

Analisi delle problematiche di impiego dei materiali tradizionali ed innovativi nel settore delle macchine utensili

*OR 6: Impiego di materiali innovativi nella
progettazione delle macchine utensili*

*Responsabile Area 3: prof. ing. Michele Monno
Ricercatore: ing. Valerio Mussi*

Indice

1.	Introduzione.....	3
2.	Stato dell'arte	4
2.1.	Materiali tradizionali.....	4
2.1.1.	Introduzione.....	4
2.1.2.	La ghisa fusa	5
2.1.3.	L'acciaio saldato	5
2.1.4.	Il calcestruzzo idraulico	6
2.1.5.	Il calcestruzzo polimerico	8
2.2.	Materiali innovativi	10
2.2.1.	Ghise innovative.....	11
2.2.1.1.	Ghise ADI (Austempered Ductile Iron).....	11
2.2.1.2.	Ghisa CGI (Compact Graphite Iron).....	12
2.2.2.	Materiali compositi rinforzati con fibre.....	12
2.2.2.1.	Struttura della macchina utensile in composito	13
2.2.2.2.	Mandrino in materiale composito	21
2.2.2.3.	Alesatore in materiale composito	23
2.2.3.	Strutture smorzanti composite basate sul Constrained Layer Camping.....	28
2.2.4.	Schiume di alluminio	29
2.2.4.1.	Caratteristiche del materiale	30
2.2.4.2.	Riempimento in schiuma di alluminio di strutture in acciaio.....	36
2.2.4.3.	Pannelli sandwich acciaio – alluminio – acciaio	39
3.	Attività svolte	41
3.1.	Grado di avanzamento	41
3.2.	Attività di ricerca bibliografica	41
3.3.	Modellazione della struttura di una macchina utensile.....	41
4.	Sviluppi futuri.....	44
5.	Bibliografia estesa sui materiali avanzati	45

5.1.	Articoli accademici e tecnici	45
5.2.	Conferenze internazionali.....	46
5.3.	Brevetti	46
5.4.	Monografie.....	47
5.5.	Lavori di tesi	48
6.	Bibliografia.....	49

1. Introduzione

La realizzazione di macchine utensili ed in particolare di centri di lavoro ad elevate prestazioni si è resa necessaria in tempi recenti per consentire un forte incremento di produttività ed una conseguente diminuzione dei costi del pezzo prodotto. Le strategie disponibili per rendere possibile quest'aumento di produttività sono essenzialmente due.

La prima consiste in un forte incremento della velocità di asportazione, incremento reso possibile negli ultimi anni dalla comparsa sul mercato di utensili realizzati con materiali a prestazioni elevatissime come il CBN, o il diamante policristallino. Per trarre il massimo vantaggio dall'utilizzo di questi utensili occorre eseguire le lavorazioni con elevate velocità di asportazione ed elevate profondità di passata è quindi necessario disporre di macchine utensili con una struttura capace di sopportare le sollecitazioni dinamiche che queste condizioni di lavoro impongono, di macchine cioè caratterizzate da grande rigidità e grande capacità di smorzare le vibrazioni.

La seconda strategia è la riduzione dell'"air cutting time", cioè di tutti i tempi morti in cui non si ha contatto tra utensile e pezzo necessari per portare la macchina utensile nella posizione di lavoro con l'utensile corretto. L'impatto di questi tempi morti sul tempo ciclo, per un moderno centro di lavoro utilizzato per la realizzazione di parti complesse, è di assoluto rilievo, e può raggiungere il 70 % del tempo ciclo totale. Per ridurre l'"air cutting time" è essenzialmente necessario realizzare macchine utensili con elevate velocità di rapido (2 m/s contro 0,5 m/s tipici di una macchina convenzionale), ma l'ottenimento di velocità di rapido elevate sulle piccole distanze è possibile solo se le parti mobili della macchina possono muoversi con accelerazioni elevate, è necessario cioè realizzare macchine capaci di raggiungere accelerazioni fino a oltre 10m/s^2 . L'ottenimento di accelerazioni così elevate senza penalizzare l'accuratezza di posizionamento è pensabile solo utilizzando macchine utensili con parti mobili caratterizzate da rigidità elevata e massa ridotta.

L'analisi di entrambi questi approcci mette in evidenza la necessità di progettare macchine utensili caratterizzate da strutture con masse mobili ridotte ed elevata rigidità dinamica. La realizzazione di macchine di questo tipo è pressoché impossibile se si utilizzano i materiali strutturali tradizionalmente impiegati, cioè la ghisa e l'acciaio, è quindi necessario prendere in considerazione classi di materiali innovativi che rendano possibile il conseguimento di questi obiettivi con il minore impatto possibile sui costi della macchina.

Lo scopo del presente obiettivo di ricerca è proprio la valutazione delle problematiche di impiego dei materiali tradizionali ed innovativi nel settore delle macchine utensili lo sviluppo di metodologie basate sul calcolo strutturale, specifiche per l'impiego di i materiali non convenzionali e di metodologie di controllo della integrità di componenti/strutture realizzati con tali materiali.

2. Stato dell'arte

2.1. Materiali tradizionali

2.1.1. Introduzione

Il grado di precisione che una macchina utensile consente di ottenere sul pezzo finito dipende essenzialmente da due fattori [Ros02]:

1. Rigidezza statica e dinamica della struttura, in particolare relativamente a sollecitazioni di flessione e torsione. Le caratteristiche del materiale che hanno maggiore impatto su queste caratteristiche sono: il modulo di Young del materiale ed il suo smorzamento interno.
2. Stabilità dimensionale rispetto alle sollecitazioni meccaniche legate alle lavorazioni e alle sollecitazioni fisiche legate all'ambiente in cui la macchina si trova ad operare. Le caratteristiche richieste al materiale sono quindi:
 - Tensioni interne estremamente ridotte
 - Bassissimo coefficiente di dilatazione termica
 - Grande conducibilità termica in modo da consentire una rapida trasmissione del calore all'interno di tutta la struttura minimizzando i gradienti termici e quindi le deformazioni termiche che ne conseguono.

Caratteristica della struttura	Caratteristiche richieste al materiale
Rigidezza statica e dinamica	Elevato modulo di Young (E)
	Elevato smorzamento interno
Stabilità dimensionale	Tensioni interne estremamente ridotte
	Bassissimo coefficiente di dilatazione termica
	Grande conducibilità termica

Tab. 1 Caratteristiche fondamentali di struttura e materiale

Più in generale il materiale oltre ad una sufficiente resistenza a trazione ed a compressione deve possedere altre importanti caratteristiche tecnologiche:

1. Resistenza all'usura, agli urti ed alla fatica
2. Basso coefficiente d'attrito
3. Grande resistenza all'attacco chimico da parte di liquidi aggressivi, in particolare lubrificanti e refrigeranti che vengono utilizzati durante le lavorazioni meccaniche.

Particolarmente importanti sono anche alcuni fattori di natura economica [Wec80]:

1. Reperibilità sul mercato
2. Prezzo per unità di massa
3. Economicità di lavorazione
4. Possibilità di ottenere strutture complesse per fusione e saldatura
5. Eventuali tempi di stagionatura e/o trattamenti termici
6. Possibilità di gettata sul posto

I materiali che nel corso degli anni hanno trovato una più ampia diffusione per le strutture delle macchine utensili sono la ghisa e l'acciaio. In Tab. 2 sono confrontate le principali caratteristiche di strutture di macchina utensile realizzate con questi due materiali.

Caratteristica	Ghisa fusa	Acciaio saldato
Costo	Produzione in lotti	Prototipi e piccole produzioni
Smorzamento interno	Buono	Basso, migliorabile con tecniche speciali
Difettosità	Difetti di fonderia spesso riscontrabili in fase di finitura	Possibili difetti di saldatura
Forma	Problemi con modelli ed anime; forme aperte per consentire l'estrazione delle anime	Forme anche chiuse
Modifiche della struttura	Difficoltose	Facili
Contratto di strisciamento	Possibile il contatto ghisa su ghisa	Sconsigliabile il contatto acciaio su acciaio

Tab. 2 Confronto tra strutture in ghisa e in acciaio

2.1.2. La ghisa fusa

La ghisa fusa è ancor oggi uno dei materiali più utilizzati per la realizzazione di strutture di macchine utensili, infatti presenta alcuni concreti aspetti positivi [Slo06]:

- È un materiale decisamente stabile dal punto di vista dimensionale a patto di prevedere un trattamento di rilassamento termico o a vibrazione o un adeguato periodo di invecchiamento naturale
- Presenta un elevato smorzamento delle vibrazioni
- Ha elevata conducibilità termica
- Ha un costo limitato per dimensioni limitate
- È possibile realizzare guide a strisciamento integrali
- Consente una buona trasmissione del calore
- Le soluzioni progettuali sono ben consolidate

2.1.3. L'acciaio saldato

- È molto utilizzato per strutture di grandi dimensioni e per piccoli lotti
- Ha un coefficiente di smorzamento modesto
- Ha un costo modesto
- Le guide a strisciamento devono essere riportate
- Si possono realizzare assemblando elementi standard

Per quanto riguarda i costi di realizzazione la scelta tra una struttura in ghisa ed una in acciaio saldato è legata essenzialmente al numero di esemplari da produrre. Da un lato il progetto di un componente fuso e la realizzazione del modello sono più costosi rispetto alla progettazione e dell'attrezzatura necessaria per un componente saldato, e quindi i costi fissi, nel primo caso sono maggiori. D'altra parte, i componenti fusi, in generale, richiedono meno manodopera e meno lavorazioni successive di quelli saldati e quindi

hanno costi variabili minori. Esiste quindi un “volume di break-even” al di sotto del quale risulta conveniente la realizzazione in acciaio saldato, e al di sopra del quale conviene la realizzazione del componente in ghisa per fusione.

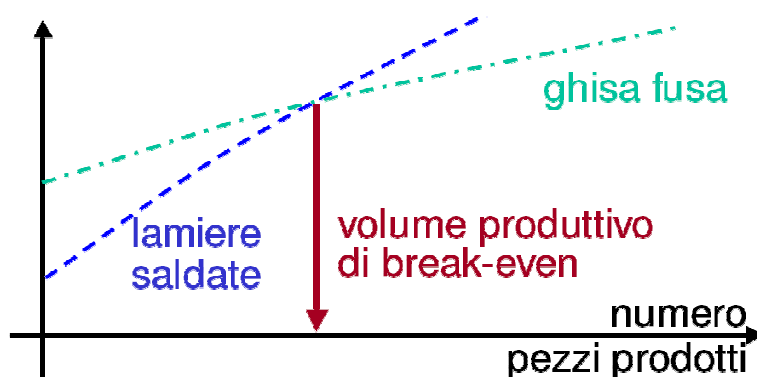


Fig. 1 Costi di strutture in acciaio saldato e ghisa fusa

2.1.4. Il calcestruzzo idraulico

Il calcestruzzo idraulico (calcestruzzo tradizionale) è un conglomerato costituito da una miscela di legante idraulico (cemento) o aereo (calce di solito), inerti (sabbia e ghiaia) ed acqua. Il legante, idratandosi con l'acqua, indurisce e conferisce alla miscela compattezza e resistenza [Wik04].

Le proprietà meccaniche del calcestruzzo dipendono dal tipo di cemento, dal tipo di inerti, dalla loro rapporto in massa e dalla quantità di acqua utilizzata. Facendo riferimento ad un cemento Portland (composizione chimica tipo: 64% ossido di calcio; 21% ossido di silicio; 5,5% ossido di alluminio; 4,5% ossido di ferro; 2,4% ossido di magnesio; 1,6% solfati; 1% altri materiali, tra cui soprattutto acqua [Wik05]), il carico di rottura a compressione può variare da 30 MPa a 70 MPa [Ros02] soprattutto in funzione del rapporto acqua/cemento, ovvero a parità di contenuto di cemento risulta maggiormente resistente una miscela con un minore contenuto di acqua. La resistenza a trazione è indicativamente 10 - 20 % di quella a compressione. Questo comportamento a trazione fa sì che i getti in calcestruzzo si fessurino in presenza di sollecitazioni di trazione anche modeste. Per ovviare a questo inconveniente si fa solitamente ricorso a rinforzi metallici ottenendo:

- Calcestruzzo armato, se all'interno del calcestruzzo vengono inseriti tondini in acciaio opportunamente sagomati
- Calcestruzzo fibroso, se il rinforzo è ottenuto disperdendo all'interno del calcestruzzo fibre di piccolo diametro in acciaio o altro materiale.

Il modulo di Young dipende, per una data età del calcestruzzo, dal rapporto acqua/cemento e dal grado di compattezza (percentuale di aria presente) ed è influenzato dalle caratteristiche dell'inerte: maggiore è il modulo di Young dell'inerte, maggiore sarà quello del calcestruzzo. Si può stimare un modulo di Young medio variante tra 25.000 MPa e 45.000 MPa, cioè circa il 25 % di quello della ghisa.

Per quanto riguarda lo smorzamento interno si ha un valore di circa 5 volte maggiore rispetto a quello della ghisa. Tale valore dipende in grande misura dalle microfessurazioni presenti e dipende dal contenuto di acqua e dall'invecchiamento. Va tenuto conto del fatto che l'elevato smorzamento interno del calcestruzzo rispetto a quello della ghisa non basta a garantire che una struttura realizzata in calcestruzzo abbia uno smorzamento maggiore rispetto ad una in ghisa, infatti spesso nelle strutture in calcestruzzo non si utilizzano le giunzioni con viti, bulloni e rivetti che contribuiscono ad aumentare di molto lo smorzamento della struttura.

Caratteristica	Unità di misura	Ghisa	Acciaio	Calcestruzzo idraulico
Modulo di	MPa	117.000	210.000	24.000

elasticità				
Massa volumica	kg/dm ³	7,21	7,85	2,29
Coefficiente di dilatazione termica	Mm/mK	0,0012	0,0012	0,0012
Resistenza a trazione	MPa	230	460	4

Tab. 3 Confronto tra materiali tradizionali per strutture [Ros2]

Nell'utilizzo per le strutture delle macchine utensili il calcestruzzo mette in evidenza due gravi inconvenienti:

- **La ridotta stabilità dimensionale** dovuta da variazioni di temperatura e di umidità e legata al fatto che la struttura finemente porosa del materiale favorisce l'assorbimento di acqua. Il fenomeno dipende, a parità di cemento, dal modulo elastico dell'inerte, attenuandosi al crescere di esso; Le deformazioni legate alla perdita di umidità interessano prima la superficie e quindi più lentamente si propagano verso l'interno provocando distorsioni nel getto. Lo stesso fenomeno si genera per variazioni esterne della temperatura che, instaurando un gradiente termico tra esterno ed interno della struttura, causano dilatazioni differenti e quindi distorsioni che vanno a sommarsi a quelle dovute alla variazione del contenuto di umidità conseguente alla variazione di temperatura.
- **Lo scorrimento sotto carico** dipende, oltre che dalla velocità di applicazione, dal lasso di tempo intercorso fino al momento della misurazione.

Per minimizzare gli effetti indotti da queste problematiche si impiegano in particolare due tecniche:

- **Il rinforzo con fibre** di metallo, vetro o plastica che vengono aggiunte al calcestruzzo dopo un primo impasto e uniformemente disperse nella massa con un opportuno tempo di mescola. Le fibre hanno lo scopo di migliorare il comportamento a trazione del calcestruzzo poiché esercitano un'azione di cucitura sui lembi delle microfessure (Fig. 2) e ne impediscono, in tal modo, l'allargamento. Per esercitare tale funzione le fibre devono essere saldamente ancorate alla matrice di calcestruzzo e a tal fine vengono sagomate con geometrie opportune (Fig. 3).

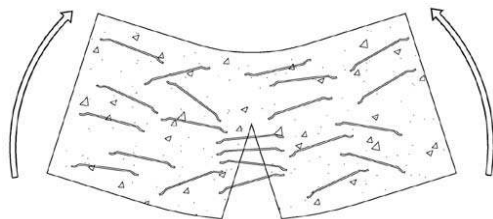


Fig. 2 Meccanismo di cucitura delle microfessurazioni [Pri05]

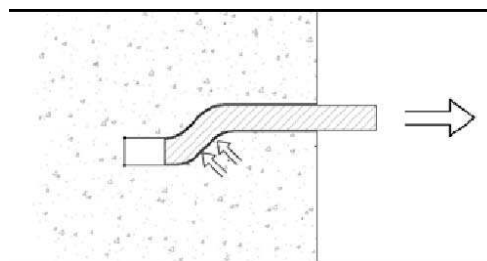


Fig. 3 Forma delle fibre per migliorare l'adesione con la matrice [Pri05]

In particolare nel caso di fibre in acciaio si riscontra un aumento del modulo di elasticità, una diminuzione dell'entità del ritiro, un aumento della resistenza in presenza di fessurazioni ed un aumento della resilienza. Per quanto riguarda la realizzazione del getto si deve tenere presente che la presenza delle fibre tende a ridurre la fluidità del calcestruzzo, può quindi essere necessaria l'aggiunta di opportuni additivi fluidificanti [Pri05].

- **L'impregnazione mediante materiali polimerici** da luogo a un materiale composito costituito da calcestruzzo cementizio che, ad indurimento avvenuto, viene impregnato, generalmente sotto vuoto, con un monomero successivamente polimerizzato in sito [Ing02]. L'impregnazione totale

migliora l'aderenza del calcestruzzo ed elimina la sua porosità e quindi ne migliora il carico di rottura e il modulo di elasticità, ne riduce il comportamento viscoso sotto carico e l'instabilità dimensionale ed infine ne migliora sensibilmente la resistenza all'attacco chimico. A titolo esemplificativo si riportano i valori indicativi presentati in [Ing02]:

- resistenza a compressione di circa 3-4 volte superiore ad un normale calcestruzzo
- resistenza a trazione sale di 5-6 volte
- il modulo di elasticità aumenta dell'80 %
- l'aderenza acciaio-cla aumenta di circa 4 volte
- l'assorbimento d'acqua diviene trascurabile a causa della riduzione della porosità
- lo scorrimento viscoso è praticamente nullo

L'impregnazione parziale invece coinvolge la sola superficie del pezzo rendendolo resistente all'attacco chimico e riducendo la sua permeabilità assicurando in tal modo una maggiore stabilità dimensionale.

2.1.5. Il calcestruzzo polimerico

Il calcestruzzo polimerico (o ghisa minerale) è una miscela nella quale la funzione legante è delegata a resine mentre il risultato finale in termini di prestazioni è legato agli inerti. Tale miscela, una volta aggiunto il catalizzatore, viene colata a freddo all'interno di apposite forme o direttamente all'interno della struttura metallica da riempire [Bia06]. Tramite una opportuna scelta degli inerti è possibile ottenere diversi vantaggi [Ros02]:

- Rallentamento dello sviluppo di calore generato dalla reazione esotermica d'indurimento che provocherebbe notevoli dilatazioni termiche e quindi la comparsa di tensioni interne e di cricche all'interno del pezzo.
- Riduzione del coefficiente di dilatazione termica che assume un valore compreso tra quello dell'inerte e quello della resina.
- Riduzione del ritiro in fase di solidificazione.

Gli inerti impiegati sono solitamente costituiti da pietrisco a granulometria mista, da polvere fino a grani di una ventina di millimetri, in modo da garantire il completo riempimento della forma.

La percentuale di resina da utilizzare deve essere il più possibile bassa perché è il componente che ha prestazioni meccaniche peggiori, ma deve allo stesso tempo consentire di ottenere un impasto sufficientemente plastico per riempire correttamente la cassaforma di gettata.

