

Un progetto di calettatori ad attrito



MAV ha svolto uno studio approfondito sui calettatori per la determinazione accurata dei fattori di concentrazione di pressione mediante analisi FEM.

Al giorno d'oggi uno dei più importanti obiettivi per chi progetta e produce componenti meccanici è certamente quello di fornire al cliente prodotti di qualità sempre più elevata, affiancati da precise indicazioni circa le prestazioni che essi possono offrire.

Per questo motivo Mav S.p.A., azienda affermata nella produzione di calettatori e shrink disk, ha investito già da diversi anni nella simulazione numerica, da un lato nel tentativo di migliorare i componenti in produzione e dall'altro come supporto alla progettazione.

SD Sandro Zamboni
Massimiliano Margonari

Le prove di laboratorio sono state quindi drasticamente diminuite, limitando il loro impiego alla sola validazione di determinate configurazioni, con una notevole riduzione dei tempi e dei costi per la certificazione di nuovi prodotti. Le ragioni che hanno spinto l'ufficio tecnico di MAV a compiere questa scelta sono molteplici e di differente natura. In primo luogo, certamente, la convinzione della dirigenza che investire nella ricerca applicata e nella simulazione numerica, sia un buon modo per garantire migliori risultati a minor costo, con evidenti benefici; in secondo luogo la crescente esigenza tecnica di avere strumenti veloci, affidabili e accurati per rispondere sempre meglio alle richieste del mercato.

I dati tecnici di maggior interesse per un progettista meccanico che faccia uso di un calettatore sono solitamente i valori di massimo momento torcente e flettente trasmissibili. Questi valori (una volta fissata la geometria, i coefficienti di attrito fra le superfici e la forza di precarico adottata per le viti) possono essere calcolati con l'aiuto di alcune equazioni, ricavate da modelli semplificati, largamente accettati e utilizzati dai progettisti.

I risultati così ottenuti sono sempre a favore di sicurezza; i modelli matematici forniscono spesso valori delle azioni trasmissibili ben al di sotto delle reali capacità del sistema, come è stato possibile appurare grazie a campagne di prove condotte da MAV su diverse tipologie di prodotti.

È interessante conoscere la distribuzione della pressione di contatto che si sviluppa fra calettatore e albero, nelle varie condizioni alle quali il sistema si viene a trovare durante il ciclo di vita, in particolare durante il montaggio e in alcune situazioni operative.

Sfortunatamente non esistono modelli semplificati che possano dare indicazioni sulla distribuzione di tensione che il calettatore genera sui componenti meccanici che esso connette. Si tenga presente, inoltre, che non esistono test di laboratorio che siano in grado di dare risposte, anche parziali, a questo tipo di problematiche.

In letteratura esistono dei risultati ottenuti all'inizio degli anni Ottanta con alcune indicazioni in proposito; essi sono stati ricavati mediante analisi a elementi

finiti di modelli assialsimmetrici estremamente semplificati, anche a causa, probabilmente, delle scarse risorse hardware e software disponibili al tempo. In ogni caso, le informazioni che si possono trarre da modelli di calcolo bidimensionali sono senza dubbio interessanti, come già sperimentato anche in MAV, ma essi non riescono a dare alcuna indicazione sul comportamento dei calettatori in prossimità dei tagli negli anelli, là dove sono attesi i picchi di tensione.

La determinazione accurata della distribuzione delle pressioni di contatto non è una questione di poco conto. Conoscere la posizione e l'intensità di eventuali picchi di tensione rende più agevole il lavoro del progettista, che sarà quindi in grado di sfruttare al meglio, e fino in fondo, le capacità meccaniche del sistema in esame, mantenendo in ogni caso adeguati livelli di sicurezza.

Per far maggior luce su questo aspetto, MAV ha intrapreso uno studio dettagliato, utilizzando un approccio interamente numerico, finalizzato alla ricerca di informazioni più precise e attendibili circa la reale distribuzione degli sforzi generati su un albero da un organo di calettamento.

