RETTIFICA

degli acciai superrapidi

ERASTEEL
supporto tecnico

MZF SRL Tel: 0362825803 - e-mail: mzf@mzf.it - www.mzf.it

INTRODUZIONE

Gli acciai superrapidi sono stati impiegati per gli utensili ad asportazione di truciolo per oltre 100 anni. L'alto contenuto di elementi di lega conferisce loro una performante combinazione di tenacità e resistenza all'usura ma ne rende più difficile la rettifica rispetto agli acciai convenzionali a bassa lega. La loro lavorazione è quindi una sfida quando sia necessario realizzare insieme alta qualità e alta produttività.

Quindi, l'ottenimento di risultati favorevoli e costanti esige una conoscenza profonda del processo di rettifica insieme all'abilità necessaria per applicarla al particolare caso degli acciai superrapidi.

Il presente fascicolo contiene una spiegazione dettagliata di questo processo: essa inizia con la descrizione dei componenti di base, del sistema di marcatura e di codifica delle mole abrasive nonché spiegazioni su come costituenti e codifica influenzano le prestazioni nella lavorazione. Più avanti il fascicolo descrive quattro differenti tipi di "bruciatura di rettifica" fornendo istruzioni per evitarle e per migliorare la resa in lavorazione. Viene inoltre spiegato il concetto di "indice di lavorabilità alla mola" e precisate le caratteristiche che diversi gradi di acciai Erasteel presentano in quel senso, insieme alla segnalazione delle mole abrasive raccomandate per la loro rettifica. Viene inoltre spiegato come la metallurgia delle polveri influenzi l'indice di lavorabilità alla mola.

Infine, il fascicolo si conclude con un capitolo dedicato all'eliminazione degli inconvenienti che si possono incontrare nella rettifica.

ASP ® è un marchio registrato **ERASTEEL**

La moderna rettifica è oggi un'operazione veramente high tech. Ciò nonostante, come nel passato essa richiede all'operatore una particolare abilità. Già gli antichi affilatori parigini sapevano che un'affilatura corretta assicurava una superiore durata ai coltelli e migliori caratteristiche taglienti.

SOMMARIO

Nozioni di base sulle mole abrasive 4

Come opera la rettifica 7

Usura della mola 8

Composizione e rettifica degli acciai superrapidi 10

Danni termici e "bruciature di rettifica" 13

Il fluido per rettifica 18

Diamantatura e ravvivatura della mola 20

Tasso di asportazione e spessore dei trucioli 21

Indice di lavorabilità 23

Rettifica di acciai P/M (da metallurgia delle polveri) 24

Scelta della mola 27

Rimozione di inconvenienti 28

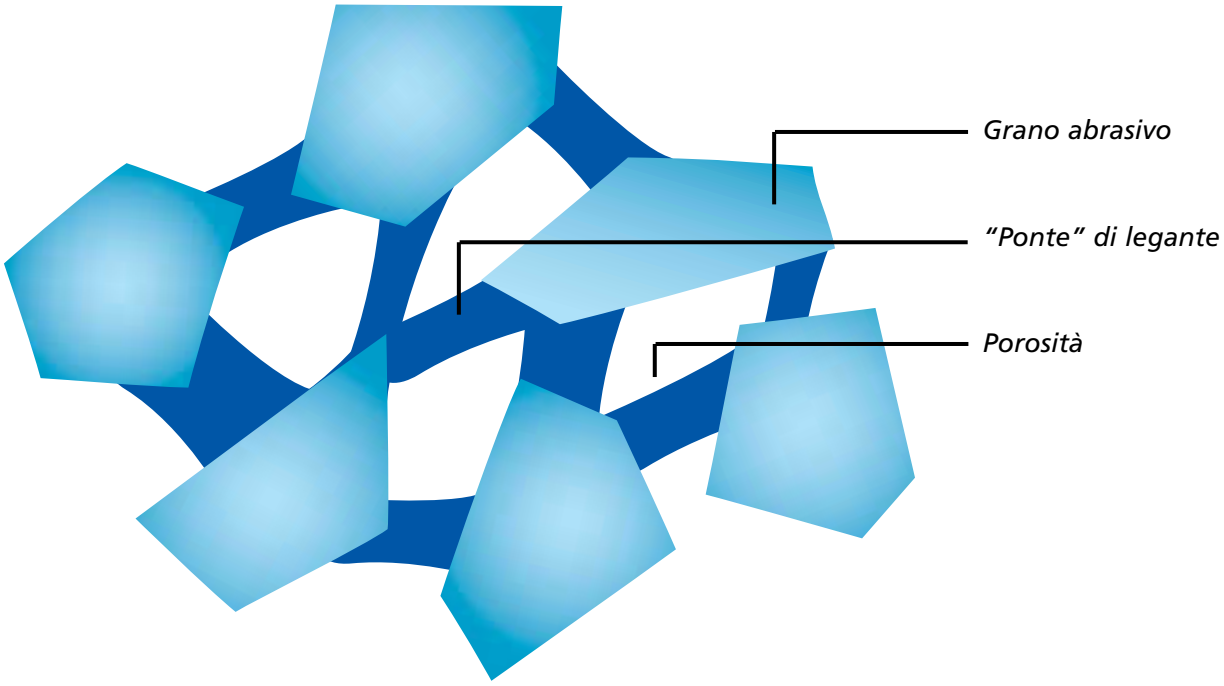
Tavola della lavorabilità alla mola 31

NOZIONI DI BASE SULLE MOLE ABRASIVE

Una mola abrasive si compone di tre elementi base:

- *abrasivo*
- *legante*
- *porosità*

L'abrasivo (con riferimento ai singoli grani) è il materiale di gran durezza che effettua l'asportazione di truciolo. Esso viene tenuto in posto nella massa agglomerata mediante un "legante". La porosità è semplicemente costituita dai pori della massa abrasiva: essa è importante poiché permette al refrigerante di giungere all'interfaccia mola-pezzo e assicura spazio per la formazione di truciolo. Le mole a legante vetrificato dispongono di un'elevata porosità naturale. Quelle a legante resinoide oppure metallico sono invece quasi prive di porosità naturale.



I tre componenti di una mola: abrasivo, legante e porosità

COMPOSIZIONE

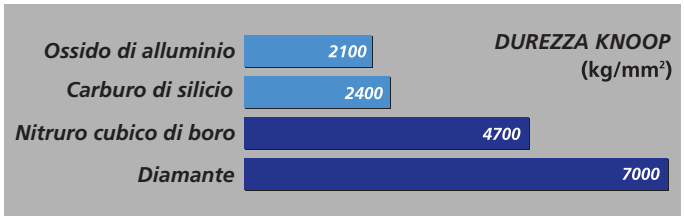
La composizione della mola abrasiva e le percentuali relative dei suoi tre componenti determinano il comportamento della mola stessa nella lavorazione. I dettagli del particolare tipo di mola sono riportati sulla stessa e seguono un sistema standard di *classificazione* e *marcatura delle mole*. Le indicazioni qui fornite sono riferite a mole di abrasivi convenzionali. Per quelle di superabrasivi la classificazione è diversa.

IL TIPO DI ABRASIVO (I)

Le lettere che seguono denotano il tipo di abrasivo usato:

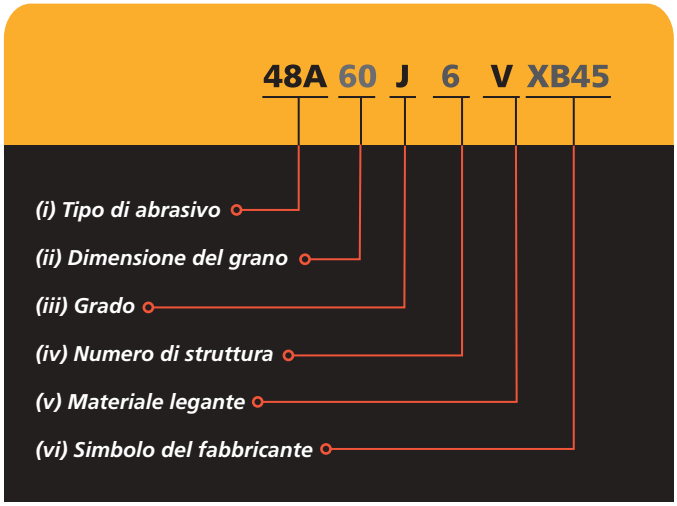
A	**ossido di alluminio (Al_2O_3)**
C	**carburo di silicio (SiC)**
B	**nitruro di boro cubico (CBN)**
D	**diamante**

L'ossido di *alluminio* e il *carburo di silicio* sono considerati abrasivi convenzionali. Il *nitruro di boro* cubico (CBN) e il *diamante* sono classificati come superabrasivi. Il tipo di abrasivo da adottare dipende dall'applicazione. L'ossido di alluminio è comunemente usato per la rettifica di acciai superrapidi. Il carburo di silicio, sebbene di maggior durezza, è usato di rado per questi acciai. Il nitruro di boro cubico con la sua grande durezza e buona conduttività fornisce buone prestazioni sugli acciai superrapidi, in particolare quelli altolegati. Tuttavia, esso è sensibilmente più costoso degli abrasivi convenzionali e pone inoltre maggiori esigenze alla rettificatrice. Il diamante, nonostante la sua altissima durezza, non è adatto alla rettifica di acciai superrapidi a per la sua limitata resistenza al calore e tendenza a reagire chimicamente col ferro.



Durezza di grani abrasivi

Le cifre che precedono le lettere indicano l'esatta varietà dell'abrasivo usato e sono diverse da produttore a produttore. Per esempio, vi sono numerose varietà di ossido di alluminio. Lo Al_2O_3 bianco è duro e friabile, si frattura quindi facilmente e risulta "autoravvivante" durante la rettifica poiché sempre grani abrasivi nuovi per la lavorazione. Lo Al_2O_3 marrone è tenace e si frattura meno facilmente. Gli abrasivi "seeded-gel" o "sol-gel" (abrasivi ceramici microcristallini) hanno guadagnato recentemente popolarità: essi presentano una struttura cristallina che si microfrattura durante l'uso mantenendo invariata la taglienza della mola e riducendone al minimo l'usura.



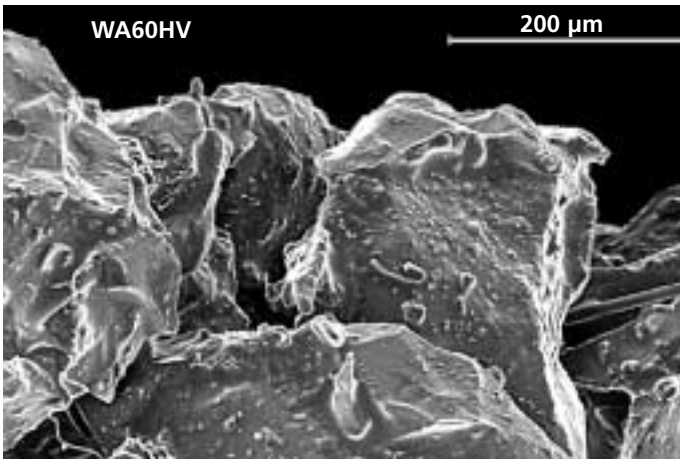
Denominazione di una mola di abrasivo convenzionale

DIMENSIONE DEL GRANO (II)

Il numero relativo alla dimensione del grano indica la granulometria della mola. Poiché esso corrisponde al numero di maglie per pollice usate nella setacciatura, *un numero alto corrisponde a una granulometria più fine*. In generale, raddoppiando il numero che esprime al dimensione del grano si dimezza all'incirca il diametro dei singoli grani determinando un numero circa 4 volte superiore di grani per unità di superficie della mola.
Gli abrasivi a grana più grossa sono utilizzati per avere forti asportazioni, nella rettifica di materiali non duri e quando la superficie di contatto mola-pezzo è grande. Essi producono una finitura superficiale rugosa e il raggio di forma minimo con essi realizzabile sul pezzo è superiore. Gli abrasivi a grana fine sono usati invece per la rettifica di alta precisione, nella lavorazione di materiali duri e quando l'area di contatto pezzo-mola è piccola. Essi forniscono una migliore finitura e permettono minori raggi di forma sul pezzo.