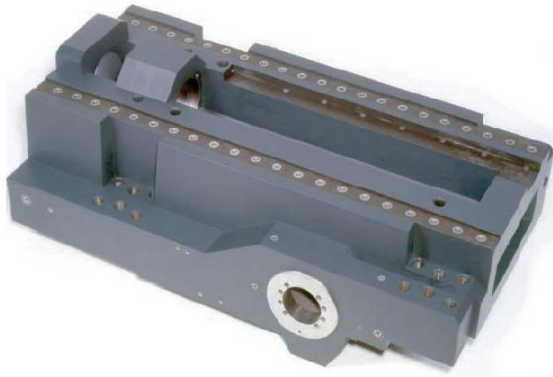


Fig. 4 Bancale di MU in cemento polimerico [Agn01]

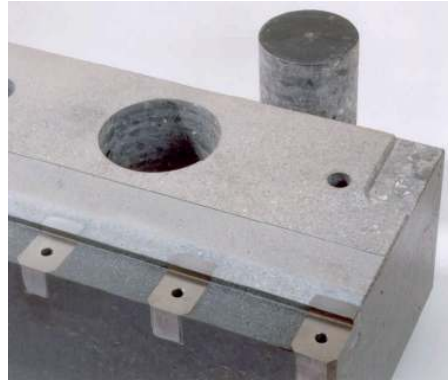


Fig. 5 Particolare di inserti filettati per il collegamento delle guide [Agn01]

I vantaggi che si possono conseguire utilizzando un calcestruzzo polimerico in luogo di un calcestruzzo idraulico possono essere sintetizzati come segue.

- Elevato smorzamento interno (alcune volte maggiore rispetto a quello della ghisa).
- Possibilità di sopportare carichi di trazione senza la necessità di rinforzi (fibre o armature tradizionali).
- Ridotto ritiro al termine della fase di indurimento.
- Impermeabilità all'acqua che conferisce elevata stabilità dimensionale al manufatto al variare dell'umidità dell'ambiente.
- Grande resistenza all'attacco chimico (oli lubrificanti e da taglio in particolare)

Tuttavia è necessario tener presente che il cemento polimerico ha una bassa conducibilità termica e quindi è necessario evitare il contatto con sorgenti calde.

Le resine utilizzate sono di tipo acrilico (PMMA), epossidiche (EP) e poliestere (UP). Come inerte si impiega il quarzo con granulometria opportunamente scelta.

La scelta della resina dipende da diversi fattori:

- La resina epossidica ha costo e viscosità elevati
- La reazione di indurimento è di circa 24 ore per la resina epossidica e di poche decine di minuti per le altre
- La reazione di reticolazione è esotermica per tutte le resine sopra indicate. Nel caso delle resine epossidiche si assiste ad un aumento di temperatura del getto di pochi gradi, per le altre invece si riscontra un aumento di pochi gradi

Per l'applicazione alle macchine utensili la soluzione più indicata [Ros02] è la resina epossidica che, grazie al ridotto aumento di temperatura del getto, garantisce una struttura praticamente esente da tensioni termiche. Questo fatto è particolarmente importante quando nella massa siano inseriti inserti metallici di ampia dimensione per l'ancoraggio di componenti meccanici, poiché le differenti condizioni di raffreddamento possono creare nel getto uno stato tensionale che può dare luogo alla formazione di cricche.

Il fatto che le resine epossidiche siano impiegate da tempo, sia in campo civile che tecnologico, da buone garanzie sul loro comportamento nel lungo periodo.

Caratteristica	Unità di misura	PMMA	EP	UP
Dimensioni inerte	Mm	0-8	0-8	0-8
Contenuto resina	% in peso	6-7	8-9	5,5-5,6
Massa volumica	kg/dm ³	2,4	2,4	2,4
Modulo di elasticità	MPa	38.000	36.000	40.000
Resistenza a compressione	MPa	150-200	120-160	90-130
Resistenza a flessione	MPa	19-24	18-20	16-18
Resistenza a trazione	MPa	9-15	9-15	10-11
Coefficiente di Poisson	-	0,2	0,2	0,2
Coefficiente di dilatazione lineare	mm/mK	0,017	0,017	0,017

Tab. 4 Caratteristiche dei calcestruzzi polimerici [Ros02]

L'applicazione di questi materiali nel settore delle macchine utensili è già da tempo una realtà sia per quanto riguarda la ricerca industriale ed accademica, si vedano ad esempio [Bru05], [Kim95] e [Ora00], sia per quanto riguarda applicazioni commerciali come testimonia anche il già citato [Agn01].

2.2. Materiali innovativi

Alle macchine utensili attuali si richiede ha un lato una sensibile riduzione del tempo ciclo, dall'altro di mantenere o più spesso di migliorare la precisione ottenibile sul pezzo finito.

La necessità di diminuire il tempo ciclo richiede macchine utensili capaci di raggiungere accelerazioni e velocità di posizionamento in rapido estremamente elevate poiché il "tempo di volo" nelle attuali lavorazioni arriva a raggiungere [Lee02] il 70 % del tempo ciclo totale. Il modo più efficace per ottenere tali prestazioni mantenendo le forze di inerzia a livelli accettabili (contenendo quindi deformazioni e vibrazioni) è ridurre la massa delle parti in movimento.

Questa problematica ha trovato una possibile soluzione nell'utilizzo dei materiali compositi di nuova generazione che richiede però di ripensare la struttura della macchina utensile, infatti con questi materiali richiedono nuovi i criteri di progettazione ma anche diversi metodi di assemblaggio.

Le richieste di leggerezza e rigidità sopra citate possono essere soddisfatte da materiali sandwich, da acciai ad elevata resistenza e dalle nuove leghe di alluminio ad alta resistenza, inoltre, l'applicazione di materiali compositi a matrice polimerica, a matrice metallica, a nido d'ape e di schiume metalliche a base di alluminio possono portare a soluzioni fortemente innovative.

Negli ultimi vent'anni, l'impiego di questi materiali, prima ristretto al settore aerospaziale, sta divenendo accessibile anche ad altri settori produttivi, grazie alla diminuzione dei costi di produzione e ad una più ampia disponibilità commerciale. Tuttavia lo sviluppo di strutture e componenti per macchine utensili utilizzando materiali leggeri non è ancora diventato pratica comune. Ciò accade perché la realizzazione di componenti in materiali avanzati presuppone da un lato una conoscenza della tecnologia produttiva di base che non è ancora diffusa in modo capillare presso le medie imprese che progettano e costruiscono macchine utensili e, dall'altro, la disponibilità commerciale di materiali e semilavorati standardizzati e di semplice reperibilità sia per la produzione di serie che per la realizzazione dei prototipi.

A titolo di esempio si riportano in Tab. 5 alcune caratteristiche meccaniche di materiali innovativi interessanti per la realizzazione di macchine utensili.

Materiali	Modulo di Young (MPa)	Densità (t/m ³)	Coeff. di dilatazione termica (µm/K)	Allungamento (A%)	Processo di formatura
Ghisa ADI 1400	165.000	7,1	13,8	1	Colata
Ghisa CGI	145.000	7,0	-	15	Colata
Leghe di Al (12Si2,5Ni)	73.000	2,7	19,0	0,5	Colata
Leghe di Al (6Si3,5Cu)	74.000	2,8	21,5	2	Colata
Lega di alluminio ipereutettica (17%Si)	81.200	2,7	18,0	1	Colata
Lega di alluminio (7075/T6)	71.000	2,8	23,4	11	Def. Plastica
Lega alluminio – litio (4%Li)	76.000	2,7	-	-	Colata e def. Plastica
Lega alluminio – boro (40%B)	180.000	2,5	-	-	-
Lega alluminio – boro (50%B)	207.000	2,7	-	-	-
Lega magnesio (AZ91)	45.000	1,7	27,0	3-6	Colata
Leghe di titanio (Ti6Al4V)	112.000	4,56	8,7	10	Colata e def. Plastica
Resina epossidica + aramide	85.000	1,4	40-50	-	Sheet molding compound
Resina epossidica + carbonio	205.000	1,6	20-30	-	Sheet molding compound
Schiuma di Al Alporas	4.000-10.000	0,2-0,25	21-23		

Tab. 5 Principali caratteristiche di materiali innovativi per applicazione alle macchine utensili [Ros02]

2.2.1. Ghise innovative

Tra le ghise rivestono particolare interesse per l'applicazione alle macchine utensili le ghise duttili austemperate (ADI – Austempered Ductile Iron) e le ghise a matrice compatta (CGI – Compact Graphite Iron), questi materiali infatti hanno la colabilità tipica delle ghise tradizionali e caratteristiche di resistenza e tenacità decisamente superiori, spesso paragonabili a quelle degli acciai, presentano inoltre una densità inferiore a quella degli acciai di circa il 10 % (7100 kg/m³ contro 7800 kg/m³).

2.2.1.1. Ghise ADI (Austempered Ductile Iron)

Per ghise ADI si intende una famiglia di ghise sferoidali trattate termicamente in modo da ottenere un materiale tenace con una resistenza meccanica vicina a quella degli acciai ed una resistenza all'abrasione superiore rispetto a quella di un acciaio bonificato. Per queste caratteristiche esse possono rappresentare una valida alternativa all'acciaio in diverse applicazioni anche grazie ad un costo confrontabile.

Le ghise ADI subiscono un processo produttivo analogo a quello delle ghise sferoidali tradizionali e differisce da queste per il trattamento termico finale detto di *austempering*.

La loro matrice è costituita da una combinazione di ferrite aciculare ed austenite satura di carbonio.

Le proprietà delle ghise ADI possono essere fatte variare significativamente in funzione della composizione della ghisa e dei parametri del trattamento. La forte influenza sulle proprietà meccaniche

esercitata dalla forma della grafite e dalla struttura della matrice da luogo ad una forte correlazione tra le proprietà meccaniche.

Per ciascuna ghisa duttile la resistenza a trazione e l'allungamento possono essere correlate mediante un'equazione del tipo:

$$(1) \quad \frac{R_m^2 A\%_m}{1000} = Q$$

dove Q è una costante.

Valori alti della costante Q sono indice di elevata resistenza e/o allungamento, quindi denotano una ghisa dotata di elevate proprietà. Per questo Q è definito come indice di qualità di una ghisa duttile e indicato come QI (Quality Index).

Valori alti di QI possono essere ottenuti nelle ghise duttili con elevata nodularità, alto numero di noduli, basso contenuto di carburi, basso contenuto di fosforo (< 0,03%) ed assenza di porosità [Wik06].

Un fattore da tenere ben presente quando si intenda impiegare questo tipo di materiale per la realizzazione di strutture di macchina utensile è la scarsa lavorabilità all'utensile dopo il trattamento di austempering. La ghisa ADI, infatti, ha una lavorabilità nettamente inferiore rispetto ad una normale ghisa sferoidale o lamellare, in particolare per quanto riguarda le formulazioni che forniscono le prestazioni meccaniche più elevate. Per questo motivo è solitamente conveniente eseguire il maggior numero di lavorazioni meccaniche possibile prima del trattamento termico tenendo accuratamente conto delle deformazioni che quest'ultimo produrrà sul pezzo.

Le tipologie attualmente disponibili presentano resistenza a trazione compresa tra 800 e 1400 MPa e durezza comprese tra 260 e 420 HB.

2.2.1.2. Ghisa CGI (Compact Graphite Iron)

Nelle ghise CGI la grafite, presente in forma vermiculare, conferisce al materiale una conducibilità termica nettamente superiore rispetto alle ghise sferoidali tradizionali. Tali ghise inoltre presentano una resistenza meccanica ed un modulo di Young nettamente maggiori rispetto alle ghise grigie con colabilità e lavorabilità maggiori rispetto alle ghise sferoidali. Sono particolarmente adatte per quei componenti soggetti a sforzi meccanici e a sollecitazioni termiche per cui è necessario un buon comportamento anche alle alte temperature.

2.2.2. Materiali compositi rinforzati con fibre

La realizzazione di strutture o parti per macchine utensili caratterizzate da leggerezza, rigidità e smorzamento è pressoché impossibile se si pensa di utilizzare materiali come l'acciaio, la ghisa, o le leghe leggere caratterizzati da rigidità specifica analoga e da scarse se non trascurabili caratteristiche di smorzamento. L'impiego di materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre, invece può consentire di ottenere parti con queste caratteristiche apparentemente discordanti tra loro, infatti, se da un lato le fibre di rinforzo sono caratterizzate da elevatissima rigidità specifica (rapporto tra modulo elastico e densità), dall'altro la matrice in materiale polimerico garantisce elevato smorzamento. Materiali di questo tipo, consentono anche di realizzare strutture a sandwich con pelli in composito a matrice polimerica rinforzata con fibre con materiali di riempimento in schiuma o a nido d'ape che possono essere progettate in modo da ottimizzarne la risposta a specifiche sollecitazioni.

Nel seguito si prendono in considerazione alcuni casi di applicazione di questi materiali a varie parti della macchina utensile che si ritengono di particolare interesse suddivisi in funzione della specifica tipologia di parte presa in esame.

2.2.2.1. Struttura della macchina utensile in composito

Progettazione e realizzazione di strutture composite per macchine utensili ad alta velocità [Lee04]

In [Lee04] viene analizzata la progettazione delle guide orizzontali e verticali di un centro di lavoro a controllo numerico utilizzando pannelli multistrato composti da pelli in composito fibre di carbonio - resina epossidica e parte interna a nido d'ape o in schiuma. La scelta del particolare tipo di materiale è legata all'intento di sfruttare l'elevato modulo di elasticità delle fibre di carbonio e contemporaneamente lo smorzamento elevato caratteristico delle resine epossidiche in cui le fibre sono inglobate e dei riempimenti in schiuma o a nido d'ape.

Strutture concepite in questo modo danno risultati particolarmente interessanti in elementi soggetti a flessione grazie all'elevata rigidezza specifica che, grazie ad una progettazione accurata, è possibile raggiungere.

Le guide sono state realizzate con pannelli sandwich e quindi rese solidali alle altre parti della macchina realizzate in acciaio elettrosaldato per incollaggio o per bullonatura. La colonna verticale (asse X) è stata realizzata con pannelli sandwich, mentre la traversa orizzontale (asse Y) è stata rinforzata con piastre composite ad alto modulo.

La progettazione è avvenuta in modo da ottenere una rigidezza strutturale equivalente a quella di strutture tradizionali in acciaio calcolata secondo la teoria classica delle travi e con l'analisi ad elementi finiti.

La frequenza naturale, lo smorzamento e il peso della struttura in composito sono stati misurati e confrontati con quelli di una macchina utensile convenzionale in acciaio con caratteristiche simili.

Progettazione e realizzazione della struttura composita

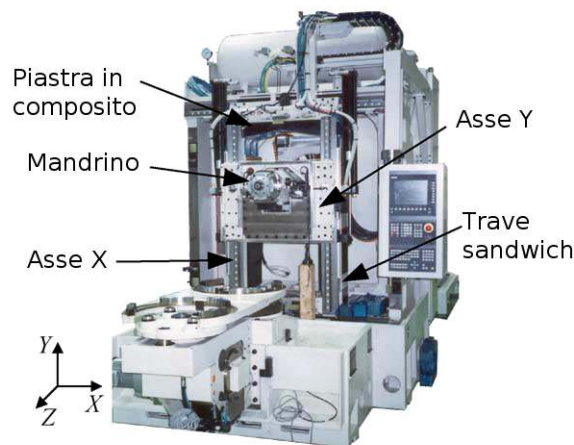


Fig. 6 Centro di lavoro con parti in composito [Lee04]

La Fig. 6 mostra la struttura del centro di lavoro a cui sono state applicate le parti in composito, in particolare la traversa dell'asse Y e la colonna dell'asse X. Le due parti realizzate in materiale composito e successivamente incollate alla struttura in acciaio saldato, sono illustrate con maggiore dettaglio nelle figure seguenti.

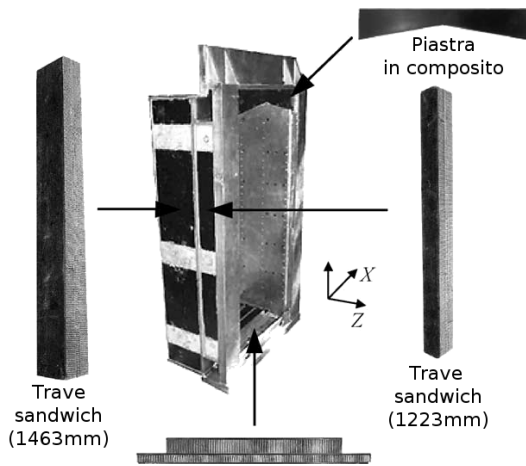


Fig. 7 Montante in composito [Lee04]

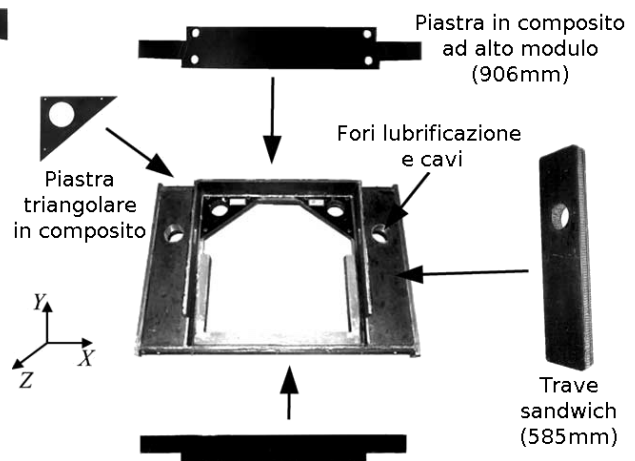


Fig. 8 Traversa in composito [Lee04]

Entrambe le parti mobili vengono movimentate a velocità di 2 m/s^2 , con accelerazioni fino a 14 m/s^2 . I carichi principali a cui sono soggette queste strutture, oltre all'inerzia, sono, l'attrazione dei due motori lineari (20 kN) montati sulle guide verticali per il montante e il momento flettente dovuto dal peso del mandrino montato a sbalzo (4000 N) per la traversa.

Per quanto riguarda il montante, la modifica principale consiste nella sostituzione delle colonne laterali in acciaio saldato con la sezione di Fig. 9 (realizzate tramite una piastra spessa 20 mm con una serie di nervature di irrigidimento nelle due direzioni) con una trave composita realizzata come indicato in Fig. 10.

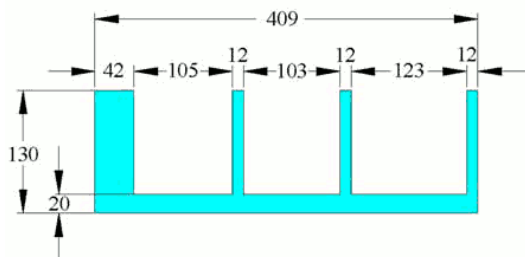


Fig. 9 Sezione in acciaio [Lee04]

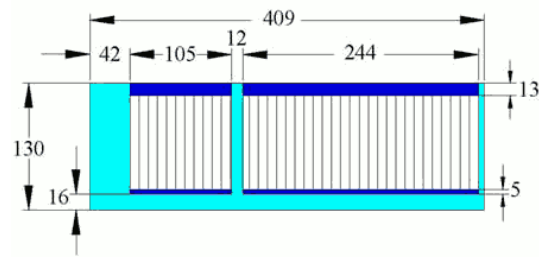


Fig. 10 Sezione composita [Lee04]

La sezione è realizzata tramite una piastra di base spessa 16 mm in acciaio su cui sono incollate due travi sandwich con pelli in materiale composito basato su strati sovrapposti di fibra di carbonio ad alta resistenza e matrice di resina epossidica (USN150 della SK Chemicals) e fibra di vetro in matrice resina epossidica (GEP215 della SK Chemicals). Lo spessore della pelle esterna, più lontana dall'asse neutro e quindi più efficace per la resistenza a flessionale, in una prima fase, è stato scelto per tentativi in modo da ottenere una rigidità flessionale analoga a quella della struttura in acciaio, in seguito sono state eseguite analisi FEM in modo da tenere conto della torsione e dello svergolamento. È stato quindi utilizzato uno spessore di 13 mm. Lo spessore della pelle interna invece è stato fissato a 5 mm.

