

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE*

*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA*

**TESI DI LAUREA**

in

**TECNOLOGIA MECCANICA E SISTEMI DI LAVORAZIONE**

**ANALISI DELLE MICROSTRUTTURE GENERATE  
SU INGRANAGGI PER USO AUTOMOTIVE  
DA PROCESSI DI RETTIFICA A SECCO**

Tesi di laurea di:  
**DANIELE FORLAI**

Relatore:  
Chiar.mo Prof. Ing.  
**ALESSANDRO FORTUNATO**

Correlatori:  
Ing. **GIACOMO GUERRINI**

Anno Accademico 2015/2016

Sessione II



## **Sommario**

Indice delle figure .....	5
Indice delle tabelle .....	7
Indice dei grafici .....	8
Capitolo 0 .....	10
Introduzione .....	10
Capitolo 1 .....	11
La rettifica .....	11
1.0 Introduzione .....	12
1.1 La mola .....	12
1.2 I grani abrasivi .....	16
1.2.1 Materiali e caratteristiche dei grani abrasivi .....	16
1.2.2 Acquisizione grani 3D con software .....	18
1.3 Il legante .....	24
1.4 Nomenclatura delle mole .....	25
1.5 Le macchine per la rettifica .....	25
1.6 Il processo di taglio e i parametri di lavoro .....	27
1.7 Rettificazione con lubrificante e a secco .....	31
Capitolo 2 .....	34
La rettifica a secco e le bruciature .....	34
2.0 Introduzione .....	35
2.1 I vantaggi della rettifica a secco .....	35
2.2 Le bruciature da rettifica .....	36
Capitolo 3 .....	42
Applicazione industriale: la rettifica a secco di ingranaggi .....	42
3.0 Introduzione .....	43
3.1 La finitura degli ingranaggi .....	44
3.2 Processo sperimentale di rettifica a secco .....	47
3.3 Attività sperimentale sui campioni metallografici .....	49
3.3.1 Introduzione alle fasi di lavoro .....	49
3.3.2 Taglio degli ingranaggi a freddo .....	50
3.3.3 Inglobatura dei campioni metallografici .....	51
3.3.4 Lucidatura dei provini metallografici .....	53
3.3.5 Attacco chimico al Nital .....	58
3.4 Risultati dell'analisi .....	59
Conclusioni .....	66

Bibliografia ..... 68

## **Indice delle figure:**

Figura 1: Geometrie caratteristiche per mole da rettifica .....	13
Figura 2: Struttura della mola .....	13
Figura 3: Struttura allumina fusa .....	18
Figura 4: Struttura allumina sinterizzata .....	18
Figura 5: Diamante naturale .....	18
Figura 6: Diamante sintetico .....	18
Figura 7: Grano abrasivo in formato digitale (vista dall'alto) .....	19
Figura 8: Esempio di superficie discretizzata con una mesh secondo il FEM .....	20
Figura 9: Finestra iniziale del software LeioshMesh .....	21
Figura 10: Foto del grano abrasivo 03_16 reale .....	22
Figura 11: Riproduzione in formato digitale del grano abrasivo 03_16 .....	22
Figura 12: Foto del grano abrasivo 06_16 reale .....	22
Figura 13: Riproduzione in formato digitale del grano abrasivo 06_16 .....	22
Figura 14: Foto del grano abrasivo 15_16 reale .....	22
Figura 15: Riproduzione in formato digitale del grano abrasivo 15_16 .....	22
Figura 16: Angoli di spoglia del grano abrasivo 07_16 .....	23
Figura 17: Angoli di spoglia del grano abrasivo 06_16 .....	23
Figura 18: Rettificatrice orizzontale per componenti assialsimmetrici .....	26
Figura 19: Rettificatrice per lavorazioni di superfici piane .....	26
Figura 20: Macchina per la rettifica senza centri .....	27
Figura 21: Velocità periferica della mola $v_s$ .....	28
Figura 22: Velocità del pezzo in lavorazione $v_w$ .....	30
Figura 23: Caratteristiche degli utensili a geometria indefinita ( $a$ _ angolo di spoglia principale $\gamma$ positivo, $b$ _ angolo di spoglia principale $\gamma$ negativo) .....	32
Figura 24: Materiale con danneggiamento termico da ossidazione .....	37
Figura 25: Materiale con danneggiamento termico da nuova tempra .....	40
Figura 26: Errore di forma sul profilo del dente .....	45
Figura 27: Errori di forma e geometrici sul dente .....	45
Figura 28: Utensile sbarbatore (o rasatore) .....	46
Figura 29: Utilizzo utensile sbarbatore .....	46
Figura 30: Processo di rettifica di un ingranaggio a denti elicoidali .....	30

Figura 31: <i>Schema delle fasi relative al processo di finitura dell'ingranaggio considerato</i> .....	48
Figura 32: <i>Mola da taglio per troncatrice</i> .....	50
Figura 33: <i>Porzione di ruota dentata tagliata</i> .....	50
Figura 34: <i>Porzione ruota dentata con 3 denti</i> .....	51
Figura 35: <i>Provino metallografico con bakelite</i> .....	52
Figura 36: <i>Gap presente tra la resina e il campione</i> .....	52
Figura 37: <i>Gap assente tra la resina e il campione</i> .....	53
Figura 38: <i>Provino con resina bianca</i> .....	53
Figura 39: <i>Esempio di carta abrasiva</i> .....	54
Figura 40: <i>Panno per la fase finale di lappatura</i> .....	55
Figura 41: <i>Campione metallografico con sbavature</i> .....	55
Figura 42: <i>Piattello magnetico</i> .....	56
Figura 43: <i>Esempio di disco abrasivo</i> .....	57
Figura 44: <i>Campione metallografico privo di sbavature</i> .....	58
Figura 45: <i>Provino non attaccato chimicamente</i> .....	59
Figura 46: <i>Provino attaccato chimicamente</i> .....	59
Figura 47: <i>Campione metallografico della ruota dentata A, privo di bruciature</i> ...	60
Figura 48: <i>Campione metallografico della ruota dentata B, con lievi bruciature</i> ...	61
Figura 49: <i>Campione metallografico della ruota dentata C, con medie bruciature</i> .....	63
Figura 50: <i>Campione metallografico della ruota dentata D, con bruciature severe</i> .....	64

## **Indice delle tabelle**

Tabella 1: <i>Caratteristiche della mola</i> .....	15
Tabella 2: <i>Caratteristiche dei materiali dei grani abrasivi</i> .....	16
Tabella 3: <i>Tabella riassuntiva con i risultati e la media finale tra tutti gli angoli di spoglia dei grani che sono stati rilevati</i> .....	23
Tabella 4: <i>Caratteristiche dei materiali del legante</i> .....	24
Tabella 5: <i>Lavorazione in concordanza ed in discordanza</i> .....	31
Tabella 6: <i>Dati tecnici dell'ingranaggio</i> .....	47

## Indice dei grafici

Grafico 1: <i>Grafico Temperatura – Microdurezza dei materiali</i> .....	17
Grafico 2: <i>Potenza assorbita dalla mola al variare di <math>v_s</math></i> .....	28
Grafico 3: <i>Velocità <math>v_s</math> – Spessore truciolo</i> .....	29
Grafico 4: <i>Velocità <math>v_s</math> – Componente tangenziale di taglio</i> .....	29
Grafico 5: <i>Velocità <math>v_s</math> – Rugosità superficiale</i> .....	29
Grafico 6: <i>Velocità <math>v_s</math> – Carico sul singolo grano abrasivo</i> .....	29
Grafico 7: <i>Velocità <math>v_s</math> – Resistenza della mola</i> .....	29
Grafico 8: <i>Velocità <math>v_s</math> – Capacità mola di mantenere invariata geometria</i> .....	29
Grafico 9: <i>Velocità <math>v_w</math> – Spessore del truciolo</i> .....	30
Grafico 10: <i>Velocità <math>v_w</math> – Rugosità superficiale</i> .....	30
Grafico 11: <i>Velocità <math>v_s</math> – Dissipazione calore</i> .....	32
Grafico 12: <i>Velocità <math>v_s</math> – Truciolo asportato</i> .....	32
Grafico 13: <i>Velocità <math>v_w</math> – Danneggiamento termico del pezzo</i> .....	33
Grafico 14: <i>Rappresentazione qualitativa dei fenomeni di bruciatura all'aumentare della temperatura di taglio</i> .....	36
Grafico 15: <i>Diagramma Profondità – Durezza</i> .....	38
Grafico 16: <i>Diagramma Profondità – Tensioni residue</i> .....	40
Grafico 17: <i>Andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggio A)</i> .....	61
Grafico 18: <i>Andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggio B)</i> .....	62
Grafico 19: <i>Andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggio C)</i> .....	63
Grafico 20: <i>Andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggio D)</i> .....	65
Grafico 21: <i>Confronto andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggi A, B, C, D)</i> .....	65

**Introduzione**

In generale, il ciclo di lavorazione di qualsiasi componente avente determinate specifiche di accuratezza da rispettare, ovvero bassi valori di rugosità superficiale e tolleranze dimensionali e geometriche molto “spinte”, prevede una serie di lavorazioni di finitura. Quest’ultime vengono eseguite dopo le lavorazioni di sgrossatura, le quali hanno lo scopo di determinare la forma e la geometria precise del componente, mentre le lavorazioni di finitura hanno lo scopo di ricavare il pezzo finito, con le dimensioni precise richieste da progetto. Una delle principali lavorazioni di finitura, in base al risultato finale ottenuto sul pezzo, è la rettifica.

La rettifica è un processo di taglio per asportazione di truciolo nato intorno al 1920, per cui già da svariati anni essa viene utilizzata come lavorazione di finitura superficiale. Essa è una delle lavorazioni con maggior sviluppo di calore e finora si è sempre fatto uso di olii lubro-refrigeranti al fine di facilitare il processo di asportazione del materiale e rimuovere la maggior parte del calore generato durante il taglio. In quest’ultimo periodo, però, si stanno rielaborando le modalità con le quali viene eseguito il processo di rettifica, cercando di rimuovere gli olii di rettifica dal processo stesso.

Questa tesi si occupa di un progetto di ricerca, avente come scopo l’eliminazione degli olii di rettifica dal processo di taglio, avviato da alcune aziende del territorio emiliano, con la collaborazione dell’Università di Bologna e di Genova. In particolare essa tratta la rettifica degli ingranaggi a secco, poiché molte aziende del territorio emiliano si occupano della produzione di macchine per la realizzazione degli ingranaggi, oppure della fabbricazione vera e propria degli stessi. Per di più queste imprese sono considerate leader-mondiali del settore.

Inoltre viene trattato con particolare attenzione uno dei problemi fondamentali che si possono manifestare con la rettifica: le bruciature. Viene eseguita un’analisi dettagliata delle microstrutture e di quali sono gli effetti provocati dalle bruciature nel processo di rettifica a secco degli ingranaggi.

**La rettifica**

### 1.0 Introduzione

Il processo di rettificazione, detto anche di rettifica, è una lavorazione per asportazione di truciolo eseguita sempre alla fine del ciclo di lavorazione di un pezzo. Ciò è valido anche nel caso in cui esso preveda dei trattamenti termici finali, per cui la rettifica seguirà quest'ultimi. Lo scopo di questa procedura è quello di ottenere qualità superficiali elevate del pezzo in lavorazione, con valori di rugosità molto bassi ( $R_a < 1\mu\text{m}$ ) e ottime tolleranze dimensionali e geometriche.

Il rateo di asportazione tipico della rettificazione è limitato a pochi  $\mu\text{m}$  di spessore di materiale, poiché il suo fine non è quello di modificare la forma del pezzo, bensì quello di garantire la finitura superficiale richiesta. Nonostante questo, con la rettifica si possono compiere sia lavorazioni di sgrossatura, che permettono di asportare più materiale ( $10\div 30\mu\text{m}$ ) andando ad impiegare velocità di taglio minori, sia operazioni di finitura, con profondità di passata minori ( $10\mu\text{m}$ ) e velocità di taglio maggiori.

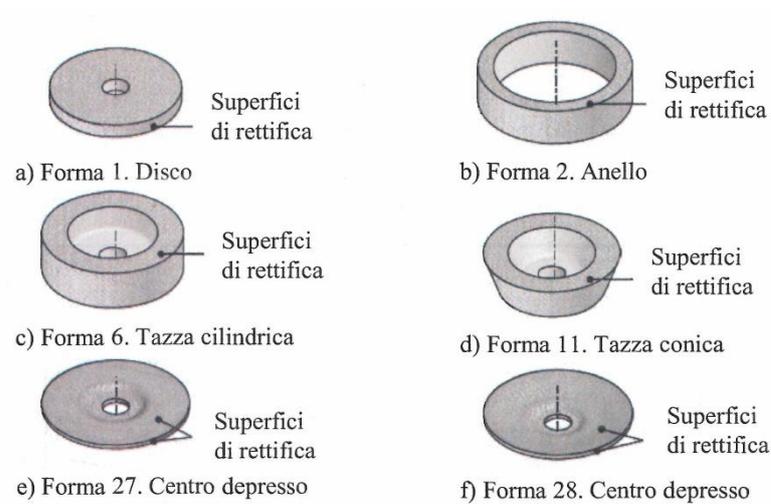
### 1.1 La mola

L'utensile impiegato per le lavorazioni di rettificazione è la "mola". In generale, essa presenta dei taglienti molto duri e resistenti all'usura, poiché viene impiegata per lavorare superfici di pezzi che possono essere stati precedentemente temprati, cementati o niturati, per cui si hanno elevati valori di durezza in superficie. Inoltre la mola è un utensile a geometria indefinita, poiché gli angoli di spoglia frontale e dorsale dei singoli grani abrasivi non rimangono invariati per tutti i taglienti, bensì variano in maniera casuale. La conseguenza di questa caratteristica della mola verrà successivamente trattata in maniera più approfondita nel paragrafo 1.7. Infine la mola risulta essere un utensile di tipo composito, dato che è costituita da due componenti:

- grani abrasivi, il cui compito principale è quello di asportare il sovrametallo (vedi paragrafo 1.2);
- legante, il cui compito è quello di mantenere compatti i vari grani abrasivi, conferendo alla mola una determinata forma e una certa rigidità (vedi paragrafo 1.3).

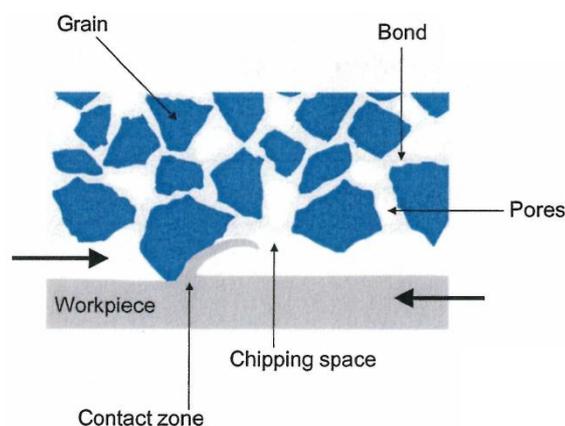
Gli utensili da rettifica possono presentare forme molto differenti l'una dall'altra in base al pezzo che deve essere lavorato, ma in generale essi sono tutti assialsimmetrici. Si diversificano in base alla loro geometria, che può essere più semplice nel caso delle mole cilindriche e coniche o più complessa nel caso di quelle elicoidali. Quest'ultime sono quelle impiegate per la rettifica dei fianchi dei denti degli ingranaggi, a cui si fa riferimento nel progetto di ricerca descritto nel Capitolo 0.

**Figura 1:** Geometrie caratteristiche per mole da rettifica



Infine, per quanto riguarda la struttura della mola, essa presenta delle cavità tra i grani abrasivi e il legante, definite porosità.

**Figura 2:** Struttura della mola



Oltre alla geometria, vi sono anche altri elementi caratteristici delle mole che influenzano le lavorazioni che possono essere eseguite, i materiali lavorabili e la qualità relativa alla finitura superficiale ottenibile:

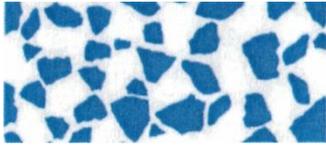
- resistenza del legante;
- materiale del grano abrasivo;
- dimensione del grano;
- quantità di porosità nella mola.

