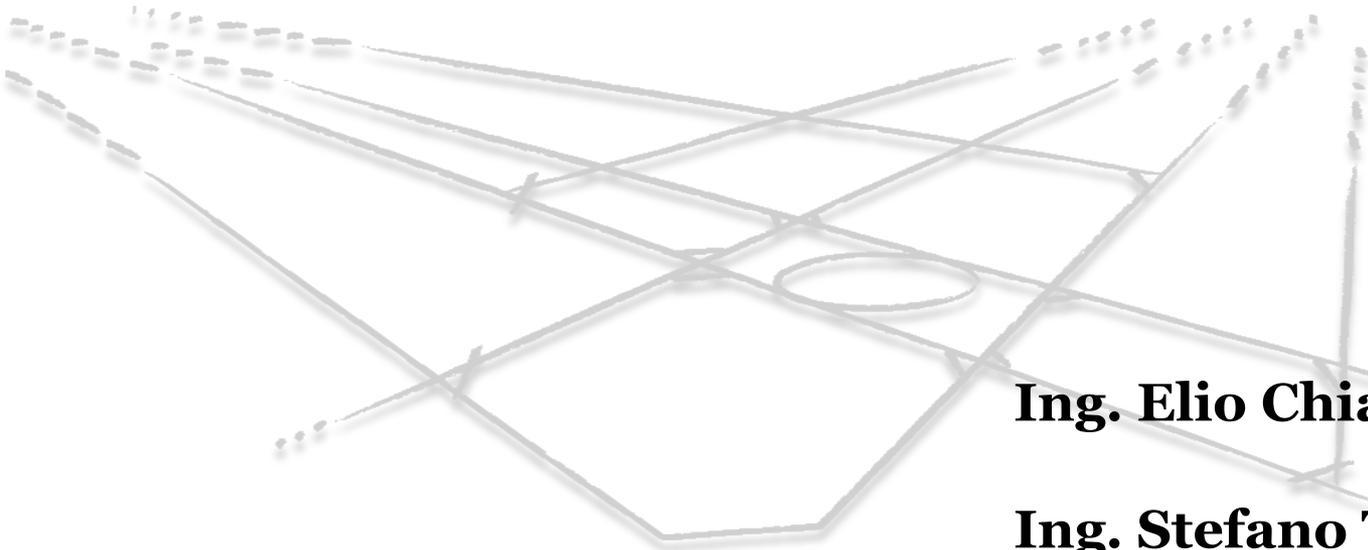


Criogenia nelle lavorazioni per asportazione

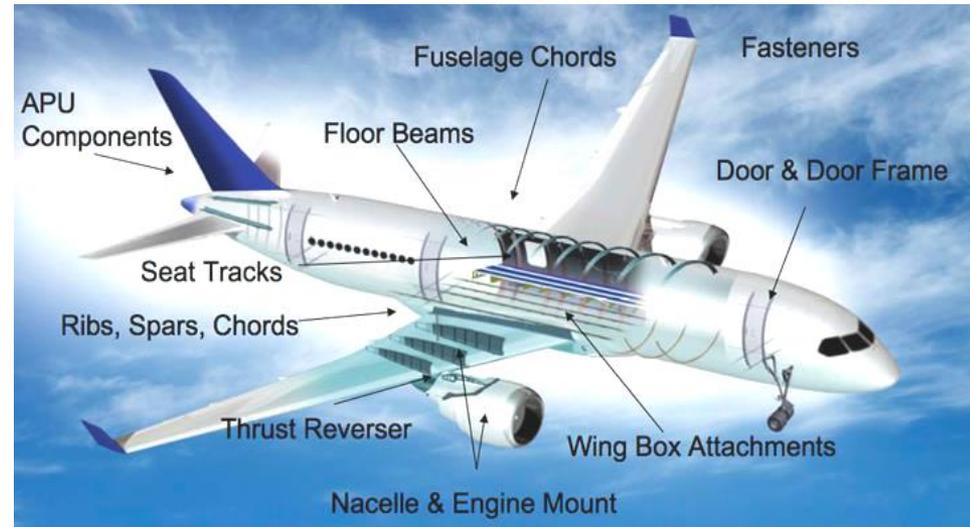


Ing. Elio Chiappini

Ing. Stefano Tirelli

La lega Ti6Al4V: proprietà

- Al, in peso, compreso tra 5,5 e 6,75%
- V tra 3,5 e 4,5%

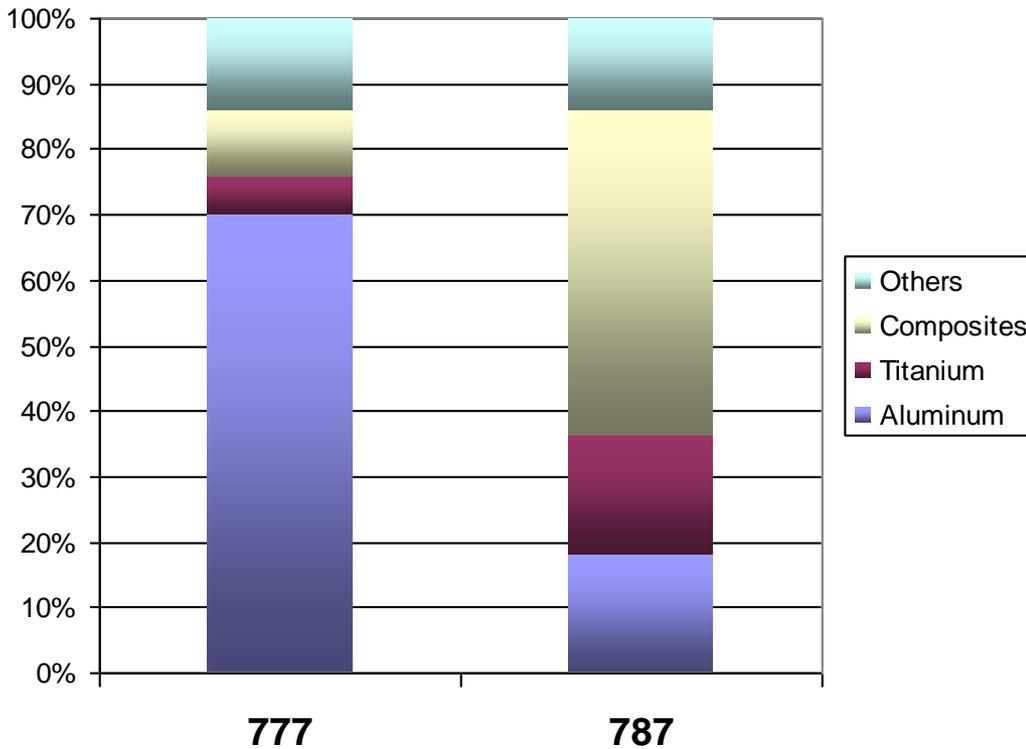


Proprietà ingegneristiche:

- resistenza a trazione fino a **1200 MPa**
- basso valore di **densità** (circa **metà di quella dell'acciaio**) ma alta resistenza specifica di 288 kN·m/kg (254 kN·m/kg per l'acciaio)
- elevata flessibilità: modulo di **elasticità pari a circa il 50%** dell'acciaio (10,3 GPa)
- **biocompatibilità**, duttilità, alta **resistenza a fatica**

Scenario di riferimento

Material mix



Example 787 - Machining:

Raw Material: 90.728 kg

Fly Away: 11.340 kg

→ buy to fly BTF of 8:1

- L'industria aerospaziale ne impiega oltre l'80% della produzione
- il resto è dell'industria biomedica (protesi)

Scenario di riferimento

Nelle lavorazioni per asportazione del settore aeronautico si lavora quasi sempre «**dal pieno**», con elevato Buy-To-Fly



L'interesse maggiore è quindi per la **sgrossatura**, inoltre per un lavoro sperimentale è più semplice partire dalla **tornitura**, ma la lavorazione di principale interesse è, in prospettiva, la **fresatura**



Non sono di particolare interesse la qualità o integrità superficiale, né le tensioni residue o distorsioni



Importante è la **produttività**

	Sgrossatura	Finitura
V_t	40-70 [m/min]	80-100 [m/min]
a	0,2- 0,4 [mm/giro]	0,1-0,2 [mm/giro]
p	1,5-2 [mm]	0,25 [mm]

Principali problematiche di lavorazione

Bassa conducibilità termica



Difficile evacuazione del calore durante il taglio che si concentra su tagliente e petto dell'inserto



Necessità di metodi efficaci, avanzati di refrigerazione



Elevata reattività chimica



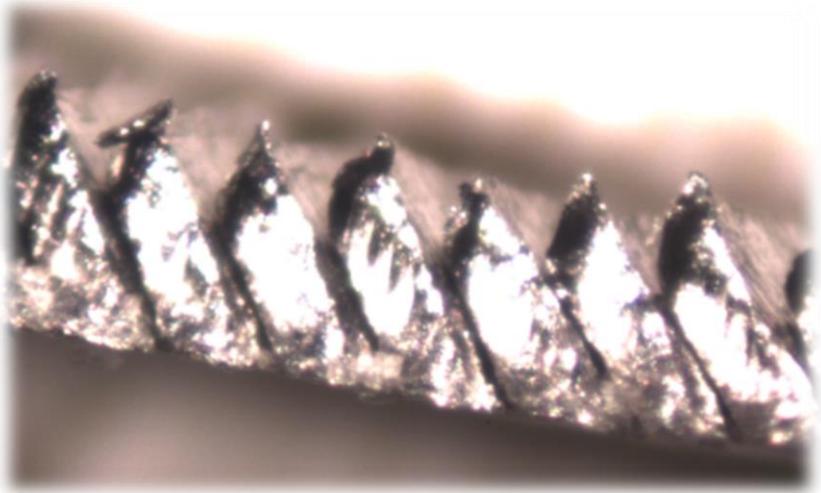
Fenomeni di adesione e craterizzazione dell'inserto

←
Uso di inserti in materiale composito (wBN-cBN)

←
Evitare inserti a granulometria molto fine

←
Metodi avanzati di refrigerazione

Principali problematiche di lavorazione



Instabilità termoplastica (ASB)

↓
Forma ciclica segmentata del truciolo che genera fluttuazioni delle forze di taglio e vibrazioni

↓
Rischio di rapida usura dell'inserto

Ridotta lunghezza di contatto truciolo-inserto

→ **Alti sforzi e temperature concentrati su una piccola area**

← **Raggio di onatura molto ridotto: minimizza forze di taglio e usura del fianco**