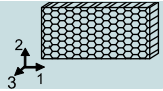
La parte interna della trave sandwich è realizzata con un pannello a nido d'ape a base di fibra aramidica (HRH-10-1/8-4.0 della Hexcel). Poiché le deformazioni di taglio in una trave sandwich di questo tipo sono solitamente importanti, è stata utilizzata una soluzione con trave scatolata con fianchi in acciaio spessi rispettivamente 42 mm e 6 mm con un ulteriore setto di rinforzo sempre in acciaio spesso 12 mm in modo da renderle trascurabili.

Sempre nel montante, la parte superiore ed inferiore sono state rinforzate quattro piastre in composito e sei piccole travi sandwich indicate in Fig. 7.

Per quanto riguarda la traversa (Fig. 8), i lati orizzontali sono stati rinforzi con materiale composito basato su fibra di carbonio ad alto modulo (HYEJ34M45D della Mitsubishi), mentre quelli verticali sono stati rinforzati con travi sandwich forate in modo da consentire il passaggio dei cavi elettrici, dei lubrificanti e dei raffreddamenti. Per aumentare ulteriormente la rigidezza torsionale della traversa sono state inserite quattro piastre triangolari. Le parti in composito sono state incollate alla struttura in acciaio utilizzando l'adesivo strutturale epossidico (2216 della 3M) ed imbullonate per una maggiore affidabilità ed efficienza nell'assemblaggio.

Nome commerciale	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	G ₁₂ (GPa)	ν ₁₂	Spessore ply (mm)	Densità (kg/m ³)
USN150	130,0	10,0	5,06	0,28	0,15	1550
GEP215	35,5	17,2	3,07	0,22	0,15	2050
HYEJ34M45D	270,0	5,9	4,5	0,30	0,30	1730

Tab. 6 Caratteristiche dei materiali impiegati per le pelli [Lee04]

Sistema di riferimento	Resistenza (MPa)			Modulo (MPa)			Densità (kg/m ³)
	3 compressione	1-3 taglio	2-3 taglio	3 compressione	1-3 taglio	2-3 taglio	
	3,96	1,75	0,97	193,06	59,30	32,40	48,05

Tab. 7 Caratteristiche dell'honeycomb HRH-10-1/8-4.0 [Lee04]

Caratteristiche delle guide in composito

Per valutare gli effetti del rinforzo in composito sulle caratteristiche dinamiche (frequenze proprie e smorzamento) sono stati eseguiti test di risposta all'impulso sia sulle parti convenzionali in acciaio che su quelle in materiale composito utilizzando la condizione con componente sospeso.

I modi di vibrare e i coefficienti di smorzamento η delle due strutture sono stati calcolati utilizzando i risultati della trasformata FFT (Fast Fourier Transform) dei segnali dell'accelerometro. I coefficienti di smorzamento modale η sono stati determinati utilizzando il metodo "half-power band width" [Ewi00] utilizzando la formula seguente.

$$(2) \quad \eta = \frac{f_2 - f_1}{f_r}$$

Il significato dei simboli è illustrato in Fig. 11.

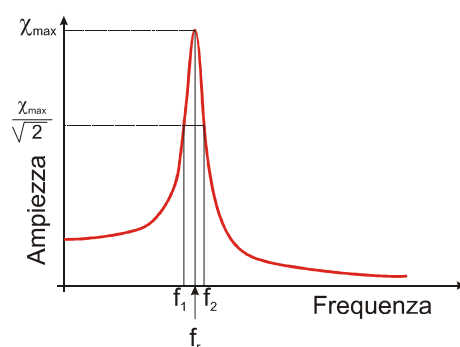


Fig. 11 Metodo half-power band width

La frequenze naturali del montante in composito, riportate in Tab. 8, sono risultate superiori del 30 % nel range di interesse rispetto alla soluzione in acciaio mentre i coefficienti di smorzamento sono risultati da 1,6 a 5,7 volte maggiori, in particolare gli aumenti più significativi sono stati riscontrati nel terzo, quarto e

quinto modo che corrispondono alla flessione del montante stesso. Per quanto riguarda la traversa non è stata riscontrata una differenza significativa per quanto riguarda le frequenze naturali, mentre il coefficiente di smorzamento è aumentato tra 1,5 e 2,5 volte (Tab. 9).

Modo	Montante tradizionale			Montante composito		
	Frequenza naturale (Hz)	Tipo di modo	Coeff. smorzamento	Frequenza naturale (Hz)	Tipo di modo	Coeff. smorzamento
1	64	Torsione	0,90	92	Torsione	2,20
2	126	Flessione	0,50	131	Inclinazione	0,80
3	211	Flessione	0,30	281	Flessione	1,20
4	261	Flessione inclinazione	0,20	304	Flessione inclinazione	0,80
5	308	Flessione inclinazione	0,14	357	Flessione inclinazione	0,80

Tab. 8 Caratteristiche dinamiche montante [Lee04]

Modo	Traversa tradizionale			Traversa composita		
	Frequenza naturale (Hz)	Tipo di modo	Coeff. smorzamento	Frequenza naturale (Hz)	Tipo di modo	Coeff. smorzamento
1	135	Torsione	0,48	115	Torsione	0,90
2	345	Flessione	0,22	341	Flessione	0,35
3	365	Modo complesso	0,19	589	Flessione	0,30
4	572	Flessione	0,22	598	Flessione	0,32
5	690	Flessione	0,12	620	Flessione	0,28

Tab. 9 Caratteristiche dinamiche traversa [Lee04]

Montante				Traversa			
Convenzionale (kg)	Ibrida (kg)			Convenzionale (kg)	Ibrida (kg)		
	Totale	Acciaio	Composito		Totale	Acciaio	Composito
671	497	465	32	140	92	82	8

Tab. 10 Massa delle parti in composito e tradizionali [Lee04]

La massa dei componenti in composito è risultata minore del 26 % (174 kg) per il montante e del 34 % (48 kg) per la traversa senza perdita di rigidità.

L'introduzione delle due parti in composito hanno consentito di raggiungere una velocità massima di 2 m/s e una accelerazione massima di 14 m/s². L'accuratezza di posizionamento del centro di lavoro è risultata di $\pm 5 \mu\text{m}$ all'80 % della massima accelerazione operativa.

I costi delle parti in composito sono superiori rispetto a quelle in acciaio di circa il 30 %, tuttavia si possono considerare accettabili economicamente tenendo conto della minore taglia dei motori necessari.

Miglioramento dello smorzamento di montanti di macchine utensili con composito a fibra e matrice polimerica [Lee98]

In questo lavoro sono stati utilizzati materiali compositi rinforzati con fibra di vetro per aumentare lo smorzamento del montante di una rettificatrice di precisione, l'attenzione è dunque ricaduta principalmente sul miglioramento delle caratteristiche dinamiche della macchina e quindi della finitura ottenibile,

attraverso il miglioramento dello smorzamento. Per aumentare la capacità smorzante della colonna rispetto al modo flessionale il materiale composito a matrice polimerica e fibra di vetro è stato incollato alla colonna in ghisa come evidenziato in Fig. 12.

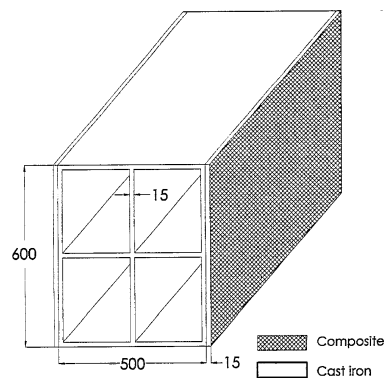


Fig. 12 Sezione del montante ibrido [Lee98]

Per ottimizzare la capacità smorzante è stata effettuata una misurazione delle proprietà dinamiche dei laminati compositi al variare dell'orientazione della fibra. Quindi è stata calcolata la capacità smorzante del montante ibrido in ghisa e piastre composite al variare dell'orientazione della fibra e dello spessore del laminato utilizzando l'equazione R.K.U. (Ross-Kerwin-Ungar). A partire dalla capacità smorzante così calcolata è stata stabilita la configurazione che offre la capacità smorzante migliore per montante composito.

Determinazione sperimentale dello smorzamento su provini a trave

Inizialmente sono stati realizzati e testati con prove di risposta all'impulso provini a trave in materiale composito con varie sequenze di laminazione in modo da misurare il coefficiente di smorzamento in funzione della sequenza di laminazione. Il materiale utilizzato è il tessuto in fibra di vetro e resina epossidica GEP215 della SK Chemicals (si veda la Tab. 11 per le principali caratteristiche del materiale). Il calcolo del modulo è stato effettuato utilizzando la teoria classica dei laminati (si veda ad esempio [Gen82]) in funzione dell'orientamento delle fibre.

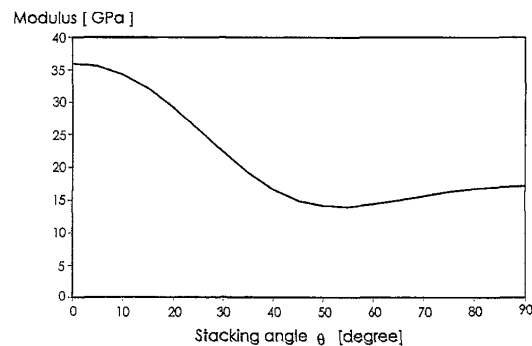


Fig. 13 Modulo di elasticità longitudinale al variare di θ con sequenza di laminazione $[\pm\theta]_n$ [Lee98]

La larghezza e lo spessore del provino a trave sono stati mantenuti costanti e pari rispettivamente a 10 mm e 3 mm. La lunghezza invece è stata fatta variare in modo da ottenere provini con differenti valori della prima frequenza naturale. Il valore di quest'ultima in condizioni di componente sospeso (free-free) è stato calcolato utilizzando la formula seguente.

$$(3) \quad f_1 = \frac{22,37}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}}$$

Dove, f_1 rappresenta la prima frequenza naturale del provino (Hz), L la sua lunghezza (mm); I è il momento di inerzia della sezione (m^4) ed S la sua area (m^2); E è il modulo di elasticità del materiale, e ρ la sua densità (kg/m^3).

Per la realizzazione dei provini è stato impiegata la reticolazione (curing) sotto vuoto in modo da eliminare l'aria e le tracce di vapori ed altri gas che si generano durante la reticolazione e per ottenere una distribuzione più omogenea della resina.

Il coefficiente di smorzamento è stato misurato per la prima frequenza naturale del provino, utilizzando la prova di risposta all'impulso al variare dell'orientamento delle fibre. Il provino è stato sospeso nei punti nodali in modo da ottenere le proprietà dinamiche evitando l'influenza dei cavi di supporto sulla prima frequenza naturale.

Il coefficiente di smorzamento η alla frequenza naturale è stato determinato utilizzando il metodo "half-power band width" [Ewi00] con la formula seguente.

$$(4) \quad \eta = \frac{f_2 - f_1}{f_r}$$

Il significato dei simboli è illustrato in Fig. 11.

Come illustrato in Fig. 14 al crescere dell'angolo θ compreso tra la direzione longitudinale del provino e le fibre il coefficiente di smorzamento cresce fino ad un valore massimo corrispondente alla configurazione $[\pm 45^\circ]_n$ e oltre tale valore decresce leggermente.

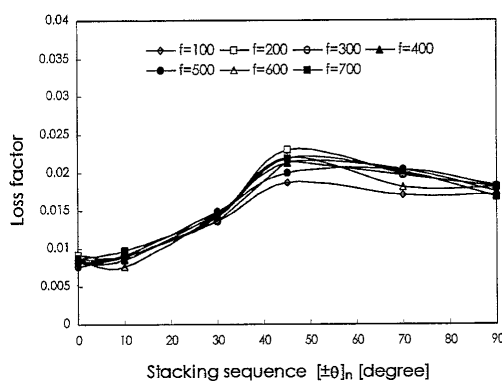


Fig. 14 Coefficiente di perdita in funzione della sequenza di laminazione [Lee98]

Il coefficiente di smorzamento non risulta invece particolarmente influenzato dalla prima frequenza propria del provino.

Calcolo del coefficiente di smorzamento della colonna in ghisa e fibra di vetro

Lo strato di rinforzo composito in fibra di vetro e resina epossidica è applicato per incollaggio ai fianchi del montante in modo da aumentare la capacità smorzante rispetto alla prima frequenza associata ad un modo di natura flessionale.

Per la previsione del coefficiente di smorzamento η del montante ibrido relativo al modo flessionale viene impiegata la relazione R.K.U. (Ross-Kerwin-Unger) a meno dei termini di ordine superiore, espressa come segue.

$$(5) \quad \eta = \eta_s + \frac{e_c i_c}{1 + e_c i_c} (\eta_c - \eta_s)$$

Con il seguente significato dei simboli.

$$e_c = \frac{E_c}{E_s} \quad i_c = \frac{I_c}{I_s}$$

- η : coefficiente di smorzamento della parte ibrida
- η_s : coefficiente di smorzamento della parte in ghisa (0,003)
- η_c : coefficiente di smorzamento della parte in composito
- I_s : momento di inerzia della sezione della parte in ghisa
- I_c : momento di inerzia della sezione della parte in composito
- E_s : modulo di elasticità della parte in ghisa
- E_c : modulo di elasticità della parte della parte in composito

Con la formula (5) è stato possibile calcolare il coefficiente di smorzamento η del montante ibrido al variare dell'angolo θ utilizzando come modulo elastico E_c della parte composita quello calcolato con la teoria classica dei laminati (Fig. 13) e come smorzamento della parte in composito η_c quello ricavato dalle prove sperimentali su provini a trave (Fig. 14). Le tre figure seguenti riassumono i risultati ottenuti al variare dei parametri di progetto a disposizione.

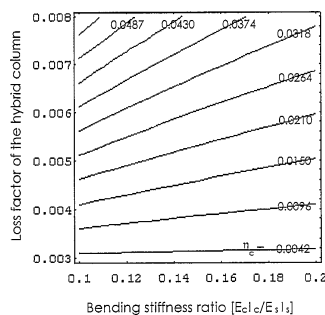


Fig. 15 η stimato in funzione del rapporto tra le rigidità e di η_c [Lee98]

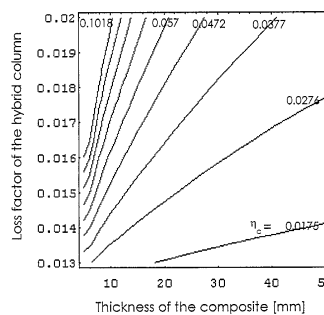


Fig. 16 η stimato in funzione dello spessore del composito e di η_c [Lee98]

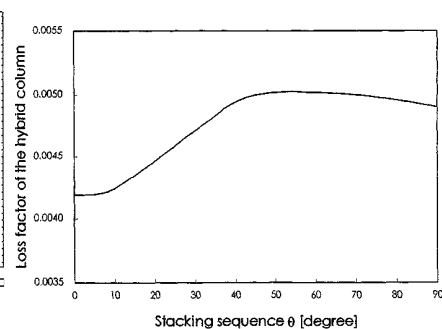


Fig. 17 η stimato in funzione di θ con sequenza di laminazione $[\pm\theta]_n$ [Lee98]

In Fig. 15 è riportato l'andamento del coefficiente di smorzamento stimato (η) al variare del rapporto tra la rigidità flessionale della parte composito e quella della parte in ghisa e del coefficiente di smorzamento del composito: η cresce al crescere di entrambi i fattori.

La Fig. 16 mostra l'andamento del coefficiente di smorzamento stimato (η) al variare dello spessore del composito e dello smorzamento del composito stesso: anche in questo caso η cresce al crescere di entrambi.

Infine in Fig. 17 viene evidenziato l'andamento di η in funzione dell'angolo (θ) delle fibre rispetto alla direzione longitudinale della parte considerando uno spessore delle pelli in composito pari a 15 mm: il valore ottimale di η pari a 0,0050 si raggiunge con θ pari a 45°.

Produzione dei laminati in fibra di vetro e resina epossidica

La produzione delle piastre in materiale composito è stata effettuata per laminazione manuale di strati di tessuto preimpregnato GEP215 della SK Chemicals le cui principali caratteristiche sono riportate in Tab. 11. La laminazione è stata effettuata utilizzando una piastra di alluminio come sostegno e una dima per ottenere il pezzo delle dimensioni desiderate. Il laminato è stato realizzato con la tecnica di stampaggio in

autoclave con sacco da vuoto in modo da minimizzare la quantità di pori presenti all'interno del pezzo finito e da massimizzarne le caratteristiche meccaniche.

Nome commerciale	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	Spessore ply (mm)	Fraz. in volume di fibra	Densità (kg/m ³)
GEP215	36	17,2	4,9	0,12	0,15	0,46	1980

Tab. 11 Caratteristiche del tessuto preimpregnato GEP215 [Lee98]

La realizzazione del laminato spesso 15 mm con un solo ciclo di reticolazione avrebbe causato un eccessivo riscaldamento del manufatto con conseguente degradazione chimica della resina, è stata quindi impiegata una tecnica di produzione in due fasi successive: in una prima fase sono state fabbricate due lamine composite spesse 6,75 mm composte da 45 strati di preimpregnato ciascuna utilizzando lo stampaggio in autoclave con sacco a vuoto e seguendo il ciclo di reticolazione riportato in Fig. 18; successivamente tra le due lamine sono stati inseriti 10 strati di preimpregnato ed è stato effettuato un ulteriore ciclo di co-reticolazione in autoclave con sacco a vuoto del tutto analogo al precedente, in modo da ottenere una lamina dello spessore finale desiderato.

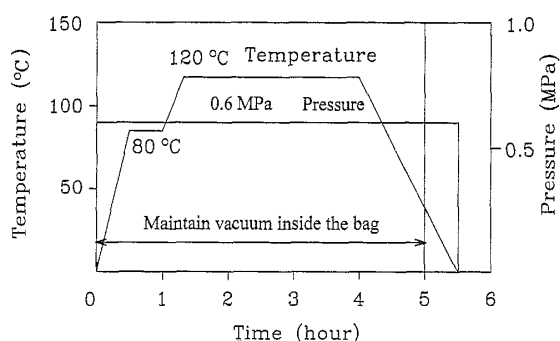


Fig. 18 Ciclo di reticolazione [Lee98]

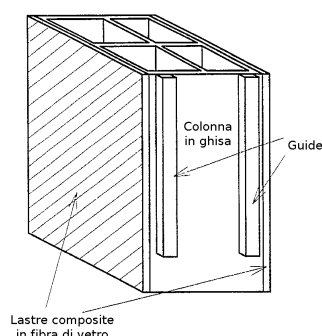


Fig. 19 Montante con lastre in fibra di vetro [Lee98]

Applicazione dei laminati compositi al montante

La superficie delle due lastre in materiale composito sono state carteggiate con carta abrasiva 80 mesh e quindi trattate con acetone ed infine incollate al montante in ghisa utilizzando l'adesivo epossidico IPCO 9923 della IPCO National (le principali caratteristiche sono riportate in Tab. 12) con reticolazione a temperatura ambiente per 12 ore. In Fig. 12 ed in Fig. 19 Montante con lastre in fibra di vetro [Lee98] Fig. 19 è riportato il layout del montante dopo l'incollaggio delle lastre in composito.