Sono state prese in considerazione le serie MAV 1008, 4061, 2005 e 1061, e per ognuna di esse sono state esaminate quattro diverse misure di albero, per avere una visione il più ampia e dettagliata possibile. Si è voluto inoltre considerare modelli tridimensionali con una notevole accuratezza nella descrizione delle geometrie, dando così vita a dei modelli molto impegnativi, anche dal punto di vista computazionale.

Come funziona un calettatore

Nelle figure 1 e 2 sono riportate le quattro diverse tipologie di calettatori che sono state prese in considerazione per questo studio. Nelle tabelle 1 e 2 sono inoltre raccolte informazioni salienti sulle geometrie, le viti utilizzate e i valori di riferimento teorici delle pressioni di contatto ottenuti con modelli semplificati.

Il principio sul quale si basa il funzionamento dei calettatori è piuttosto semplice: degli anelli con profili conici vengono avvicinati fra di loro mediante il tiro di alcune viti, generando così delle pressioni di contatto piuttosto elevate fra l'albero, il mozzo e il calettatore stesso. Questo consente di mantenere salde fra di loro le varie parti e di trasmettere il moto.

Gli anelli in contatto con l'albero e il mozzo hanno sempre un taglio longitudinale per ridurre la rigidità circonferenziale, consentendo così una più facile e migliore chiusura dei giochi eventualmente presenti fra le varie componenti. Il calettatore viene solitamente montato sull'albero e le viti vengono

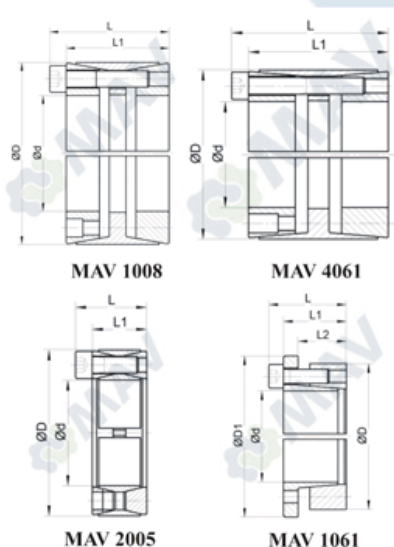


Fig. 2 - Sezioni longitudinali dei calettatori MAV 1008, 4061, 2005 e 1061 riportanti le quote di maggior interesse.

precaricate utilizzando la ben nota regola della croce, per limitare possibili eccentricità nella configurazione finale. Il mozzo è posizionato esternamente al calettatore e consente la trasmissione del moto; esso deve essere opportunamente dimensionato per contrastare efficacemente la deformata radiale del calettatore e può esso stesso, per ragioni di spazio ma an-

TAB. 1 - DIMENSIONI DEI CALETTATORI E DEI MOZZI ADOTTATI PER LO STUDIO. IL DIAMETRO DELL'ALBERO È DA INTENDERSI UGUALE AL DIAMETRO INTERNO d DEL CALETTATORE

	Dimensioni [mm]							
	Calettatore				Mozzo			
MAV 1008	d	D	L	$L1$	Diametro esterno	Profondità		
70 x 110	70	110	74	66	150	60		
100 x 145	100	145	114	102	300	100		
200 x 260	200	260	165	149	450	140		
400 x 495	400	495	225	203	900	200		
MAV 4061	d	D	L	$L1$	Diametro esterno	Profondità		
50 x 80	50	80	74	66	150	60		
100 x 145	100	145	114	102	300	100		
200 x 260	200	260	165	149	450	140		
400 x 495	400	495	225	203	900	200		
MAV 2005	d	D	L	$L1$	Diametro esterno	Profondità		
50 x 80	50	80	32	24	150	28		
100 x 145	100	145	45	33	360	40		
200 x 260	200	260	66	52	580	58		
400 x 495	400	495	112	90	990	100		
MAV 1061	d	D	$D1$	$L2$	$L1$	L	Diametro esterno	Profondità
50 x 80	50	80	89	27	35	43	150	27
100 x 145	100	145	154	33	45	57	290	33
200 x 260	200	260	269	51	65	79	480	51
400 x 495	400	495	504	94	116	138	910	94

