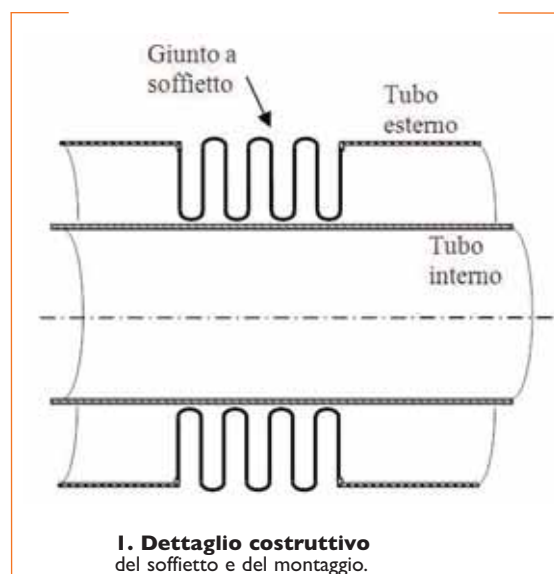


Ottimizzazione di un giunto meccanico



Alcune tra le metodologie più moderne in ambito di progettazione strutturale sono state applicate al fine di ottimizzare sia le prestazioni sia il processo di idroformatura di un giunto compensatore di dilatazione assiale del tipo a "soffietto" in lamiera di acciaio

Un giunto compensatore di dilatazione assiale del tipo a "soffietto" (figura 1) ha il compito essenziale di consentire scorrimenti assiali relativi tra i due elementi coassiali, tipicamente tubi, a esso collegati. Il soffietto viene prodotto mediante idroformatura, una tecnologia ormai ben consolidata e adottata nell'industria soprattutto quando i volumi di produzione sono limitati ad alcune migliaia di pezzi/anno e quando si può partire dal tubo [1-3]. Un fluido viene messo in pressione all'interno del tubo causandone la dilatazione

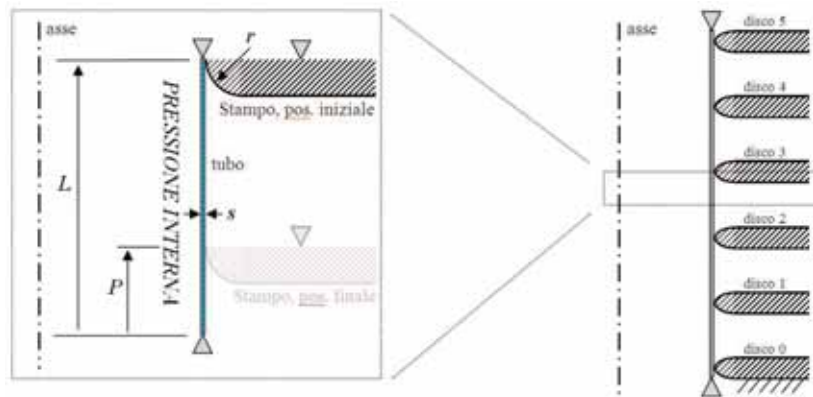
contro uno stampo mobile costituito da più dischi toroidali equidistanti; dopo una prima fase di rigonfiamento libero, i dischi dello stampo vengono fatti avvicinare attraverso un pistone; in questo modo il tubo assume la classica forma a soffietto. A fine formatura il componente è costituito da 5 pieghe complete; in seguito le pieghe di estremità vengono tagliate a circa metà della loro lunghezza e collegate tramite saldature orbitali alle flange di attacco. I requisiti dal punto di vista dell'ingombro si riferiscono al diametro in-

terno del giunto, che non deve scendere sotto i 100 mm, e alla lunghezza finale di montaggio, che deve risultare pari a 38,5 mm per raccordarsi opportunamente agli altri membri della giunzione; infine il giunto deve garantire un'escursione in esercizio pari a $\pm 12,5$ mm senza andare a pacco.

