

POLITECNICO DI TORINO

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi di Laurea Magistrale

**Resistenza a fatica in campo LCF della sede attacco
pala sul disco di turbina a temperatura ambiente e
ad alte temperature**



Relatore:

Prof. Daniele Botto

Candidato:

Davide Bongiovanni

Indice

1.	INTRODUZIONE ED OBIETTIVI	1
2.	SOMMARIO	2
3.	ANALISI DEL PROBLEMA.....	3
3.1	Studio preliminare	3
3.2	Analisi stato tensionale	7
4.	PROVE A TEMPERATURA AMBIENTE.....	10
4.1	Analisi dei risultati	14
4.1.1	Effetti lavorazione meccanica	16
4.1.2	Effetti finitura superficiale	17
4.1.3	Relazione carico – profondità cricca	19
5.	PROVE AD ALTE TEMPERATURE.....	23
5.1	Fase preparatoria	23
5.1.1	Calibrazione termica Termocoppia e Pirometro.....	23
5.1.2	Settaggio emissività.....	27
5.1.3	Rilevamento ΔT tra centro e Termocoppia per controllo automatico	28
5.1.4	Mappatura della Temperatura sulla faccia sx del provino.....	30
5.1.5	Tensioni generate dal gradiente termico interno	33
5.2	Fase esecutiva delle prove	34
5.2.1	Montaggio del provino	34
5.2.2	Riscaldamento preventivo del provino	35
5.2.3	Prova con ciclo chiuso per controllo temperatura	35
5.3	Analisi dei risultati e della rottura imprevista	38
6.	CONCLUSIONI.....	45
I	Conclusioni su prove a temperatura ambiente.....	45
II	Conclusioni su prova ad alte temperature.....	44
	APPENDICI.....	48
I	LA FATICA e LOW CYCLE FATIGUE	49
I.I	Generalità sulla fatica	49
I.II	Low cycle fatigue	51
I.III	Parametri influenzanti la vita a fatica	55
II.I	BROCCIATURA	70

II.II	FRESATURA.....	73
II.III	LAVORAZIONE ELETTROCHIMICA	76
II.IV	CONFRONTO TRA LAVORAZIONI	78
III	MACCHINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATE.....	80
III.I	MACCHINA SCHENCK HYDROPULPS 750	80
III.II	UTILIZZO MACCHINA SCHENCK	82
III.III	MACCHINA INSTRON 8801	87
III.IV	RISCALDATORE AD INDUZIONE	94
III.VI	PIROMETRO.....	96
III.VII	TERMOCOPPIA	97
	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	101

1. INTRODUZIONE ED OBIETTIVI

La turbina di alta o di bassa pressione è un componente di fondamentale importanza in un motore aeronautico. In essa avviene l'espansione dei gas ad alta pressione e ad elevata temperatura provenienti dal compressore e dal combustore. Alla luce della condizione critica in cui si trovano a lavorare, i singoli componenti di una turbina aeronautica sono oggi oggetto d'importanti studi e ricerche che spaziano dalla meccanica, la fluidodinamica e la scienza dei materiali, con l'obiettivo di aumentarne l'efficienza, la sicurezza e migliorarne la produzione.

La turbina è soggetta ad importanti campi di tensione, operando in condizioni estreme dovute alla propria velocità di rotazione ed alle elevate temperature che si registrano all'interno.

La presente Tesi s'inserisce in un progetto di ricerca più ampio, realizzato in collaborazione con GE Avio, azienda aeronautica specializzata nella produzione di turbine di bassa pressione. È stato condotto lo studio del comportamento a fatica a basso numero di cicli ed alte tensioni della sede di attacco della paletta nel disco di turbina, essendo una zona di consistenti effetti di intaglio e concentrazioni di tensioni. Il lavoro di ricerca si collega a quello iniziato in una Tesi precedente, di cui ne è la naturale continuazione, con il cui autore ho collaborato e condiviso i principali risultati.

In primis sono stati studiati gli effetti di differenti lavorazioni effettuate nella zona intagliata, per stabilire quale sia la meno peggiorativa della vita a fatica. Nella seconda parte si è spostata l'attenzione sull'influenza delle elevate temperature operative sulla vita a fatica del componente.

I risultati ottenuti sono stati utilizzati per realizzare, in ultima istanza, la curva σ -N per il materiale e la geometria studiati.

2. SOMMARIO

Il seguente lavoro di ricerca è partito dall'attività e dai risultati precedentemente sviluppati nella Tesi del mio collega Tommaso Battocchio, di cui ne è la continuazione.

Prima dello svolgimento delle prove di laboratorio vere e proprie, è stato svolto uno studio del problema con lo scopo di avere il maggior numero di dati necessari a stabilire la situazione iniziale.

Le prove di laboratorio sono state svolte su provini parallelepipedi con un intaglio simmetrico sulla faccia sinistra e destra, che rappresentasse in scala la sede dell'attacco della paletta sul disco di turbina. Trascurando il problema più complesso del contatto tra disco e pala, essi sono stati sottoposti a prove di fatica, caricati con forze assiali di trazione simulanti le forze circonferenziali che agiscono nella reale applicazione. Inoltre si è tenuto conto anche della tensione generata dagli afferraggi della macchina di prova. Tutto questo stato tensionale è stato preliminarmente studiato con ANSYS, software per analisi agli elementi finiti, per avere un'idea della distribuzione di tensioni nella zona intagliata, della tensione massima raggiunta e della sua localizzazione.

Altro parametro fondamentale che è stato analizzato prima delle prove vere e proprie è la rugosità superficiale di ogni provino nella zona intagliata, misurata con un microscopio elettronico; essa è legata alla qualità della lavorazione eseguita sul componente ed è rilevante nella vita a fatica del componente stesso. Da un confronto rugosità – numero di cicli di vita, è possibile fornire una valutazione su quale sia la lavorazione, tra quelle studiate, che migliori la resistenza del provino alla fatica.

Le prove vere e proprie sono state svolte con una macchina di trazione Instron, una parte a temperatura ambiente ed una parte a temperature nettamente superiori, vicine a quelle reali di lavoro nella turbina.

Al termine delle prove, per ogni provino sono stati raccolti i dati sul numero di cicli di vita, deformazioni elastiche e plastiche subite. Sono state raccolte tutte le immagini delle zone di rottura, da cui sono state misurate l'altezza e la profondità della cricca, entrambe messe in relazione al carico a cui è stato sottoposto il provino.

Inoltre, con l'ausilio di un estensometro legato al provino, si è studiata la variazione dei cicli di isteresi nel piano σ - ϵ all'aumentare del numero di cicli.

3. ANALISI DEL PROBLEMA

3.1 Studio preliminare

La turbina è uno dei componenti più critici di un motore aeronautico, dal momento che opera in condizioni estreme dovute alle sue elevate velocità di rotazione ed alle alte temperature a cui si trova a lavorare.

L'attenzione della presente ricerca si è concentrata sul disco di turbina, il quale è sottoposto all'azione contemporanea di tre differenti sorgenti di tensioni: la forza centrifuga agente sul disco, le forze aerodinamiche e centrifughe derivanti dalla presenza delle palette, agenti sulla sede dell'attacco pala sul disco stesso ed i forti gradienti termici esistenti. Witek [1] scrisse che i dischi di turbina presentano tre zone critiche su cui concentrare l'attenzione: la zona di contatto della sede attacco pala, il fondo della sede stessa ed i fori di assemblaggio. Sottolineò come l'attacco tra la palette della turbina ed il disco rappresenti solitamente l'area più critica dal punto di vista della resistenza statica e di quella a fatica; in questa zona.

In questo studio però sono stati tralasciati i problemi legati al contatto e ci si è concentrati sull'analisi del fondo della sede attacco pala.

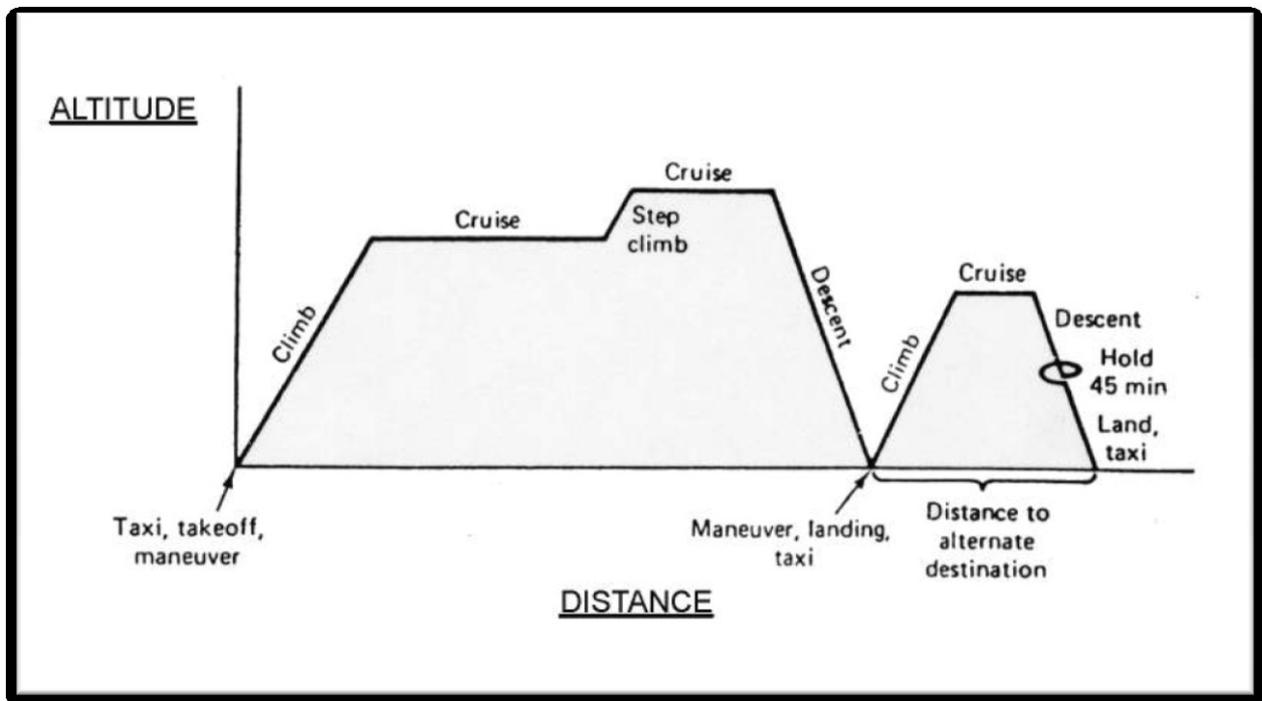


Figura 1: Profilo di missione aereo civile

L'analisi del problema deve necessariamente partire dalla determinazione più o meno dettagliata del profilo di missione tipico del velivolo su cui viene installato il motore in oggetto, in modo tale da quantificare le velocità di rotazione a cui lavora la turbina nelle varie fasi della missione ed i tempi di permanenza in quelle condizioni. Inoltre è necessario mappare la variazione di temperatura in funzione del tempo di volo. Unendo tutte queste informazioni è possibile calcolare le tensioni agenti nel disco di turbina.

Supponendo di sezionare il disco di turbina in corrispondenza di uno slot di attacco pala, il risultato sarebbe quello riportato in Figura 2:

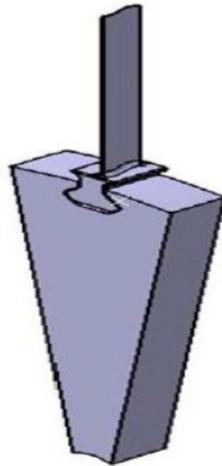


Figura 2: Sezione disco relativa a singolo slot

Schematizzando le forze agenti nella zona della sede attacco pala come in Figura 3, è possibile scomporre la forza centrifuga della paletta in una componente tangenziale ed una normale. Così facendo è possibile ricavare la componente circonferenziale di tale forza agente sul disco. È evidente ed importante per lo studio che questa forza risulti sempre di trazione e mai di compressione; tale situazione è stata fondamentale nelle prove pratiche, avendo cercato di evitare qualsiasi tipo di carico di compressione eventualmente subito dai provini.

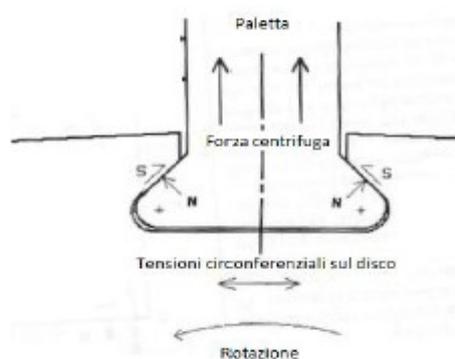


Figura 3: Forze agenti su sede attacco paletta

La forza centrifuga viene calcolata come segue:

$$F_c = m\omega^2 r$$

I cui termini rappresentano:

- m: massa relativa al disco o alla paletta
- ω : velocità angolare
- r: raggio rispetto al centro di rotazione

E' quindi evidente la forte dipendenza (quadratica) della forza centrifuga, e conseguenti tensioni, dalla velocità di rotazione della turbina. Ulteriore dipendenza evidente è quella dalla geometria e dal materiale (all'interno del termine m).

Con l'ausilio di software per analisi agli elementi finiti è possibile ottenere una mappatura delle tensioni presenti su un disco di turbina, come riportato in Figura 4. Uno studio analogo è stato fatto con il software ANSYS per studiare la distribuzione delle tensioni sui provini, ed in un secondo momento la distribuzione delle temperature sullo stesso.

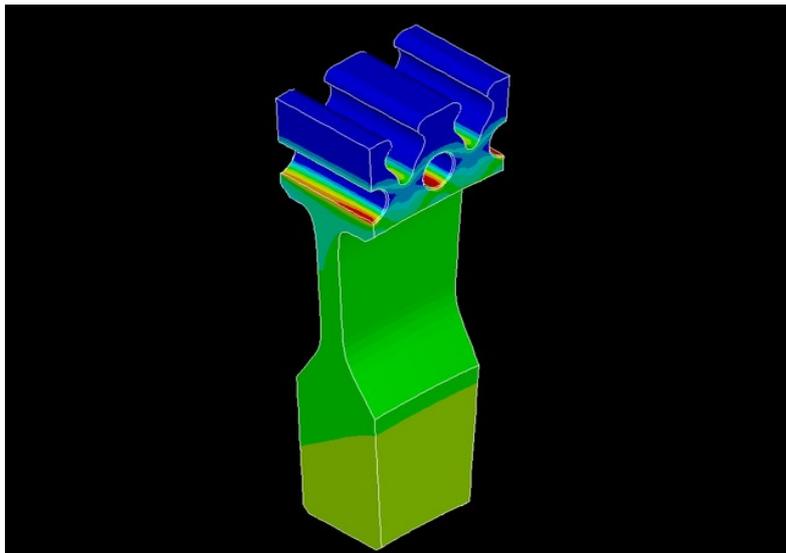


Figura 4: Esempio campo di tensioni in disco di turbina [2]

Andando a concentrare la ricerca sulla zona più esterna del disco, nell'intorno della sede di attacco pala, è possibile semplificare, con una geometria piana caricata assialmente, una geometria che nella realtà è leggermente curva e con carico circonferenziale.

Alla luce di queste considerazioni, i provini forniti da GE Avio sono stati realizzati con una geometria simile a quella della sede dell'attacco pala del disco del quinto stadio di una turbina aeronautica. In Figura 5 viene riportato il disegno tecnico dei provini utilizzati, privato di quote per riservatezza aziendale.

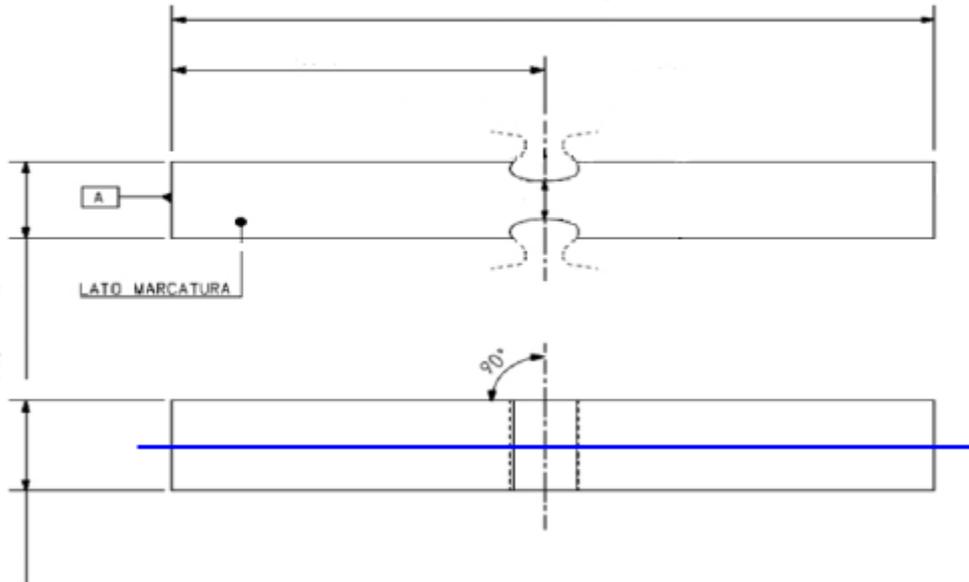


Figura 5: Disegno tecnico provino

Come si può notare, il provino è un parallelepipedo intagliato. Nella figura è tratteggiata la continuazione della geometria della sede attacco pala. Dal momento che l'attenzione di questa ricerca è incentrata sulla zona intagliata, viene tralasciata (e non realizzata) la parte più esterna della sede.

Il materiale con cui sono stati realizzati i provini è INCONEL 718 [Appendice IV], una lega formata principalmente da 48-72 % di Nichel e 14-29% di Cromo. Questo materiale è spesso usato nell'industria aerospaziale per la sua elevata resistenza alla corrosione, alle alte temperature ed all'ossidazione, oltre che all'ottima resistenza a fatica. Le caratteristiche del materiale specificatamente utilizzato, sono state fornite dall'azienda per lo studio:

N.B. i valori più importanti sono stati segretiati per riservatezza aziendale.

Materiali	Inconel 718
Ultimate tensile strength	** Mpa
Yeld tensile strength	** MPa
Modulo di elasticità E	208320 Mpa
Coefficiente di Poisson ν	0.3

Tabella 1: Caratteristiche Inconel 718

3.2 Analisi stato tensionale

Ipotizzate le forze che verranno applicate nelle prove di trazione sui provini (80, 90, 100 kN), il primo step è stato quantificare lo stato di tensione interno che ne sarebbe derivato.

Quest'analisi è stata effettuata all'inizio del progetto di ricerca dal collega Tommaso Battocchio (cui si fa riferimento), ma ne vengono riportati i risultati più rilevanti ai fini della completezza dello studio.

Con il software per analisi agli elementi finiti ANSYS, si è rappresentata la condizione di carico che si sarebbe verificata sulla macchina di prova, in cui un'estremità del provino sarebbe stata bloccata e l'altra caricata con una pressione negativa equivalente ad una forza di trazione di 100 kN.

Concentrando l'attenzione sulla tensione assiale σ_x , dal momento che i test sarebbero stati svolti sotto un carico puramente assiale, si è ottenuta una mappatura delle tensioni interne al provino, in particolare nella zona dell'intaglio. Il risultato ottenuto è visibile in Figure 6 e 7:

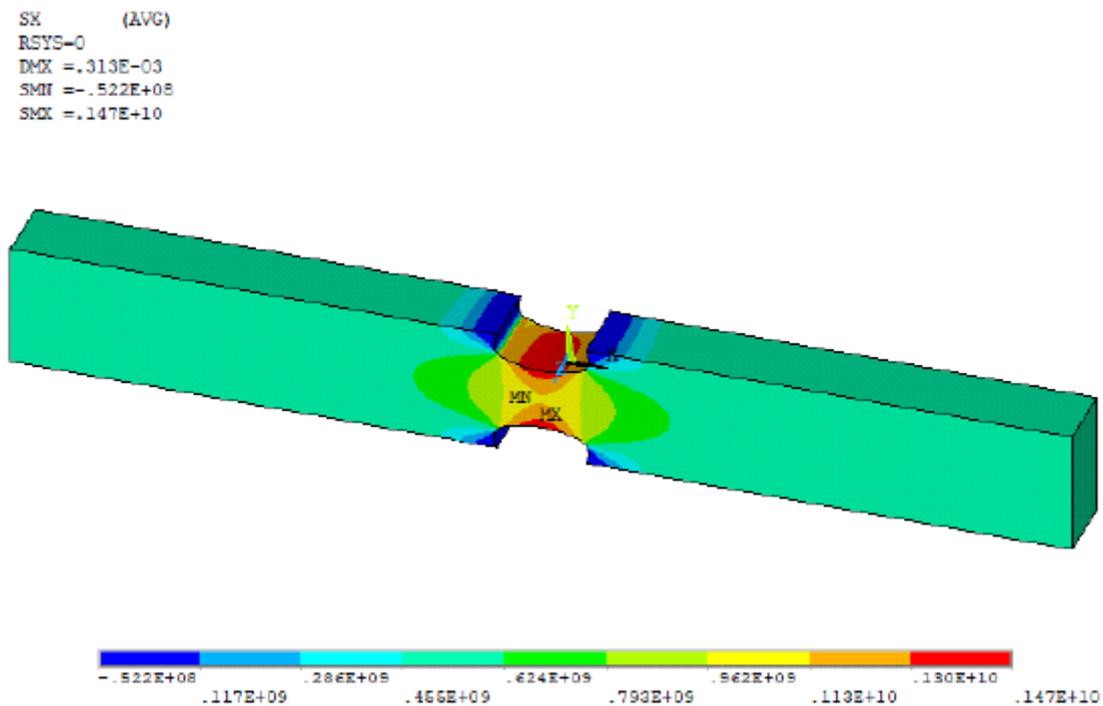


Figura 6: Stato tensionale interno

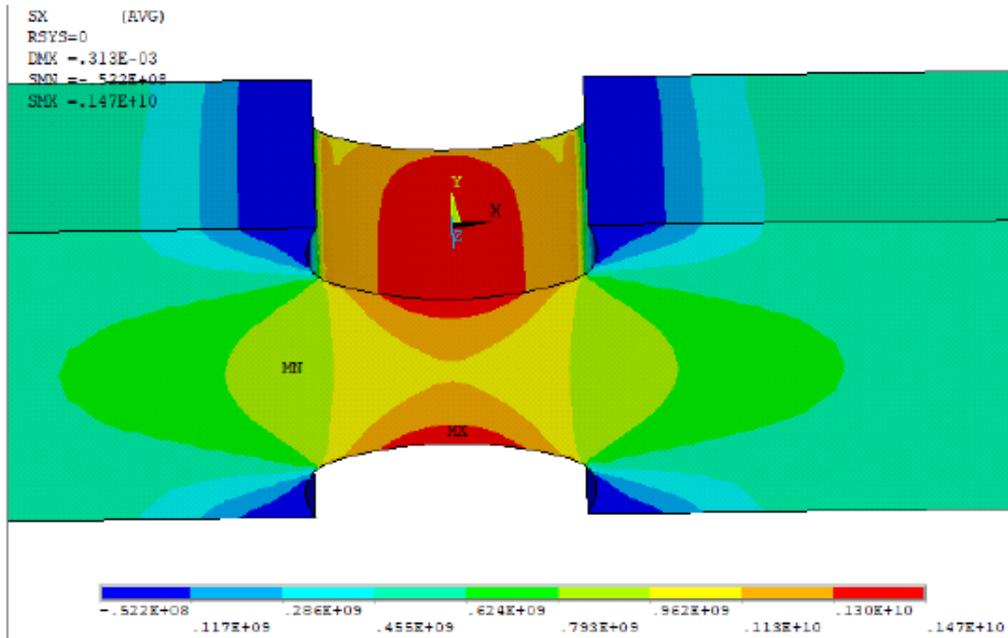


Figura 7: Stato tensionale zona intagliata

Da questa analisi è stato osservato che la tensione massima era localizzata al centro dell'intaglio, sul piano di simmetria del provino ed era pari a 1468 MPa.

È stata poi calcolata la tensione nominale, riferita a quella sezione che è intagliata:

$$\sigma_{x,n} = \frac{F}{A} = \frac{100000}{**} = 1190 \text{ MPa}$$

Con cui è stato possibile calcolare analiticamente il coefficiente di intaglio:

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{x,n}} = \frac{1468}{1190} = 1.23$$

Valore che rispecchia quello fornitoci da GE Avio, pari a 1.2.

La prima considerazione importante, di cui si è cercata dimostrazione nei risultati pratici, è che le cricche nascono al centro dell'intaglio, in corrispondenza delle superfici laterali, che è la sede delle tensioni massime.

È stato inoltre studiato l'andamento delle tensioni lungo la sezione centrale dell'intaglio, Figura 8:

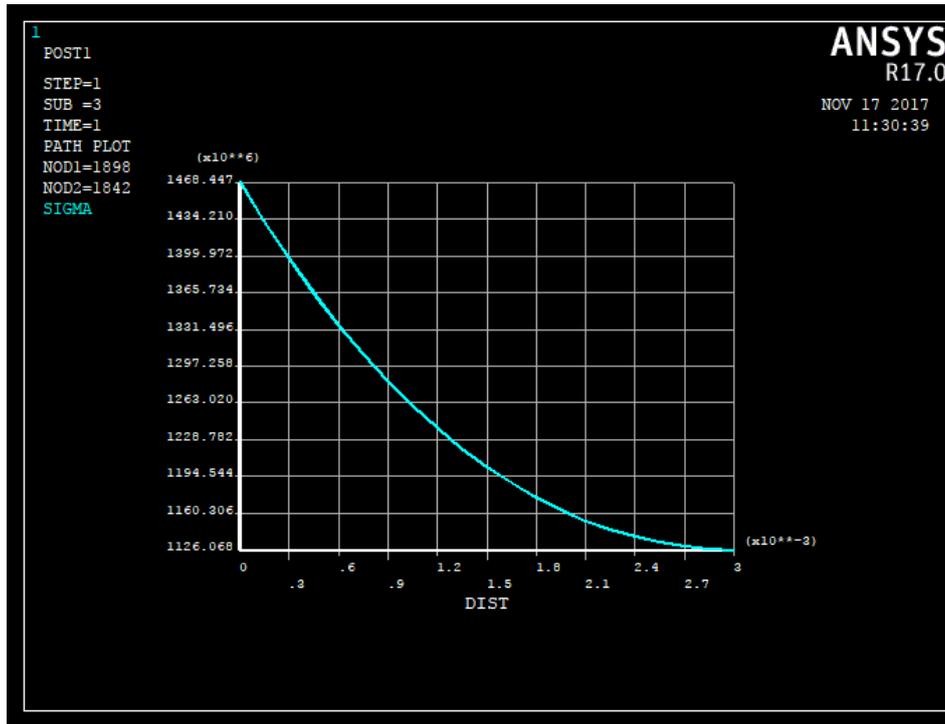


Figura 8: Distribuzione tensioni centro dell'intaglio

La distribuzione ottenuta conferma quanto ci si aspetta dalla teoria degli effetti dell'intaglio [Appendice I]: la tensione massima è localizzata all'estremità, maggiore della tensione nominale, con progressiva diminuzione spostandosi verso il centro dell'intaglio, dove raggiunge valori minori di quella nominale.

Si fa riferimento alla Tesi di Laurea Magistrale “Resistenza a fatica della sede attacco pala nel disco di turbina”, Tommaso Battocchio, per le specifiche di questa analisi, per i risultati completi ed il codice ANSYS.

4. PROVE A TEMPERATURA AMBIENTE



Figura 9: Fattori influenzanti la fatica

Come riportato in *Appendice I*, i fattori influenzanti la fatica di un materiale e di un componente sono quelli riportati in Figura 9.

La seguente ricerca si concentra su alcuni di questi fattori:

- Effetto dell'intaglio, da cui si è ricavato il valore del K_t [rif. *Analisi stato tensionale*] e la distribuzione di tensioni indotta dall'intaglio stesso.
- Temperatura: la seconda parte delle prove viene effettuata alla temperatura operativa di 540° C e si studiano le differenze rispetto ai risultati ottenuti a temperatura ambiente.
- Rugosità e Lavorazioni: i lotti di provini hanno subito, nella zona intagliata, differenti lavorazioni. Lo scopo è correlare la vita a fatica con la lavorazione meccanica subita e determinare quale lavorazione sia meno impattante negativamente sulla vita stessa del provino. Per ogni lavorazione viene tracciata la curva a fatica.
- Trattamenti superficiali: alcuni lotti hanno subito, dopo la lavorazione, dei trattamenti superficiali come lucidatura e smussatura degli spigoli, mentre altri sono stati lasciati "as machining", così come usciti dalla lavorazione meccanica.
- Carico medio: si sono scelti tre principali livelli di carico, ad 80 – 90 – 100 kN, secondo le indicazioni fornite dall'azienda. Inoltre, le prove sono state condotte con rapporto di tensione $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0$, cioè con tensione di trazione pura.

Nella prima parte di prove vengono testati due lotti di provini con le seguenti caratteristiche:

N. LOTTO DI PRODUZIONE	N. PROVINI	N. SER. PROVINI	LAVORAZIONE	LAVORAZIONI DI FINITURA
I	6	#034 » #040	EROSIONE ELETTRICIMICA	NESSUNA
II	6	#115 » #120	FRESATURA	SMUSSATURA SPIGOLI INTAGLIO - NESSUNA LUCIDATURA

Figura 10: Elenco provini testati

Le caratteristiche di processo, i parametri fondamentali e la tipologia di prodotti ottenuti da ciascuna lavorazione vengono riportati in Appendice II. Le prove sono state condotte seguendo alcune indicazioni pratiche fornite da GE Avio:

- La lunghezza massima di afferraggio del provino nella macchina di prova è stata stimata, con un'analisi ANSYS, pari a 30 mm, affinché non provocasse variazioni eccessive di tensioni nella zona d'intaglio ed assicurasse una presa sicura sul provino.
- Le prove devono essere condotte con un circo sinusoidale e con frequenza di 1 Hz.
- $R=0$, cioè forza puramente assiale.

