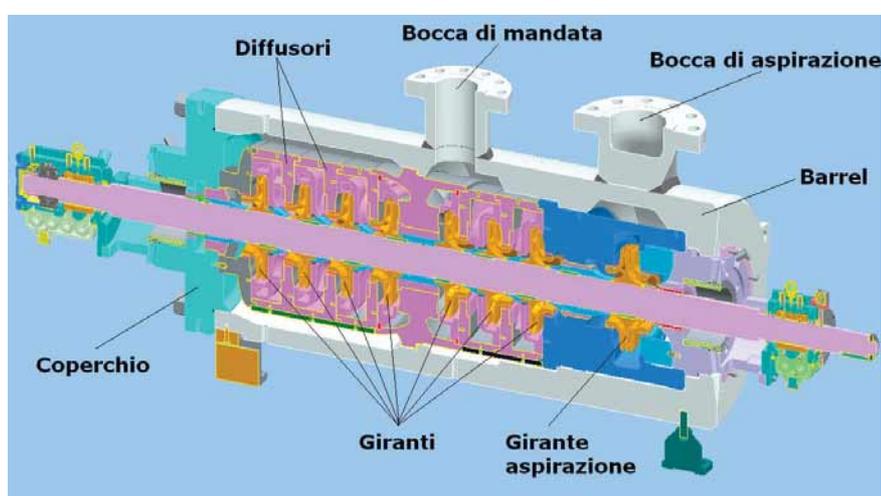


Dimensioniamo la pompa



1. Sezione di una pompa multistadio tipo barrel.

La pompa presa in considerazione in questo lavoro è una pompa centrifuga orizzontale di tipo multistadio (figura 1), nella quale il componente resistente alla pressione è costituito da un cilindro a grosso spessore (barrel) chiuso ad un'estremità da un coperchio. L'interno del barrel è sagomato in modo tale da accogliere la serie di diffusori e giranti: la disposizione è a stadi contrapposti, in modo da bilanciare la spinta assiale generata dalle giranti.

La prevalenza potenzialmente sviluppabile da questa pompa è di circa 1.200 m equivalente a una pressione di mandata di 120 bar in acqua, considerando una pressione in aspirazione a livello atmosferico.

Le norme di riferimento per questa tipologia di pompe sono le norme americane Api 610. Tali norme forniscono le linee guida per la pro-

gettazione di base e i livelli di accettabilità per quanto riguarda la resistenza strutturale. In particolare la pompa deve essere in grado di resistere a due condizioni di carico. La prima corrisponde alla simulazione del normale funzionamento della pompa, per la quale è richiesta la resistenza delle parti in pressione alla Mawp (maximum allowable working pressure), definita come la massima pressione di mandata incrementata del 10% della massima pressione differenziale sviluppabile dalla pompa. Nel nostro caso la Mawp deve essere almeno pari a 132 bar. La seconda condizione di carico è costituita dalla prova idrostatica (hydrotest), richiesta per verificare la tenuta delle parti in pressione. In tale test il barrel viene sottoposto ad una pressione di 1,5 volte la Mawp per almeno trenta minuti.

Nel settore delle raffinerie e delle centrali di generazione di potenza si è assistito allo svilupparsi di condizioni operative sempre più gravose. Di conseguenza, componenti essenziali come le pompe centrifughe devono poter funzionare a pressioni di esercizio sempre maggiori, dell'ordine di 300 bar e temperature di oltre 200 °C

Tabella 1.
Proprietà meccaniche secondo le norme
Asme dei materiali del barrel (T=20 °C).

Materiale	Astm	Uns	Modulo di Young [N/mm ²]	Modulo di Poisson	Tensione di rottura [N/mm ²]	Tensione di snervamento [N/mm ²]	Tensione ammissibile [N/mm ²]
Acciaio basso legato	A 266 Gr2	K03506	206000	0,27	483	248	121
Acciaio inox austenitico	A 182 F316L	S31603	200000	0,27	448	172	112
Acciaio inox martensitico	A 182 F6NM	S41500	220000	0,27	793	650	198
Acciaio inox duplex	A 182 F51	S31803	190000	0,27	650	448	162

Con questo lavoro si è voluto verificare se questi livelli di carico siano sostenibili con tutti i materiali normalmente utilizzati per la fabbricazione del barrel.