GRADO (III)

Il grado indica la "resistenza della mola", ossia quanto tenacemente il materiale legante trattiene i grani abrasivi.
Essa è talvolta indicata anche come "durezza" della mola, cosa che può indurre equivoci poiché *non ha nulla a che vedere con la durezza dell'abrasivo*. Per mole con legante vetrificato il grado predetto si riferisce alla frazione relativa di materiale legante e alla porosità della mola per un contenuto fisso di abrasivo. Le mole con grado elevato sono caratterizzate da maggior quantità di legante e minore porosità, caratteristica che le rende più "dure". Le mole con grado basso dispongono invece di meno legante e più porosità, cosa che le rende più "morbide". Per mole a legante resinoide e a legante metallico (che sono praticamente prive di porosità naturale) il grado è determinato dalla formulazione del legante.
Le mole di grado elevato tendono a mantenere bene la forma ma danno facilmente bruciature poiché i grani abrasivi non vengono scalzati dopo che sono smussati dall'usura. Le mole dei gradi inferiori tendono invece a perdere più facilmente la forma ma sono meno inclini a dare bruciature poiché i singoli grani abrasivi vengono scalzati e perduti facilmente una volta usurati, assicurando un effetto di autoravvivatura.
La corretta scelta del grado della mola dipende da numerose variabili. I materiali più difficili da rettificare causano rapidamente la perdita di taglienza della mola. Essi richiedono quindi mole di grado inferiore affinché la mola resti sempre ben tagliente. Le operazioni di rettifica con forte lunghezza dell'arco di contatto (pag. 18) richiedono l'utilizzo di mole di grado basso data la disponibilità di un'ampia area per distribuire le forze sui singoli grani.
La mola ottimale per una determinata lavorazione è un compromesso fra resistenza e taglienza: essa deve essere dura a sufficienza da mantenere la forma ma tenera a sufficienza da permettere il ricambio dei grani smussati per usura.



Grani abrasivi in una mola. Le mole appena ravvivate sono ben taglienti ma tendono a perdere taglienza con l'uso. Scegliendo una mola tenera (di grado basso) si ha meno legante e più porosità per cui i grani abrasivi si scalzano più facilmente creando un effetto di autoravvivatura.

Le scale di durezza non sono standardizzate: esse sono diverse per ciascun fabbricante. Tuttavia, nell'ambito di ciascuna famiglia di prodotti e tipo di mole, il grado indica la resistenza relativa delle mole di un certo grado rispetto a quella di un altro grado

Gradi delle mole. Mole a legante vetrificato di grado alto hanno più legante e si comportano come mole "dure".

NUMERO DI STRUTTURA (IV)

La struttura esprime *la spaziatura dell'abrasivo nell'ambito della mola*, cosa definita spesso anche "concentrazione volumetrica di abrasivo nella mola ". Un numero inferiore indica una superiore percentuale di abrasivo e quindi una struttura più "chiusa". Il numero maggiore indica invece una bassa percentuale di abrasivo e una struttura più "aperta". Questo numero viene spesso omesso quando si tratta del valore di default (standard) del fabbricante. Le mole a struttura "aperta" sono utilizzate per facilitare la formazione del truciolo e nelle lavorazioni in cui il raffreddamento ha maggiore importanza quali ad esempio la rettifica creep-feed.

Struttura di una mola. Le mole a struttura aperta presentano una maggiore distanza fra i singoli grani abrasivi.

MATERIALE LEGANTE (V)

Lo scopo del legante è di trattenere i singoli grani abrasivi. I tipi più comuni di legante sono:

V	**vetrificato**
B	**resinoide**
R	**gomma**
M	**metallico**

Le mole a legante **vetrificato** sono le più comuni e sono usate sia con abrasivi convenzionali sia con i superabrasivi. Esse sono rigide (adatte quindi alla rettifica di precisione), dispongono di struttura porosa e non sono sensibili alle alte temperature. Le mole a legante **resinoide** non sono porose, sono meno rigide (quindi più adatte a una migliore finitura superficiale), tenaci (cioè meno fragili, cosa favorevole all'impiego in operazioni gravose, ad alte velocità periferiche e in presenza di forze laterali) ma sono più sensibili alla temperatura rispetto alle precedenti vetrificate. Le mole con legante **gomma** sono usate per operazioni di troncatura a umido e per ottenere una finitura superficiale veramente spinta.
Infine, le mole a legante **metallico** sono spesso usate con i superabrasivi.

SIMBOLI DEL FABBRICANTE (VI)

Ulteriori numeri e/o lettere descrivono il particolare tipo di legante utilizzato e sono diverse da fabbricante a fabbricante. Alcune cifre possono fornire ulteriori informazioni sulla mola.

COME OPERA LA RETTIFICA

La rettifica è un processo di asportazione dove i grani abrasivi agiscono come utensili da taglio mentre il legante serve come portautensile. Analogamente alla fresatura e alla tornitura, la rettifica è un processo ad asportazione di truciolo. Tuttavia, i trucioli prodotti sono estremamente piccoli e gli spigoli taglienti sono numerosi, di geometria irregolare e "autoaffilanti" nonché caratterizzati da angoli di taglio negativi.

Nell'interfaccia abrasivo-pezzo durante la rettifica si hanno tre interazioni primarie: *taglio, spostamento e scorrimento*.
Tutte e tre generano calore.

TAGLIO

E' la formazione di trucioli sui lati del grano abrasivo.

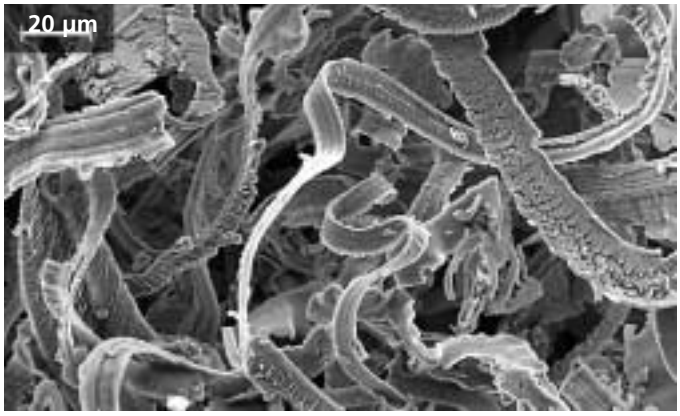
SPOSTAMENTO

E' lo spostamento di materiale sulla parte frontale e laterale del singolo grano. Non determina asportazione di materiale ma facilita la formazione del truciolo.

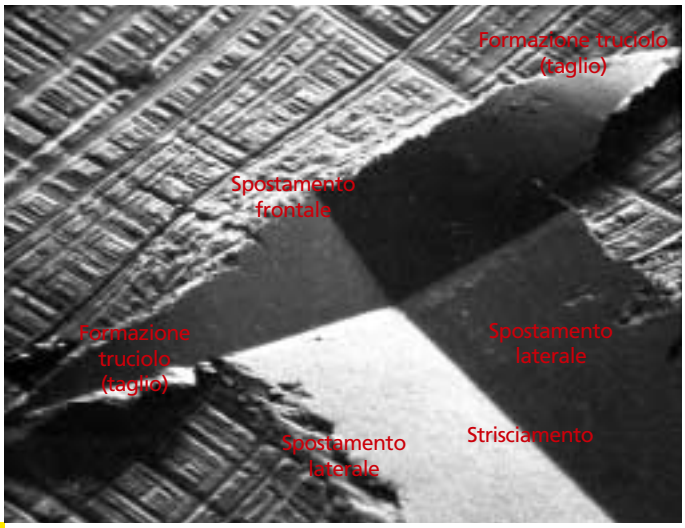
STRISCIAMENTO

Si tratta dello scorrimento tra grani abrasivi e pezzo. Non vi è rimozione del materiale.

Durante la rettifica le tre interazioni sopra citate si verificano tutte, ma in misura variabile. Una mola ben tagliente opera in modo efficiente e dà una prevalente azione di taglio sviluppando quindi meno calore. Una mola non tagliente opera in modo non efficiente e determina una maggiore azione di spostamento e di strisciamento, generando quindi più calore.



Sopra: trucioli di rettifica fortemente ingranditi. La rettifica è un processo ad asportazione di truciolo (lavorazione su acciaio M9V con mola WA46HV, 1.000 ingrandimenti).



A destra: un materiale tenero dopo che un grano di abrasivo duro e di forma piramidale è stato spinto attraverso di esso. Si vedono tutti e tre i tipi di interazione pezzo-abrasivo, ossia taglio, spostamento e strisciamento.

USURA DELLA MOLA

Subito dopo la ravvivatura, la mola è ben affilata e taglia in modo efficiente avendo quindi una elevata aliquota di taglio rispetto alle altre interazioni. Al proseguire della lavorazione, tuttavia, i taglienti dei singoli grani abrasivi si ottundono. Ciò determina un progressivo crescere delle aliquote di spostamento e scorrimento con maggior assorbimento di potenza e crescente riscaldamento, alte temperature e bruciature di rettifica.

I tre tipi di usura della mola sono:

USURA DA ATTRITO (I)

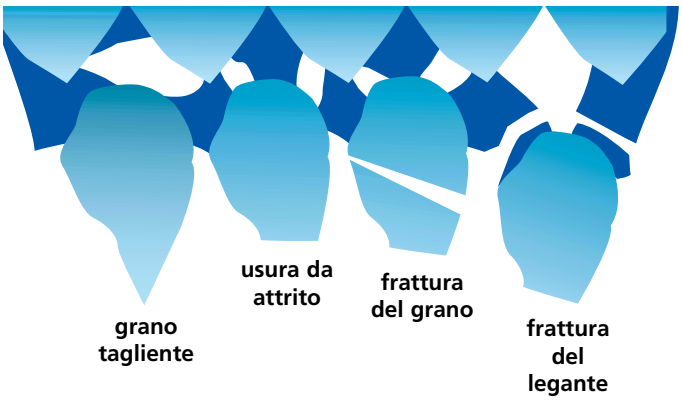
Quest'usura si verifica sulla sommità dei singoli grani abrasivi. Sebbene essa sia responsabile soltanto di una piccola frazione dell'usura complessiva della mola, ne influenza in senso negativo le prestazioni poiché porta un forte sviluppo di calore: si hanno, infatti, spesso fenomeni di "appiattimento da usura", smussatura dei taglienti o vetrificazione della mola. Le mole in CBN, a causa della loro elevata durezza, presentano un molto minore tasso di usura da attrito.

FRATTURA DEI GRANI (II)

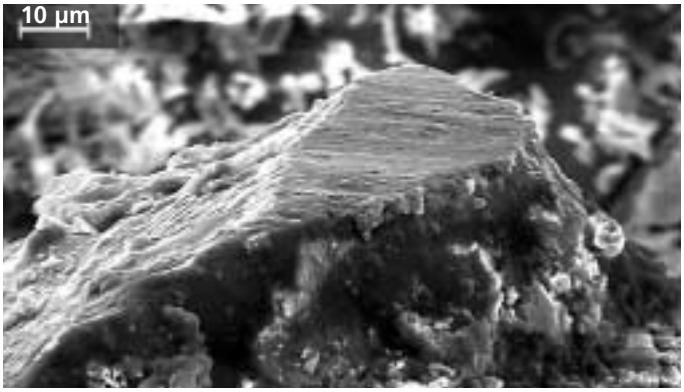
La frattura dei grani è la forma di usura dovuta alla rottura dei singoli grani abrasivi. Essa si verifica quando le sollecitazioni agenti sul grano superano il suo limite di rottura. Gli abrasivi friabili, quali per esempio l'allumina bianca, sono più facili a queste rotture. Gli abrasivi del tipo “seeded-gel” presentano una grande inclinazione a rotture di quel tipo che si verificano lungo i loro microscopici piani di frattura.

FRATTURA DEL LEGANTE (III)

La frattura del legante è il tipo di usura che si manifesta sulla mola mediante frattura del legante che trattiene i singoli grani abrasivi. Si verifica quando le sollecitazioni sul grano superano la resistenza del legante che lo trattiene. Le mole di grado "tenero" sono più facili a questo tipo di rottura poiché presentano una minore quantità di materiale legante intorno ai singoli grani.



Sopra: i tre tipi di usura di una mola. L'usura da attrito porta a un maggiore sviluppo di calore e alte temperature. Essa deve essere bilanciata da un corretto grado di fratture dei grani e frattura del legante, così da creare un effetto di autoravvivatura.