Modellazione Fem e applicazione Doe

Lo studio è stato condotto con il codice Fem Ansys; sfruttando le simmetrie geometriche

presenti, il calcolo del processo di formatura e di deformazione in esercizio è stato ricondotto all'analisi assialsimmetrica di metà piega del giunto (figura 2a). La validità di tale semplificazione è stata verificata da una simulazione su di un modello completo comprendente tutte e 5 le pieghe (figura 2b) e che ha fornito risultati sostanzialmente identici. L'area corrispondente al tubo è stata discretizzata con una mesh regolare di elementi PLANE42 con 3 divisioni nello spessore ed un conseguente numero di divisioni nella lunghezza. È stato poi definito il contatto, di tipo rigido-deformabile con attrito secco, tra lo stampo mobile e la superficie esterna del tubo, mentre sulla superficie interna del tubo agisce la pressione di idroformatura. La parte inferiore del tubo può scorrere solo radialmente per consentire l'espansione, mentre la parte superiore è vincolata a seguire la stessa legge di spostamento verticale imposta allo stampo; per simulare la vita operativa invece vengono eliminati la pressione interna e lo stampo, viene imposto al lato superiore del tubo di portarsi nella posizione di montaggio, e successivamente alla stessa estremità vengono applicati i due spostamenti di 12,5 mm verso il basso e verso l'alto. Come relazione costitutiva del materiale è stata utilizzata una legge elasto-plastica incrudente di tipo bilineare i cui valori sono riassunti in tabella 1. Il modello Fem è stato predisposto in modalità parametrica per poter effettuare una campagna di simulazioni in cui poter variare le principali grandezze di progetto: pressione interna p , passo tra le pieghe a stampo chiuso P , lunghezza L e spessore iniziali del tubo s , raggio di curvatura dello stampo r . La situazione è riassunta nella tabella 2, i cui valori geometrici sono riferiti a metà piega.



Gli output, indicati nella terza colonna, sono tutti da minimizzare; chiaramente sono preferibili i più bassi valori possibili per l'assottigliamento e per le tensioni al fine di ridurre le probabilità di rottura durante il processo di produzione o in funzionamento. Anche le rigidzze sono da minimizzare in modo che il giunto effettui la corsa richiesta senza indurre forze elevate. Quella effettuata è dunque una ottimiz-

2. Modello per la simulazione di processo (a); modello completo a 5 righe (b).

la lunghezza di montaggio; per completezza è stata monitorata anche la massima tensione equivalente in fase di formatura. Il vincolo di fattibilità impone invece che la piega sia sufficientemente formata, at-

Variabili	Parametri fissi	Output	Vincoli
p	15÷50 [bar]	Dint 100 mm	Stress max formatura [MPa]
P	4÷7 [mm]		Strain max formatura [-]
L	15÷25 [mm]	Corsa ± 1.5625 mm	Lunghezza libera [mm]
r	1.5÷5 [mm]		Stress max estens. [MPa]
s	0.1÷0.3 [mm]	P montaggio 5.5 mm	Stress max compress. [MPa]
			Rigidezza estens [N/mm]
			Rigidezza compress [N/mm]

Tabella 2. Parametri di progetto.

zazione multi-obiettivo, alla quale sono stati inoltre applicati vincoli di fattibilità geometrici.

Per quanto riguarda la lunghezza libera, sebbene la cedevolezza del giunto garantisca sempre il montaggio, risulta in generale preferibile che essa non si discosti troppo dal-

Tabella 1. Caratteristiche del materiale acciaio AIS I316L in lamiera sottile [4].

Modulo elastico [MPa]	Tensione di snervamento [MPa]	Modulo tangente [MPa]
193000	200	1300