In base ai fattori appena elencati si possono eseguire alcune considerazioni:

- la granulometria della mola, ovvero la dimensione dei grani, influenza fortemente la rugosità superficiale ottenuta, infatti grani di dimensioni maggiori sono impiegati nelle lavorazioni di sgrossatura e più in generale quando le rugosità finali non sono troppo spinte;
- la resistenza del legante influenza la durezza della mola, la quale sarà maggiore se il legante ha una maggiore capacità di mantenere compatti i grani abrasivi durante la lavorazione, senza disperderli e viceversa. Alla luce di tutto questo, è possibile scegliere la durezza della mola, in base alla durezza del materiale del pezzo in lavorazione. Se quest'ultimo è molto duro si preferirà una mola “tenera”, poiché i grani si andranno ad usurare rapidamente, per cui è preferibile porre a contatto col pezzo grani nuovi e ben affilati. Viceversa per i materiali più teneri è preferibile impiegare delle mole “dure”, che avranno un ricambio minore dei grani;
- la struttura della mola va ad influenzare la quantità di porosità presenti in essa, infatti se è poco densa si avranno maggiori porosità, che porteranno ad una migliore capacità di smaltimento del calore prodotto durante la lavorazione e a facilitare l'asportazione del truciolo che va ad accumularsi nei pori della mola. L'utilizzo di questa tipologia di utensile da rettifica appena descritto è preferibile nelle lavorazioni di sgrossatura.

Tutto ciò che è stato detto poc'anzi può essere riassunto nella seguente tabella:

**Tabella 3:** *Caratteristiche della mola*

Minore: meno legante 	Durezza	Maggiore: più legante 
Aperta: meno grani abrasivi 	Struttura	Densa: più grani abrasivi 
Poche porosità estese 	Porosità	Molte porosità piccole 

La mola deve sempre presentare la propria superficie di lavoro in condizioni ottimali, per garantire le specifiche di lavorazione richieste ed essendo la rettifica un processo che permette di ottenere tolleranze molto strette è necessario avere un'elevata precisione nel processo di taglio. Quindi la superficie di lavoro deve sempre presentare la geometria e le tolleranze richieste dalla lavorazione. Per garantire queste caratteristiche viene eseguita la rinvivatura della mola. Essa è un processo eseguito grazie ad un utensile diamantato, avente opportuna geometria, che va a rigenerare la superficie di lavoro della mola, riportandola alle condizioni iniziali di lavoro.

## 1.2 I grani abrasivi

### 1.2.1 Materiali e caratteristiche dei grani abrasivi

I grani abrasivi risultano essere uno dei due componenti fondamentali che costituiscono gli utensili da rettifica. Il tipo di materiale impiegato per i grani varia in base al materiale del pezzo in lavorazione e si suddividono principalmente in due categorie:

- abrasivi convenzionali, tra i quali si hanno gli ossidi di alluminio ( $Al_2O_3$ ) e i carburi di silicio (SiC);
- super abrasivi, tra i quali si hanno il nitrato di boro cubico (CBN) e il diamante.

In generale l'allumina ( $Al_2O_3$ ) e il CBN sono impiegati per i materiali duttili, come l'acciaio e le super leghe, mentre i carburi di silicio e il diamante sono utilizzati per i materiali fragili, come la ghisa, il vetro, i carburi e la pietra. Durante le lavorazioni eseguite coi primi due materiali si ottengono trucioli di maggiore lunghezza rispetto ai secondi.

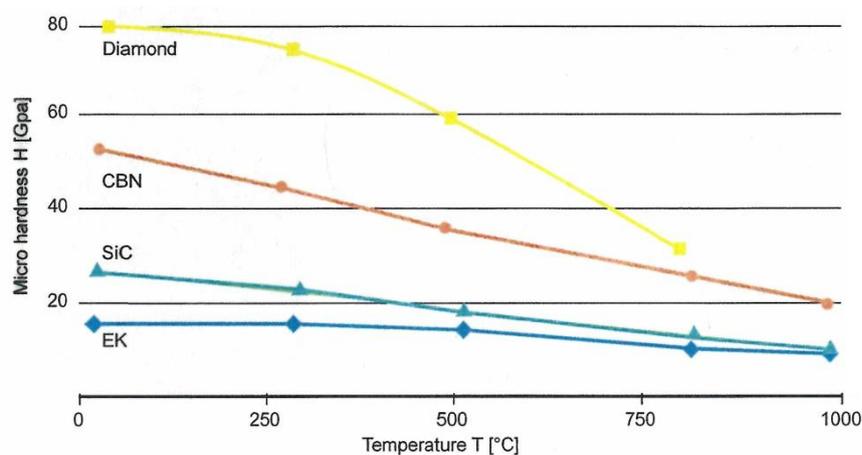
Nella seguente tabella sono indicate le caratteristiche meccaniche, chimiche e fisiche dei grani in base al materiale di cui essi sono costituiti, in una scala variabile da 0 a 10, dove 0 significa che tale caratteristica è nulla e 10 che è ottima.

**Tabella 4:** Caratteristiche dei materiali dei grani abrasivi

Materiale	Diamante	Allumina fusa	Allumina sinterizzata	CBN	Carburo di silicio
Durezza	10	5	4	10	6
Conducibilità termica	10	1	1	9	1
Stabilità termica	2	10	10	8	10
Resistenza meccanica	10	2	9	7	2
Resistenza chimica	2	7	9	10	2
Energia dissipata	10	7	5	10	5

Per quanto riguarda i materiali costituenti i grani abrasivi, appena descritti in Tabella 2, esiste una certa influenza da parte della temperatura sulla loro micro-durezza. Infatti, all'aumentare della temperatura, si ha una diminuzione della micro-durezza del materiale, la quale risulta essere più o meno elevata in base al materiale preso in considerazione. E' possibile osservare il comportamento di alcuni materiali (diamante, CBN, Carburo di silicio e allumina fusa nell'ordine) al variare della temperatura nel seguente grafico.

**Grafico 1:** *Grafico Temperatura – Microdurezza dei materiali*



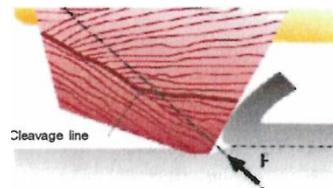
Come evidenziato ad inizio paragrafo uno dei materiali con cui è possibile realizzare i grani abrasivi è l'ossido di alluminio, detto anche allumina, di cui esistono due particolari tipologie, le quali presentano caratteristiche differenti:

- allumina fusa, la quale presenta una struttura più omogenea e compatta e i bordi dei grani costituiti da essa tendono ad essere sempre affilati, poiché avviene un vero e proprio distacco di porzioni elevate di materiale. Questo fenomeno avviene a causa di vari fattori, come micro-cricche, grandi fratture ed usura grossolana del materiale. Le conseguenze di tutto ciò sono molteplici, infatti si avranno fenomeni di micro-usura, abrasione, rottura del materiale lavorato, scorrimento, usura chimica e risaldatura del truciolo sul materiale. Questo andrà a comportare un aumento delle forze di taglio e di conseguenza delle temperature.
- Allumina sinterizzata, la quale presenta una struttura formata da microsferiche e i bordi dei grani costituiti da essa tendono ad arrotondarsi, poiché le

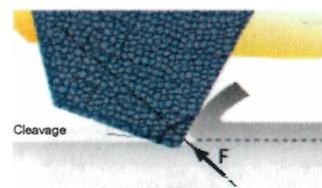
porzioni di materiale che si distaccano sono molto limitate. Questo è dovuto a fenomeni di micro-usura.

Le conseguenze di tutto ciò sono un'usura di tipo abrasiva e deformazioni plastiche del materiale lavorato, con incremento delle forze, quindi delle temperature. Si avrà poi una risaldata del materiale lavorato che genererà un ulteriore aumento della temperatura.

**Figura 3:** *Struttura allumina fusa*

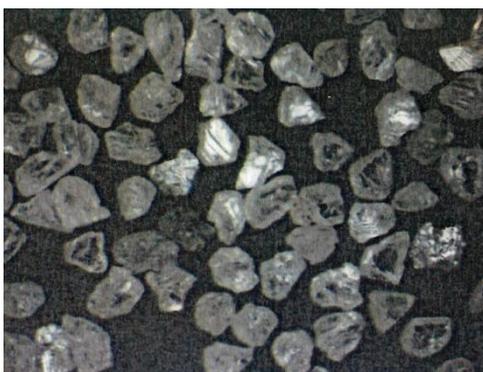


**Figura 4:** *Struttura allumina sinterizzata*



Oltre all'allumina esistono anche due tipologie di diamante, quello naturale e quello sintetico, ovvero artificiale. Il secondo presenta migliori prestazioni rispetto al primo, in termini di forma, durezza, uniformità della struttura e in generale resistenza.

**Figura 5:** *Diamante naturale*



**Figura 6:** *Diamante sintetico*



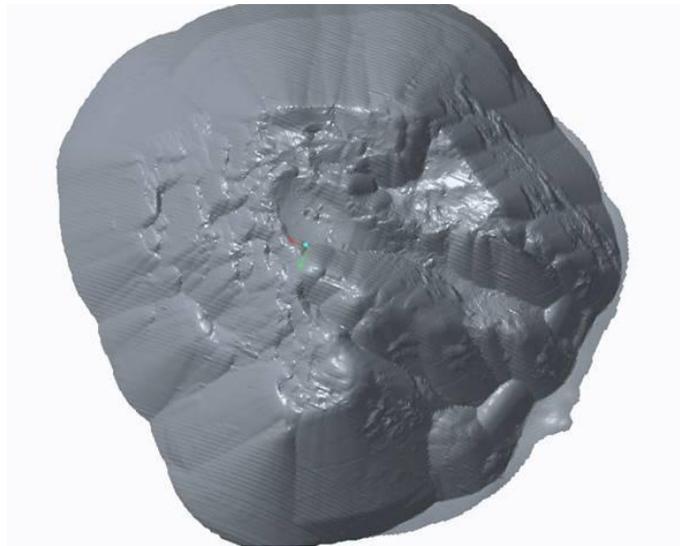
### 1.2.2 Acquisizione grani 3D con software

L'acquisizione dei grani in 3D, attraverso un apposito software, è un'attività essenziale per implementare la parte di simulazione al computer del processo di rettifica a secco con mono-grano. Questa risulta essere una delle due parti

fondamentali che caratterizzano il progetto di ricerca a cui fa riferimento questa tesi, come è stato descritto nel Capitolo 0. La simulazione è effettuata attraverso un particolare software per computer: DForm.

Lo scopo di questa attività è quello di ottenere una riproduzione tridimensionale in formato digitale dei singoli grani abrasivi, i quali sono impiegati nel processo di rettifica a secco eseguito con apposito utensile strumentato. Il formato digitale deve essere il più possibile accurato, in maniera da riprodurre fedelmente la forma e la struttura dei grani abrasivi reali, che verranno poi impiegati nella simulazione eseguita con DForm. Quest'ultimo è un aspetto fondamentale, perché se vi fossero importanti differenze tra la riproduzione digitale e il grano reale, di conseguenza anche i risultati ottenuti dalla simulazione e dal processo di rettifica reale sarebbero molto diversi tra loro e non avrebbe alcun significato eseguire un confronto tra i risultati ottenuti. Quindi l'accuratezza nell'eseguire la riproduzione è fondamentale.

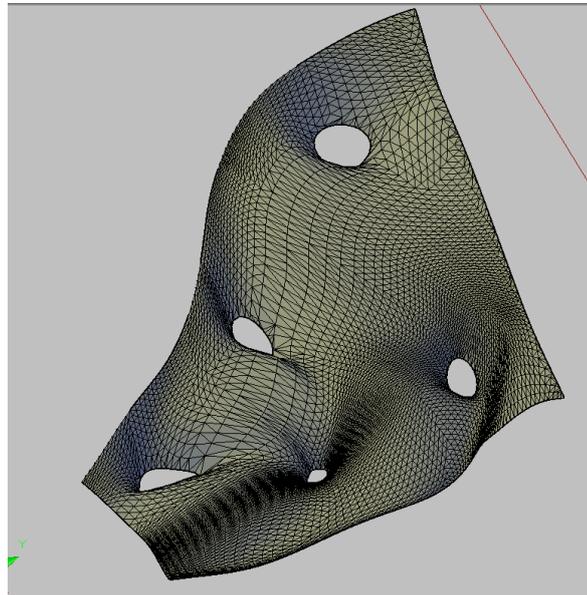
**Figura 7:** *Grano abrasivo in formato digitale (vista dall'alto)*



Il principio in base al quale è possibile eseguire una riproduzione in formato digitale dei grani abrasivi è il Metodo degli elementi finiti (FEM). Si tratta di una tecnica di approssimazione numerica il cui scopo è quello di determinare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali, sostituendo a quest'ultime un sistema di equazioni algebriche, quindi risolvibile. L'aspetto fondamentale del FEM è la discretizzazione attraverso l'utilizzo di una griglia, definita mesh, composta da primitive, cioè gli elementi finiti.

Quest'ultimi sono dei triangoli o dei quadrati quando si hanno domini in 2D, cioè superfici, altrimenti degli esaedri o dei tetraedri nel caso di domini 3D, cioè solidi. Quindi la superficie o il solido vengono suddivisi nei vari elementi finiti, formando la mesh e più essi saranno piccoli, più la griglia sarà fitta e si avrà una migliore accuratezza nella realizzazione del modello a fronte di una maggiore pesantezza di calcolo. Ovviamente questo metodo risulta comunque essere un'approssimazione, come è esplicitato nella definizione di FEM, di conseguenza si avrà sempre un certo errore, che potrà essere limitato andando a rendere più fitta la mesh.

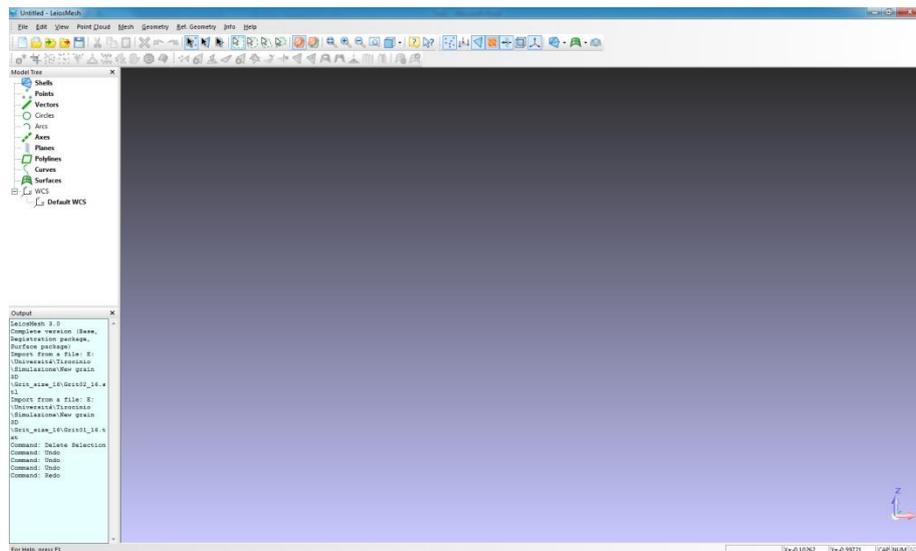
**Figura 8:** *Esempio di superficie discretizzata con una mesh secondo il FEM*



I grani di abrasivo impiegati per il processo di rettifica a secco con mono-grano, eseguito ai fini dell'attività di ricerca trattata in questa tesi, sono costituiti da allumina e sono suddivisi in tre gruppi, di granulometria differente 16, 24, 36.

La procedura per l'acquisizione dei singoli grani abrasivi è stata eseguita attraverso un rugosimetro. Grazie al tastatore di cui esso è provvisto, è possibile riprodurre la superficie del grano in formato digitale, come file .txt. Successivamente viene utilizzato un apposito software su PC, LeiosMesh, per discretizzare la superficie del grano che è stata precedentemente acquisita, in modo tale da ottenere una superficie già discretizzata. Si avrà un file in formato .stl, che verrà impiegato per la simulazione sul software DForm.