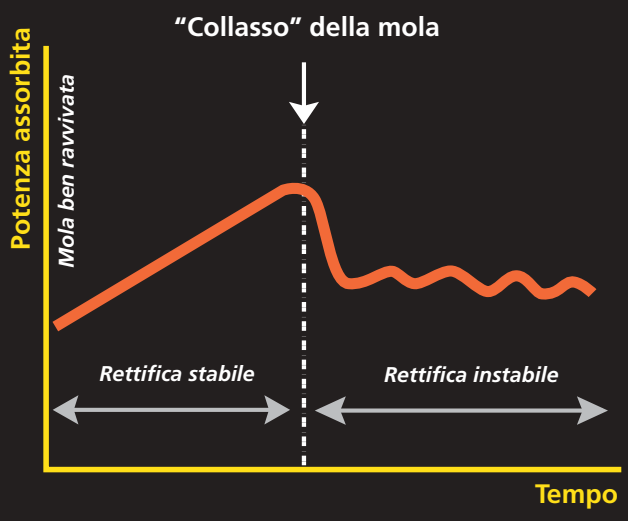


Sopra: un grano abrasivo smussato. La presenza di più grani in queste condizioni porta ad elevate temperature di rettifica e a tipiche "bruciature". Questa mola, granulometria 46, grado L con legante vetrificato, era troppo dura per l'operazione per cui è stata usata.

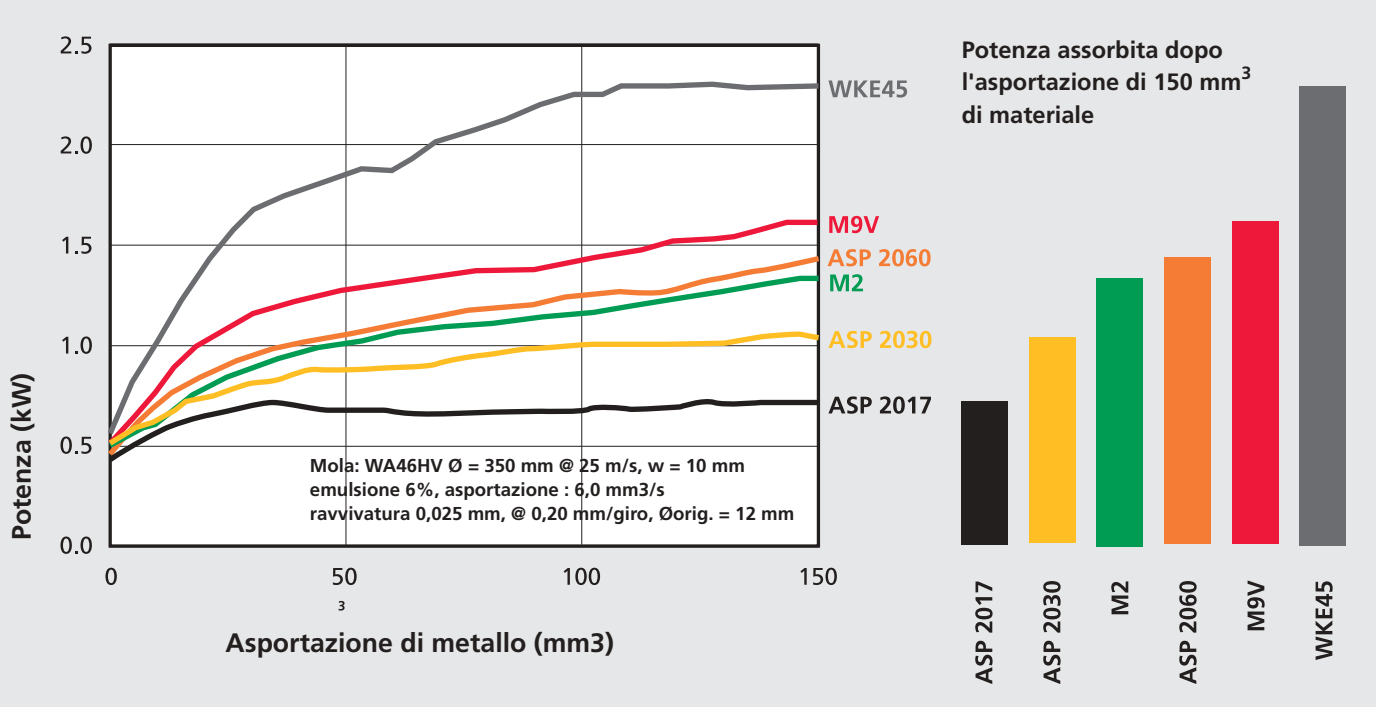
In una mola abrasiva correttamente operante, le accresciute sollecitazioni conseguenti alla smussatura dei grani (usura tipo i) sono bilanciate dalla resistenza dell'abrasivo e dei "ponti" di legante per cui i grani smussati vengono scalzati mettendo in luce grani nuovi a spigoli taglienti. Ciò avviene per frattura dei grani abrasivi (usura tipo ii), oppure frattura del legante (usura tipo iii). Questo tipo di mola è definito "autoravvivante". Nelle mole che si usurano in modo troppo rapido il tasso di rotture dei grani e di rotture del legante può essere ridotto mediante riduzione dello spessore dei trucioli (pag. 21).
In mediocri condizioni di autoravvivatura le forze agenti sui grani abrasivi raggiungono un punto critico e l'usura della mola diviene estrema e discontinua (vedere diagramma a fianco). A questo punto la mola "collassa" e perde la propria rotondità determinando vibrazioni e rettifica non stabile. In queste condizioni la rettifica deve essere interrotta. Le mole di grado alto si usurano più rapidamente e giungono prima al collasso. Inoltre, la lavorazione con mola intasata induce questo fenomeno molto più facilmente.

RETTIFICA E COMPOSIZIONE DELL'ACCIAIO

L'usura della mola è influenzata dalle condizioni di lavorazione ma anche dalla composizione dell'acciaio. La rettifica di acciai altolegati con la loro alta durezza e quantità di carburi duri porta alla rapida perdita di taglienza della mola e maggior assorbimento di potenza. Per esempio, gli acciai altolegati danno luogo ad assorbimenti di potenza praticamente uguali a quelli degli acciai bassolegati quando la mola è tagliente (ossia all'inizio della lavorazione), come si vede dal diagramma qui sotto. Al progredire della lavorazione, però, l'assorbimento di potenza con gli acciai altolegati cresce più rapidamente: dopo qualche tempo l'assorbimento può risultare più volte superiore a quello provocato da un acciaio meno legato.



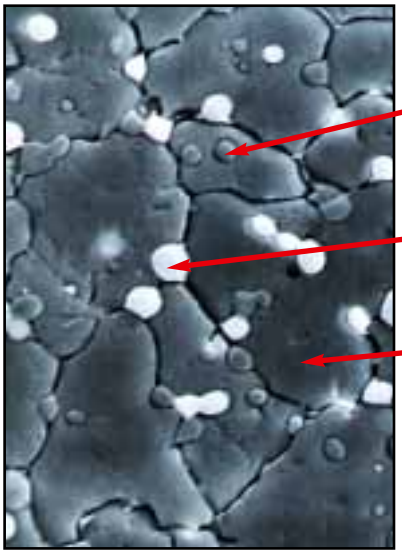
Assorbimento di potenza (o, in alternativa, sviluppo di forza e di calore) in funzione del tempo, durante la rettifica.
Dopo la ravvivatura la mola inzia ad ottundersi (ossia a perdere taglienza). Quando le forze di lavoro raggiungono un valore critico l'usura della mola diviene rapida e si ha il collasso della mola stessa. A questo punto essa perde la propria rotondità e la rettifica diviene instabile. Sul pezzo si formano tracce di vibrazioni e la finitura superficiale diviene cattiva. La mola va ravvivata nuovamente prima che questa fase sia raggiunta.



Gli acciai altolegati e quelli bassolegati determinano approssimativamente lo stesso assorbimento di potenza quando la mola è tagliente. Al procedere della lavorazione, però, con l'acciaio altolegato si ha una più rapida usura dei taglienti. Ciò determina l'altrettanto rapida usura della mola e, come si vede qui nel diagramma, un rapido incremento della potenza assorbita. Cresce di conseguenza il rischio di bruciature da rettifica.

COMPOSIZIONE DEGLI ACCIAI SUPERRAPIDI E LORO RETTIFICA

L'acciaio superrapido è composto di due elementi principali: la matrice di lega ferro-carbonio e i carburi. Tungsteno, molibdeno e vanadio si combinano col carbonio formando carburi di grande durezza. Come si vede nella figura a pagina seguente, questi carburi possono avere la stessa durezza o essere addirittura più duri dei grani abrasivi della mola determinando la rapida smussatura e la rottura dei grani stessi o del legante. In generale un maggior contenuto di lega negli acciai significa maggior presenza di carburi e minore facilità di rettifica.

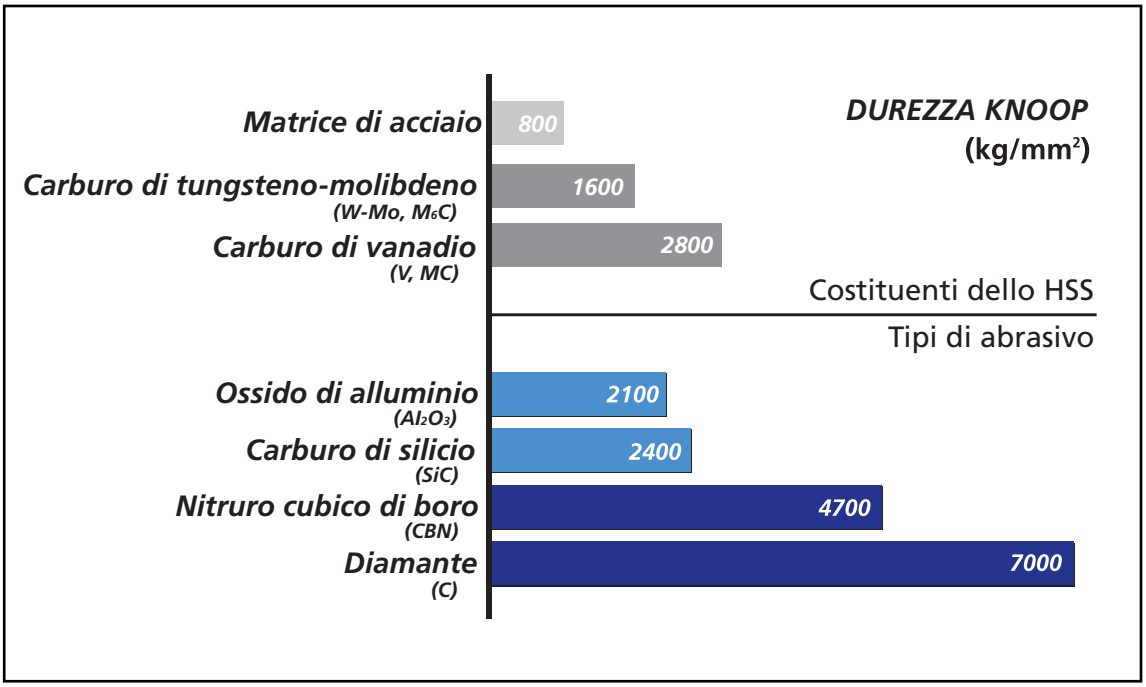


Carburi e matrice nell'acciaio ASP 2030 P/M

Il tagliente di un coltello in acciaio ASP 2053. I carburi conferiscono al coltello resistenza all'usura ma lo rendono più difficile da affilare.

La rettifica degli acciai bassolegati è più agevole: la mola mantiene la propria taglienza più a lungo. La rettifica degli acciai altolegati ad alta percentuale di carburi duri pone speciali sfide. Pertanto, la corretta scelta della mola, delle condizioni di ravvivatura, del refrigerante e dei parametri di lavorazione è di estrema importanza per ottenere un'elevata produttività con minimo sviluppo di calore.

Ciò nonostante, anche le operazioni di rettifica ottimizzate, se spinte al limite di produttività, possono determinare danni da surriscaldamento, detti generalmente "bruciature di rettifica".
E' quindi importante vedere i differenti tipi di danneggiamenti termici che si possono verificare, come essi possono essere scoperti e le strategie per contrastarli.