Nome commerciale	Modulo elastico (GPa)	Coefficiente di Poisson	Modulo a taglio (GPa)	Densità (kg/m ³)
IPCO 9923	2,5	0,45	0,862	1200

Tab. 12 Caratteristiche meccaniche dell'adesivo epossidico IPCO 9923 [Lee98]

Risultati delle prove dinamiche sulla struttura della macchina utensile

Tramite prove di risposta all'impulso sono state determinate le caratteristiche dinamiche del montante senza le lastre in fibra di vetro, montato sul basamento della rettificatrice realizzato in cemento polimerico come illustrato in Fig. 20.

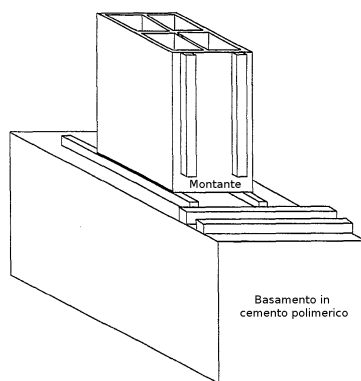


Fig. 20 Montante montato sul basamento [Lee98]

In questa configurazione sono state individuate due frequenze naturali fondamentali per la struttura, la prima, a 156 Hz, relativa al moto rigido del montante sul supporto della guida orizzontale con coefficiente di smorzamento di 0,0501 dovuto principalmente all'effetto dell'attrito nei cuscinetti e nelle guide; la seconda a 427 Hz relativa al modo flessionale del montante con coefficiente di smorzamento di 0,0122 dovuto all'attrito nei giunti tra montante e guida orizzontale ed allo smorzamento interno della ghisa.

Le stesse prove sono state poi effettuate con il montante ibrido (con le piastre in composito) montato sullo stesso basamento. La prima frequenza naturale in questa configurazione è risultata di 153 Hz con coefficiente di smorzamento di 0,0539, valori del tutto analoghi a quelli della soluzione in sola ghisa poiché il rinforzo in materiale composito non contribuisce al coefficiente di smorzamento caso di moto rigido della colonna. La seconda frequenza naturale invece è risultata pari a 434 Hz con un coefficiente di smorzamento pari a 0,0165 cioè il 35 % maggiore rispetto al caso con montante in sola ghisa poiché il rinforzo in materiale composito concorre alla determinazione dello smorzamento nel modo flessionale del montante.

L'aumento del coefficiente di smorzamento associato alla seconda frequenza propria del 35 % è risultato maggiore di quello previsto utilizzando l'equazione (5) che prevede un coefficiente di smorzamento di 0,0158 con aumento soltanto del 30 %. La differenza potrebbe essere causata da effetti di taglio all'interno del materiale composito e dalla presenza dello strato di adesivo epossidico.

2.2.2.2. Mandrino in materiale composito

Realizzazione di un sistema albero cuscinetti in materiale composito per una macchina utensile [Cho97]

In [Cho97] viene progettato l'albero in materiale composito di un mandrino con cuscinetti a sfere rappresentato in . Sono state utilizzate fibre di carbonio con matrice epossilica. L'obiettivo è quello di migliorare le caratteristiche dinamiche del mandrino puntando sull'incremento della rigidezza e sull'aumento dello smorzamento, caratteristica intrinseca del materiale composito.

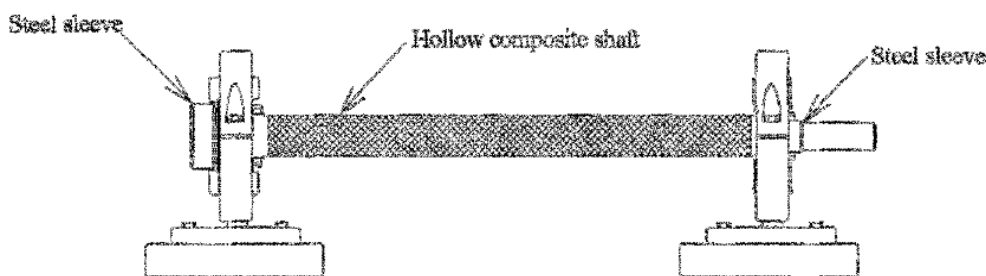


Fig. 21 Albero mandrino con cuscinetti [Cho97]

Il lavoro confronta la nuova soluzione progettuale caratterizzata dall'albero cavo in materiale composito con la soluzione tradizionale che prevede l'utilizzo di un albero a sezione piena in acciaio.

	Preimpregnato	Adesivo (IPCO 9923)
Modulo elastico (GPa)	131,6	1,3
Modulo elastico trasversale (GPa)	8,2	
Modulo di taglio (GPa)	6,1	0,46
Coefficiente di Poisson	0,3	45
Resistenza a trazione (GPa)	1,78	0,41
Resistenza trasversale (MPa)	50	13,7
Resistenza a taglio (MPa)	88	
Frazione in volume fibra (%)	60	
Densità (kg/m ³)	1600	

Tab. 13 Caratteristiche meccaniche preimpregnato fibra di carbonio – resina epossidica e adesivo [Cho97]

Viene scelto l'orientamento delle fibre $[\pm 30^\circ]_{NT}$ che determina un aumento delle frequenze proprie dell'albero sia dei modi flessionali che dei modi torsionali. Viene scelto inoltre lo spessore del materiale composito. L'albero così progettato permette di avere un ridotto coefficiente di dilatazione termica in senso assiale e un coefficiente paragonabile con quello dell'acciaio in senso trasversale.

La valutazione delle prestazioni dell'albero vengono eseguite sia attraverso simulazioni numeriche che mediante prove sperimentali su di un prototipo montato su una coppia di cuscinetti montati ad O. All'estremità dell'albero sono stati incollati due manicotti, è verificata inoltre la possibilità di trasmettere la coppia voluta.

Le prove sperimentali effettuate sul prototipo rappresentano l'aspetto più interessante del lavoro. E' stato rilevato il valore della prima frequenza propria del sistema ed il relativo coefficiente di smorzamento.

	Steel spinde system	Composite spindle system	Variation
Frequenza naturale (Hz)	269	300	+1,1 volte
Coefficiente di smorzamento	0,001	0,0068	+6,8 volte
Massa (kg)	8,6	0,29	-29,6 volte

Tab. 14 Riassunto prove sperimentali sul prototipo [Cho97]

Inoltre è stato riscontrato un aumento della rigidità dinamica proporzionale a $\zeta \cdot k$.

Progettazione di mandrino con cuscinetti ad aria in materiale composito [Cha02]

In [Cha02] è stata analizzata la progettazione di un albero per mandrino con cuscinetti ad aria.

Il lavoro punta principalmente sulla riduzione di massa infatti viene proposto anche il progetto di un rotore in materiale composito.

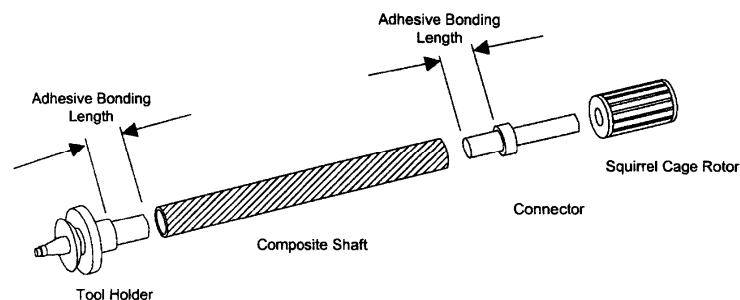


Fig. 22 Mandrino in composito con cuscinetti ad aria [Cha02]

La scelta dell'orientamento delle fibre è stata fatta cercando ottimizzare il cedimento radiale, gli sforzi termici residui e la rigidità specifica flessionale. Le valutazioni sono state fatte con modelli ad elementi

finiti e approcci analitici. Il materiale utilizzato per la realizzazione dell'albero è il preimpregnato con fibra di carbonio e resina epossidica USN 125 della "SK Chemical" (le caratteristiche meccaniche principali del materiale si riportano in Tab. 15) e con sequenza di laminazione $[\pm 60_2/\pm 15_2/\pm 60_2]_T$ selezionata dopo una fase di ottimizzazione svolta tramite analisi di sollecitazione e rigidezza. Il ciclo di polimerizzazione utilizzato è riportato in Fig. 18.

	Valore a temperatura ambiente	Valore a 80 C
Modulo elastico (GPa)	4,7	1,1
Resistenza a trazione (MPa)	39	17
Allungamento percentuale a rottura (%)	2,0	9,6
Densità	1200	1200

Tab. 15 Caratteristiche meccaniche del preimpregnato USN 125 [Cha02]

Sono inoltre state condotte prove di analisi modale sperimentale con albero e rotore sospesi. Si è riscontrato un aumento, rispetto alla soluzione in acciaio, della prima frequenza propria pari a circa il 17% ed un incremento del fattore di smorzamento pari a 563%. Il comportamento dinamico dell'albero è risultato comunque pesantemente influenzato dalla presenza dei cuscinetti. Si è riscontrato un incremento particolarmente significativo del fattore di smorzamento (da 0.002 a 0.016, incremento pari a 8 volte), l'entità dell'incremento viene confermata, anche se in misura minore, dai risultati delle prove svolte in [Cho97]

2.2.2.3. Alesatore in materiale composito

In letteratura è stato possibile reperire un piccolo numero di articoli [Nag97], [Arg00], e [Lee03] che riguardano la produzione di barre alesatrici fisse e rotanti che utilizzano, con soluzioni abbastanza differenti, materiale composito per aumentare la rigidezza statica, lo smorzamento, le frequenze proprie e di conseguenza la rigidezza dinamica dell'utensile.

Sebbene l'argomento di queste pubblicazioni non sia strettamente attinente la struttura della macchina utensile, esse meritano di essere analizzate perché la soluzione impiegata può essere allargata a particolari costruttivi di notevole interesse all'interno della macchina utensile. I concetti utilizzati potrebbero essere applicati con risultati interessanti alla realizzazione di parti altamente sollecitate a flessione, torsione e/o trazione come l'albero dei motori, le viti di trasmissione e l'albero del mandrino poiché permettono di realizzare elementi caratterizzati da frequenze proprie elevate e grande smorzamento.

Si è ritenuto quindi opportuno analizzare nel dettaglio [Lee03], la pubblicazione più significativa sull'argomento perché mette in evidenza sia le strategie progettuali utilizzate che la tecnica di produzione che l'analisi sperimentale delle prestazioni del pezzo realizzato, sebbene non utilizzi tecniche di progettazione degli esperimenti né tecniche di analisi statistica dei risultati.

Progettazione e realizzazione di una barra alesatrice rotante in fibra di carbonio e resina epossidica [Lee03]

Questa pubblicazione, sebbene riguardi un argomento non strettamente attinente la struttura della macchina utensili, poiché tratta la progettazione di una barra alesatrice in materiale composito, merita di essere analizzata perché la soluzione impiegata può essere allargata a particolari costruttivi di notevole interesse all'interno della macchina utensile. I concetti utilizzati potrebbero essere applicati con risultati interessanti alla realizzazione di parti altamente sollecitate a flessione, torsione e/o trazione come l'albero dei motori, le viti di trasmissione e l'albero del mandrino poiché permettono di realizzare elementi caratterizzati da frequenze proprie elevate e grande smorzamento. Discorso del tutto analogo vale per [Lee04b] che tratta sostanzialmente la stessa tematica ed è in parte relativa allo stesso lavoro.

Viene descritta la progettazione e la realizzazione di una barra alesatrice del diametro di 22,5 mm lunga 240 mm (di comune impiego per la lavorazione di testate per motori automobilistici) utilizzando un materiale composito basato su fibra di carbonio pitch based (ricavata a partire da pece).

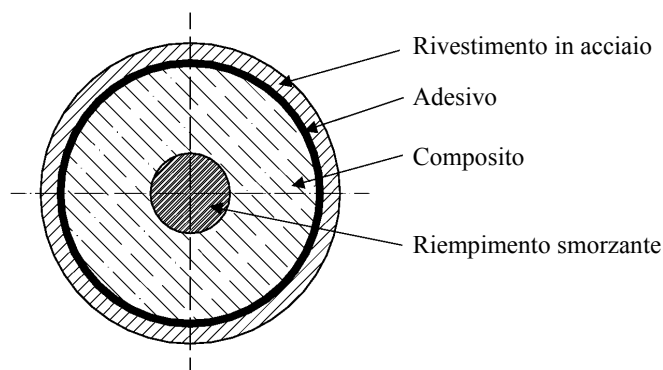


Fig. 23 Sezione della barra alesatrice in composito [Lee03]

In Fig. 23 sono rappresentate le varie parti della sezione della barra e in Tab. 16 sono indicate le principali caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati, il carburo di tungsteno è citato per confronto poiché è un materiale di interesse per questo tipo di applicazione.

- **Il rivestimento esterno in acciaio** ha la funzione di proteggere gli strati interni dal contatto con il truciolo e con i fluidi da taglio durante la lavorazione. Poiché il modulo di elasticità dell'acciaio è circa la metà di quello del composito, lo spessore del rivestimento viene reso minimo (circa 0,2 mm) grazie ad una operazione di tornitura finale che segue l'incollaggio del rivestimento sulla parte in composito.
- **Il riempimento smorzante** ha due funzioni, serve da mandrino su cui avvolgere le fibre di carbonio preimpregnate ed aumenta la capacità smorzante del barenò.
- **L'adesivo** serve per collegare il rivestimento in acciaio con la barra in composito e incrementa la capacità di smorzamento grazie al meccanismo del "constrained damping". Si tratta di un adesivo strutturale epossidico tenacizzato con gomma con denominazione commerciale DP 460 dell'americana 3M.
- **Il composito a fibra di carbonio** è realizzata con un preimpregnato di fibre di carbonio "pitch based" (da pece) ad alto modulo e resina epossidica. La nomenclatura commerciale del materiale è URN 300 della coreana "SK Chemicals"

I parametri di progetto considerati sono: lo spessore del tubo esterno in acciaio, lo spessore del collante, il diametro dell'anima smorzante ed il materiale di cui essa è composta.

	Carburo di tungsteno	URN 300 (Composito)	DP 460 (Adesivo)
E_1 (GPa)	460	380	2,7
E_2 (GPa)		5,1	
G_{12} (GPa)	177	5,5	1,0
ν_{12}	0,3	0,29	0,40
ρ (kg/m ³)	14000	1750	1100
ζ	$2,2e^{-3}$	$20,7e^{-3}$	

Tab. 16 Caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati (Il carburo di tungsteno è inserito per confronto)

Le prestazioni della barra alesatrice durante la lavorazione dipendono essenzialmente da due fattori, la stabilità durante il taglio e la frequenza naturale fondamentale. La stabilità del taglio viene quantificata tramite la massima profondità di taglio che è possibile utilizzare senza l'insorgenza del chatter che viene calcolata come:

$$(6) \quad D_{\max} = \frac{2\zeta K}{0.8 \cdot u \cdot \cos(\gamma)}$$

Dove ζ è il coefficiente di smorzamento, K la rigidezza flessionale della barra, u l'energia specifica di taglio del materiale lavorato e γ l'angolo di spoglia superiore dell'utensile utilizzato. Fissata la lavorazione la massima profondità di taglio è proporzionale la rigidezza dinamica della barra definita come prodotto tra la rigidezza flessionale e il coefficiente di smorzamento.

La rigidezza dinamica è calcolata utilizzando la rigidezza flessionale equivalente come segue:

$$(7) \quad D = \zeta K = \frac{3\zeta (EI)_{equiv}}{l^3}$$

Dove l è la sporgenza della barra e $(EI)_{equiv}$ è la rigidezza flessionale equivalente della barra.

La prima frequenza propria è determinante perché limita la velocità di taglio senza chatter. Essa viene calcolata con la formula:

$$(8) \quad f_1 = \frac{3,56}{l^2} \sqrt{\frac{(EI)_{equiv}}{(\rho S)_{equiv}}}$$

Dove (ρS) rappresenta la densità per unità di area equivalente della barra composita e viene calcolata con la formula seguente.

$$(9) \quad (\rho S)_{equiv} = (\rho S)_{copertura} + (\rho S)_{adesivo} + (\rho S)_{composito} + (\rho S)_{anima}$$

Per determinare le prestazioni della barra è necessario quindi conoscere:

- La rigidezza flessionale equivalente della barra
- La densità dei materiali utilizzati
- Le condizioni di vincolo
- Il coefficiente di smorzamento

Le prime due caratteristiche vengono determinate analiticamente mentre lo smorzamento va determinato sperimentalmente poiché sono molti i fenomeni che concorrono a determinarne l'entità, tra questi in particolare lo smorzamento proprio del materiale (material damping), lo smorzamento legato allo stato di colla compresso (constrained layer damping), lo smorzamento "clamped joint", lo smorzamento aerodinamico (air borne camping). Quest'ultimo quindi viene determinato sperimentalmente su prototipi al variare dei parametri di progetto stabiliti.

Procedura sperimentale

La procedura seguita per la caratterizzazione delle varie configurazioni di parametri di progetto è la seguente:

1. Determinazione sperimentale con test di risposta dinamica all'impulso (impulse dynamic test) della prima frequenza propria e del coefficiente di smorzamento. I test sono effettuati con la barra alesatrice montata su un centro di lavoro verticale con la stessa forza di serraggio normalmente impiegata per la lavorazione di alesatura e con una zona di afferraggio pari a 40 mm.
2. Determinazione della rigidezza flessionale equivalente con la formula:

$$(10) \quad (EI)_{equiv} = \left(\frac{f_1 l^2}{3,516} \right) (\rho S)_{equiv}$$

3. Calcolo della rigidezza dinamica, utilizzando il coefficiente di smorzamento determinato sperimentalmente, secondo la formula:

$$(11) \quad D = 0,243 l \zeta_1 f_1 (\rho S)_{equiv}$$

Risultati ottenuti

I parametri di progetto considerati sono: lo spessore del tubo esterno in acciaio, lo spessore del collante, il diametro dell'anima smorzante ed il materiale di cui essa è composta.

- Prove al variare del diametro dell'anima smorzante (in acciaio).

Il diametro dell'anima interna è stato fatto variare tra 2 mm e 10 mm mantenendo costanti tutti gli altri parametri di progetto (spessore adesivo 0,1 mm, spessore tubo esterno 0,25 mm, materiale dell'anima acciaio).

La frequenza naturale resta circa costante per valori fino a 6 mm, oltre decresce sensibilmente.

Lo smorzamento non varia sensibilmente

La rigidezza dinamica resta circa costante per valori fino a 6 mm, oltre decresce sensibilmente.

- Prove al variare del materiale dell'anima smorzante di seguito sono indicati i materiali testati.

Case	Damping core material	Case	Damping core material
1	Steel	8	Stainless steel pipe
2	Aluminum	9	Alumina particle (#36) in stainless steel pipe
3	Tungsten carbide	10	Alumina particle (#120) in stainless steel pipe
4	Polyoxymethylene	11	Alumina particle (#220) in stainless steel pipe
5	Teflon	12	Silicone oil (1 Pa-s) in stainless steel pipe
6	Lead	13	Silicone oil (100 Pa-s) in stainless steel pipe
7	Lead in stainless steel pipe		

Tab. 17 Materiali testati per l'anima smorzante [Lee03]

Gli altri parametri di progetto rimangono costanti: spessore adesivo 0,1 mm, spessore tubo esterno 0,25 mm, diametro anima 6 mm.

La frequenza naturale rimane pressoché inalterata al variare del materiale dell'anima, invece lo smorzamento e la rigidezza dinamica variano decisamente.