**Figura 9:** Finestra iniziale del software LeioshMesh

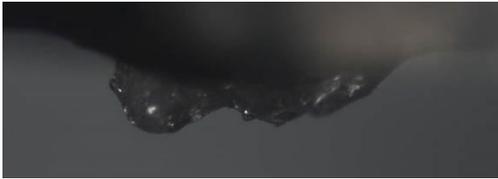


La procedura precisa da seguire su LeioshMesh è la seguente:

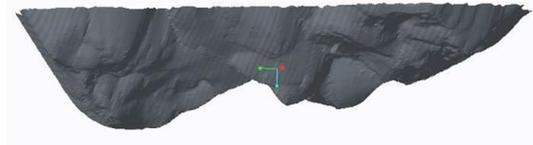
1. IMPORT file .txt;
2. Utilizzare i comandi RECTANGLE SELECTION TOOL o POLYGON SELECTION TOOL per selezionare l'area del grano acquisito da tagliare;
3. Una volta selezionata tale area premere DELETE OBJECTS;
4. Premere TRIANGULATE e confermare;
5. Premere FIND ABNORMAL FACES;
6. Premere FIND IRREGULAR FACES e selezionare DELETE;
7. Premere DELETE SINGULARITIES;
8. Premere CHECK INTERSECTIONS;
9. Premere FILL HOLES e selezionare CURVATURE-BASED per un migliore riempimento delle aree forate, ma ciò determina tempi di calcolo molto maggiori. Altrimenti selezionare FLAT. In entrambi i casi selezionare anche COMPLETE FILL. Successivamente selezionare completamente la superficie relativa al grano e premere FILL;
10. EXPORT file in formato .stl.

Nelle seguenti figure è possibile osservare il confronto tra la foto reale e la riproduzione in formato digitale dello stesso grano abrasivo:

**Figura 10:** *Foto del grano abrasivo 03\_16 reale*



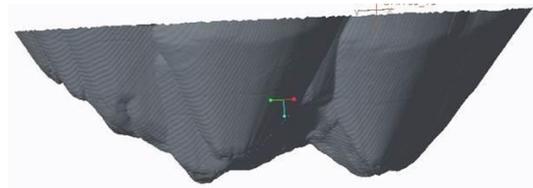
**Figura 11:** *Riproduzione in formato digitale del grano abrasivo 03\_16*



**Figura 12:** *Foto del grano abrasivo 06\_16 reale*



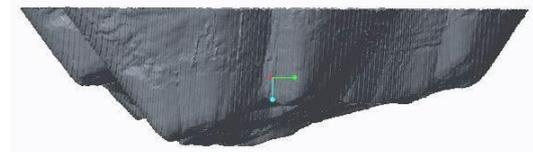
**Figura 13:** *Riproduzione in formato digitale del grano abrasivo 06\_16*



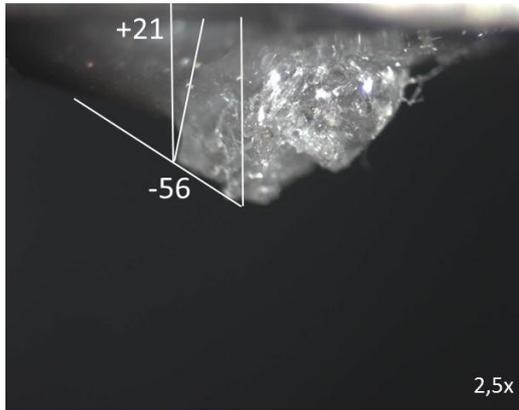
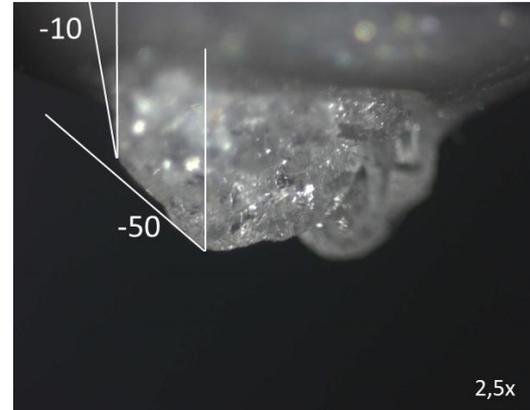
**Figura 14:** *Foto del grano abrasivo 15\_16 reale*



**Figura 15:** *Riproduzione in formato digitale del grano abrasivo 15\_16*



Considerando una parte dei grani di granulometria 16, è possibile eseguire una valutazione relativa all'angolo di spoglia degli stessi, andando a determinare il fatto che essi siano negativi o positivi e il relativo valore. Grazie alle figure a seguire è possibile osservare come è stato determinato l'angolo di spoglia per alcuni grani, infine nella Tabella 3 vi sono tutti i risultati e la media tra tutti gli angoli dei grani che sono stati rilevati.

**Figura 16:** Angoli di spoglia del grano abrasivo 07\_16**Figura 17:** Angoli di spoglia del grano abrasivo 06\_16**Tabella 3:** Tabella riassuntiva con i risultati e la media finale tra tutti gli angoli di spoglia dei grani che sono stati rilevati

Grit	Angle	Grit Average	Grit $\sigma$	Average	$\sigma$
01_16	-36			-41.6 $\pm$ 21	
03_16	-35				
04_16	-34	-56.7 $\pm$ 19.7			
	-69				
	-67				
05_16	16	-4.5 $\pm$ 29			
	-25				
06_16	-10	-30 $\pm$ 28			
	-50				
07_16	21	-17.5 $\pm$ 54			
	-56				
08_16	-62				
10_16	-53				
11_16	-72				
12_16	-62	-51 $\pm$ 16			
	-40				
13_16	-22				
15_16	-47	-59.5 $\pm$ 18			
	-72				

Dall'analisi sull'angolo di spoglia dei grani abrasivi considerati si deduce che esso è rappresentato da un valor medio pari a  $-41.6^\circ$ , quindi negativo, con una dispersione (varianza) pari a  $21^\circ$ . Quindi è stato verificato, come verrà meglio spiegato nel paragrafo 1.7, che in media gli angoli di spoglia dei grani abrasivi che

costituiscono una mola hanno valore negativo, in accordo con la comune teoria riguardante il processo di rettifica sviluppatasi sino ad oggi.

### 1.3 Il legante

Il legante risulta essere uno dei due componenti fondamentali che costituiscono gli utensili da rettifica. Il tipo di materiale impiegato per il legante varia in base al materiale del pezzo in lavorazione e può essere metallico, organico o vetroso.

Nella seguente tabella sono indicate le caratteristiche meccaniche, chimiche e fisiche di particolari tipi di legante, in funzione del materiale di cui esso è costituito, in una scala variabile da 0 a 10, dove 0 significa che tale caratteristica è nulla e 10 che è ottima.

**Tabella 4:** *Caratteristiche dei materiali del legante*

Materiale	Resina sintetica	Elastico	Ceramico	Elettrolitico	Metallico
Facilità ravvivatura mola	10	10	10	2	2
Resistenza termica	3	2	10	10	10
Resistenza ad invecchiamento	2	2	10	10	10
Rigidità	6	2	10	10	10
Durezza	6	10	2	10	10
Conducibilità termica	2	2	2	10	10
Smorzamento	8	10	2	2	1
Resistenza ad usura	8	2	10	10	8

Un'ulteriore caratteristica fondamentale del legante è la capacità di smorzare le vibrazioni che si vengono a creare mettendo in esercizio la mola. Si avranno quindi due comportamenti opposti in base alle caratteristiche del materiale di cui è costituito il legante. Se esso è duro, rigido, fragile e resistente alle alte temperature si avrà un bassissimo effetto di smorzamento e si può pensare che le vibrazioni tendano all'infinito. Al contrario, se il materiale è duttile, elastico, tenace e resistente alle basse temperature si avrà un elevato effetto di smorzamento e si può pensare che le vibrazioni dopo un certo intervallo di tempo tendano a zero.

## 1.4 Nomenclatura delle mole

Secondo le norme attuali la designazione delle mole avviene secondo una sigla alfanumerica, in base alla quale sono riportati, nell'ordine, i seguenti parametri:

- indicazione del produttore;
- tipologia di abrasivo presente nella mola (carattere alfabetico);
- dimensione del grano abrasivo (numero da 8 a 600, dove 8 rappresenta la granulometria di dimensioni maggiori);
- durezza (carattere alfabetico da A a Z, dove A rappresenta la minima durezza);
- struttura (carattere numerico  $\geq 1$ , in base al quale, più il valore è grande, minore è la densità della mola, quindi maggiori sono le porosità);
- tipologia di legante (carattere alfabetico).

Un esempio di designazione di una mola è la seguente:

34-A-40-M8-R-20

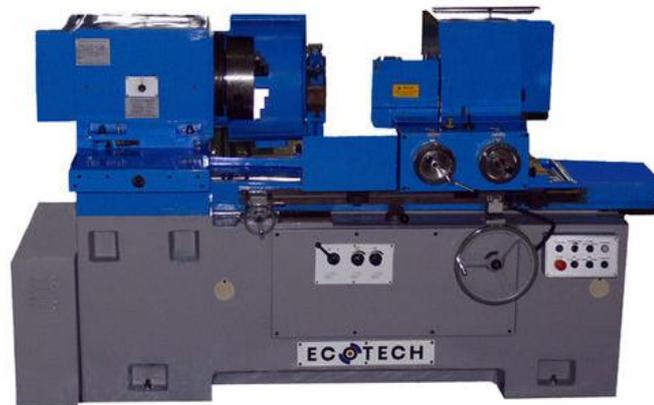
## 1.5 Le macchine per la rettifica

Le macchine utensili impiegate per le operazioni di rettifica sono definite “rettificatrici” e presentano costi elevati, poiché devono garantire elevata precisione e rigidità nei moti di lavoro, che permettono l'esecuzione delle lavorazioni richieste, rispettando i parametri di qualità imposti.

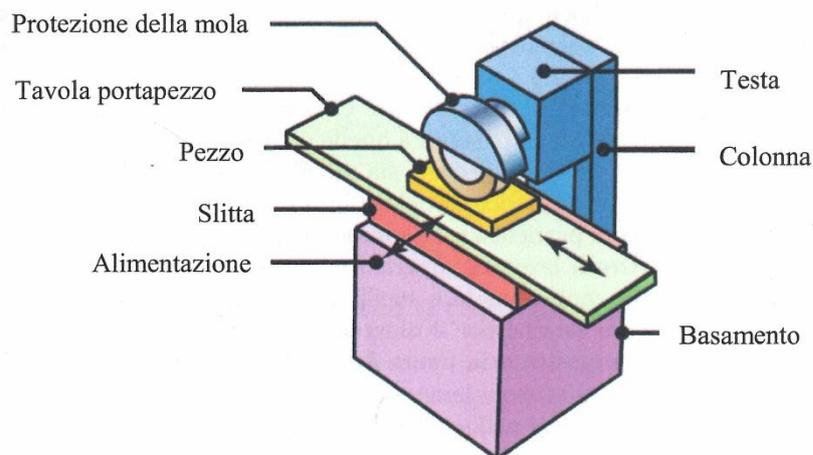
L'architettura delle rettificatrici dipende dal tipo di superficie che deve essere lavorata e si hanno principalmente due tipologie di macchina:

- rettificatrici per lavorazioni di interni ed esterni di pezzi assialsimmetrici, aventi una conformazione simile a quella dei torni in parallelo;
- rettificatrici per lavorazioni di superfici piane, le quali impiegano mole sia ad azione periferica, sia ad azione frontale. Tali macchine assomigliano maggiormente alle fresatrici verticali.

**Figura 18:** *Rettificatrice orizzontale per componenti assialsimmetrici*



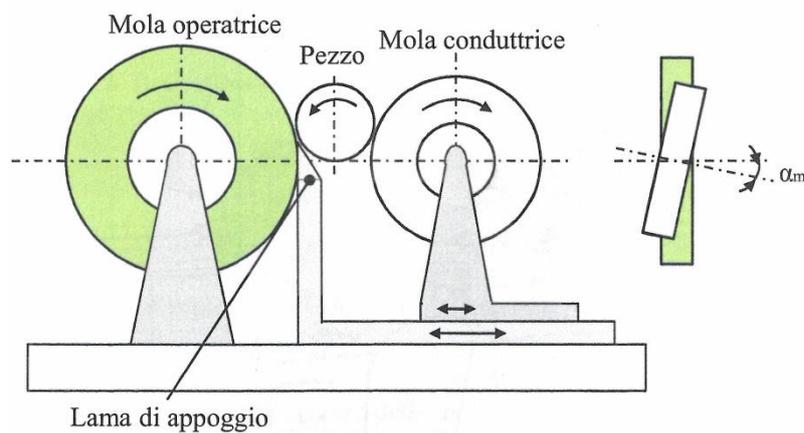
**Figura 19:** *Rettificatrice per lavorazioni di superfici piane*



Un particolare tipo di rettificatrice è la macchina per la rettifica senza centri, la quale permette la lavorazione di superfici cilindriche esterne di componenti assialsimmetrici snelli, quindi aventi elevata lunghezza rispetto allo spessore. Questa macchina permette di evitare l'esecuzione dell'operazione di centrinatura delle facce esterne, per il bloccaggio del componente in macchina. Quindi la barra viene appoggiata su di un supporto fisso definito lama di appoggio e stretta tra due mole di diametro e velocità differenti. Esse, però, ruotano nello stesso verso. Le due mole svolgono funzioni diverse, in quanto quella con diametro minore, definita conduttrice, presenta una superficie esterna iperboloïdica, che consente il trascinamento in rotazione della barra, mentre quella di diametro maggiore, definita

operatrice, ruotando ad una velocità più alta rispetto al pezzo svolge l'azione abrasiva su di esso. In questo modo viene eseguita l'operazione di rettifica. Le due mole presentano gli assi sghembi.

**Figura 20:** Macchina per la rettifica senza centri



## 1.6 Il processo di taglio e i parametri di lavoro

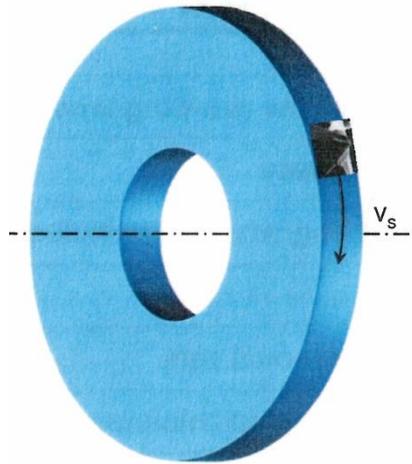
La rettifica è quell'operazione ad asportazione di truciolo, nella quale prendono parte il componente che deve essere rettificato e la mola, ovvero l'utensile impiegato per eseguire la lavorazione. Il processo di taglio che permette l'esecuzione della rettificazione di una superficie del componente, avviene grazie ai moti di lavoro conferiti all'utensile, o al pezzo. Essi sono:

- il moto di taglio, che permette la vera e propria asportazione del sovrametallo, è posseduto sempre dalla mola ed è rotatorio continuo;
- il moto di alimentazione, che permette di fornire all'utensile nuovo materiale da asportare durante il processo di taglio, può essere conferito sia al pezzo, sia all'utensile e potrà essere rotatorio continuo o rettilineo alternativo;
- il moto di appostamento o di registrazione, che permette di posizionare l'utensile rispetto al pezzo prima della fase di taglio, è posseduto solitamente dall'utensile.

Analizziamo ora i parametri di taglio caratteristici della rettificazione.