Durezza dei componenti dell'acciaio superrapido (HSS) e di vari tipi di abrasivi.

Capsula di acciaio ASP P/M dopo la pressatura isostatica a caldo.

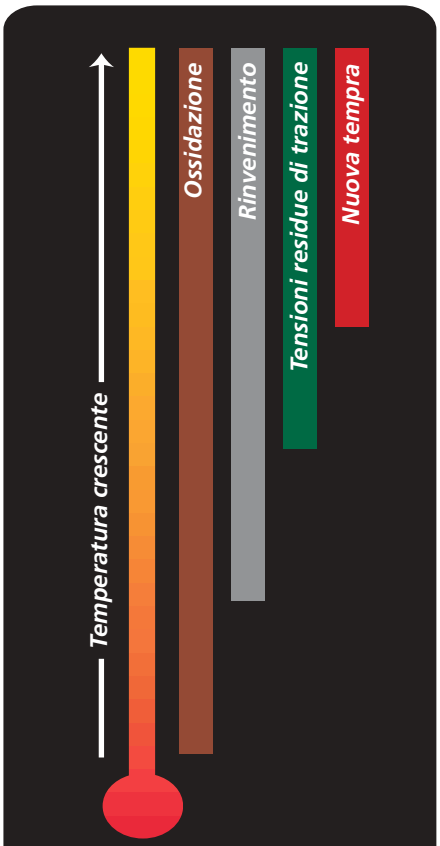
DANNEGGIAMENTI TERMICI E "BRUCIATURE" DI RETTIFICA

"Bruciatura di rettifica" è un termine usato per descrivere genericamente ogni tipo di danneggiamento termico che si verifica sul pezzo durante la rettifica. In pratica vi sono vari tipi di questi danneggiamenti e ciascuno si verifica a differenti temperature influenzando differentemente la qualità del pezzo.

I 4 TIPI DI DANNEGGIAMENTO TERMICO SONO:

tipo 1: ossidazione
tipo 2: rinvenimento
tipo 3: tensioni residue di trazione
tipo 4: bruciatura con nuova tempera

Molti tipi di danneggiamento termico non risultano evidenti sui pezzi.



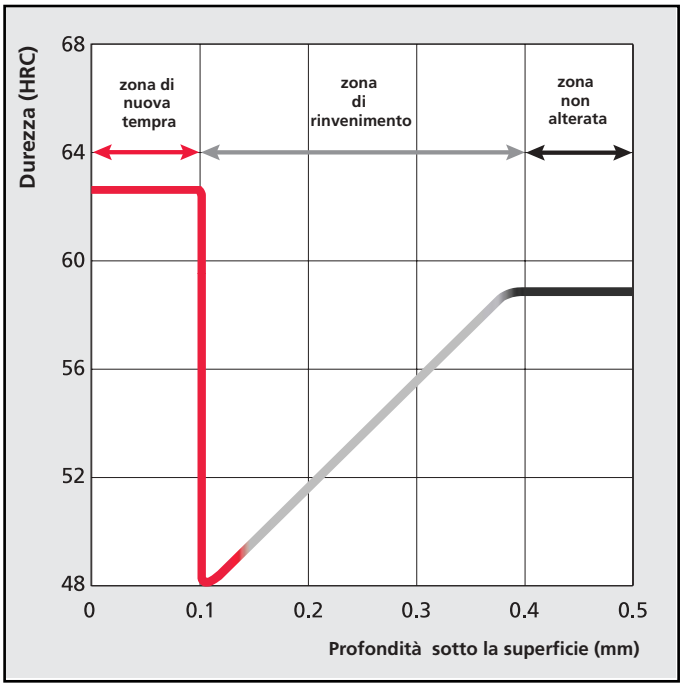
I quattro tipi di danneggiamento termico e i campi di temperatura in cui si verificano.

TIPO 1: OSSIDAZIONE

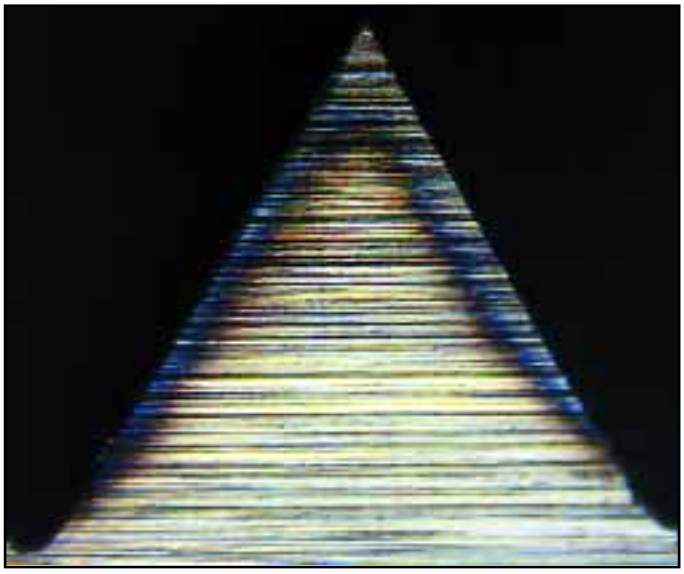
Questo danneggiamento è causato da ossidazione sul pezzo sul quale resta un sottile strato di colore diverso. Può verificarsi anche su una zona non rettificata vicina a quella rettificata, dove le temperature sono alte per conduzione termica. Talvolta l'ossidazione è un fenomeno negativo ma puramente "cosmetico" e si verifica senza veri danneggiamenti metallurgici al pezzo sebbene il sottile strato superficiale sopra citato possa impedire ogni altro rivestimento. Sebbene esso sia solitamente più marcato alle alte temperature, non segnala la presenza o meno di altri danneggiamenti termici.

TIPO 2: RINVENIMENTO

Il *rinvenimento* si verifica quando la temperatura del pezzo supera quella di tempra. Esso determina uno strato di materiale di durezza ridotta che può influenzare negativamente la resistenza e le prestazioni del pezzo.
La figura mostra come la durezza del pezzo sia influenzata da danneggiamenti termici a profondità crescenti. Essa mostra due tipi di danneggiamento. Il primo, in superficie, fino alla profondità di 0,1 mm (rosso) è una zona di nuova tempra (tipo 4) con accresciuta durezza. Vi è poi una zona a profondità compresa fra 0,1 e 0,4 mm (grigia) in cui vi è rinvenimento (danno tipo 2), con durezza ridotta. A profondità oltre 0,4 mm (nero) la durezza del pezzo resta invariata. Sebbene in questo caso si abbiano sia rinvenimento sia nuova tempra, il rinvenimento si riscontra spesso senza presenza di nuova tempra poiché il rinvenimento inizia già a temperature sensibilmente inferiori.



Il diagramma da la durezza in funzione della profondità e mette in evidenza i danneggiamenti dei tipi 2 e 4. Sulla superficie vi è uno strato di nuova tempra mentre sotto la superficie si ha uno strato di materiale rinvenuto



Bruciatura ossidante su un maschio. La superficie del dente cambia di colore a seguito del surriscaldamento nella rettifica. Il cambiamento di colore, tuttavia, non indica necessariamente la presenza di altri danni termici.

TIPO 3: TENSIONI RESIDUE DI TRAZIONE

Nella rettifica correttamente condotta la deformazione plastica del materiale del pezzo conseguente all'azione dei grani abrasivi lascia la superficie in uno stato di tensione residua di compressione. Analogamente alla nota "pallinatura", ciò può aumentare le proprietà meccaniche del pezzo, in particolare la resistenza a fatica. Tuttavia, se si "spinge" il processo per ottenere maggior produttività, cresce anche la temperatura e possono iniziare a manifestarsi tensioni residue di trazione.
Queste ultime sono causate dalla contrastata espansione termica della superficie del pezzo durante la rettifica. Dopo il raffreddamento, la superficie stessa entra in uno stato di tensione. Nei casi moderati, le tensioni residue di trazione hanno l'unico effetto di influenzare negativamente la durata del pezzo (quest'ultimo è solitamente un utensile). In casi estremi si può arrivare però addirittura alla rottura del pezzo stesso dopo la rettifica. Il valore di queste tensioni e la profondità alla quale si manifestano dipendono dalla temperatura raggiunta e dalle proprietà del materiale del pezzo. Supposto che non si verifichino rotture immediate, le tensioni residue possono essere ridotte mediante un trattamento termico di distensione dopo rettifica. I metodi usati per rilevare la presenza di dette tensioni di trazione sono le analisi mediante diffrazione ai raggi X, l'attacco con acidi e il *Barkhausen Noise*.

TIPO 4: NUOVA TEMPRA

Questo danneggiamento si verifica quando la temperatura del pezzo supera quella di austenitizzazione causando così un cambio di fase metallurgica nel materiale dopo il raffreddamento. Ciò determina un sottile strato di martensite dura, fragile. Questa condizione viene poi esasperata da tensioni residue secondarie che possono sopravvenire col cambio di densità del materiale di nuova formazione. Si tratta della forma più grave di danneggiamento termico e porta spesso alla rottura del pezzo.

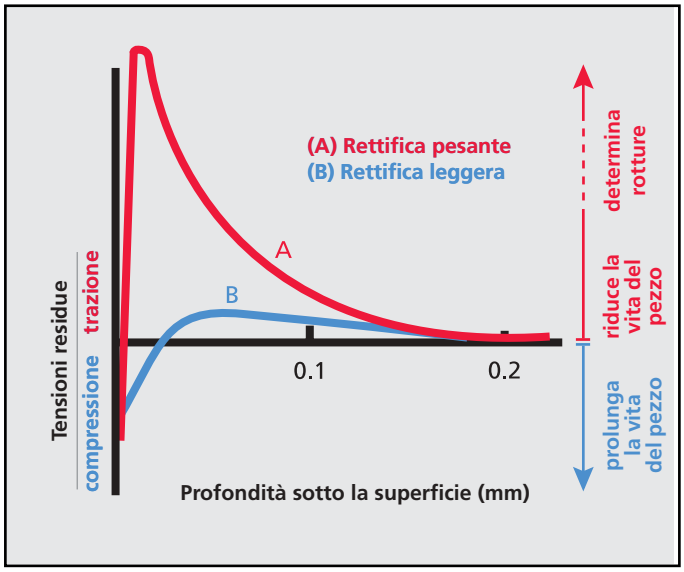
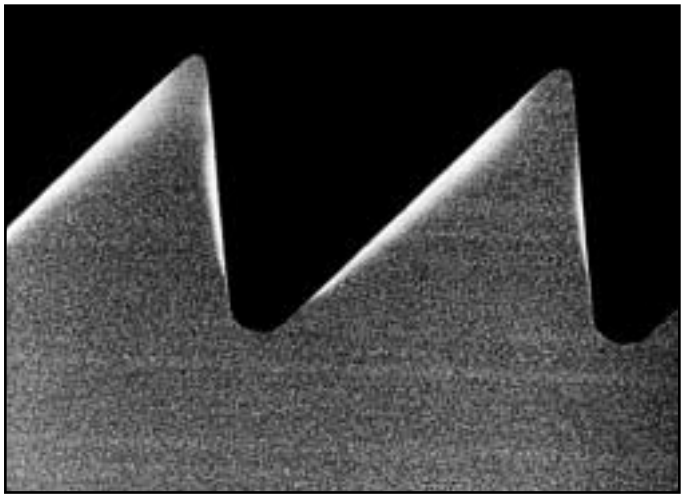


Diagramma che da le tensioni residue in funzione della profondità sotto la superficie del pezzo. Tensioni residue sono presenti in tutti i provini. Quelle di compressione prolungano la vita del pezzo mentre quelle di trazione la riducono e possono provocare anche rotture immediate.

RIDUZIONE DEI DANNI TERMICI

Anche nelle migliori condizioni di rettifica il perseguire elevate produttività comporta sempre il rischio di danni termici. La sfida consiste nell'ottenere alte produttività con una costante qualità dei pezzi grazie al contenimento delle temperature che questi ultimi assumono nella zona di contatto con la mola. La riduzione delle temperature può essere ottenuta (i) riducendo lo sviluppo di calore, oppure (ii) riducendo il calore che entra nel pezzo (per esempio mediante un più efficace raffreddamento). I paragrafi che seguono spiegano i concetti fondamentali per la rettifica riguardanti il rendimento e la generazione di calore: essi forniscono raccomandazioni per migliorare le prestazioni di lavoro e ridurre il rischio di danni termici.