Un ciclo teorico di carico sinusoidale con $R=0$ viene riportato in Figura 11:

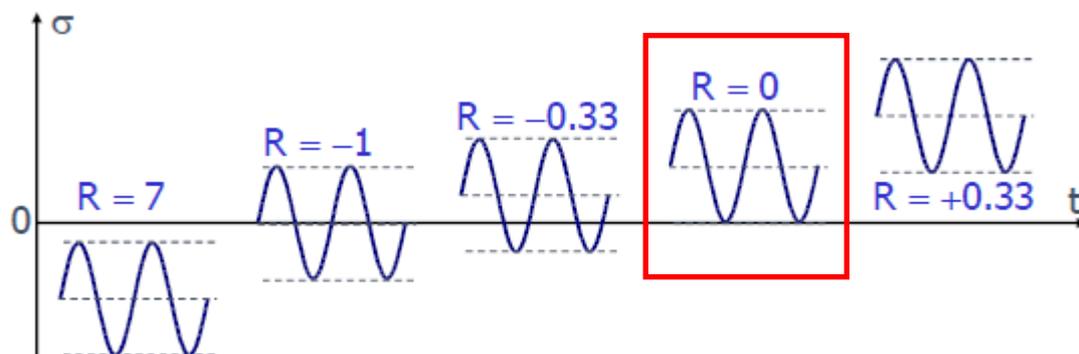


Figura 11: Cicli di carico al variare del fattore R

Le prove vengono svolte con una macchina di trazione Instron 8801, visibile in Figura 12.

Questa macchina permette di applicare forze fino a ± 100 kN in prove di tipo statico o dinamico, assicurando alta rigidezza e struttura di carico con buona precisione di allineamento. In Figura 13 viene invece mostrato il montaggio del provino nelle ganasce.

Per ulteriori informazioni e chiarimenti su caratteristiche, funzionamento ed utilizzo della Instron 8801 si fa riferimento alla Appendice III.



Figura 12: Instron 8801



Figura13: Afferraggio provino

Il provino viene afferrato con pressioni variabili a seconda del carico di trazione con cui viene condotta la prova, seguendo l'andamento precedentemente ottenuto dalle indicazioni di utilizzo della Instron, che viene riportato in Figura 14.

In particolare in corrispondenza dei tre carichi applicati si afferra con le seguenti pressioni:

- 140 bar per carichi di 90 kN;
- 160 bar per carichi di 100 kN;

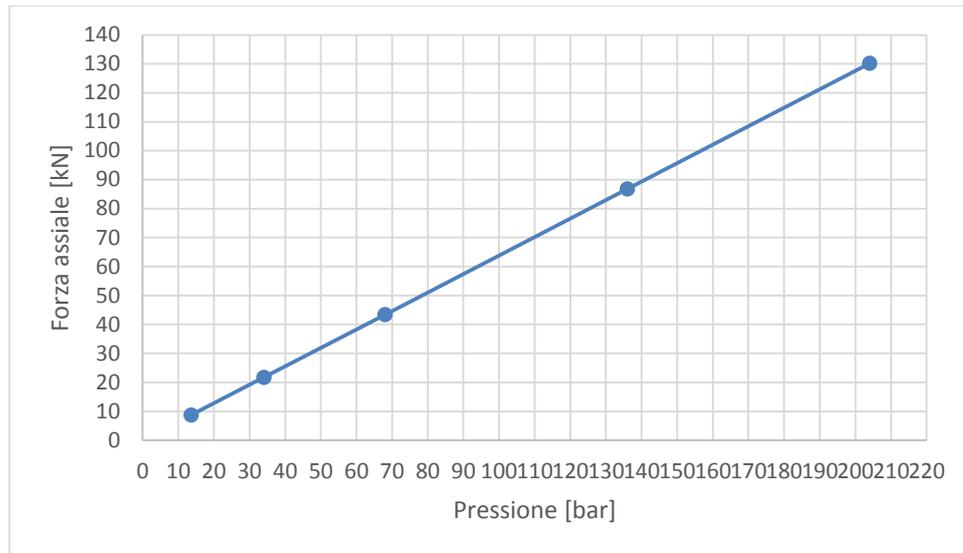


Figura 14: Pressione di afferraggio vs. Carico applicato

Prima dell'afferraggio viene montato sul provino, in corrispondenza della zona intagliata, un estensometro che misura la deformazione subita durante la prova e ne registra i dati. Questo strumento serve inoltre come indicatore della fine della prova: il superamento del limite di deformazione imposto indica che il provino è arrivato a rottura e la deformazione cresce all'infinito. A questo punto la macchina blocca la prova e genera i file dei risultati.

4.1 Analisi dei risultati

	ID	034	035	037	038	039	040
	LAVORAZIONE	ECM					
GEOMETRIA	THICKNESS [mm]	** .998	** .020	** .030	** .004	** .032	** .022
	WIDTH [mm]	** .042	** .032	** .024	** .022	** .016	** .04
	NECK [mm]	** .982	** .988	** .000	** .996	** .998	** .003
	min dx [mm]	** .024	** .018	** .004	** .996	** .020	** .980
	min sx [mm]	** .990	** .014	** .006	** .997	** .996	** .012
CONDIZIONI DI PROVA	GRIP TORQUE [Nm]	80					
	FREQUENZA [Hz]	1					
	TEMP. [°C]	25					
CARICO	min [kN]	0					
	min Instron [kN]	0.29	0.40	0.33	0.42	0.38	0.33
	Max [kN]	90					
	Max Instron [kN]	90.40	90.14	90.32	90.09	90.22	90.22
TENSIONI	$\sigma_{x,nom}$ [Mpa]	1076.20	1072.79	1073.40	1071.53	1073.18	1070.45
	$\sigma_{x,MAX}$ [Mpa]	1291.44	1287.35	1288.08	1285.84	1287.82	1284.54
	$\sigma_{VM,Neck}$ [Mpa]	1297.09	1292.28	1292.71	1290.13	1291.63	1290.74
	$\sigma_{VM,Offset}$ [Mpa]	1311.86	1303.60	1297.20	1287.17	1306.25	1300.26
ROTTURA	CICLI	***	***	***	***	***	***
	FACCIA	DX	DX	SX	SX	DX	SX
	ALTEZZA CRICCA [mm]	50.85	50.90	50.90	51.10	50.80	49.60

Tabella 2: Risultati provini ECM

	ID	115	116	117	118	119	120
	LAVORAZIONE	FRESATI (LOTTO II)					
GEOMETRIA	THICKNESS [mm]	** .010	** .010	** .010	** .010	** .005	** .010
	WIDTH [mm]	** .005	** .005	** .005	** .005	** .010	** .04
	NECK [mm]	** .008	** .008	** .008	** .006	** .999	** .002
	min dx [mm]	** .004	** .001	** .001	** .002	** .001	** .005
	min sx [mm]	** .998	** .001	** .001	** .002	** .005	** .003
CONDIZIONI DI PROVA	GRIP TORQUE [Nm]	80					
	FREQUENZA [Hz]	1					
	TEMP. [°C]	25					
CARICO	min [kN]	0					
	min Instron [kN]	0.47	0.82	0.58	0.65	1.14	0.66
	Max [kN]	90					
	Max Instron [kN]	88.82	87.44	89.99	89.98	88.79	89.81
TENSIONI	$\sigma_{x,nom}$ [Mpa]	1070.00	1070.00	1070.00	1070.00	1057.00	1068.00
	$\sigma_{x,MAX}$ [Mpa]	1284.00	1284.00	1284.00	1284.00	1268.00	1282.00
	$\sigma_{VM,Neck}$ [Mpa]	1270.00	1279.00	1287.00	1287.00	1271.00	1285.00
	$\sigma_{VM,Offset}$ [Mpa]	1274.00	1281.00	1289.00	1289.00	1275.00	1289.00
ROTTURA	CICLI	***	***	***	***	***	***
	FACCIA	DX	DX	SX	DX	DX	DX
	ALTEZZA CRICCA [mm]	48.70	53.10	53.00	52.10	52.10	52.10

Tabella 3: Risultati provini Fresati (Lotto II)

In Tabella 2 e 3 vengono riportati i parametri con cui sono state eseguiti i test sui provini ECM e su quelli fresati (Lotto II), oltre che i principali risultati numerici ottenuti. In particolare vengono riportati:

- ID: numero seriale del provino testato;
- LAVORAZIONE: lavorazione meccanica cui è stato sottoposto il provino;
- THICKNESS: larghezza del provino;
- WIDTH: spessore del provino;
- NECK: spessore minimo dell'intaglio;
- min dx: profondità dell'intaglio sulla faccia destra;
- min sx: profondità dell'intaglio sulla faccia sinistra;

N.B. i valori della geometria dei provini sono riportati in modo parziale per riservatezza aziendale. Sono indicate le parti decimali delle misure, da cui è possibile notare che esse

variano da provino a provino rispetto alle quote di progetto, a causa delle imprecisioni di fabbricazione; tutti i valori sono però all'interno delle tolleranze.

- GRIP TORQUE: coppia di serraggio delle viti di afferraggio;
- FREQUENZA: frequenza a cui viene eseguito il test;
- TEMPERATURA: temperatura a cui si lavora;
- CARICO: carichi minimo e massimo; vengono anche riportati i carichi “Instron” per precisione di studio, poiché la macchina ha una lieve difficoltà nel controllo preciso del carico, per cui non si ha un carico minimo esattamente 0 e lo stesso per il carico massimo;
- $\sigma_{x,nom}$: tensione nominale, calcolata come $\frac{\text{carico massimo} \cdot 1000}{\text{thickness min} \cdot \text{width}}$;
- $\sigma_{x,max}$: tensione massima, ottenuta come prodotto della tensione nominale per il coefficiente di intaglio k_t ;
- $\sigma_{VM,neck}$: tensione equivalente che considera il fatto che lo spessore minimo non sia quello nominale. Tramite l'analisi FEM fornitaci da GE Avio, è stato possibile determinare l'interpolazione lineare che rappresenta come tale tensione cambi al variare dello spessore minimo;
- $\sigma_{VM,offset}$: tensione equivalente che considera la differenza tra la profondità di intaglio sulle due facce; su una si ha un intaglio più profondo che sull'altra. Questa differenza fa sì che la tensione sia maggiore sulla faccia con intaglio più profondo e minore su quella opposta. Usando nuovamente un'analisi FEM di GE Avio è possibile ricavare il valore massimo sulla faccia con intaglio più profondo.
- CICLI: numero di cicli a cui il provino è arrivato a rottura. Il seguente dato viene oscurato per riservatezza aziendale;
- FACCIA: faccia sulla quale è nata e si è sviluppata la cricca;
- ALTEZZA CRICCA: altezza del provino rotto, misurata tra la base ed il punto in cui si è incubata la cricca.

4.1.1 Effetti lavorazione meccanica

Il primo aspetto che si può analizzare dai risultati ottenuti è il numero di cicli a cui ciascun provino ha raggiunto la rottura. Nelle Tabelle 2 e 3 questi valori sono stati omessi per riservatezza aziendale, ma essi vengono inseriti nel grafico riportato in Figura 15: esso riporta sull'asse delle ordinate la tensione nominale agente sull'area effettiva del provino, espressa come percentuale del carico di rottura UTS del materiale utilizzato (non riportato per riservatezza aziendale) e sull'asse delle ascisse il logaritmo del numero di cicli che l'hanno portato a rottura (anche questi valori sono riservati).

Sullo stesso grafico vengono riportate tre serie:

- 1) di colore rosso i risultati dei provini lavorati con ECM;
- 2) in azzurro i risultati dei provini fresati appartenenti al primo lotto;
- 3) in viola i risultati dei provini fresati appartenenti al secondo lotto;

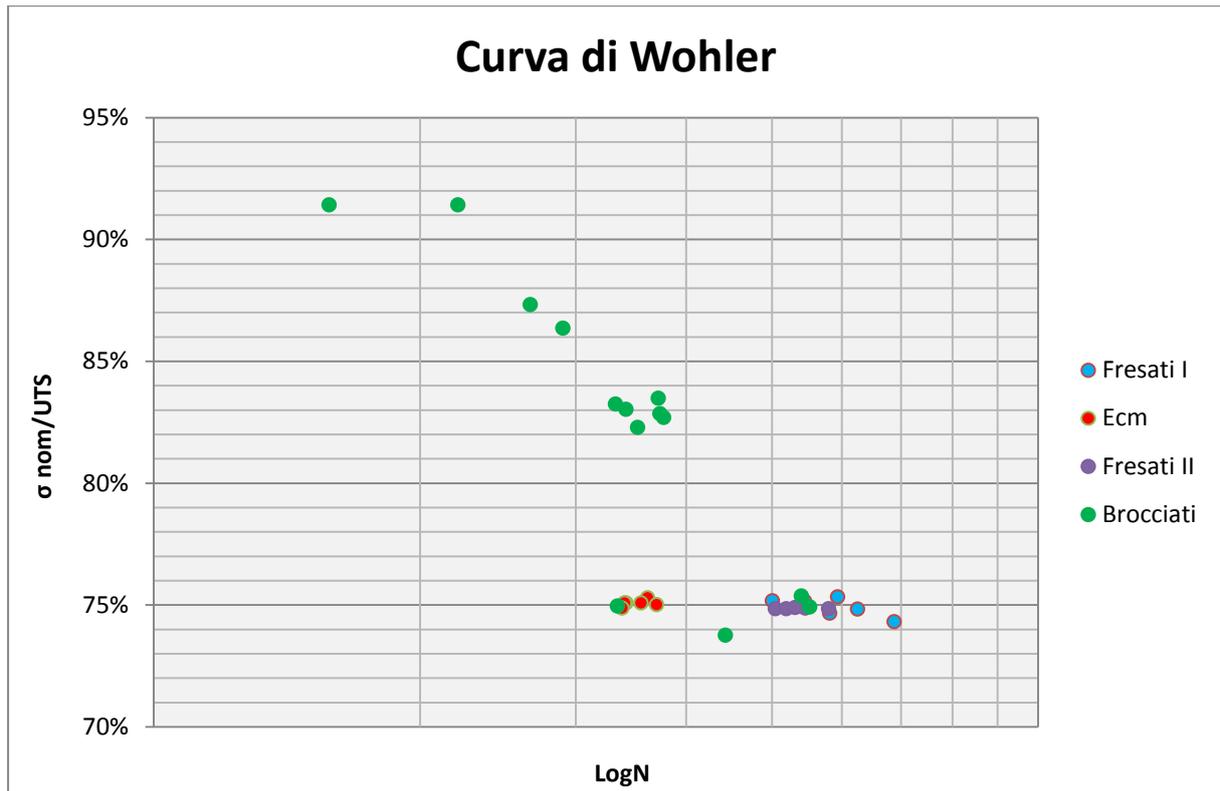


Figura 15: Risultati provini fresati ed ECM

Appare evidente che la lavorazione con elettroerosione chimica ha fornito provini la cui vita a fatica risulta essere notevolmente inferiore a quella dei provini fresati. La differenza riscontrata è dell'ordine dei 20000 cicli, quindi significativa.

Da questi risultati sembrerebbe che la lavorazione con elettroerosione chimica sia più invadente e penalizzante per il provino. La fresatura, come si può leggere in [Appendice II](#), prevede il contatto diretto dell'utensile con la superficie del provino per asportare il materiale; questo comporta la nascita di alcune tensioni residue di compressione che sono positive ai fini della vita a fatica in quanto vanno a chiudere eventuali difetti sub-superficiali presenti in seguito alla produzione, che potrebbero essere sedi di fratture per fatica.

Inoltre, la vita a fatica inferiore può essere spiegata considerando gli effetti che queste due lavorazioni hanno sulla rugosità finale della superficie.

4.1.2 Effetti finitura superficiale

Come detto nel paragrafo precedente, un aspetto rilevante ai fini della vita a fatica del provino è la rugosità media che la lavorazione meccanica ha generato sulla superficie. In Figura 16 viene riportato il grafico della Rugosità media R_a misurata su ciascuna faccia dei provini, distinti per lavorazione.

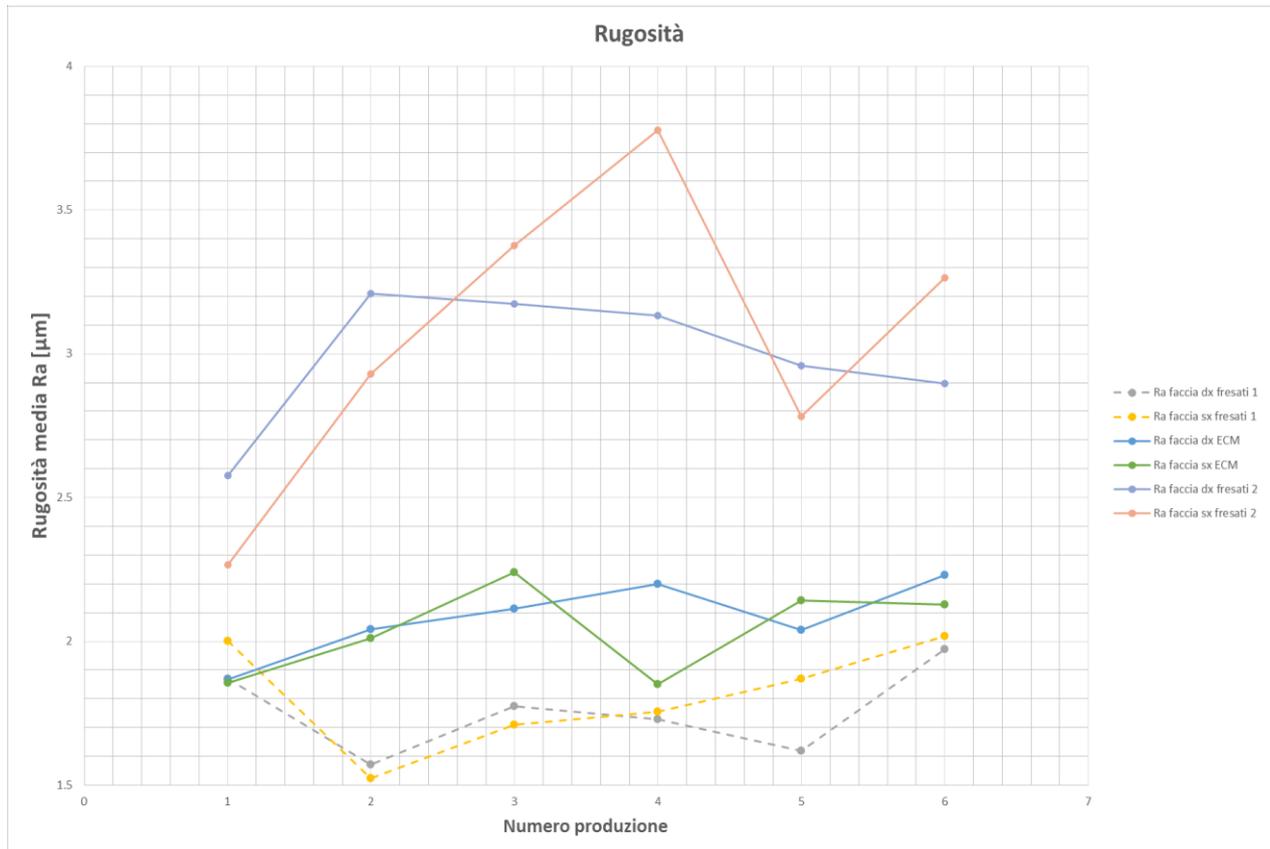


Figura 16: Rugosità provini

Il primo confronto che si può fare è tra il primo lotto di provini fresati e quelli ECM: entrambe le facce dei provini lavorati per elettroerosione chimica hanno dei valori di rugosità media più alti rispetto ai provini fresati. Questo può essere dovuto al fatto che il processo chimico alla base della lavorazione abbia in qualche modo eroso in modo non uniforme la superficie del provino, lasciando delle imperfezioni.

Un altro confronto di rilievo è tra i due lotti di provini fresati: il primo lotto di provini fresati ha subito un'ulteriore lavorazione di lucidatura della superficie dell'intaglio, mentre il secondo lotto non ha subito alcuna finitura. La lucidatura comporta un livellamento dei picchi e delle valli che caratterizzano la superficie di ogni materiale, rendendola più omogenea. Ciò spiega perché i valori di rugosità del lotto I siano nettamente inferiori rispetto a quelli del lotto II. Questo si ripercuote anche sulla vita a fatica: i provini fresati II raggiungono la rottura circa 5000 cicli prima di quelli del lotto I.

L'insieme di assenza di lucidatura, assenza di tensioni residue di compressione e possibile attacco chimico eccessivo sulla superficie, fa sì che la lavorazione per erosione elettrochimica non si sia dimostrata la miglior scelta dal punto di vista della fatica, soprattutto se paragonata alla lavorazione per fresatura.

4.1.3 Relazione carico – profondità cricca

In ultima analisi viene studiata una possibile correlazione tra il carico applicato durante la prova e la profondità della cricca primaria.

Con l’ausilio di un microscopio ottico viene presa un’immagine zoomata della parte inferiore di ogni provino dopo la rottura. Su questa immagine si misura l’estensione della cricca primaria. I risultati ottenuti sono i seguenti:

FRESATI		
S/N	Load (kN)	Est. cricca
109	90	10.255
110	90	8.419
111	90	7.184
112	90	8.919
113	90	9.418
114	90	7.275
Valori medi		
	Load (kN)	Est. Cricca
	90	8.58

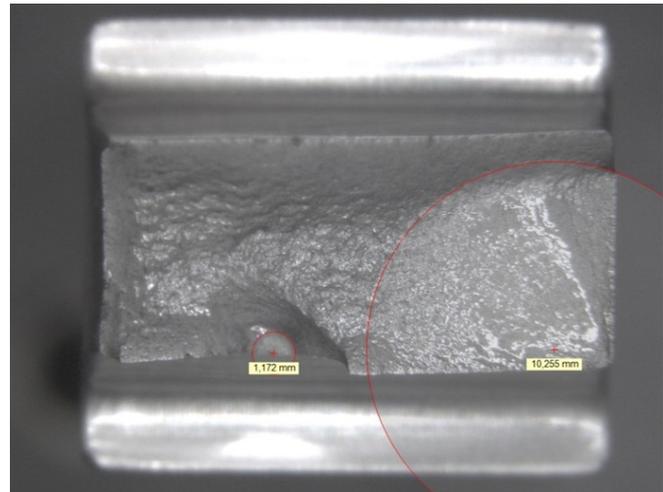


Figura 17.1: Provino 109

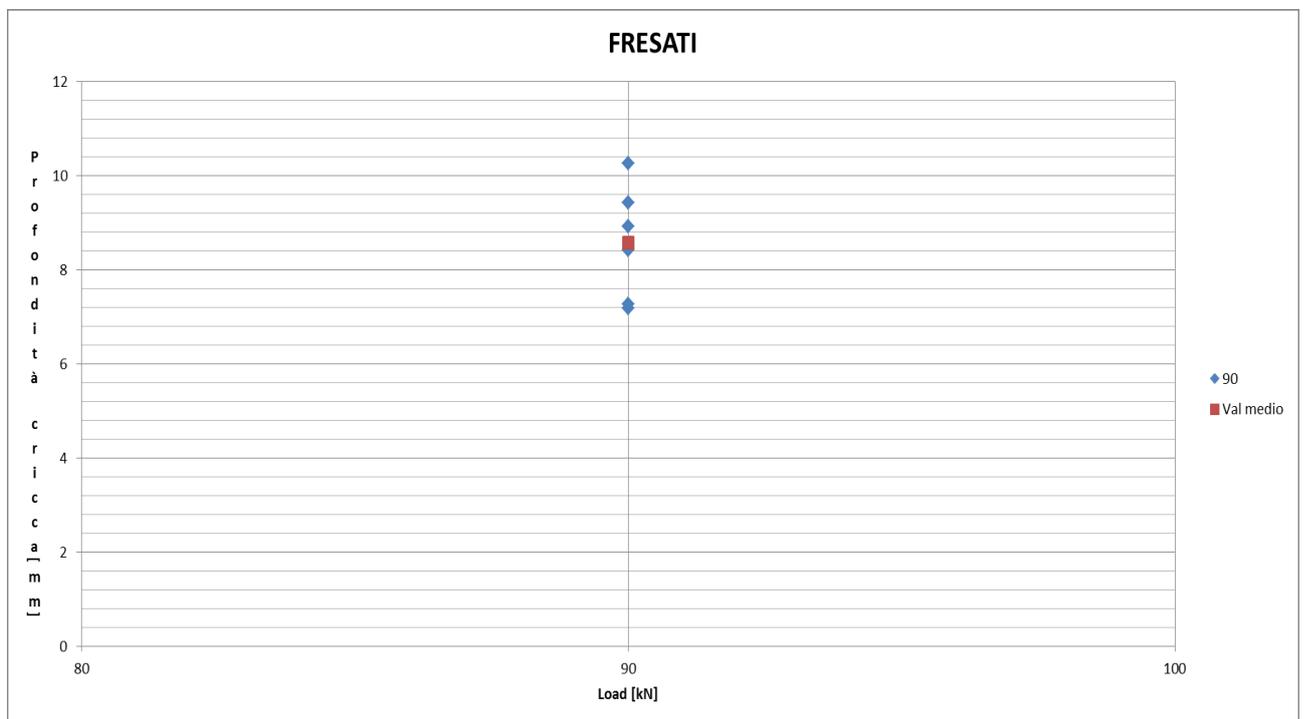


Figura 17: Relazione carico - profondità cricca Fresati I

FRESATI II		
S/N	Load (kN)	Est. cricca
115	90	6.684708
116	90	6.979438
117	90	8.602286
118	90	6.641267
119	90	7.512621
120	90	7.348297
Valori medi		
	Load (kN)	Est. Cricca
	90	7.29

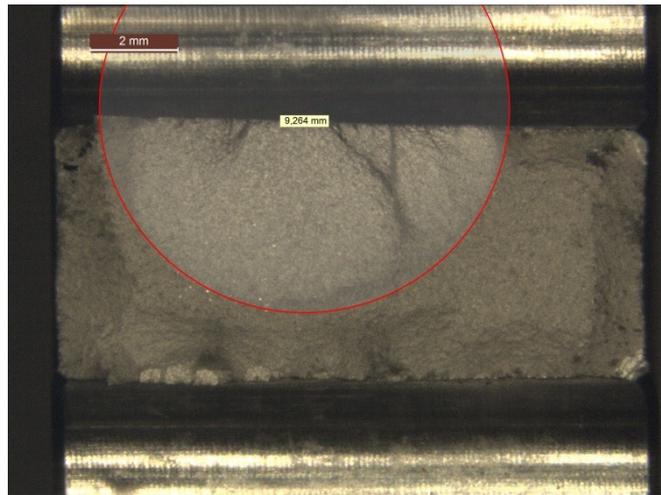


Figura 18.1: Provino 117

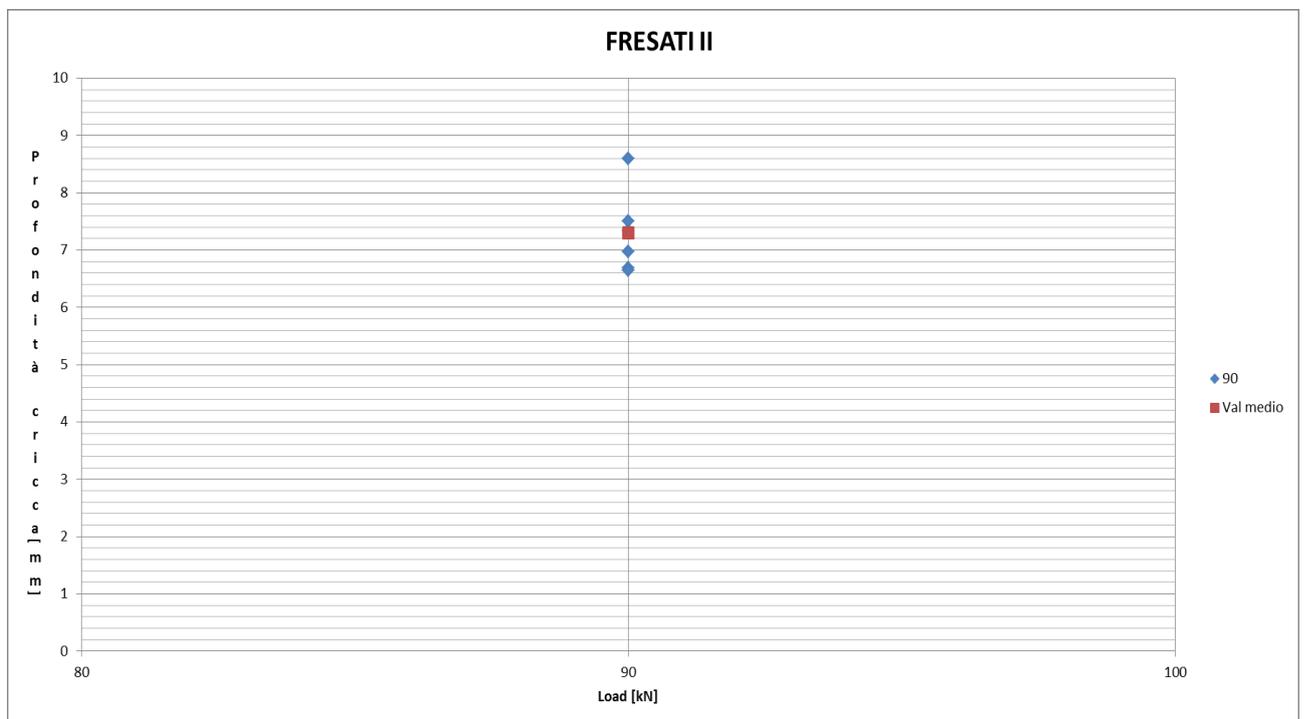


Figura 18: Relazione carico - profondità critica Fresati II

ECM		
S/N	Load (kN)	Est. cricca
34	90	7.022
35	90	7.743
37	90	6.334
38	90	(rifare immagini con misura)
39	90	7.481
40	90	6.944
Valori medi		
	Load (kN)	Est. Cricca
	90	7.10

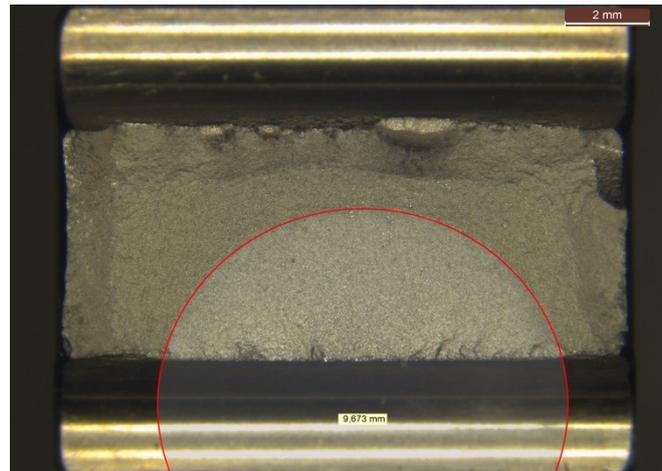


Figura 19.1: Provino 39

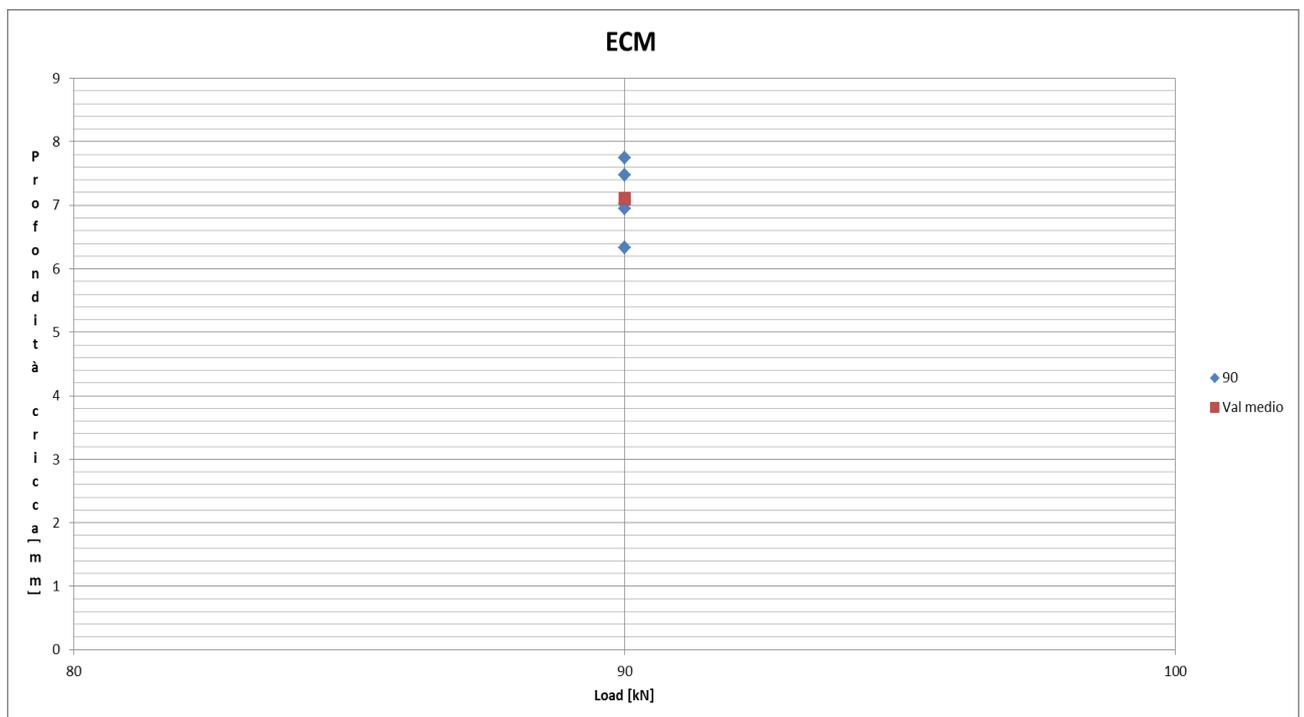


Figura 19: Relazione carico - profondità cricca ECM

Riportando su uno stesso diagramma i valori medi di profondità della cricca dei tre lotti, è evidente che i provini fresati del primo lotto, per merito della lucidatura, presentano una maggiore estensione della cricca. Questo significa che c'è stata una maggior deformazione plastica al loro interno che ha portato a cricche più estese, corrispondenti ad una maggiore vita a fatica.