Caratteristiche del materiale

Il barrel viene ottenuto mediante un processo di forgiatura seguito da un trattamento termico adeguato al materiale. Come ultima operazione viene eseguita la saldatura delle bocche di aspirazione e mandata.

In molte applicazioni il fluido pompato può essere corrosivo: a lungo termine questa condizione può determinare una pericolosa diminuzione dello spessore del barrel.

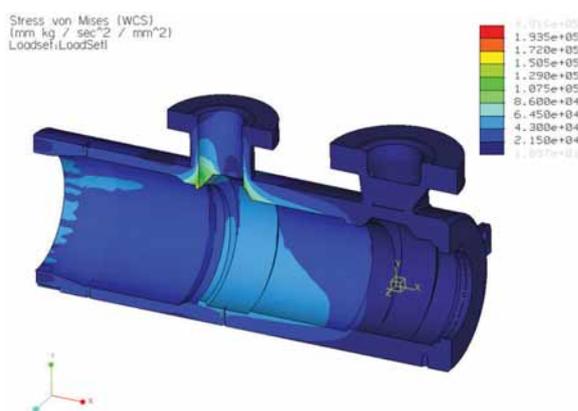
Per tenere conto di ciò, nella condizione di carico corrispondente alla Mawp, si diminuisce di 3 mm lo spessore utile lungo tutto il componente. È la cosiddetta corrosion allowance prevista dalle Api 610.

I materiali normalmente utilizzati per il barrel sono di tre tipi: acciai basso legati, acciai inossidabili e leghe del nickel.

Le caratteristiche meccaniche considerate sono quelle fornite dalle norme Asme per i rispettivi

2. Sforzo di von Mises, set di carico Mawp.

materiali. La sollecitazione ammissibile è definita come un quarto della tensione di rottura (definizione secondo le Api 610), valore da non superare nelle zone dove si hanno le sollecitazioni nominali, ad esempio nel fasciame cilindrico, lontano quindi da regioni caratterizzate da gradienti di sforzo. In tabella 1 sono riportate le proprietà meccaniche dei materiali classificati secondo le sigle Astm, alla temperatura di 20 °C.

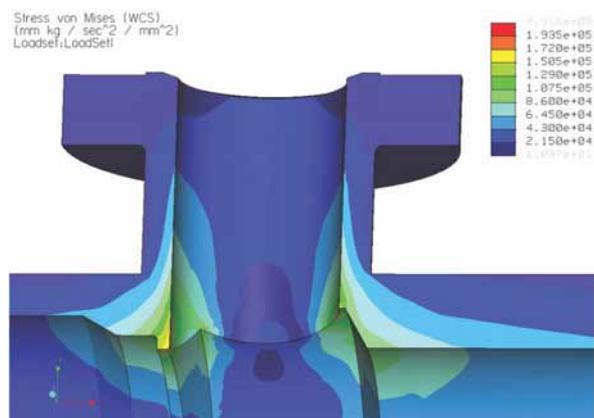


Modello numerico lineare

La geometria corrispondente al barrel è stata modellata con un Cad tridimensionale (Pro/Engineer), trascurando tutti i particolari non funzio-

nali alla resistenza strutturale (raccordi, smussi, ecc.). Per alleggerire l'analisi numerica si è sfruttata la simmetria del modello considerando metà barrel. Come codice di simulazione agli elementi finiti si è utilizzato Pro/Mechanica. Questo software è basato sull'utilizzo di elementi di tipo p. Questi elementi hanno il vantaggio di poter variare il grado (da 1 a 9) della funzione di forma a seconda del gradiente di sforzo. In tal modo la mesh può risultare più grossolana rispetto alle mesh realizzate con elementi tradizionali di tipo h. Il software esegue un primo calcolo con grado del polinomio 3, poi valuta le zone dove è presente un elevato gradiente di sforzo ed incrementa di conseguenza il grado della funzione di forma. La mesh ha previsto 150.00 elementi solidi tetraedrici.