TAB. 2 - TIPOLOGIA E NUMERO DI VITI DEI CALETTATORI PRESI IN ESAME

	Viti (classe 12.9) Numero tipo	Pressione media teorica [MPa]		Massima torsione trasmissibile teorica [N mm]
		sull'albero	sul mozzo	
MAV 1008				
70 x 110	8 M10	197	125	7280·10 ³
100 x 145	10 M12	215	148	19400·10 ³
200 x 260	18 M14	166	128	95300·10 ³
400 x 495	22 M22	168	136	609500·10 ³
MAV 4061				
50 x 80	8 M8	198	124	4120·10 ³
100 x 145	11 M12	210	145	27700·10 ³
200 x 260	16 M16	181	139	149900·10 ³
400 x 495	24 M22	188	152	863900·10 ³
MAV 2005				
50 x 80	12 M8	282	176	2160·10 ³
100 x 145	14 M12	307	214	11690·10 ³
200 x 260	30 M14	254	195	65450·10 ³
400 x 495	36 M22	218	176	393360·10 ³
MAV 1061				
50 x 80	7 M8	191	119	1800·10 ³
100 x 145	8 M12	206	142	10100·10 ³
200 x 260	15 M14	153	118	50900·10 ³
400 x 495	21 M22	146	118	377900·10 ³

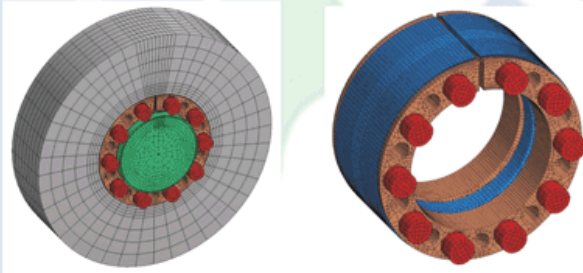
Sono riportate inoltre le pressioni medie di contatto generate sull'albero e sul mozzo calcolate con modelli semplificati e il massimo momento torcente trasmissibile, ipotizzando un coefficiente di attrito pari a 0,12 e delle distribuzioni uniformi delle pressioni.

che stilistiche e di economia, integrare tamburi, ruote dentate o qualsiasi altro componente meccanico si renda necessario.

Una volta che il precarico viti è stato assegnato, il sistema è costituito da parti ben solidali fra loro e può essere assoggettato ai carichi esterni.

Il MAV 1008 e 2005 sono definiti calettatori autsbloccanti. Se le viti vengono rimosse una volta montato il calettatore, essi tenderanno a smontarsi e riprendere la configurazione indeformata iniziale. Questo è dovuto al fatto che gli anelli hanno un profilo con elevata conicità (8, 10 gradi) e il coefficiente di attrito, che solitamente viene stimato pari a 0,12, non è sufficientemente elevato per tenere le varie parti in configurazione deformata. Questa

Fig. 3 - Mesh del calettatore MAV 1008 100 x 145, dell'albero e del mozzo (a sinistra) e del solo calettatore (a destra).



è una caratteristica molto apprezzata quando il calettatore deve essere montato e smontato numerose volte durante il suo ciclo di vita. Al contrario il MAV 4061 e 1061 sono detti autobloccanti; grazie infatti a dei profili conici inferiori a 5 gradi, essi sono caratterizzati da un comportamento opposto a quello descritto sopra.

In questo caso le viti non hanno particolari compiti strutturali, ma devono solo consentire di deformare opportunamente gli anelli.

Come è facile comprendere, la pressione che nasce sull'albero non ha una distribuzione uniforme (condizione questa da considerarsi come ideale), ma presenta delle variazioni sia in direzione longitudinale che circonferenziale, a causa della variabile rigidità dei fori degli anelli che costituiscono il calettatore (esempi in figura 7 e 8). Inoltre, i tagli negli anelli a contatto con albero e mozzo, come accennato in precedenza, costituiscono un elemento di disturbo non indifferente e possono originare picchi di tensione indesiderati. Per questo motivo, come accennato sopra, si è voluto considerare modelli tridimensionali, focalizzando l'attenzione sulle zone di discontinuità come i bordi e i tagli negli anelli.