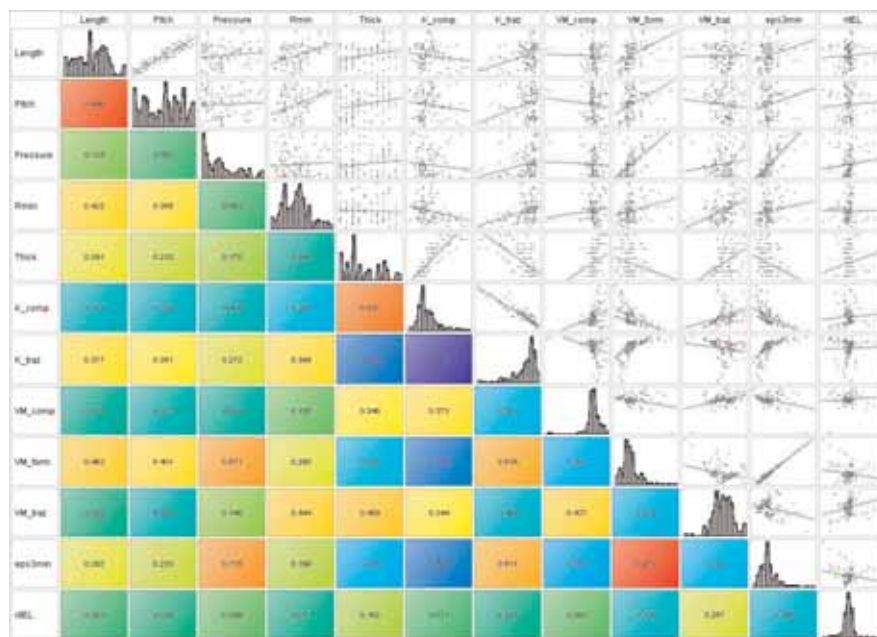
tribuendo al giunto la forma di soffiutto, e possa raccordarsi alle flange di attacco esterne.

La figura 3 mostra gli istanti successivi nella simulazione, utilizzando i seguenti parametri di input: $p = 20$ bar, $s = 0,2$ mm, $L = 20$ mm, $P = 5,5$ mm, $r = 2,65$ mm; questi valori rappresentano la situazione di riferimento da ottimizzare.

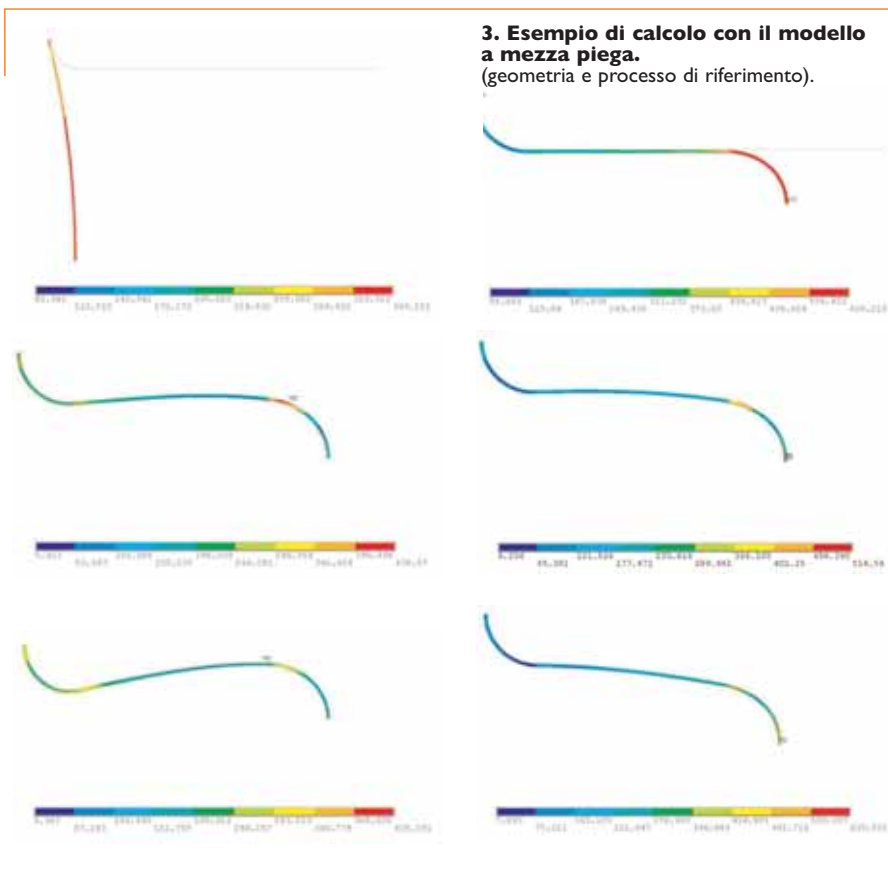
Attraverso il software modeFrontier è stata implementata una procedura automatica per l'effettuazione di numerose simulazioni Fem con diversi valori dei suddetti parametri di input. Lo spazio multidimensionale di input