↓ **Geometria tonda inserti**

MRR e vita utensile

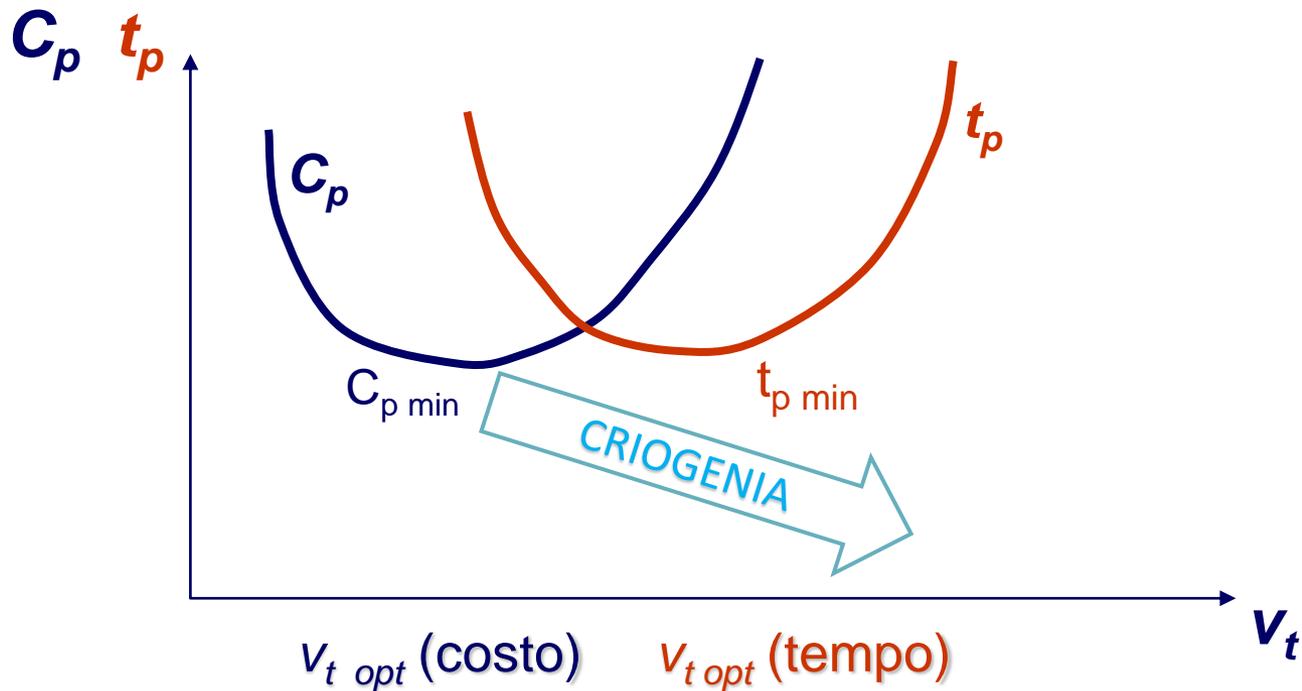
Alta produttività →

Elevati parametri di taglio



- Elevata temperature all'interfaccia petto-truciolo
- Elevati stress
- Vibrazioni

← **Rapida usura degli utensili**



L'azoto liquido

- Inerte,
- Presente in grande quantità nell'aria
- Non tossico
- Non infiammabile

La sua temperatura di ebollizione è di circa
-196°C

Estrema capacità di asportare il calore però
una volta a contatto con l'aria evapora e
non è più recuperabile

Non presenta pericoli per l'ambiente né le
persone, tuttavia bisogna evitare il contatto
con la pelle (ustioni da freddo) ed evitare
di utilizzarlo in ambienti piccoli e chiusi
(rischio asfissia)



La criogenia e le lavorazioni per asportazione di truciolo

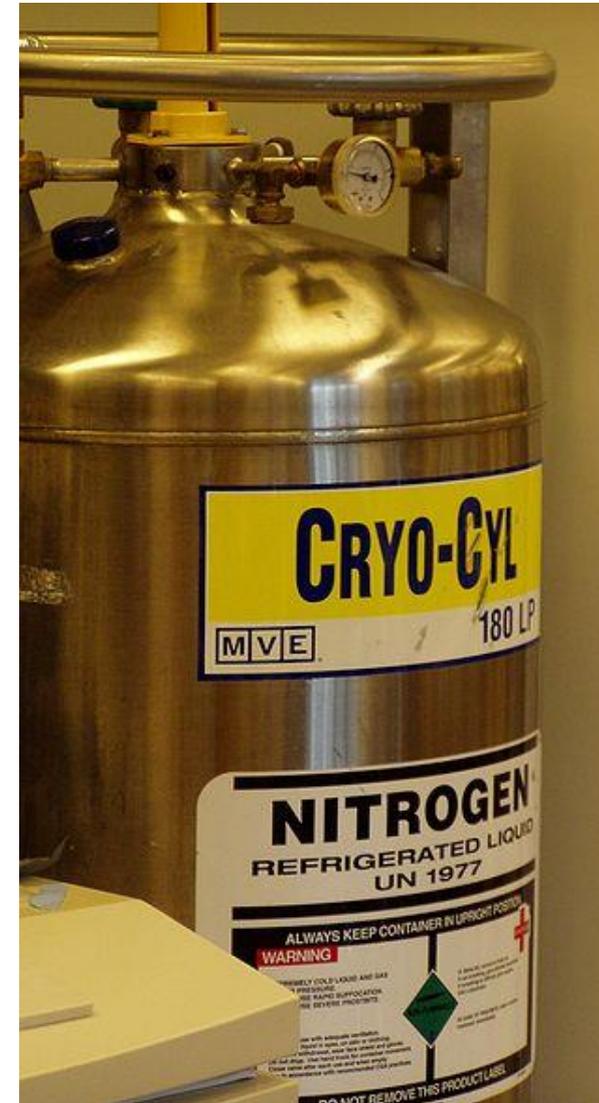
Le tecnologie criogeniche prevedono l'utilizzo di azoto liquido (LN₂) e vengono impiegate laddove sia necessaria una fortissima azione di raffreddamento. Ad esempio sono impiegate nell'industria alimentare, nell'industria biomedica ecc.



A livello di tecnologia meccanica l'utilizzo di tecniche criogeniche è ancora in fase sperimentale e nel caso dell'asportazione di truciolo esistono due applicazioni principali

**Trattamento
criogenico di inserti in
HSS e WC**

**Raffreddamento
criogenico delle
operazioni di taglio**



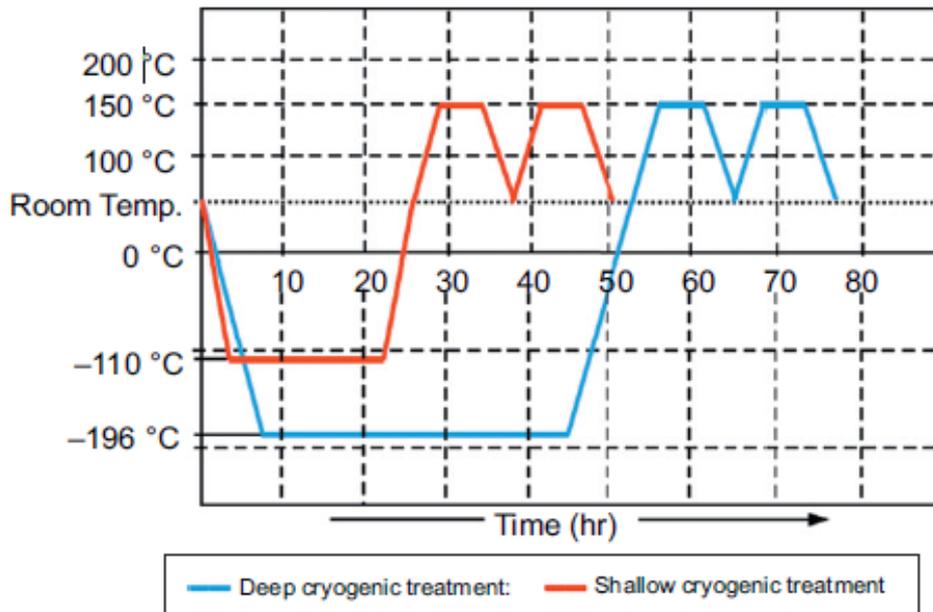
Il trattamento criogenico degli inserti

Raffreddamento dell'inserto sino a:

- -80°C (shallow cryogenic treatment)
- -196°C (deep cryogenic treatment)

**Aumento di resistenza
all'usura**

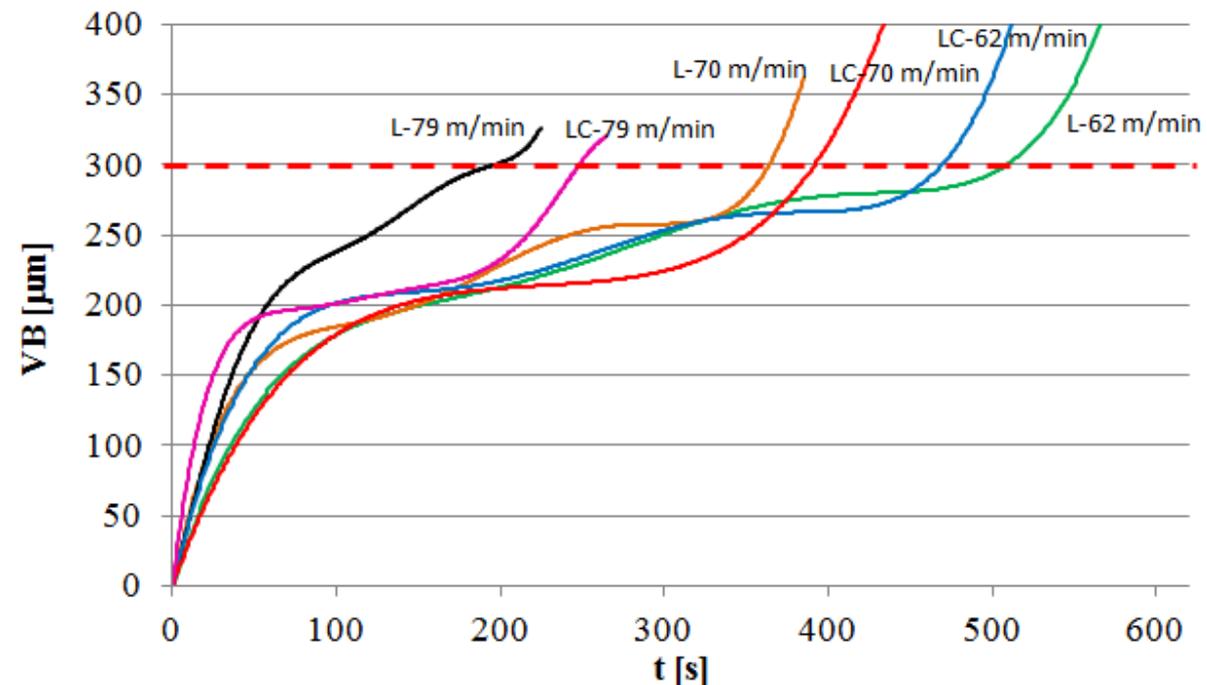
DCT (Deep Cryogenic Treatment)



1. Lento raffreddamento (tra $0,5$ e $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$) da temperatura ambiente fino a quella dell'azoto liquido.
2. Quando il materiale raggiunge all'incirca i -193°C viene sommerso ("soaking") dall'azoto liquido generalmente per 24 ore.
3. Il riscaldamento è generalmente più lento del raffreddamento, con un tempo variabile tra le 40 e le 72 ore.