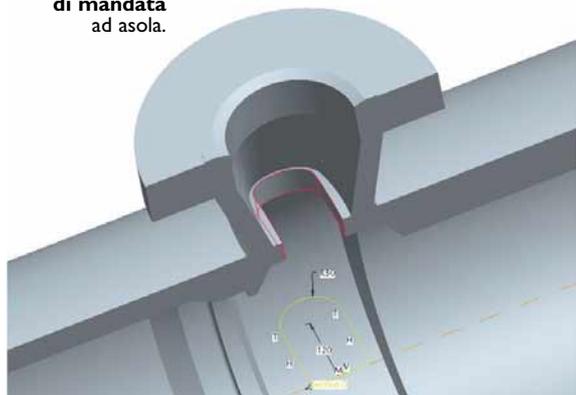
3. Sforzo di von Mises nella bocca di mandata, set di carico Mawp.



Carichi e vincoli

Sono stati considerati due set di carico: il primo Mawp: è stata applicata una pressione diversa nelle tre regioni (aspirazione, intermedia e mandata); sono state, inoltre, considerate le forze scambiate dai coperchi con il barrel. Come carico di pressione limite si è considerato quello che determinava il raggiungimento dello snerva-

4. Bocca di mandata ad asola.



più sollecitate in condizioni di lavoro. Ci si è focalizzati di conseguenza sulla bocca di mandata. Nei paragrafi seguenti sono riportati i risultati relativi a due approcci differenti per affrontare questo problema: il primo si basa su ciò che consigliano le norme Asme in termini di rinforzi di bocchelli in serbatoi cilindrici, il secondo approccio si basa, invece, sulla modifica della forma della bocca di mandata.

mento in prossimità della bocca di mandata. Il secondo Hydrotest: è stata applicata una pressione uniforme alla superficie interna del barrel pari a 1,5 volte la pressione Mawp. Allo stesso modo sono state applicate le forze scambiate con i coperchi. Con tale set di carico non è stata considerata la corrosion allowanc in quanto la prova idrostatica viene eseguita una volta sola a macchina nuova. I vincoli applicati al modello sono stati quelli di simmetria e quelli relativi ai piedi di fissaggio del corpo pompa al basamento.

Risultati del modello originale

I risultati riportati si riferiscono a una Mawp di 109 bar, condizione limite per il materiale più carente dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche (A 182 F316L). Le analisi hanno considerato un materiale con comportamento perfettamente elastico. In figura 2 è mostrato l'andamento dello sforzo di von Mises per il set di carico Mawp. Come si può notare la zona più critica risulta il foro della bocca di mandata (figura 3) dove si raggiunge lo snervamento (172 N/mm²). Nel fasciame cilindrico la sollecitazione di von Mises si attesta sui 58 N/mm² nella zona di pressione di mandata, 50 N/mm² nella regione a pressione intermedia e 27 N/mm² nella regione di aspirazione. Tali sforzi sono ben inferiori al valore di sollecitazione nominale ammissibile dato dalle Api 610 per questo materiale (112 N/mm²). La pressione limite considerata, 109 bar, è da ritenersi insufficiente per le potenzialità della pompa, in quanto come osservato in precedenza, la Mawp deve essere almeno pari a 132 bar. Nasce quindi l'esigenza di introdurre delle modifiche geometriche nelle regioni

Risultati modello modificato

Le norme Asme (Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII - Division 1, part UG) propongono di rinforzare il mantello esterno del recipiente in pressione applicando un collare di sezione rettangolare avente un'area tale da compensare l'indebolimento strutturale causato dal foro nel mantello stesso. Si rimanda al testo della norma per una descrizione completa della procedura.