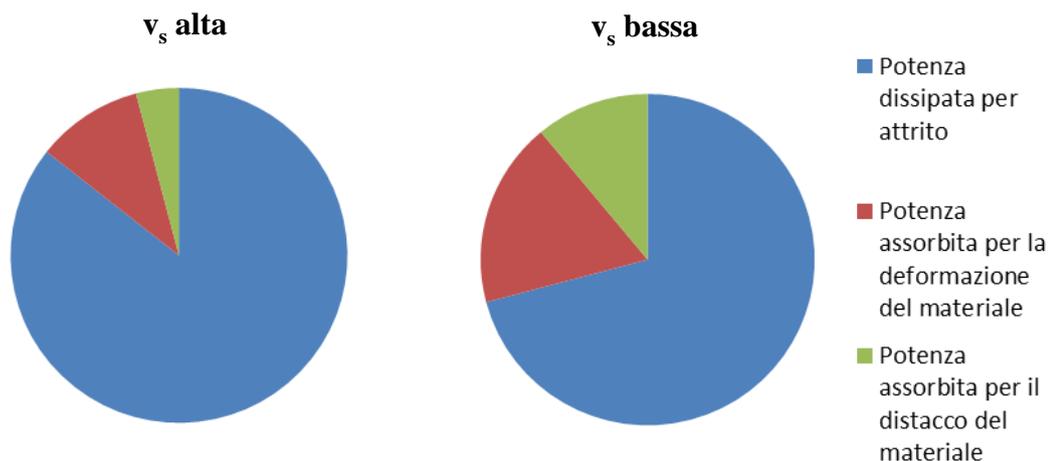
Uno dei parametri fondamentali del processo di taglio è  $v_s$ , ovvero la velocità periferica della mola, la cui unità di misura è m/s. In base alla variazione di  $v_s$ , è possibile osservare come variano gli altri parametri di taglio.

**Figura 21:** Velocità periferica della mola  $v_s$

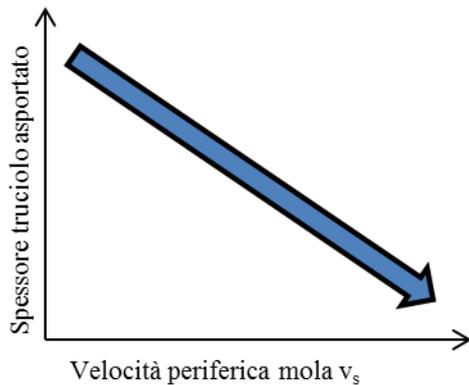
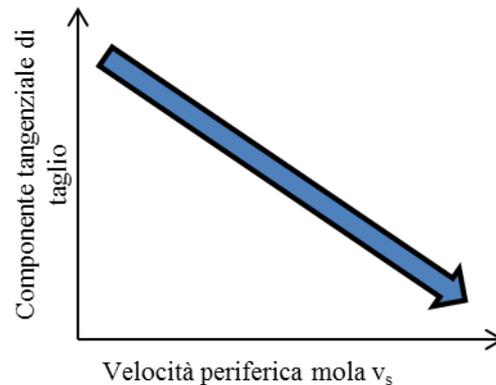
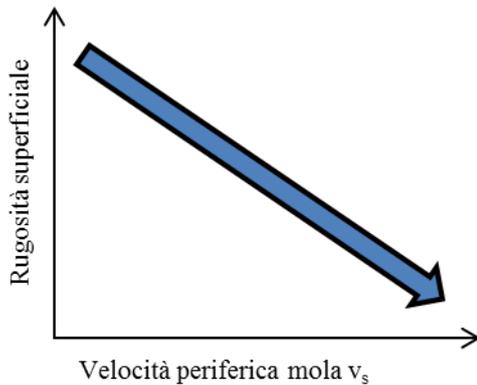
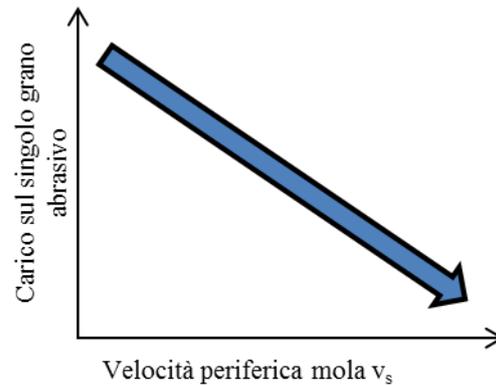
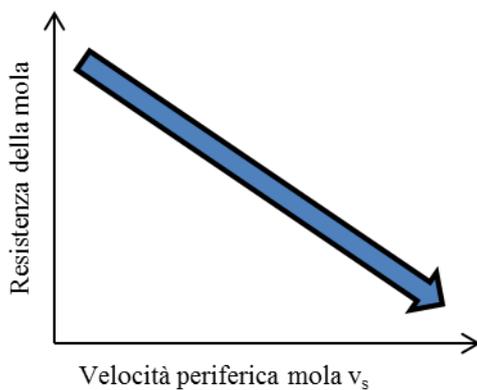
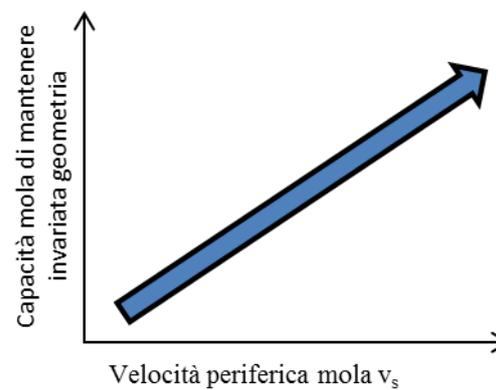


La velocità periferica della mola va ad influenzare la potenza assorbita dalla stessa durante il processo di taglio ed è possibile osservare come varia grazie ai seguenti grafici.

**Grafico 2:** Potenza assorbita dalla mola al variare di  $v_s$



Inoltre al variare di  $v_s$  variano lo spessore di truciolo asportato, la componente tangenziale della forza di taglio, la rugosità superficiale ottenuta, il carico sul singolo grano della mola, la resistenza della mola e la capacità dell'utensile di mantenere invariata la sua geometria.

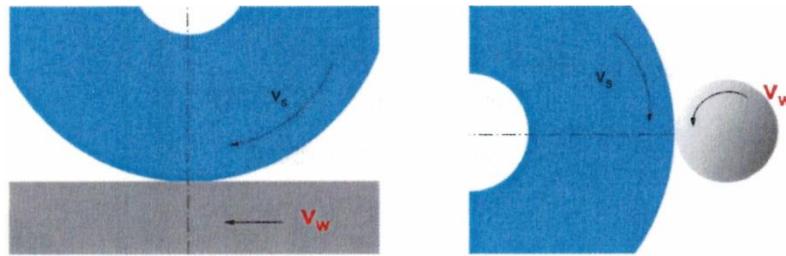
**Grafico 3:** *Velocità  $v_s$  – Spessore truciolo***Grafico 4:** *Velocità  $v_s$  – Componente tangenziale di taglio***Grafico 5:** *Velocità  $v_s$  – Rugosità superficiale***Grafico 6:** *Velocità  $v_s$  – Carico sul singolo grano abrasivo***Grafico 7:** *Velocità  $v_s$  – Resistenza della mola***Grafico 8:** *Velocità  $v_s$  – Capacità mola di mantenere invariata geometria*

Durante la fase di lavorazione, le dimensioni della mola diminuiscono gradualmente a causa dell'usura. Considerando una mola ad azione periferica, per

mantenere la sua velocità periferica costante, è necessario aumentare la velocità di rotazione della mola stessa. Quindi se il diametro della mola dimezza, la sua velocità di rotazione dovrà raddoppiare.

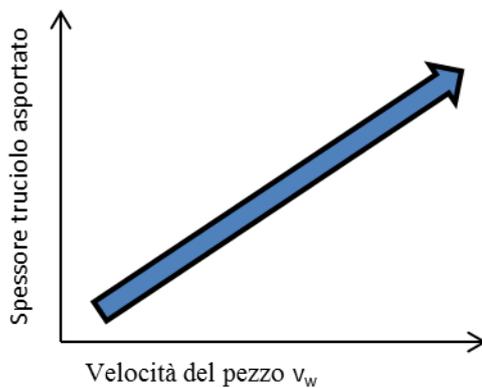
Un altro parametro di taglio è  $v_w$ , ovvero la velocità del pezzo in lavorazione, la cui unità di misura è m/min.

**Figura 22:** Velocità del pezzo in lavorazione  $v_w$

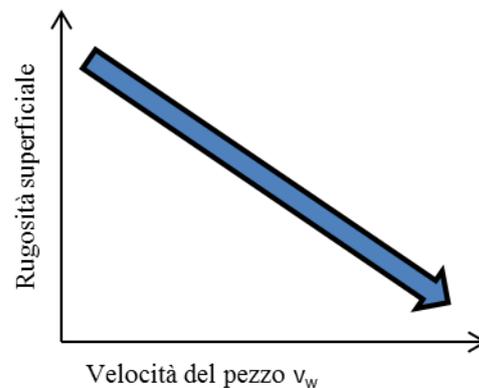


In base alla variazione di  $v_w$ , è possibile osservare come variano gli altri parametri di taglio, come lo spessore del truciolo e la rugosità superficiale ottenuta.

**Grafico 9:** Velocità  $v_w$  – Spessore del truciolo

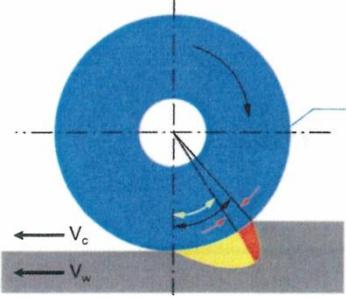
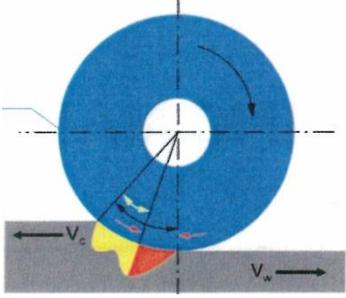


**Grafico 10:** Velocità  $v_w$  – Rugosità superficiale



Considerando una rettificazione con mola ad azione periferica, si possono delineare due casi differenti per l'esecuzione del processo di taglio; il taglio in concordanza e il taglio in discordanza. Nel primo caso il verso di rotazione del moto di taglio è il medesimo del moto di alimentazione, invece nel secondo caso essi sono opposti. Si possono osservare le differenze tra i due casi nella tabella seguente.

**Tabella 5:** Lavorazione in concordanza ed in discordanza

Taglio in concordanza	Caratteristiche	Taglio in discordanza
		
Maggiore	Zona di asportazione del truciolo (colore giallo in figura)	Minore
Minore	Zona di sfregamento (colore rosso in figura)	Maggiore
Ridotte	Forze sull'utensile	Elevate
Tendenzialmente bassa	Temperatura nella zona di contatto	Tendenzialmente alta

In base a quanto detto finora è possibile definire la velocità di taglio  $v_c$ , la quale è ottenuta dalla somma vettoriale della velocità periferica della mola  $v_s$  e della velocità del pezzo  $v_w$ . Se la lavorazione è in concordanza la velocità di taglio sarà data da  $v_c = v_s + v_w$ , altrimenti sarà data da  $v_c = v_s - v_w$ .

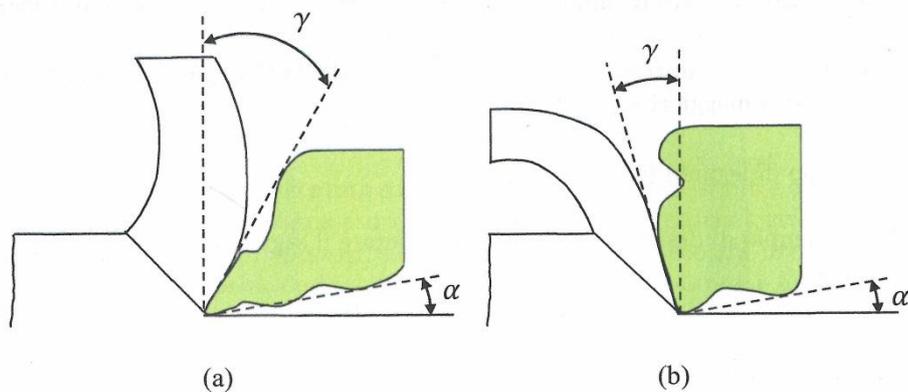
Considerando il processo di asportazione del materiale si possono distinguere tre differenti zone di deformazione:

1. primaria: inizia il contatto tra grani e materiale e si ha deformazione elastica;
2. secondaria: il grano affonda nel materiale generando deformazione plastica;
3. terziaria: massima deformazione con relativo distacco del truciolo.

### 1.7 Rettificazione con lubrificante e a secco

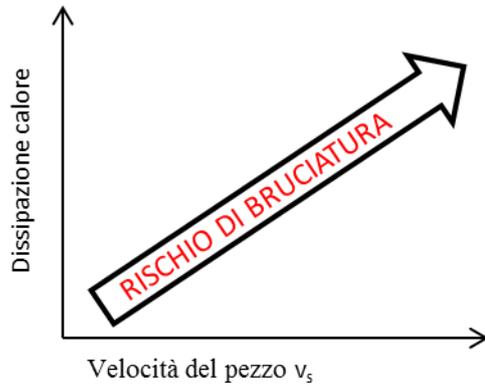
Come introdotto nei paragrafi 1.1 e 1.2, la rettifica è una lavorazione eseguita attraverso un utensile a geometria indefinita. Ciò significa che gli angoli di spoglia dei vari grani abrasivi che costituiscono la mola possono variare assumendo valori estremamente diversi. Essendo la distribuzione dei grani sulla mola assolutamente casuale, si può affermare che, statisticamente, si ha un maggior numero di grani con angolo di spoglia principale  $\gamma$  negativo. Questo fatto determina la formazione di un truciolo molto deformato, che richiede elevate quantità di energia per riuscire ad eseguire il processo di taglio. Oltre a questa conseguenza, si avranno anche pressioni di taglio molto alte, dovute al fatto che gli spessori di sovrametallo asportato sono ridotti. Tali condizioni provocano la generazione di elevate quantità di calore. Per questo la rettifica è considerata come la lavorazione ad asportazione di truciolo con maggiore produzione di calore e per questo vengono impiegate notevoli quantità di fluido refrigerante.

**Figura 23:** *Caratteristiche degli utensili a geometria indefinita (a\_angolo di spoglia principale  $\gamma$  positivo, b\_ angolo di spoglia principale  $\gamma$  negativo)*

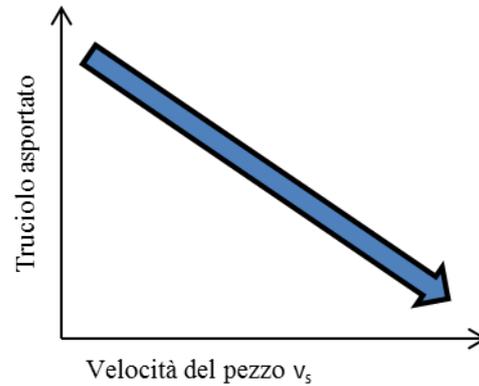


Si analizza ora come varia la generazione di calore durante il processo di taglio, in funzione della velocità di taglio  $v_s$  e della velocità di alimentazione  $v_w$ , grazie ai seguenti grafici.

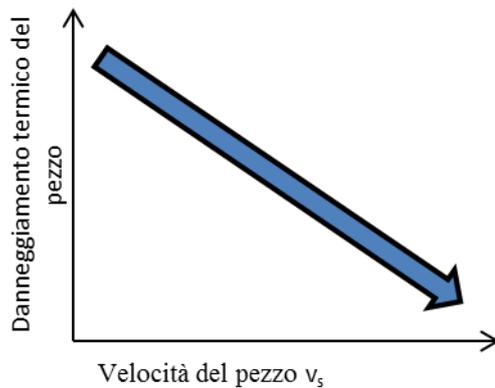
**Grafico 11:** Velocità  $v_s$  – Dissipazione calore



**Grafico 12:** Velocità  $v_s$  – Truciolo asportato



**Grafico 13:** Velocità  $v_w$  – Danneggiamento termico del pezzo



Il principale compito svolto dal fluido lubro-refrigerante è quello di smaltire la maggior parte del calore sviluppato durante il processo di lavorazione, il quale si viene a generare a causa dell'attrito tra i grani abrasivi e il pezzo in lavorazione e tra il legante il pezzo in lavorazione. Compiti secondari svolti da esso riguardano una maggiore pulizia della mola e della superficie del componente durante il processo di taglio, una migliore evacuazione del truciolo dalla zona di taglio, infine il fluido lubro-refrigerante protegge la macchina e il componente in lavorazione dalla corrosione.