I provini lavorati per elettroerosione chimica ed i fresati del secondo lotto presentano praticamente la stessa estensione media di cricca, corrispondentemente ad una minore vita a fatica. La mancanza di lucidatura superficiale fa sì che la cricca nasca, si estenda e porti a rottura in un tempo, espresso in numero di cicli, nettamente inferiore.

Un'ultima osservazione che si può fare, a conferma di quanto ci si aspetta dalla teoria, è che la superficie di frattura si presenta tipicamente liscia, a causa dello sfregamento subito durante la propagazione della cricca attraverso la sezione, per poi diventare nettamente più ruvida dove il provino è giunto a rottura in modo duttile quando la sezione trasversale è diventata troppo piccola per sopportare il carico. Spesso, come visibile in Figura 20, l'avanzare della frattura è indicato da una serie di anelli, detti "beach marks", che crescono verso il centro dal punto di innesco della frattura.

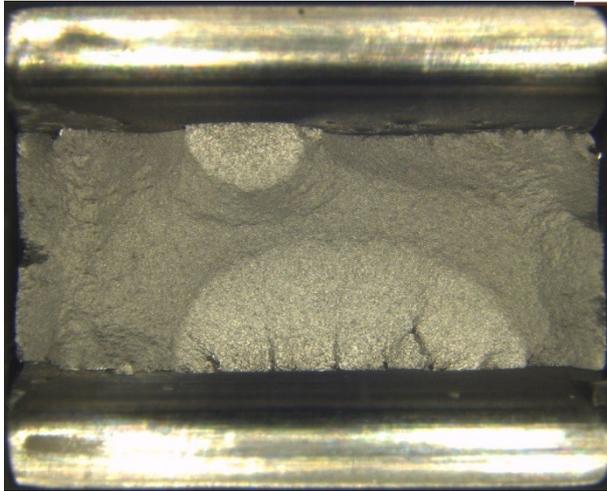


Figura 20.1: Superficie di rottura #020

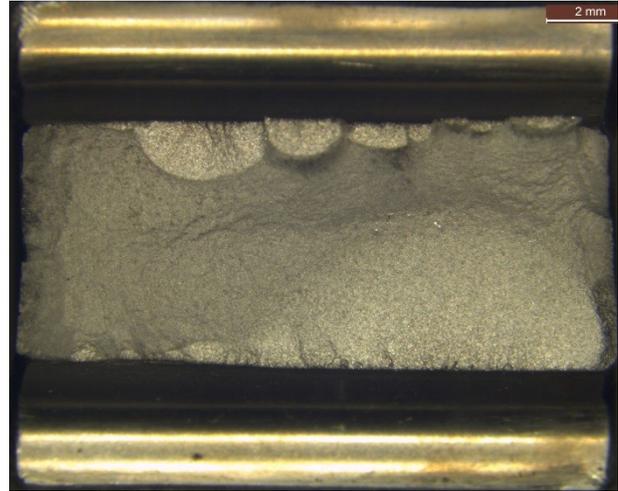


Figura 20.2: Superficie di rottura #035

Generalmente la cricca si innesca in un punto di concentrazione delle tensioni od in corrispondenza di uno spigolo acuto o di un intaglio. Nelle Figure 20.1 e 20.2 sono riportati due esempi riassuntivi dei risultati ottenuti: la cricca nasce e si sviluppa a metà altezza del provino, in corrispondenza dell'intaglio dove si trova una maggiore concentrazione delle tensioni (Figura 21). Nella maggior parte dei casi la cricca nuclea al centro della superficie trasversale dell'intaglio, come per il provino #035, la nucleazione può avvenire in corrispondenza di un angolo dell'intaglio.



Figura 21: Altezza zona di rottura #035

5. PROVE AD ALTE TEMPERATURE

Lo scopo della seconda parte di prove svolte è quella di analizzare il comportamento a fatica dei provini quando vengono portati in un ambiente caratterizzato da alte temperature operative, che simulino le condizioni di lavoro effettive.

Nello specifico, le prove in temperatura di questo studio vengono svolte su provini brocciati, a 540°, raggiunti attraverso un riscaldatore ad induzione [*Appendice III*], applicando un carico di 85 kN.

È stata richiesta da GE Avio la riduzione del carico di prova da 90 a 85 kN, in virtù del fatto che si vogliono ottenere dei punti nella zona di plateau della Curva di Wohler per Low cycle fatigue, senza oltrepassare l'UTS, cioè il carico di rottura del materiale e l'YTS cioè il carico di snervamento.

Dalla teoria sulla fatica si sa che la resistenza a fatica dei metalli decresce all'aumentare della temperatura rispetto alla temperatura ambiente [4]. Ci si aspetta che a temperature abbastanza sopra la metà del punto di fusione del metallo, lo snervamento sia la principale causa di cedimento. Lo snervamento tende ad aumentare con tensioni medie più alte, ma in questo studio la tensione media viene mantenuta costante.

I provini sono stati precedentemente verniciati con vernice nera resistente alle alte temperature. In realtà fin dalle prime prove si è notato come la vernice venisse pian piano fatta evaporare dall'elevato calore; questo ha comportato la necessità di studiare l'andamento nel tempo dell'emissività del provino, come spiegato successivamente.

5.1 Fase preparatoria

5.1.1 Calibrazione termica Termocoppia e Pirometro

La fase preparatoria delle prove prevede un settaggio della strumentazione utilizzata per la misurazione ed il controllo della temperatura sul provino. Questa calibrazione mira a verificare che la termocoppia collegata direttamente al provino ed il pirometro misurino la stessa temperatura in uno stesso punto. Per questo motivo si mira il pirometro nel punto 8 della Figura 22, in corrispondenza della termocoppia; si avvia la registrazione e si studiano i valori restituiti.

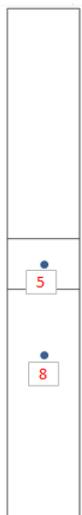


Figura 22: Punti rilevamento T

Puntando il pirometro in corrispondenza della termocoppia (8), riscaldando e lasciando l'amperaggio costante, vengono rilevati alcuni valori di temperatura. In particolare ogni 10/15 minuti viene letto il valore restituito dalla termocoppia e quello restituito dal pirometro: se c'è differenza tra i due, tramite il setup del programma di controllo del pirometro, si inserisce la temperatura rilevata dalla termocoppia e si calibra l'emissività. In questo modo è possibile studiare un andamento di massima dell'emissività nel tempo, in Figura 23 (a) si può vedere l'andamento ottenuto per il provino 030, mentre in Figura 23 (b) quello per il provino 030:

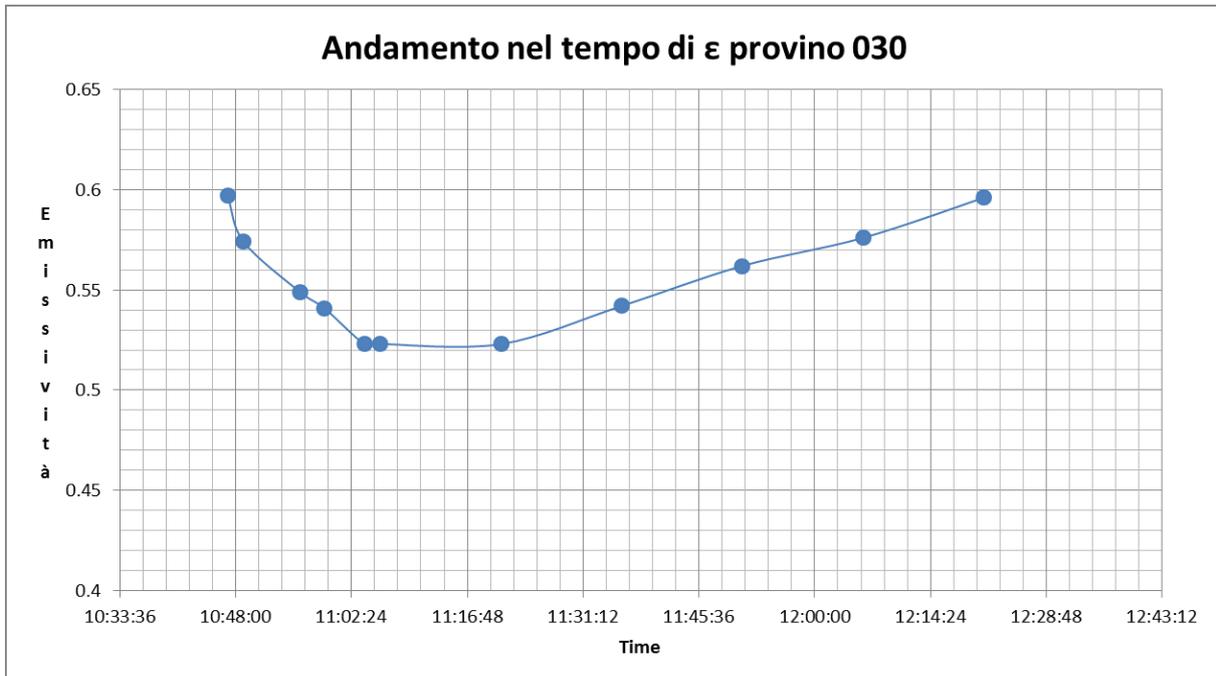


Figura 23 (a): Andamento emissività provino 030 in riscaldamento

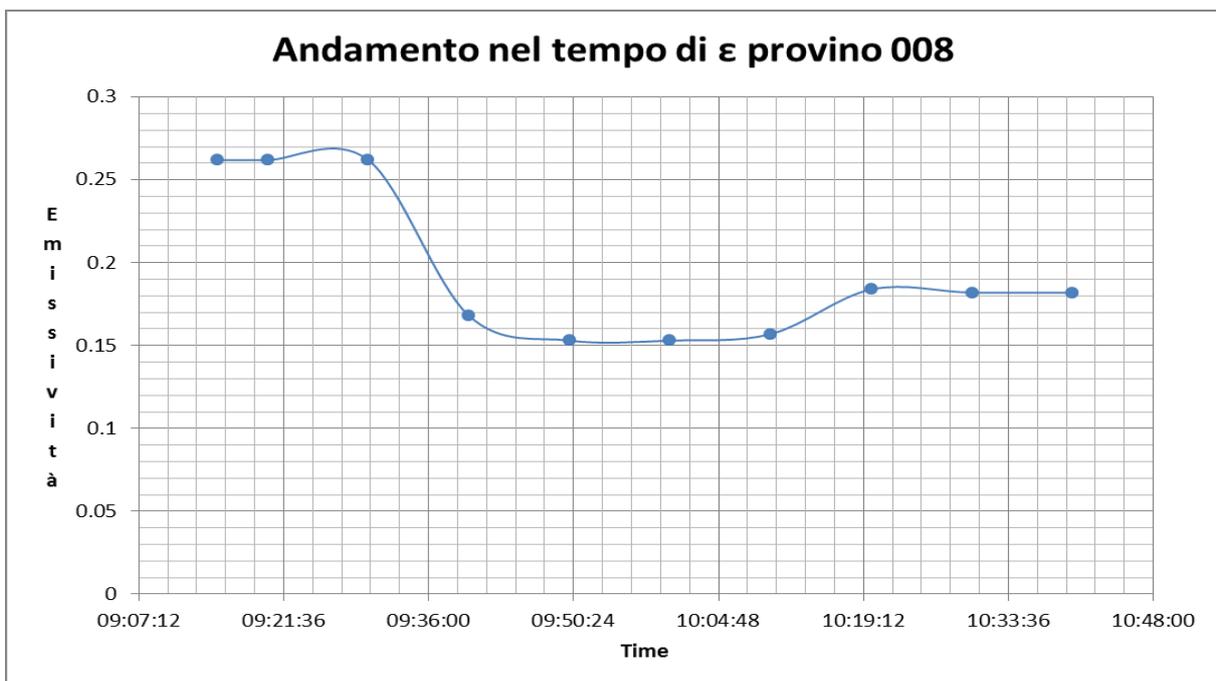


Figura 23 (b): Andamento emissività provino 008 in riscaldamento

In entrambi i casi si può notare una chiara diminuzione dell'emissività dovuta al consumo della vernice che pian piano evapora per effetto del riscaldamento. Segue poi un leggero rialzo dovuto a fenomeni interni al materiale del provino, in cui c'è movimento di grani e cambiamento di alcune proprietà microscopiche; questo rispecchia le evidenze teoriche che prevedono che i metalli abbiano un'emissività piuttosto bassa, crescente con la temperatura. Il provino 008 mostra un andamento più regolare, i cui valori numerici sono riportati in Tabella 4:

Time	Current [A]	ϵ	Temp TC	T pyro su TC	T pyro centro		
09:15:00	78.1	0.262	400.0			SETTAGGIO ϵ , CON PIROMETRO PUNTATO SU TERMOCOPPIA	
09:20:00	78.1	0.262	450.0	490			
09:30:00	78.1	0.262	480.0	453			
09:40:00	80.3	0.168	506.0	498			
09:50:00	82.5	0.153	530.0	531.2	/		
10:00:00	81.4	0.153	527.0	528.6			
10:10:00	81.4	0.157	529.0	541			
10:20:00	80.3	0.184	521.5	520.7			
10:30:00	80.3	0.182	525.0	524.6			
10:40:00	80.3	0.182	527.0	527			
10:43:00	80.3	0.182	528.0			560	ΔT CENTRO - TC, CON PIROMETRO PUNTATO AL CENTRO
10:53:00	79.2	0.182	523.5			555	
11:03:00	78.1	0.182	513.5	/		544	
11:25:00	78.1	0.182	516.5		548		
11:35:00	78.1	0.182	518.0		550		
11:45:00	78.1	0.182	519.0		551		
11:55:00	78.1	0.182	520.0		552		
12:25:00	78.1	0.212	523.0		539.8	553	ΔT CENTRO - TC, CON PIROMETRO PUNTATO AL CENTRO E POI SU TC PER AGGIORNAMENTO ϵ
12:35:00	78.1	0.249	523.5	523.3	544		
12:45:00	78.1	0.228	524.5	523.8	554		
12:55:00	78.1	0.243	525.0	525.3	547		
13:05:00	78.1	0.243	526.0	525	548		
14:30:00	78.1	0.243	529.5	524.3	552.5		
14:40:00	77	0.229	522.5	522.7	552		
14:50:00	75.9	0.229	510.0	512.2	538		

Tabella 4: Riscaldamento provino 008

La prima fase del riscaldamento serve a registrare il variare dell'emissività, con una contemporanea regolazione della corrente nell'induttore per raggiungere la temperatura

voluta. Il valore scende fino ad un minimo di 0.153 per poi risalire a 0.182; questo valore viene poi mantenuto costante per un'ora con lo scopo di quantificare la differenza di temperatura tra la zona in cui è saldata la termocoppia ed il centro dell'intaglio. Con il proseguire del riscaldamento, come ci si aspetta dai metalli, c'è un leggero innalzamento dell'emissività intorno a 0.240/0.245, per poi stabilizzarsi ad un valore di 0.229 che rimane costante durante il resto del riscaldamento e può essere preso come valore di riferimento per i test sul provino 008.

Per la calibrazione degli strumenti si è fissato il valore di emissività ad $\varepsilon = 0.472$, valore ottenuto come costante dal provino 030, ma per ogni test si andrà a ricalibrare con lo stesso procedimento.

Con questo valore di emissività fissato, si sono registrati i valori restituiti dai due strumenti, prima a temperatura più bassa poi ad una temperatura più alta. In Figura 24 viene riportato il confronto: come si può notare, dopo 1000 secondi di riscaldamento, le temperature indicate da pirometro e termocoppia sono concordi. Questo permette di considerare affidabile e preciso il controllo della temperatura con il sistema termocoppia e pirometro.

Per la ripetibilità della seguente considerazione sono state svolte altre due prove simili che hanno condotto allo stesso risultato, confermando quanto appena detto.

Il pirometro viene utilizzato per il controllo del riscaldatore in un circuito chiuso Termocoppia – Pirometro – Riscaldatore ad induzione, come spiegato nel Paragrafo 5.2.3.

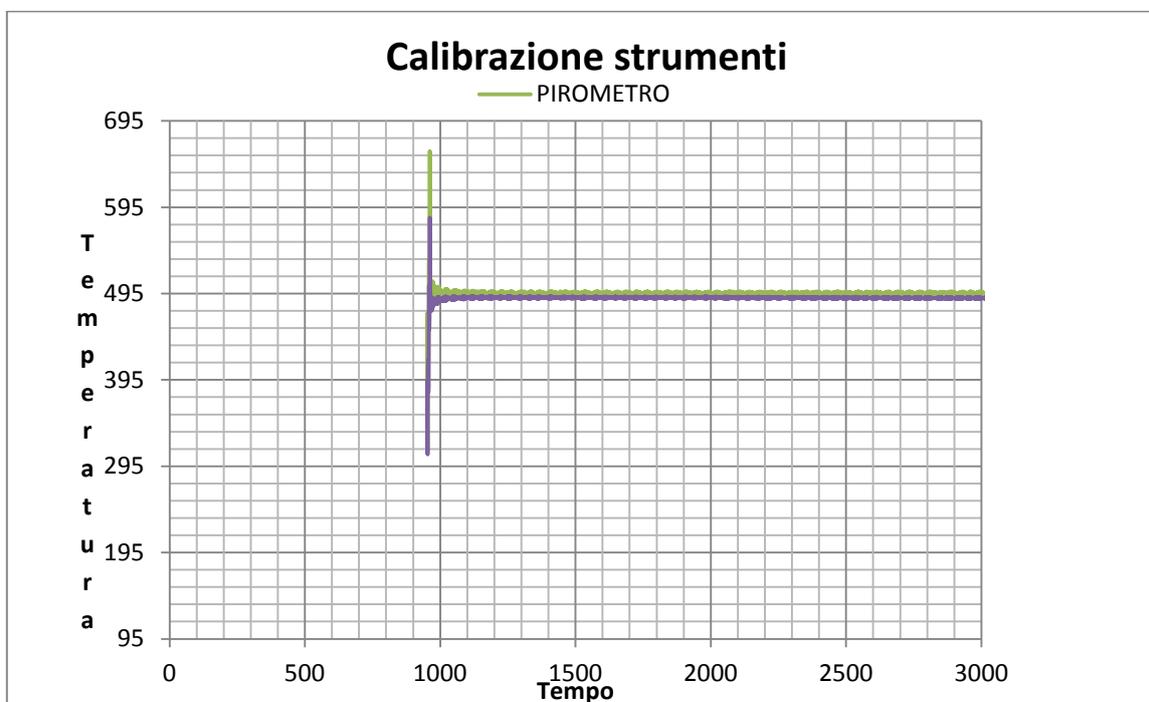


Figura 24: Calibrazione strumenti

5.1.2 Settaggio emissività

Dopo aver calibrato gli strumenti di misura, è necessario settare l'emissività del provino che verrà considerata costante durante la prova, considerando come obiettivo il raggiungimento nel centro dell'intaglio della temperatura di 540°.

Il provino durante il riscaldamento ad alte temperature perde pian piano tutto il rivestimento di vernice protettiva e passa da essere un corpo nero (ϵ circa unitaria) ad un corpo grigio, quindi con emissività ben inferiore ad 1. Il procedimento seguito per settare l'emissività e far sì che termocoppia e pirometro indichino la medesima temperatura se puntati nello stesso punto è il seguente (Figura 25): si procede con il riscaldamento finché la termocoppia raggiunge una temperatura stabile; a questo punto si legge il valore che il pirometro restituisce nel punto 8 (in corrispondenza della termocoppia). Se viene evidenziata una differenza di temperature tra pirometro e termocoppia, si aggiorna l'emissività inserendo la temperatura indicata dalla termocoppia. Una volta che i due strumenti sono concordi, si misura col pirometro la temperatura raggiunta nel punto 5, zona dell'intaglio di interesse per lo studio e si alza o si abbassa l'ampereaggio del riscaldatore sulla base della distanza dall'obiettivo (raggiungimento di 540° nell'intaglio). Questa operazione viene ripetuta finché si ottiene una differenza nulla (o quasi) tra le temperature indicate dai due strumenti, nel caso specifico sette volte. Per ogni prova si prende nota del ΔT tra il punto 8 ed il punto 5, utile per il controllo automatico della temperatura durante la prova, come spiegato nel Paragrafo successivo.

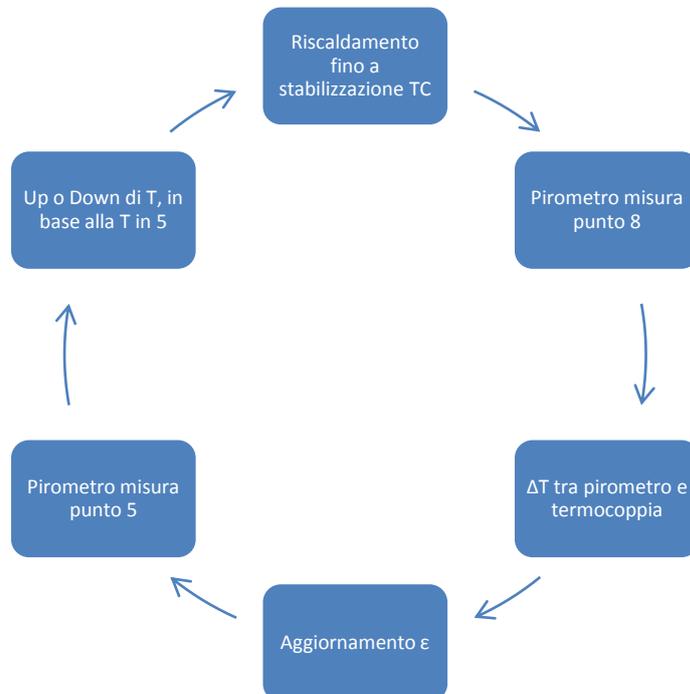


Figura 25: Settaggio emissività

In Figura 26 viene riportata la situazione ottenuta nella quinta prova.

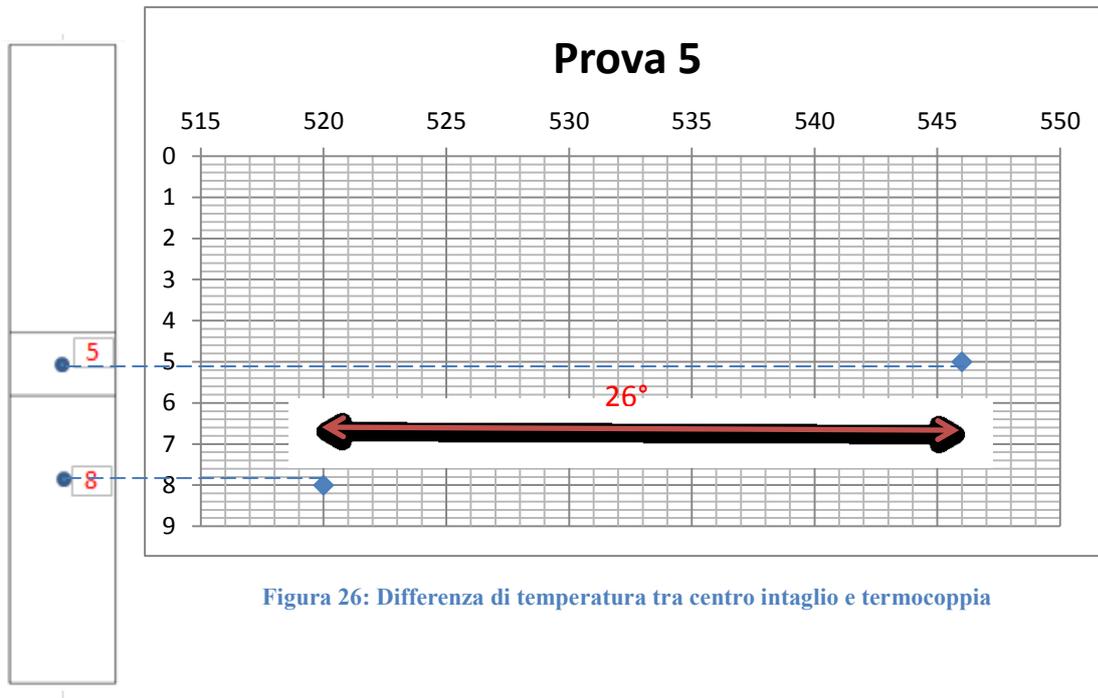


Figura 26: Differenza di temperatura tra centro intaglio e termocoppia

In questo caso l'emissività è pari a 0.147, ma viene rilevata ancora una differenza tra i valori di temperatura nel punto 8 misurati dai due strumenti. In virtù di questo si prosegue con l'analisi; alla settima prova la differenza tende ad annullarsi, corrispondentemente ad un valore $\varepsilon = 0.168$ che viene considerato costante per tutta l'analisi termica prima delle prove vere e proprie, durante le quali esso verrà ricalibrato.

5.1.3 Rilevamento ΔT tra centro e Termocoppia per controllo automatico

Contemporaneamente al settaggio dell'emissività viene condotto, con l'ausilio del pirometro, un rilevamento delle temperature nel punto 8, saldatura della termocoppia, e nel punto 5, centro dell'intaglio, per rilevarne la differenza.

L'obiettivo è quello di quantificare in modo stabile ed affidabile il ΔT esistente tra i due punti per poter svolgere un controllo automatico della temperatura durante la prova: come spiegato nel [Paragrafo 5.2.3](#), nel corso del test un calcolatore fornisce la temperatura rilevata dalla termocoppia ed il pirometro viene puntato sulla termocoppia stessa. In questo modo è possibile tenere sotto controllo automatico la temperatura sulla termocoppia, facendo in modo che si mantenga ad un determinato valore che assicuri di raggiungere la temperatura obiettivo di 540° al centro dell'intaglio.