Bruciature con nuova tempra su un utensile per filettatura. Le sezioni bianche evidenziano un cambiamento di fase del materiale.

Le prime mole per rettifica: macine a Stanage Edge, Peak District, Inghilterra.

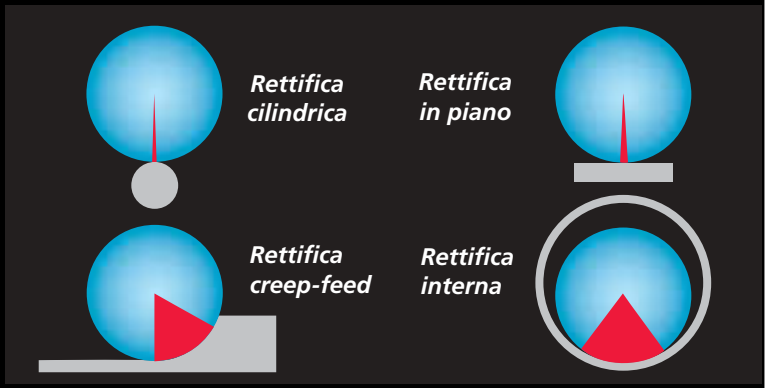
LIQUIDI PER RETTIFICA

I tre scopi primari del fluido nella rettifica sono:

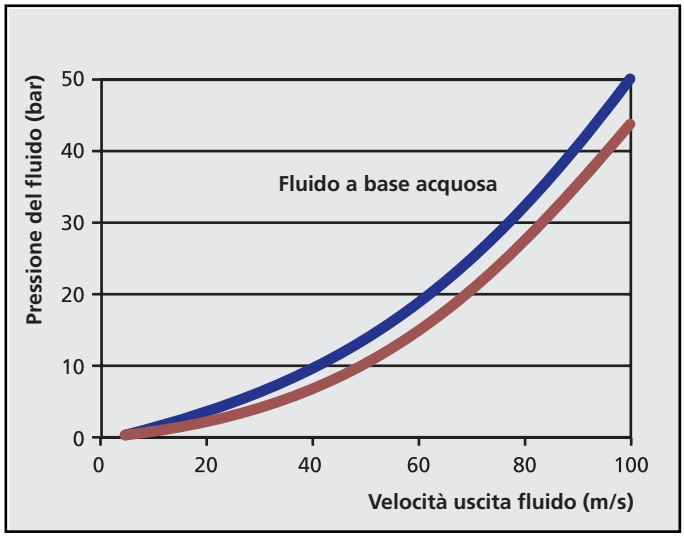
- *raffreddare il pezzo*
- *lubrificare la zona di contatto tra mola e pezzo*
- *asportare i trucioli prodotti*

In generale, le emulsioni a base di acqua assicurano un buon raffreddamento ma una limitata lubrificazione mentre gli oli da taglio assicurano un'eccellente lubrificazione ma un limitato raffreddamento. Le emulsioni sono spesso preferite per ragioni igieniche ed ecologiche.
L'efficacia del raffreddamento dipende largamente dalla lunghezza dell'arco di contatto. Le operazioni di rettifica con un arco di contatto molto sviluppato (quali il processo creep-feed) sono caratterizzate da un'ampia area di contatto per il trasferimento di calore al fluido mediante convezione: pertanto il fluido stesso assorbe una frazione notevole del calore sviluppato. Dette operazioni beneficiano quindi molto del raffreddamento efficace. Nelle lavorazioni con limitato arco di contatto, quali ad esempio la rettifica esterna, l'area disponibile per il trasferimento di calore è invece limitata: pertanto il fluido assorbe solo una piccola frazione del calore sviluppato. Queste operazioni non beneficiano quindi di un efficace raffreddamento e il beneficio primario assicurato al fluido è la lubrificazione.

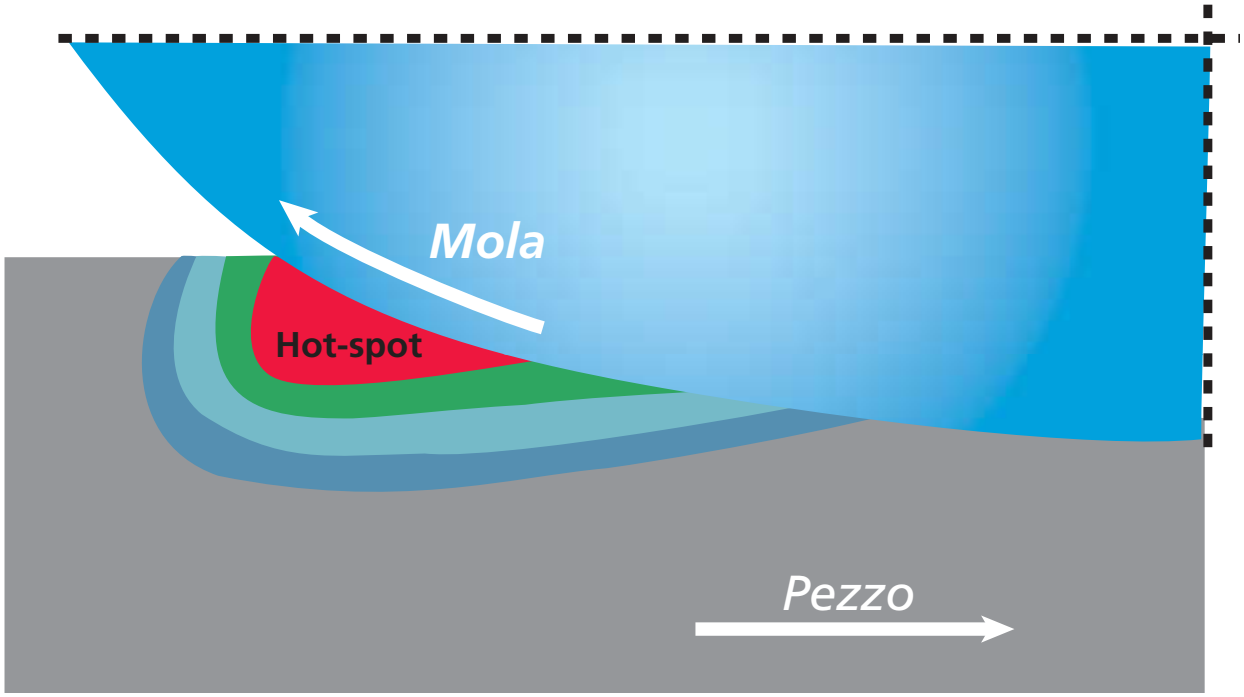
Le lavorazioni con un arco di contatto molto sviluppato beneficiano del raffreddamento. Inoltre, la lunghezza dell'arco influenza marcatamente il grado ottimale della mola. Un arco molto sviluppato permette, infatti, di distribuire le forze su una maggiore superficie di contatto. Ciò significa minori forze agenti su ogni grano abrasivo cosicché è possibile utilizzare una mola di grado inferiore.



Lo “hot-spot” è la parte dell’interfaccia mola-pezzo dove le temperature sono massime. L'efficacia del raffreddamento dipende dalla possibilità del liquido refrigerante di perforare la barriera d'aria che circonda la mola e di penetrare nello hot-spot. Ciò si ottiene mediante velocità di erogazione del refrigerante che si approssimano alla velocità periferica della mola, in modo che il liquido possa perforare la barriera d'aria. Ciò significa che un ugello d’erogazione opportunamente sagomato e un'alta velocità di uscita del fluido sono più importanti di una elevata portata di fluido. D'altra parte, elevate velocità richiedono alte pressioni (figura). Per questo è importante che l'ugello di erogazione del fluido sia correttamente disegnato: esso deve avere in particolare una sezione d’uscita di opportune dimensioni. Se la sezione è troppo ampia si avrà una caduta di pressione nel sistema e una minore velocità di uscita.
Una tecnica alternativa è di forzare il liquido nelle porosità della mola in modo che la forza centrifuga spinga il fluido nella zona dell'arco di contatto. Tuttavia, ciò può essere difficile da realizzare e può richiedere alla macchina potenza supplementare per accelerare a sufficienza il fluido.



Pressione del refrigerante in funzione della velocità di uscita. Per un efficace raffreddamento la velocità di uscita del liquido refrigerante deve essere vicina alla velocità periferica della mola.



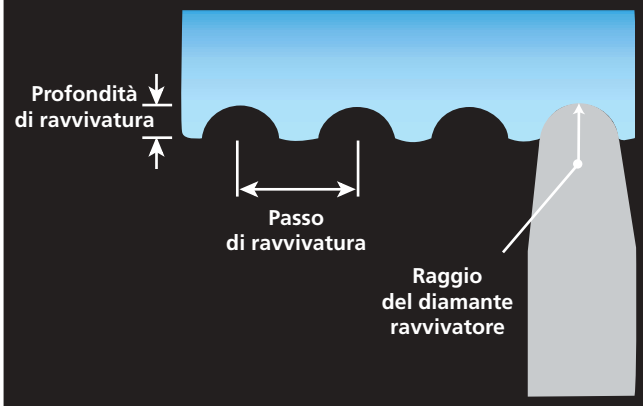
Lo hot-spot è la parte della zona di contatto mola-pezzo nella quale si hanno le massime temperature durante la rettifica. Per un efficace raffreddamento è necessario che il fluido refrigerante penetri tra i grani abrasivi per permettere alla mola di spingere il fluido nella zona di alta temperatura.

BILANCIATURA E DIAMANTATURA DELLA MOLA

La preparazione della mola prima della rettifica comprende la bilanciatura e la diamantatura. La prima consiste nell'asportazione mirata di materiale in modo che la mola risulti perfettamente rotonda e ruoti concentrica, quindi senza squilibrio. L'operazione può comprendere anche la profilatura della mola per portarla a una forma speciale desiderata.
La ravvivatura ha invece lo scopo di creare sulla mola una specifica topografia nella superficie attiva allo scopo di ottenere la desiderata taglienza.

Per mole di superabrasivo a legante resinoide la bilanciatura e la diamantatura sono di solito effettuate separatamente. Nella maggior parte degli altri casi esse avvengono invece con un'unica operazione denominata semplicemente ravvivatura. Per questa operazione vi sono parecchi metodi diversi: i più comuni sono la ravvivatura con diamante singolo, oppure quella con rullo diamantato.
Nel primo caso (ravvivatura a diamante singolo) profondità di ravvivatura, passo di ravvivatura e raggio del diamante influenzano tutti la topografia finale. Una forte profondità e un forte passo di ravvivatura creano sulla mola una superficie più rugosa. Il passo di ravvivatura ha spesso più importanza e viene altrettanto spesso sottovalutato. Se usato in modo appropriato esso può inoltre creare un'*elica sulla mola* facilitando il flusso del refrigerante. Il raggio del diamante è a sua volta importante e anch'esso di frequente sottovalutato: con ripetute ravvivature esso si smussa e acquisisce un raggio maggiore, cosa che determina una mola non tagliente anche subito dopo la ravvivatura. Pertanto, il diamante ravvivatore va fatto ruotare con frequenza perché mantenga inalterata la sua capacità ravvivante. In alternativa si possono utilizzare ravvivatori a diamanti multipli (lame, cluster, ecc.) che risultano spesso vantaggiosi e più adatti alla produzione automatica.
I *rulli diamantati* consistono di rulli metallici in cui sono incastonate particelle di diamante. Essi sono spesso usati per generare profili. Molti sono i parametri che ne influenzano le prestazioni: la profondità di ravvivatura, la penetrazione per giro della mola e il tempo di sosta, ma anche il rapporto di velocità. Un forte avanzamento in penetrazione per giro produce una mola con superficie più grossolana. Il tempo di sosta agisce analogamente a una passata di finitura durante la rettifica determinando una struttura più fine sulla mola. Il rapporto di velocità è il rapporto fra velocità del rullo ravvivatore e quello della mola. Un valore positivo significa che due elementi si muovono nella stessa direzione: il valore +1 significa che le due velocità coincidono determinando un *effetto di frantumazione* dei grani abrasivi. L'esperienza mostra che in molti casi una ravvivatura ottimale si ha con un rapporto di +0,8 con generazione di una superficie relativamente rugosa sulla mola.

