44	1273,46	-479,28
1,86	-1279,22	-2636,31	1279,73	1278,92	-483,29
1,87	-1286,10	-2648,05	1289,04	1284,37	-487,32
1,88	-1292,97	-2659,76	1298,38	1289,80	-491,36
1,89	-1299,85	-2671,45	1307,75	1295,22	-495,41
1,9	-1306,73	-2683,11	1317,14	1300,63	-499,49