Per spiegare i risultati ottenuti si fa riferimento al caso del provino 030. In Figura 27 viene riportata la tabella dei risultati, in "TC" indica la temperatura rilevata dalla termocoppia, mentre "T_PIR_5" rappresenta la temperatura mostrata dal pirometro puntato al centro dell'intaglio.

Time	ΔT	TC	T_PIR "5"
11.45	21	533	554
11.48	20	534	554
11.51	20	534	554
11.54	20	535	555
11.57	21	535	556
12.00	20	536	556
12.06	17	537	554
12.09	17	537	554
12.12	17	537	554
12.15	17	538	555
12.18	17	538	555
12.21	17	539	556
12.24	18	539	557
12.27	17	540	557
12.30	17	541	558

Figura 27: Diff. Temperature tra centro e termocoppia

I dati vengono rappresentati nel diagramma riportato in Figura 28:

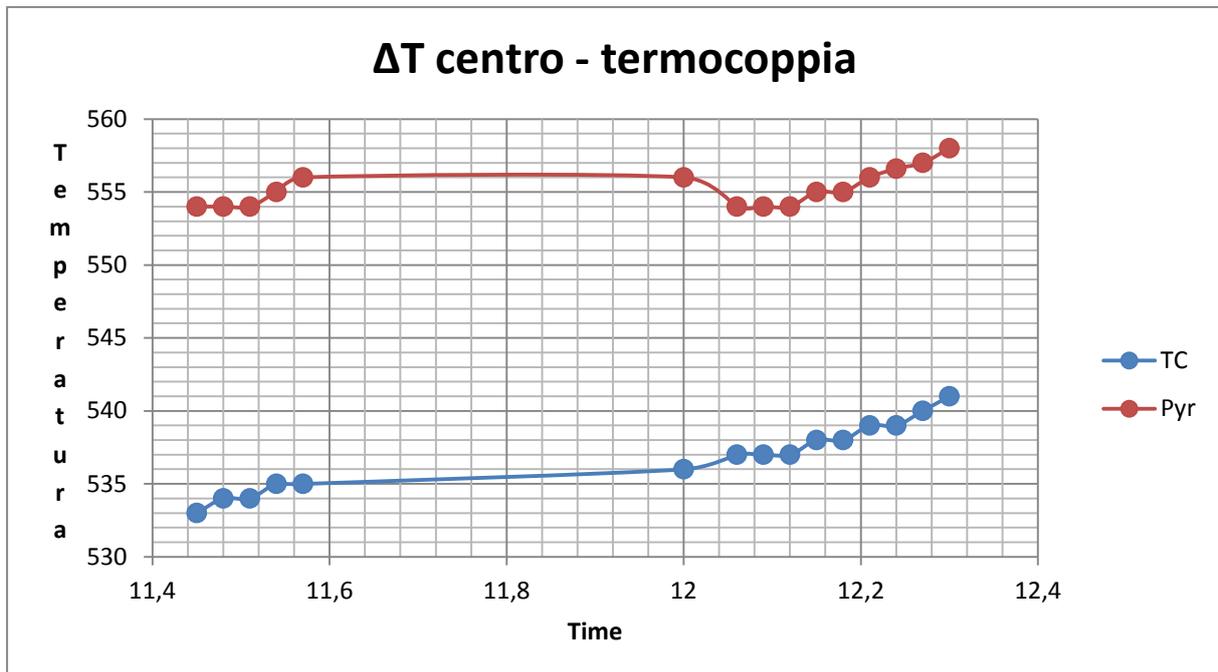


Figura 28: Diff. Temperature tra centro e termocoppia

Come si può evincere sia dalla tabella dei risultati che dal diagramma, la termocoppia ed il pirometro puntato al centro dell'intaglio mantengono una differenza di temperatura $\Delta T \approx 20^\circ$

C. Il diagramma mostra con chiarezza che le temperature nei due punti studiati variano in modo omogeneo nel tempo, mantenendo costante il loro scostamento.

In virtù di questo viene considerato come parametro di controllo $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$. Questa condizione si può esprimere matematicamente come segue:

$$T_{\text{centro intaglio}} = T_{\text{Termocoppia}} + 20^{\circ}\text{C}$$

Quindi, affinché al centro si raggiunga una temperatura di $\approx 540^{\circ}\text{C}$ come richiesto, si controlla che la temperatura nel punto 8 della termocoppia rimanga al valore di 520°C .

5.1.4 Mappatura della Temperatura sulla faccia sx del provino

Ultima parte della fase preparatoria alle prove in temperatura è la mappatura della faccia destra del provino (quella su cui è collegata la termocoppia) con due obiettivi: il primo è quello di posizionare l'induttore in modo tale da avere un riscaldamento il più possibile omogeneo del provino, evitando asimmetrie di temperature che potrebbero compromettere le prove o rendere imprecisi i risultati.

Una prima mappatura di massima della temperatura sulla faccia laterale del provino viene svolta con l'ausilio di una termocamera ad infrarossi che registra il riscaldamento del provino (nello specifico, il provino 030) con immagini in cui le diverse temperature sono indicate da differenti colori. Ciò che si ottiene viene riportato in Figura 29:

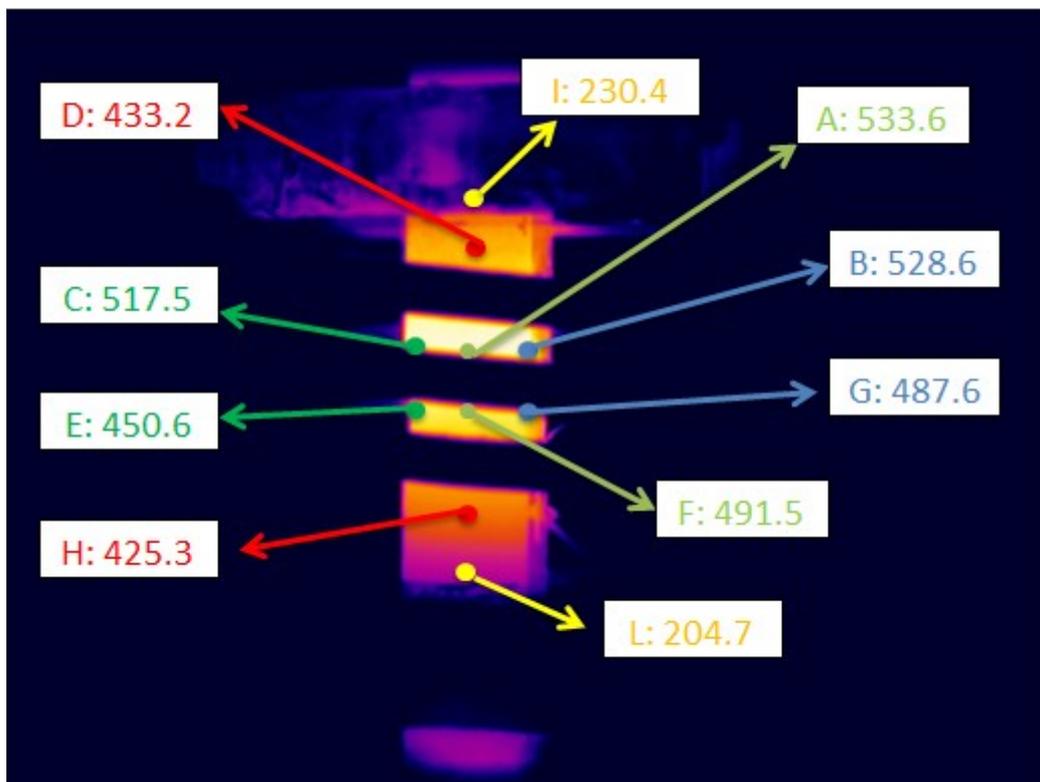


Figura 29: Analisi termica con termocamera provino 030

Nell'immagine restituita dalla termocamera sono ben visibili le spire dell'induttore che avvolgono la zona centrale del provino, l'afferraggio superiore ed il provino stesso.

Sulla base della scala cromatica è evidente che le temperature massime vengono raggiunte nella zona centrale, quella dell'intaglio, e vanno via via diminuendo allontanandosi da tale zona. Questa analisi è stata effettuata prima del settaggio corretto dell'emissività, con un controllo manuale più o meno corretto della temperatura e della corrente di alimentazione, quindi è stata utilizzata per il solo scopo di bilanciare la distribuzione di temperatura. Per questo motivo nella zona centrale si raggiungono temperature dai 500°C ai 533°C, eccedendo la temperatura obiettivo di 540°C.

Analizzando questa immagine si nota la necessità di alcune modifiche nel posizionamento dell'induttore: la temperatura è leggermente maggiore nella zona superiore del provino (anche in virtù del fatto che il calore tende a muoversi verso l'alto), per cui serve abbassare l'induttore; le differenze tra parte frontale e posteriore del provino sono più lievi, ma indicano la necessità di una leggera correzione per ottenere una configurazione ottimale.

Dopo aver apportato tutti i riposizionamenti necessari ed aver svolto lo studio per la determinazione dell'emissività, si svolge una mappatura più precisa della faccia laterale del provino con l'ausilio del pirometro che viene mirato in punti precisi. Anche in questo caso si effettuano più misurazioni con conseguenti riposizionamenti dell'induttore, per raggiungere la configurazione ottimale che dia una distribuzione di temperature il più possibile omogenea.

In Figura 30 viene riportata la distribuzione ottenuta per il provino 030 nella configurazione ritenuta migliore:

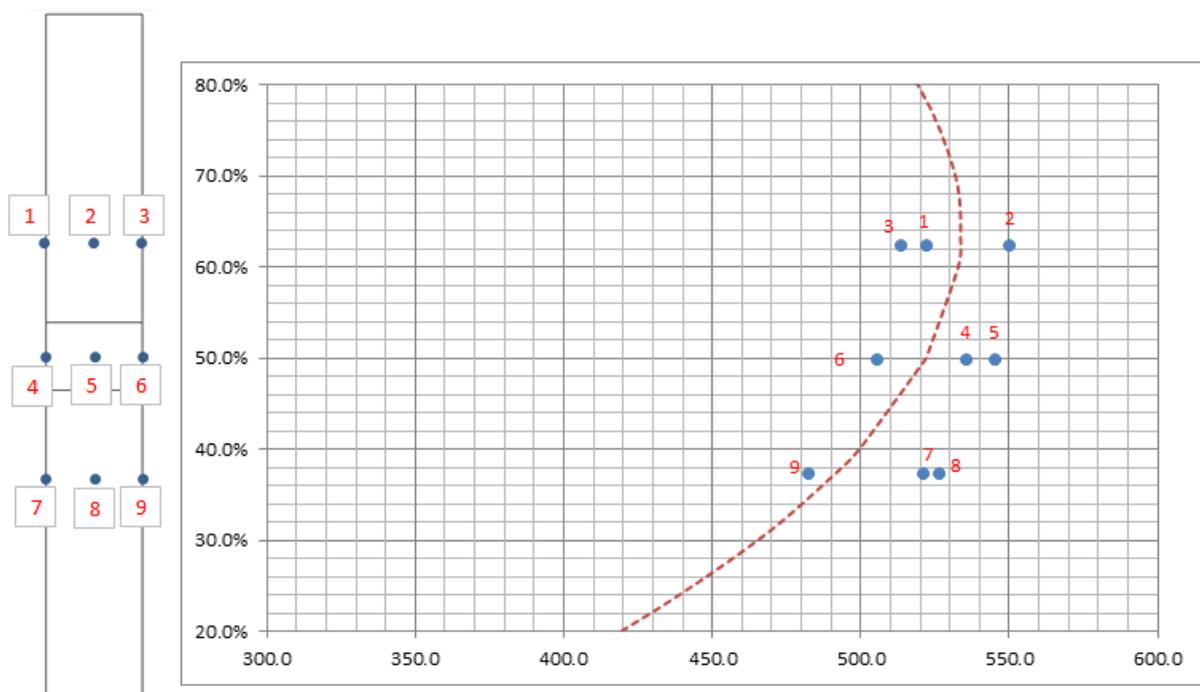


Figura 30: Mappatura termica con pirometro provino 030

La misura viene effettuata dopo aver verificato che l'emissività si sia ormai stabilizzata, nello specifico al valore di 0.168. I punti in cui vengono rilevate le temperature sono in corrispondenza della zona centrale dell'intaglio (50% dell'altezza totale del provino), lungo una linea all'altezza della termocoppia (punti 7 – 8 – 9, al 37.5% dell'altezza) e al 62.5% dell'altezza totale.

È evidente che la distribuzione delle temperature lungo l'altezza del provino che può essere approssimata con una equazione parabolica di secondo grado, rappresentata in rosso nella Figura 30; nella zona centrale si raggiunge una temperatura intorno ai 540°C (nello specifico 545°C) che rispetta la richiesta per i test. La condizione ideale sarebbe quella di avere la temperatura massima di 540°C al centro ed una diminuzione regolare verso l'alto e verso il basso del provino. Nella realtà si ottiene nella zona superiore (62.5%) una temperatura superiore di qualche grado rispetto al centro; in generale però è possibile confermare che c'è una diminuzione di temperature dal centro verso le estremità del provino. Le imperfezioni sono dovute principalmente a lievi errori di misura con il pirometro ed al fatto che è molto difficile trovare la posizione dell'induttore che generi una distribuzione termica perfettamente simmetrica. Inoltre si nota come i punti centrali 2 – 5 – 8, dove si concentrano le linee del campo magnetico dell'induttore, sono più caldi rispetto ai punti esterni; anche questo conferma che la distribuzione di temperature rispetti quanto ci si aspetta dalla teoria e può essere utilizzata per le prove in laboratorio.

A titolo di esempio e di conferma di quanto appena descritto, in Figura 31 viene riportato lo stesso tipo di mappatura, eseguita però per il provino 008 e con la misurazione in più punti, per avere un maggior numero di dati ed una maggior precisione dell'analisi.

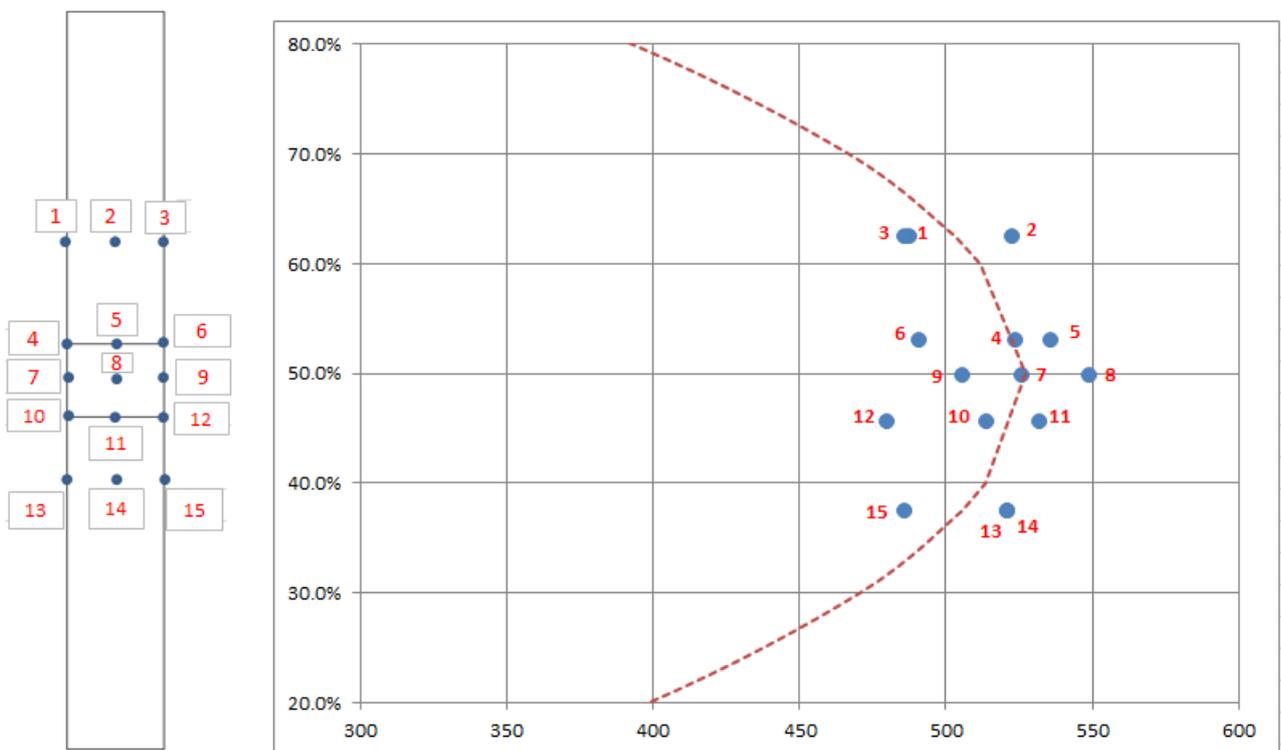


Figura 31: Mappatura termica con pirometro provino 008

In Figura 31.1 viene invece riportato il profilo di temperatura restituito dalla termocamera in modo automatico:

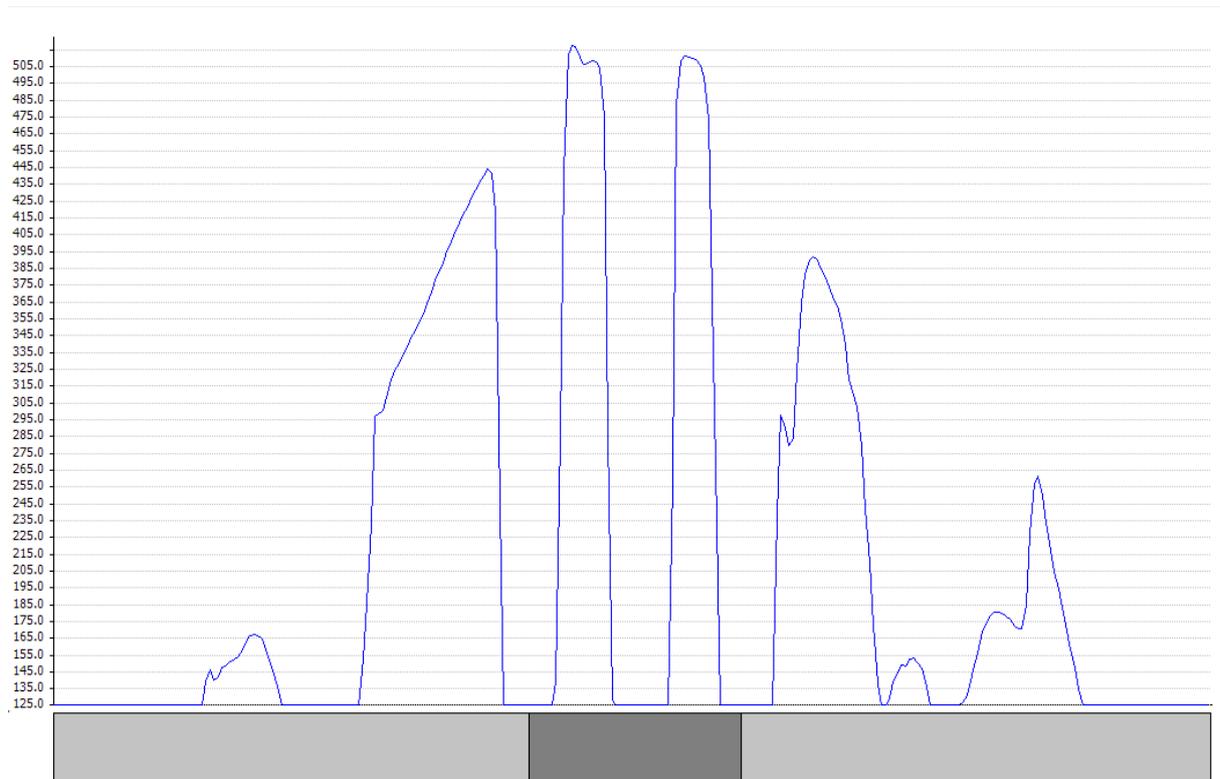


Figura 31.1: Profilo di temperature con termocamera

In esso sono presenti tre valli, in cui la temperatura percepita scende intorno ai 125 °C, che sono le zone dove passano le spire attorno al provino e la termocamera rileva la loro temperatura e non quella del provino. Gli altri picchi riportano le temperature reali del provino, mentre non è indicato il picco al centro dell'intaglio perché esso è coperto da una spira, come si può vedere in Figura 32. Provando ad interpolare i picchi lungo tutta l'estensione del profilo, si ottiene la stessa distribuzione di prima: la temperatura raggiunge un massimo al centro dell'intaglio, per poi abbassarsi progressivamente verso le due estremità del provino.

5.1.5 Tensioni generate dal gradiente termico interno

Come spiegato in *Appendice I.III*, il gradiente termico che si genera all'interno del provino crea delle dilatazioni del materiale con conseguente generazione di tensioni che si vanno a sommare a quelle applicate dall'esterno. Queste tensioni possono in linea di massima essere calcolate, conoscendo il coefficiente di espansione termica α e Modulo Elastico E dell'Inconel 718.

Dati Inconel 718:

- $E = 2.1 * 10^{11} \text{ MPa}$
- $\alpha = 12.1 * 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Queste sono tensioni che si vanno a sommare a quelle generate dai carichi applicati dall'esterno. Ciò fa sì che nei punti centrali siano presenti livelli di temperatura superiori rispetto a quelli dei test a temperatura ambiente, creando delle deformazioni interne che vanno a peggiorare le condizioni in termini di vita a fatica.

5.2 Fase esecutiva delle prove

Dopo la prima fase di preparazione alle prove pratiche, con misurazioni termiche, analisi dei risultati, mappature termiche del provino, settaggio dell'emissività da utilizzare nei test come parametro fisso, si hanno tutti i dati per passare alla fase esecutiva vera e propria.

In questo paragrafo si fa principalmente riferimento al test sul provino 030.

5.2.1 Montaggio del provino

I test in temperatura vengono eseguiti sulla Macchina Schenck [*Appendice III*] che permette di montare il provino avvolto dalle spire dell'induttore di riscaldamento.



Figura 32: Montaggio provino su macchina Schenck per test ad alte T

In Figura 32 è visibile il montaggio del provino: nelle prove a temperatura ambiente il provino viene serrato nell'afferraggio inferiore con la faccia anteriore (quella su cui è inciso il numero seriale) rivolta verso l'operatore; sulla base di questa disposizione vengono determinate la faccia sinistra e quella destra. Nelle prove in temperatura il provino viene montato in direzione contraria: dal momento che la termocoppia, su cui deve puntare il pirometro è montata sulla faccia dx (riferimento con numero seriale rivolto verso l'operatore) ed il pirometro può essere posizionato solo al centro del laboratorio, il provino viene montato con la faccia posteriore rivolta verso l'operatore, in verso opposto alle prove a temperatura ambiente.

Dopo aver bloccato il provino, serrando le viti che assicurano la forza necessaria a mantenere un afferraggio saldo e sicuro durante la prova, si accende la macchina, la si porta in alta pressione e si fa salire il provino fino all'altezza necessaria ad avere un altrettanto buon

afferraggio nella parte superiore del provino. Anche sull'afferraggio superiore si serrano le viti di pressione.

5.2.2 Riscaldamento preventivo del provino

Quando si verifica che il provino è saldamente afferrato, si accende l'induttore e si procede ad una fase di riscaldamento dello stesso per un tempo di circa 1.5/2 ore.

Per fare questo si impostano le seguenti condizioni:

- *Emissività* $\epsilon = 0.168$, ottenuta dalla calibrazione termica precedentemente eseguite;
- *Corrente* = 78.1 A.

Questa fase ha lo scopo di portare il provino alla temperatura desiderata, con al centro 540 °C, e raggiungere una situazione stabile, superando tutta la fase di transitorio, di cambiamenti interni e di instabilità.

Durante questa fase si ripetono alcune misurazioni con le modalità precedentemente spiegate, per verificare che la temperatura mostrata dalla termocoppia sia concorde con quella indicata dal pirometro puntato sulla termocoppia stessa. Queste prove confermano un'emissività di 0.168.

5.2.3 Prova con ciclo chiuso per controllo temperatura

Dopo la fase di riscaldamento è possibile far partire la prova di trazione vera e propria. Con l'accensione della macchina Schenck, si impostano i seguenti valori che assicurano un test con un carico di 85 kN, come richiesto:



Figura 33: Esempio di schermata di controllo test Macchina Schenck

- Forma d'onda: sinusoidale;
- Ampiezza: 42.5 kN;
- Frequenza: 1 Hz/s.

La prova di trazione prosegue regolarmente.

In aggiunta alla prova di trazione deve esserci un controllo automatico della temperatura affinché, con la regolazione della corrente nell'induttore, al centro dell'intaglio sia mantenuta a 540 °C.

Questo controllo automatico viene effettuato con l'ausilio del pirometro e di un controllore collegato al pirometro ed al riscaldatore ad induzione, a formare un ciclo chiuso che si può schematizzare come segue:

1. Il pirometro viene puntato sul punto 8, in corrispondenza della termocoppia; esso misura con una emissività impostata a 0.168 e mostra a video la temperatura di quella zona (corrispondente al valore restituito dalla termocoppia, anche se quest'ultima non interviene nel ciclo chiuso di controllo automatico);
2. Il controllore è un dispositivo che riceve in input la temperatura letta dal pirometro e fornisce in output al riscaldatore il segnale di regolazione della corrente per arrivare alla temperatura che gli è stata impostata digitalmente. Va precisato che durante la

fase preparatoria è stato quantificato un gap di temperatura tra pirometro e controller, pari a 4 gradi, che va tenuto sempre in considerazione.

La temperatura che viene controllata è quella del punto 8, in corrispondenza della termocoppia; come spiegato precedentemente, esiste una differenza di 20 °C tra termocoppia e centro intaglio:

$$T_{\text{centro intaglio}} = T_{\text{Termocoppia}} + 20^{\circ}\text{C}$$

Perciò il controllo viene fatto sulla termocoppia, per mantenerla a 520 °C, assicurando quindi 540 °C al centro dell'intaglio.

3. Il riscaldatore varia la corrente nell'induttore e riscalda o raffredda.

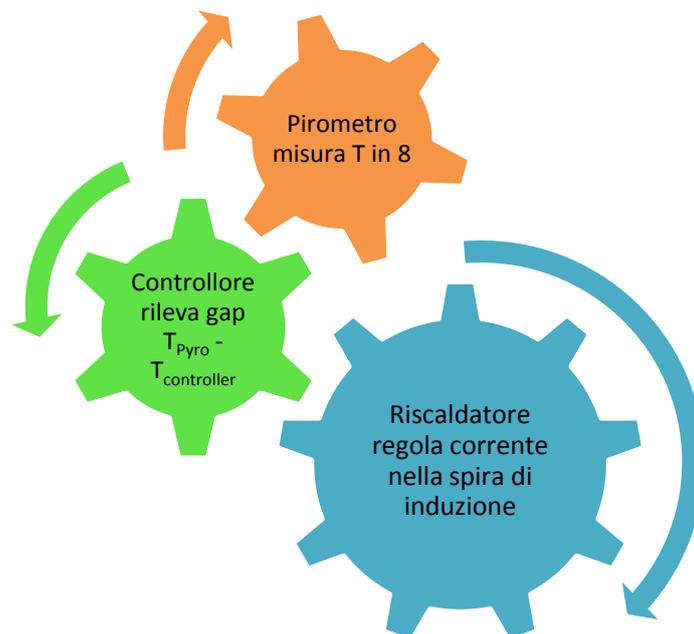


Figura 34: Ciclo chiuso di controllo della T

È necessaria la presenza fisica di qualcuno che blocchi la macchina nel momento in cui il provino arriva a rottura, perché il pirometro punterebbe in zone molto più fredde (come il muro del laboratorio) e porterebbe il riscaldatore ad alzare eccessivamente la temperatura.

5.3 Analisi dei risultati e della rottura imprevista

In Figura 35 viene riportato il sommario dei risultati, segreti per riservatezza aziendale, del test sul provino 030:

	ID	034
	LAVORAZIONE	BROCCIATI - 540 °C
GEOMETRIA	THICKNESS [mm]	** .040
	WIDTH [mm]	** .020
	NECK [mm]	** .060
	min dx [mm]	** .960
	min sx [mm]	** .020
CONDIZIONI DI PROVA	GRIP TORQUE [Nm]	80
	FREQUENZA [Hz]	1
	TEMP. [°C]	25
CARICO	min [kN]	0
	min Instron [kN]	/
	Max [kN]	85
	Max Instron [kN]	/
TENSIONI	$\sigma_{x,nom}$ [Mpa]	1000.00
	$\sigma_{x,MAX}$ [Mpa]	1201.00
	$\sigma_{VM,Neck}$ [Mpa]	1206.00
	$\sigma_{VM,Offset}$ [Mpa]	1231.00
ROTTURA	CICLI	***
	FACCIA	/
	ALTEZZA CRICCA [mm]	/

Figura 34: Risultati provino 030

Il provino 030 ha raggiunto la rottura ad un numero di cicli notevolmente più basso rispetto agli altri, sia brocciati che fresati ed ECM. Questo risultato è dovuto all'effetto contemporaneo del tipo di lavorazione (brocciatura), con relativo livello di rugosità, e dell'alta temperatura.