è stato indagato secondo una sequenza Doe quasi-random denominata Sobol, che effettua una scansione pressoché uniforme dello spazio utilizzando 200 diverse configurazioni. Le simulazioni effettuate secondo il suddetto piano Doe hanno consentito di stabilire statisticamente i principali effetti delle variabili di processo sugli output; un modo efficace per sintetizzare le relazioni esistenti tra i diversi parametri in gioco è quello della matrice di correlazione, riportata in figura 4, in cui il colore di ciascuna casella sotto la diagonale indica il coefficiente della retta di regressione tra le variabili lette (sulle righe e sulle colonne).

Si segnalano alcuni dei risultati più significativi: si è verificata una notevole linearità (+0.97) tra la tensione massima equivalente e l'assottigliamento in fase di formatura, significando che la flessione a cui è sottoposta la piega non altera la situazione rispetto a quello che si avrebbe in idroformatura pura, pertanto si sarebbe potuto considerare una



4. Matrice di correlazione.



3. Esempio di calcolo con il modello a mezza piega. (geometria e processo di riferimento).

sola di queste due variabili di output; tuttavia le cose cambiano se si considerano le tensioni massime in esercizio, le quali risultano molto meno collegate allo spessore di fine formatura, presentando un coefficiente di correlazione lineare con la terza deformazione principale pari a -0,31 e -0,37 rispettivamente per la fase di estensione e compressione.

Si è avuta una notevole correlazione, come era lecito aspettarsi, tra le rigidzze in allungamento ed accorciamento, significando che le due rigidzze del soffietto, pur essendo diverse, presentano andamenti simili tra loro al variare dei parametri di progetto; il fattore più importante che le influenza risulta essere lo spessore s , mentre la lunghezza L e la pressione p risultano quasi indifferenti e non esibiscono in media un grande effetto su tale output. Infine, un'altra correlazione lineare notevole riguarda la pressione il cui valore elevato, come era lecito aspettarsi, tende ad incrementare l'assottigliamento.

Ottimizzazione del processo e del prodotto

I risultati delle simulazioni sono stati utilizzati per generare delle superfici di risposta,

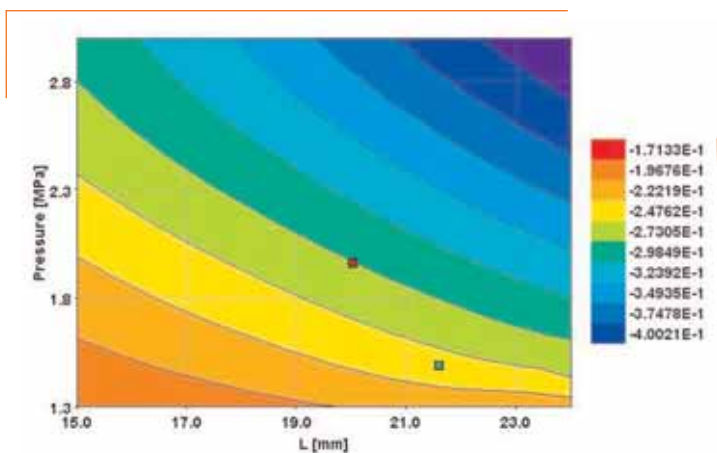
una per ogni variabile di output, con la tecnica delle reti neurali di tipo feedforward [7, 8] a 6 neuroni nello strato nascosto. In questo modo la ricerca dell'ottimo, che tipicamente richiede l'esecuzione di numerose simulazioni, è stata affidata alla superficie di risposta stessa la quale viene "interrogata" per fornire i valori di output dei numerosi design-sets, necessari ad indagare con sufficiente risoluzione il dominio degli input senza dover ricorrere ogni volta ad una vera simulazione agli elementi finiti.