Modelli CAD

Il software Autodesk Inventor 10 è stato utilizzato per costruire i modelli tridimensionali dei calettatori presi in esame. La capacità di parametrizzazione delle geometrie disegnate è stata ampiamente utilizzata per velocizzare la preparazione dei modelli stessi. Questo ha richiesto un impegno aggiuntivo rispetto al procedere usuale ma ha reso possibile, in prospettiva, l'analisi di ulteriori misure qualora si rendesse necessario, senza considerevoli sforzi aggiuntivi.

Massima cura è stata adottata nel disegno, tenendo ben presente fin dal principio la successiva necessità di trattare le geometrie con un meshatore ad elementi finiti. In particolare:

Un importante "defeaturing" delle geometrie è stato portato a termine, riducendo al minimo i raccordi e le piccole superfici che non contribuiscono in maniera significativa alla definizione dei corpi e che non influenzano la risposta strutturale. Questo ha portato benefici evidenti durante la costruzione delle mesh. Le superfici esterne di tutti i componenti sono state divise, quando possibile, in quadrilateri il più regolari possibile, consentendo successivamente una meshatura regolare, in particolar modo nelle zone interessate da contatto.

Il formato IGES è stato scelto per trasferire agevolmente le geometrie all'interno dell'ambiente di simulazione agli elementi finiti.

Modelli FEM

Il software Ansys 10.0 è stato utilizzato per portare a termine le simulazioni numeriche. In particolare si è fatto uso dell'ambiente Workbench per la preparazione dei modelli e per la visualizzazione dei risultati, mentre è stato preferito il lancio batch su una macchina Linux per effettuare le analisi vere e proprie.

Si è sempre fatto uso di elementi dotati di funzioni di forma quadratiche e il settaggio "Hex Dominant" è stato impostato per garantire maggior regolarità delle mesh, con conseguente riduzione di nodi utilizzati e migliori risultati, a parità di altre impostazioni. Sono inoltre state utilizzate delle molle deboli ("weak springs") per evitare possibili moti rigidi di alcune parti del modello.

La scarsa rigidità di queste molle ha consentito di giungere a soluzione senza alterare significativamente la risposta del sistema.

In tabella 3 sono raccolti il numero di nodi, di elementi e i gradi di libertà attivati da ogni singolo modello. Si può notare che il numero di elementi di contatto di tipo CONTACT e di tipo TARGET sono sempre identici per ogni modello, avendo sempre adottato una definizione di tipo simmetrico dei contatti.

Una buona gestione dei contatti risulta in questo caso fondamentale; si è sempre fatto uso di una formulazione lagrangiana aumentata, monitorando le penetrazioni risultanti fra i corpi, e modificando a più riprese i parametri, la dove ritenuto necessario.

Il coefficiente di attrito fra le superfici è stato scelto pari a 0,12, considerato un valore sufficientemente basso e statisticamente affidabile per descrivere il contatto acciaio su acciaio.

Il materiale, identico per tutte le parti in gioco, è stato assunto elastico lineare e isotropo, caratterizzato da un modulo di Young pari a 200 [GPa] e un coefficiente di Poisson di 0,3.

L'unica non-linearità considerata nei modelli deriva dalla presenza di contatti con attrito. Con alcune analisi svolte in precedenza si è infatti compreso che includere altre non-linearità, quali ad esempio la plasticità o grandi deformazioni e grandi spostamenti, non porta alcun beneficio in termini di qualità dei risultati sui contatti calettatore - albero, ma appesantisce notevolmente i tempi di calcolo.

Fattori di concentrazione della pressione di contatto

L'obiettivo principale di questo studio è stato certamente quello di individuare una quantità semplice da utilizzare in fase progettuale, ma allo stesso tempo sufficientemente rappresentativa dello stato tensionale indotto dal calettatore sull'albero.

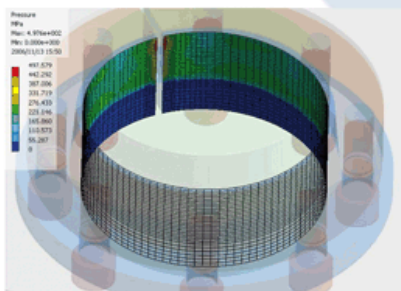


Fig. 4 - MAV 1061 100 x 145, pressione di contatto tra albero e calettatore, visualizzata su quest'ultimo, alla fine della fase di chiusura viti. Si può apprezzare l'esistenza di una concentrazione di pressione in prossimità del taglio, nella zona anteriore della flangia.