Sul grafico in Figura 36 vengono riportati i valori di rugosità dei provini 008 – 014 – 019 – 030 destinati alle prove in temperatura:

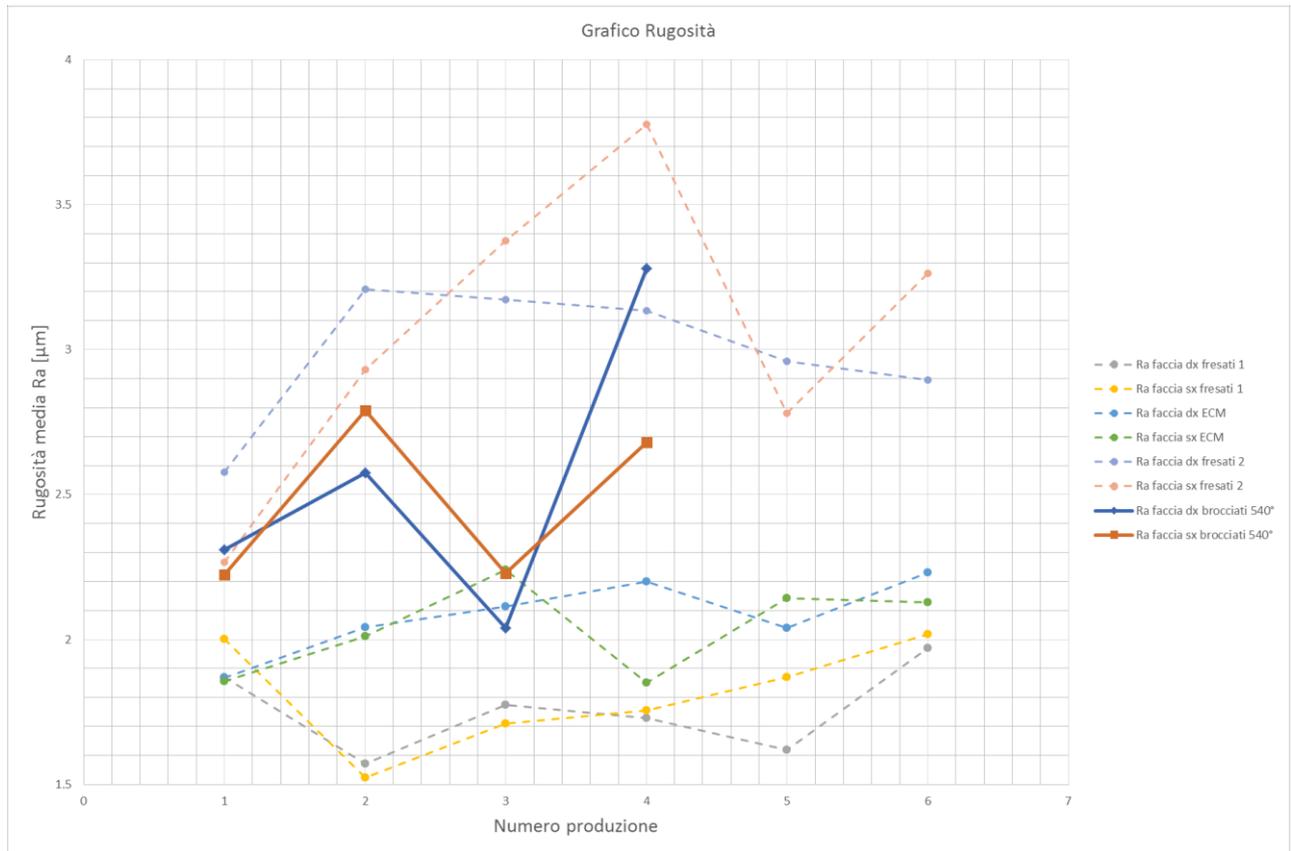


Figura 35: Rugosità provini 008 - 014 - 019 - 030

È evidente che questo lotto di provini sia stato lavorato lasciando una peggior finitura superficiale rispetto al primo lotto di fresati, che hanno subito una lucidatura ed anche ai provini elettroerosi chimicamente. Al contrario, la fresatura senza successiva lucidatura genera valori di rugosità più alti.

In generale i valori di rugosità lasciati dalla brocciatura eseguita sono abbastanza alti, fattore che influisce negativamente sulla vita a fatica di questi provini. Questo si va ad aggiungere al peggioramento generato dalla condizione di alta temperatura.

Il test sul provino 030 è giunto a conclusione, ma ha rilevato una rottura imprevista e confermata dai test sugli altri provini.

Di seguito viene riportato un report di immagini che documentano la rottura inaspettata e differente da quelle ottenute precedentemente.



Figura 36: Rottura #030 pezzo inferiore

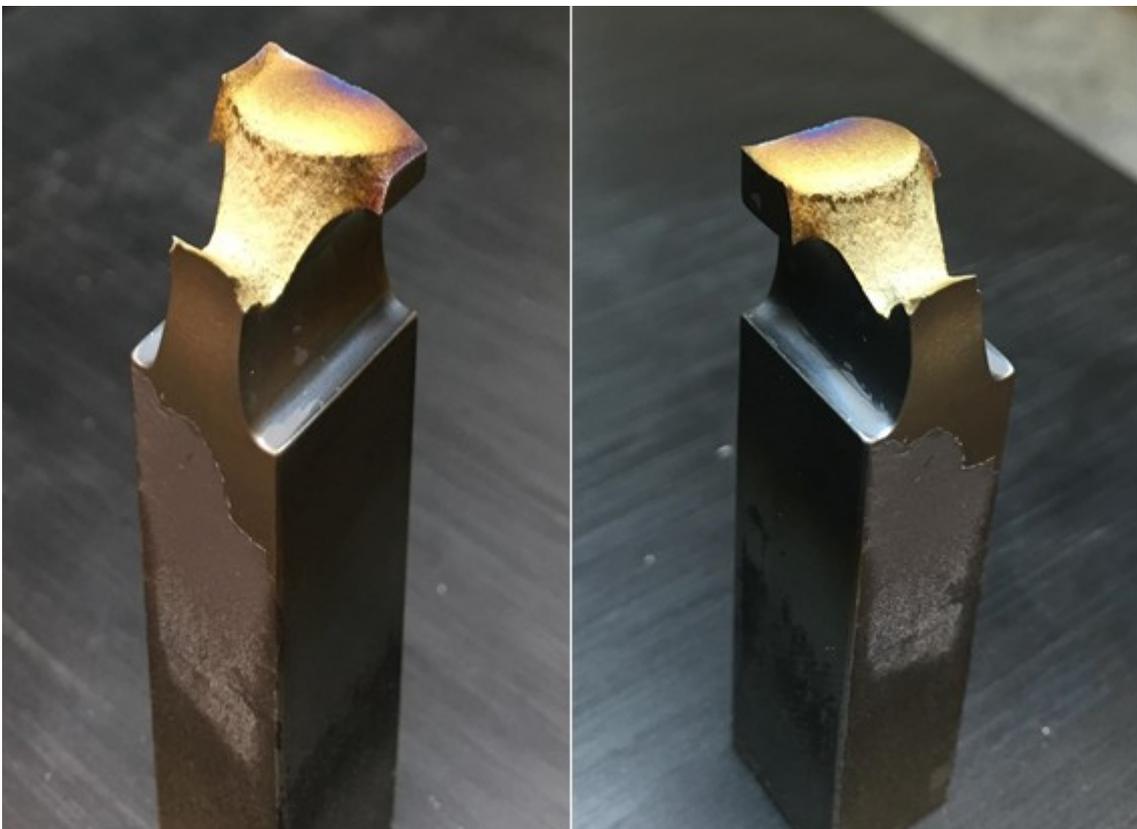


Figura 37: Rottura #030 pezzo superiore

Il provino 030 ha manifestato una rottura completamente inaspettata ed imprevista. Come si può vedere dalle Figure 37 e 38, la rottura non è avvenuta a metà dell'altezza del provino, lungo un piano pressoché normale alla direzione di applicazione della forza.

Come si vede nella Figura 37, la cricca è nucleata in corrispondenza dei tre punti di saldatura dati per fissare la termocoppia sulla faccia frontale del provino e si è sviluppata lungo un piano inclinato di circa 45°.

Analizzando il pezzo superiore del provino, riportato in Figura 38, è ben visibile l'innesco della cricca che ha assunto un colore blu in seguito al riscaldamento, il suo primo sviluppo piano dovuto alla deformazione plastica e poi la rottura lungo il piano inclinato. La Figura 39 riporta uno zoom della zona di innesco e deformazione sul pezzo superiore:

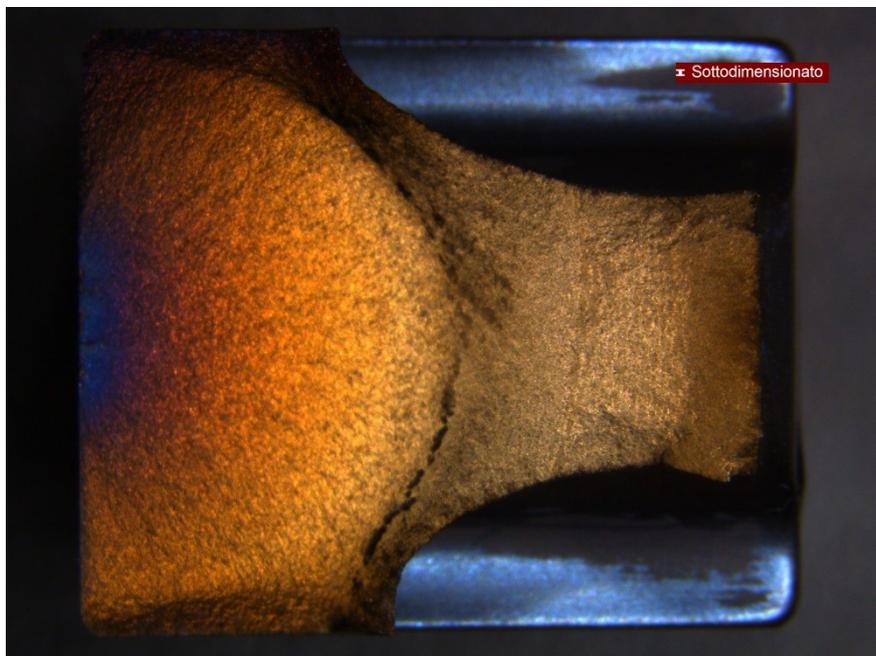


Figura 38: Zoom cricca su pezzo superiore provino 030

È ben visibile il punto di innesco della cricca, colorato di blu dovuto al riscaldamento durante la prova ed ulteriore surriscaldamento subito in seguito alla rottura. La zona arancione è la zona di deformazione plastica, dopo la quale è avvenuta la rottura.

Questo è un esempio di ciò che è successo al termine delle prove in temperatura e che le ha rese inutili ed insoddisfacenti ai fini dello studio dell'effetto della temperatura sulla vita a fatica. L'unico aspetto che si può dedurre è che in generale la vita a fatica dei provini testati ad alte temperature è notevolmente inferiore rispetto a quella dei provini testati a temperatura ambiente; si può stimare una riduzione fino a metà della vita in condizioni ambiente.

In Figura 40 viene riportata un'immagine del pezzo superiore del provino presa frontalmente: è chiaro come la prova non sia da considerarsi affidabile ai fini della ricerca, in quanto il

punto di innesco della cricca sta al di fuori della zona di intaglio, che è quella da studiare, e si sviluppa in modo non regolare fino alla faccia opposta.



Figura 40: Vista frontale pezzo superiore provino 030

Quindi le prove in temperatura sui quattro provini forniti da GE Avio non sono affidabili in quanto presentano rotture dovute a cricche generate in un punto fuori dalla zona di intaglio e la cui origine non è imputabile al contemporaneo effetto di geometria di intaglio, lavorazione ed alta temperatura, quanto piuttosto alla presenza della termocoppia saldata direttamente sul provino.

Infatti, osservando il provino ad occhio nudo e poi con l'ausilio di microscopio ottico e microscopio 3D, si può giungere alla conclusione che questa rottura contraria alle aspettative sia dovuta agli effetti microscopici, all'interno del materiale, della saldatura eseguita in azienda.

La saldatura è un processo di giunzione di due materiali metallici, in questo caso la piastrina della termocoppia e la superficie del provino, tramite l'apporto di materiale o semplice fusione dei materiali base attraverso l'applicazione di temperature notevolmente elevate, dell'ordine del migliaio di gradi °C. Il raggiungimento localizzato di temperature così elevate genera inevitabilmente dei cambiamenti nel materiale, uno spostamento dei grani, un loro

accorpamento e cambiamento di geometria e dimensioni. In letteratura si può reperire uno schema teorico di ciò che avviene nella zona di saldatura, come visibile in Figura 41:

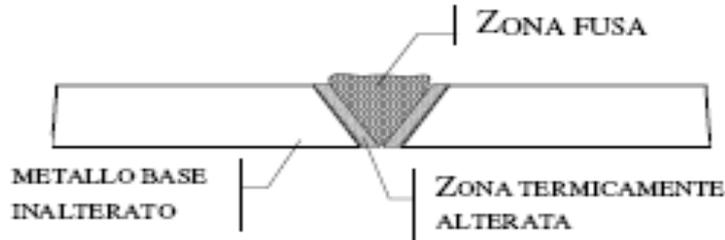


Figura 41: Struttura microscopica giunto saldato

Si identificano tre zone distinte:

1. Il *metallo base*, cioè il metallo di cui è costituito il pezzo saldato;
2. La *zona termicamente (o chimicamente) alterata* (ZTA);
3. La *zona fusa*, cioè la zona che viene fusa durante la saldatura, arrivando a temperature fino a 1000 °C, e che forma il cordone di saldatura.

Una fase fondamentale della saldatura, di cui ne influenza direttamente le proprietà meccaniche, è il raffreddamento del bagno di fusione fino a temperatura ambiente, che porta alla generazione del cordone di saldatura. Il processo inizia con la formazione di grani colonnari, detti dendriti, relativamente lunghi e disposti parallelamente al flusso di calore. La struttura e la dimensione dei grani dipendono dalla lega, dal processo di saldatura e dal materiale di apporto che è stato utilizzato.

In linea generale la zona fusa subisce un raffreddamento abbastanza lento, con formazione di grani di dimensioni piuttosto grandi, per cui questa zona ha valori relativamente bassi di resistenza, durezza, tenacità e duttilità.

La ZTA si trova all'interno del metallo base, in prossimità della zona fusa; la sua microstruttura differisce però da quella del metallo base perché nella fase di saldatura subisce un ciclo termico che comporta una trasformazione microstrutturale. Le proprietà e la microstruttura di questa zona dipendono principalmente dalla velocità di riscaldamento, di raffreddamento ed alla temperatura raggiunta durante la saldatura.

Il calore fornito produce una ricristallizzazione dei grani allungati del metallo base; i grani lontani dalla zona fusa ricristallizzano, diventando grani fini ed equiassici, mentre quelli vicini, sottoposti ad alte temperature per un lungo periodo, crescono in dimensioni. La crescita dei grani comporta che quella zona sia più tenera e meno resistente.

Tutti questi fattori fanno sì che il punto di saldatura a livello microscopico rappresenti una vera e propria inclusione; infatti, nonostante si tratti dello stesso materiale, in quella zona cambiano alcuni parametri fondamentali come dimensioni e forma del grano, andando a costituire una discontinuità.

Uno dei problemi che si porta dietro il processo di saldatura è la nascita delle cricche in varie posizioni e direzioni; esse possono trovarsi sia nella zona fusa che nella zona termicamente alterata. Esse in genere nucleano per una combinazione di fattori: la presenza di gradienti di temperature (come nel caso di questo studio) genera tensioni termiche nella zona saldata, ma anche una variazione nella composizione della stessa zona che provoca contrazioni differenti in punti diversi. Inoltre interviene anche un'impossibilità di contrazione del giunto saldato durante il raffreddamento. Nello specifico di quanto accaduto in questi test si tratta di cricche a freddo, cioè sviluppatasi dopo il raffreddamento del cordone di saldatura.

In Figura 42 viene riportata l'immagine ottenuta con il microscopio 3D del piano di rottura:

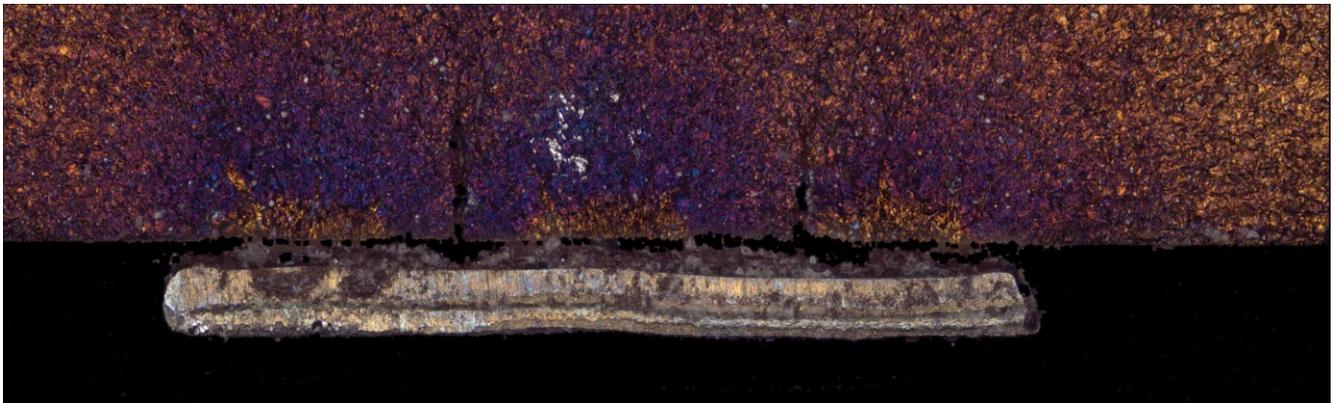


Figura 42: Zoom microscopio zona saldatura provino 030

Nella figura precedente è visibile la piastra della termocoppia, di colore grigio, attaccata alla superficie del provino ed i tre punti di saldatura che appaiono dorati. Queste sono zone che hanno subito, come già detto, cambiamenti microstrutturali del materiale; da esse è nucleata la cricca e sono visibili le tre aree di prima deformazione plastica, sotto forma di aloni viola attorno ai tre punti di saldatura. Con il prosieguo della deformazione legata all'espansione della cricca, le tre zone di deformazione si uniformano in un'unica area che porta alla rottura finale. Le zone di colore viola indicano un cambiamento interno al materiale, ed un surriscaldamento avvenuto man mano che la cricca continua la sua espansione.

La causa di quanto accaduto risiede proprio nei tre punti di saldatura che l'azienda ha realizzato direttamente sulla superficie del provino; essi, a causa dei cambiamenti microscopici dei grani del materiale provocati dall'elevata temperatura della saldatura, rappresentano a tutti gli effetti delle inclusioni all'interno del metallo base. Le inclusioni, siano esse di materiale diverso da quello base o dello stesso materiale ma con diversi parametri microscopici, si comportano come concentratori di tensioni, bloccano il movimento interno delle dislocazioni impedendo la deformazione e comportando l'innesco delle cricche che hanno reso la saldatura la causa predominante delle rotture di questo lotto di provini.

6. CONCLUSIONI

6.1 Conclusioni su prove a temperatura ambiente

La prima parte dello studio ha condotto ad una serie di risultati che hanno in gran parte confermato quanto atteso dalla teoria precedente.

Dalla curva di Wholer su cui vengono riportati i risultati dei test in termini di carico e numero di cicli a rottura si evince che una fresatura, seguita da una lucidatura superficiale, conduce ad una vita a fatica più elevata rispetto ad una fresatura priva di successivo trattamento superficiale.

Sempre dall'analisi della curva di Wholer si conclude che la lavorazione dei provini con Elettroerosione chimica non è ottimale nell'ottica di un miglioramento della vita a fatica, avendo ottenuto valori di cicli a rottura nettamente inferiori a quelli dei lotti fresati.

In virtù di questo si sottolinea l'importanza degli effetti che la lavorazione meccanica ha sulla superficie dei provini, che si traduce in valori più o meno elevati di rugosità. Viene quindi dimostrato che una lavorazione meccanica seguita da una di finitura superficiale, come la lucidatura, porta con sé valori più bassi di rugosità e conseguentemente maggiori vite a fatica.

Altro aspetto preso in considerazione è l'effetto benefico di tensioni residue di compressione.

Considerando tutti questi aspetti insieme, si conclude che sarebbe ottimale, nell'ottica del miglioramento della vita a fatica, una lavorazione che non vada ad intaccare chimicamente il materiale, che non sia nemmeno troppo aggressiva nell'asportazione del materiale e che essa sia seguita da un trattamento di finitura superficiale e/o da un processo che generi tensioni residue di compressione sulla superficie, come la pallinatura.

6.2 Conclusioni su prove ad alta temperatura

Le conclusioni a cui si può giungere per la parte di prove ad alte temperature sono in parte limitate dal tipo di rottura imprevisto che si è verificato.

Dai risultati ottenuti si sono confermate alcune evidenze presenti nella teoria:

1. Nonostante l'errore compiuto saldando le termocoppie, l'Inconel 718 ha dimostrato di essere un materiale che presenta comunque una buona vita a fatica in condizioni di elevate temperature operative, come nelle applicazioni aeronautiche per cui viene principalmente utilizzato;
2. Non si può però confermare con evidenza di risultati sperimentali l'influenza penalizzante della temperatura sulla vita a fatica dei componenti meccanici;
3. Viene nuovamente dimostrata l'influenza fortemente penalizzante per la vita a fatica delle imperfezioni interne al metallo base con cui è realizzato il componente;

Si sottolinea quindi la necessità di realizzare componenti particolarmente critici, come le palette di una turbina aeronautica, ponendo grande attenzione alla composizione chimica del

materiale e ad una microstruttura il più possibile omogenea e priva di imperfezioni ed inclusioni. Il tutto può essere perfezionato con una buona finitura superficiale del componente.

APPENDICI

I LA FATICA e LOW CYCLE FATIGUE

I.1 Generalità sulla fatica

“Il processo di cambiamento strutturale progressivo, localizzato e permanente che avviene all’interno di un materiale, soggetto a condizioni che producono tensioni e deformazioni fluttuanti in uno o più punti e che culmina in una cricca o nella completa frattura dopo un sufficiente numero di fluttuazioni” [5]

Quella riportata è la definizione teorica che l’ASTM fornisce del fenomeno della fatica. Oggi si considera la fatica come un processo di cambiamento costituito da tre distinte fasi principali: la nucleazione di una cricca, la crescita della stessa ed instabilità finale o rottura.

Fin dal 1830 è riconosciuto che un metallo, soggetto a tensioni cicliche o ripetitive, cede a tensioni inferiori rispetto a quella necessaria a portarlo a rottura in una situazione di carico statico. Oggi si stima che circa il 90% di tutti i cedimenti per cause meccaniche sia imputabile a fenomeni di fatica strutturale. Il cedimento per fatica è particolarmente insidioso perché si verifica senza alcun segnale d’allarme precedente. La frattura avviene senza grandi deformazioni e con una superficie normale alla direzione della tensione principale.

Tre sono le condizioni base che causano un cedimento per fatica:

- 1) un valore massimo di tensione di trazione piuttosto elevato;
- 2) una grande variazione o fluttuazione del carico applicato;
- 3) un numero sufficientemente grande di cicli di carico applicato;

Inoltre ci sono altri fattori influenzanti la vita a fatica di un componente: la concentrazione di tensioni per la presenza di intagli, la corrosione, la temperatura, sovraccarico, tensioni residue, tensioni combinate, lavorazioni meccaniche subite e trattamenti superficiali.

Il carico viene applicato in modo ciclico con andamento sinusoidale, visibile in Figura 43. Per convenzione le tensioni di trazione sono considerate positive e quelle di compressione negative.

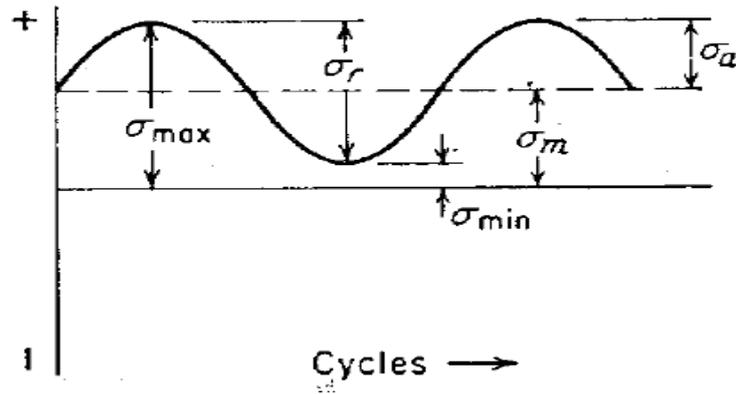


Figura 43: Andamento sinusoidale del carico applicato

In figura sono riportate:

- σ_{max} : tensione massima;
- σ_{min} : tensione minima;
- σ_m : tensione media tra la massima e la minima;
- σ_r : range di tensione, differenza tra la tensione massima e la minima;
- σ_a : tensione alternata, metà del range di tensione

Inoltre si definisce il *Rapporto di tensione* $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$, che può essere maggiore o minore di 0, uguale a 0 o ad 1; il valore di R cambia il tipo di andamento del carico applicato.

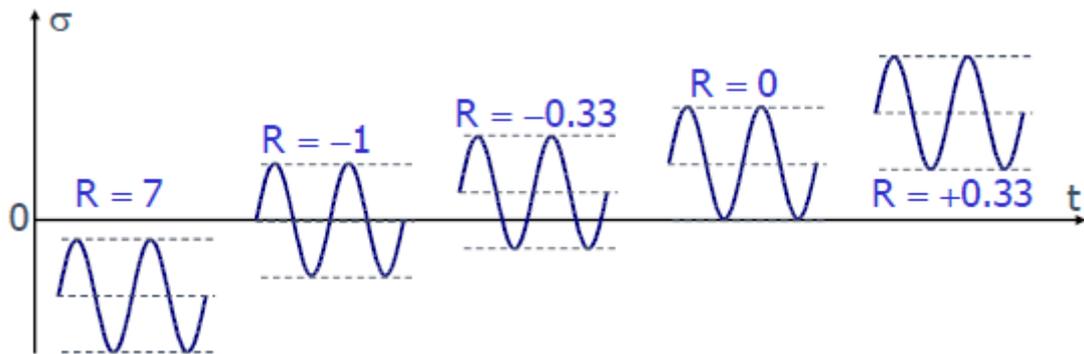


Figura 44: Andamenti del carico al variare di R

Il metodo più comune per presentare i dati ingegneristici della fatica è l'utilizzo della curva σ -N, che lega il numero di cicli alla tensione applicata. Questa relazione viene determinata per uno specifico valore di tensione media e di rapporto di tensione R.

In Figura 45 viene riportato un esempio di curva σ -N:

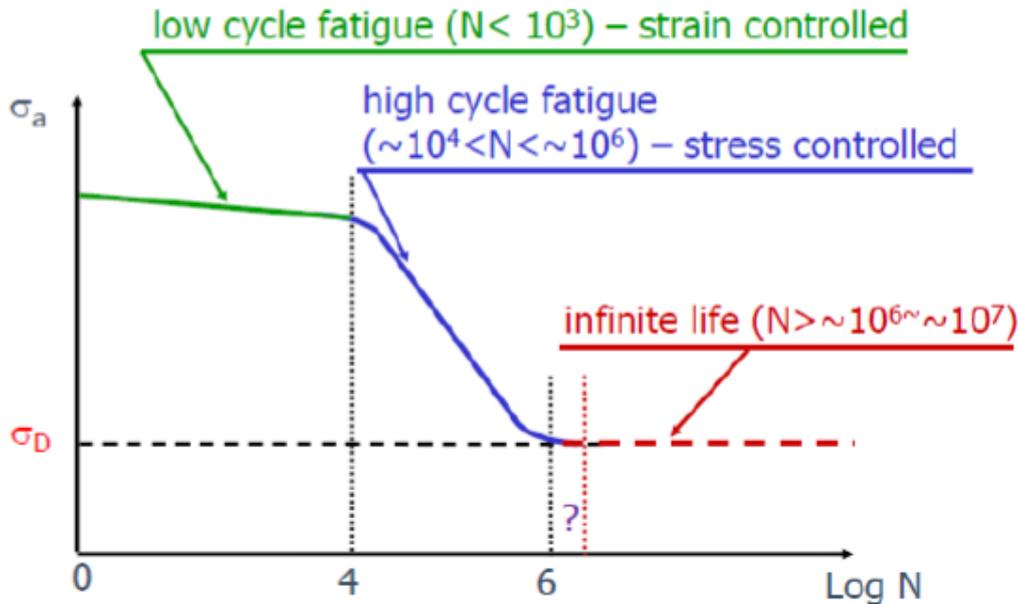


Figura 45: Curva tensione - N

Sono visibili due domini: uno è legato a carichi ciclici relativamente bassi e per cui le deformazioni avvengono principalmente in campo elastico, caso in cui il numero di cicli a rottura è piuttosto alto (High Cycle Fatigue). L'altro dominio è caratterizzato da alti carichi che inducono una deformazione plastica del metallo e comporta un minor numero di cicli prima della rottura; questa zona viene chiamata Low Cycle Fatigue.

I.II Low cycle fatigue

L'obiettivo dell'ingegneria è tipicamente quello di portare il componente ad avere una vita a fatica il più elevata possibile, ma ci sono situazioni in cui la fatica a basso numero di cicli assume una maggiore importanza per lo studio. È questo il caso, per esempio, di sistemi ad alte prestazioni come le turbine aeronautiche: la contemporaneità di elevati carichi transitori sia meccanici che termici durante la vita operativa ed il danno che si va accumulando, può portare alla nascita di cricche ed a rottura per fatica. Inoltre, nel caso di carichi nominalmente bassi, in presenza di intagli geometrici, il materiale subisce una quantità di plasticità locale che viene ben studiata dalla teoria LCF.

Tuttavia, nonostante i numerosi studi del passato abbiano portato a notevoli progressi, serve ancora molto studio per avere tutti i mezzi necessari a predire in modo accurato la vita a basso numero di cicli dei componenti meccanici e strutturali, tenendo in considerazione gli effetti di tutti i fattori che possono agire contemporaneamente.

La zona LCF, che si estende fino a circa 10^3 cicli, presenta una resistenza quasi costante e molto vicina alla tensione di rottura del materiale; avviene che il materiale subisce una sostanziale deformazione plastica, per cui la vita a fatica in questa zona può essere descritta in maniera migliore come funzione della deformazione plastica ϵ , piuttosto che dell'ampiezza

ciclica della tensione. Per questo motivo, nello studio precedente, hanno fondamentale importanza le curve σ - ϵ .

Come nel caso delle turbine, le condizioni di fatica a basso numero di cicli si presentano frequentemente dove le tensioni che si ripetono sono di tipo termico. Dal momento che le tensioni termiche originano da un'espansione termica del materiale, è facilmente constatabile che in questo caso la fatica deriva da cicli di deformazioni piuttosto che da cicli di tensioni.