Utensili criogenici, i nostri test

Nome	Materiale e rivestimento	Durezza [HV]
INSERTO L	WC con coating 'Hyperlox' in TiAlN (4 μm)	2037,0
INSERTO LC	WC con coating 'Hyperlox' in TiAlN (4 μm) e trattamento DCT	2258,7



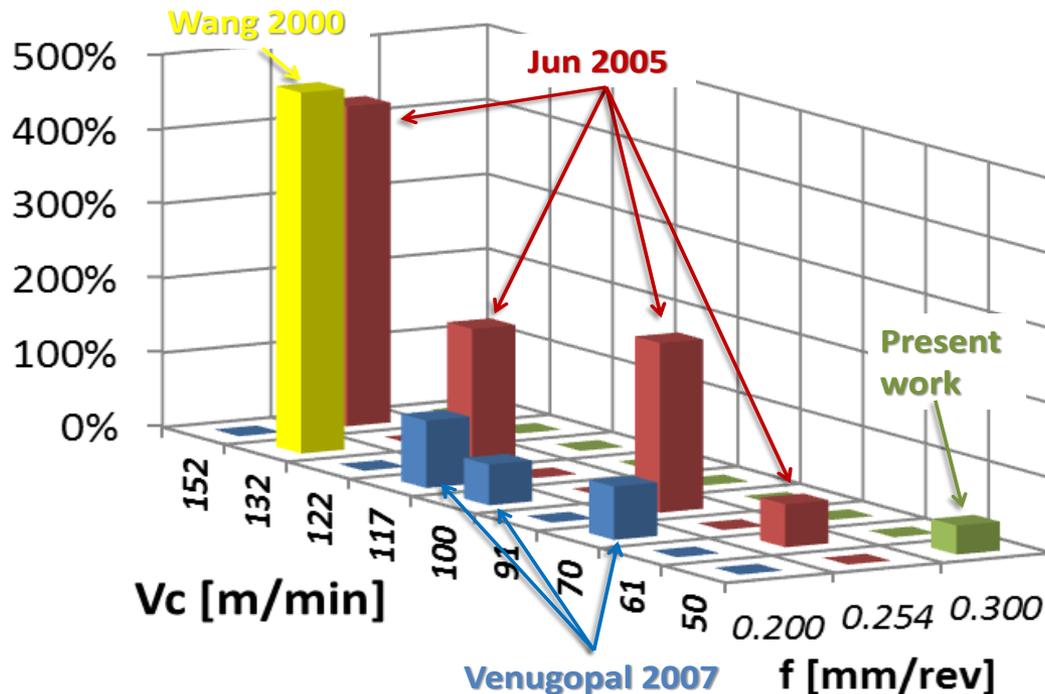
- Il DCT genera un sensibile indurimento superficiale
- L'inserto trattato criogenicamente offre una durata superiore alle alte velocità di taglio rispetto al non trattato

La lavorazione criogenica in letteratura

In letteratura il tema della lavorazione criogenica è ampiamente trattato

Il principio comune consiste nella sostituzione della tradizionale emulsione lubrorefrigerante con un getto di azoto liquido estremamente freddo (-196°C) indirizzato verso la zona di taglio

La soluzione di adduzione migliore è rappresentata da un doppio getto di azoto liquido indirizzato bidirezionalmente su petto e fianco dell'utensile



La maggior parte dei lavori sperimentali sul raffreddamento criogenico si concentra sugli **alti valori di v_t** , e **basse profondità di passata** quindi sui problemi di **finitura**

Il raffreddamento criogenico del taglio

Vantaggi assicurati:

- Riduzione delle temperature di lavorazione
- Eliminazione degli oli da taglio e relativi costi di smaltimento e filtraggio
- Produzione di truciolo pulito ed asciutto
- Maggiore salubrità dell'ambiente di lavoro

La letteratura scientifica non propone test significativi di confronto tra lavorazioni tradizionali e criogenica in sgrossatura



Si vuole colmare questo gap

Risultati contrastanti tra le pubblicazioni:

- Riduzione o aumento forze di taglio
- Riduzione o aumento del coefficiente di attrito

Presunti vantaggi, da verificare:

- Miglioramento prestazionale degli utensili a livello di vita utile
- Possibilità di migliorare il Material Removal Rate per le operazioni di sgrossatura

Setup sperimentale

L'operazione di revamping è stata effettuata su un tornio SOMAB UNIMAB 400 da 11 kw presso il laboratorio MUSP di Piacenza

- Prelievo del fluido da un dewar da 240 litri posto accanto al tornio
- Trasporto del fluido attraverso una tubazione isolata termicamente
- Adduzione localizzata nella zona di taglio utilizzando un portautensile forato per lubrificazione minimale (MQL)



Setup sperimentale

Inserto

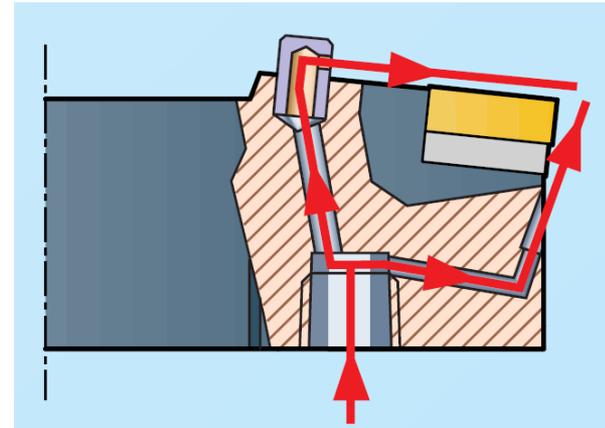
SANDVIK CNMG 12-04-08 SMR
1115 WC con coating in TiAlN (2 μm)
+ AlCrO (1 μm)

Angoli caratteristici di inserti + portainserito

- Angolo di registrazione χ : 95°
- Angolo di spoglia frontale γ : -6°
- Angolo di spoglia dorsale α : 5°
- Angolo di inclinazione del tagliente principale λ : -6°

Materiale in lavorazione

- Lega Ti6Al4V (ricotto a 700°C)
- Barre con diametro iniziale di 60 mm e lunghezza di circa 500 mm provenienti da stessa colata

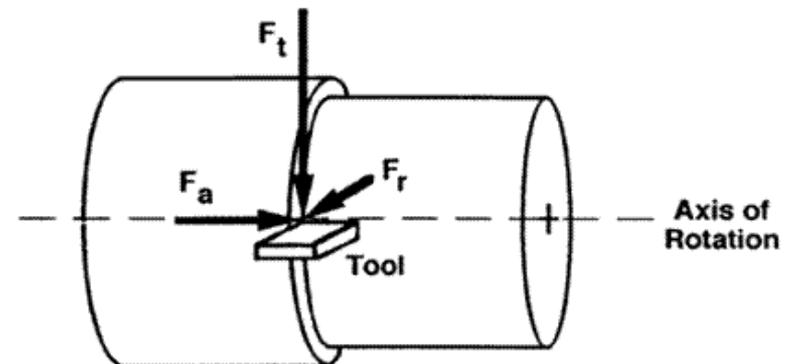
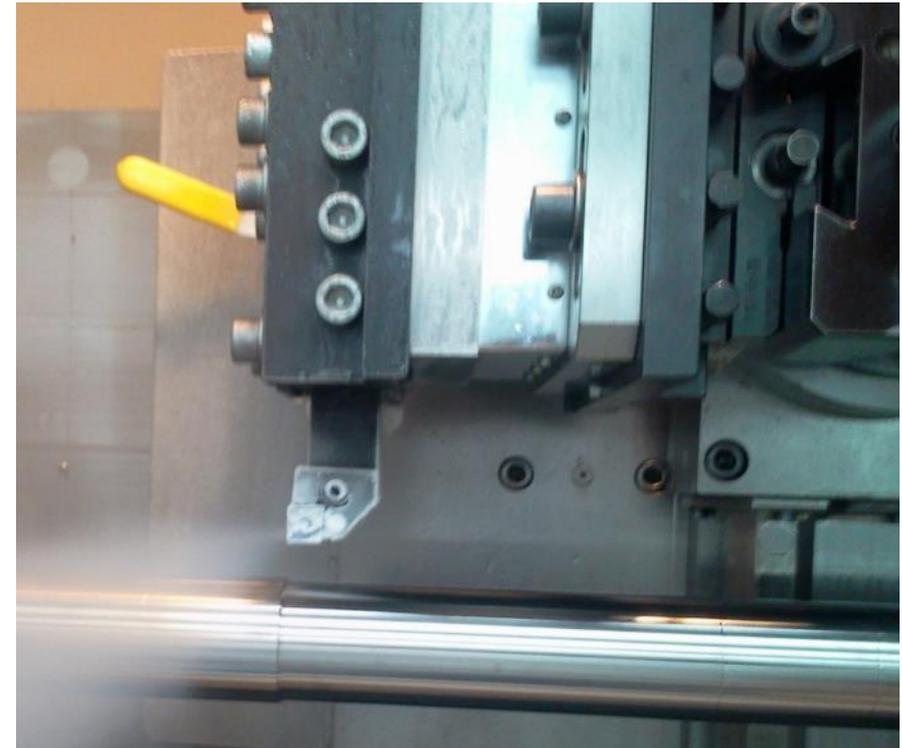
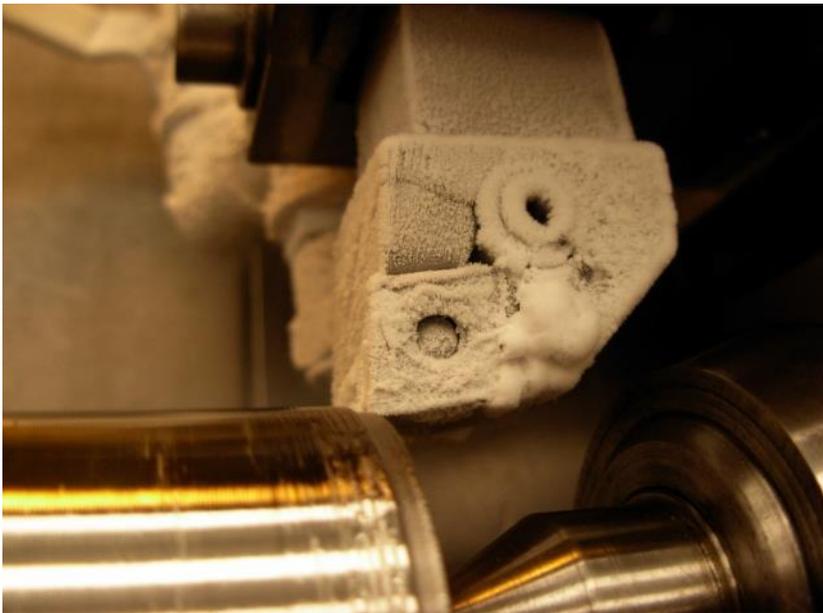


Doppio ugello di adduzione dell'azoto liquido su petto e fianco dell'utensile.