In questo lavoro, i diversi design-set sono stati generati attraverso l'algoritmo genetico MOGA [9, 10], con 30 diverse popolazioni della stessa dimensione del piano Doe iniziale, per un totale di circa 60 mila campioni calcolati però in pochi secondi dalle superfici di risposta.

In figura 5 è riportata ad esempio la superficie di risposta per la deformazione principale minima in funzione della pressione e della lunghezza del tubo; i quadrati in rosso e verde indicano rispettivamente la configurazione di riferimento e quella ottimizzata, che verrà illustrata più avanti.

Va a questo punto ricordato che nel caso di ottimizzazione multi-obiettivo, non si può parlare di un'unica soluzione migliore delle altre; bensì è più corretto introdurre il concetto di dominanza e parlare di una serie di design, o individui, che prevalgono sugli altri [10].

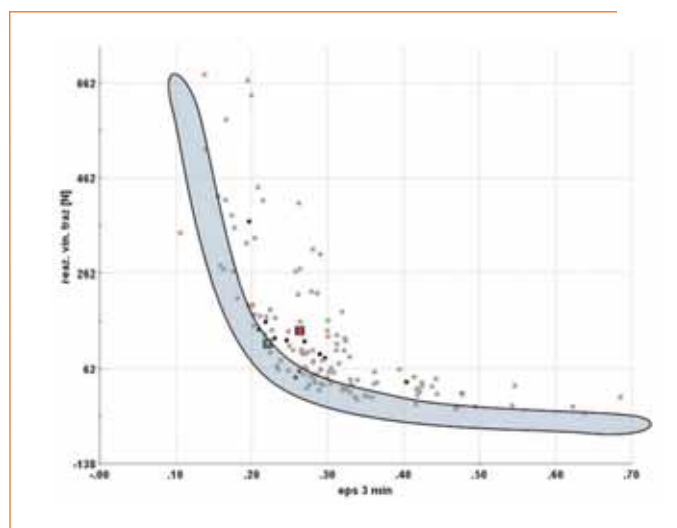
Nella fattispecie, si sono individuate all'interno del range di variazione ammesso tutte le soluzioni non-dominate, costituenti la



5. Esempio di superficie di risposta di risposta ottenuta per la deformazione principale minima.

Output y_i	w_i	Rif.	# 1	Diff %	# 2	Diff %
ϵ_3 formatura [mm/mm]	0.42	-0.257	-0.221	-14.0	-0.228	-11.3
σ_{VM} estens. [MPa]	0.17	623	519 -	16.7	539	-13.5
σ_{VM} compr. [MPa]	0.17	401	376	-6.2	377	-6.0
K estens. [N/mm]	0.08	12.5	9.6	-23.2	12.1	-3.2
K compr. [N/mm]	0.08	10.2	7.5	-26.5	9.5 -	6.9
ΔP montaggio [mm]	0.04	0.85	0.23	-72.9	0.72	-15.3
σ_{VM} formatura [MPa]	0.04	625	600	-4.0	618	-1.1
ranking	1.00	0.83	0.90			

Tabella 3. Risultato dell'ottimizzazione.



6. Dispersione dei vari design set nel piano degli output.

cosiddetta frontiera limite di Pareto, e tra queste sono state successivamente selezionate solo quelle che dominano la soluzione di riferimento, in modo da migliorare tutti gli obiettivi.

In figura 6 è visibile la dispersione dei vari design-set nel piano di due variabili di output; la banda in semitrasparenza indica quella che può essere considerata la frontiera di Pareto (limitatamente ai due output indicati sugli assi), mentre in rosso e in verde sono evidenziate ancora la situazione di riferimento e quella ottimizzata.

Dovendo alla fine scegliere una e una sola

configurazione, ci si è ricondotti alla valutazione in termini di un unico ranking da attribuire ai migliori design - set sopra individuati, in modo analogo a quanto avviene nelle più comuni ottimizzazioni mono-obiettivo. Il punteggio di un generico design - set è stato calcolato con la relazione:

$$\text{ranking} = \sum_{i=1}^N w_i \frac{y_i}{\bar{y}_i} \quad (1)$$

dove N è il numero dei parametri di output, w_i è il peso associato all' i -esimo output y_i , e rappresenta l' i -esimo output per la soluzione di partenza.