Negli ultimi tempi si sta cercando di abbandonare l'utilizzo del fluido lubro-refrigerante, spostandosi verso un nuovo tipo di lavorazione a secco, come è stato spiegato nella parte introduttiva di questa tesi. I motivi per cui è preferibile usare un processo di rettifica a secco e le modalità con le quali esso viene implementato saranno spiegate nel capitolo successivo.

**La rettifica a secco e le bruciature**

## 2.0 Introduzione

Alla luce di quanto è stato spiegato nel paragrafo 1.7, per quanto concerne lo sviluppo di energia termica durante il processo di taglio nella rettifica, verranno spiegati nel seguente capitolo il principale problema ed i vantaggi che si possono avere eseguendo la rettificazione senza l'impiego di olio lubro-refrigerante. Questo processo prende appunto il nome di rettifica a secco.

In quest'ultimo periodo, sia in campo industriale sia universitario, è stato avviato un progetto di ricerca nell'ambito della rettifica, avente come obiettivo quello di realizzare l'intero processo senza l'impiego di olii lubrificanti e refrigeranti. Sono già stati ottenuti importanti risultati in questi termini, che hanno portato allo sviluppo di una macchina industriale realizzata ad hoc per questo processo.

In questo Capitolo viene anche trattato uno dei principali problemi che si sono riscontrati durante la fase di implementazione del processo di rettifica a secco: le bruciature da rettifica. Lo studio di questo fenomeno di danneggiamento termico del materiale è iniziato da poco tempo e molte peculiarità non sono ancora note. In particolare non si è ancora a conoscenza del tipo di struttura che si viene a creare nel materiale dopo la formazione di una bruciatura.

## 2.1 I vantaggi della rettifica a secco

E' stato implementato il processo di rettifica a secco, poiché si è riscontrato che la presenza dell'olio lubrificante e refrigerante presenta diversi aspetti negativi, in termini economici, energetici ed ambientali.

I vantaggi che si riscontrano dal processo di rettifica a secco sono i seguenti:

- notevole risparmio per quanto riguarda i costi di processo, poiché gli olii lubro-refrigeranti esausti presentano elevati costi di smaltimento;
- notevole risparmio per quanto riguarda i costi di investimento;
- notevole risparmio energetico, in quanto le fasi del trattamento dell'olio di rettifica assorbono molta più energia di quella richiesta dal processo di rettifica stesso e si hanno procedure difficoltose di trattamento e smaltimento degli stessi;

- si ha una macchina da rettifica più ecosostenibile, poiché l'assenza degli olii di rettifica permette di ridurre i possibili problemi di inquinamento ambientale, poiché essi sono nocivi.

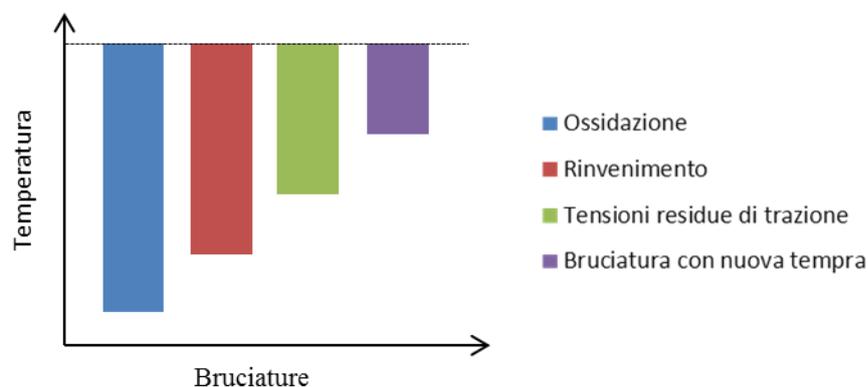
## 2.2 Le bruciature da rettifica

Uno dei principali problemi che si riscontrano sulla superficie di un componente rettificato sono le bruciature. Questo fenomeno si verifica sia in caso di rettifica con fluido lubro-refrigerante, sia nel caso della rettifica a secco.

Il termine bruciatura descrive in generale un danneggiamento termico che si verifica sulla superficie del pezzo durante la rettifica. Esistono vari tipi di danneggiamento, i quali si differenziano gli uni dagli altri in base all'intervallo di temperatura in cui essi si verificano e al grado di deterioramento che essi creano sulla superficie, cioè appunto come influenzano la qualità del pezzo. Con il nome di "bruciatura" si identificano 4 fenomeni differenti che possono avere luogo sul materiale singolarmente o in maniera combinata:

- ossidazione;
- rinvenimento;
- tensioni residue di trazione;
- bruciatura con nuova tempra.

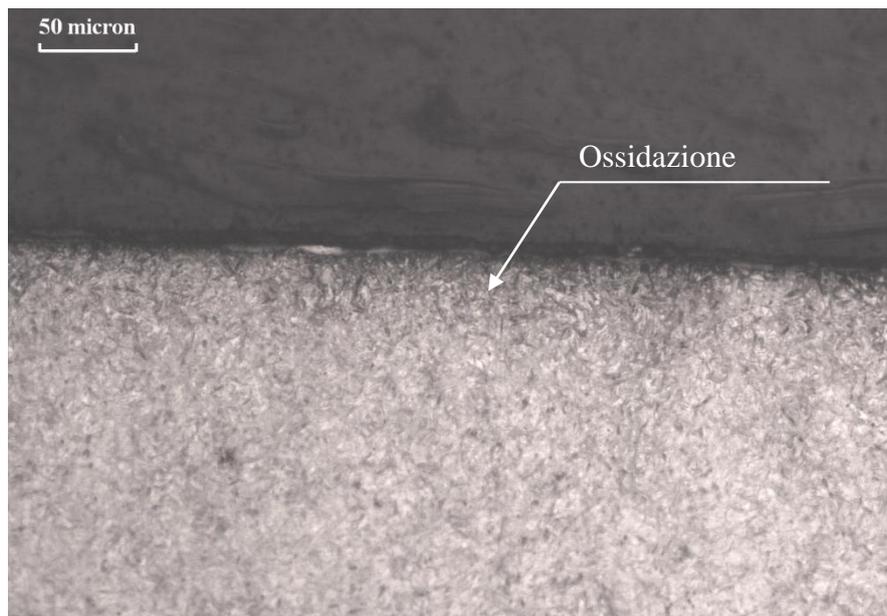
**Grafico 14:** *Rappresentazione qualitativa dei fenomeni di bruciatura all'aumentare della temperatura di taglio*



Andiamo ora a descrivere dettagliatamente ogni tipo di bruciatura esistente.

L'ossidazione è quel danneggiamento termico provocato da fenomeni di ossidazione sulla superficie del componente in lavorazione, sul quale si crea un sottile strato di colore differente da quello originario del materiale di cui è costituito il pezzo. Questo può avvenire anche in una zona non rettificata del pezzo, vicina a quella rettificata, perché nella prima si possono raggiungere elevate temperature a causa del surriscaldamento avvenuto per conduzione termica. In svariati casi l'ossidazione non determina veri e propri danneggiamenti al pezzo lavorato, nonostante il sottile strato superficiale di ossido che si viene a creare impedisca la realizzazione di ogni altro rivestimento in tale zona. Questo fenomeno inizia a temperature inferiori rispetto alle altre tipologie di danneggiamento termico, come è possibile osservare nel grafico 14.

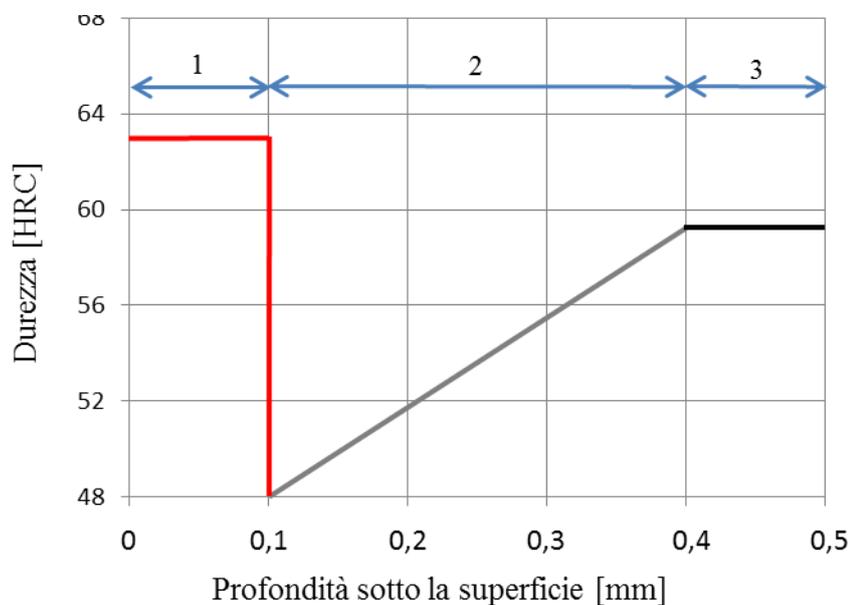
**Figura 24:** *Materiale con danneggiamento termico da ossidazione*



Il rinvenimento è quel danneggiamento termico che si verifica sulla superficie del pezzo rettificato quando la temperatura supera quella di tempra. La conseguenza di questo fenomeno è la formazione di uno strato di materiale avente durezza ridotta, che va a compromettere la resistenza e le prestazioni del componente. In particolare si possono osservare dal grafico sottostante due tipi differenti di danneggiamento del materiale del pezzo. Il primo risulta essere in superficie, per uno spessore di 0.1mm (linea rossa) e questa zona viene definita di nuova tempra (bruciatura con

nuova tempra descritta in fondo al paragrafo 2.2), poiché si ha un accrescimento della durezza del materiale. Il secondo danneggiamento presente, è compreso tra 0.1mm e 0.4mm di profondità nel pezzo (linea grigia) e rappresenta la zona vera e propria di rinvenimento, nella quale si ha una netta riduzione di durezza. Oltre i 0.4mm si ha la cosiddetta zona non alterata (linea nera), poiché la durezza resta invariata ed è pari al valore caratteristico del materiale che costituisce il componente in lavorazione. Il caso appena esposto rappresenta la condizione più generale di danneggiamento, nella quale si ha la presenza sia di nuova tempra, sia di rinvenimento, ma nella maggior parte dei casi sulla superficie dei pezzi rettificati si riscontra soltanto la zona di rinvenimento, senza quella di nuova tempra, poiché il rinvenimento stesso inizia a temperature sensibilmente inferiori. Inoltre quest'ultima situazione si verifica in particolare nel caso delle lavorazioni di rettifica a secco, poiché appunto non si ha il fluido lubro-refrigerante che provoca la formazione della zona di nuova tempra.

**Grafico 15:** *Diagramma Profondità - Durezza*



- 1) Zona di nuova tempra
- 2) Zona di rinvenimento
- 3) Zona non alterata

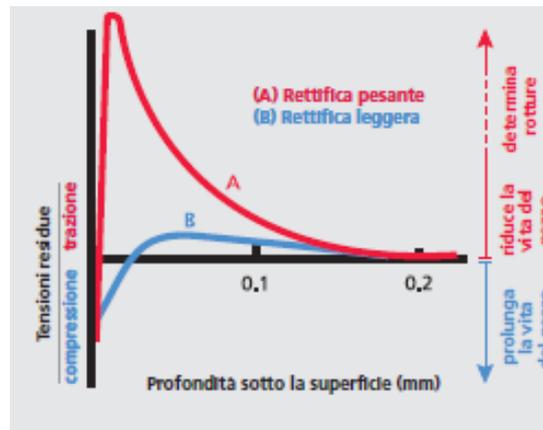
Le tensioni residue di trazione sono quel tipo di danneggiamento termico che si verifica in un componente qualora si voglia “spingere” il processo di rettifica per ottenere una maggior produttività. Ciò significa aumentare i parametri di velocità per diminuire il tempo di lavorazione del singolo pezzo, ma questo comporta ovviamente un maggior sviluppo di calore che andrà ad accrescere la temperatura.

Quando il processo di rettifica viene eseguito correttamente, la deformazione plastica provocata dai grani abrasivi al materiale del pezzo lascia la sua superficie in uno stato tensionale residuo di compressione. Esso è un fatto positivo, in quanto si avrà un aumento delle proprietà meccaniche del componente ed in particolare una maggior resistenza a fatica. Nel caso in cui si decidesse di aumentare la produttività del processo di rettifica si avrebbe un incremento della temperatura nella zona rettificata del pezzo, con conseguente manifestazione di tensioni residue di trazione. Esse sono provocate dal fatto che a causa dell'aumento di temperatura il materiale tende ad espandersi in superficie, ma questa espansione viene contrastata dallo stato tensionale di compressione generato dall'effetto dei grani abrasivi. Una volta raffreddato il materiale, la superficie presenta uno stato tensionale residuo, ottenuto dalla combinazione dei due precedenti.

In base all'intensità del fenomeno, cioè al valore di temperatura raggiunto, si hanno conseguenze assai differenti sul componente rettificato. Nel caso in cui vi siano tensioni residue di trazione moderate si avrà come unica conseguenza quella di ridurre la durezza del pezzo, mentre se esse risultano essere elevate possono portare perfino alla rottura del pezzo stesso dopo la rettifica. L'entità di queste tensioni residue e la profondità alla quale esse si manifestano dipendono dalla temperatura raggiunta e dalle proprietà del materiale di cui è composto il pezzo.

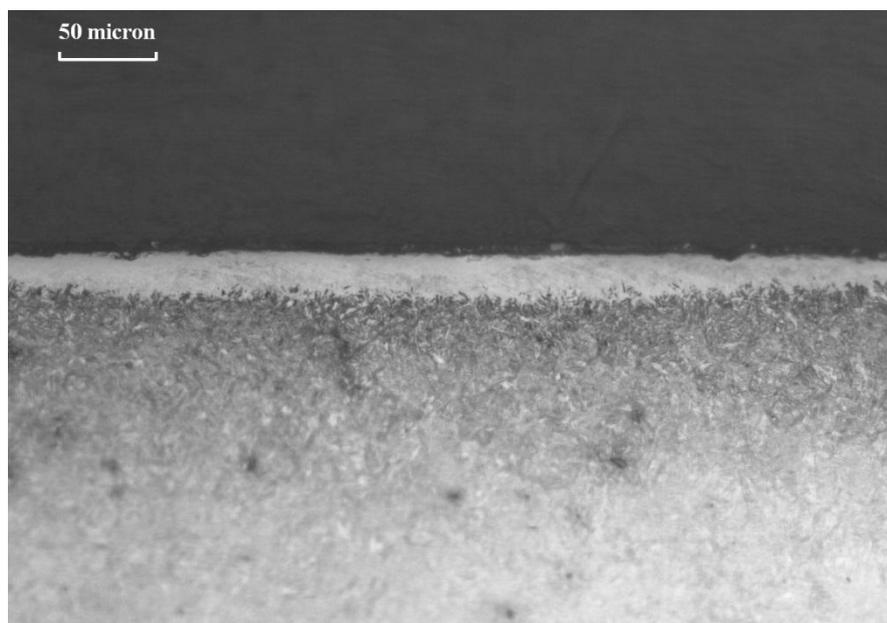
Qualora non avvengano rotture immediate, le tensioni residue possono essere ridotte attraverso un trattamento termico di distensione, eseguito dopo la rettifica. I metodi impiegati per identificare la presenza di tensioni residue nel materiale sono le analisi mediante diffrazione ai raggi X, l'attacco con acidi e l'effetto Barkhausen Noise.

**Grafico 16:** *Diagramma Profondità – Tensioni residue*



La bruciatura con nuova tempra è quel tipo di danneggiamento termico che si presenta nel caso in cui la temperatura della superficie del pezzo rettificato superi quella di austenizzazione, generando un cambio di fase metallurgica nel materiale del pezzo stesso dopo il suo raffreddamento. Si viene a creare in superficie un sottile strato duro e fragile, che va ad indebolire il materiale, poiché ne riduce la resistenza. Questa condizione può peggiorare nel caso in cui si presentino anche delle tensioni residue secondarie che possono comparire a causa del cambio di densità del nuovo materiale formatosi. Questa è la forma più grave di danneggiamento termico e solitamente porta alla rottura del pezzo.