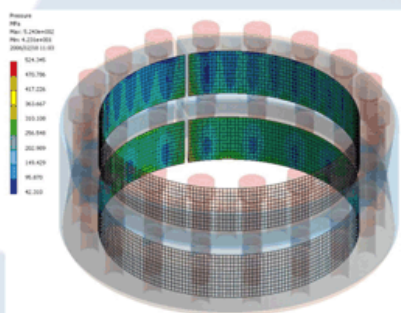


Fig. 5 - MAV 1008 200 x 260, pressione di contatto tra albero e calettatore, visualizzata su quest'ultimo, alla fine dell'applicazione dei carichi. Esistono in questo caso due concentrazioni delle pressioni di contatto; esse sono posizionate nelle zone anteriori dei due anelli, all'altezza dei tagli.

A questo scopo viene spesso definito il seguente rapporto:

$$FCP = \frac{p_{max}}{p_m} \quad (1.1)$$

dove FCP sta per "Fattore di Concentrazione della Pressione" di contatto, mentre p_{max} e p_m sono rispet-

TAB. 3 - MODELLI A ELEMENTI FINITI: NODI, ELEMENTI E GRADI DI LIBERTÀ ATTIVATI NELLE ANALISI

Modello	Nodi	d.o.fs	Elementi				
			SOLID 186-187	CONTA 174	TARGE 170	PRETS 179	COMBIN 14
MAV 1008							
70 x 110	292537	887601	79293	15135	15135	8	312
100 x 145	360336	1080994	97643	20724	20724	10	360
200 x 260	425297	1275861	51458	25729	25729	18	552
400 x 495	462964	1388854	127141	29925	29925	22	648
MAV 4061							
50 x 80	314089	942257	87281	15168	15168	8	312
100 x 145	351697	1055075	96304	21457	21457	11	384
200 x 260	411116	1233322	110871	27683	27683	16	504
400 x 495	450338	1350972	121679	27785	27785	24	696
MAV 2005							
50 x 80	356263	1068771	104024	17495	17495	12	432
100 x 145	366645	1099913	105956	18584	18584	14	480
200 x 260	299780	899268	82701	19033	19033	30	864
400 x 495	528261	1584717	149978	32658	32658	36	1008
MAV 1061							
50 x 80	207692	623071	59031	11109	11109	7	264
100 x 145	240670	722003	68132	13607	13607	8	288
200 x 260	436743	1310208	122083	23614	23614	15	456
400 x 495	587715	1763112	166613	32675	32675	21	600

Fig. 6 - MAV 4061 100 x 145, pressione di contatto tra albero e calettatore, visualizzata su quest'ultimo, alla fine dell'applicazione dei carichi. Si noti come, in prossimità dei fori negli anelli, vi siano delle riduzioni della pressione di contatto.

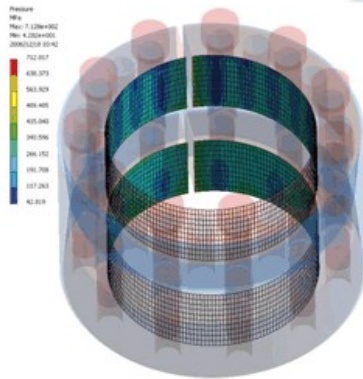
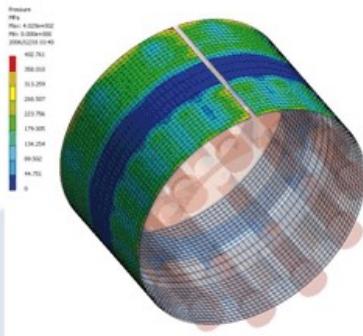


Fig. 7 - MAV 4061 100 x 145, pressione di contatto tra mozzo calettatore, visualizzata su quest'ultimo, alla fine dell'applicazione dei carichi. Si può apprezzare l'esistenza di una zona con sviluppo circonferenziale, in corrispondenza della flangia, dove le pressioni di contatto sono molto basse, in alcuni casi nulle.