Il metodo usuale per presentare i risultati delle prove LCF è quello di diagrammare il range di deformazione plastica rispetto al numero di cicli su scala bilogarithmica, come riportato nell'esempio in Figura 46.

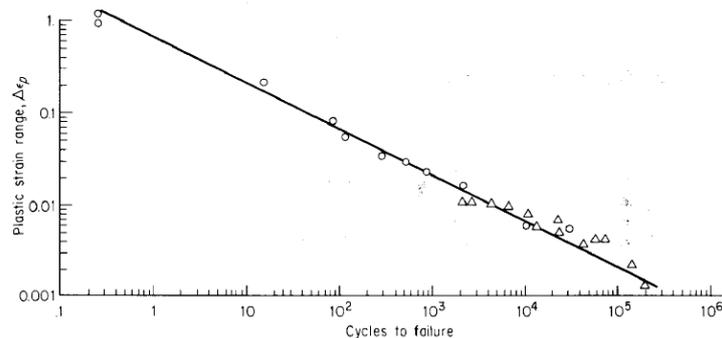


Figura 46: Low-cycle fatigue curve per acciaio inossidabile 347

Alle volte si sceglie di diagrammare l'ampiezza della sola deformazione plastica e non della deformazione totale; sperimentalmente si è dimostrato che in questo caso è possibile approssimare i dati ottenuti con una retta del tipo riportato in Figura 46, caratterizzata da un coefficiente angolare compreso tra -0.5 e -0.7 rispetto all'asse orizzontale. Successivamente, con la prosecuzione degli studi e delle prove sperimentali, si è appurato che la vita a fatica viene correlata meglio alla deformazione totale, ossia la somma di quella elastica e quella plastica, in particolare per quanto riguarda numeri di cicli vicini alla zona di transizione da LCF a HCF. Questo comportamento è valido per un elevato numero di materiali, alcuni dei quali sono riportati in Figura 47.

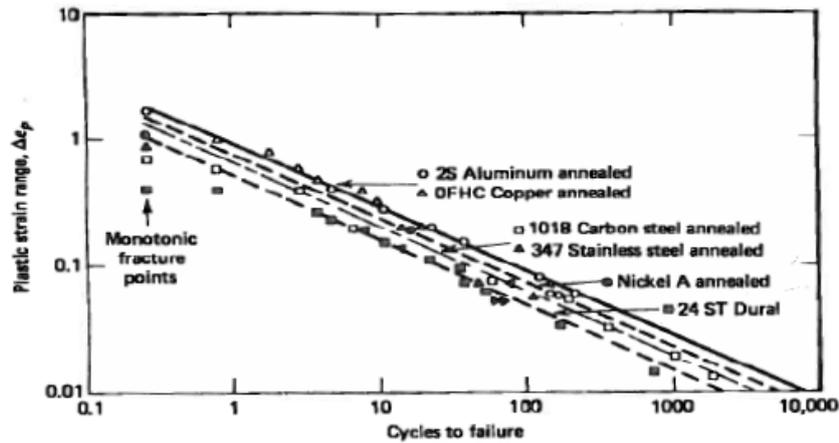


Figura 47: Risultati sperimentali di prove LCF per diversi materiali

Questi risultati sperimentali hanno condotto alla formulazione di un'equazione empirica che lega il range di deformazione plastica $\Delta\varepsilon_p$ al numero di cicli a rottura N_f in condizioni di tensione uniaassiale nel dominio LCF.

La relazione, detta relazione di Coffin-Manson, dal nome di coloro che l'hanno formulata, è la seguente:

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

Dove:

- $\frac{\Delta\varepsilon_p}{2}$ rappresenta l'ampiezza della deformazione plastica;
- ε'_f rappresenta il coefficiente di duttilità a fatica, pari alla deformazione dopo un ciclo;
- $2N_f$ rappresenta il numero totale di inversioni di deformazione a rottura, considerando che un ciclo rappresenta due inversioni;
- c rappresenta l'esponente di duttilità a fatica, pari alla pendenza della curva di deformazione plastica rispetto alle inversioni a rottura del grafico bilogarithmico.

Un'osservazione importante è che valori bassi di c corrispondono ad una maggiore vita a fatica.

Morrow ha proseguito i suoi studi sulla correlazione tra vita a fatica e deformazione, arrivando a concludere che fosse possibile sovrapporre in un unico diagramma la deformazione plastica e quella elastica, come riportato in Figura 48.

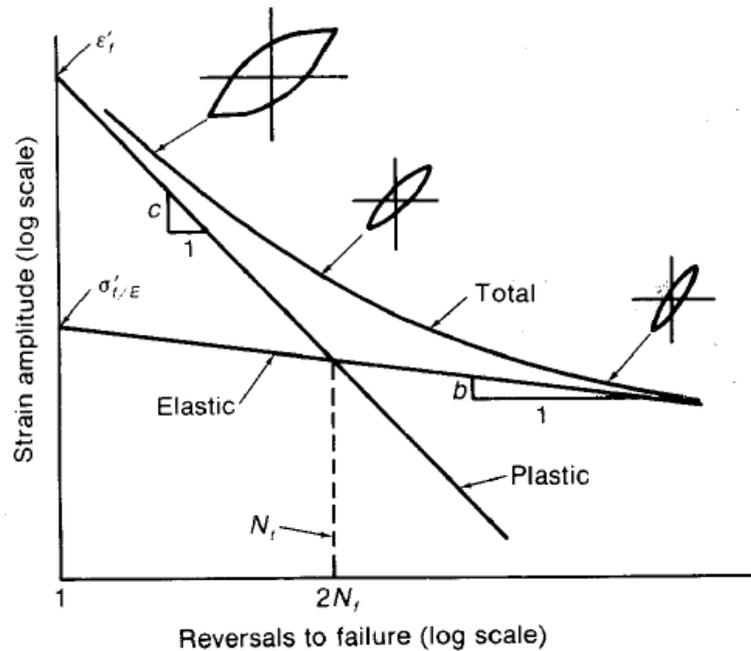


Figura 48: Curva deformazione - vita con sovrapposizione def. plastica ed elastica

Questo diagramma è la rappresentazione grafica dell'equazione che sovrappone deformazione plastica e deformazione elastica:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

Dove b e $\frac{\sigma'_f}{E}$ sono costanti rappresentanti la pendenza ed il valore dopo il ciclo della curva della deformazione elastica. b può variare tra -0.05 e -0.15.

Dalla Figura 48 si può notare come la curva deformazione – vita tenda alla zona plastica per grandi ampiezze di deformazione totale, cioè a vite brevi quella plastica è la componente dominante. Al contrario, per piccole deformazioni totali la curva tende alla deformazione elastica che è quella preponderante, corrispondente a vite più lunghe.

Il punto in cui si intersecano le due rette viene detto “vita di transizione”; si può notare che per una vita minore a quella di transizione i materiali molto duttili sono migliori, mentre per vita maggiore sono migliori i materiali con elevata resistenza a fatica. Per questo motivo è di fondamentale importanza determinare in fasi di progetto l'ampiezza della deformazione che il componente subirà durante la vita operativa, con lo scopo di scegliere il miglior materiale da utilizzare.

I.III Parametri influenzanti la vita a fatica



Figura 49: Parametri influenzanti la vita a fatica

Il diagramma di Figura 49 raggruppa i principali fattori che vanno ad influire sulla vita a fatica di un componente. Ciascuno ha un particolare effetto positivo o negativo a seconda dei casi.

- TENSIONE MEDIA DIVERSA DA 0

Molti risultati teorici che si trovano in letteratura sono stati ottenuti in condizione di cicli di tensione completamente reversibili, tali per cui $\sigma_m = 0$. Tuttavia, le condizioni nella pratica ingegneristica sono spesso caratterizzate da tensioni alternate sovrapposte ad una tensione media, stazionaria, non nulla.

La curva σ -N per tensione media non nulla può essere rappresentata in due modi: in uno si diagramma la tensione massima rispetto al $\log(N)$ per valori costanti di rapporto di tensione $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$, ottenuto con una serie di cicli di carico con tensione massima via via decrescente, e tensione minima in ogni caso frazione costante della tensione massima. Un esempio è riportato in Figura 50.

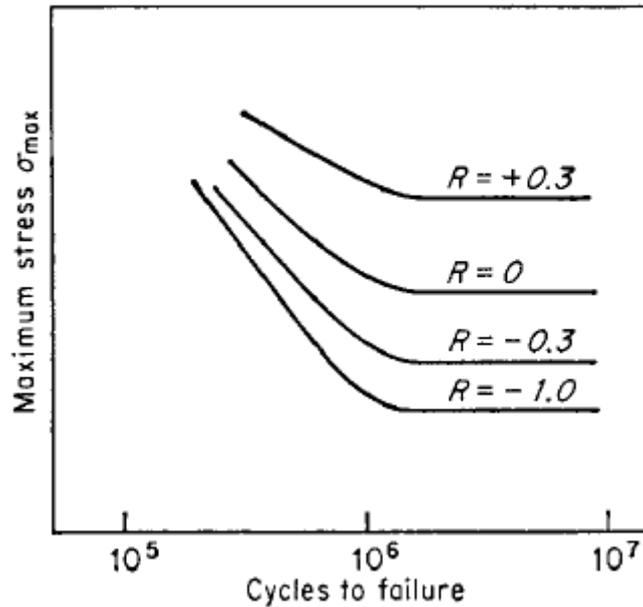


Figura 50

Si può notare che al crescere di R verso valori più positivi, che equivale ad un incremento della tensione media, il limite di fatica diventa maggiore, questo accade perché ci si avvicina alla condizione di carico di compressione. In caso di carico di trazione, la vita a fatica varia sensibilmente. $R = -1$ rappresenta la condizione di tensione completamente reversibile, per cui σ_{max} e σ_{min} sono uguali ed opposte. Per tenere in considerazione le differenze tra condizioni di carico compressivo e carico tensionale, sono state formulate delle relazioni empiriche che legano la rottura ad una determinata vita del componente in condizioni di tensione media non nulla, alla rottura per la stessa vita, ma in condizioni di tensione media nulla.

La relazione più comunemente utilizzata è la *relazione lineare di Goodman*:

$$\frac{\sigma_D}{\sigma_{D-1}} + \frac{\sigma_m}{R_m} = 1$$

I cui termini rappresentano:

- σ_D : limite di fatica per tensione media non nulla;
- σ_{D-1} : il limite di fatica per tensione media nulla;
- σ_m : la tensione media;
- R_m : la tensione di rottura statica.

Il risultato che si può trarre da questa relazione è che più grande è la tensione media, più breve sarà la vita a fatica del materiale.

L'equazione di Goodman si traduce in un diagramma omonimo del tipo riportato in Figura 51.

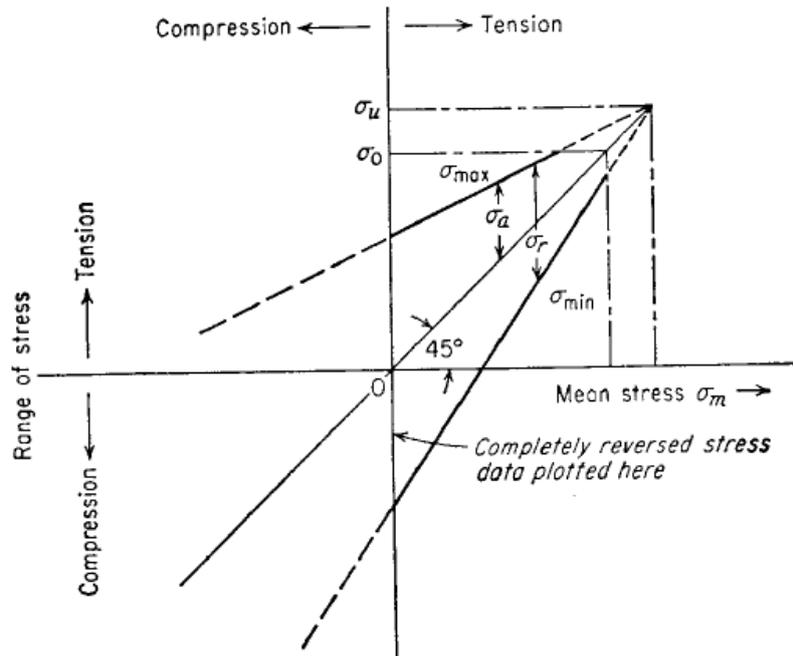


Figura 51: Diagramma di Goodman

Questo diagramma presenta la variazione del range di tensione limite $\sigma_{min} - \sigma_{max}$ rispetto alla tensione media. Si può notare che man mano che la tensione media diventa maggiormente di trazione il range possibile di tensioni si riduce, fino ad annullarsi in corrispondenza del limite di resistenza a trazione σ_u . Tuttavia, per scopi di test pratici ci si ferma quando viene raggiunto e superato il limite di snervamento σ_0 .

- CONCENTRAZIONE DELLE TENSIONI ED EFFETTO D'INTAGLIO

La resistenza a fatica viene seriamente ridotta dall'introduzione di innalzatori di tensione, primi fra tutti fori ed intagli. Le macchine e componenti odierne contengono svariati elementi che possono innalzare la tensione locale, come filetti, fori e chiavette; per questo motivo è spesso evidente come le cricche per fatica in parti strutturali nascano generalmente in corrispondenza di queste irregolarità geometriche. Uno dei migliori metodi per minimizzare il cedimento per fatica è la riduzione di tutti gli intensificatori di tensione possibili elaborando un progetto attento a tali aspetti e la prevenzione di concentratori accidentali attraverso una buona lavorazione e fabbricazione. Tuttavia la concentrazione di tensioni può anche derivare dalla rugosità superficiale e da concentratori di tensione metallurgici come porosità, inclusioni, sovrariscaldamento locale e decarburizzazione.

Ciò che accade in presenza di un intaglio geometrico è che si generano delle tensioni locali maggiori rispetto alle tensioni nominali che si avrebbero in condizioni di assenza di effetti di intaglio. Per comprendere il fenomeno si possono considerare i flussi di forza attraverso un elemento soggetto a carichi esterni, come rappresentato in Figura 52:

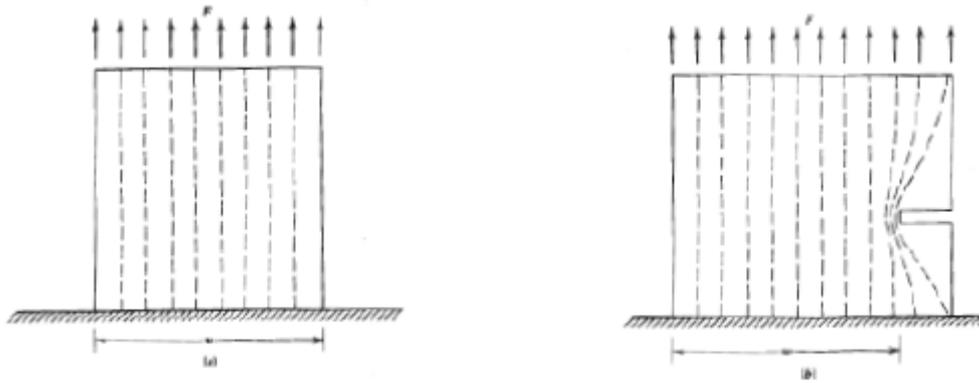


Figura 52: Effetto della concentrazione delle tensioni

Nella figura a sinistra l'asta rettangolare, di ampiezza w e spessore t , è fissata dal lato inferiore ed è soggetta ad una forza totale pari a F , distribuita in modo uniforme lungo il lato superiore. Le linee tratteggiate indicano una certa quantità di forza che agisce in quella zona, che per semplicità di studio viene considerata costante, per cui le tensioni locali sono considerate uniformemente distribuite lungo il piano e possono essere calcolate come:

$$\sigma = \frac{F}{wt}$$

Nella figura a destra invece, la stessa asta rettangolare è soggetta alla stessa forza F , ma è stata aumentata l'ampiezza w ed è stato inserito un intaglio per avere, all'altezza di quest'ultimo la stessa ampiezza iniziale.

Dal momento che nella zona dell'intaglio non è possibile sopportare alcuna forza, le linee di flusso di forza tendono a raggrupparsi in corrispondenza dell'estremità dell'intaglio. Questa situazione produce una zona locale di maggiore intensità di forza e quindi di tensioni. Le tensioni locali risultano essere molto maggiori rispetto alla tensione nominale, perché in quella zona sono intensificate le forze.

In linea teorica gli effetti di intaglio possono essere distinti in effetti locali, per i quali il volume di materiale in cui avviene la concentrazione di tensioni è trascurabile rispetto al volume dell'intero volume, ed effetti distribuiti, per i quali il volume è una porzione significativa del volume totale. Questo influisce sulla variazione della zona soggetta a tensioni: nel caso di effetti locali la dimensione e la forma di tale zona non varierà molto in conseguenza dello snervamento della regione di intaglio, mentre nel caso di effetti distribuiti tali cambiamenti possono essere più significativi. Tutto questo discorso teorico viene tradotto in termini matematici ed ingegneristici nell'introduzione di *fattori di concentrazione delle tensioni*.

In prima istanza viene introdotto il *fattore di concentrazione delle tensioni teorico*, definito come rapporto tra la tensione massima locale nella zona di intaglio (o di discontinuità) e la tensione nominale della sezione calcolata in assenza di effetti di intaglio:

$$K_t = \frac{\text{Tensione massima locale}}{\text{Tensione nominale}} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

Questo fattore però è accettabile per livelli di tensione che rientrano nel campo elastico, mentre deve essere modificato se le tensioni raggiungono il campo plastico. Inoltre questo fattore cambia se il carico applicato è assiale o flessionale.

I fattori di concentrazione delle tensioni possono essere determinati attraverso il calcolo diretto delle deformazioni per la geometria studiata, con i principi della teoria dell'elasticità oppure con un'analisi agli elementi finiti. I risultati vengono poi diagrammati considerando le dimensioni principali delle geometrie prese in considerazione, per esempio il raggio di un raccordo, come riportato a titolo di esempio in Figura 53.

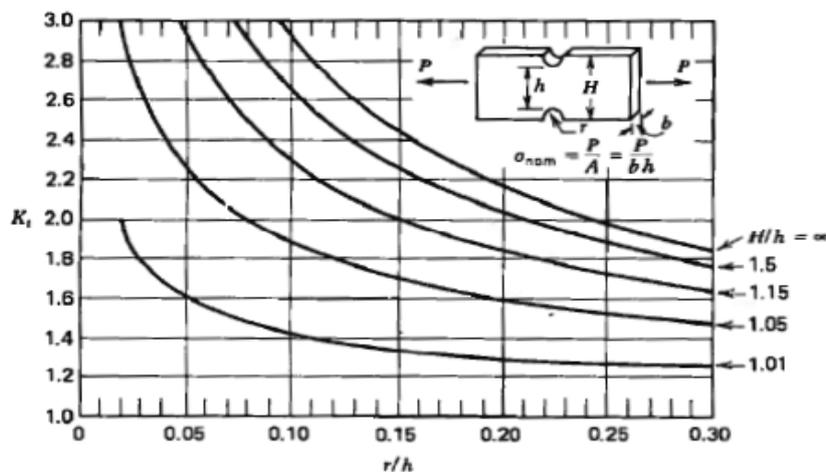


Figura 53: K_t per barra con intaglio soggetta a carico assiale

Nella figura viene riportato il diagramma tipico di una barra con un intaglio simmetrico soggetta ad un carico assiale. Il fattore K_t è facilmente determinabile conoscendo le dimensioni principali: l'altezza H della barra non intagliata, l'altezza h della zona intagliata ed il raggio r dell'intaglio.

La Figura 54 viene riportata a titolo esemplificativo del fatto che il fattore K_t cambia in base alla forma del provino (o componente) e del tipo di carico; la figura si riferisce al caso di barra tonda soggetta a flessione. È evidente come cambino anche le grandezze principali prese in considerazione per la determinazione precisa del fattore.

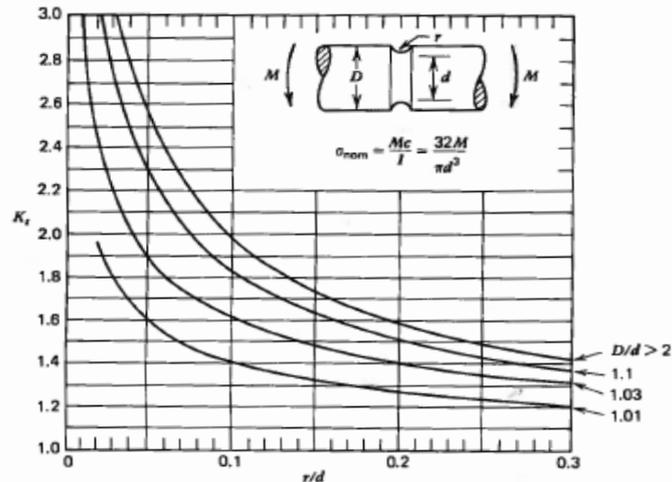


Figura 54: K_t per barra tonda soggetta a flessione

L'effetto di intaglio comporta che in macchine o provini aventi raccordi molto bruschi anche dei carichi non eccessivamente elevati possono generare tensioni locali all'estremità dell'intaglio che superano la tensione di snervamento del materiale. A sua volta lo snervamento, portando il materiale in campo plastico, causa una ridistribuzione delle tensioni ed il fattore teorico di concentrazione delle tensioni necessita di modifiche, poiché la tensione massima risulta essere relativamente più bassa di quella nominale, rispetto al caso in cui il materiale rimanesse in campo elastico. Sostanzialmente accade che il fattore K_t risulta essere minore, mentre la deformazione maggiore rispetto a ciò che si troverebbe se si applicasse la sola teoria elastica.

È quindi stato elaborato un metodo matematico per calcolare il fattore di concentrazione nel caso di tensioni elastoplastiche. Questo metodo è piuttosto complesso, ma è stato riassunto da una legge che nella maggior parte dei casi restituisce risultati attendibili:

$$K_p = 1 + (K_t - 1) \left(\frac{E_s}{E} \right)$$

In cui:

- K_p è il fattore di concentrazione delle tensioni nel campo plastico;
- K_t è il fattore di concentrazione delle tensioni in campo elastico;
- E_s è il modulo secante del materiale;
- E è il modulo di Young del materiale.

Un discorso a parte, seppur legato a quello sul fattore di concentrazione delle tensioni, è quello della concentrazione delle tensioni e la sua influenza sulla vita a fatica.

In questo caso viene introdotto il fattore K_f , detto *coefficiente di intaglio a fatica* che, diversamente dal K_t , è funzione della geometria e del carico applicato, ma anche del materiale del componente. Esso rappresenta il rapporto tra la tensione effettiva a fatica all'apice dell'intaglio e la tensione nominale a fatica che si avrebbe in assenza di intaglio.

Il valore di K_f in linea teorica varia in funzione della severità dell'intaglio, del tipo di intaglio, del materiale, del tipo di carico e del livello di tensione. I valori di K_f che si trovano in letteratura sono soggetti ad un considerevole spargimento, ma ci sono due tendenze principalmente prese in considerazione: la prima è che il K_f è tendenzialmente inferiore al K_t , e la seconda è che il rapporto K_f/K_t decresce al crescere di K_t . Perciò, intagli molto appuntiti (con elevato K_t) hanno minor effetto sulla resistenza a fatica rispetto a ciò che ci si aspetterebbe visto il loro elevato valori di K_t . La tendenza generale è che per ampi intagli con grandi raggi, K_f è praticamente uguale a K_t , mentre per piccoli intagli troviamo che $K_f \ll K_t$ nel caso di metalli morbidi e duttili, mentre $K_f > K_t$ per metalli più forti; diciamo che questi ultimi sono più sensibili all'intaglio.

La sensibilità dell'intaglio alle caratteristiche del materiale nella fatica viene espressa dal *fattore di sensibilità dell'intaglio*

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

Questa equazione viene scelta in modo tale che il valore di q vari in un intervallo ben definito: un materiale che non risente di effetti di intaglio a fatica, per cui $K_f = 1$, ha un fattore $q = 0$, mentre un materiale in cui l'intaglio ha il suo effetto teorico completo, per cui $K_f = K_t$, ha un fattore $q = 1$.

Tuttavia, dai risultati sperimentali si è osservato come il fattore q non sia solo dipendente dal materiale, ma anche dalla severità e tipologia di intaglio, dalla dimensione del provino e dal tipo di carico applicato. In particolare, come si può vedere in Figura 55, la sensibilità dell'intaglio aumenta con l'aumentare della resistenza a trazione.

Perciò è possibile in alcune circostanze diminuire le performance a fatica aumentando la durezza o la resistenza a trazione del materiale.

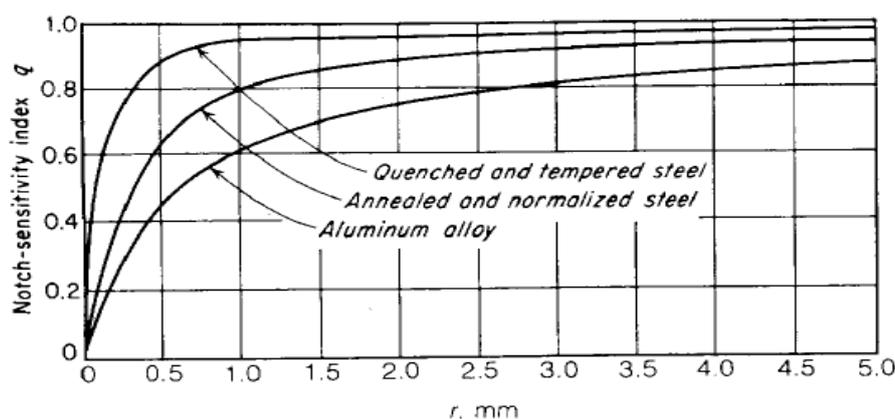


Figura 55: Fattore q in funzione della geometria e della resistenza a trazione (dipendente dalla lavorazione subita)

Il coefficiente di intaglio a fatica è però applicabile solo per la fatica ad alto numero di cicli. Solitamente, nel caso di carichi statici, gli effetti della concentrazione delle tensioni sono

trascurabili; questo significa che fino a 10^5 cicli il coefficiente di intaglio a fatica varia tra l'unità fino al valore K_f .

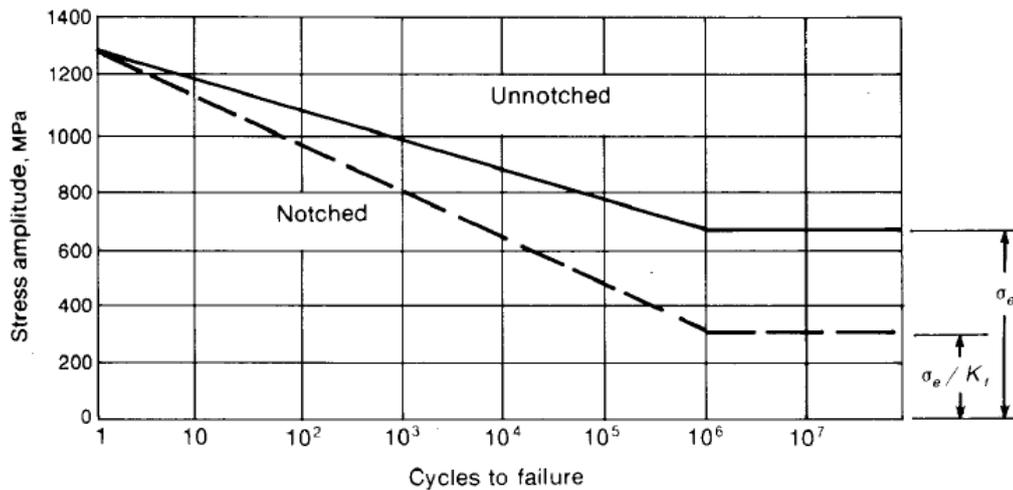


Figura 56: Confronto provino intagliato e non intagliato

Nella Figura 56 si nota che le curve $\sigma - N$ per un provino con intaglio e per un provino privo di intaglio convergono nella zona LCF e coincidono nel caso di rottura statica (1 ciclo). Inoltre è possibile affermare che molti materiali mostrano un coefficiente di intaglio a fatica quasi unitario per un numero di cicli inferiore al migliaio.

- EFFETTI FINITURA SUPERFICIALE

Nella pratica tutte le rotture per fatica iniziano sulla superficie poiché, in quasi tutte le condizioni di carico, la tensione massima si genera sulla superficie e per questo è logico che sia questo il punto di innesco della cricca.

Ci sono ampie evidenze della notevole sensibilità delle proprietà a fatica alle condizioni superficiali. I fattori principali che influiscono principalmente sulla superficie di un provino possono essere suddivisi in tre categorie:

- Rugosità superficiale o intensificatori superficiali di tensione;
- Cambiamenti nella resistenza a fatica della superficie metallica;
- Cambiamenti nelle condizioni di tensioni residue superficiali.

In aggiunta, la superficie metallica è soggetta ad ossidazione e corrosione, eventi che peggiorano le condizioni.

- *Rugosità superficiale*: fin dai primi studi sulla fatica è stato riconosciuto che differenti finiture superficiali, prodotte da differenti procedure di lavorazione, possono affliggere notevolmente le performance a fatica. I provini perfettamente lucidati, nei quali piccole scanalature (intensificatori di tensione) sono orientate parallelamente alla

direzione della tensione principale, danno i valori migliori nei test a fatica; questi provini sono usati generalmente in laboratorio per definire una condizione standard rispetto a cui confrontare test di fatica su altri provini lavorati diversamente. Per la definizione della rugosità superficiale si considerano diversi parametri, come riportato nella seguente tabella:

PARAMETRO	DEFINIZIONE
R _a	Valor medio delle ordinate del profilo rispetto alla linea media
R _q	Media quadratica spostamenti del profilo dalla linea media
R _t	Distanza tra picco più alto e valle più profonda
R _z	Distanza tra due linee parallele alla linea media, passanti mediamente la prima lungo i cinque picchi più alti e la seconda tra le cinque valli più profonde
R _p	Altezza picco più alto
R _v	Altezza valle più profonda

In generale si prende come parametro di governo la R_a in quanto valor medio della rugosità di tutta la superficie.