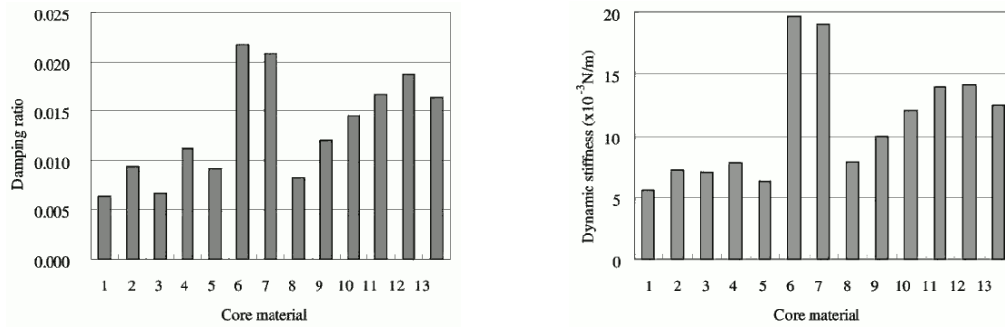


Fig. 24 Smorzamento e rigidezza dinamica al variare del materiale [Lee03]

I migliori risultati sono quelli ottenuti con anima in piombo che tuttavia non è utilizzabile come mandrino per l'avvolgimento del composito, quindi la soluzione tecnologicamente migliore è quella con core in piombo contenuto in un tubetto in acciaio inox.

- Prove al variare dello spessore del tubo esterno in acciaio tra 0 (senza tubo esterno in acciaio) e 1,25 mm.

Gli altri parametri di progetto rimangono costanti: spessore adesivo 0,1 mm, anima in piombo contenuta in un tubetto in acciaio inox, diametro anima 6 mm.

La frequenza naturale, lo smorzamento e la rigidezza dinamica decrescono al crescere dello spessore del tubo esterno.

La configurazione senza tubo esterno ha invece smorzamento, e la rigidezza dinamica della copertura in acciaio sono decisamente inferiori rispetto al caso con tubo esterno.

Il minimo spessore del tubo esterno facilmente ottenibile per rettifica è 0,25 mm.

- Prove al variare dello spessore dell'adesivo tra 0,1 mm e 0,5 mm.

Gli altri parametri di progetto rimangono costanti: spessore del tubo esterno in acciaio 0,25 mm, anima in piombo contenuta in un tubetto in acciaio inox, diametro anima 6 mm.

La frequenza naturale, lo smorzamento e la rigidezza dinamica mostrano un andamento del tutto analogo. Si ha un tratto costante a valore elevato fino ad uno spessore di 0,1 mm e quindi i valori decrescono.

Il valore che garantisce prestazioni più elevate è 0,1 che risulta anche essere il valore che da la massima resistenza a fatica dello strato di adesivo secondo [Cho96].

Tecnologia di produzione della barra alesatrice

La barra alesatrice è stata realizzata avvolgendo i preimpregnati sull'anima interna e quindi effettuando la reticolazione in autoclave con la tecnica di degassaggio in sacco da vuoto (vacuum bag degassing). La sequenza di laminazione utilizzata è del tipo $[\pm 5]_n$ che minimizza i problemi di rottura della matrice durante la successiva operazione di rettifica. Successivamente il tubo di acciaio esterno viene incollato al composito utilizzando il collante epossidico.

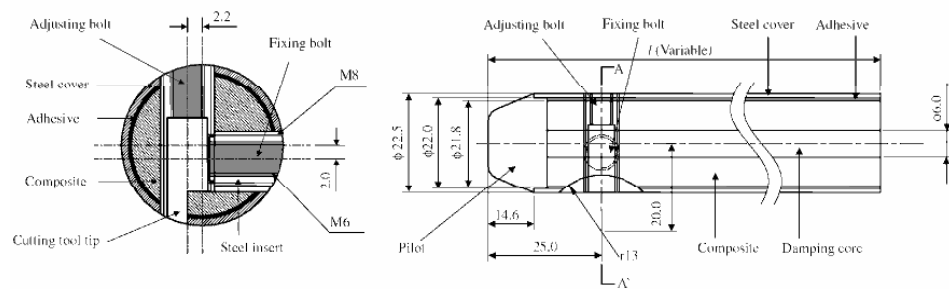


Fig. 25 Disegno della barra alesatrice in composito [Lee03]

Le sedi per la placchetta, per il grano di posizionamento e per il grano di bloccaggio sono ricavate (Fig. 1) forando il composito e incollando all'interno del foro una bussola in acciaio che successivamente viene filettata in modo da evitare le difficoltà di filettatura tipiche di un materiale composito.

Un lavoro del tutto analogo a quello presentato in questo articolo è descritto anche in [Lee04b], sebbene in forma più sintetica e senza sostanziali sviluppi o approfondimenti.

2.2.3. Strutture smorzanti composite basate sul Constrained Layer Camping

In letteratura sono presenti diverse fonti che documentano un approccio innovativo allo smorzamento nella macchina utensile basato essenzialmente sul meccanismo del constrained layer camping. In particolare, in [Hal99], viene analizzata l'applicabilità di diverse soluzioni smorzanti all'interno di una macchina utensile e tra queste il constrained layer camping. In [Bam02], [Bam00] e nel brevetto [Slo98], sono state progettate, ottimizzate e testate diverse soluzioni progettuali che permettono di applicare in modo semplice ed economico questa tecnica alla struttura di una macchina utensile. L'idea alla base di questi lavori è quella di inserire con interferenza uno strato di materiale viscoelastico smorzante tra una parte della struttura ed un supporto realizzato ad hoc, detto "constraining layer", con lo scopo di dissipare all'interno del materiale viscoelastico l'energia cinetica che si sviluppa nel moto relativo che ha luogo tra le due parti rigide durante la flessione o la torsione. In Fig. 26 è riportato uno schema che illustra questo tipo di smorzatore.

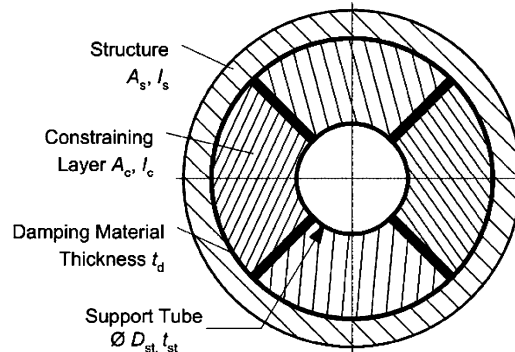


Fig. 26 Smorzatore ShearDamper basato sul "constrained layer damping" [Bam02]

La soluzione più interessante, illustrata in Fig. 27, prevede di realizzare più constraining layers gettando in opera del calcestruzzo espandente all'interno di inserti tubolari in materiale viscoelastico collocati tra due tubi concentrici che realizzano una parte della struttura della macchina. Il calcestruzzo, durante la fase di solidificazione si espande, grazie all'aggiunta di un additivo apposito (Intraplast-NTM), e quindi blocca lo strato di materiale smorzante a contatto con il tubo interno e con quello esterno.

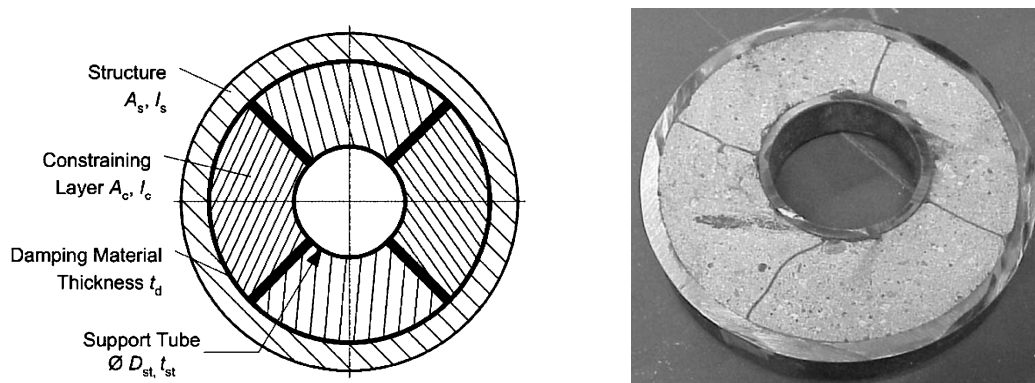


Fig. 27 Smorzatore basato su "constrained layer damping" in calcestruzzo [Bam02]

Un ulteriore incremento di prestazioni è stato ottenuto rinforzando il calcestruzzo con alcune barre di armatura in acciaio poiché in questo modo è possibile ottenere una rigidità del "constraining layer" paragonabile a quella dell'acciaio utilizzato per realizzare la struttura. Dall'analisi della Fig. 28 è possibile effettuare una sommaria valutazione dei risultati ottenuti, in termini di miglioramento dell'effetto smorzante, infatti rappresenta un confronto della risposta nel tempo all'impulso di diverse soluzioni progettuali comparabili.

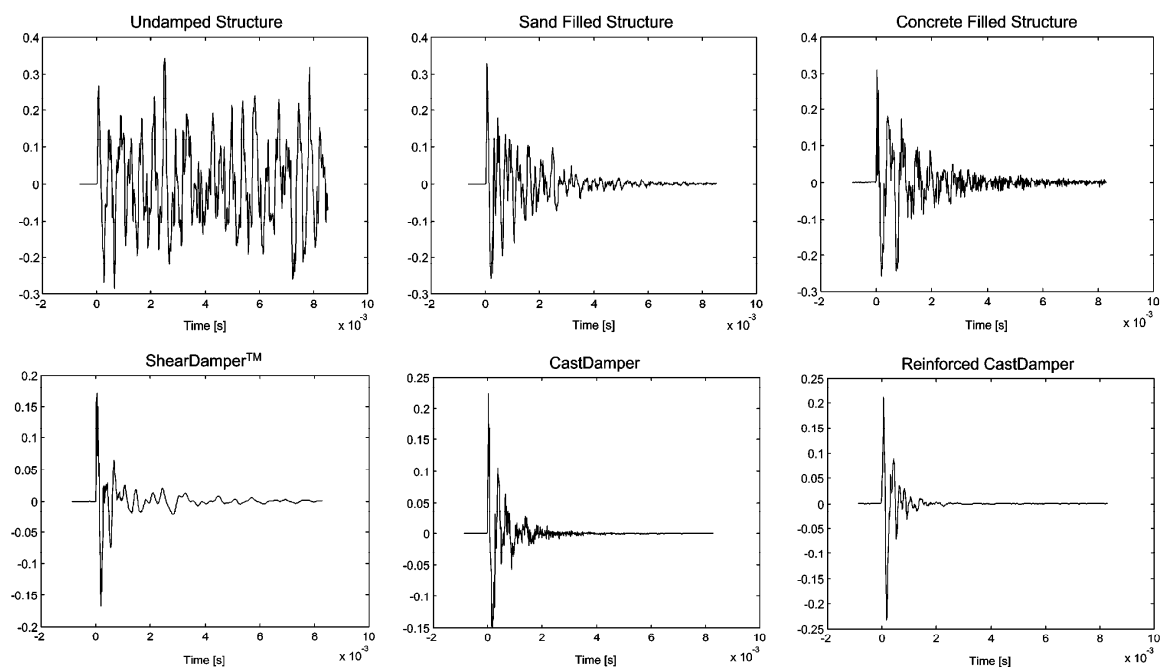


Fig. 28 Confronto tra la risposta all'impulso di diverse soluzioni smorzanti [Bam02]

2.2.4. Schiume di alluminio

Tra i materiali innovativi le schiume metalliche, di alluminio in particolare, dopo una lunga fase di sperimentazione in laboratorio e dopo essere state applicate con successo in altri settori industriali, stanno suscitando un interesse crescente per molteplici ragioni. L'eccezionale mix di caratteristiche meccaniche e fisiche che le contraddistingue, la continua riduzione dei costi di produzione e ad una migliorata disponibilità commerciale, infatti le rendono una scelta interessante per sostituire o affiancare i materiali tradizionali nella progettazione di macchine utensili innovative. Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche, tecnologiche, elettriche, termiche, acustiche, metallurgiche e morfologiche delle varie tipologie di schiume metalliche disponibili in commercio è stato possibile reperire una ingente quantità di letteratura accademica. Le informazioni disponibili sulle applicazioni industriali di questi materiali, sono invece piuttosto ridotte, e riguardano essenzialmente applicazioni nel settore aerospaziale, in quello delle

automobili ad altissime prestazioni, in quello delle celle a combustibile ed anche in questi casi non sono disponibili indicazioni relative agli aspetti economici dell'utilizzo di questi materiali. Per quanto riguarda il settore della macchina utensile è stato possibile individuare essenzialmente tre fonti, le prime due [Neu03] e [MSZ06] sono legate al Metal Foam Center del "Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU" di Chemnitz dove sono state applicate con successo le schiume metalliche prodotte per metallurgia delle polveri a diverse parti di macchine utensili e la terza [Sut06] è una tesi di laurea del Politecnico di Milano. Queste fonti verranno esaminate nei paragrafi 2.2.4.2 e 2.2.4.3 perché, sebbene incomplete, evidenziano risultati di tutto interesse.

2.2.4.1. Caratteristiche del materiale

Spesso nel linguaggio comune si utilizza il termine schiuma metallica come sinonimo di materiale metallico poroso, riferendosi ad una qualsiasi massa metallica contenente una percentuale non trascurabile di porosità, indipendentemente da come esse siano state ottenute. Tale definizione non è corretta e confonde di fatto le schiume metalliche e le spugne metalliche, due tipi di materiale che vale la pena di descrivere separatamente poiché hanno caratteristiche fisiche e meccaniche decisamente diverse e differenti campi di applicazione.

A rigore con il termine schiuma si intende una dispersione, più o meno uniforme, di una fase gassosa all'interno di una liquida. Volendo quindi dare una definizione del tutto rigorosa di schiuma metallica si può dire che si tratta di una dispersione uniforme di un gas all'interno di una matrice metallica ottenuta solidificando una schiuma formata dal metallo allo stato liquido. Si tratta cioè di un materiale che si ottiene solidificando una massa composta da bolle di metallo liquido e quindi la sua struttura non può che essere "a cella chiusa" cioè le porosità presenti non sono interconnesse tra loro ma sono separate da pareti più o meno sottili di metallo [Ban01].

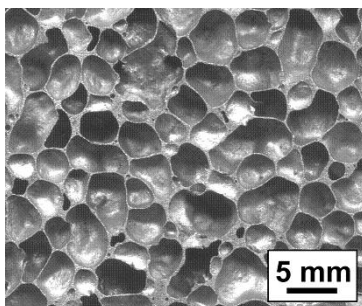


Fig. 29 Schiuma metallica [Wik07]

In commercio sono reperibili schiume realizzate in alluminio, zinco e piombo ma in laboratorio sono state ottenute anche schiume in magnesio, stagno, ottone ed anche oro, sebbene per il momento queste ultime siano da considerarsi per applicazioni di ricerca.

La percentuale di porosità ottenibile all'interno di una schiuma metallica è compresa tra 60 % e 97 % circa, a seconda del particolare processo di produzione utilizzato. I costi, in particolare per quanto riguarda l'alluminio sono abbastanza contenuti.

Le spugne metalliche sono invece materiali a cella aperta, le porosità del materiale sono cioè interconnesse. Vengono realizzate con processi estremamente particolari che non partono da una schiuma liquida e quindi possono impiegare una gamma più ampia di materiali, è infatti possibile ottenere spugne di rame, acciaio al carbonio, acciaio inossidabile, bronzo e nickel oltre che di alluminio e zinco in una gamma di porosità compresa tra il 20 % e il 97 %.

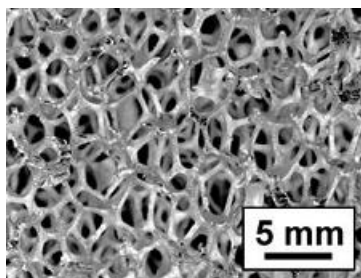


Fig. 30 Spugna metallica [Wik07]

Le spugne metalliche sono reperibili in commercio, ma gli elevatissimi costi, possono raggiungere i 10 \$ per pollice cubo, le rendono incompatibili con le comuni applicazioni strutturali [Ban01].

L'applicazione delle spugne metalliche al settore della macchina utensile su vasta scala, non è quindi pensabile al momento attuale. Ben diverso è il caso delle schiume di alluminio che grazie a caratteristiche meccaniche particolarmente interessanti, e a costi più accettabili destinati a ridursi grazie al crescente utilizzo industriale, potranno rivelarsi di sicuro interesse nel futuro nella macchina utensile.

A titolo di esempio si riportano in Tab. 18 le principali caratteristiche delle schiume di alluminio reperibili in commercio tratta da [Ash00] a confronto con quelle della lega di alluminio AA6061 di comune applicazione in molti settori industriali [Mat07].

Proprietà	AA6061	Alporas	Alulight	Recemat	ERG	Inco
Materiale	-	Al	Al	Al-SiC	Al	Ni
Struttura	-	Chiusa	Chiusa	Chiusa	Aperta	Aperta
Densità (Mg/m^3)	2,7	0,2-0,25	0,3-1,0	0,07-0,56	0,16-0,25	0,26-0,37
Densità relativa	1,0	0,08-0,1	0,1-0,35	0,02-0,2	0,05-0,1	0,03-0,04
Modulo di Young (GPa)	68,9	0,4-1,0	1,7-12	0,02-2,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Modulo di Taglio (GPa)	26	0,3-0,35	0,6-5,2	0,001-1,0	0,02-0,1	0,17-0,37
Coefficiente di Poisson	0,33	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34
Resistenza a Compressione (MPa)	145?	1,3-1,7	1,9-14,0	0,04-7,0	0,9-3,0	0,6-1,1
Resistenza a Trazione (MPa)	145	1,6-1,9	2,2-3,0	0,05-8,5	1,9-3,5	1,0-2,4
Punto di Fusione (K)	850-920	910-920	840-850	830-910	830-920	1700-1720
Massima Temperatura di Servizio (K)	-	400-420	400-430	500-530	380-420	550-650
Minima Temperatura di Servizio (K)	-	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2
Calore Specifico (J/kgK)	896	830-870	910-920	830-870	850-950	450-460
Conducibilità Termica (W/mK)	154	3,5-4,5	3,0-35	0,3-10	6,0-11	0,2-0,3
Resistività ($\Omega \cdot m \cdot 10^{-8}$)	4,32	210-250	20-200	90-3000	180-450	300-500

Tab. 18 Caratteristiche meccaniche di alcune schiume metalliche commerciali [Ash00], [Mat07]

Proprietà meccaniche

A partire dai dati reperibili nella letteratura tecnica (in particolare in [Ash00]) si analizzano brevemente le caratteristiche meccaniche delle schiume metalliche.

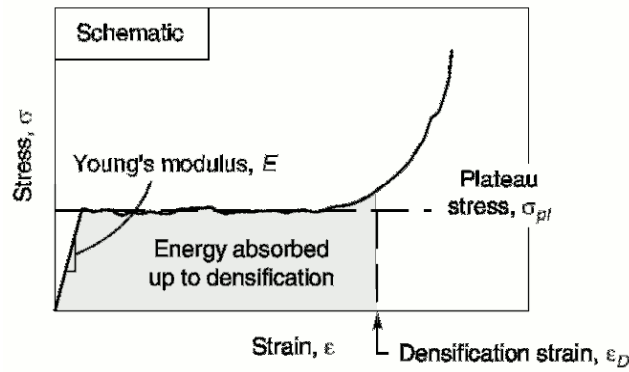


Fig. 31 Andamento schematico della curva σ - ϵ per una schiuma metallica a compressione [Ash00]

La Fig. 31, rappresenta l'andamento indicativo della curva sforzo-deformazione per una schiuma metallica in un test di compressione, si può notare che la fase di carico iniziale manifesta un comportamento di tipo elastico lineare. Se si stima il modulo di elasticità come tangente alla curva nell'origine tuttavia si ottiene un valore decisamente più basso di quello del materiale base, ciò dipende dal fatto che alcune celle raggiungono lo snervamento già per carichi molto bassi. Risultati più realistici ed utili si ottengono determinando il modulo di elasticità (E) caricando la schiuma fino ad entrare in campo plastico e misurando E nella fase di scarico del provino.