**Figura 25:** *Materiale con danneggiamento termico da nuova tempra*



In generale, durante le lavorazioni di rettifica, le bruciature si manifestano qualora si tenda ad aumentare la produttività del processo, nonostante esso venga eseguito nelle condizioni migliori. L'obiettivo sarà quindi raggiungere alte produttività, mantenendo una costante qualità dei componenti rettificati, grazie alla limitazione delle temperature che questi ultimi assumono nella zona di contatto con la mola. Tale contenimento delle temperature può essere conseguito riducendo lo sviluppo di calore, oppure limitando la quantità di energia termica entrante nel pezzo.

**Applicazione industriale: la rettifica a secco di ingranaggi**

### 3.0 Introduzione

In questi ultimi anni, in particolare nel campo automobilistico, le trasmissioni montate sulle auto, ovvero gli ingranaggi che permettono la trasmissione di potenza nelle auto stesse, hanno subito importanti sviluppi e grandi trasformazioni. Infatti oggi sono presenti nuovi progetti di trasmissione che presentano un numero più elevato di rapporti di trasmissione, arrivando fino a 7/10. Ciò significa che all'interno di un cambio automobilistico vi sono molti più ingranaggi, quindi più ruote dentate. Inoltre aumentano sempre più le richieste da parte del mercato, in termini di riduzione di rumorosità ed aumento di efficienza, che hanno portato a rendere obbligatorio un processo di finitura post-trattamento termico delle ruote dentate. La principale lavorazione di finitura eseguita su di essi è la rettifica. Pertanto alcune aziende del territorio emiliano hanno deciso di analizzare quale tipo di processo poter proporre al mercato per riuscire a migliorare le caratteristiche per l'utilizzatore finale di questo processo, in particolare in termini di costi della lavorazione. Quindi è stato sviluppato un processo che oltre a ridurre il costo dell'investimento iniziale, ovvero una macchina avente un costo minore, presenti anche un minor costo per quanto riguarda gli utensili impiegati.

Finora la maggior parte degli ingranaggi sono stati prodotti pre-trattamento termico con processi di lavorazione a secco e post-trattamento termico l'unica lavorazione che ancora richiede la presenza dell'olio da taglio come lubro-refrigerante è la rettifica. Quindi l'innovazione principale di questo nuovo processo è quella di eseguire la lavorazione di finitura superficiale degli ingranaggi senza l'impiego dell'olio di rettifica. Questa novità ha portato ad ottenere un certo numero di importanti vantaggi nella realizzazione del processo di rettificazione, i quali sono stati elencati dettagliatamente nel Paragrafo 2.1.

Alla luce di quanto è stato detto finora, questo capitolo si occuperà di spiegare quali sono i motivi per cui è necessario eseguire lavorazioni di finitura sulle ruote dentate, qual è il nuovo processo di realizzazione degli ingranaggi sopra citato ed in particolare l'attività sperimentale seguita per arrivare ad eseguire la lavorazione di rettifica a secco.

### 3.1 La finitura degli ingranaggi

Oggigiorno le ruote dentate possono essere realizzate in diversi materiali, ad esempio metalli e polimeri, ma la maggior parte di esse sono costituite da acciai da bonifica o acciai da cementazione. I primi sono impiegati quando il problema della resistenza meccanica è di maggiore importanza rispetto a quello della resistenza ad usura e devono essere limitate le distorsioni dovute al trattamento termico, mentre gli acciai da cementazione sono impiegati quando è necessaria una maggiore durezza superficiale per ridurre l'usura e serve contemporaneamente buona resilienza (tenacità) del materiale a cuore.

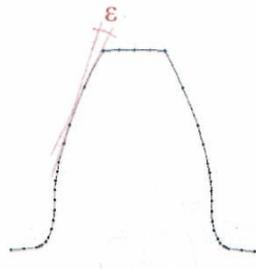
Per quanto riguarda la realizzazione delle ruote dentate esistono due metodi differenti, ovvero per asportazione di truciolo o per deformazione plastica. Il primo procedimento è quello di gran lunga più impiegato a livello industriale. Questo si suddivide ulteriormente in due categorie:

- taglio per divisione, eseguito attraverso utensili di forma, come frese o brocche;
- taglio per involuppo, eseguito mediante utensili non di forma e di conseguenza questo metodo presenta costi inferiori rispetto al primo ed è più utilizzato nel caso si debbano produrre lotti di grandi dimensioni.

Le operazioni appena descritte sono tutte considerate di sgrossatura, poiché non permettono di ottenere denti con profili e fianchi aventi rugosità e qualità geometriche in grado di rispettare le specifiche tecniche richieste. I principali errori riscontrabili nel taglio di una ruota dentata sono i seguenti:

- errore di forma sul profilo del dente, il quale non risulta un arco di evolvente, bensì una spezzata. Questo si verifica in particolare quando le ruote dentate sono fabbricate col creatore, il quale agisce dalla testa fino al piede con un taglio discontinuo, dovuto alla presenza dei vari taglienti agenti sul fianco del dente;

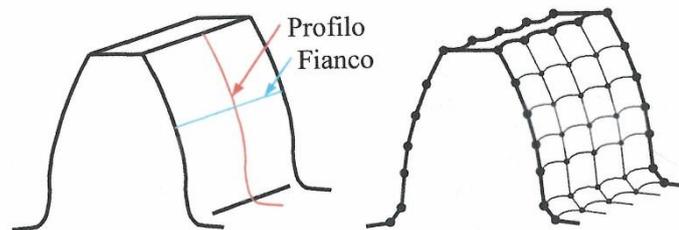
**Figura 26:** *Errore di forma sul profilo del dente*



- errore di forma sul fianco del dente, determinato dall'avanzamento dell'utensile durante il taglio.

Questi due errori di forma generano una “griglia” sul fianco del dente, costituita da più superfici convesse di forma quadrata. Questa si può facilmente osservare dalla figura seguente.

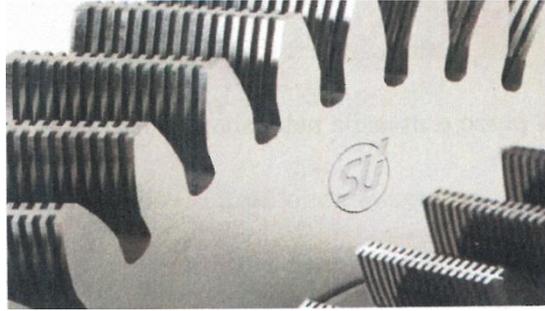
**Figura 27:** *Errori di forma e geometrici sul dente*



A causa di questi errori micro e macro geometrici e a valori troppo elevati di rugosità prodotti durante le lavorazioni di sgrossatura necessarie alla generazione della dentatura, è necessario eseguire delle lavorazioni di finitura delle ruote dentate. Esistono due possibili processi di finitura, la rasatura (detta anche sbarbatura) e la rettifica.

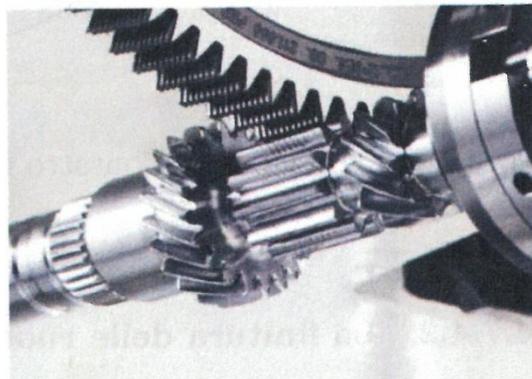
La finitura delle ruote dentate per rasatura viene eseguita grazie all'utensile sbarbatore (o rasatore), il quale è costruito in acciaio rapido o super-rapido ed è simile ad una ruota dentata ad evolvente e lungo i suoi denti sono ricavati dei solchi che formano gli spigoli taglienti necessari ad eseguire il taglio.

**Figura 28:** *Utensile sbarbatore (o rasatore)*



Il processo di rasatura avviene esclusivamente per involuppo tra l'utensile rasatore e la ruota dentata.

**Figura 29:** *Utilizzo utensile sbarbatore*



Grazie a questo processo di finitura è possibile ottenere buoni risultati in termini di geometria e rugosità, ma esso presenta una limitazione, poiché la rasatura non può essere eseguita su quelle ruote dentate che abbiano subito trattamenti termici o termochimici di indurimento superficiale. Quindi quest'ultimi devono essere eseguiti post-finitura, ma ciò va a danneggiare la ruota dentata stessa, poiché si creano distorsioni geometriche e dimensionali che provocano un minore rendimento dell'ingranaggio e maggiore rumorosità della trasmissione, una volta posto in esercizio. Questo limite può essere ovviato grazie al processo di finitura per rettifica.

La rettifica delle ruote dentate viene eseguita mediante apposite mole, aventi una velocità di taglio oltre a 100 m/s. Il processo di taglio può avvenire sia per generazione, cioè per involuppo, sia attraverso mole di forma. Essendo l'utensile per la rettificazione di tipo abrasivo e considerata l'elevata durezza dei grani abrasivi

stessi, il processo di finitura per rettifica può essere eseguito anche su ruote dentate che hanno subito in precedenza trattamenti termici o termochimici, i quali hanno portato ad un indurimento superficiale delle stesse. Quindi il limite della rasatura può essere ovviato in questo modo.

**Figura 30:** *Processo di rettifica di un ingranaggio a denti elicoidali*



### 3.2 Processo sperimentale di rettifica a secco

Il processo sperimentale di rettifica a secco descritto finora, il quale è stato avviato da alcune aziende del territorio emiliano, con la collaborazione delle Università di Bologna e Genova, è stato studiato su un particolare tipo di ingranaggio, del quale possono essere indicate solamente alcune informazioni. I principali dati tecnici dell'ingranaggio impiegato sono esposti nella seguente tabella.

**Tabella 6:** *Dati tecnici dell'ingranaggio*

Materiale	Acciaio da cementazione 27MnCr5
Trattamento termico	Carbocementazione, tempra e rinvenimento
Modulo	1.86 mm

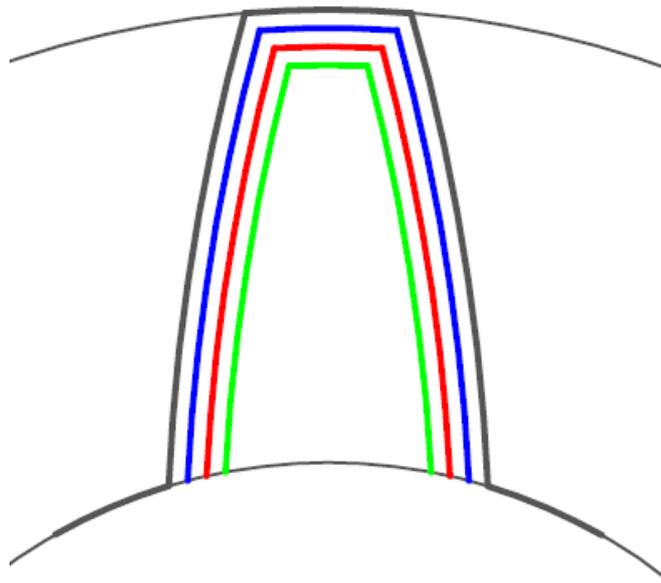
Per quanto riguarda il processo di rettifica a secco eseguito a livello sperimentale, il taglio è stato eseguito attraverso una specifica mola a vite, avente le seguenti caratteristiche: abrasivo in allumina, con grana 80 da finitura e 3 principi.

In generale il processo di sola finitura previsto per la realizzazione di una ruota dentata della tipologia considerata è il seguente (si consideri come parametro di

riferimento la larghezza di fascia della ruota dentata, la quale viene misurata tenendo conto di 5 denti della stessa):

- 1) Si consideri inizialmente il profilo della ruota dentata ottenuta col processo di sgrossatura (profilo grigio in figura 31), la quale dovrà quindi essere finita, per ottenere i dati tecnici esatti della stessa. La larghezza di fascia di partenza è 26.58 mm. La prima operazione di finitura è il taglio con un creatore in metallo duro (questa operazione prende il nome di “skyving”), col quale si ottiene una larghezza di fascia pari a 26.33 mm (profilo blu).
- 2) La seconda operazione di finitura è il processo di rettifica a secco di pre-finitura, col quale la larghezza di fascia scende a 26.01mm (profilo rosso).
- 3) La terza e ultima operazione di finitura è il processo di rettifica a secco di finitura, col quale la larghezza di fascia arriva al valore atteso pari a 26.00mm (profilo verde).

**Figura 31:** *Schema delle fasi relative al processo di finitura dell'ingranaggio considerato*



Questo è il processo di finitura completo che è previsto per la realizzazione di questi ingranaggi, ma in particolare è stato studiato più attentamente il processo di rettifica a secco. Quest'ultimo è stato effettuato variando i parametri di taglio relativi alla lavorazione, in modo da poter osservare le variazioni dei valori relativi alle forze di taglio e alla temperatura.

Oltre a questi elementi sono stati esaminati gli effetti sulla ruota dentata stessa, in particolare i cambiamenti subiti dal materiale. Quindi l'analisi del processo è stata eseguita su campioni di ingranaggi che sono stati lavorati con differenti parametri di lavoro, che in questa sede non possono essere pubblicati per segreto industriale.

### 3.3 Attività sperimentale sui campioni metallografici

#### *3.3.1 Introduzione alle fasi di lavoro*

L'attività sperimentale compiuta nel progetto di ricerca, avente come scopo principale quello di verificare possibili problemi (bruciature) nel materiale dell'ingranaggio rettificato, consta di due parti fondamentali, ovvero una prima preparazione dei campioni metallografici relativi agli ingranaggi rettificati a secco e la successiva analisi degli stessi.

Consideriamo ora la prima parte del progetto, ossia la preparazione dei campioni metallografici. Essa prevede una serie di fasi di lavoro eseguite in sequenza, attraverso le quali è possibile ottenere un provino metallografico, che potrà poi essere analizzato. Esse sono:

- troncatura a freddo delle ruote dentate rettificate per ottenere i campioni metallografici, attraverso la troncatrice;
- inglobatura dei campioni per ottenere i provini metallografici, attraverso inglobatrice;
- lucidatura dei provini, impiegando due tecniche differenti, utilizzando una lappatrice;
- attacco chimico al Nital per mettere in evidenza la struttura metallografica dell'acciaio.

Nei successivi sottoparagrafi verranno espone in maniera dettagliata le varie fasi di lavoro sopra elencate.

L'analisi dei provini metallografici prevede due fasi di lavoro, ovvero un primo esame al microscopio ottico dei provini attaccati chimicamente e una successiva realizzazione di foto delle zone dei campioni più significative, per poter eseguire poi un'analisi finale delle microstrutture presenti nel materiale. I risultati ottenuti da questa analisi saranno spiegati nel paragrafo 3.4.

### 3.3.2 Taglio degli ingranaggi a freddo

La prima fase svolta per poter analizzare i fianchi dei denti rettificati a secco è il taglio dell'ingranaggio a freddo. I dispositivi e le macchine impiegate per questa fase di lavoro sono la smerigliatrice e la troncatrice con taglio a mola.

**Figura 32:** Mola da taglio per troncatrice



L'operazione di taglio a freddo inizia dalla singola ruota dentata e prevede due fasi di taglio. Il primo taglio viene eseguito manualmente bloccando con una morsa la ruota dentata e utilizzando la smerigliatrice per ottenerne una porzione, come è possibile osservare in figura.

**Figura 33:** Porzione di ruota dentata tagliata



Successivamente la porzione così ottenuta è suddivisa in ulteriori porzioni di 3 denti ciascuna attraverso la troncatrice. Infine viene eseguito il taglio finale lungo la fascia della porzione di ruota dentata che è stata ottenuta. Quest'ultimo piano di sezione è posizionato perpendicolare all'asse della ruota e nella mezziera della sua fascia. Il risultato finale di questo taglio è la realizzazione di un campione metallografico, che verrà poi impiegato nelle fasi di lavorazione successive.

**Figura 34:** *Porzione ruota dentata con 3 denti*



### *3.3.3 Inglobatura dei campioni metallografici*

La seconda fase svolta per poter analizzare i fianchi dei denti rettificati a secco è l'inglobatura dei campioni metallografici precedentemente ottenuti. La macchina impiegata per questa lavorazione è l'inglobatrice.