La tendenza generale è quella di una riduzione del limite di fatica, per effetto della rugosità, di un fattore b₀, moltiplicato per il limite a fatica σ_{D-1}, che considera il fatto che i materiali testati in laboratorio si trovano sempre in condizioni operative differenti rispetto a quelle in cui si troverà a lavorare il componente. Tale coefficiente viene sperimentalmente definito attraverso dei test su provini “lisci” e “da lavorazione”:

$$b_0 = \frac{\sigma_{D-1}(\text{da lavorazione})}{\sigma_{D-1}(\text{liscio})}$$

e tiene in considerazione la diminuzione di resistenza a fatica con l’aumento della rugosità superficiale. In Figura 57 è chiara la diminuzione di b₀, e quindi del limite a fatica, al crescere della rugosità superficiale.

La rugosità è strettamente legata al tipo di lavorazione cui è sottoposto il materiale; infatti, ogni lavorazione è più o meno aggressiva sulla superficie, lasciando una rugosità più o meno elevata. Ad esempio, in condizioni “da lavorazione”, cioè senza finiture superficiali, una

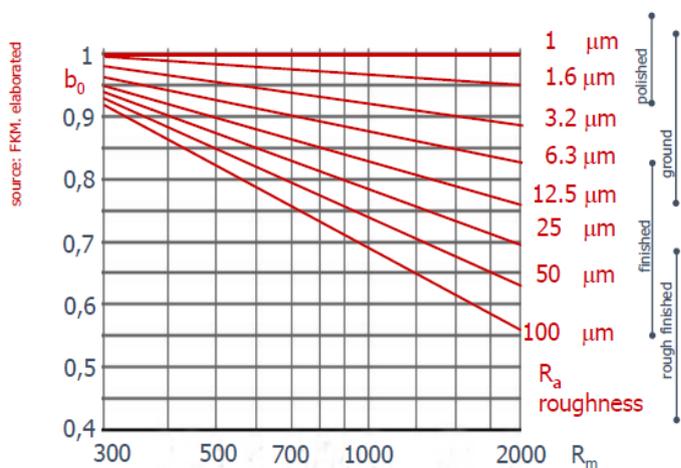


Figura 57: Coefficiente b₀ al variare della rugosità

fresatura comporta rugosità mediamente più elevate rispetto ad una brocciatura.

- *Cambiamenti di proprietà superficiali*: tutto ciò che cambia la resistenza a fatica della superficie va inevitabilmente ad intaccare le proprietà a fatica dell'intero componente. Per esempio la decarburazione della superficie dell'acciaio trattato termicamente è particolarmente dannoso per le performance a fatica.

Viceversa, si notano notevoli incrementi di proprietà a fatica risultanti dalla formazione di superfici più dure e forti in acciai che hanno subito una carburazione od una nitrurazione. Questo effetto benefico è maggiore nei casi di alto gradiente di tensione, come in condizione di flessione o torsione, rispetto al caso di carico puramente assiale. Il maggior incremento nelle performance a fatica si trova quando i provini intagliati vengono nitrurati.

È caratteristica generale delle parti indurite superficialmente che la cricca inizi all'interfaccia tra la zona indurita e la zona più morbida, piuttosto che sulla superficie.

- *Condizioni di tensioni residue*: la formazione di uno stato favorevole di compressione residua sulla superficie è probabilmente il metodo più efficace di incremento delle proprietà a fatica. Si può dire che le tensioni residue siano delle tensioni interne presenti in zone non soggette a forze esterne. Queste tensioni residue possono essere misurate con metodi ai raggi x, come la diffrattometria.

Le tensioni residue nascono quando la deformazione plastica non è uniforme lungo tutta la sezione trasversale del pezzo che è stato deformato.

Considerando un provino in flessione, esso è soggetto ad una deformazione plastica. Quando la forza esterna viene rimossa, le regioni che sono state deformate plasticamente impediscono alle zone adiacenti deformate elasticamente di tornare alla condizione iniziale. Di conseguenza le zone deformate elasticamente si trovano in una condizione di trazione residua, mentre le zone deformate plasticamente hanno una tensione residua di compressione dopo l'eliminazione della forza esterna, per bilanciare le tensioni attraverso la superficie trasversale del provino. Di conseguenza la regione che ha subito deformazioni plastiche nel caso di carico di trazione risentirà di tensioni residue di compressione dopo la rimozione della forza, mentre nel caso di carico di compressione rimarranno tensioni residue di trazione. Il valore massimo di tensione residua che può essere prodotta è pari al limite elastico del metallo.

Le tensioni residue di compressione sulla superficie devono essere bilanciate da tensioni residue di trazione nel cuore della sezione. In Figura 58 si nota che la tensione massima di trazione sulla superficie viene ridotta di una quantità pari alla tensione residua di compressione che si trova sulla superficie stessa ed il punto di picco di trazione si sposta verso la zona interna. Nella condizione (a) si ha una distribuzione di tensioni elastiche senza presenza di tensioni residue. Nell'immagine (b) si ha una tipica distribuzione di tensioni residue, per esempio ottenuta da una pallinatura del componente: elevate tensioni residue di compressione sulla superficie sono bilanciate da piccole tensioni residue di trazione nel cuore del materiale. La situazione (c)

rappresenta la distribuzione di tensione derivante dalla sovrapposizione e somma algebrica delle tensioni dei primi due casi, tensioni esterne e tensioni residue.

Si conclude però che gli incrementi delle performance di fatica che risultano dall'introduzione di tensioni superficiali di compressione sono maggiori quando si è in condizioni di carico con gradiente piuttosto che in condizioni di carico senza gradiente.

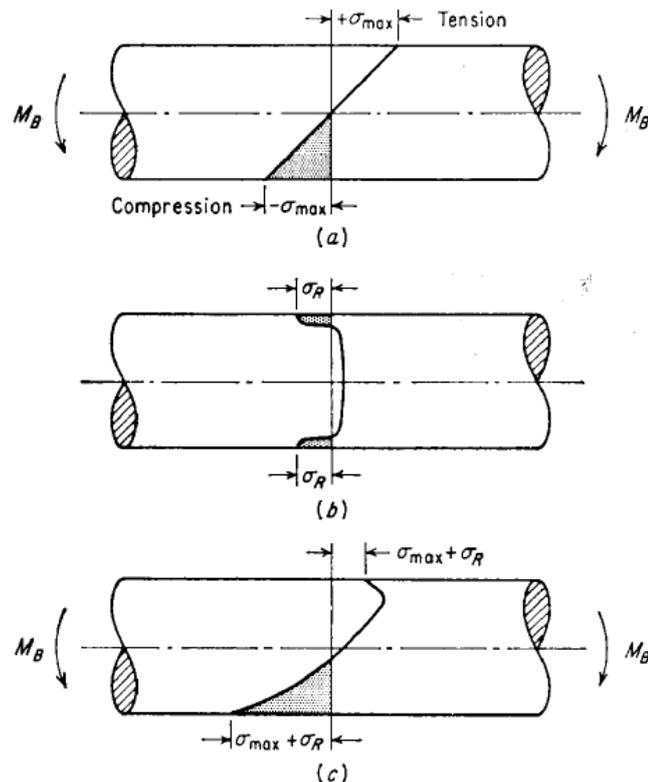


Figura 58: Sovrapposizione di tensioni residue applicate

I metodi principalmente utilizzati per generare tensioni residue superficiali di compressione sono la pallinatura e la laminazione. Tuttavia è importante sottolineare che gli incrementi nelle proprietà a fatica non sono conseguenza automatica di un processo di pallinatura e/o laminazione, ma essi possono anche danneggiare la superficie se applicati in modo sbagliato o eccessivo. Questi due processi creano dei cambiamenti nella resistenza statica del materiale dovuti al suo incrudimento, ma i miglioramenti che essi portano alla resistenza a fatica sono dovuti principalmente proprio all'introduzione delle tensioni residue.

La laminazione viene utilizzata nella lavorazione di pezzi di grandi dimensioni, in cui una dimensione è inferiore alle altre.

Invece, la pallinatura può essere usata per pezzi più piccoli; si sparano ad alta velocità contro il pezzo dei piccoli pallini di acciaio o ghisa che vanno a creare delle piccolissime zone di deformazione plastica sulla superficie del pezzo, generando le tensioni di compressione. È necessario assicurare una copertura uniforme dell'area

desiderata, e questo dipende dal controllo dei parametri dell'operazione come la velocità, la dimensione, la forma e la durezza dei pallini. Un ulteriore miglioramento si ha levigando la superficie dopo la pallinatura, in modo tale da levigare i picchi e valli a livello microscopico, riducendo quindi la rugosità.

Esperienze e test aiutano a stabilire quali siano le condizioni ottimali per produrre una distribuzione ottimale di tensioni residue. Questa distribuzione può essere modificata da deformazione plastica o da attivazione termica. Quando si genera una grande deformazione plastica le tensioni crollano verso il limite di snervamento. Per questo motivo, periodi di sovraccarico in cicli di fatica o test ad alti livelli di carico nella zona a basso numero di cicli alterano la distribuzione di tensioni residue per via della deformazione plastica. Questo fenomeno è noto come *dissolvenza delle tensioni residue*.

Le tensioni residue hanno la loro maggior influenza vicino al limite di fatica, dove si genera una piccola dissolvenza. Al contrario, la vita a fatica ad alte tensioni applicate dipende poco dalle tensioni residue.

- EFFETTI DELLA TEMPERATURA

La fatica in ambito LCF è stata definita come fenomeno di rottura progressiva in seguito all'applicazione ciclica di deformazioni (derivanti da tensioni cicliche) che si sviluppano in campo plastico fino a causare rottura del materiale entro i 10^5 cicli. Nonostante in genere le deformazioni siano causate da fattori meccanici, bisogna tenere in considerazione il fatto che spesso sono presenti cicli di deformazione dovuti a variazioni cicliche del campo di temperatura.

Se sono presenti dei cambiamenti ciclici di temperatura e le espansioni e contrazioni del materiale sono vincolate, derivano cicli di tensione e deformazione che influiscono e favoriscono le rotture a fatica.

In generale, la resistenza a fatica dei metalli decresce al crescere della temperatura rispetto alla temperatura ambiente. Dal momento in cui la temperatura viene innalzata sufficientemente sopra la temperatura ambiente il creep diventa importante e ad alte temperature, approssimativamente più grandi della metà della temperatura di fusione, è la principale causa di cedimento. Questo porta ad un passaggio da cedimento tradizionale transcristallino alla rottura per creep intercristallino. Inoltre, l'ossidazione intergranulare, in corrispondenza dei bordi di grano, contribuisce significativamente sulla nucleazione della cricca. Ulteriore aspetto è l'aumento dell'entità del creep, ad una data temperatura, con l'incremento della tensione media.

In Figura 59 vengono riportati i risultati di alcuni test eseguiti in LCF ad alte temperature con deformazioni indotte meccanicamente ed un altro in cui la deformazione è stata indotta con una variazione della distribuzione di temperature.

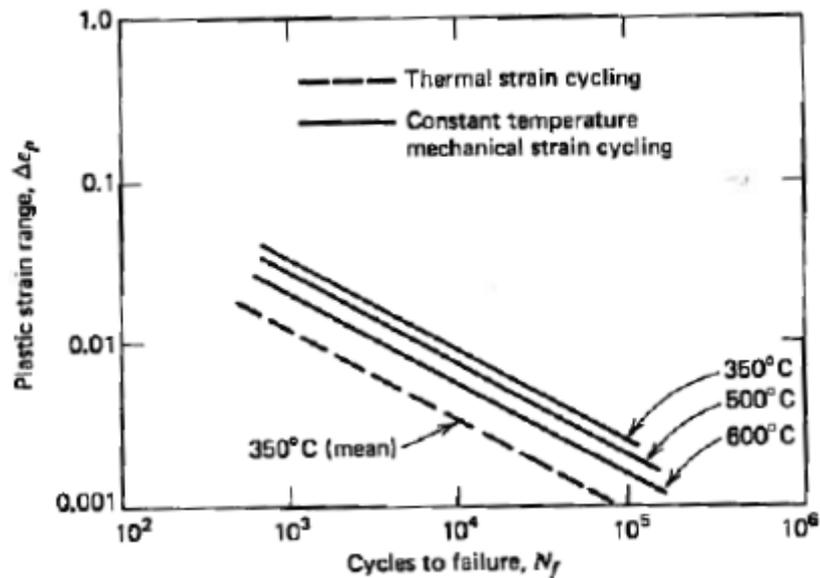


Figura 59: Effetti della temperatura su fatica LCF

I primi test sono stati svolti con temperature variabili tra 350° e 600° C, mentre il secondo è stato eseguito variando la temperatura tra 200° e 500° C, con una temperatura media di 350° C. Ciò che si nota è che per uno stesso range di deformazione plastica il numero di cicli a rottura risulta nettamente inferiore nel caso di deformazione termica rispetto al caso dei provini deformati meccanicamente, anche se questi ultimi sono stati testati a temperature anche di 100° superiori. Per portare la curva della fatica termica a sovrapporsi con quella della fatica meccanica a 350°, servirebbe moltiplicare il numero di cicli a rottura per un fattore di 2.5; questo significa che la vita a fatica termica risulta essere meno della metà della vita dovuta alla fatica meccanica ad elevate temperature. Quindi, sebbene il fenomeno della fatica termica e quello della fatica meccanica siano molto simili e rappresentabili allo stesso modo matematicamente, il ricorso alla seconda per ottenere i risultati della prima non è molto preciso ed affidabile. La fatica termica va studiata come un fenomeno a sé.

In realtà esistono alcune differenze tra i due fenomeni:

- Nella fatica termica la deformazione plastica si concentra nella zona più calda del corpo, dal momento che il punto di snervamento si trova in quella regione;
- Le variazioni di temperatura hanno effetti significativi sulle proprietà del materiale e sulla sua capacità di resistere alla fatica;
- Nella fatica termica ha molta importanza la velocità alla quale il ciclo di deformazione viene applicato al materiale.

Una tendenza che è stata dimostrata sperimentalmente è che più alta è la resistenza del materiale al creep, più alta è la sua resistenza alla fatica ad alte temperature. Tuttavia, un trattamento metallurgico che produce le migliori proprietà a fatica ad alte temperature non risulta necessariamente nel miglioramento delle proprietà di resistenza a creep. In particolare, un grano più fine risulta in migliori proprietà a fatica a basse temperature; nel momento in cui la temperatura viene innalzata la differenza nelle proprietà a fatica tra materiali a grano

grossolano e grano fine si abbassa fino ad alta temperatura, quando predomina il creep ed il grano grossolano presenta una maggiore resistenza.

Va tenuto anche in considerazione il fatto che numerose procedure che sono ottimali per la riduzione delle fratture per fatica a temperatura ambiente, possono non essere più efficaci ad alte temperature. Per esempio le tensioni residue di compressione potrebbero essere annullate al raggiungimento dell'alta temperatura.

Come già detto, le tensioni che producono il cedimento per fatica ad alte temperature non derivano necessariamente da una fonte meccanica, ma anche da tensioni termiche cicliche in condizioni tali per cui sono assenti tensioni meccaniche. Le tensioni termiche nascono quando i cambiamenti nelle dimensioni di un componente, conseguenti di un cambiamento di temperatura, sono ostacolati da qualche tipo di vincolo. Per il caso semplice di barra vincolata alle estremità la tensione termica sviluppata da un salto di temperatura ΔT è pari a:

$$\sigma = \alpha E \Delta T$$

In cui:

α è il coefficiente di espansione termica lineare;

E è il modulo elastico del materiale.

Se il cedimento avviene con una sola applicazione di tensione termica si parla di *shock termic*. Tuttavia, se la rottura ha luogo dopo una serie di applicazioni di tensioni termiche, di minore intensità, si parla di *fatica termica*.

Per esempio, l'acciaio inossidabile austenitico è particolarmente sensibile a questo fenomeno a causa della sua bassa conducibilità termica ed alta espansione termica.

La predisposizione al cedimento per fatica termica è relazionata al parametro $\frac{\sigma_f k}{E \alpha}$, dove σ_f è la resistenza a fatica a temperatura media e k è la conducibilità termica. Un valore alto di questo parametro indica una buona resistenza alla fatica termica.

- EFFETTI DELLA DIMENSIONE

Un aspetto importante è la predizione delle performance a fatica di componenti di grandi macchine rispetto ai risultati dei test di laboratorio condotti su provini. L'esperienza ha dimostrato che esiste un *effetto dimensione*, per cui la resistenza a fatica di grandi componenti è più bassa di quella di piccoli provini. Lo studio dettagliato del problema è difficile, principalmente perché è complicato, se non impossibile, realizzare provini simili di diametro via via crescente con le stesse caratteristiche metallurgiche e distribuzione di tensioni residue. Viceversa esistono poche macchine sufficientemente grandi da realizzare prove di fatiche direttamente sui componenti.

Cambiare la dimensione di un provino in fatica generalmente comporta principalmente due variazioni: in primo luogo l'incremento del diametro aumenta il volume o area di superficie del provino; la variazione di quantità di superficie ha importanza, dal momento che i cedimenti per fatica generalmente insorgono sulla superficie. In secondo luogo, per provino caricati in flessione o torsione, un incremento del diametro generalmente abbassa il gradiente di tensione attraverso il diametro ed incrementa il volume di materiale che è altamente stressato.

I risultati sperimentali sull'effetto della dimensione sulla fatica sono contraddittori e non del tutto completi. In generale si concorda sul fatto che l'effetto della dimensione sia legato all'esistenza di un gradiente di carico.

II LAVORAZIONI MECCANICHE

Uno degli obiettivi principali di questo lavoro di ricerca è la determinazione di una relazione tra tipo di lavorazione meccanica e finitura superficiale eseguite sui provini e la vita a fatica che ne consegue.

I provini utilizzati nei test, come già detto, sono stati prodotti con tre tipi di lavorazione: brocciatura per i provini dedicati alle prove ad alta temperatura, fresatura ed elettroerosione chimica per quelle a temperatura ambiente.

Queste tre lavorazioni si differenziano per il processo seguito, parametri di processo e componente risultante.

II.1 BROCCIATURA

La brocciatura rientra nella classe di lavorazioni per asportazione di truciolo; il pezzo da lavorare viene tenuto fermo e l'utensile, montato su un'apposita testa mossa da una slitta, trasla con un moto rettilineo alternato avanti e indietro. L'azione tagliente avviene durante il modo di avanzamento della slitta e quindi dell'utensile di taglio.

L'utensile usato viene chiamato broccia, costituito da una serie di denti la cui dimensione aumenta progressivamente, in modo tale che il taglio avvenga in modo graduale. La variazione di altezza dei denti viene chiamato incremento. Durante la lavorazione, la profondità del taglio ad ogni passata della broccia è pari alla somma degli incrementi di ciascun dente.

In Figura 60 viene riportato lo schema generale di una broccia:

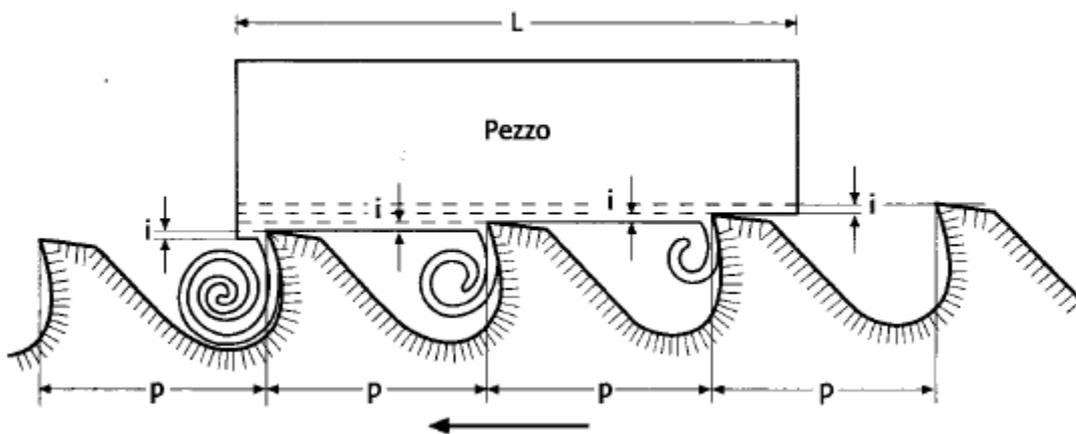


Figura 60: funzionamento di una broccia

L'utensile è caratterizzato dai :

- Il *passo* p tra i denti, che dipende dalla lunghezza del pezzo, dalla resistenza dell'utensile e dalla dimensione e forma del truciolo;

- *L'angolo di spoglia* o di affilatura, dipendente dal materiale, solitamente assume valori tra 0° e 20°;
- *L'angolo di spoglia inferiore*, compreso generalmente tra 1° e 4°. Non deve essere troppo piccolo per evitare lo sfregamento del dente sulla superficie lavorata;
- La *profondità del dente*, cioè l'altezza del dente rispetto al raccordo di fondo che deve essere sufficientemente grande da permettere l'accumulo del truciolo prodotto durante la lavorazione.

La dentatura di una broccia viene suddivisa in tre zone:

- *Ossatura*: comprende i denti sgrassatori, caratterizzati da un incremento alto. Servono a rimuovere la maggior parte del materiale senza grande precisione.
- *Finitura*: costituita dai denti finitori, aventi un valore di incremento più basso, che servono a rifinire meglio la geometria.
- *Calibratura*: caratterizzata da denti calibratori che solitamente non hanno un incremento proprio in funzione del fatto che servono per la calibratura del pezzo.

La brocciatura permette di ottenere pezzi con una buona finitura superficiale e accuratezza dimensionale. Un grosso difetto è il costo della broccia che però risulta giustificato se il volume produttivo è piuttosto elevato come avviene in Avio, dove la produzione degli attacchi delle palette di turbina avviene proprio con la brocciatura.

Nel caso specifico di questa tesi, i quattro provini del lotto destinato ai test ad alta temperatura sono stati prodotti con l'utilizzo di una broccia a fine vita, cioè deteriorata a tal punto da dover essere sostituita. In questo modo ci si pone nella condizione più gravosa per la vita a fatica, dal momento che una broccia a fine vita genera una rugosità più alta di una nuova.

La broccia utilizzata è in realtà un insieme di nove diverse brocche, le prime cinque utilizzate per la sgrassatura, tre per la finitura e l'ultima per la calibratura.

Nella seguente Tabella vengono definite le caratteristiche delle varie sezioni:

SETTORE	LUNGHEZZA [mm]	PASSO ASSIALE [mm]	INCLINAZIONE [°]	N°DENTI INCREMENTALI	VALORE INCREMENTO r_{max}	N° DENTI INCREMENTO NULLO	DIREZIONE INCREMENTO r_{c1}	TIPO
01	243	10	15	24	0.0600	0	90.00	Sgrossat.
02	440	8	0	55	0.0650	0	90.00	Sgrossat.
03	440	8	0	55	0.0650	0	90.00	Sgrossat.
04	342	10	0	34	0.0350	0	10.00	Sgrossat.
05	342	10	0	34	0.0450	0	10.00	Sgrossat.

06	110	10	0	8	0.0300	3	80.00	Finitr.
07	120	10	0	9	0.0250	3	90.00	Finitr.
08	492	10	0	46	0.0650	3	10.00	Finitr.
09	245	20	15	9	0.0150	3	10.00	Calibrat.

Tabella 5: Specifiche broccia usata nella produzione dei provini

Le prime tre sezioni, accomunate da un elevato numero di denti e da un alto valore di incremento, sono usate per l'asportazione della maggior parte del materiale. Le sezioni 4 e 5 generano approssimativamente la forma della zona d'intaglio. La 6, 7 e 8 definiscono invece in modo dettagliato la geometria.

La lunghezza totale della broccia, data dalla somma della lunghezza delle diverse sezioni, è di 2774 mm; si ricorre ad un angolo di spoglia inferiore di 3° e un angolo di spoglia di 12°.

Queste caratteristiche sono riportate nel disegno tecnico riportato di seguito, fornito direttamente da GE Avio, in cui sono state eliminate le principali quote per segretezza aziendale.

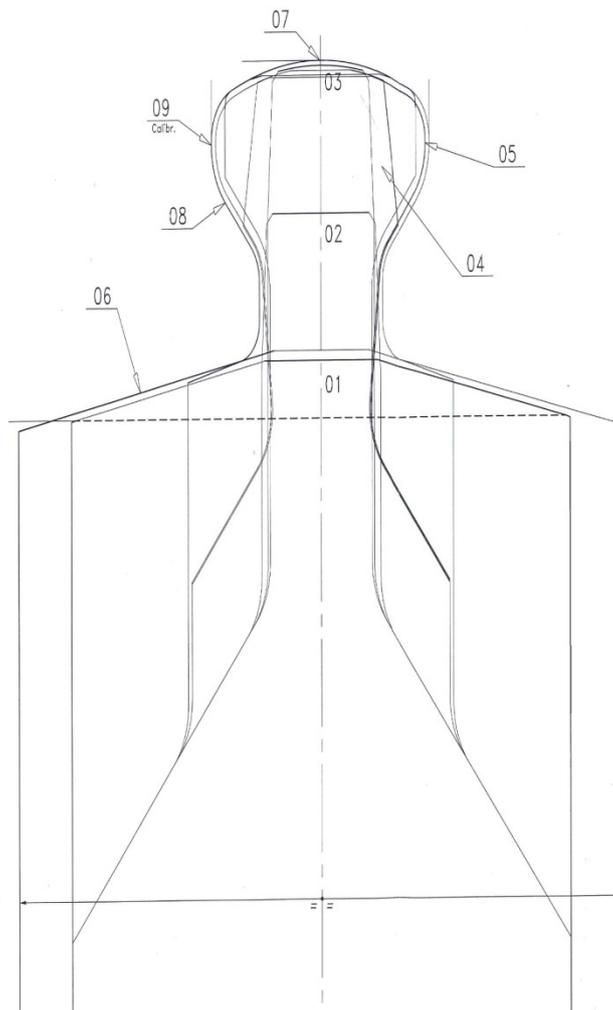


Figura 61: Disegno tecnico brocche utilizzate

II.II FRESATURA

La fresatura può essere considerata una delle lavorazioni più versatili, facendo ricorso ad un utensile rotante che può spostarsi in diverse direzioni rispetto al pezzo. L'utensile, in questo caso definito fresa, è pluritagliente e ruotando esegue l'asportazione del materiale dal pezzo.

Nel nostro caso la lavorazione è avvenuta per fresatura con fresa a codolo, detta *end milling*. La fresa a codolo può essere cilindrico o conico in base al diametro della fresa. Nel caso di diametri piccoli si utilizza un codolo cilindrico, mentre per diametri maggiori si usa quello conico. Solitamente la fresa ruota attorno ad un asse perpendicolare alla superficie del pezzo ma può anche essere inclinato per la realizzazione di superfici più complesse.

Le frese a codolo sono dotate di taglienti anche nella parte terminale, consentendo di utilizzarle come punta a forare per avviare la lavorazione di una cavità. Esse però possono avere anche estremità con forma differente, per esempio semisferica, utilizzate per la lavorazione di superfici complesse a forma libera.

Di seguito vengono elencati i parametri principali della lavorazione per fresatura:

- D [mm]: il diametro della fresa o diametro di taglio;
- N [giri/min]: la velocità di rotazione della fresa;
- V_c [m/min]: la velocità di taglio in fresatura, ossia la velocità periferica della fresa. Può essere calcolata con la formula $V_c = \pi DN$;
- Z : il numero di taglienti effettivi periferici, ovvero il numero di taglienti che ad ogni giro della fresa asportano del materiale;
- F_z [mm/dente]: l'avanzamento per dente, cioè la distanza percorsa dal pezzo per singolo dente della fresa;
- A_p : la profondità di passata;
- V_f [mm/min]: la velocità di avanzamento della fresa; ricavata come $V_f = F_z NZ$;

E' possibile definire nel dettaglio le specifiche della fresatura utilizzata nella produzione dei provini usati nel presente lavoro di ricerca.

Il metodo di produzione dei provini è stato leggermente diverso da come vengono realmente prodotti i pezzi in serie per le turbine aeronautiche. Nel caso della brocciatura, l'unica differenza rilevabile è che la stessa broccia viene usata su una barra piana invece che su un disco di turbina. Invece, nel caso della fresatura esistono variazioni nel tipo e nel numero di frese usate per ottenere la stessa geometria; tuttavia, le ultime due frese, quelle che servono a definire la forma dell'intaglio, risultano essere comuni ad entrambe le produzioni.

Nella Tabella riportata di seguito vengono descritte le diverse frese utilizzate e le caratteristiche della lavorazione eseguita per la produzione dei provini utilizzati in laboratorio.