Ravvivatura con diamante singolo



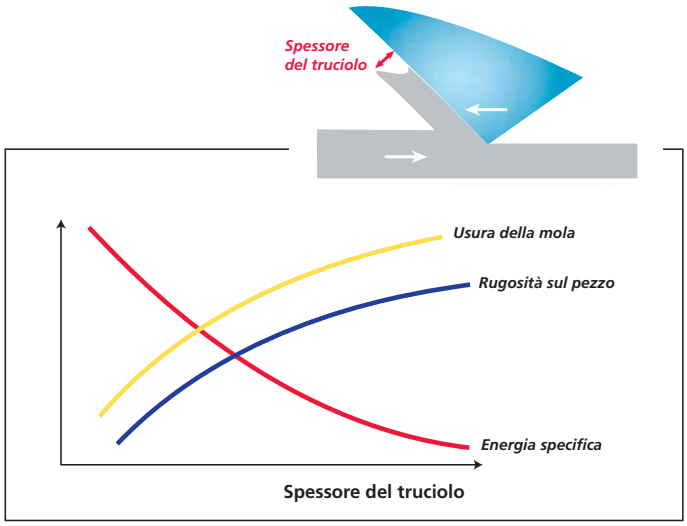
Profondità di ravvivatura, passo di ravvivatura e raggio del diamante influenzano la taglienza della mola.

ASPORTAZIONE E SPESSORE DEL TRUCIOLO

Il tasso di asportazione di materiale esprime la quantità di materiale truciolato per unità di tempo ed è espresso in mm³/s. Aumentando la profondità di passata, la velocità periferica del pezzo e la larghezza di contatto della mola aumenta detta asportazione. In pratica, essa viene aumentata il più possibile per aumentare la produttività..

L'asportazione di materiale è spesso indicata per unità di larghezza della mola e in questo caso viene definita asportazione specifica ed espressa in mm³/mm.s. Aumentando l'asportazione specifica aumenta lo spessore del truciolo.
Quest'ultimo spessore è in realtà quello medio dei trucioli che vengono generati. Sebbene i trucioli tipici della rettifica siano di forma irregolare, il loro spessore medio resta relativamente costante per determinate condizioni di lavoro. Un maggior spessore di truciolo si ottiene mediante:

- **aumento della profondità di passata**
- **aumento della velocità periferica del pezzo**
- **riduzione della velocità periferica della mola.**



Lo spessore del truciolo ha un'importante influenza sulla rettifica e può essere modificato per ottenere un desiderato risultato.

In generale un maggior spessore di truciolo comporta:

- **maggior rugosità sul pezzo**
- **maggior usura della mola e rapida alterazione della sua geometria**
- **migliore autoravvivatura della mola stessa**
- **minor consumo specifico di energia.**

L'*energia specifica* è il calore generato per unità di volume di materiale asportato e viene espressa in Joules/mm3. La rettifica con bassa energia specifica è un processo efficiente e genera poco calore. Le mole ben taglienti, con la loro elevata aliquota di effetto di taglio e bassa aliquota di strisciamento e spostamento, assorbono una bassa energia specifica e danno luogo a minore sviluppo di calore.
La potenza assorbita (e, con essa, il calore generato) durante la rettifica è il prodotto dell'asportazione di materiale e della energia specifica:

potenza (W) = asportazione (mm³/s) x energia specifica (J/mm³)

Pertanto, il calore che entra nel pezzo durante la rettifica può essere diminuito mediante:
1) riduzione dell'asportazione specifica (rettifica meno "energica"),
2) riduzione dell'energia specifica (con maggior spessore del truciolo, mola più tagliente, ravvivatura più energica, ecc.).

Per esempio, il ridurre la velocità periferica della mola comporta un maggior spessore del truciolo, di conseguenza una minore energia specifica e minor sviluppo di calore. Si ha però anche un'accresciuta usura della mola (con effetto di autoravvivatura) e una meno buona finitura superficiale sul pezzo. Al contrario, una minore velocità periferica del pezzo produce minori spessori di truciolo e una migliore finitura superficiale.

LAVORABILITÀ

Il termine "lavorabilità alla mola" è usato per descrivere la relativa facilità con al quale un materiale può essere rettificato. Date le differenze di composizione e di durezza, i differenti tipi di acciai superrapidi possono avere, infatti, attitudini molto diverse a subire la rettifica.

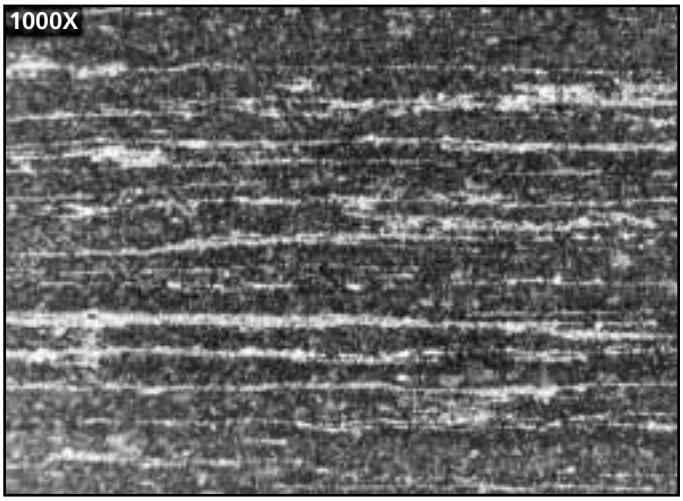
La lavorabilità può comprendere la sensibilità del materiale ai danneggiamenti termici e alle alte temperature. Ma la lavorabilità è meglio descritta attraverso il "*rapporto G*" in particolare quando la rettifica avviene con abrasivi convenzionali. Il rapporto G è definito come *il volume di materiale asportato durante la rettifica diviso per il volume perduto per usura della mola*.
Il significato del rapporto G non sta nel costo della quantità di mola consumata, bensì piuttosto negli effetti della composizione dell'acciaio sulle proprietà di taglio dei grani abrasivi. Gli acciai altolegati, con le loro numerose particelle di carburi duri, tendono ad far perdere rapidamente taglienza alla mola con conseguente aumento del calore sviluppato e dell'usura della mola stessa. Ciò fornisce un rapporto G inferiore e una minore lavorabilità del materiale. I materiali con basso valore del rapporto G richiedono minori velocità periferiche e minori avanzamenti nonché una più frequente ravvivatura (per mantenere la taglienza e la forma della mola): ciò comporta maggiori tempi di rettifica.
Gli acciai bassolegati presentano invece elevati rapporti G: per essi si possono utilizzare maggiori velocità periferiche e avanzamenti dato il limitato scorrimento dei grani abrasivi e la limitata usura della mola. Ciò comporta ravvivature meno frequenti che si traducono a loro volta in minori tempi di rettifica e migliore controllo della qualità del pezzo.
Per queste ragioni le mole in CBN sono spesso usate per la finitura di acciai altolegati caratterizzati da bassa lavorabilità. I grani abrasivi di CBN sono notevolmente più duri dei carburi presenti nell'acciaio per cui la mola mantiene più a lungo la propria taglienza. Inoltre il CBN presenta un'elevata conduttività termica per la quale il calore viene evacuato dal pezzo e trasferito nella mola, con un'ulteriore riduzione del rischio di danneggiamenti termici dell'acciaio.
I diagrammi riportati alla fine del presente fascicolo forniscono la lavorabilità relativa degli acciai Erasteel, valutazione basata su prove di rapporto G ed esperienze pratiche. Poiché il rapporto G è un *parametro di processo*, esso dipende da numerose variabili. Tuttavia, in pratica, la classifica relativa di lavorabilità fra i vari gradi di acciaio resta in generale significativa. Pertanto i valori di lavorabilità sono riferiti a quella dell'acciaio M2. Questa classifica vale per rettifica con *abrasivi convenzionali*. In quella con superabrasivi le differenze pratiche di lavorabilità fra i vari tipi di acciaio è inferiore.

RETTIFICA DEGLI ACCIAI P/M

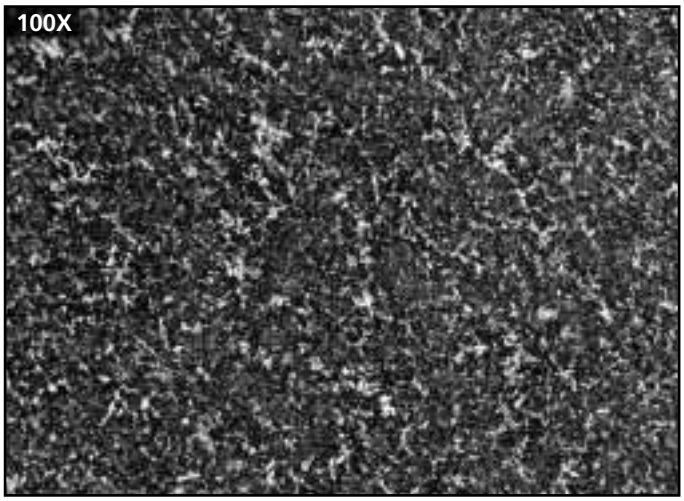
Le differenze di proprietà metallurgiche fra acciai prodotti con processo convenzionale e acciai prodotti con la metallurgia delle polveri (P/M) comporta sensibili differenze nel loro comportamento durante la rettifica.

Se prodotti con metodi convenzionali, gli acciai superrapidi contengono grosse particelle di carburi che ottundono la mola.
Questo problema è accentuato dalla segregazione, fenomeno per il quale i carburi si raccolgono in grossi gruppi durante la solidificazione.
Se prodotti con la metallurgia delle polveri (P/M), gli acciai superrapidi contengono invece una minore quantità di carburi. Durante la rettifica la mola resta quindi tagliente più a lungo e si usura di meno. Inoltre, l'elevata densità di solidificazione del metallo nel processo P/M assicura che non vi siano segregazioni e vi sia invece una più omogenea distribuzione dei carburi.

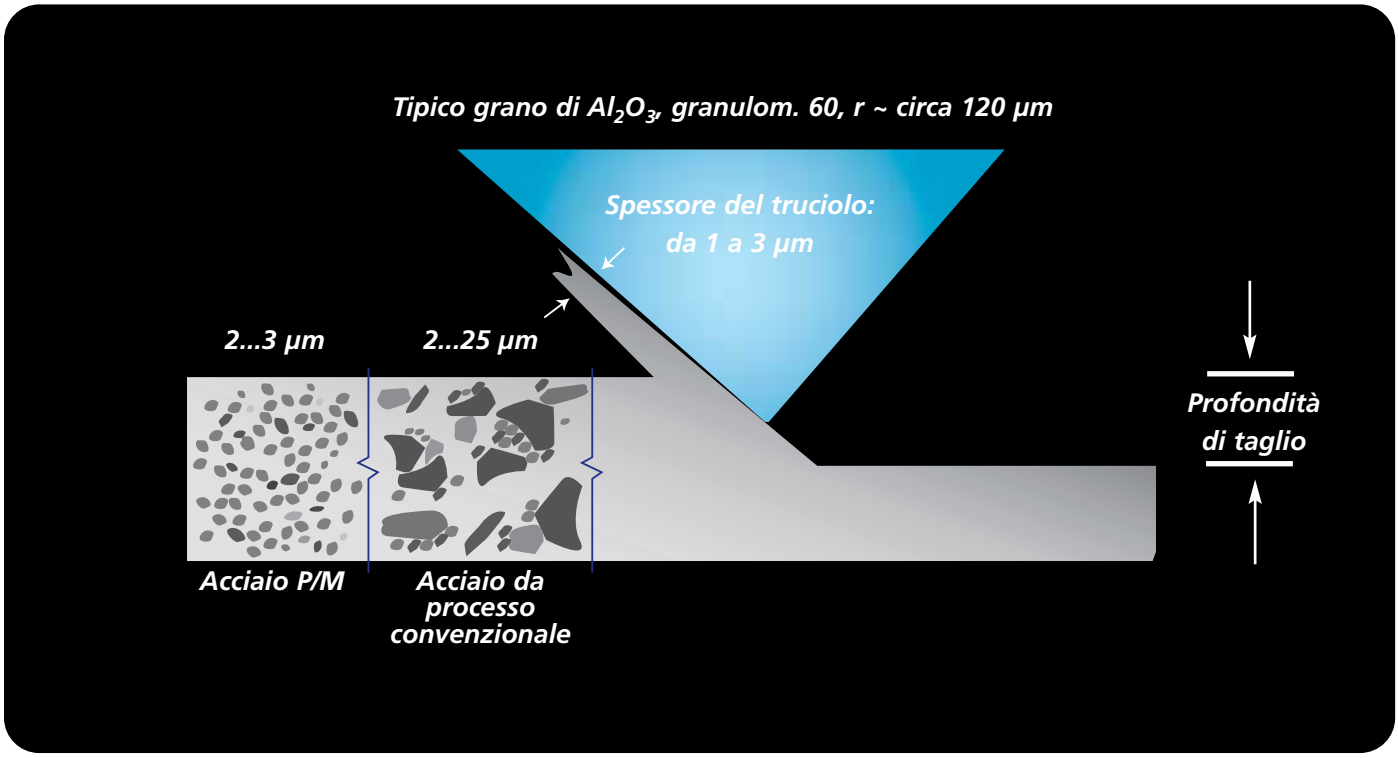
Ciò significa che, per un determinato contenuto di elementi di lega, l'acciaio superrapido prodotto col processo P/M è più facile da rettificare rispetto a un acciaio prodotto con processo convenzionale. Questo vantaggio relativo aumenta al crescere del contenuto di elementi di lega. Infine, lo stesso vantaggio è ancora più pronunciato quando si rettifica con abrasivi convenzionali rispetto ai superabrasivi.