Setup sperimentale

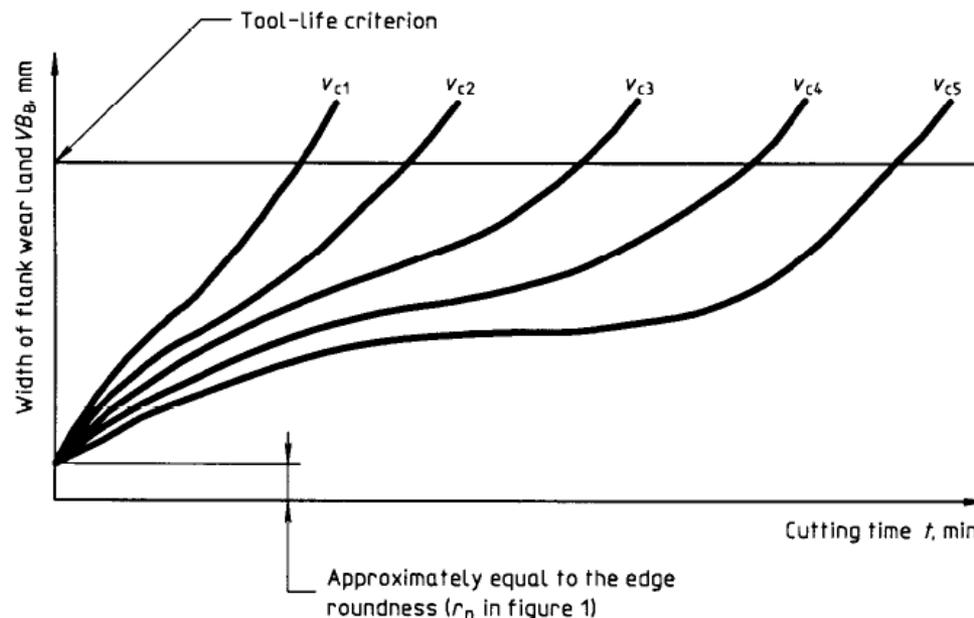
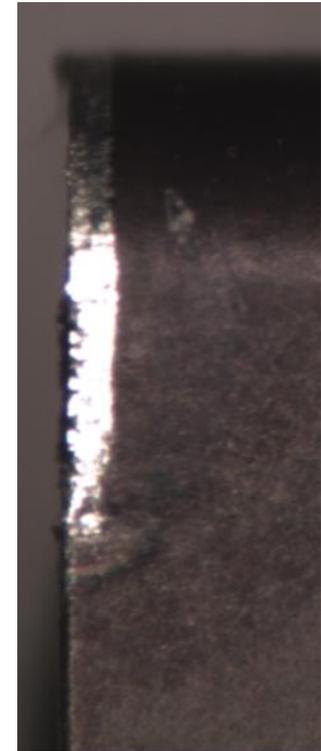
Grandezze acquisite:

- Forza di taglio
- Forza di avanzamento
- Forza di repulsione
- Livello medio del fianco di usura
- Rugosità
- Raccolta di campioni di truciolo per successive analisi



Normative usura utensile

- L'usura si può manifestare come flank wear, craterizzazione petto, frattura del naso o del tagliente
- Nel nostro caso (Ti6Al4V) prevale il meccanismo di usura del fianco. L'usura degli inserti segue una caratteristica curva ad 'S'
- La normativa 'ISO 3685' definisce come istante di fine vita utile il momento in cui l'usura media del fianco raggiunge gli 0.3 mm



Taylor's law

$$V_c \cdot T^n = C$$

Piano sperimentale

**Elevato rapporto 'buy to fly'
per i componenti in titanio
Valori compresi tra 5:1 e 20:1**



**Parametri del piano
sperimentale tipici
della sgrossatura**

Piano fattoriale 2x2

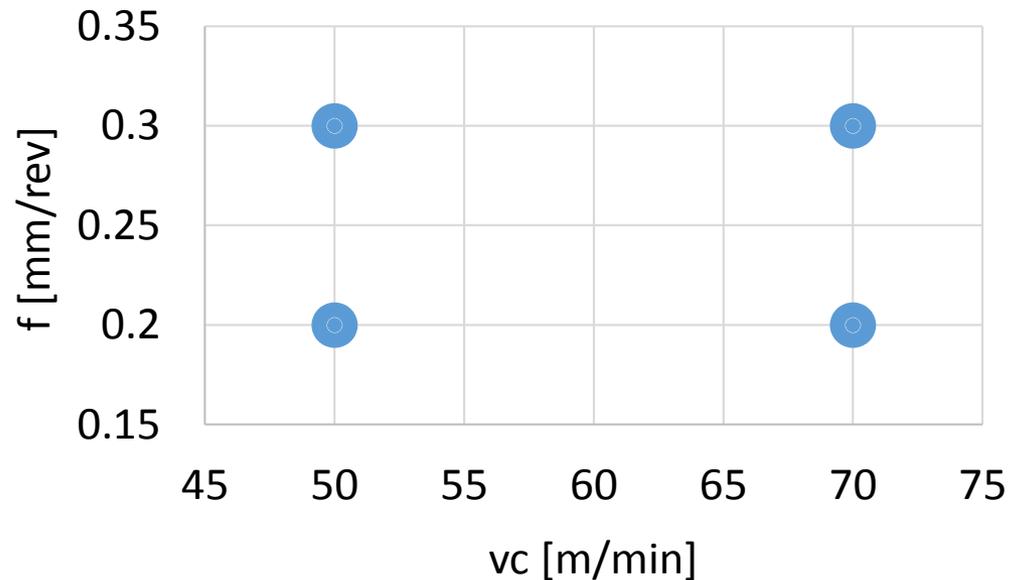
Confronto tra:

- Lubrorefrigerante tradizionale (emulsione acqua-olio al 5% con portata 2 l/min)
- Azoto liquido (LN₂)

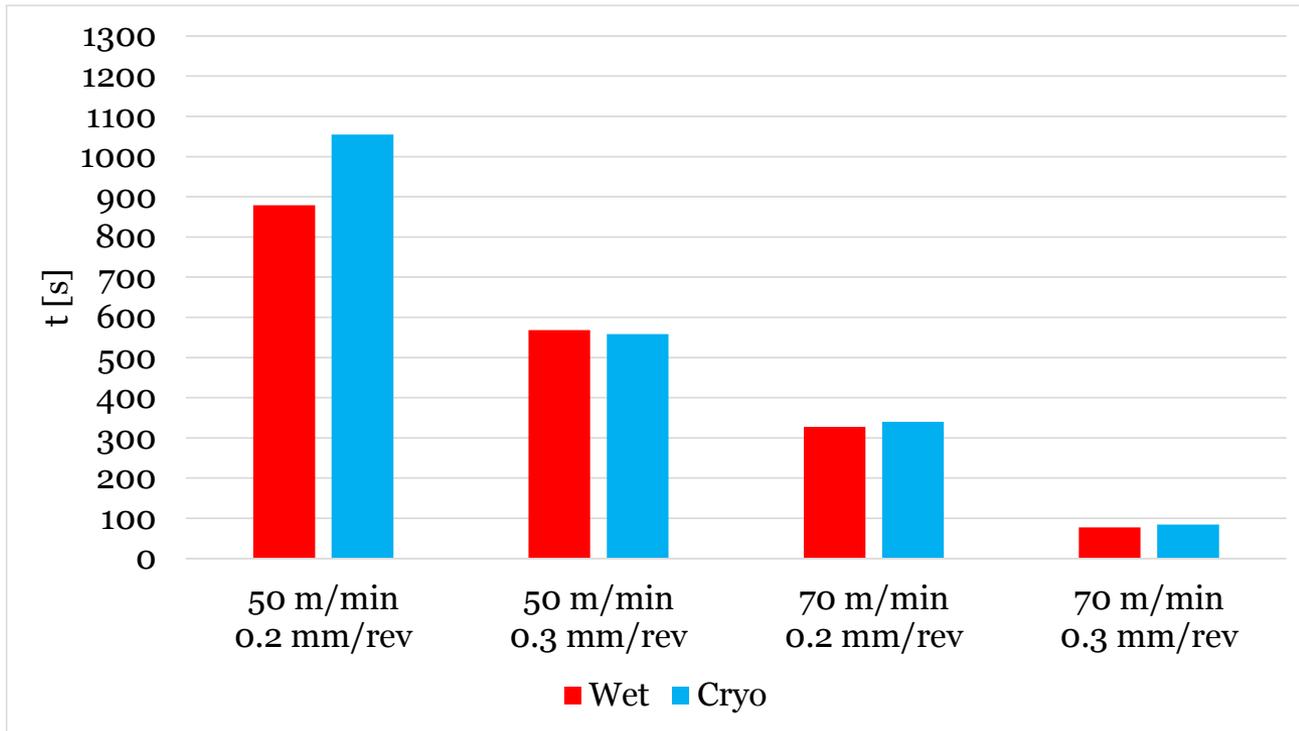
Profondità di passata fissata a 2 mm

3 repliche per ogni condizione sperimentale

24 prove sperimentali in totale



Risultati



Pareggio o a miglioramento della vita utile nelle operazioni di sgrossatura senza addurre olio

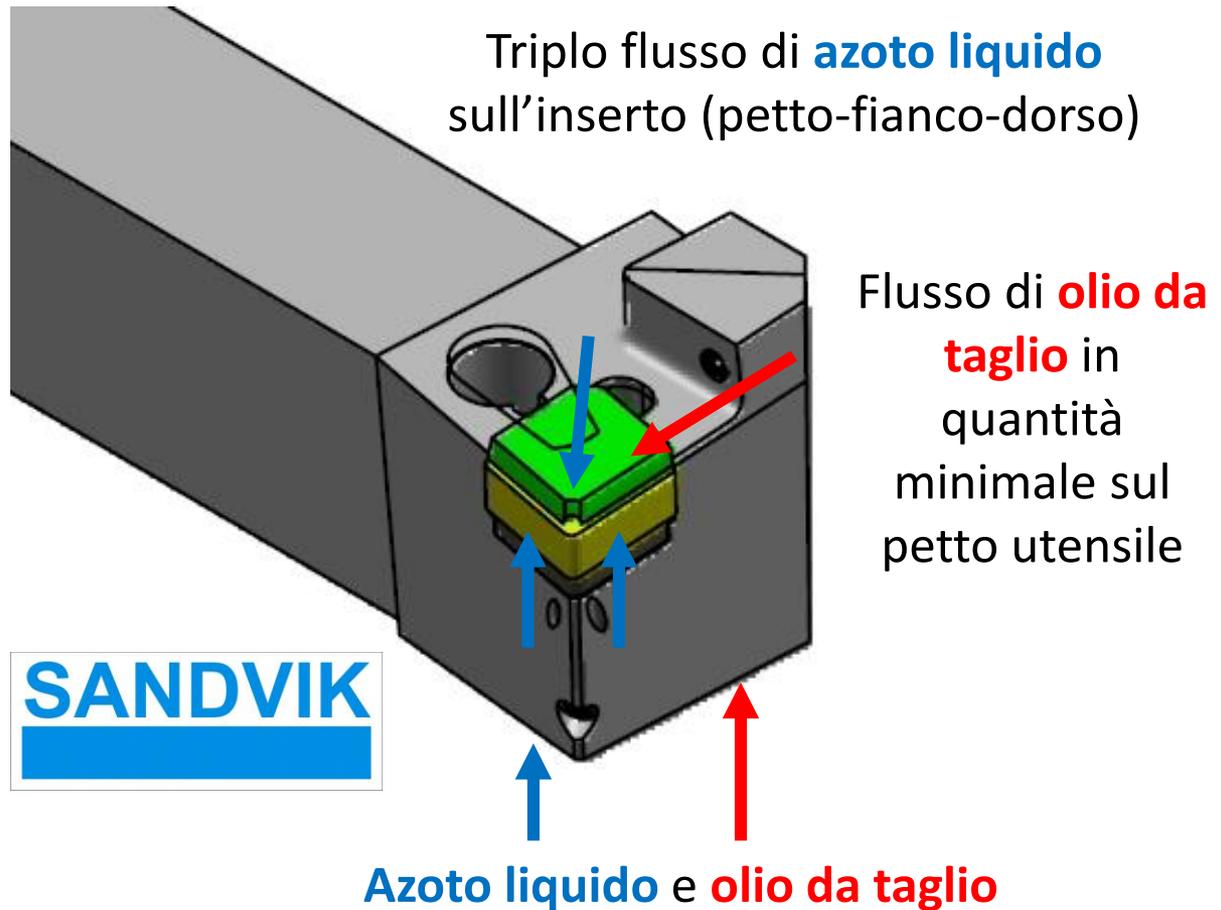
Ad elevato avanzamento e velocità di taglio il flusso di azoto incontra più difficoltà a penetrare nella zona di taglio: l'idea è di avvicinare l'ugello di adduzione il più possibile