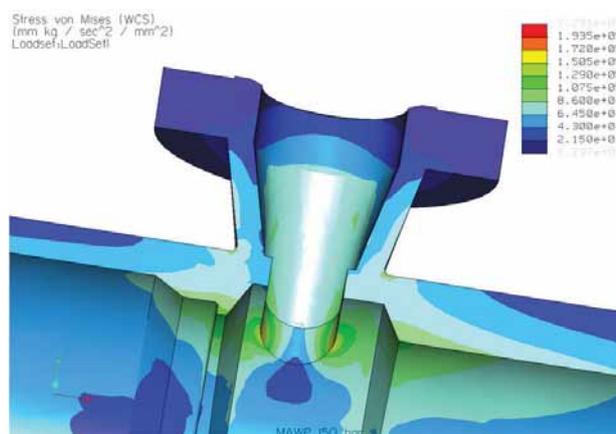
nali proposti dalle norme. Si è quindi deciso di modificare radicalmente la forma della bocca di mandata in modo da perturbare il meno possibile l'integrità strutturale del barrel.

Bocca di mandata modificata

Lo stato di sforzo in corrispondenza della bocca di mandata risente dell'effetto di intaglio introdotto dal foro circolare in modo simile a quello che si avrebbe in una lastra piana. Per migliorare la distribuzione delle sollecitazioni si è pensato quindi di passare da un foro cilindrico ad uno di forma ad asola (figura 4). Il profilo è stato ottimizzato tenendo in considerazione alcuni vincoli fondamentali quali la fattibilità della saldatura tra barrel e bocca di mandata ed il mantenimento dell'area di passaggio del fluido (31.850 mm² per la bocca ad asola, 31.400 mm² per quella circolare). Questa modifica determina una netta diminuzione degli sforzi circonferenziali nella zona critica.

Consideriamo il set di carico Mawp: come è evidente in figura 5 lo sforzo di von Mises raggiunge la condizione limite di snervamento con una pressione di 150 bar, il 37% superiore ri-

5. Sforzo di von Mises nella bocca ad asola, set di carico Mawp.

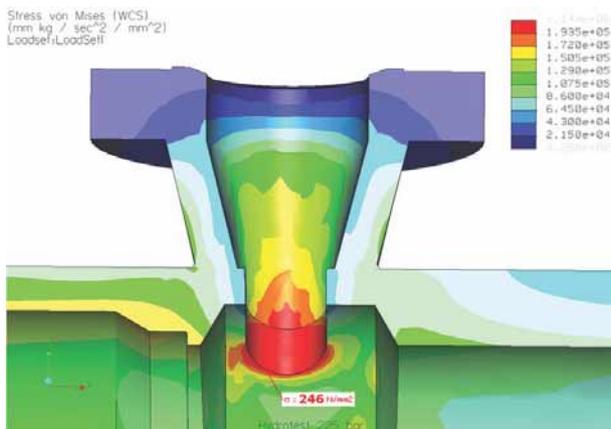


In questo caso occorrerebbe un collare di sezione 55x35 mm. Secondo le norme Asme l'effetto del bocchello sarebbe in questo modo attenuato. Simulando numericamente il modello si vede, però, che l'efficacia di questa modifica è molto limitata. Lo sforzo di von Mises scende solamente del 3%, da 172 N/mm² a 167 N/mm². Questo dimostra come i programmi basati sugli elementi finiti permettano un'analisi di dettaglio molto più raffinata rispetto ai metodi tradizio-

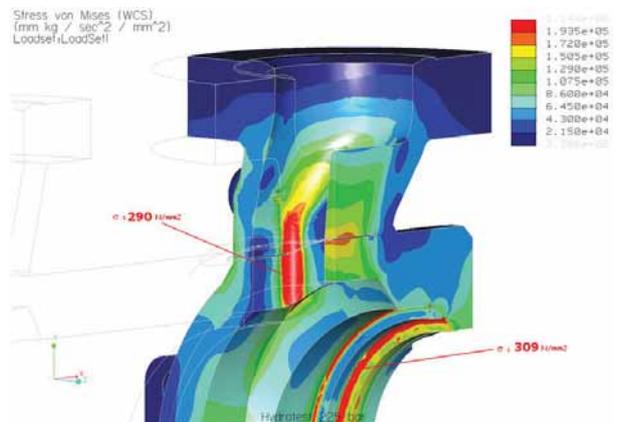
spetto alla pressione limite nel caso di foro circolare (109 bar).