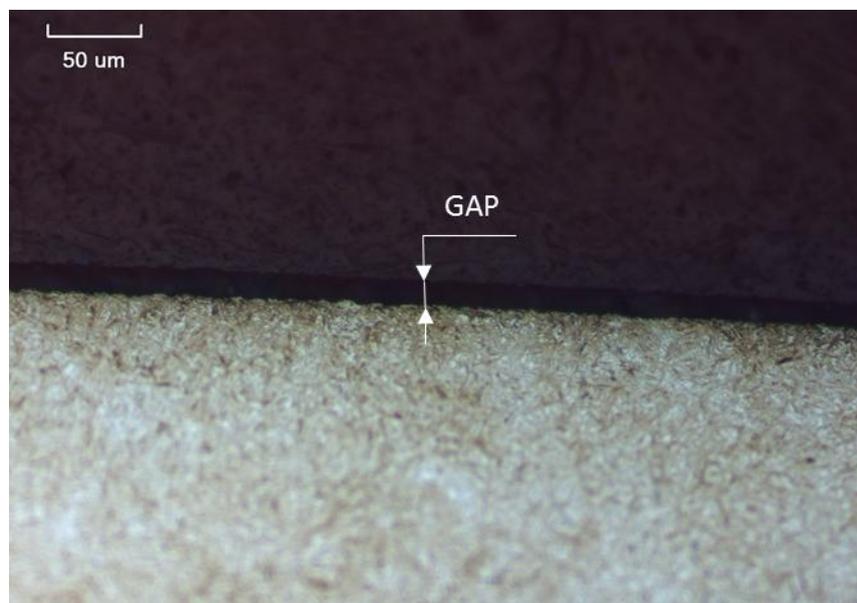
Inizialmente è stata utilizzata una resina fenolica termoindurente di colore rosso, bakelite, con la quale sono stati realizzati alcuni provini metallografici.

**Figura 35:** *Provino metallografico con bakelite*



Una volta eseguita la successiva lucidatura è stato riscontrato, grazie ad un'analisi al microscopio ottico, che tra resina e campione metallografico si viene a creare un gap, dovuto al fatto che si ha una scollatura tra i due elementi del provino. Questo risultato è inaccettabile, poiché all'interno di questo interstizio, che determina ovviamente una mancanza di continuità del provino stesso, si crea uno spazio in cui le bave si depositano rendendo inutilizzabile il campione.

**Figura 36:** *Gap presente tra la resina e il campione*



Per ovviare al problema appena descritto sono stati introdotti due differenti tipi di resina, una di colore nero in materiale epossidico e una bianca in materiale organico.

Grazie all'utilizzo di queste resine il risultato finale è quello desiderato, come è possibile osservare nella seguente figura, in cui non si ha la presenza di un gap tra resina e campione metallografico.

**Figura 37:** *Gap assente tra la resina e il campione*



**Figura 38:** *Provino con resina bianca*



### *3.3.4 Lucidatura dei provini metallografici*

La terza fase svolta per poter analizzare i fianchi dei denti rettificati a secco è la lucidatura dei provini metallografici. La macchina impiegata per questa lavorazione è la lappatrice.

La lappatrice è la macchina che permette di eseguire il processo di lappatura sui provini metallografici. Lo scopo di questa operazione è quello di ridurre al minimo la rugosità superficiale degli stessi ed eliminare qualsiasi asperità superficiale o “graffio”. Questo avviene grazie a particolari superfici abrasive, che agendo sul provino permettono di ottenere una vera e propria superficie “a specchio” dello stesso. Le superfici abrasive possono essere principalmente di due tipi e in base alla tipologia impiegata sono stati sviluppati due processi differenti per questa fase di lavoro:

– PROCEDURA TRADIZIONALE:

Questo processo prevede l'impiego di carte abrasive. L'operazione di lappatura attraverso queste carte avviene in più step, partendo da superfici abrasive con grani più grossolani e passando via via a superfici con granulometria sempre più fine. La prima carta abrasiva utilizzata avrà un tempo di lavoro di circa 5-10 minuti, mentre per le successive carte è previsto un tempo di circa 5 minuti. Durante il funzionamento il disco deve essere sempre bagnato attraverso un getto d'acqua a bassa pressione.

Una volta lucidati i campioni attraverso le carte abrasive si ha l'ultima fase della lappatura, in modo tale da ottenere la superficie “a specchio” voluta. Essa consiste in una lucidatura finale con un panno e in questo caso il tempo di processo è di circa 5 minuti. Ogni 2 minuti di funzionamento deve essere versata sul panno posto in rotazione grazie al piattello una sospensione di allumina con granulometria pari a  $0.05\mu\text{m}$ .

**Figura 39:** *Esempio di carta abrasiva*

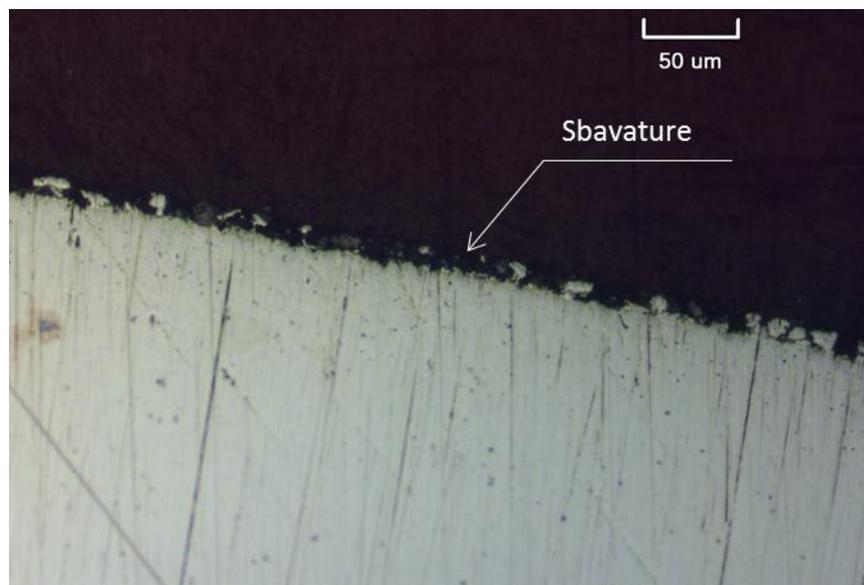


**Figura 40:** *Panno per la fase finale di lappatura*



Utilizzando la procedura tradizionale appena descritta, si può riscontrare, grazie ad un'analisi al microscopio ottico, che vi sono problemi di messa a fuoco del campione metallografico e sbavature dovute ad una non perfetta lucidatura dello stesso.

**Figura 41:** *Campione metallografico con sbavature*



Le cause di questi problemi sono il fatto che l'effetto abrasivo delle carte sia ridotto nel tempo, che l'unione tra carta abrasiva e piattello avvenga attraverso una superficie adesiva (minor rigidità ed inesatta planarità delle superfici) e che la densità dei grani sulla superficie abrasiva sia la stessa in tutti i suoi punti (effetto abrasivo diverso per ogni campione). Per far fronte ai problemi appena citati si fa riferimento alla nuova procedura.

– NUOVA PROCEDURA:

Questo processo prevede l'impiego di dischi aventi una superficie abrasiva e l'altra magnetica, in modo da poter essere posizionati sopra un piattello in metallo ferromagnetico. I grani abrasivi dei dischi sono costituiti da diamante.

**Figura 42:** *Piattello magnetico*



Il fatto che il disco sia metallico e che il collegamento tra piattello e disco sia magnetico garantiscono una maggiore rigidità del disco stesso e di conseguenza una migliore planarità della superficie dei campioni metallografici.

Un ulteriore vantaggio di questi dischi riguarda l'usura, la quale è molto più lenta rispetto alle carte abrasive, per cui l'effetto levigante viene mantenuto per un tempo maggiore.

Inoltre durante il ciclo di lavoro di questi dischi non si consuma soltanto l'abrasivo, ma anche il legante, mentre per le carte abrasive questo non è vero, poiché si consuma soltanto l'abrasivo. Quindi, durante il processo di lucidatura, è possibile mantenere sempre la stessa densità di grani abrasivi in ogni punto della superficie. Questo permette di mantenere fino alla completa usura del disco il medesimo effetto abrasivo.

Al contrario delle carte abrasive, in questi dischi, spostandosi radialmente dal centro, verso l'esterno, la densità dei grani abrasivi diminuisce gradualmente.

Questo permette di avere su tutti i punti del disco la stessa azione abrasiva, al contrario di ciò che avviene nella procedura tradizionale descritta precedentemente.

Anche in questo caso il processo di lucidatura viene eseguito in più step successivi, ma si ha un numero minore di dischi da utilizzare per eseguire la lucidatura rispetto al numero delle carte abrasive usate con la procedura tradizionale ed il tempo di lucidatura per ogni disco è di circa 2 minuti. Questo significa che oltre ai vantaggi precedentemente illustrati, anche in termini di tempo si ha un guadagno. Questi dischi devono essere lievemente bagnati, poiché altrimenti si crea il fenomeno dell'acquaplaning e l'effetto abrasivo viene a mancare.

**Figura 43:** *Esempio di disco abrasivo*



Come per la procedura tradizionale, anche in questo caso una volta eseguita la lucidatura coi dischi, si deve finire la superficie del campione con i panni, andando però ad utilizzare una sospensione diamantata.

**Figura 44:** *Campione metallografico privo di sbavature*



### *3.3.5 Attacco chimico al Nital*

La quarta fase svolta per poter analizzare i fianchi dei denti rettificati a secco è l'attacco al Nital dei provini metallografici. La soluzione di alcol e acido nitrico, più comunemente definita Nital, è un reagente chimico impiegato per mettere in evidenza la struttura metallografica di un acciaio e i suoi costituenti.

La procedura consiste nel bagnare l'intera superficie del campione metallografico con il Nital, attendere una decina di secondi (non tempi troppo elevati altrimenti si creano le bruciature da attacco chimico) perché il reagente faccia effetto e risciacquare immediatamente il provino. Successivamente si deve asciugare il campione.

**Figura 45:** *Provino non attaccato chimicamente*



**Figura 46:** *Provino attaccato chimicamente*



### 3.4 Risultati dell'analisi

Come è stato accennato nel paragrafo 3.2, gli ingranaggi considerati per eseguire l'analisi sperimentale sono stati rettificati a secco con parametri di lavoro differenti, in modo da variare le forze di taglio e di conseguenza la temperatura presente nella zona di taglio. Tutto ciò va a provocare differenti effetti sul materiale delle ruote dentate, arrivando perfino a generare danneggiamenti termici dello stesso, ovvero bruciature da rettifica. Pertanto sono stati realizzati, con la procedura vista nel paragrafo precedente, dei provini metallografici per ogni ingranaggio rettificato a secco con parametri di lavoro differenti. Grazie all'analisi al microscopio ottico di questi provini metallografici è possibile determinare la presenza o meno di bruciature nel materiale della ruota dentata ed in particolare come variano i danneggiamenti termici al variare dei parametri di taglio.

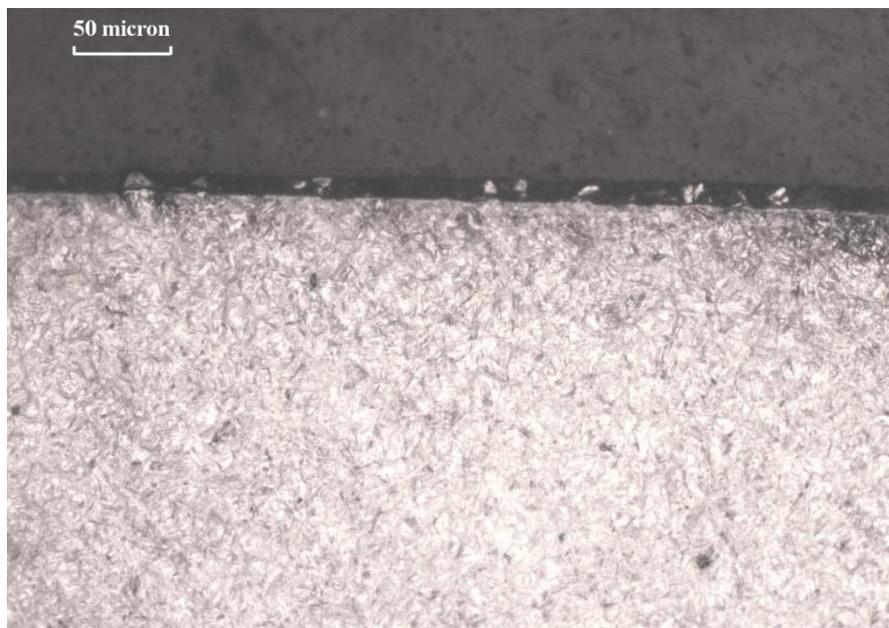
L'analisi sperimentale è stata eseguita su quattro gruppi di ingranaggi (A, B, C, D), rettificati a secco con parametri di taglio differenti. Considerando i quattro gruppi di ingranaggi in ordine alfabetico, tra l'uno e l'altro si ha un incremento del 25% della potenza di taglio impiegata per eseguire il processo di rettifica a secco degli ingranaggi. Di conseguenza un incremento della potenza di taglio provocherà un rispettivo aumento delle forze di taglio, che a sua volta porterà ad un maggiore sviluppo di calore. Quest'ultimo andrà ad incrementare la temperatura nella zona di taglio, generando possibili danneggiamenti termici nel materiale presente nel fianco

rettificato della ruota dentata. In questa sede, per il segreto industriale, non è possibile indicare ulteriori informazioni relative ai parametri di taglio.

I risultati ottenuti dall'analisi sperimentale sui quattro gruppi di ingranaggi sono i seguenti:

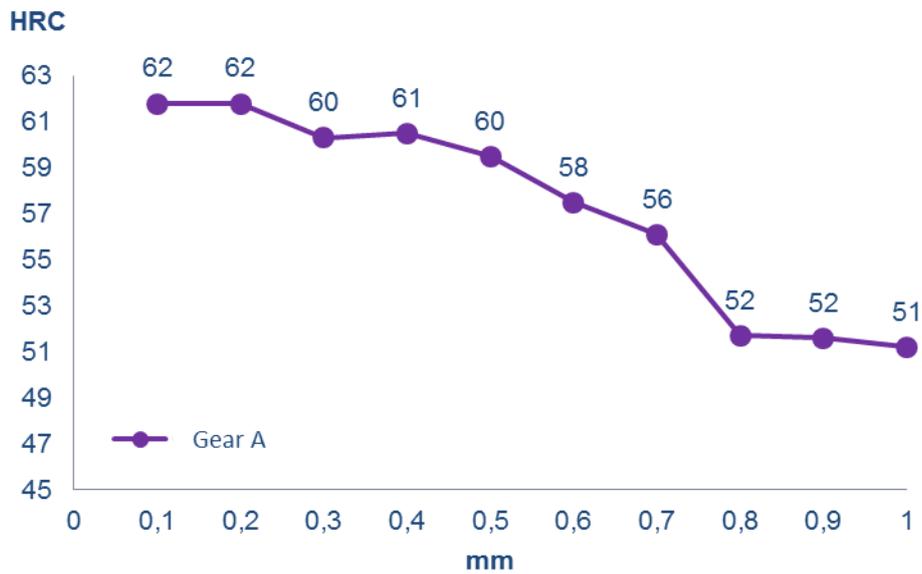
- La ruota dentata del gruppo A è stata rettificata a secco attraverso parametri di taglio che come è possibile osservare in figura non hanno provocato alcun danneggiamento termico nel materiale.