Portautensile speciale

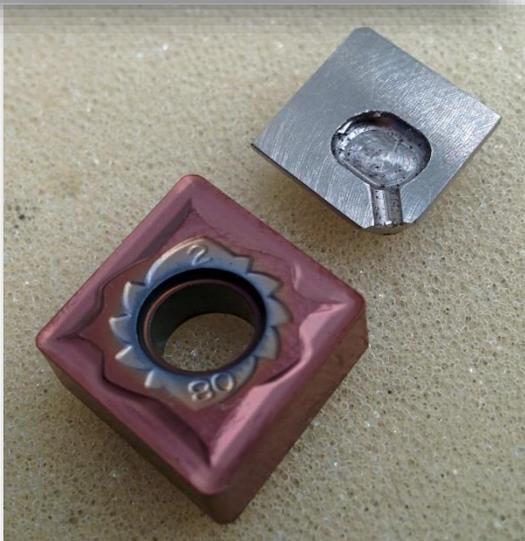
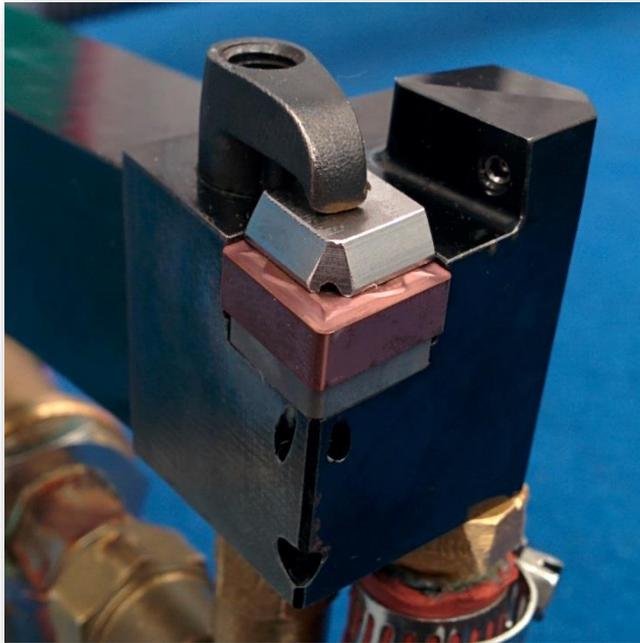
È stata avviata una collaborazione con la sede Sandvik di Piacenza per progettare e realizzare un portautensile speciale per la tornitura criogenica

Triplo flusso di azoto liquido
+
Olio da taglio in quantità minimale

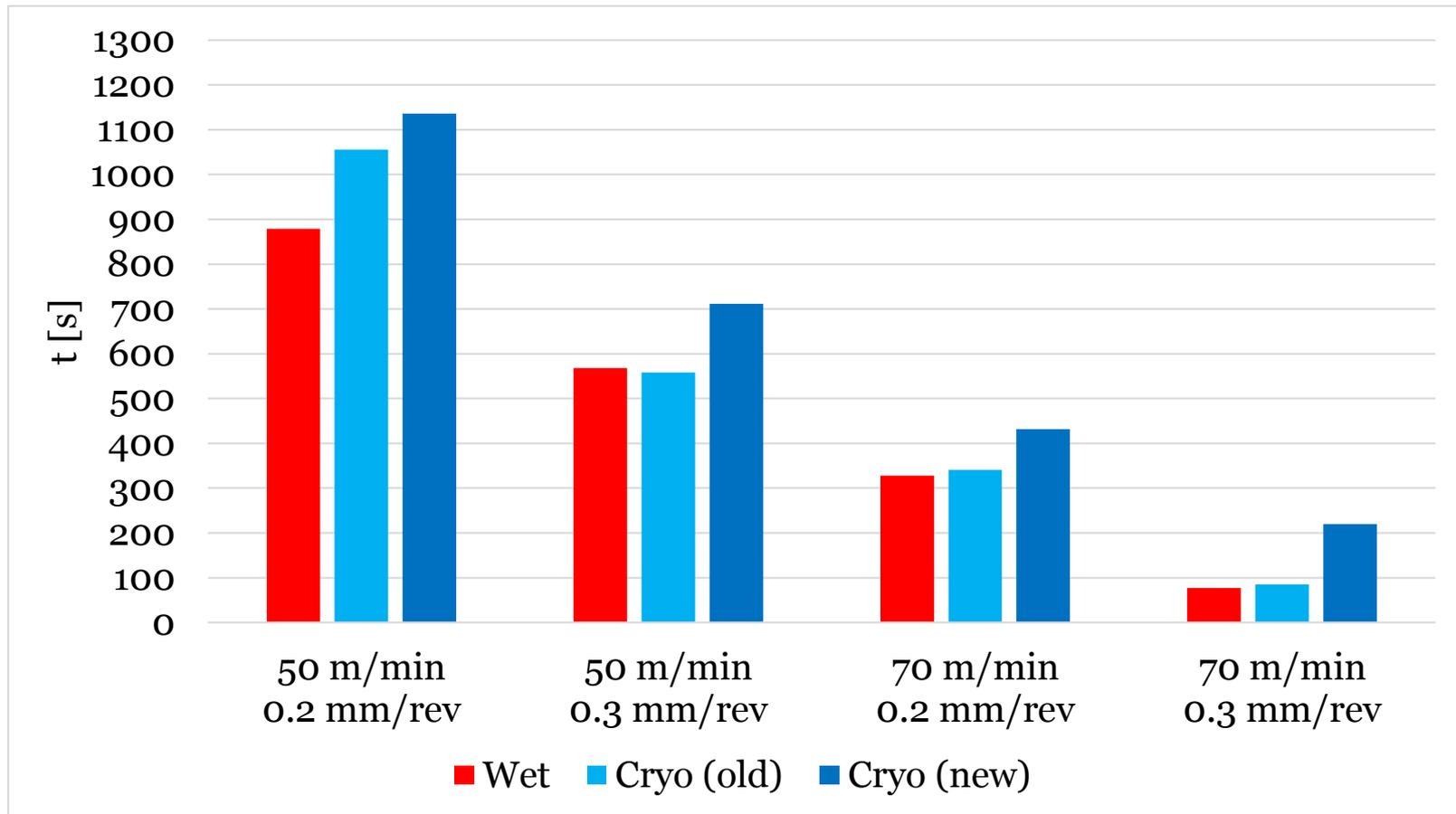
Gli ugelli sono posizionati molto vicini al tagliente per avere condizioni di raffreddamento e lubrificazione ottimali



Portautensile speciale



Risultati preliminari nuovo portautensile



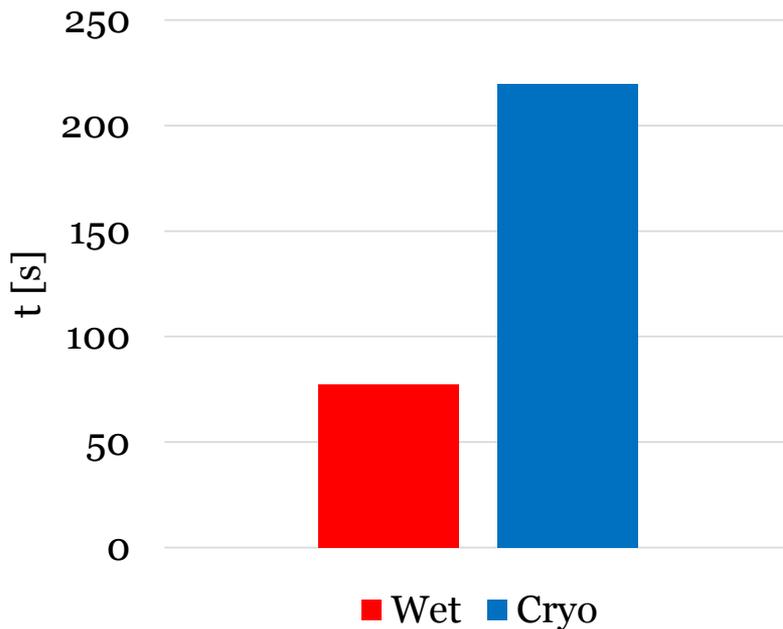
Il nuovo portautensile permette un miglioramento della vita utile dell'inserto alle condizioni di taglio più gravose (alta velocità di taglio o avanzamento)

Stima di costo, elevata produttività

Da una stima preliminare la portata di azoto risulta di circa 1.7 litri/min con l'attuale sistema di adduzione, da cui un costo orario di circa **20 euro/h**

Si consideri un costo per tagliente di 2.5 €

$vc=70$ m/min - $f=0.3$ mm/rev



Se si ipotizza di lavorare al massimo della produttività (70 m/min e 0.3 mm/rev) si utilizzano:

- 46 taglienti/ora con il lubrificante tradizionale
- 16 taglienti/ora con il sistema criogenico

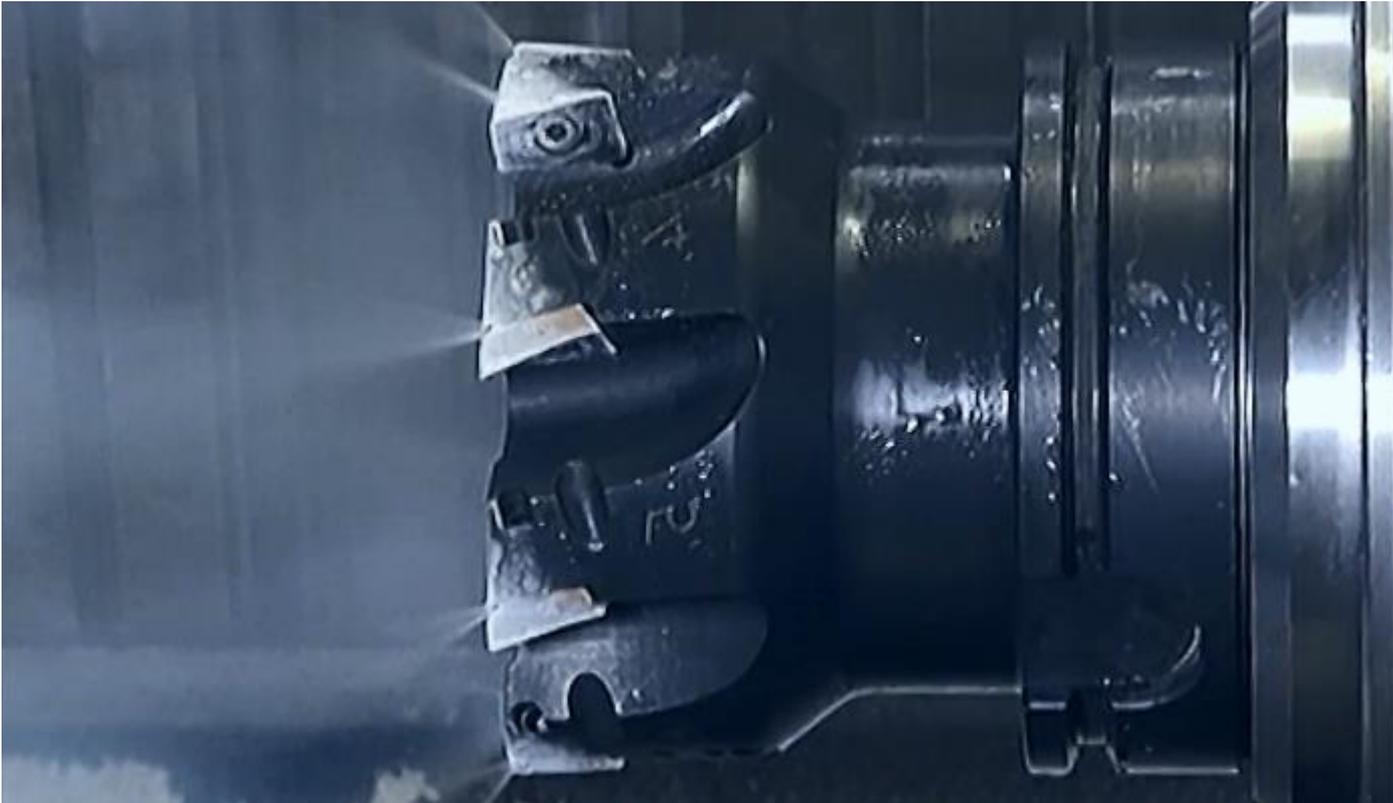
Per cui il costo orario degli utensili risulta:

- $2.5 \times 46 = 115$ €/h con lubro
 - $2.5 \times 16 = 40$ €/h con cryo
- } 55 €/h di risparmio

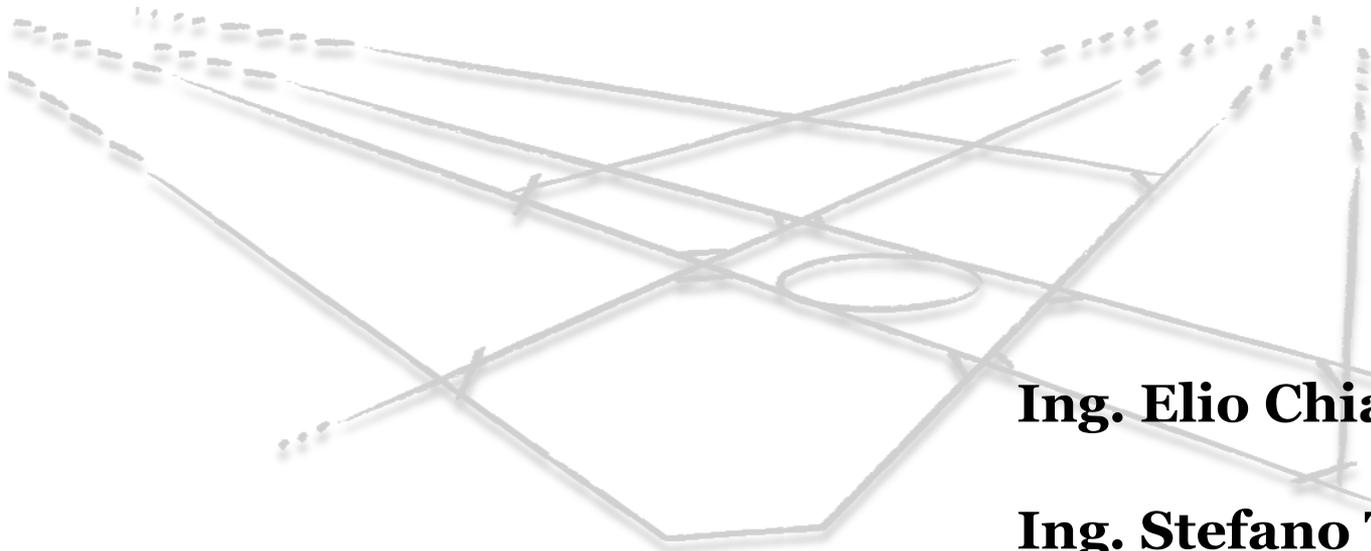
SOLO VALUTANDO I COSTI ORARI DELL'UTENSILE

Sviluppi futuri della ricerca

- Valutazione dell'efficacia di un getto di olio in quantità minimale da addurre contemporaneamente al flusso di azoto liquido
- Studio e implementazione del sistema di adduzione dell'azoto in lavorazioni di fresatura
- Studio di nuovi coating / trattamenti per gli inserti su misura per criogenia



Simulazione ad elementi finiti di processi per asportazione di truciolo



Ing. Elio Chiappini

Ing. Stefano Tirelli

Simulazione FEM dei processi di taglio

Simulazione termo-meccanica del processo di taglio

Permette di:

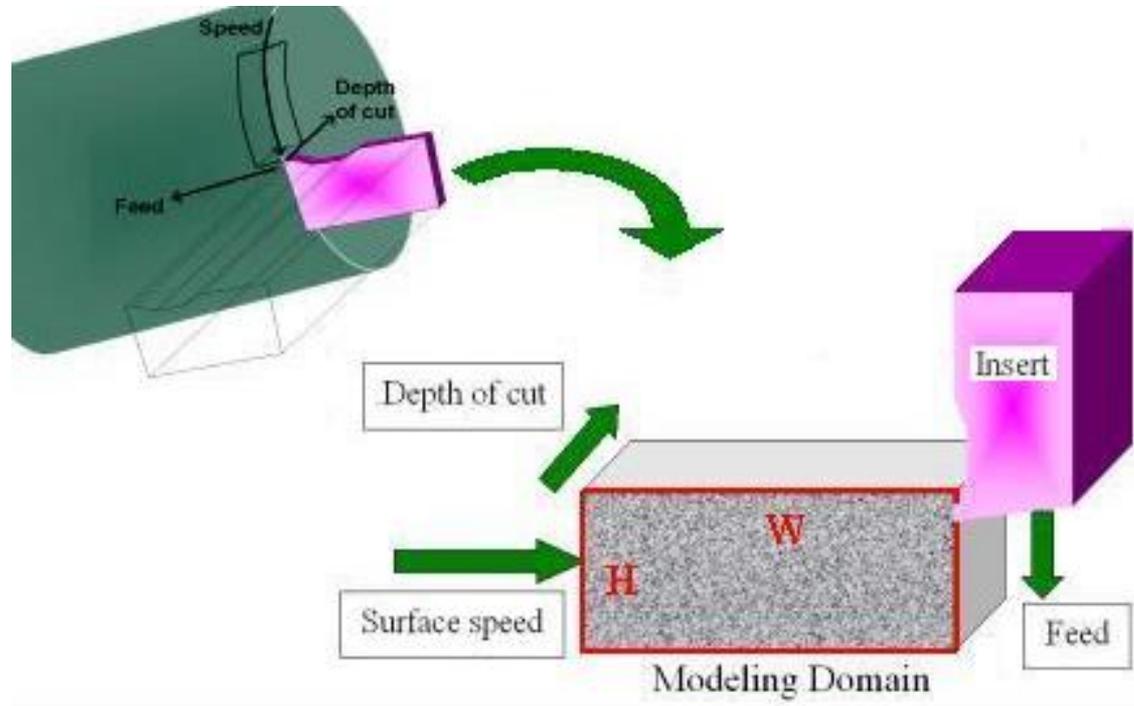
- Osservare aspetti fenomenologici impossibili da analizzare sperimentalmente (es. meccanismi legati alla SSSV^[1])
- Analizzare variabili di processo difficilmente misurabili (es. temperatura all'interfaccia petto-truciolo)

- Ridurre i costi della sperimentazione, legati sia alla realizzazione di prototipi che al taglio di materiali costosi (ad esempio leghe di titanio)
- Ottimizzare la geometria dell'utensile

- Possibilità di realizzare simulazioni termo-meccaniche o solo termiche

[1] E. Chiappini, S. Tirelli, P. Albertelli, M. Strano, M. Monno
On the mechanics of chip formation in Ti-6Al-4V turning with spindle speed variation
International Journal of Machine Tools and Manufacture 77 (2014) 16-26

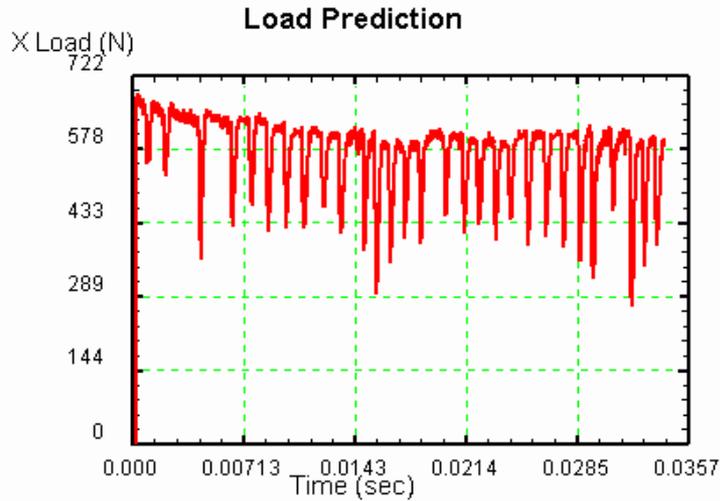
Simulazione del processo di taglio ortogonale



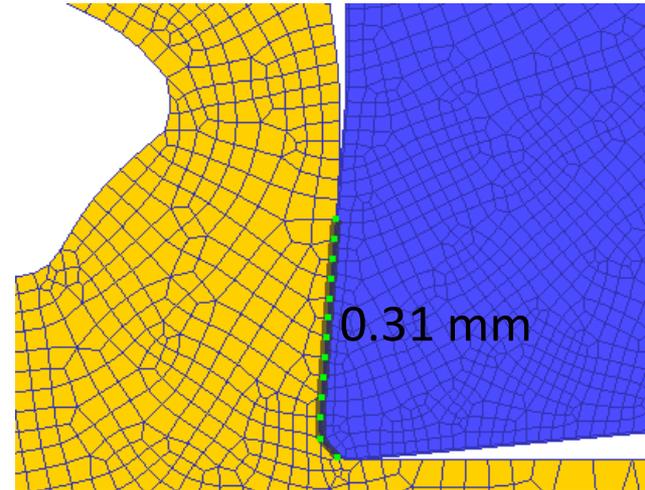
- accuratezza e flessibilità nell'analisi del problema
- tempo di calcolo notevolmente inferiore rispetto al 3D
- buona approssimazione nel caso in cui la deformazione possa essere considerata piana, nel caso specifico della tornitura questa ipotesi è giustificata se la profondità di passata è molto più grande del raggio di punta e dell'avanzamento