In tabella 3 sono riportati i valori del peso scelti, nonché i risultati in termini di output e ranking complessivo per la situazione di riferimento e per due soluzioni ottenute con la procedura multi-obiettivo.

La soluzione 1 migliora notevolmente i parametri di output, con un ranking complessivo di 0,83, utilizzando il seguente set di parametri: $p = 13,6$ bar, $s = 0,166$ mm, L

$= 20,23$ mm, $P = 5,35$ mm, $r = 2,0$ mm. Come soluzione 2 si è indicata invece la migliore fra quelle aventi uno spessore di tubo reperibile in commercio; i parametri in questo caso sono: $p = 15,5$ bar, $s = 0,2$ mm, $L = 21,6$ mm, $P = 5,75$ mm, $r = 2,3$ mm. Anche questa soluzione, seppur con un ranking complessivo leggermente più alto (0,90), ha evidenziato un buon margine di miglioramento per tutti gli obiettivi e può considerarsi la configurazione migliore da un punto di vista applicativo.

M. Sasso, D. Amodio, Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Meccanica.

F. Tagliaferri, Polo Srl, Calenzano (FI).

L'articolo è tratto dalla relazione dal titolo "Ottimizzazione di un giunto di dilatazione assiale ottenuto per idroformatura" presentata al XXXVIII Convegno Aias di Torino.

readerservice@fieramilanoeditore.it n.72

Bibliografia

- [1] W. Zimmermann and H.-U. Lücke, "Reducing Part Costs for Hydroforming", TPJ Nov/Dec 1998.
- [2] A. Böhm, "Hydroforming: State of the Art". Technical paper of 14th Annual World Tube Congress, Cleveland - Ohio 1998.
- [3] K. Siegert, *Hydroforming of tubes, Extrusions and Sheet Metals*, Vol. 1, Klaus Siegert Ed. 2001.
- [4] Y. Tamarin, *Handbook of Stress-Strain Curves*, ASM International, 2002.
- [5] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, Wiley & Sons, 2001.
- [6] R. Bose, B. Manvel, *Introduction to Combinatorial Theory*, Wiley & Sons, 1984.
- [7] S. Haykin, *Neural Networks - A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall International Editions, 1999.
- [8] M.T. Hagan, M.B. Menhaj, "Training Feedforward Networks with the Marquardt Algorithm", IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 5, (6) 1994.
- [9] K. Deb, "Multi-Objective Genetic Algorithm, Problem Difficulties and Construction of Test Problems", *Evolutionary Computations*, 7 (3), 205-230, 1999.
- [10] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Wiley & Sons, 2001.



**SOFTWARE AD ALTE
PRESTAZIONI PER LE NUOVE
TECNOLOGIE.
NON POTRETE PIÙ FARNE A
MENO!**

readerservice.it n.25011

Grazie ai nostri prodotti di simulazione CAE (Computer Aided Engineering) centinaia di aziende italiane hanno ridotto i loro tempi di progettazione ottenendo notevoli vantaggi economici. La soddisfazione dei nostri clienti deriva anche dall'accuratezza e facilità d'uso dei nostri software e dal tempismo ed efficacia del nostro supporto tecnico on-line.

Richiedi informazioni su come SmartCAE può risolvere anche i tuoi problemi di ingegneria.
Analisi Statica Lineare e Non-lineare + Analisi Termica + Dinamica + Vibrazioni + Shock + Materiali Compositi + Simulazione di Impatto + Fatica + Cinetodinamica + Fluido Dinamica Computazionale.

Contattaci per ottenere una prova gratuita nella tua Azienda chiamando lo **0574-404642** o inviando una e-mail a info@smartcae.com

 **SmartCAE**

Simulate more, innovate faster

SmartCAE srl

www.smartcae.com
info@smartcae.com