I risultati relativi al set di carico hydrotest (225 bar) mostrano come lo sforzo di von Mises (figure 6-7) oltrepassi lo snervamento in prossimità della bocca di mandata (246 N/mm²), nei raccordi della bocca di aspirazione (290 N/mm²) e nei raccordi della sede di appoggio del coperchio lato aspirazione (309 N/mm²).

Da questi ultimi risultati appare evidente il li-



6. Sforzo di von Mises nella bocca di mandata, set di carico hydrotest.



7. Sforzo di von Mises nella bocca di aspirazione, set di carico hydrotest.

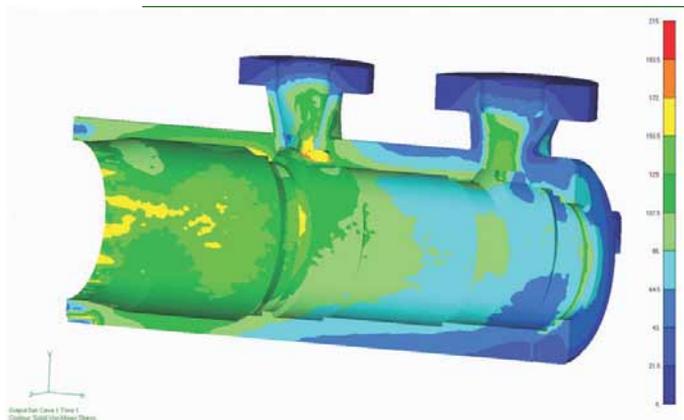
mite dell'ipotesi di materiale lineare perfettamente elastico. Per rimanere entro il limite elastico saremmo costretti a limitare notevolmente i carichi (pressione) applicati. Nasce quindi l'esigenza di simulare in modo più aderente alla realtà il comportamento del materiale, eseguendo un'analisi elasto-plastica. Nel caso specifico si è considerato un legame costitutivo bi-lineare che rappresenta in modo piuttosto fedele la curva sforzi-deformazioni dell'acciaio austenitico A 182 F316L.

Modello numerico elasto-plastico

La geometria in formato Step è stata importata nell'ambiente di pre-processing Femap 8.3, dove si è realizzata la mesh con elementi tetraedrici lineari (139.000). Si sono previsti tre set di carico: hydrotest, scarico e Mawp, applicati in sequenza come nella realtà. I vincoli sono gli stessi di quelli considerati nel modello lineare.

L'analisi è stata eseguita con Nastran 2004. Con il primo set di carico hydrotest si vede che l'an-

9. Sforzo di von Mises, set di carico hydrotest.



damento dello sforzo di von Mises (figura 9) nelle bocche di mandata e aspirazione supera di poco (175 N/mm²) lo snervamento. Questa è una conseguenza della legge costitutiva del materiale (figura 8) che oltre lo snervamento è caratterizzata da un basso coefficiente di proporzionalità tra sforzi e deformazioni.

Conclusioni

Con il presente articolo si è voluto ottimizzare la resistenza strutturale del principale componente in pressione (barrel) di una pompa multistadio. I codici attuali di calcolo hanno

permesso di gestire efficacemente il modello numerico, dimostrando ancora una volta la validità di questi strumenti per la progettazione meccanica di base. In particolare l'efficacia dell'analisi numerica appare evidente nei confronti dei metodi progettuali proposti dalle norme. Un aspetto che si rivela critico nel caso di strutture con effetti di intaglio è l'utilizzo di leg-

gi costitutive puramente lineari. Questo impedisce, infatti, di valutare la redistribuzione dello sforzo in campo plastico. Dal punto di vista progettuale un'alternativa sarebbe quella di limitare i carichi esterni in modo da rimanere in campo elastico. Tale approccio appare del tutto inadeguato per le esigenze del mondo industriale. Di conseguenza occorre modificare la legge costitutiva del materiale fin qui considerata per poter effettuare un'analisi in campo plastico. Se da un lato questa tipologia di analisi si rivela più delicata e dispendiosa in termini di tempi di calcolo, dall'altro si dimostra come l'approccio da tenere in considerazione per le future analisi strutturali.

D. Cassani, M. Cipolla, Weir Gabbioneta, R&D department.

readerservice.it n. 252

8. Legge costitutiva Aisi 316L.