tivamente la pressione di contatto massima e media. Quest'ultima viene calcolata mediante la seguente equazione:

$$p_m = \frac{\int_{A_c, \text{if } p(x) > 0} p(x) dA_x}{\int_{A_c, \text{if } p(x) > 0} dA_x} \quad (1.2)$$

dove $p(x)$ rappresenta la pressione di contatto nel punto x sulla superficie A_c . Ovviamente, per la valutazione degli integrali sopra riportati si considera soltanto l'area dove la pressione di contatto è non nulla a seguito dell'applicazione dei carichi, e non la superficie di contatto iniziale. Si ricorda infatti che la superficie di contatto fra i corpi non è in generale nota a priori, ma dipende ovviamente dalle modalità deformative della struttura.

È facile notare che

$$F_k = \int_{A_c, \text{if } p(x) > 0} p(x) dA_x \quad (1.3)$$

rappresenta la forza radiale trasmessa dal calettatore all'albero e al mozzo.

In questo studio non si è fatto uso della (1.1) perché si ritiene che, in questo contesto, non sia completamente corretto, ma si è proposta una versione modificata, come descritto nel seguito.

È noto infatti che in un'analisi a elementi finiti, quando si considera un comportamento elastico lineare per il materiale, non sono presenti limiti ai valori che gli stress possono assumere all'interno dei corpi. Nel caso siano presenti forze concentrate, spigoli vivi o contatti fra parti, lo stato tensionale può assumere in alcuni nodi valori sempre crescenti all'infittirsi della mesh di calcolo.

Questa è una naturale conseguenza del fatto che le equazioni dell'elastostatica consentono la non definizione dello stato tensionale in alcuni punti dello spazio; esempio assai noto è il problema di Boussinesq, di cui esiste soluzione analitica.

È utile ricordare tuttavia, che l'integrale dello stato tensionale calcolato su un dominio finito, che includa anche delle singolarità, è ben definito, e rappresenta la risultante delle forze applicate. Nel caso di un calettatore la forza radiale trasmessa (equazione 1.3) assume sempre valori finiti, anche se esistono punti in cui la pressione di contatto $p(x)$ non è definita o, in un modello FEM, cresce indefinitamente all'infittire della mesh.

Per questo motivo si è deciso di introdurre la seguente definizione:

$$FCP = \frac{p_{perc}}{p_m} \quad (1.4)$$

dove p_{perc} è un valore di pressione non noto a priori, che rappresenta la pressione alla quale la maggior parte della forza radiale (nel nostro caso il 99,75%) viene trasmessa.

Il valore di p_{perc} può essere calcolato utilizzando la seguente equazione:

$$perc F_k = \int_{A_c, \text{if } p(x) > 0} p(x) dA_x \quad (1.5)$$

dove $perc$ è un numero reale di poco inferiore all'unità (nel nostro caso il 0,9975). In questo modo il valore p_{perc} , che risulta essere indipendente dalla mesh di calcolo (come testato in uno studio separato), è sufficientemente rappresentativo della concentrazione di pressione.

È importante tuttavia notare che il FCP tiene conto solo della componente normale dello stato di sforzo alla superficie di contatto e che quindi, per questa ragione, non può dare informazioni esaustive circa lo

stato tensionale attuale. Un altro limite è ovviamente dato dal fatto che esso non da alcuna descrizione della distribuzione dello stress, che invece risulta importante per valutare la pericolosità o meno di una data situazione.

Operativamente si è deciso di procedere considerando la pressione nel centroide degli elementi di contatto. La pressione media diventa quindi:

$$p_m = \frac{\sum_{e=1}^{N_c} p_e A_e}{\sum_{e=1}^{N_c} A_e} \quad (1.6)$$

dove N_c rappresenta il numero di elementi considerati, p_e e A_e rispettivamente la pressione e l'area dell'elemento e-simo. Per il calcolo di p_{perc} è sufficiente generare la lista ordinata in modo crescente delle pressioni e, partendo dai valori più bassi valutare la seguente:

$$perc F_k = \sum_{e=1}^{N_k} p_e A_e \quad (1.7)$$

essendo N_k il numero di elementi necessari per soddisfare la (1.7). La pressione del N_k -esimo elemento nella lista è esattamente p_{perc} .