Sono anche disponibili relazioni sperimentali per la determinazione del modulo di elasticità E , del modulo G e del coefficiente di Poisson ν in funzione della densità relativa (ρ/ρ_s):

$$(12) \quad E \approx \alpha_2 E_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad G \approx \frac{3}{8} \alpha_2 G_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad \nu \approx 0,3$$

Dove ρ è la densità della schiuma metallica, ρ_s la densità del metallo base; i coefficienti n ed α_2 dipendono dalla struttura e dalla tipologia della schiuma (n assume valori compresi tra 1,8 e 2,2; α_2 assume valori tra 0,1 e 4).

Le schiume a celle aperte (spugne metalliche) presentano un'ampia zona in cui la deformazione cresce mentre la sollecitazione σ_{pl} rimane costante fino ad un valore di deformazione ϵ_D per cui si ha la compattazione della schiuma e quindi lo sforzo torna a crescere rapidamente. Le due grandezze sopra definite possono essere stimate dalle formule seguenti.

$$(13) \quad \sigma_{pl} \approx (0,25 \div 0,35) \sigma_{y,s} \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^m \quad \epsilon_D \approx \left(1 - \alpha_1 \frac{\rho}{\rho_s} \right)$$

Dove m assume valori compresi tra 1,5 e 2; ed α_1 varia tra 1,4 e 2.

Il modulo elastico a trazione per una schiuma metallica presenta solitamente un valore maggiore rispetto a quello a compressione di circa il 10 %, ma va tenuto presente che l'anisotropia nella distribuzione della dimensione delle celle può portare a variazioni significative del modulo elastico (fino a circa il 30 %) al variare della direzione di sollecitazione.

In Fig. 32 si riportano alcune curve sforzo-deformazione ottenute durante prove di trazione su schiume metalliche Alulight con differenti valori di densità relativa, come si può notare il comportamento a trazione è marcatamente differente rispetto a quello a compressione, in particolare si nota la mancanza del plateau plastico e del fenomeno della densificazione. Si ha una prima regione elastica non lineare in cui lo sforzo cresce rapidamente con la deformazione ed avvengono micro-plasticizzazioni anche per valori di

deformazione molto bassi, questa zona ha termine quando viene raggiunto lo sforzo di snervamento della schiuma. Al crescere del carico ha inizio la fase di incrudimento della schiuma che ha termine quando lo sforzo raggiunge il valore limite di rottura.

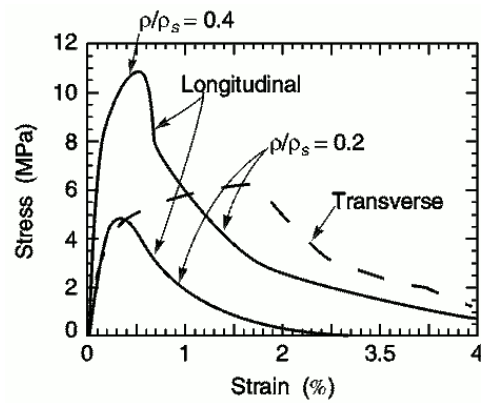
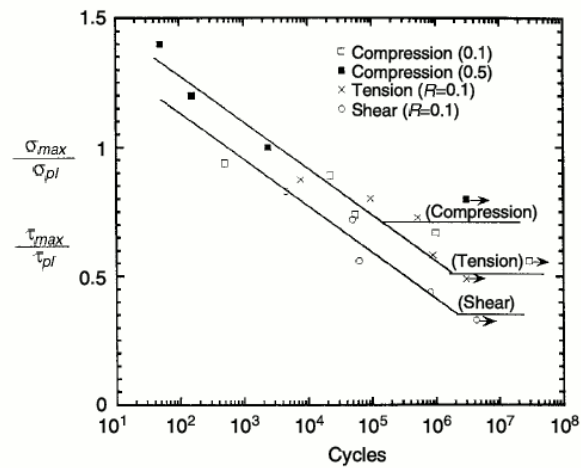
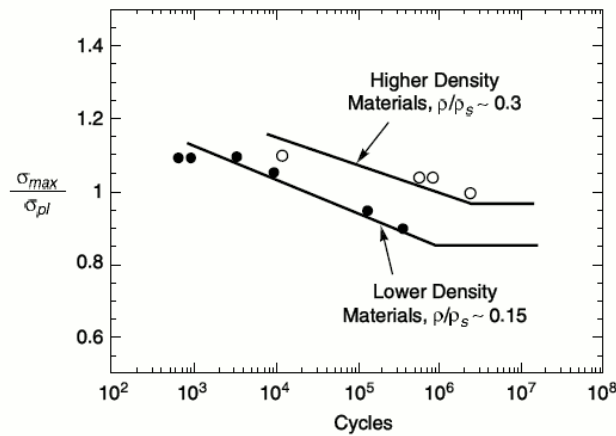


Fig. 32 Curve sforzo-deformazione a trazione per schiume Alulight [Ash00]

Per quanto riguarda il comportamento a fatica, prove di fatica ad elevato numero di cicli consentono di misurare un limite di fatica $\Delta\sigma_e$ che rappresenta il campo di sforzo per il quale il materiale resiste almeno a 10^7 cicli di sollecitazione. In Fig. 33 è riportato un esempio di diagramma di Whöler per una schiuma metallica.



(a)



(b)

Fig. 33 (a) Diagrammi di Whöler in compressione-compressione e trazione-trazione per una schiuma Alporas con densità relativa 0,11. (b) Diagrammi di Whöler in compressione-compressione per una schiuma Alulight con differenti densità relative e con rapporto di carico ($R=0,1$)

Un'altra importante caratteristica tipica di questi materiali è la capacità di smorzamento delle vibrazioni che risulta fino a 5-10 volte più grande di quella del metallo base. Questa caratteristica si rivela di particolare interesse per gli impieghi strutturali nelle macchine utensili.

Di seguito si riportano, a titolo di indicazione i diagrammi a bolle di modulo elastico (Fig. 34), resistenza a compressione (Fig. 35) e modulo elastico specifico (Fig. 36) per le principali schiume metalliche reperibili in commercio ne permettono una prima valutazione comparativa.

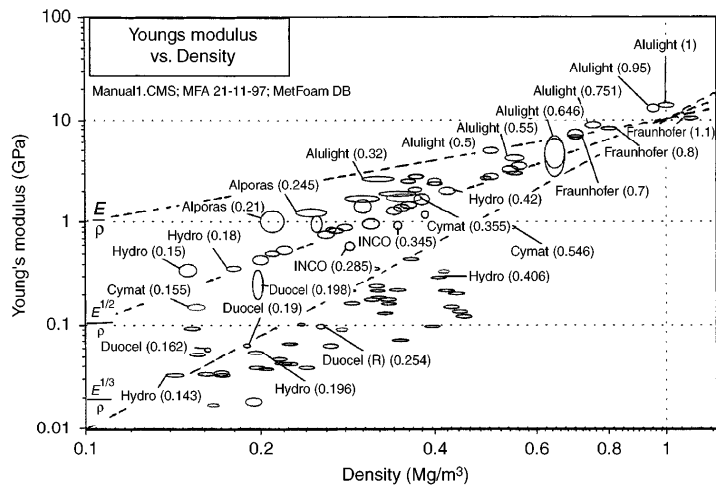


Fig. 34 Diagramma a bolle del modulo di Young rispetto alla densità [Ash00]

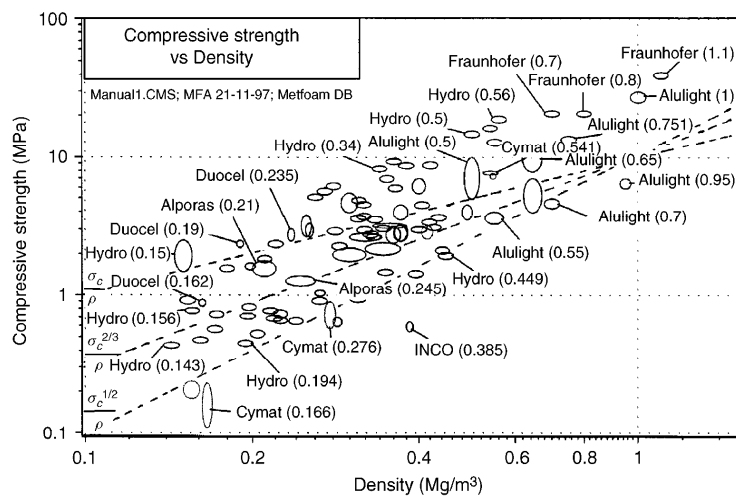


Fig. 35 Diagramma a bolle della resistenza a compressione rispetto alla densità [Ash00]

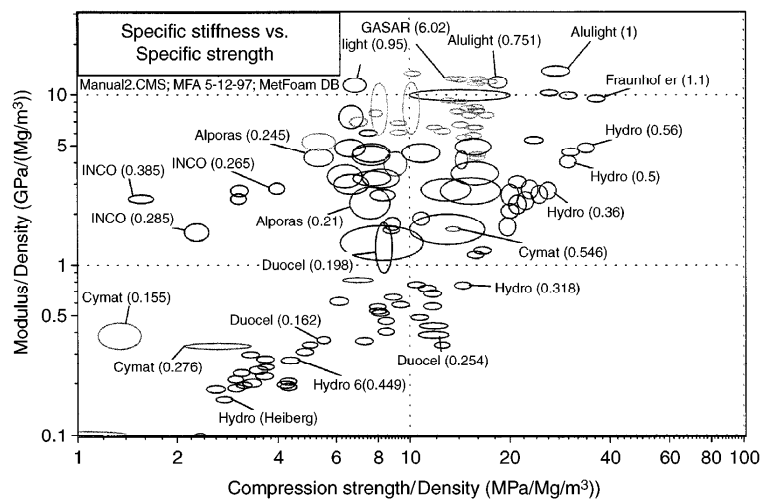


Fig. 36 Diagramma a bolle del modulo di Young specifico rispetto alla densità [Ash00]

A partire dalle precedenti relazioni è particolarmente utile, per finalità ingegneristiche, definire indici di merito che permettono di identificare i materiali più idonei in relazione alle sollecitazioni cui verranno sottoposti. Un confronto tra schiume metalliche e materiali di largo impiego nei componenti meccanici, quali acciaio ed alluminio [Ash00], ha condotto ad individuare i seguenti indici di prestazione:

- $E^{1/3}/\rho$ è l'indice che caratterizza la rigidezza flessionale di pannelli leggeri.

Un pannello in schiuma, a parità di rigidezza, è più leggero di uno dello stesso materiale pieno. Utilizzando la schiuma come materiale di riempimento di strutture sandwich è possibile ottenere un risparmio di peso anche maggiore.

- $\sqrt{\sigma_y}/\rho$ è l'indice che caratterizza la resistenza a flessione dei pannelli leggeri.

Un pannello in schiuma è più resistente, a parità di peso, di un pannello realizzato con lo stesso materiale pieno.

- La capacità di assorbire energia tipica delle schiume metalliche è caratterizzata dall'indice $\sigma_{pl}\epsilon_D$ che misura l'energia assorbita durante la deformazione del materiale fino al raggiungimento della sua deformazione da "densificazione" ϵ_D .
- $\eta E^{1/3}/\rho$ (dove η rappresenta un rendimento) misura la capacità di un pannello di smorzare le vibrazioni flessionali. Valori elevati di questo indice consentono di sopprimere il fenomeno della risonanza nel range acustico (20-20.000 Hz).
- $c_p\rho\lambda$ (dove c_p è il calore specifico e λ la conducibilità termica) caratterizza la scala temporale di penetrazione di un fronte termico all'interno di uno strato isolante di spessore dato; caratterizza inoltre l'energia termica totale accumulata nell'isolamento.

Sono dunque disponibili gli strumenti attraverso cui classificare e comparare il comportamento delle schiume metalliche rispetto a materiali tradizionali ed innovativi (compositi). Ancora parecchio lavoro sperimentale deve essere invece sviluppato per ampliare la conoscenza a schiume provenienti da differenti materiali di base e processi di produzione diversi.

2.2.4.2. Riempimento in schiuma di alluminio di strutture in acciaio

Banco prova motori lineari [MSZ06]

Presso l'MSZ è stata realizzata una tavola portapezzo per un banco di prova per motori lineari a cui viene applicata una forza massima nella direzione di avanzamento di 15 kN e che deve raggiungere una velocità di avanzamento massima di 140 m/min con una accuratezza di posizionamento di $\pm 1 \mu\text{m}$. La soluzione originale presa come riferimento (illustrata in Fig. 37) prevedeva la costruzione con lamiera in acciaio elettrosaldate.

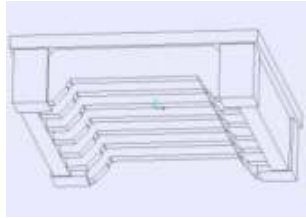


Fig. 37 Soluzione originale in acciaio saldato [MSZ06]

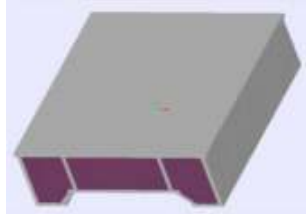


Fig. 39 Soluzione con inserti in schiuma metallica [MSZ06]

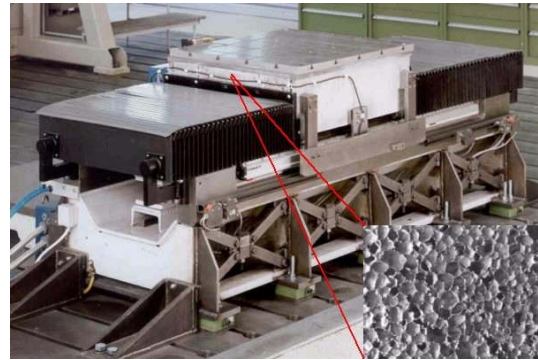


Fig. 38 Banco prova con riempimenti in schiuma metallica [MSZ06]

Per l'impiego della schiuma di alluminio è stata effettuata una parziale riprogettazione della parte realizzando un telaio in lamiera di acciaio saldato all'interno del quale sono stati incollati inserti sagomati in schiuma metallica ottenuti per lavorazione meccanica come mostrano la Fig. 39 e Fig. 38. La soluzione ottenuta ha stravolto le prestazioni del pezzo, infatti si è registrata una diminuzione della massa del 29% e un considerevole aumento della rigidità dinamica della struttura, che si è concretizzato nell'aumento dell'80% della prima frequenza propria del sistema e in uno smorzamento maggiore di oltre l'800%. In Fig. 40 è riportato il confronto in termini di prestazioni tra la soluzione tradizionale, la soluzione con telaio in acciaio e schiuma metallica, ed il caso del solo telaio in acciaio.

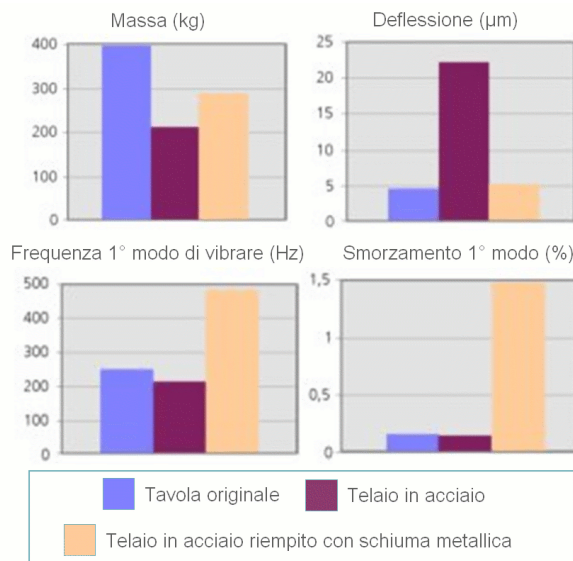


Fig. 40 Prestazioni delle soluzioni tradizionale e con schiuma metallica [MSZ06]

Traversa per macchina taglio laser [Neu03]

Sempre presso l'MSZ è stata realizzata una traversa per una unità di taglio laser della SITECH Industrieanlagen di Chemnitz con esigenze particolarmente spinte in termini di accelerazioni massime richieste (10 m/s^2 in direzione x e y) e con una freccia massima richiesta di $10 \mu\text{m}$ considerando le inerzie, il peso, e l'attrazione dei motori lineari, trascurando invece le forze di lavoro.

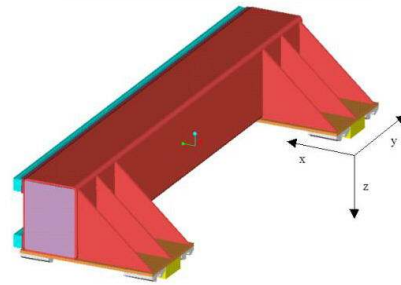


Fig. 41 Traversa con riempimento in schiuma metallica [Neu03], [MSZ06]

La soluzione scelta prevede la realizzazione della traversa con un unico tubolare in acciaio integralmente riempito in schiuma di alluminio. Tramite l'analisi ad elementi finiti sono state valutate varie configurazioni in termini di spessore del profilato e di densità della schiuma di alluminio. In tutti i casi sono state ottenute frecce massime al centro della traversa inferiori ai 6 μm . In Tab. 19 sono riportate le prestazioni delle varie soluzioni.

Soluzione	Spessore parete	Densità schiuma	Massa traversa	Freccia massima (Obiettivo: <10 μm)		Prima frequenza propria flessionale in direzione x	
				Simulata	Misurata	Simulata	Misurata
	mm	g/cm^3	kg	μm	μm	Hz	Hz
1	4	0,7	96,7	5,4		419	
2	5	0,7	102,8	5,2		432	
3	6	0,7	108,9	5,0		442	
4	4	0,6	93,2	5,5	8,2	411	375
5	4	0,5	89,7	5,8		402	

Tab. 19 Confronto sulle prestazioni della traversa con differenti spessori di parete e densità della schiuma [Neu03]

Tra le soluzioni valutate è stata scelta la 4 che è stata realizzata e valutata con misure dirette. Oltre alla misurazione delle frequenze proprie sono stati misurati anche i coefficienti di smorzamento associati ai primi 12 modi di vibrare ottenendo valori compresi tra 0,064 % e 0,42 %.

Analisi della struttura di una macchina utensile progettata per l'impiego di schiume in alluminio [Sut06]

In questo lavoro è stata analizzata l'analisi strutturale FEA della traversa del centro di lavoro "Event" della EMMEOTTO realizzata con varie soluzioni:

- traversa in acciaio irrigidita mediante setti in acciaio sagomato;
- traversa in ghisa irrigidita mediante setti in ghisa sagomata;
- traversa in acciaio riempita totalmente in schiuma AlSi12;
- traversa in acciaio riempita parzialmente in schiuma AlSi12 (al fine di assicurare la stessa rigidità della traversa in acciaio irrigidita).

Le soluzioni sono state messe a confronto dal punto di vista della deflessione statica sotto l'azione delle forze di lavorazione e del peso proprio, dal punto di vista della massa della traversa e dal punto di vista dei costi di realizzazione.