L'acciaio superrapido prodotto con processo convenzionale presenta grossi gruppi di particelle di carburi.



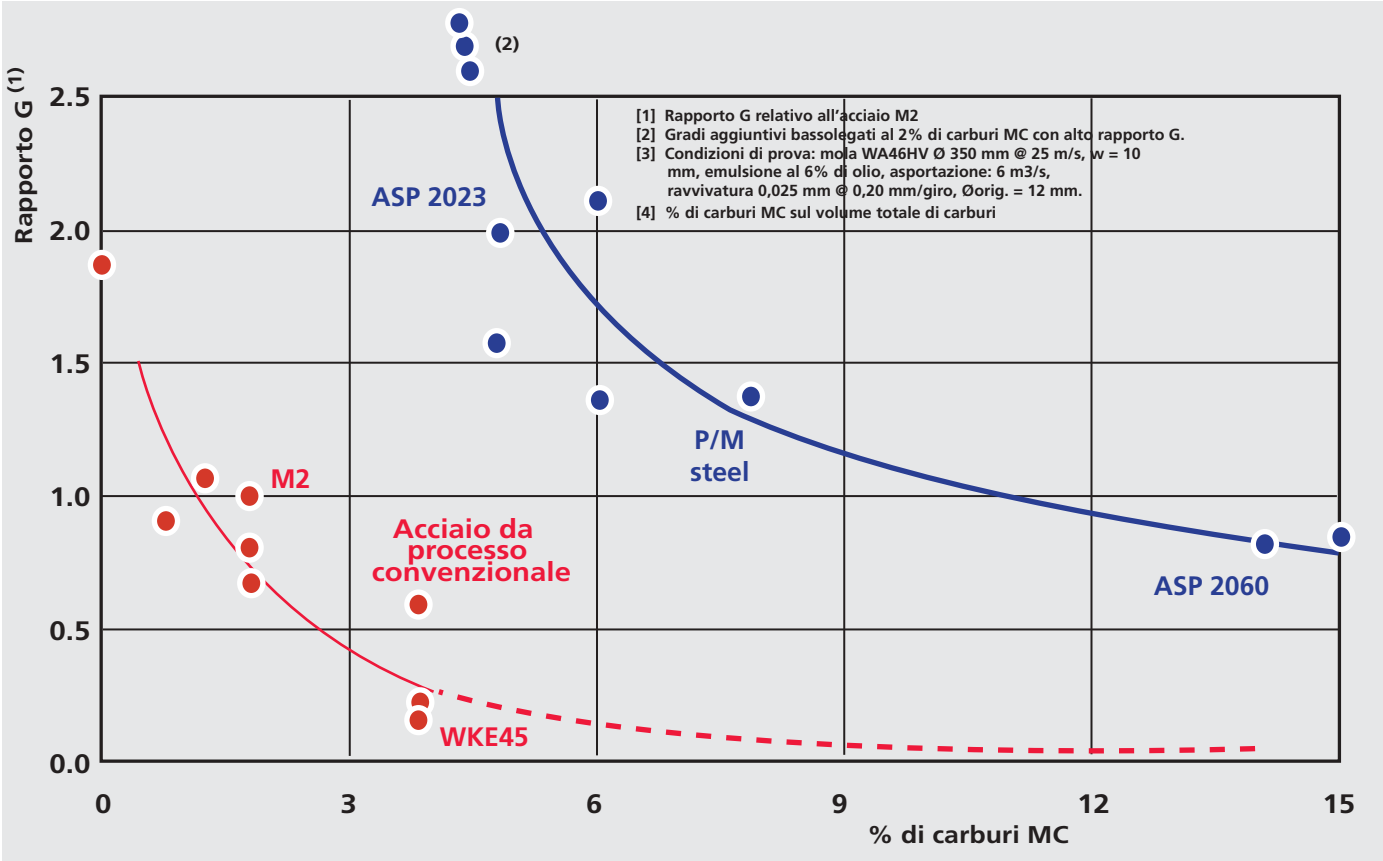
L'acciaio superrapido prodotto con processi P/M presenta invece carburi distribuiti in modo uniforme.



Grano abrasivo, carburo e dimensioni del truciolo nella rettifica di acciai P/M e di acciai convenzionali.

Con il processo P/M si possono produrre acciai con un superiore contenuto di elementi di lega, con vantaggio di resistenza all'usura (dovuta alla presenza di maggior quantità di carburi) ma senza perdite di tenacità. La lavorabilità alla mola, però, si riduce. Tuttavia, gli acciai P/M conservano pur sempre una superiore lavorabilità rispetto a quelli convenzionali, a parità di elementi di lega.

La figura qui sotto mostra l'influenza del contenuto di alliganti sul rapporto G per acciai convenzionali e acciai P/M. Per esempio, il tipo ASP 2023 è spesso utilizzato in luogo dell'acciaio M2 rispetto al quale ha un superiore contenuto di carburi, in particolare di durissimi carburi di vanadio: ciò nonostante, esso è più facile da rettificare dell'M2.



Rapporto G in funzione del contenuto di carburi duri MC (vanadio). Per un determinato contenuto di carburi, l'acciaio da P/M risulta sempre più facile da rettificare rispetto all'acciaio da processo convenzionale.

RENNHOLMEN

SCELTA DELLA MOLA

La corretta scelta della mola abrasiva per un determinato processo dipende da numerose variabili quali materiale e dimensioni del pezzo, rigidità del serraggio di quest'ultimo, velocità, avanzamenti, condizioni di ravvivatura, refrigerante utilizzato, esigenze di finitura superficiale, tolleranze, ecc.

Le mole consigliate nella Tabella che segue risultano dalle raccomandazioni di produttori di mole abrasive. Queste raccomandazioni vanno però viste solo come punto di partenza. E' necessario effettuare poi un'ottimizzazione per le singole applicazioni insieme al fabbricante della mola, per tenere conto delle particolarità del singolo caso. I fabbricanti di mole considerati nella Tabella sono Slip Naxos[1], Norton[2] e Tyrolit[3].

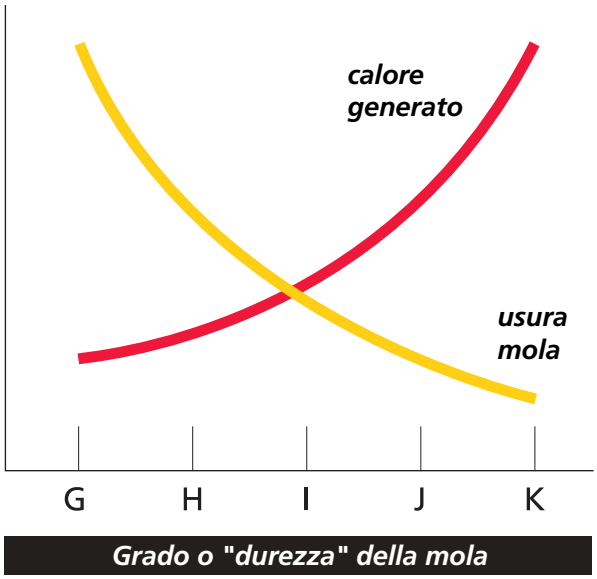
	BASSOLEGATI (M50) (ASP 2017)	MEDIOLEGATI (M2) (ASP 2030)	ALTOLEGATI (WKE 45) (ASP 2060)
Rettifica di scanalature	B91 R100 B3(1) 57A 100U B(2) M10A 802S 8 25(3)	B91 R100 B3(1) 23A 100U B(2) M10A 802S 8 B25(3)	B91 R100 B3(1) SG 100U B(2) M10A 802S 8 B25(3)
Rettifica di scarichi	B91 R100 B3(1) M10A 802S 8 25(3)	B91 R100 B3(1) M10A 802 S8 B25(3)	B91 R100 B3(1) M10A 802 S8 B25(3)
Rettifica di filettature	48A 100 G VZ(1) 430A 100 G VQP(1)* 38A 100L V(2) 86A 100L V(2) 89A 1802 J2 V112(3)	48A 100 G VZ(1) 430A 100 G VQP(1)* 32A 100L V(2) 89A 1802 J2 V112(3)	48A 100 G VZ(1) 430A 100 G VQP(1)* SG o TG 100L V(2) 89A 1802 J2 V112(3)
Rettifica su spigoli vivi	B91 R100 B6(1) 57A 100U B(2)	B91 R100 B6(1) 23A 100U B(2)	B91 R100 B6(1) SG 100U B(2)
Rettifica senza centri	53A 60 L VZ(1) 820A 60 L VQ(1)* 57A 60L V(2) 64A 60L V(2)	53A 60 L VZ(1) 820A 60 L VQ(1)* 23A 60L V(2) 53A 60L V(2)	53A 60 L VZ(1) 820A 60 L VQ(1)* SG o SGP 60L V(2)
Rettifica cilindrica	48A 54 J VZ(1) 420A 54 J VQ(1)* 99A 802 K5 V121(3)	48A 54 J VZ(1) 420A 54 J VQ(1)* 99A 802 K5 V121(3)	48A 54 J VZ(1) 420A 54 J VQ(1)* 99A 802 K5 V121(3)
Rettifica interna	48A 80 J9 VZ(1) 420A 80 J9 VZ(1)* 32A 100K V(2) 32AA 100K V(2) 51B 91C 75 B75(3)	48A 80 J9 VZ(1) 420A 80 J9 VZ(1)* SG 100K V(2) 51B 91C 75 B75(3)	48A 80 J9 VZ(1) 420A 80 J9 VZ(1)* SG o TG 100K V(2) 51B 91C 75 B75(3)
Rettifica in piano	48A 46 G VZ(1) 420A 46 G12 VQP(1)* 53A 60J V(2) 51B 126 C50 B54 VIB(3)*	48A 46 G VZ(1) 420A 46 G12 VQP(1)* 32A or 32AA 60J V(2) 51B 126 C50 B54 VIB*(3)	48A 46 G VZ(1) 420A 46 G12 VQP(1)* SG or TG 60J V(2) 51B 126 C50 B54 VIB(3)*

**** per impiego su macchine rigide.***
Per certe operazioni i fabbricanti consigliano più di un tipo di mola

(1) SlipNaxos
(2) Norton
(3) Tyrolit

ELIMINAZIONE DI INCONVENIENTI

La rettifica è un processo molto complesso e caratterizzato da numerose variabili interdipendenti. La tabella qui sotto serve come guida per la soluzione di problemi che si incontrano frequentemente in questa lavorazione. La tabella fornisce l'inconveniente rilevato, la sua possibile causa e il relativo rimedio insieme a commenti e citazioni di possibili effetti collaterali che il tecnico deve tenere presenti. Infatti vi sono spesso più cause per un particolare inconveniente e quindi varie possibili soluzioni.