Storie di carico e condizioni al contorno

Le storie di carico sono costituite da sei differenti step: durante il primo viene assegnato il precarico alle viti, simulando così la fase di montaggio. Nel secondo step viene applicato un momento torcente al mozzo pari a circa il 90% del valore teorico di slittamento. Nelle fasi seguenti si mantiene il momento torcente facendo aumentare progressivamente il momento flettente fino ad un valore pari al 50% del corrispondente momento torcente applicato.

Durante tutti i passi di carico gli spostamenti circolarmente dei nodi di una delle facce trasversali dell'albero sono vincolati, così come gli spostamenti trasversali del nodo sull'asse appartenente alla faccia opposta. In questo modo si consente all'albero di deformarsi liberamente, senza inficiare lo stato di sforzo al proprio interno.

Risultati e conclusioni

Le tabelle 4 e 5 riassumono i principali risultati ottenuti con questo studio. In particolare, si riportano i valori delle pressioni medie registrate sugli alberi, ottenute grazie alla (1.6) e i fattori di concentrazione della pressione, ottenuti con la procedura descritta precedentemente.

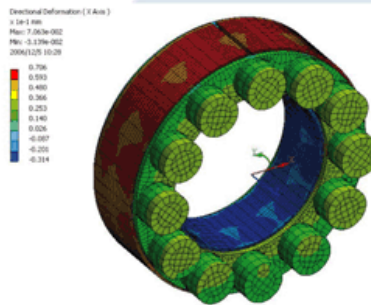


Fig. 8 - MAV 2005 50 x 80, spostamento radiale del calettatore alla fine della fase di precarico. L'anello interno si chiude sull'albero mentre quello esterno si apre sul mozzo.

Si noti come le pressioni medie di contatto, per una fissata misura, hanno variazioni modeste al variare del passo di carico; questo si giustifica, da un lato, con il fatto che la superficie di contatto rimane inalterata.

TAB. 4 - PRESSIONI DI CONTATTO MEDIE OTTENUTE A OGNI PASSO DI CARICO, PER OGNI MISURA E PER OGNI SERIE DI CALETTATORE CONSIDERATO

Pressioni di contatto medie [MPa]					
MAV 1008					
Passo di carico	70 x 110	100 x 145	200 x 260	400 x 495	
1	194,4	214,2	183,0	182,9	
2	198,9	219,8	185,8	185,3	
3	200,0	220,2	185,9	185,8	
4	200,5	220,4	186,2	185,9	
5	200,6	220,7	186,7	186,2	
6	200,8	221,1	186,6	186,4	
MAV 4061					
Passo di carico	50 x 80	100 x 145	200 x 260	400 x 495	
1	196,1	208,8	230,7	201,3	
2	198,4	211,0	230,6	201,8	
3	198,1	211,0	230,3	202,2	
4	198,0	210,5	230,1	202,3	
5	198,0	210,5	230,2	202,4	
6	198,4	210,5	230,4	202,5	
MAV 2005					
Passo di carico	50 x 80	100 x 145	200 x 260	400 x 495	
1	259,0	250,4	246,8	193,5	
2	263,3	252,1	248,8	194,9	
3	264,2	252,6	250,5	195,5	
4	265,3	253,1	250,8	195,7	
5	266,3	253,5	251,3	196,0	
6	267,8	253,3	252,0	196,3	
MAV 1061					
Passo di carico	50 x 80	100 x 145	200 x 260	400 x 495	
1	192,5	193,4	152,6	150,2	
2	193,6	193,0	152,6	150,2	
3	193,6	194,8	152,4	153,2	
4	193,2	194,8	152,7	152,6	
5	192,5	194,6	152,1	152,8	
6	187,2	193,8	152,3	153,6	

Fig. 9 (a sinistra) - MAV 2005 50 x 80, spostamento circonferenziale del calettatore alla fine della fase di precarico. L'anello esterno tende ad aprirsi, in particolare modo in prossimità del taglio, mentre l'anello interno, a contatto con l'albero, si comporta in maniera opposta.