Esempi di output ottenibili

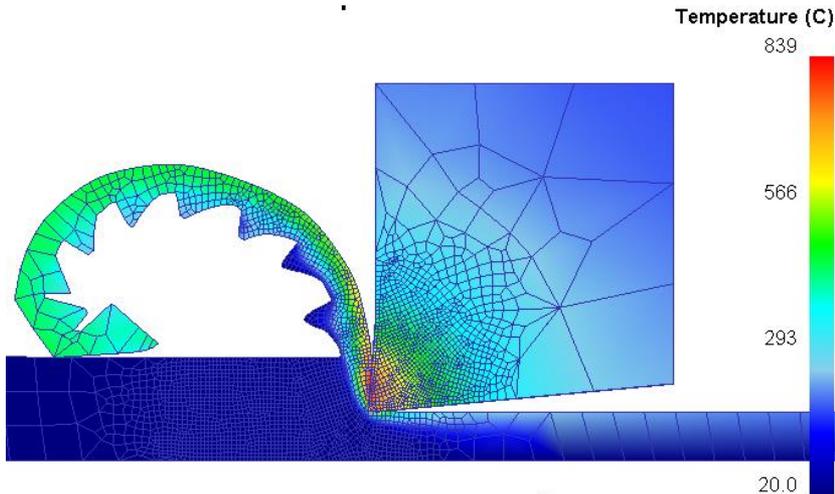
Forze di taglio e di avanzamento



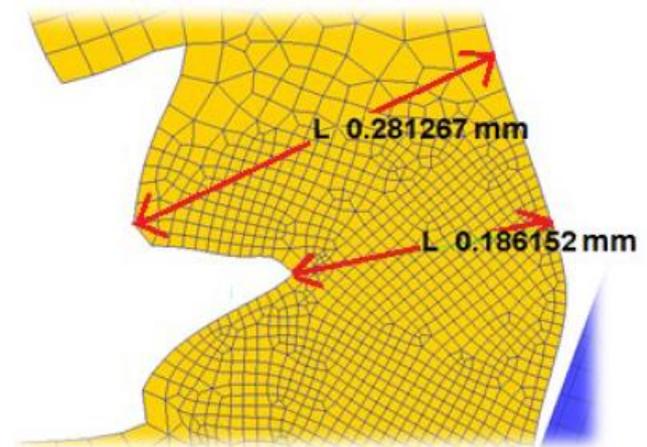
Lunghezza di contatto



Andamento della T nell'inserto



Morfologia del truciolo



Parametri fondamentali del modello

Il modello ad elementi finiti richiede la definizione di diversi parametri relativi al materiale e all'interazione pezzo-utensile

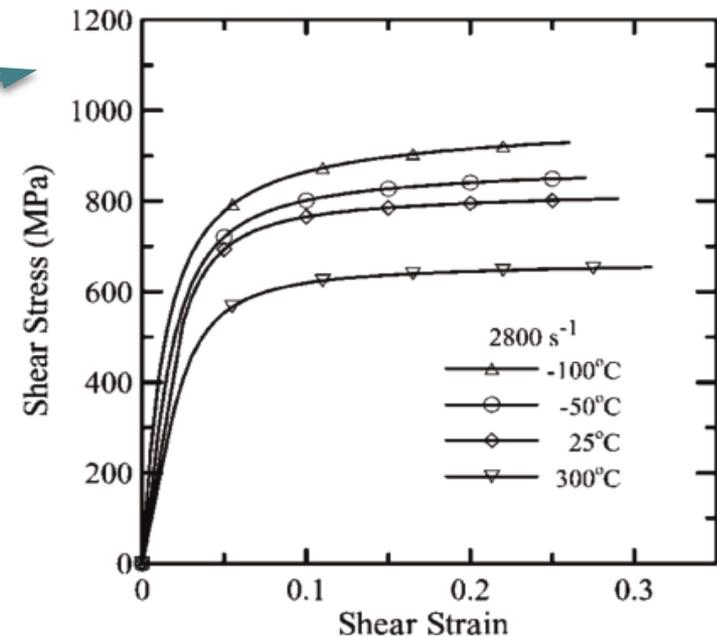
Parametri materiale

- Legge che descriva il comportamento del materiale a elevate deformazioni e velocità di deformazione
- Definizione del modello di frattura

Inter object

- Modello e coefficiente di attrito
- Coefficiente di scambio termico all'interfaccia truciolo-inserto

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T)$$

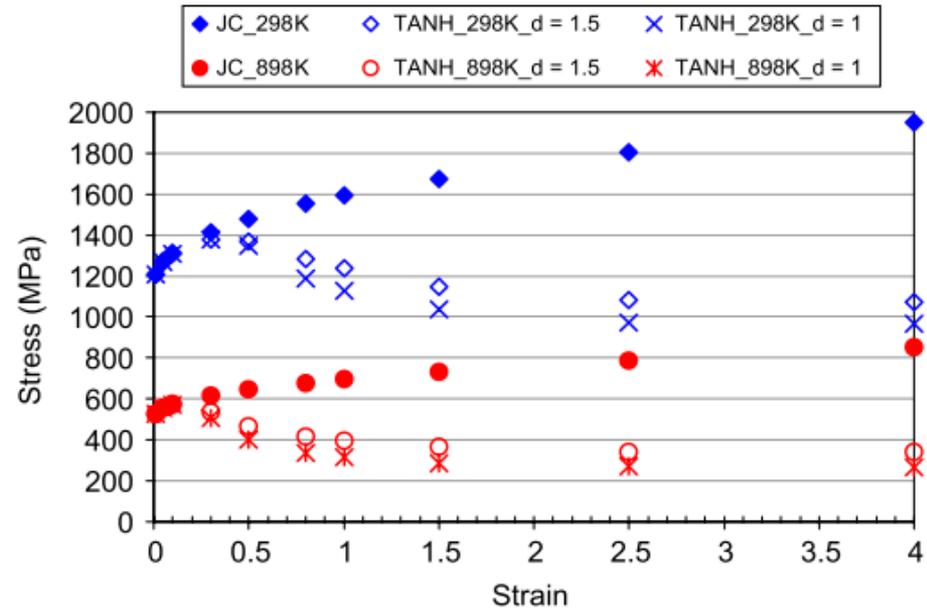
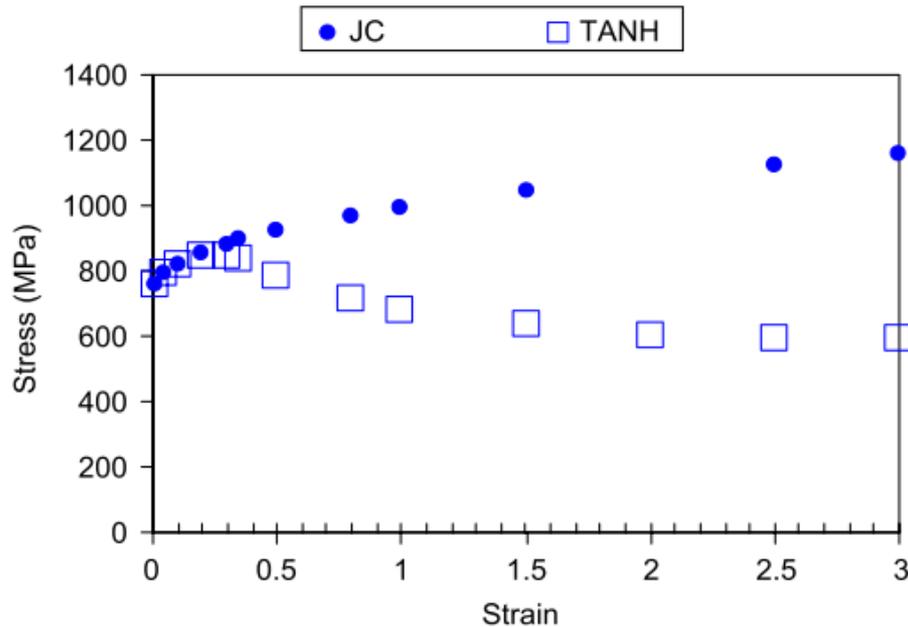


Legge costitutiva del materiale

Flow stress del materiale

Valori empirici tabellati

Legge costitutiva di Johnson-Cook generalizzata o con strain softening: $\sigma = f(\varepsilon) \cdot g(\dot{\varepsilon}) \cdot h(T)$



Legge costitutiva del materiale

Flow stress del materiale

- Valori empirici tabellati
- Legge costitutiva di Johnson-Cook generalizzata o con strain softening:

JC generalizzata

$$\sigma = [A + B\varepsilon^n] \left[1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right]$$

$$\sigma = f(\varepsilon) \cdot g(\dot{\varepsilon}) \cdot h(T)$$

JC con softening

$$\sigma = \left[A + B\varepsilon^n \left(\frac{1}{\exp(\varepsilon^a)} \right) \right] [\dots] \left[\dots \right] \left[1 - \left(\frac{T}{T_m} \right)^d + \left(\frac{T}{T_m} \right)^d \cdot \tanh \left(\frac{1}{\left[\varepsilon + (T / T_m)^b \right]^c} \right) \right]$$

Termini aggiuntivi per la modellazione dello strain softening

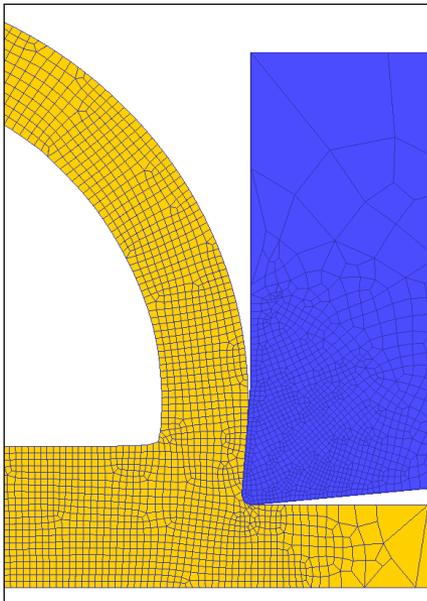
Criterio di frattura

Determina la frattura degli elementi e quindi la segmentazione del truciolo

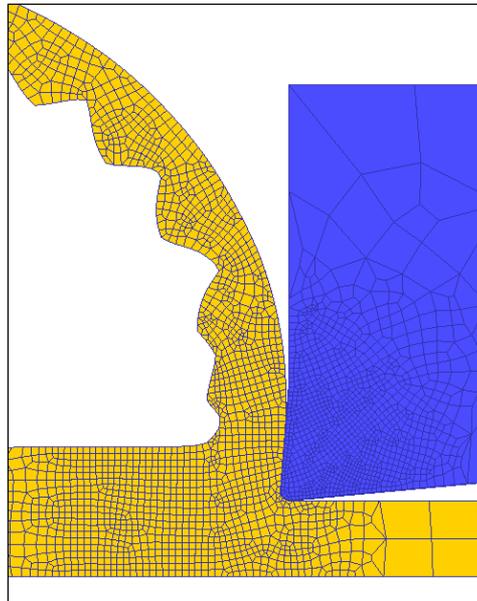
Criterio di frattura di Cockroft e Latham e valore di danneggiamento critico

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \sigma_1 d\bar{\varepsilon} = D$$