**Figura 47:** *Campione metallografico della ruota dentata A, privo di bruciature*



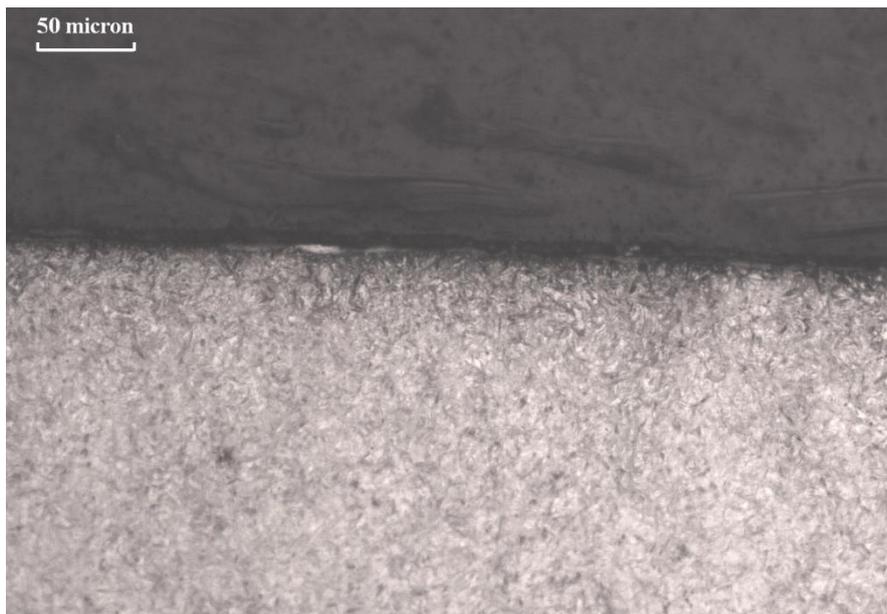
Osservando il seguente grafico, relativo all'andamento della durezza del materiale dalla superficie a cuore, misurata in punti HRC, è possibile verificare ulteriormente che non vi sono danneggiamenti termici dello stesso, poiché in superficie non si ha un calo di durezza, poiché il valore è pari a 62 HRC, cioè quello ottenuto col trattamento termico di carbocementazione.

**Grafico 17:** *Andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggio A)*



- La ruota dentata del gruppo B è stata rettificata a secco attraverso parametri di taglio che come è possibile osservare in figura hanno provocato un lieve danneggiamento termico nel materiale. Lo si può intuire dalla presenza di zone bianche (coltre bianca) presenti in superficie, le quali risultano essere comunque ridotte.

**Figura 48:** *Campione metallografico della ruota dentata B, con lievi bruciature*



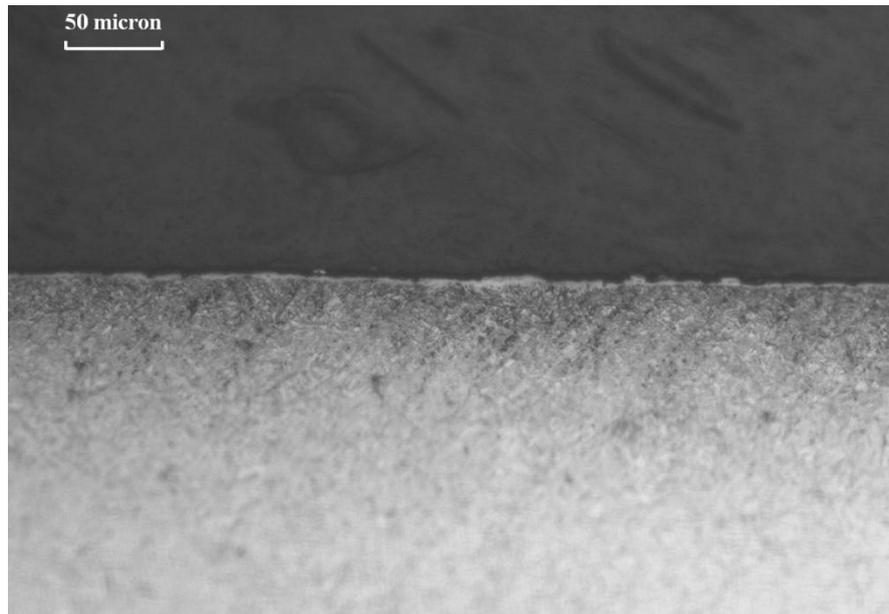
Osservando il seguente grafico, relativo all'andamento della durezza del materiale dalla superficie a cuore, misurata in punti HRC, è possibile verificare ulteriormente che vi è un lieve danneggiamento termico dello stesso, poiché in superficie si ha un leggero calo di durezza, poiché la curva scende leggermente spostandosi verso la superficie, nonostante il valore sia pari a 62 HRC, cioè quello ottenuto col trattamento termico di carbocementazione.

**Grafico 18:** *Andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggio B)*



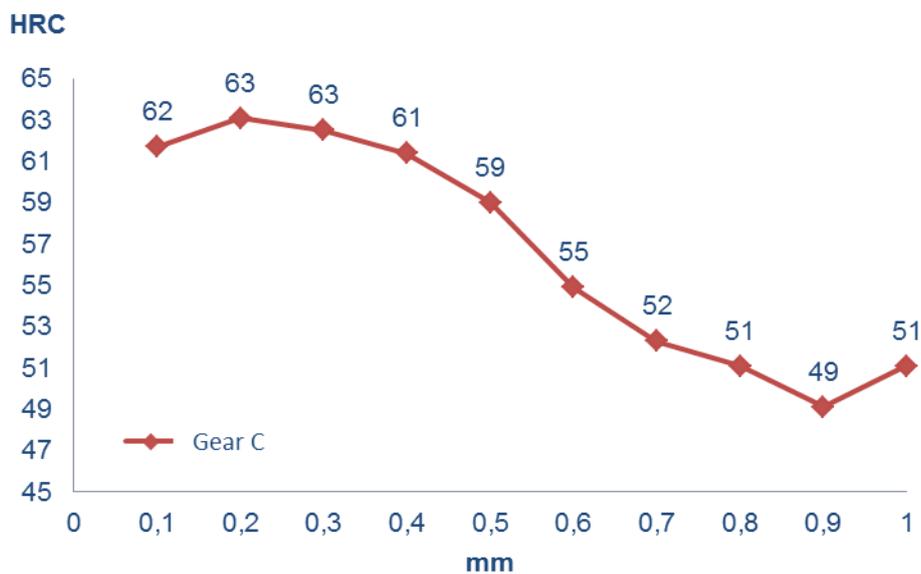
- La ruota dentata C è stata rettificata a secco attraverso parametri di taglio che come è possibile osservare in figura hanno provocato una media bruciatura nel materiale. Lo si può intuire dalla presenza di un numero maggiore di zone bianche presenti in superficie rispetto all'ingranaggio del gruppo B. Inoltre esse risultano essere più estese.

**Figura 49:** Campione metallografico della ruota dentata C, con medie bruciature



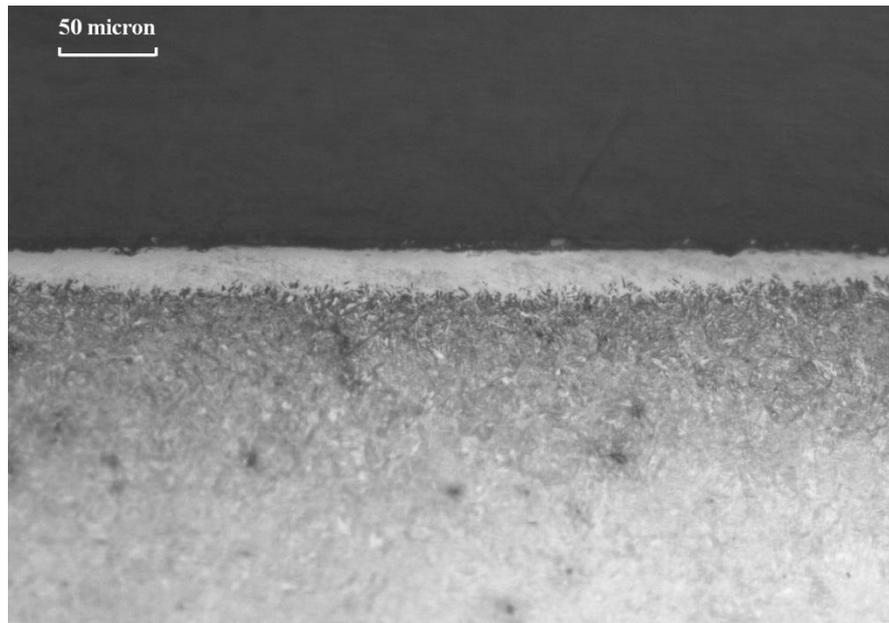
Osservando il seguente grafico, relativo all'andamento della durezza del materiale dalla superficie a cuore, misurata in punti HRC, è possibile verificare ulteriormente che esso presenta una media bruciatura, poiché in superficie si ha un sensibile calo di durezza. Infatti la curva scende dal valore di 63 HRC, ottenuto col trattamento termico di carbo-cementazione, al valore di 62 HRC, spostandosi verso la superficie.

**Grafico 19:** Andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggio C)



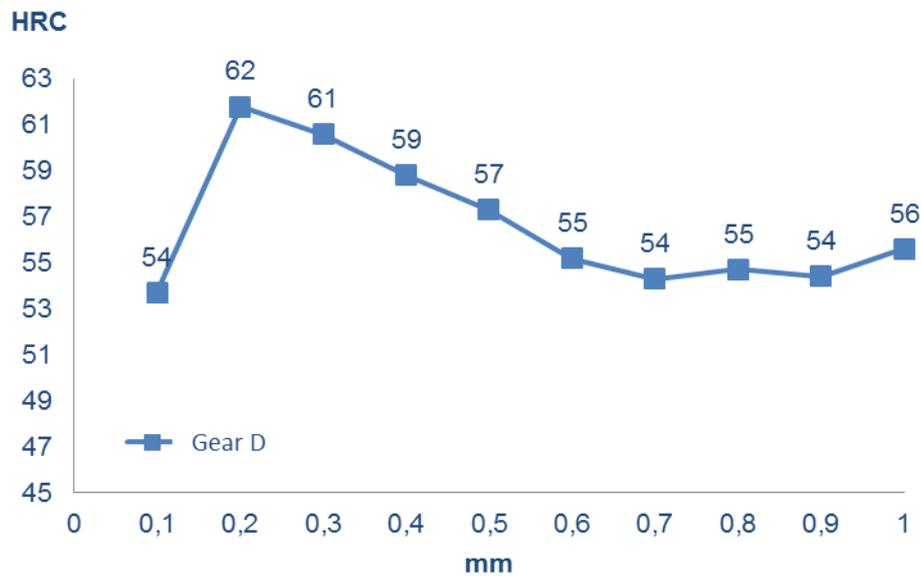
- La ruota dentata del gruppo D è stata rettificata a secco attraverso parametri di taglio che come è possibile osservare in figura hanno provocato una bruciatura severa nel materiale. Lo si può intuire dalla presenza di un fitto strato di coltre bianca in superficie.

**Figura 50:** *Campione metallografico della ruota dentata D, con bruciature severe*



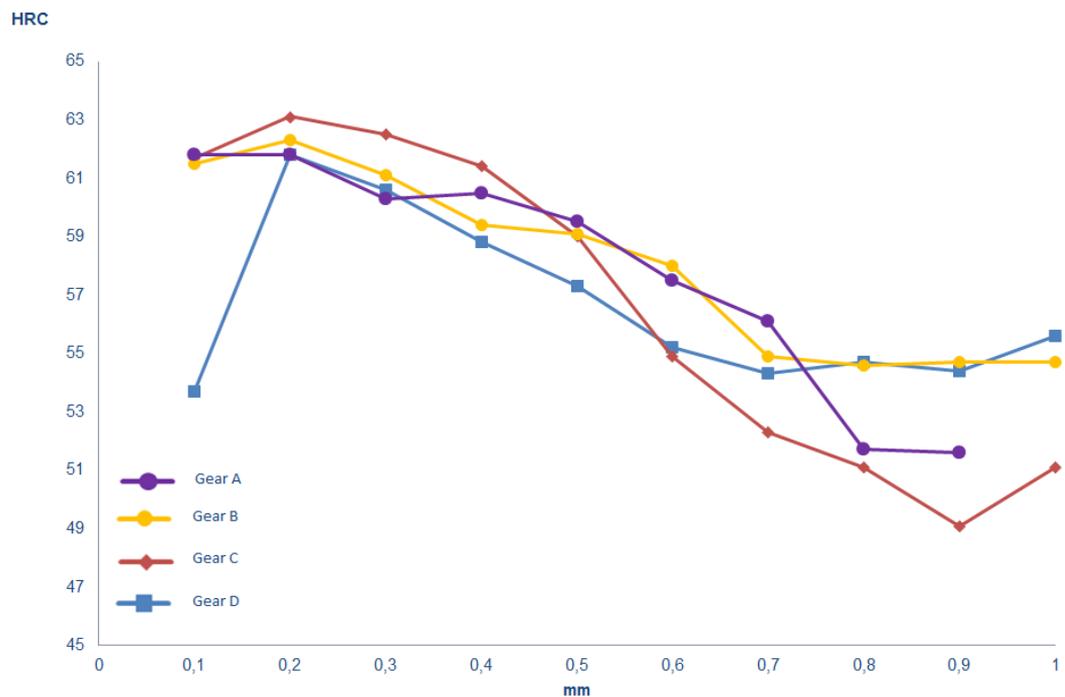
Osservando il seguente grafico, relativo all'andamento della durezza del materiale dalla superficie a cuore, misurata in punti HRC, è possibile verificare ulteriormente che esso presenta una bruciatura severa, poiché in superficie si ha un elevato calo di durezza. Infatti la curva scende dal valore di 62 HRC, ottenuto col trattamento termico di carbo-cementazione, al valore di 54 HRC, spostandosi verso la superficie.

**Grafico 20:** *Andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggio D)*



Nel seguente grafico è possibile eseguire un confronto tra le varie curve che descrivono l'andamento della durezza del materiale costituente i quattro tipi di ingranaggi considerati, spostandosi dalla superficie a cuore.

**Grafico 21:** *Confronto andamento durezza da superficie a cuore (ingranaggi A, B, C, D)*



## **Conclusioni**

---

### Conclusioni

Questa tesi di laurea è nata da un progetto di ricerca tra alcune aziende del territorio emiliano e le Università di Bologna e Genova, con lo scopo principale di implementare un processo di rettifica a secco di ingranaggi automobilistici, in maniera da avere diversi vantaggi, in termini economici, energetici ed ambientali.

Sono stati studiati gli effetti generati sul materiale costituente le ruote dentate, in base alla variazione dei parametri di taglio, in modo da capire quando il processo di rettifica a secco permette di ottenere ingranaggi in grado di rispettare le specifiche richieste da progetto e quando invece essi sono da scartare. Questo aspetto del progetto di ricerca risulta essere fondamentale dal punto di vista della produzione industriale per capire fino a che punto può essere “spinta” la produttività della macchina, senza avere pezzi danneggiati. Nonostante non sia possibile indicare informazioni dettagliate riguardo i parametri di lavoro sono stati eseguiti confronti dettagliati tra quattro gruppi di ingranaggi lavorati con parametri di taglio diversi tra loro.

Infine dal punto di vista della procedura sperimentale, fondamentale per ottenere i provini metallografici necessari a realizzare l’analisi da cui sono stati ottenuti i risultati di cui si è parlato poc’anzi, è stato possibile costruire un processo costituito da più fasi, grazie al quale si possono realizzare campioni metallografici di ottima qualità.

Grazie a questo progetto di ricerca è avvenuta un’importante innovazione nel mondo dei processi per asportazione di truciolo, in particolare per la rettifica, grazie alla rimozione degli olii lubro-refrigeranti.

## **Bibliografia**

---

- [1]. Fortunato A., Ascari A., Liverani E., *Tecnologia Meccanica. Introduzione alle lavorazioni per asportazione di truciolo*, Società editrice Esculapio, 2016. ISBN 978-88-7488-955-6.
- [2]. Relazione di tirocinio curricolare, Forlai D., *Titolo: Analisi metallografica di ingranaggi automotive per l'identificazione di bruciature da rettifica*, a.a. 2015/2016.
- [3]. Dispensa M.Z.F. srl, *RETTIFICA degli acciai superrapidi*.

---

### Articoli scientifici

- [1]. Single grain grinding: an experimental and FEM assesment. Guerrini G., Bruzzone A.A.G., Crenna F. 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16.

---

### Siti Web

- Wikipedia:  
[https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo\\_degli\\_elementi\\_finiti](https://it.wikipedia.org/wiki/Metodo_degli_elementi_finiti)