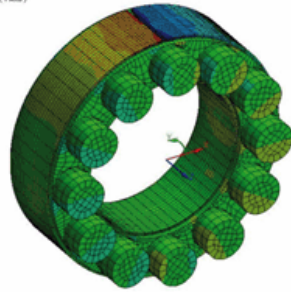
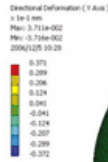


Fig. 10 (a destra) - MAV 2005 50 x 80, spostamento longitudinale del calettatore alla fine della fase di precarico. I due anelli conici tendono ad avvicinarsi l'un l'altro in maniera pressoché simmetrica. Lo spostamento globale del calettatore risulta essere dell'ordine di qualche centesimo di millimetro.

TAB. 5 - FATTORI DI CONCENTRAZIONE DELLA PRESSIONE DI CONTATTO (FCP) OTTENUTI A OGNI PASSO DI CARICO, PER OGNI MISURA E PER OGNI SERIE DI CALETTATORE CONSIDERATO

Fattori di concentrazione della pressione di contatto (FCP)				
MAV 1008				
Passo di carico	70 x 110	100 x 145	200 x 260	4000 x 495
1	2,1	2,1	1,9	1,9
2	2,3	2,3	2,2	2,1
3	2,3	2,2	2,0	2,1
4	2,3	2,2	2,0	2,1
5	2,3	2,1	2,0	2,1
6	2,3	2,2	2,0	2,1
MAV 4061				
Passo di carico	50 x 80	100 x 145	200 x 260	400 x 495
1	2,6	2,1	2,0	2,0
2	3,2	2,8	2,2	1,9
3	2,9	2,6	2,1	1,8
4	2,9	2,5	2,1	1,8
5	2,8	2,5	2,1	1,9
6	2,8	2,5	2,1	2,0
MAV 2005				
Passo di carico	50 x 80	100 x 145	200 x 260	400 x 495
1	1,6	1,9	1,4	1,6
2	1,6	1,9	1,4	1,6
3	1,8	2,0	1,6	1,7
4	1,9	2,1	1,6	1,8
5	2,0	2,2	1,7	1,9
6	2,3	2,3	1,8	2,0
MAV 1061				
Passo di carico	50 x 80	100 x 145	200 x 260	400 x 495
1	2,8	2,3	2,0	1,4
2	2,9	2,5	2,2	1,5
3	3,3	2,9	2,7	1,7
4	3,4	3,0	2,8	1,8
5	3,5	3,2	2,9	2,0
6	3,7	3,3	3,1	2,0

terata (non sono mai presenti fenomeni di distacco fra calettatore e albero) e, dall'altro, con il fatto che l'aumento dei valori massimi, peraltro sempre modesta, è compensato da una analoga riduzione dei valori minimi.

La pressione minima non assume mai valori inferiori ai 30 [MPa], garantendo sempre una buona aderenza fra calettatore e albero e riducendo così al minimo i rischi di "fretting".

Si tenga presente, infine, che un apparente elevato valore di concentrazione di pressione, come potrebbe essere per il MAV 1061, non è indice di una scarsa qualità del calettatore o sinonimo di basse prestazioni meccaniche.

Si deve valutare il FCP affiancandolo sempre al valor medio della pressione e ai massimi carichi trasmissibili, rapportati alle vere esigenze di progetto.

In questo articolo si sono brevemente descritti i risultati ottenuti grazie ad alcune analisi ad elementi finiti condotte su quattro tipologie differenti di calettatori.

L'obiettivo principale del lavoro è stato quello di valutare con buona accuratezza il fattore di concentrazione della pressione di contatto generata su un albero da un organo di calettamento.

L'impossibilità di ottenere tale valore con prove di laboratorio e la scarsità di indicazioni in letteratura sono state le motivazioni principali di questo studio.

I risultati ottenuti sono di indubbio interesse perché mostrano un'inattesa scarsa o assente dipendenza del picco di pressione di contatto dal valore di momento flettente applicato, anche quando questo raggiunge valori decisamente al di sopra di quelli normalmente incontrati nella pratica.

Molto interessante anche la tendenza, quasi comune a tutte le serie, che vede una diminuzione del FCP all'aumentare delle dimensioni dell'albero.