La schiuma di alluminio (Fominal AlSi12) è stata utilizzata sotto forma di inserto da applicare all'interno della traversa mediante incollaggio con polimerizzazione a freddo (utilizzando l'adesivo CIBA Araldite

AW 136 o l'adesivo SikaForce®-7750) in modo da evitare di dover riscaldare la traversa a temperature non compatibili con i trattamenti termici previsti per le sue saldature.

Il riempimento della traversa in acciaio con 60mm di schiuma ha garantito il raggiungimento delle stesse caratteristiche di rigidità della traversa in acciaio con setti sagomati di irrigidimento. In quest'ultima l'azione dei setti presenta un marcato effetto locale, mentre la schiuma garantisce una migliore uniformità delle deformazioni lungo la traversa grazie alla sua distribuzione omogenea.

L'analisi dei pesi ha confermato che l'applicazione della schiuma non comporta incrementi aggiuntivi in quanto il suo peso va a compensare quello degli irrigiditori e delle piastre laterali. L'ottimo rapporto rigidità-peso della schiuma AISi12, unitamente allo studio della sua corretta applicazione, ha consentito di arrivare ad una soluzione competitiva rispetto a quelle utilizzate comunemente nel campo delle strutture delle macchine utensili.

La struttura in acciaio è risultata la più conveniente per un basso numero di pezzi prodotti. La traversa in ghisa risulterebbe economicamente conveniente rispetto alla struttura in acciaio solo se la produzione di pezzi fosse superiore alle 30 unità (quantità minima necessaria ad ammortizzare convenientemente i costi fissi di realizzazione del modello e delle staffe). La struttura in acciaio contenente l'insero in schiuma di alluminio è risultata essere più costosa della soluzione in solo acciaio ma meno costosa di quella in ghisa nel caso in cui la produzione fosse limitata ad un piccolo lotto di pezzi. Questa analisi dipende strettamente dal fatto che la tecnologia di realizzazione delle schiume metalliche non consente ancora la produzione su larga scala ed a costi contenuti.

2.2.4.3. Pannelli sandwich acciaio – alluminio – acciaio

Montante per un centro di lavoro [Neu03]

La riprogettazione con pannelli sandwich è stata utilizzata per la realizzazione del montante per il centro di lavoro CWK 500 D della Heckert Werkzeugmaschinen GmbH, allo scopo di migliorare la rigidità e lo smorzamento a parità di massa. Sono stati utilizzati pannelli sandwich acciaio – schiuma di alluminio – acciaio e profilati standard in acciaio riempiti con schiuma di alluminio.

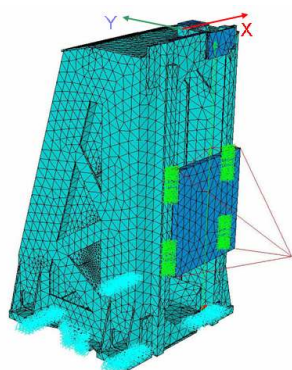


Fig. 42 Modello fem del montante realizzato con pannelli sandwich [Neu03]



Fig. 43 Prototipo di montante realizzato con pannelli sandwich [Neu03]

La struttura è stata ottimizzata tramite analisi ad elementi finiti in modo da minimizzare la deformazione del montante quando alla testa del mandrino viene applicato un carico di 10 KN in direzione x, y e z. Dopo la fase di ottimizzazione la struttura è stata realizzata e ne sono state misurate le deformazioni; per confronto le deformazioni sono state misurate anche sulla struttura tradizionale di riferimento. I risultati ottenuti sono riportati in Tab. 20 come valori percentuali rispetto alla configurazione di riferimento.

	Simulazione FEM	Misure dirette
Deformazione in direzione X	-13,9 %	-17,6 %
Deformazione in direzione Y	-25,4 %	-35,8 %

Tab. 20 Deflessioni della struttura in pannelli rispetto alla struttura originale [Neu03]

La massa, nel caso della struttura in pannelli sandwich ha un massa maggiore del 4,5 % rispetto al componente di riferimento, inoltre è stato stimato un incremento dello smorzamento della parte di circa il 500 %.

Traversa per un centro di lavoro per la produzione di utensili [Neu03]

La progettazione con pannelli sandwich acciaio-schiuma di alluminio-acciaio è stata utilizzata per la realizzazione della struttura per un centro di lavoro visibile in Fig. 44. Tutte le parti realizzate con pannelli sandwich sono state ricavate per taglio waterjet da pannelli di 1179 mm x 1182 mm spessi 35 mm (2 pelli in acciaio dello spessore di 3 mm e parte centrale in schiuma di alluminio spesse 29 mm) ed assemblate per saldatura.

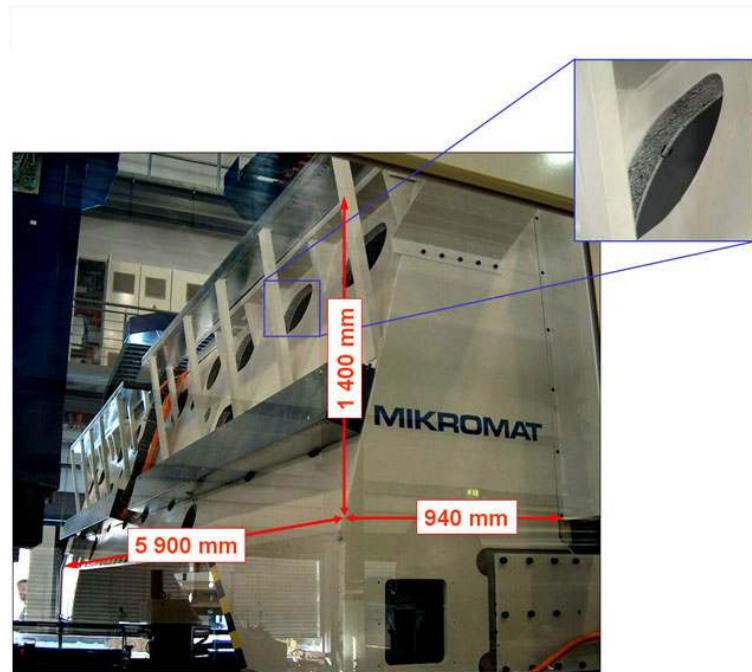


Fig. 44 Struttura per centro di lavoro per lavorazione di utensili di grandi dimensioni [Neu03]

Anche in questo caso è stato realizzato un confronto tra la soluzione originale in acciaio e la soluzione con pannelli sandwich riportato in Tab. 21.

Variante	Soluzione convenzionale in acciaio	Struttura sandwich
Massa (kg)	6300	6600
Deflessione a causa del peso proprio (μm)	34	14
Prima frequenza propria (Hz)	-	37,9
Seconda frequenza propria (Hz)	-	75,5
Smorzamento prima frequenza propria	-	2,3%
Smorzamento seconda frequenza propria	-	2,9%

Tab. 21 Principali caratteristiche della soluzioni tradizionale e di quella sandwich [Neu03],[MSZ06]

3. Attività svolte

3.1. Grado di avanzamento

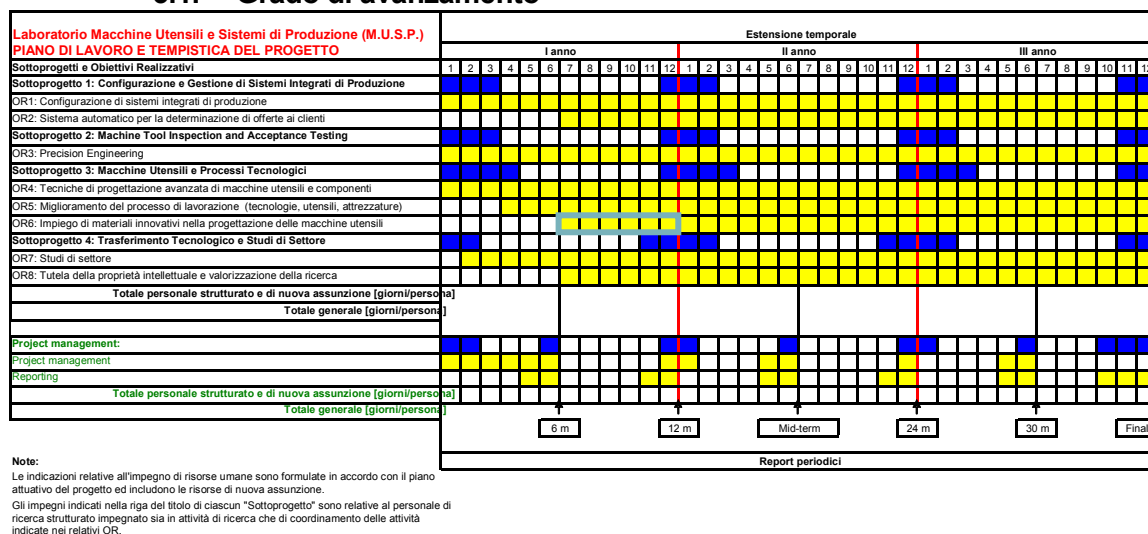


Fig. 45 Gantt del progetto MUSP

Il grado di avanzamento dell'obiettivo realizzativo discusso nel presente report è del tutto concorde con il piano attuativo globale del progetto MUSP rappresentato in Fig. 45.

3.2. Attività di ricerca bibliografica

Durante tutto il periodo di attività è stata eseguita un'ampia attività di ricerca bibliografica estesa alla letteratura accademica e tecnica, alle conferenze internazionali, ed ai brevetti che ha permesso di costruire il quadro dell'utilizzo dei materiali innovativi all'interno del settore delle macchine utensili esposto al paragrafo 0. È stata realizzata una base di conoscenza sulle principali problematiche di impiego sia di quei materiali che già trovano un'ampia applicazione nel settore delle macchine utensili ma che non possono ancora considerarsi di comune utilizzo, come il calcestruzzo polimerico, sia di materiali, quali i compositi o le schiume metalliche che, pur attraendo sempre più l'attenzione dei produttori, restano ad oggi confinati soprattutto alla ricerca industriale o accademica. Per questi ultimi materiali è emerso come la futura diffusione nel settore dipenda essenzialmente da una conoscenza non ancora soddisfacente, soprattutto per quanto concerne il comportamento a lungo termine, di indubbie difficoltà sia legate alla progettazione che alla industrializzazione, ed infine a non trascurabili problematiche di costo. Al paragrafo 5 si riportano in dettaglio i riferimenti bibliografici vagliati sull'argomento.

3.3. Modellazione della struttura di una macchina utensile

Per effettuare una analisi quantitativa e comparativa dei differenti materiali valutati per quanto riguarda le prestazioni della struttura della macchina utensile si è ritenuto necessario partire da un caso studio concreto. In particolare si è scelto di focalizzare l'attenzione su di una struttura di macchina utensile per la lavorazione del legno della "Working Process S.r.l.", azienda che fa parte del Consorzio MUSP che si presta molto bene all'applicazione di materiali innovativi essendo concepita in modo modulare ed ottenuta per assemblaggio di parti ottenute da lamiere o da profili standard. È stato quindi realizzato un modello FEM con ABAQUS 6.5 (il software è stato messo a disposizione dal Politecnico di Milano).

Per la realizzazione del modello della struttura si è partiti dalla rappresentazione tridimensionale completa fornita da "Working Process S.r.l." di cui si riporta una illustrazione in Fig. 46.

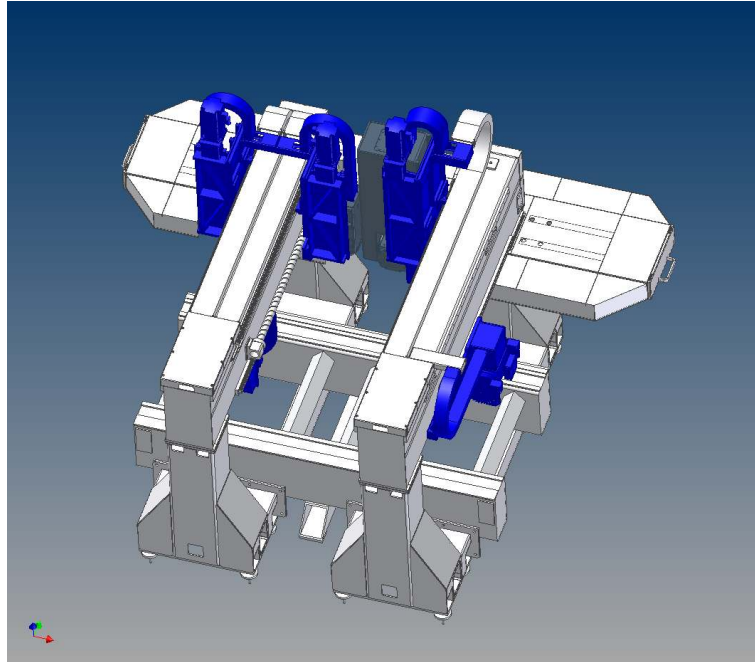


Fig. 46 Modello tridimensionale completo del centro di lavoro ANTHROPOS (Cortesia Working Process s.r.l.)

La struttura della macchina è formata da due portali identici all'interno dei quali è inserita una struttura a cassone ancorata a terra. In questa prima fase del lavoro si è deciso di eseguire la modellazione di uno dei due portali trascurando la struttura centrale che verrà presa in considerazione in una fase successiva. Si è quindi eseguita una prima semplificazione del modello solido eliminando tutte le parti accessorie e le parti scartate ottenendo il modello riportato in Fig. 47.

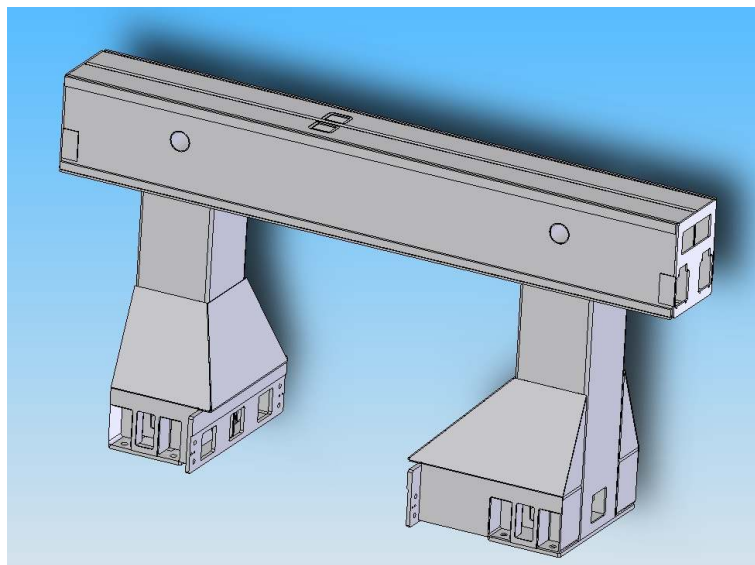


Fig. 47 Modello solido del solo portale del centro ANTHROPOS

Poiché la macchina utensile è realizzata essenzialmente per assemblaggio di lamiere sottili e di profilati in lamiera si è scelto di eseguire la modellazione ad elementi finiti utilizzando elementi di tipo shell. In un primo momento si è cercato di passare dal modello solido di Fig. 47 ad un modello costituito di sole superfici giacenti sul piano medio delle lamiere presenti nel modello solido. Si è però constatato che con questa tecnica, per altro molto laboriosa, si sarebbe ottenuto un modello decisamente complesso e ricco di particolari di scarso interesse al fine della modellazione strutturale complessiva del portale che avrebbe

richiesto una ulteriore fase di semplificazione e di assemblaggio all'interno di ABAQUS CAE. Si è quindi ritenuto più opportuno eseguire da zero la modellazione del portale all'interno di ABAQUS CAE sfruttando, grazie alla modellazione parametrica, la notevole similitudine dei due montanti. La modellazione è quindi stata condotta realizzando in ABAQUS CAE prima uno dei due montanti, quindi il secondo ottenuto modificando una copia del primo ed infine la traversa. Le tre parti sono quindi state unite tra loro con un legame di tipo "Tie".

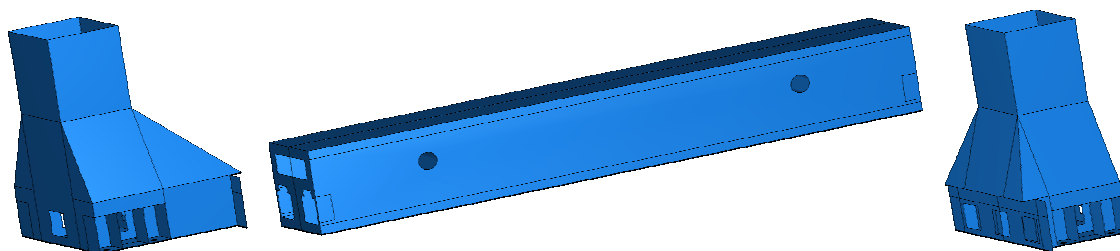


Fig. 48 Primo montante - traversa - secondo montante

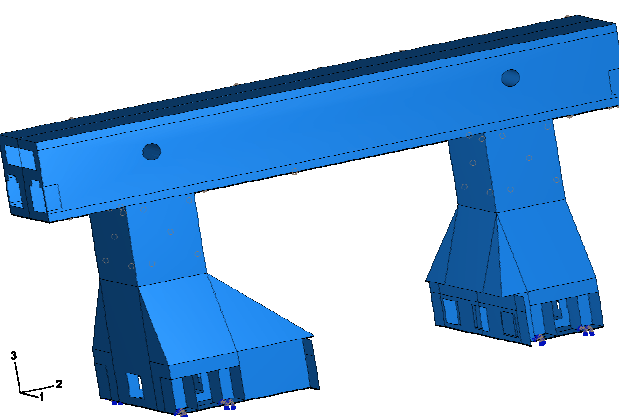


Fig. 49 Modello completo con Tie e vincoli

A questo punto si è proceduto ad eseguire la "mesh" del modello creato utilizzando elementi S8R, vale dire elementi shell quadratici a 8 nodi con 6 gradi di libertà per ogni nodo. Il modello discretizzato è riportato in Fig. 50.

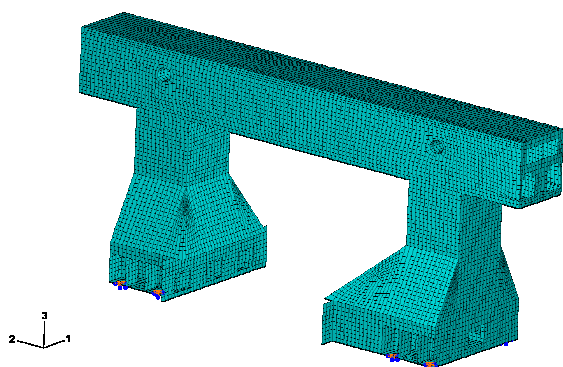


Fig. 50 Struttura portale con discretizzazione

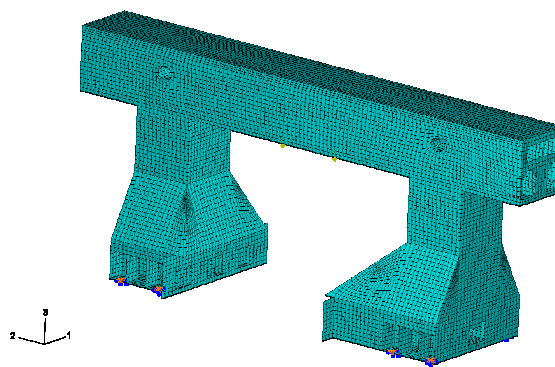


Fig. 51 Struttura portale con discretizzazione e carichi

Per verificare la correttezza del modello sono stati applicati alla struttura della macchina due carichi concentrati di -10000 N ciascuno in direzione 3 nella parte centrale della traversa ed è stata eseguita una analisi statica. Il carichi applicati sono rappresentati in Fig. 51 come due piccole frecce di colore giallo.