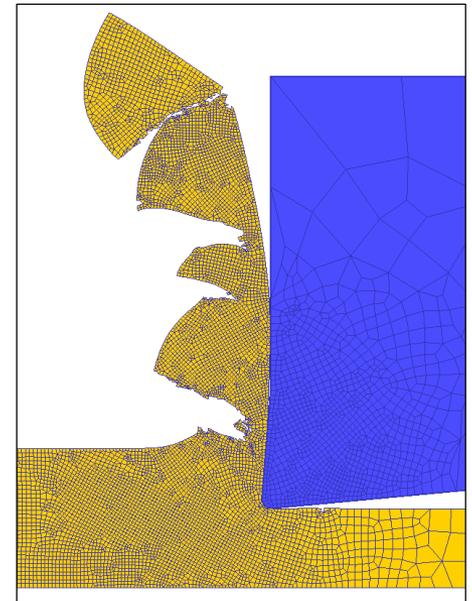
No crit. frattura



Criterio frattura C&L



Criterio frattura & element deletion



Modello di attrito

Definito dal coefficiente di attrito e dalle zone di contatto



Forte influenza dei parametri di taglio e della geometria dell'utensile



Difficoltà nella stima sperimentale

Coulomb

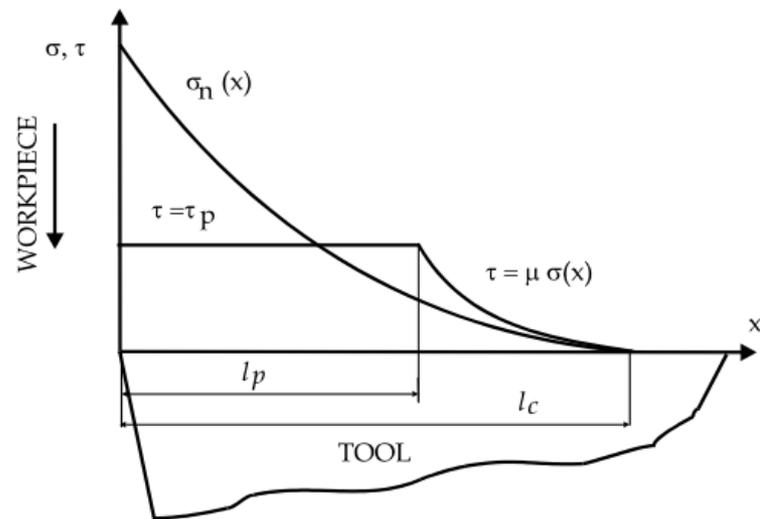
$$\tau = \mu \cdot \sigma$$

Modello a taglio costante

$$\tau = m \cdot \tau_0 = m \frac{\sigma_0}{\sqrt{3}}$$

Ibrido

$$\begin{cases} \tau = \mu \cdot p & \text{per } \mu \cdot p < m \cdot \tau_0 \\ \tau = m \cdot \tau_0 & \text{per } \mu \cdot p \geq m \cdot \tau_0 \end{cases}$$

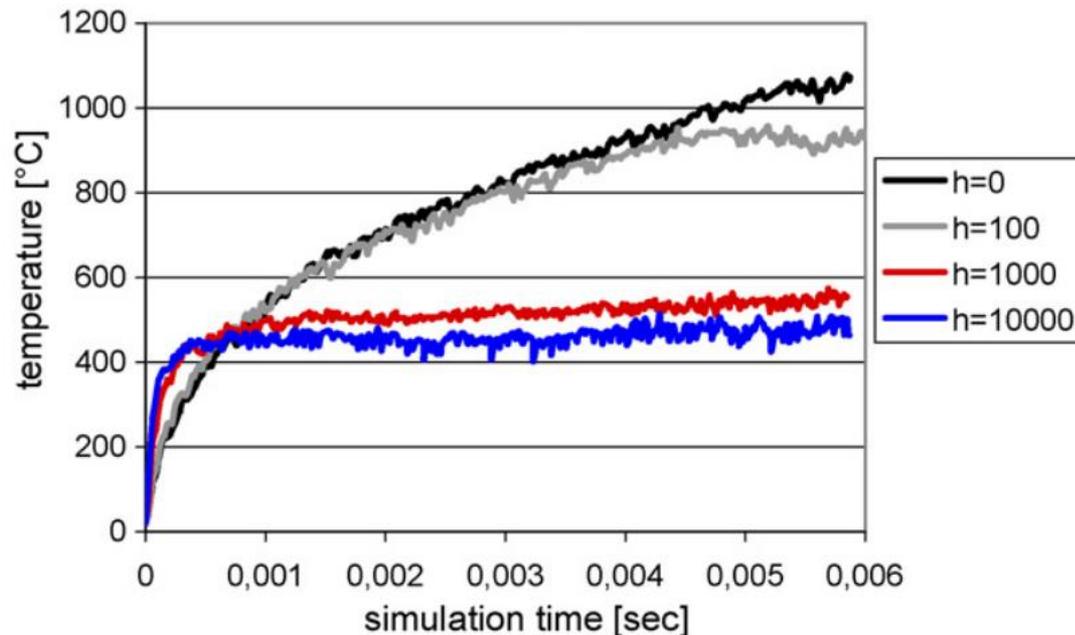


Coefficienti di scambio termico

Coefficiente di scambio termico all'interfaccia truciolo-petto

Valori più elevati, anche se non realistici, permettono di raggiungere in tempi brevi il regime termico all'interfaccia.

Valori utilizzati in letteratura scientifica variano da 1000 a 100000 $N/(sec \cdot mm \cdot ^\circ C)$



Coefficiente di scambio termico convettivo con l'ambiente

Poco rilevante per le simulazioni termo-meccaniche

Diventa importante nelle simulazioni puramente termiche

Mesh pezzo e inserto

Frequenti remesh del pezzo

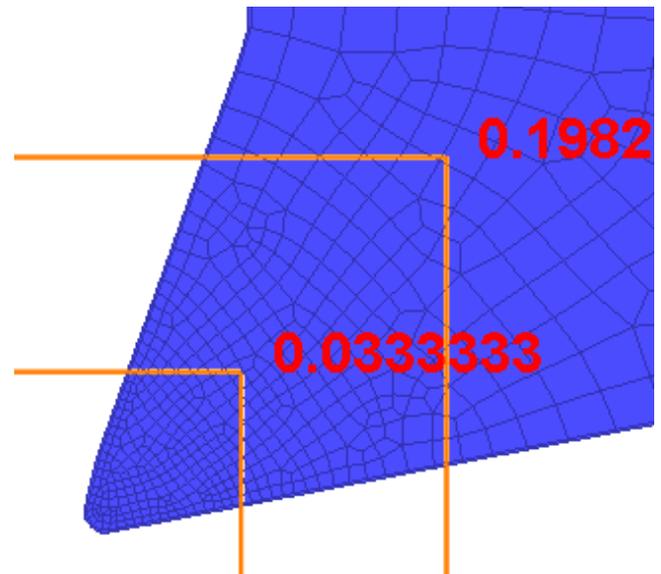
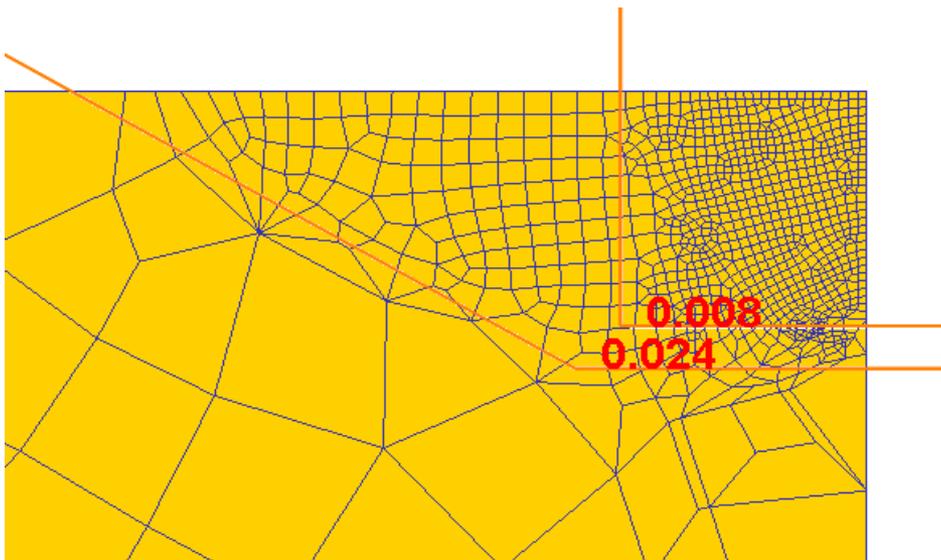


Necessità di interpolazione delle variabili di stato ai nodi



Mesh molto fitta nella zona di taglio per ridurre imprecisioni dovute all'interpolazione

Finestre di mesh fisse nello spazio



Simulazione puramente termica

Simulazione accoppiata termo-meccanica



Alti tempi computazionali



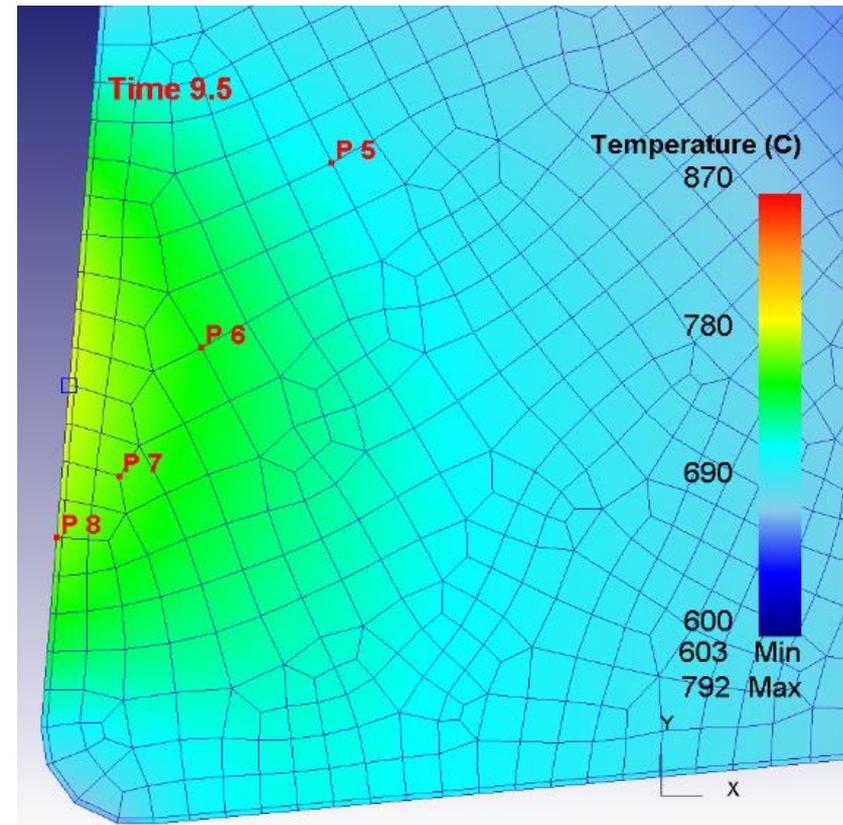
T di regime solo nei nodi all'interfaccia petto-truciolo

Simulazione puramente termica



- Molto leggera dal punto di vista computazionale
- Permette di conoscere la temperatura di regime nei punti interni dell'inserto

Validazione possibile grazie a misure sperimentali di temperatura



Contatti

Ing. Elio Chiappini
elio.chiappini@musp.it

Ing. Stefano Tirelli
stefano.tirelli@musp.it

Consorzio MUSP
Via Tirotti 9 - Località Le Mose - 29122 Piacenza
info@musp.it
www.musp.it