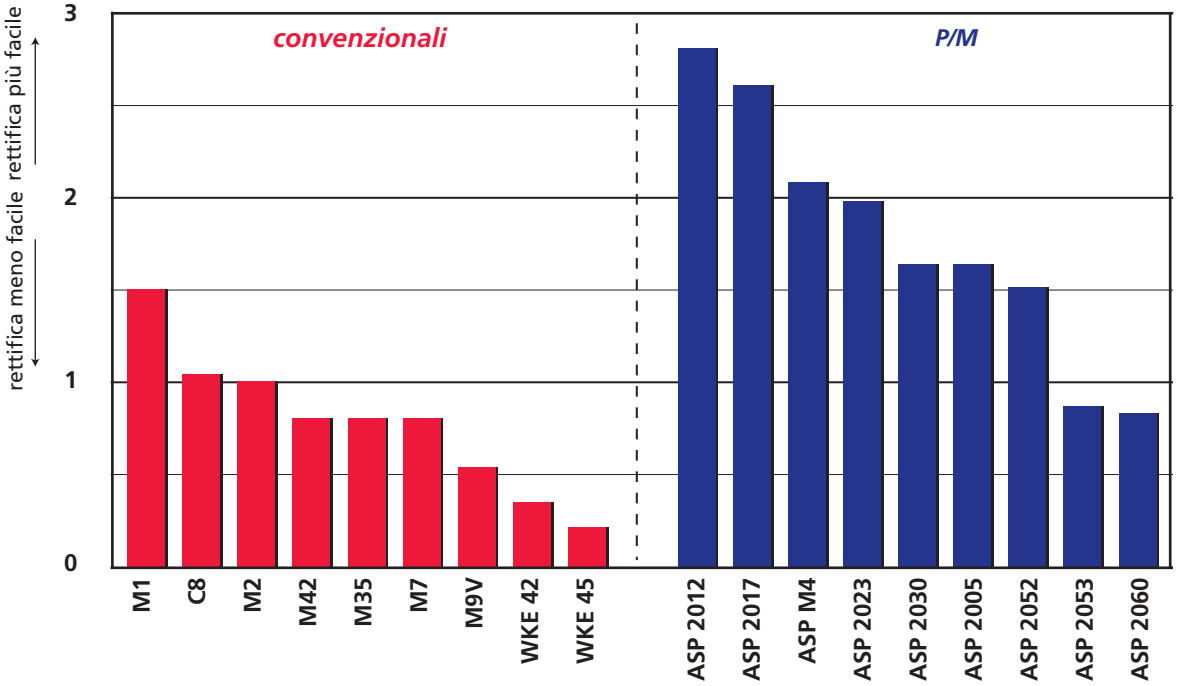
La corretta scelta nella rettifica comporta spesso un compromesso fra più parametri. Per esempio, le mole di grado duro tendono a mantenere più a lungo la forma ma danno un accentuato rischio di bruciature da surriscaldamento.

Inconveniente	Possibile causa	Rimedio	Commenti, possibili effetti collaterali
Tracce di vibrazioni sul pezzo, vibrazioni sulla macchina	Cuscinetti usurati	Sostituire i cuscinetti	
	Scarsa rigidità della macchina	Passare a cuscinetti più rigidi, usare attrezzature più rigide, usare un portautensile più rigido	
	Mola squilibrata	Bilanciare la mola	
	Mola eccentrica	Ravvivare la mola	La mola può avere raggiunto la fase di "collasso" (pag. 9).
	Mola troppo dura	Utilizzare una mola meno dura	Rischio: peggiore finitura superficiale, perdita di forma
		Passare a un abrasivo meno friabile	Esempi: seeded-gel, allumina bianca. Rischio: minore finitura superfciale, perdita di forma
		Aumentare l'asportazione specifica (in particolare la velocità periferica del pezzo)	Aumentare lo spessore del truciolo per creare una autoravvivatura della mola. Rischio: surriscaldamento, minore finitura superficiale, perdita di forma, maggiori forze conseguenti alla maggiore asportazione di materiale.
	Eccessiva asportazione di materiale	Ridurre l'asportazione	Minori velocità e avanzamenti (rettifica più "delicata" per ridurre le forze in gioco. Rischio: perdita di taglienza della mola
	Superficie mola troppo liscia	Passare a una ravvivatura più "aperta", ruotare o cambiare il diamante.	Rischio: finitura superficiale, perdita di forma
		Passare a un abrasivo di maggiore granulometria.	Rischio: finitura superficiale, perdita di taglienza della mola (grani più grossi possono rendere la mola più "dura").

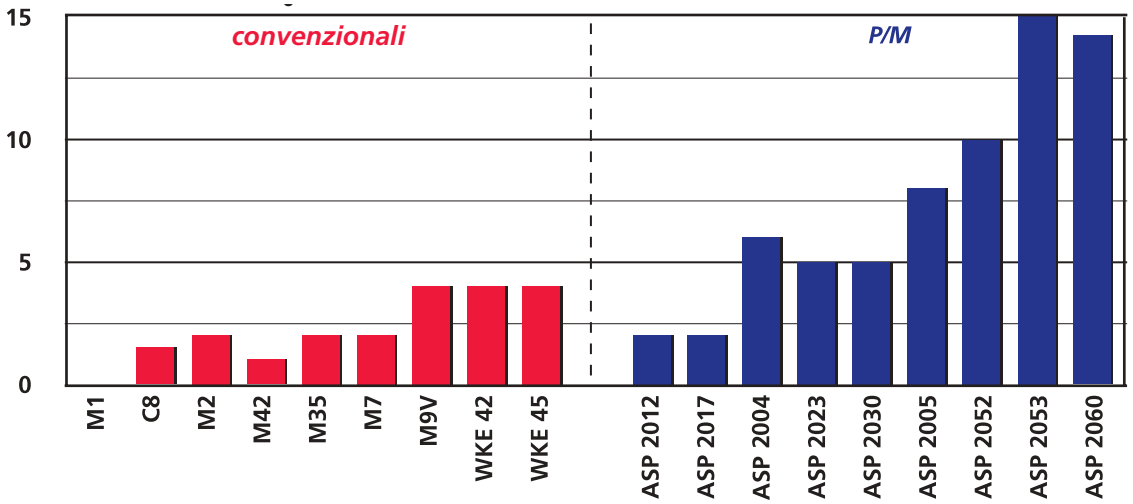
Inconveniente	Possibile causa	Rimedio	Commenti, possibili effetti collaterali
Bruciature, alterazioni termiche, rotture da stress	Eccessiva asportazione di materiale	Ridurre l'asportazione specifica (pag. 21)	Ridurre velocità periferiche e avanzamenti (rettifica più "delicata"). Rischio: perdita di taglienza della mola.
	Mola con superficie troppo liscia	Attuare una ravvivatura più "aperta", ruotare o sostituire il diamante (pag. 20)	Rischio: minore finitura superficiale
		Passare a un abrasivo di granulometria superiore	Rischio: minore finitura superficiale, minimo raggio di forma
	Mola troppo "dura"	Passare a una mola meno dura	Rischio: minore finitura superficiale, perdita di forma
		Passare a un abrasivo meno friabile	Esempi: seeded-gel, allumina bianca Rischio: minore finitura superficiale, perdita di forma
		Aumentare l'asportazione specifica (in particolare la velocità periferica del pezzo (pag. 21)	Aumentare lo spessore del truciolo per indurre autoravvivatura della mola, in particolare con abrasivi friabili e seeded-gel. Rischio: alterazioni termiche da eccessiva asportazione, minore finitura superficiale, perdita di forma
	Insufficiente raffreddamento	Aumentare la pressione di erogazione del fluido	Vedere il paragrafo sui fluidi di taglio (pag. 18)
		Migliorare la posizione dell'ugello	Dirigere il getto di refrigerante sull'arco di contatto e nella zona hot-spot
		Ridurre la sezione dell'ugello	Ugelli di ampia sezione determinano caduta di pressione nel circuito e minori velocità del liquido all'uscita
	Refrigerante troppo caldo	Controllare il sistema di raffreddamento	
Tracce di bruciature su superfici non rettificate	Bruciature ossidanti	Migliorare il raffreddamento, dirigere un ugello supplementare sulla zona con colore alterato	Scopo: raffreddare direttamente la superficie ossidata e ridurre il contatto con l'ossigeno. Rischio: l'ugello supplementare può ridurre la portata disponibile per l'arco di contatto principale
Insufficiente finitura superficiale	Ravvivatura grossolana	Eseguire una ravvivatura più fine	Rischio: surriscaldamenti, alterazioni termiche,vibrazioni
		Passare a una mola di minore granulometria	Rischio: alterazioni termiche, vibrazioni, perdite di forma
	Mola troppo "morbida"	Passare a una mola più dura	Rischio: alterazioni termiche, vibrazioni
		Passare a un abrasivo più tenace	Rischio: alterazioni termiche conseguenti a insufficiente autoravvivatura dell'abrasivo non friabile
	Eccessivo spessore del truciolo	Ridurre lo spessore del truciolo	Ridurre lo spessore del truciolo diminuendo profondità di passata o velocità periferia del pezzo oppure aumentando la velocità della mola. Rischio: alterazioni termiche da insufficiente autoravvivatura della mola, in particolare con abrasivi friabili e seeded-gel; maggiore assorbimento di energia. Vedere il Capitolo sullo spessore del truciolo (pag. 21).
Perdita di forma	Mola troppo morbida	Passare a una mola più dura	Rischio: alterazioni termiche, vibrazioni
		Passare a una granulometria superiore	Un abrasivo di maggiore granulometria rende la mola più dura e riduce l'usura della stessa
		Passare a un abrasivo più tenace	Rischio: alterazioni termiche da insufficiente autoravvivatura dell'abrasivo non friabile
		Ridurre lo spessore del truciolo	Rischio: i trucioli piccoli riducono l'autoravvivatura della mola, in particolare con abrasivi friabili e abrasivi seeded-gel (pag. 21)
	Granulometria eccessiva dell mola per la forma voluta	Passare a una granulometria inferiore e a una mola più dura	L'abrasivo più fine può dare un raggio di forma inferiore. Rischio: surriscaldamento

Rettificare su acciaio P/M è come navigare in un mare di cubetti di ghiaccio - il contrario che in un mare di iceberg.

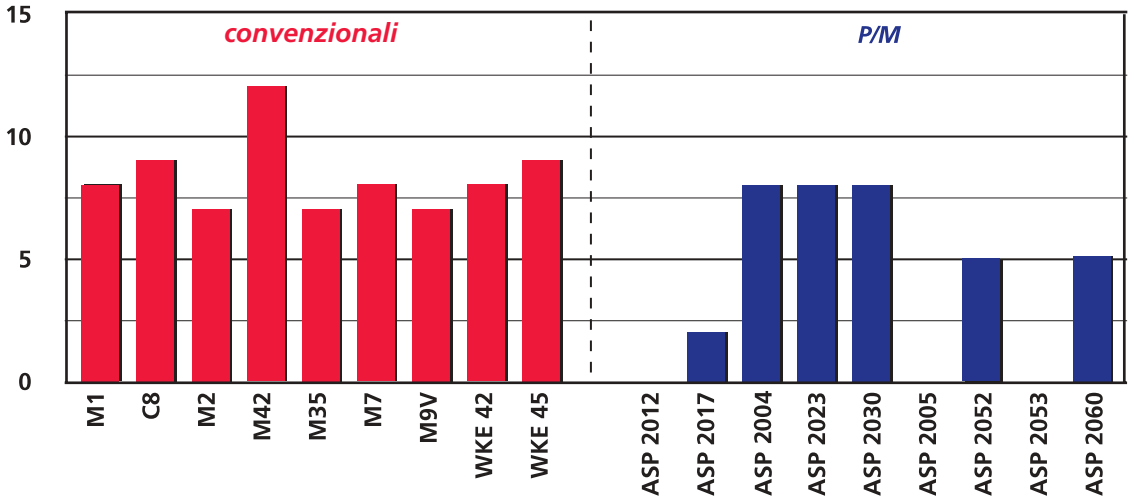
LAVORABILITA' DI ACCIAI ERASTEEL DI VARI GRADI



% DI CARBURI MC a 2.800 HV



% DI CARBURI M_6C a 1.600 HV



Classifica della lavorabilità alla mola con abrasivi convenzionali, basata su prove di rapporto G ed esperienze pratiche. Nel caso di rettifica con superabrasivi le differenze fra i vari gradi di acciaio sono in genere meno marcate.

ASP ® è un marchio registrato **ERASTEEL**