L'analisi statica preliminare ha messo in evidenza la sostanziale correttezza del modello. In sono è presentata una immagine in falsi colori che evidenzia gli spostamenti in direzione 3 mentre in sono presentati, sempre in falsi colori gli sforzi di Von Mises.

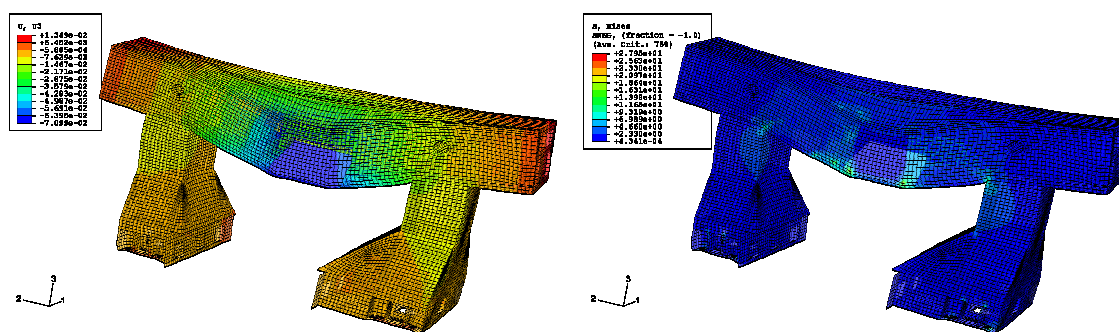


Fig. 52 Rappresentazione in falsi colori degli spostamenti in direzione verticale (direzione 3) Fig. 53 Rappresentazione in falsi colori degli sforzi di Von Mises

4. Sviluppi futuri

Nel prosieguo del lavoro verranno individuati alcuni i componenti fondamentali della struttura vista al paragrafo 3.3 e/o di altre strutture o parti di macchine utensili, cioè quelli che maggiormente influenzano le caratteristiche statiche e dinamiche della struttura. Su questi componenti verrà sperimentato l'utilizzo di alcuni dei materiali innovativi analizzati al paragrafo 2.2 che saranno selezionati a partire dalla definizione di un profilo di caratteristiche meccaniche e più in generale, tecnologiche creato utilizzando un metodo analitico di scelta del materiale come ad esempio quello di Ashby [Ash04]. La sperimentazione di tali materiali verrà attuata in una prima fase utilizzando la simulazione su modelli numerici, mediante l'impiego di tecniche di modellazione solida e di calcolo strutturale con il metodo degli elementi finiti al fine di prevedere il comportamento meccanico delle strutture e di individuare la soluzione ottimizzata in relazione alla parte presa in esame. In una fase successiva potrà rendersi necessario realizzare prototipi completi o parziali delle parti analizzate in modo da verificare se le prestazioni ottenute sono in accordo con i modelli numerici ed in modo da quantificare quei fattori che difficilmente possono essere previsti con le tecniche di calcolo come le caratteristiche dinamiche (in particolare per quanto riguarda lo smorzamento), le difficoltà tecnologiche connesse alla realizzazione ed i costi.

5. Bibliografia estesa sui materiali avanzati

In questo paragrafo si riportano tutti i riferimenti bibliografici vagliati durante il lavoro ed inerenti alle problematiche di applicazione dei materiali avanzati e tradizionali al settore della macchina utensile.

5.1. Articoli accademici e tecnici

- [1] Agnesi, D. La ghisa minerale – una vera rivoluzione. *Tecnologie meccaniche*, 2001, , settembre, 472-477.
- [2] Bamberg, E., Slocum, A. Concrete-based constrained layer damping. *Precision Engineering*, 2002, 26, 4, 430-441.
- [3] Bang, K.G., Lee, D.G. Design of carbon fiber composite shafts for high speed air spindles. *Composite structures*, 2002, 55, 2, 247-259.
- [4] Bruni, C., et al. Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B. *Int. J. Of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 46, 12-13, 1547-1554.
- [5] Chang, S.H., et al. Steel-composite hybrid headstock for high-precision grinding machines. *Composite Structures*, 2001, 53, 1, 1-8.
- [6] Chang, S.H., Lee, D.G., Choi, J.K. Composite rotor for high-speed induction motors. *Composite structures*, 2000, 50, 1, 37-47.
- [7] Chang, S.H., Lee, D.G. Performance of high speed air spindle motor equipped with composite squirrel cage rotor. *Composite Structures*, 2002, 55, 4, 419-427.
- [8] Chang, C-Y., Chang, M-Y., Huang, J.H. Vibration analysis of rotating composite shafts containing randomly oriented reinforcements. *Composite Structures*, 2004, 63, 1, 21-32.
- [9] Chang, S.H., Lee, D.G. Robust Design of a Composite Air Spindle. *Composite Structures*, 2002, 23, 3, 361-371.
- [10] Choi, J.K., Lee, D.G. Manufacture of a carbon fibre-epoxy composite spindle-bearing system for a machine tool. *Composite Structures*, 1997, 37, 2, 241-251.
- [11] Choi, J.K., Lee, D.G. Manufacture of a carbon fibre-epoxy composite spindle-bearing system for a machine tool. *Composite structures*, 1997, 37, 2, 241-251.
- [12] Hwang, H.Y., Lee, H.G., Lee, D.G. Clamping effects on the dynamic characteristics of composite machine tool structures. *Composite Structures*, 2004, 66, 1-4, 399-407.
- [13] Jeong, K.S., Lee, D.G., Kwak, Y.K. Experimental investigation of the dynamic characteristics of carbon fiber epoxy composite thin beams. *Composite Structures*, 1995, 33, 2, 77-86.
- [14] Kim, H.S., Park, K.Y., Lee, D.G. A study on the epoxy resin concrete for the ultra-precision machine tool bed. *J. of Materials Processing Technology*, 1995, 48, 1-4, 649-655.
- [15] Kim, D.I., et al. Parametric study on design of composite-foam-resin concrete sandwich structures for precision machine tool structures. *Composite Structures*, 2006, 75, 1-4, 408-414.

- [16] Kim, H.S., Park, S.W., Lee, D.G. Smart cure cycle with cooling and reheating for co-cure bonded steel/carbon epoxy composite hybrid structures for reducing thermal residual stress. *Composites Part A*, 2006, 37, 10, 1708-1721.
- [17] Kim, P.J., Lee, D.G., Choi, J.K. Grinding Characteristics of Carbon Fiber Epoxy Composite Hollow Shafts. *J. of Composite Materials*, 2000, 34, 23, 2016-2035.
- [18] Lee, D.G., et al. Design and manufacture of composite high speed machine tool structures. *Composite Science and Technology*, 2004, 64, , 1523-1530.
- [19] Lee, D.G., Chang, S.H., Kim, H.S. Damping improvement of machine tool columns with polymer matrix fiber composite material. *Composite Structures*, 1998, 43, 2, 155-163.
- [20] Lee, D.G., et al. Novel applications of composite structures to robots, machine tools and automobiles. *Composite Structures*, 2004, 66, 1-4, 17-39.
- [21] Lee, D.G., Yun Hwang, H., Kook Kim, J. Design and manufacture of a carbon fiber epoxy rotating boring bar. *Composite Structures*, 2003, 60, 1, 115-124.
- [22] Lee, D.G., et al. Composite heddle frame for high-speed looms. *Composite structures*, 1999, 47, 1-4, 507-517.
- [23] Nagano, S., et al. Development of a composite boring bar. *Composite Structures*, 1997, 38, 1-4, 531-539.
- [24] Ohama, Y. Recent Progress in Concrete-Polymer Composites. *Advanced Cement Based Materials*, 1997, 5, 2, 31-40.
- [25] Orak, S. Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30, 2, 171-174.
- [26] Potluri, P., Kusak, E., Reddy, T.Y. Novel stitch-bonded sandwich composite structures. *Composite Structures*, 2003, 59, 2, 251-259.
- [27] Prisco, M., Plizzari, G., Failla, C. Il calcestruzzo fibrorinforzato per le strutture del futuro. *Edilizia*, 2005, , 140, 42-48.
- [28] Suh, J.D., et al. Damping characteristics of composite hybrid spindle covers for high speed machine tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113, 1-3, 178-183.
- [29] Suh, J.D., Lee, D.G. Thermal characteristics of composite sandwich structures for machine tool moving body applications. *Composite Structures*, 2004, 66, 1-4, 429-438.

5.2. Conferenze internazionali

- [30] Argento, A., Kim, W. Design of Composite Shafts with Damping Layers for High Speed Machining Processes. *Technology Day 6.6.2000*, 2000.
- [31] Neugebauer, R., et Al. Highly damped machine tools with metal foam. *Int. Conf. Advanced metallic materials*, 2003, 214-218.

5.3. Brevetti

- [32] AESOP, Inc.. *Replicated-in-place internal viscous shear damper for machine structures and components*. Inventore: Slocum, A.H., Marsh, E.R., Smith, D.H. Class. Int.: F16F 9/30
Class. USA: 248/636. USA, Brevetto, 5799924, 1998-09-01.

- [33] United Aircraft Corporation. *Method of making foamed metal*. Inventore: Allen, B.C., Sabroff, A.M. Class. Int.: B22F 003/11 Class. USA: 75/415 ; 420/528; 428/613; 75/230. USA, Brevetto, 3087807, 1963-04-30.
- [34] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. (Munich, DE). *Methods for manufacturing foamable metal bodies*. Inventore: Baumeister, J., Schrader, H. Class. USA: 419/2 ; 264/44; 264/54; 419/37; 419/48; 419/50; 428/613. USA, Applicazione, 5151246, 1992-09-29.
- [35] SCHWÄBISCHE WERKZEUGMASCHINEN GMBH. *Werkzeugmaschine mit metallbauteilen aus metallschaum und herstellungsverfahren dafür*. Inventore: Kroll, D., Armleder, W. Class. Int.: B23Q 1/01. Germany, Brevetto, 178500, 2000-12-28.
- [36] Neue Materialien Furth GmbH. *Method for producing a moulded body from foamed metal*. Inventore: R. F. Singer; C. Korner, Class. Int.: B22F 003/10 Class. USA: 419/2. USA, Brevetto, 6733722, 2002-05-13.
- [37] Mepura Metallpulvergesellschaft mbH. *Method for producing forms and foamed metal forms*. Inventore: Wolfsgruber, E., Worz, H., Simancik, F. Class. Int.: B22F 003/10 Class. USA: 419/2. USA, Brevetto, 6391250, 2002-05-21.

5.4. Monografie

- [38] Ashby, M.F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 2. ed. Oxford, UK: Elsevier, 2004.
- [39] Ewins, D.J. *Modal testing: theory, practice and application*. 2. ed. Baldock, England: Research studies, 2000.
- [40] Genta, G. *Progettazione e calcolo strutturale con i materiali compositi*. Milano: Tecniche Nuove, 1982.
- [41] Lazan, J. *Damping of materials and members in structural mechanics*. Oxford, UK: Pergamon Press, 1968.
- [42] Nashif, A.D., Jones, I.G., Henderson, J.P. *Vibration Damping*. Chichester: John Wiley & Sons, 1985.
- [43] Sanjay, K.M. *Composites manufacturing – Materials, Product and Process Engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2002.
- [44] Tong, L., Mouritz, A.P., Bannister, M. *3D Fibre Reinforced Polymer Composites*. Oxford, UK: Elsevier, 2002.
- [45] Vasiliev, V.V., Morozov, E.V. *Mechanics and analysis of composite materials*. Oxford, UK: Elsevier, 2001.
- [46] Weck, M. *Handbook of machine tools vol.1 – Types of machines, forms of construction and applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 1980.
- [47] Weck, M. *Handbook of machine tools vol.2 – Construction and mathematical analysis*. Chichester: John Wiley & Sons, 1980.
- [48] Weck, M. *Handbook of machine tools vol.3 – Automation and controls*. Chichester: John Wiley & Sons, 1980.
- [49] Weck, M. *Handbook of machine tools vol.4 – Metrological analysis and performance tests*. Chichester: John Wiley & Sons, 1980.

5.5. Lavori di tesi

- [50] Bamberg, E. *Principles of Rapid Machine Design*. Slocum, A. Tesi dott. Cambridge, Massachussets: Massachusetts institute of technology, 1999-2000.
- [51] Cai, C. *Effetti del processing sulle proprietà e sulla struttura delle fibre di carbonio*. Licciulli, A. Tesi dott. Lecce: Università di Lecce, 2006.
- [52] Hale, L.C. *Principles and Techniques for Designing Precision Machines*. Slocum, A. Tesi dott. Cambridge, Massachussets: Massachusetts institute of technology, 1999.
- [53] Koo, J.H. *Using Magneto-Rheological Dampers in Semiactive Tuned Vibration Absorbers to Control Structural Vibrations*. Ahmadian, M. Tesi dott. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002-2003.
- [54] Sutti, M. *Analisi della struttura di una macchina utensile progettata per l'impiego di schiume in alluminio*. Bernasconi, A. Tesi dott. Milano: Politecnico di Milano, 2006.

6. Bibliografia

- [Ros02] Rossi, M. et al. *Il manuale delle macchine utensili*. Milano: Tecniche Nuove, 2002.
- [Wec80] Weck, M. *Handbook of machine tools vol.2 – Construction and mathematical analysis*. Chichester: John Wiley & Sons, 1980.
- [Slo06] Slocum, A. *Precision Machine Design* [online]. Cambridge (USA): Massachusetts Institute of Technology, 2006. [13-09-2006]. Topic 9a Structural Design1
http://pergatory.mit.edu/2.75/2_75%20Lectures/PMD%20Topic%209a%20Structural%20design%201.pdf
- [Bia06] Bianchi, G. *Architetture e strutture delle macchine utensili - Dispensa del corso di Macchine e sistemi di lavorazione a controllo numerico*. 2005.
- [Agn01] Agnesi, D. La ghisa minerale – una vera rivoluzione. *Tecnologie meccaniche*, 2001, , settembre, 472-477.
- [Bru05] Bruni, C., et Al. Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B. *Int. J. Of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 46, 12-13, 1547-1554.
- [Kim95] Kim, H., Park, K.Y., Lee, D.G. A study on the epoxy resin concrete for the ultra-precision machine tool bed. *J. of Materials Processing Technology*, 1995, 48, 1-4, 649-655.
- [Ora00] Orak, S. Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30, 2, 171-174.
- [Wik04] Calcestruzzo. In *Wikipedia* [online]. St. Petersburg (USA): Wikimedia Foundation Inc., 2004. 06-09-2006 [08-09-2006]. <<http://it.wikipedia.org/wiki/Calcestruzzo>>.
- [Wik05] Cemento (edilizia). In *Wikipedia* [online]. St. Petersburg, (USA): Wikimedia Foundation Inc., 2005. 21-08-2006 [08-09-2006]. <http://it.wikipedia.org/wiki/Cemento_Portland>.
- [Pri05] Prisco, M., Plizzari, G., Failla, C. Il calcestruzzo fibrorinforzato per le strutture del futuro. *Edilizia*, 2005, , 140, 42-48.
- [Ing02] Calcestruzzi innovativi. In *Ingegneriaonline* [online]. Mariano Comense: Ingegneria Online S.r.l., 2003. [11-09-2006]. <http://www.ingegneriaonline.it/articoli/cls_fr.htm>.
- [Wik06] Ghisa duttile. In *Wikipedia* [online]. St. Petersburg (USA): Wikimedia Foundation Inc., 2006. 07-09-2006 [15-09-2006]. <http://it.wikipedia.org/wiki/Ghisa_duttile>
- [Lee04] Lee, D.G., et Al. Design and manufacture of composite high speed machine tool structures. *Composite Science and Technology*, 2004, 64, 1523-1530.
- [Ewi00] Ewins, D.J. *Modal testing: theory, practice and application*. 2. ed. Baldock, England: Research studies, 2000.
- [Lee04b] Lee, D.G., et Al. Novel applications of composite structures to robots, machine tools and automobiles. *Composite Structures*, 2004, 66, 1-4, 17-39.
- [Lee98] Lee, D.G., Chang, S.H., Kim, H.S. Damping improvement of machine tool columns with polymer matrix fiber composite material. *Composite Structures*, 1998, 43, 2, 155-163.

- [Gen82] Genta, G. *Progettazione e calcolo strutturale con i materiali compositi*. Milano: Tecniche Nuove, 1982.
- [Cho97] Kyung, J., Lee, D.G. Manufacture of a carbon fibre-epoxy composite spindle-bearing system for a machine tool. *Composite Structures*, 1997, 37, 241-251.
- [Cha02] Chang, S.H., Lee, D.G. Robust Design of a Composite Air Spindle. *Polymer Composites*, 2002, 23, 3, 361 - 371.
- [Nag97] Nagano, S., et Al. Development of a composite boring bar. *Composite Structures*, 1997, 38, 1-4, 531-539.
- [Arg00] Argento, A., Kim, W. Design of Composite Shafts with Damping Layers for High Speed Machining Processes. *Technology Day 6.6.2000*, 2000.
- [Lee03] Lee, D.G., Yun Hwang, H., Kook Kim, J. Design and manufacture of a carbon fiber epoxy rotating boring bar. *Composite Structures*, 2003, 60, 1, 115-124.
- [Cho96] Choi, J.H., Lee, D.G. . J. of Adhesion, 1996, 55, 3-4, 245-260.
- [Hal99] Hale, L.C. *Principles and Techniques for Designing Precision Machines*. Slocum, A.. Tesi datt. Cambridge, Massachussets: Massachusetts institute of technology, 1999.
- [Bam02] Bamberg, E., Slocum, A. Concrete-based constrained layer damping. *Precision Engineering*, 2002, 26, 4, 430-441.
- [Bam00] Bamberg, E. *Principles of Rapid Machine Design*. Slocum, A.. Tesi datt. Cambridge, Massachussets: Massachusetts institute of technology, 1999-2000.
- [Slo98] AESOP, Inc.. *Replicated-in-place internal viscous shear damper for machine structures and components*. Inventore: Slocum, A.H., Marsh, E.R., Smith, D.H. Class. Int.: F16F 9/30 Class. USA: 248/636. USA, Brevetto, 5799924, 1998-09-01.
- [Neu03] Neugebauer, R., et Al. Highly damped machine tools with metal foam. *Int. Conf. Advanced metallic materials*, 2003, 214-218.
- [MSZ06] *Metal foam center Chemnitz* [online]. Chemnitz: IWU. <<http://www.iwu.fraunhofer.de/schaumzentrum/english/index.htm>>.
- [Sut06] Sutti, M. *Analisi della struttura di una macchina utensile progettata per l'impiego di schiume in alluminio*. Bernasconi, A.. Tesi datt. Milano: Politecnico di Milano, 2006.
- [Ban01] Banhart, J. *Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams*. Progress in Materials Science, 2001, 46, 559–632.
- [Wik07] Metal foam. In *Wikipedia* [online]. St. Petersburg, (USA): Wikimedia Foundation Inc., 2005. 09-01-2007 [11-01-2007]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Metal_foam>
- [Ash00] Ashby, M.F., et Al. *Metal Foams: a Design Guide*. Woburn, MA: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [Mat07] Aluminum 6061-T4; 6061-T451. In *Matweb* [online]. Blacksburg, (Virginia): Automation Creations, Inc., 1996?. [11-01-2007]. <http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061T4>
- [Ash04] Ashby, M.F. *Materials Selection in Mechanical Design*. 2. ed. Oxford, UK: Elsevier, 2004.