Fase	1	2	3	4
Lavorazione	Creazione fessura	Definizione fessura	Pre rifinitura dell'intaglio	Rifinitura dell'intaglio
D[mm]	6.35	6.0	8.72	8.92
Z	4	4	3	3
N[Giri/min]	1253	1326	913	1071
Vc[m/min]	25	25	25	30
Fz[mm/dente]	0.02	0.12	0.015	0.04
Vf[mm/min]	100	630	41	128
Vita della fresa	100 fori	sconosciuta	sconosciuta	sconosciuta
Tempo lavorazione [s]	10	2	49	16
Raffreddamento	Interno	Attraverso la punta	Interno attraverso buchi in ogni solco	Interno attraverso buchi in ogni solco
Figura	23.A	23.B	23.C	23.D

Tabella 6: Specifiche delle frese usate per la lavorazione dei provini



Figura 62.A: Fresa per creazione fessura

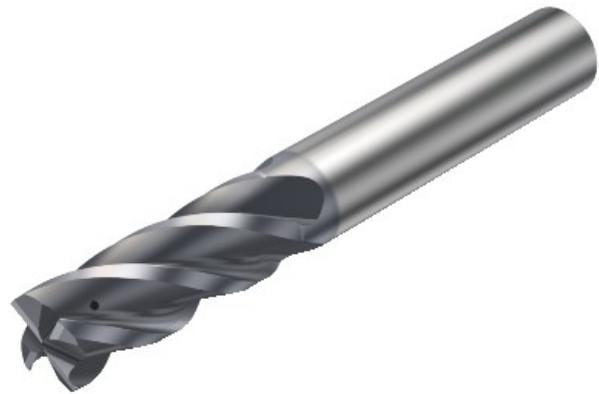


Figura 62.B: Fresa per definizione fessura

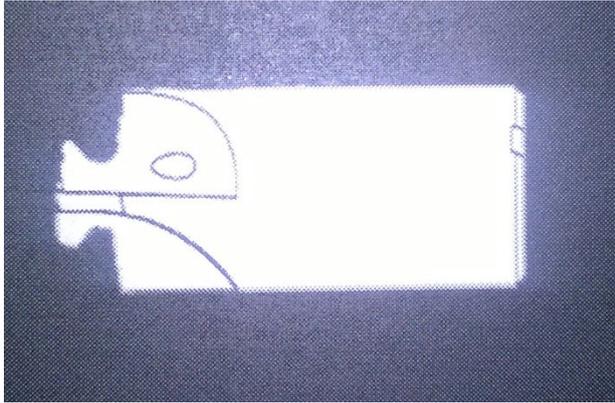


Figura 62.C: Fresa per pre-rifinitura intaglio

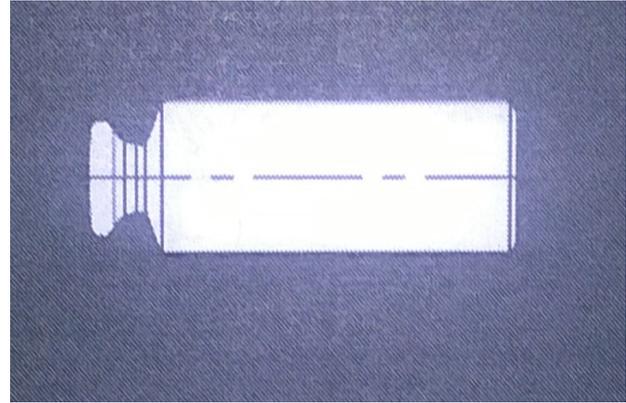


Figura 62.D: Fresa per rifinitura intaglio

Le prime due frese utilizzate nel processo, rispettivamente la 62.A e la 62.B, sono standard, prodotte in scala industriale e servono per asportare la maggior parte del materiale dalla zona dove si realizza l'intaglio. Esse generano una pista rettangolare sul provino. Successivamente vengono utilizzate le frese 62.C e 62.D, prodotte appositamente per questa lavorazione, che operano con un asse inclinato di 2° rispetto alla normale al pezzo e vengono utilizzate per definire nel dettaglio la geometria dell'intaglio. Complessivamente il tempo necessario alla creazione e definizione di ogni singolo intaglio è pari a 77 secondi, tenendo conto anche del tempo di entrata e di uscita del pezzo; la fresatura risulta quindi essere un processo sufficientemente rapido e conciliante l'obiettivo di voler rendere la produzione snella e veloce, ottimizzando i tempi dell'intero ciclo.

II.III LAVORAZIONE ELETTROCHIMICA

La lavorazione elettrochimica (ECM, *Electrochemical machining*) si basa sul principio inverso rispetto all'elettrodeposizione.

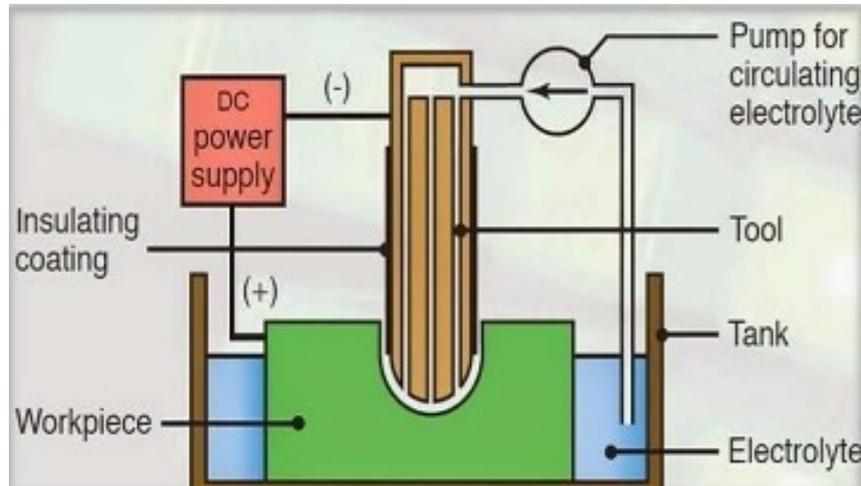


Figura 63: Schematizzazione della lavorazione ECM

In Figura 63 viene riportata una rappresentazione schematica di come avviene la lavorazione per elettroerosione chimica.

Il pezzo da lavorare si trova immerso in un elettrolita all'interno di una vasca, su di esso lavora l'utensile. Tra utensile e pezzo viene instaurata una differenza di potenziale attraverso un generatore e l'utensile è collegato ad una pompa per la circolazione dell'elettrolita dalla vasca alla zona lavorata.

L'elettrolita funziona come portatore di corrente ma la velocità elevata con cui fluisce nell'interfaccia tra pezzo e utensile ha l'utilità di allontanare gli ioni metallici dal pezzo (anodo) prima che questi riescano a depositarsi sull'utensile (catodo). Sul pezzo si ottiene una forma complementare a quella dell'utensile (elettrodo). Questa metodologia di lavorazione può essere introdotta anche nelle più classiche, come fresatura o tornitura, andando a sostituire l'utensile da taglio con l'elettrodo.

L'elettrodo è generalmente in ottone, rame, bronzo o acciaio inossidabile mentre come elettrolita si utilizza una soluzione salina altamente conduttiva, come una miscela di cloruro di sodio in acqua, pompata ad alta velocità nei condotti ricavati nell'elettrodo. Tipicamente la densità della corrente varia tra 1.5 e 8 A/mm² in fase di lavorazione con un'alimentazione che varia tra i 5 ed i 25V in corrente continua. La combinazione di differenza di potenziale pezzo – utensile e scorrimento dell'elettrolita fa sì che il pezzo venga eroso nella zona di lavorazione.

La velocità con cui viene asportato il metallo è funzione della sola velocità di scambio ionico e non è quindi influenzata dalla resistenza, dalla durezza o dalla tenacità del materiale di cui è

costituito il pezzo. L'unica condizione che deve essere rispettata affinché il processo funzioni è che il pezzo sia un conduttore elettrico.

La velocità di asportazione del materiale dal pezzo può essere determinata come segue:

$$MRR = CI\eta$$

Dove:

- MRR [mm^3/min]: volume di materiale asportato in unità di tempo;
- I [A]: corrente continua applicata;
- η : rendimento lavorazione, assume valori tipici tra il 90% e il 100%;
- C [mm^3/Amin]: costante del materiale che per i metalli puri dipende dalla valenza. Maggiore è la valenza, minore è il valore della costante. Solitamente varia tra 1 e 2.

Se la cavità che viene prodotta con questo tipo di lavorazione ha una sezione trasversale uniforme di area A_0 , allora si può definire l'avanzamento "f" espresso in mm/min facendo ricorso alla seguente relazione:

$$f = \frac{MRR}{A_0}$$

Esso esprime la velocità con cui l'elettrodo penetra nel pezzo. Le lavorazioni ECM sono utilizzate solitamente per creare delle cavità di forma complessa su materiali con elevata resistenza ed è quindi spesso utilizzata nell'industria aerospaziale per la produzione di palette o componenti di motori a getto.

Si hanno diversi vantaggi dall'utilizzo della lavorazione per elettroerosione chimica:

- Le superfici lavorate non presentano bave;
- Non c'è alcun danneggiamento termico al pezzo;
- Non ci sono forze che agiscono sull'utensile e quindi non ci sono distorsioni del pezzo come invece può avvenire utilizzando le classiche lavorazioni per asportazione;
- Non ci sono fenomeni di usura dell'utensile;
- È possibile creare forme complesse con materiali di durezza elevata;

Nel caso della lavorazione ECM non ci sono pervenuti dati interessanti riguardo al processo di produzione dei pezzi utilizzati negli esperimenti.

II.IV CONFRONTO TRA LAVORAZIONI

È utile avere a questo punto un quadro completo dei pro e dei contro che le diverse lavorazioni presentano, per poter scegliere quella che risulta ottimale per il tipo di prodotto desiderato.

Le principali caratteristiche delle lavorazioni precedentemente presentate sono riportate di seguito:

Lavorazione	Brocciatura	Fresatura	ECM
Pro	Buona finitura superficiale. Buona accuratezza dimensionale. Rapidità di lavorazione. Possibilità di creare geometrie complicate.	Rapidità di lavorazione. Costo ridotto delle frese. Possibilità di creare geometrie complicate.	Ottima finitura superficiale e accuratezza dimensionale Non ho problemi di usura. Lavorazione di materiali con elevata durezza. No danneggiamenti termici.
Contro	Costo elevato della broccia. Danneggiamenti termici nel pezzo.	Finitura superficiale peggiore delle tre. Danneggiamenti termici nel pezzo.	Possibile variazione delle proprietà meccaniche del materiale sottoposto a lavorazione ECM

Tabella 7: Pro e contro delle lavorazioni meccaniche

Inoltre è possibile confrontare come varia la finitura superficiale (e quindi la rugosità) al variare della tecnica di lavorazione del pezzo. Essa infatti è importante non solo per l'accuratezza dimensionale con cui i pezzi sono stati lavorati ma anche per la sua influenza sulle loro proprietà meccaniche, specialmente la resistenza a fatica.

Mentre la finitura superficiale descrive la geometria dello strato superficiale, l'integrità riguarda proprietà come la durata a fatica e la resistenza a corrosione che sono fortemente influenzate dal tipo di superficie prodotta. L'integrità superficiale viene influenzata da diversi fattori:

- Le temperature generate durante la lavorazione;
- Le tensioni residue;
- Le trasformazioni metallurgiche;
- Le deformazioni plastiche, strappi e cricche superficiali;

In Figura 64 vengono riportati gli intervalli entro cui si mantengono i valori di rugosità ottenibili con le lavorazioni per asportazione ed altri processi produttivi.

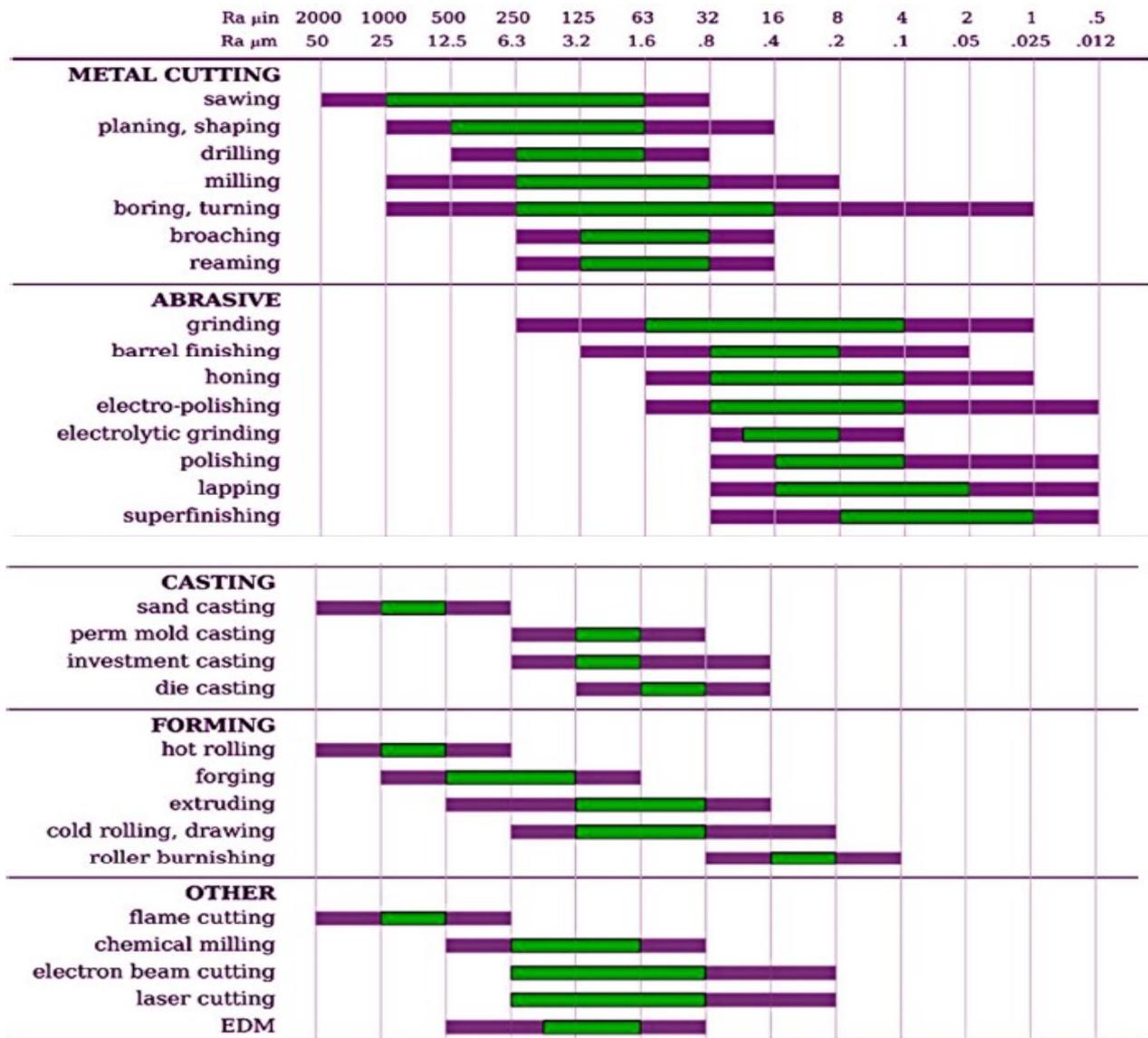


Figura 64: Ra al variare del processo di lavorazione (verde= valore comune, viola= valore meno frequente)

Si può notare dalla figura 64 che, per quanto riguarda le lavorazioni utilizzate per produrre i pezzi dei nostri test, la migliore risulterebbe essere la lavorazione elettrochimica, con una rugosità finale compresa tra i 3.2 μm e 0.8 μm . La brocciatura e la fresatura sono invece piuttosto simili con la prima che varia tra 3.2 μm e 0.8 μm mentre la seconda spazia tra 6.3 μm e 0.8 μm .

In definitiva, non essendo così marcatamente diversi i risultati, è difficile dal punto di vista dell'integrità superficiale determinare a priori quale tra i diversi tipi di lavorazione sarebbe il migliore per la vita a fatica del provino o del componente.

III MACCHINE E STRUMENTAZIONE UTILIZZATE

III.I MACCHINA SCHENCK HYDROPULPS 750

La parte di test eseguiti ad alte temperature è stata eseguita su una macchina Schenck Hydropulps 750, visibile in Figura 65, che permette di far ricorso al riscaldatore ad induzione per innalzare la temperatura attorno ai provini.



Figura 65: Macchina Schenck

La macchina è costituita da un attuttore idraulico, posto sotto il banco di prova, che comanda un pistone visibile nella parte inferiore della Figura. La parte superiore della macchina è

dotata invece di una cella di carico PM250Rn capace di sopportare carichi fino a 250 kN. Il comando e controllo della macchina è affidato ad un calcolatore, attraverso un programma appositamente creato e sviluppato.

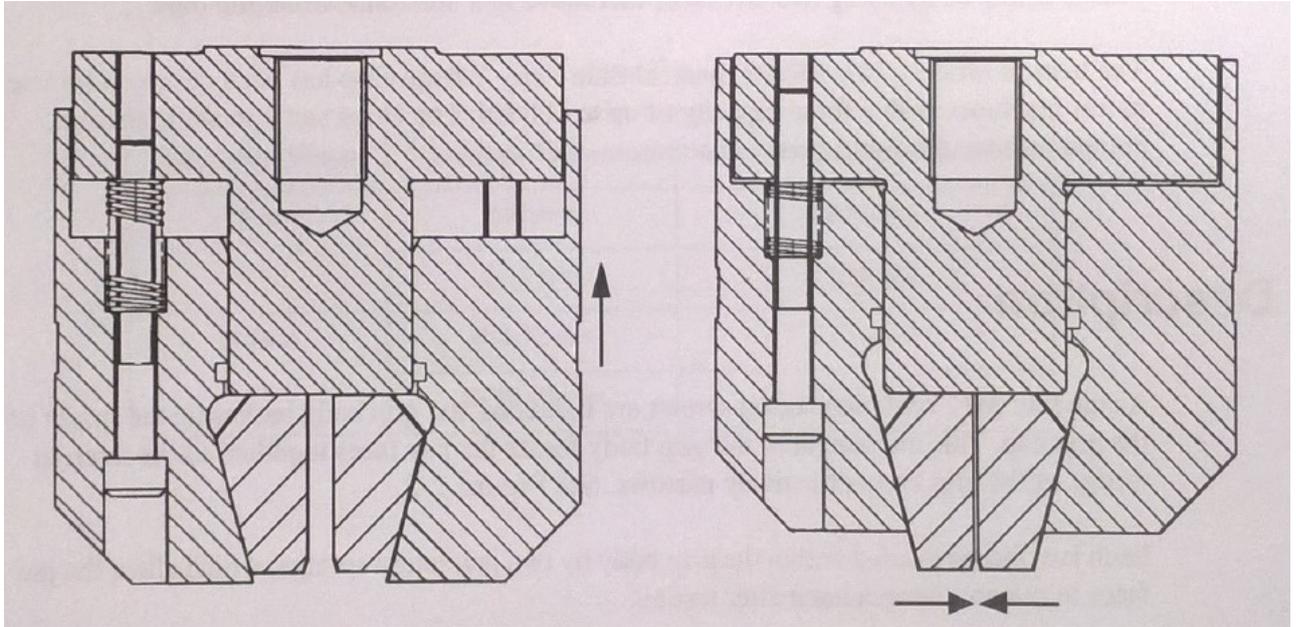


Figura 65(a): Disegno afferraggi

Come visibile in Figura 65(a), gli afferraggi presentano un foro filettato M30 e quattro viti che vengono serrate con un determinato momento (solitamente di 80Nm) e portano le ganasce a chiudersi, come mostrato, andando a bloccare il provino.

Inoltre è stata progettata una dima usata per ottenere un perfetto allineamento del provino tra le ganasce dell'afferraggio e per avere la certezza che non venga afferrato per una lunghezza superiore a quella limite trovata nell'analisi FEM [*ref. Tesi di Tommaso Battocchio*].



Figura 66: foto della dima

La dima è stata studiata in modo tale che appoggiando le spine, visibili in Figura 66, alle facce laterali delle ganasce e facendo aderire il provino sul piano orizzontale e verticale, esso risulti afferrato perfettamente al centro delle ganasce dell'afferraggio.

Sulla macchina sono presenti degli steli con dei distanziali che sostengono gli afferraggi. In seguito a rotture degli adattatori all'inizio dell'attività di ricerca, la macchina è stata fornita di un dispositivo usato per applicare la massima forza di precarico possibile al sistema adattatore – afferraggio, così da evitare eventuali allentamenti che potrebbero portare ad ulteriori rotture. Tale dispositivo è riportato in Figura 67:



Figura 67: Dispositivo per precarico

Con questo dispositivo si è riusciti a dare il precarico necessario. Questo componente è di fatto tagliato in due pezzi da un piano inclinato: per questo motivo, ruotando il pezzo superiore rispetto a quello inferiore lo spessore totale aumenta. Utilizzando delle apposite brugole inserite nei fori laterali, si può aumentare lo spessore del dispositivo di precarico in modo tale da rendere nullo il gioco che si può creare tra il pezzo superiore e la base dell'afferraggio. Così facendo si rende tutto il sistema molto più compatto e meno incline a subire allentamenti nel corso delle prove a fatica.

III.II UTILIZZO MACCHINA SCHENCK

Questo paragrafo mira a spiegare il funzionamento e la modalità di utilizzo della macchina durante le prove in laboratorio. La prima operazione da effettuare è quella di afferrare il provino tra le ganasce dell'afferraggio. Per completare questa operazione non è necessario attivare la macchina in quanto è un'operazione da effettuare manualmente con l'utilizzo di

brugole e di una chiave dinamometrica. Come si è visto in precedenza ci sono quattro viti sulla testa dell'afferraggio che serrandosi fanno avvicinare tra di loro le ganasce. Nel manuale di utilizzo è riportata la tabella che indica il momento di serraggio da dare alle singole viti in base alla forza assiale limite che può essere impressa durante la prova. Viene inoltre riportato il massimo momento di serraggio che si può imprimere pari a 120Nm.

In base al carico a cui viene fatta la prova vengono serrate le viti con una chiave dinamometrica. Tutte le viti vengono serrate sei o sette volte per ovviare agli allentamenti progressivi che le viti subiscono quando una viene completamente avvitata.

Nelle prove di questo lavoro di ricerca le viti sono state serrate a 80Nm, sia per avere un margine di sicurezza sia perché i dati della tabella sono valutati per prove statiche e non per quelle di fatica.

Momento di serraggio [Nm]	Forza assiale di serraggio [kN]
10	16.8
20	33.6
30	50.4
40	67.2
50	84.0
60	100.8
70	117.6
80	134.4

Tabella 8: Legame momento di serraggio viti - forza applicabile

Come già detto in precedenza, il provino viene inserito tra le ganasce con l'utilizzo di una dima che ne assicura il perfetto centraggio. Dopo aver fissato il provino nell'afferraggio inferiore viene accesa la macchina che viene controllata attraverso un apposito programma.

In Figura 68 viene riportata quella che è la schermata di controllo della macchina durante la prova:

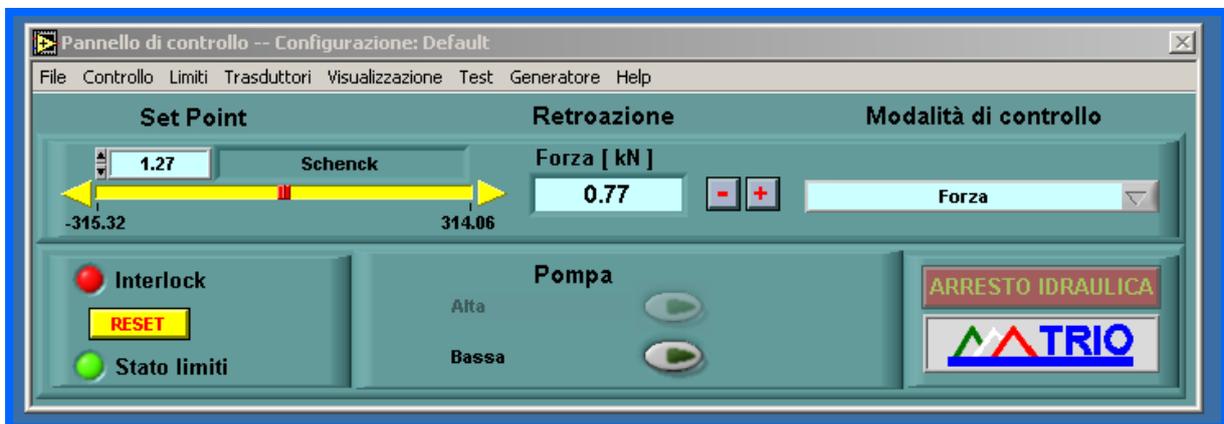


Figura 68: Schermata di controllo della macchina

In essa si trovano:

- Il *set point*, che indica la forza (o lo spostamento, inteso come altezza del pistone della macchina) a cui si vuole far operare la macchina.
- Il valore *Forza* (o *Spostamento*) che indica la forza (o l'altezza del pistone) che la macchina sta esercitando in quel preciso istante.
- La *modalità di controllo* permette di controllare la macchina in termini di forza o in termini di spostamento.

Dopo aver afferrato il provino nella sua parte inferiore la macchina viene accesa in controllo di posizione e viene fatto alzare il pistone in modo tale da portare il provino nel punto in cui deve essere bloccato dall'afferraggio superiore.

Dopo il primo giro di serraggio delle viti dell'afferraggio superiore, è molto importante passare dal controllo di posizione a quello di forza. Se non si fa questo passaggio di controllo della macchina, si rischia di sottoporre il provino a dei carichi indesiderati di compressione anche piuttosto elevati. Dopo di che si completano almeno 5/6 giri di serraggio delle varie viti.

A questo punto tutto è pronto per la prova.

Dal controller vengono inseriti i dati per effettuare la prova, come riportato in Figura 69:

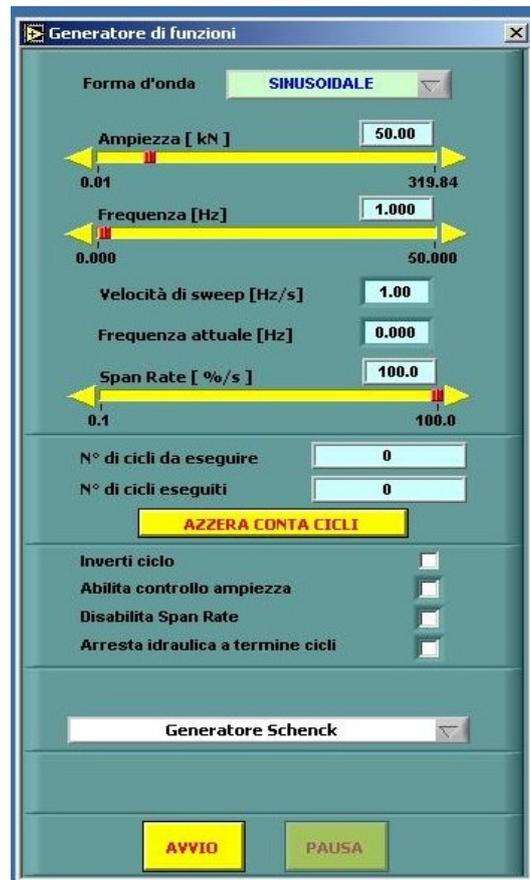


Figura 69: Schermata di controllo della prova a fatica

controllo di posizione invece lo spostamento è verso numeri più positivi se il pistone scende, e quindi se viene generata una forza di tensione.

- *Limite inferiore*: è il limite inferiore che se superato porta al blocco immediato della macchina. Si noti che inferiore e superiore devono essere intesi non come positivo e negativo ma come valore più piccolo e valore più grande.

Una volta inseriti ed attivati i limiti, la prova può definitivamente partire.

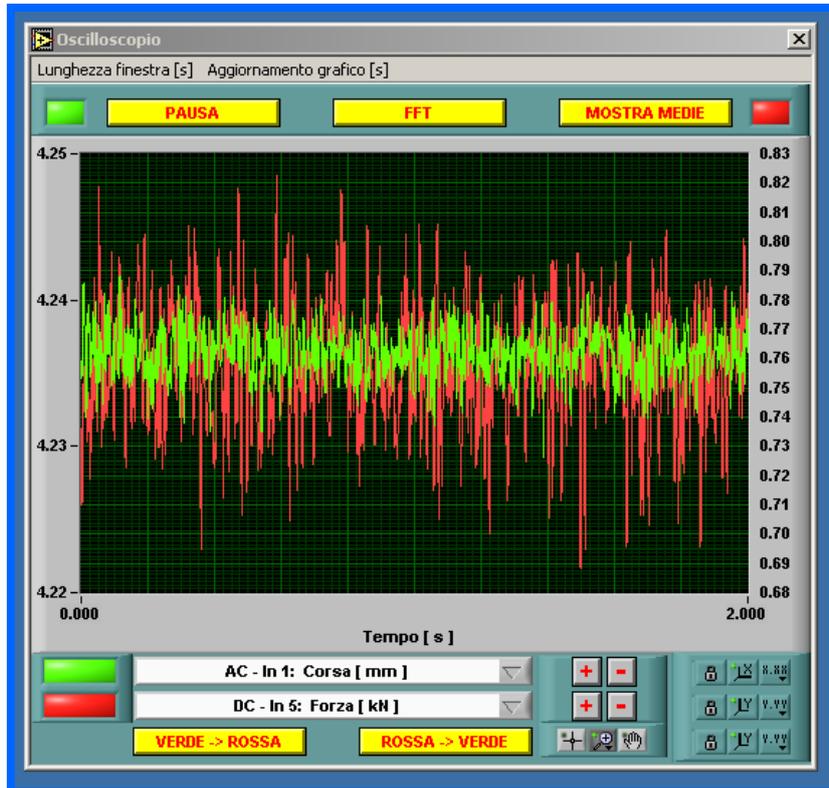


Figura 71: Schermata dell'oscilloscopio

Tra le schermate di controllo della macchina è presente quella dell'oscilloscopio che permette di visualizzare in tempo reale l'andamento del carico e dello spostamento del pistone, come visibile in Figura 71.

Si possono inoltre registrare i dati in ingresso al calcolatore con una frequenza imposta dall'utente. Un esempio è visibile nella tabella seguente:

Tempo [s]	Corsa [mm]	Forza [kN]	Comando Schenck [kN]	Servovalvola Schenck [V]	Errore Schenck [V]
0.0	-75.729	0.181	0.200	0.066	0.001
0.1	-75.732	0.188	0.200	0.066	0.000
0.2	-75.734	0.194	0.200	0.065	0.000
0.3	-75.733	0.194	0.200	0.066	0.000

Tabella 9: esempio di dati salvati

In cui:

- Il tempo rappresenta l'istante dall'inizio della registrazione in cui vengono acquisiti i dati di quella riga;
- La corsa rappresenta la posizione del pistone;
- La forza rappresenta la forza istantanea percepita dalla Load Cell;
- Il Comando Schenck rappresenta il set point in termini di forza;
- Gli ultimi due dati riguardano invece i segnali elettronici della macchina e possono essere trascurati.

Questi dati risultano importanti soprattutto per quanto riguarda il controllo della forza. È infatti possibile verificare in che modo la macchina mantiene il livello di forza richiesto nel tempo. In tutte le prove il risultato è ottimo, con differenze massime rispetto al valore desiderato minori dell'1 % e per di più concentrate nei primi cicli, quando la macchina ancora non è stabilizzata.

III.III MACCHINA INSTRON 8801

I test a temperatura ambiente vengono invece svolti con l'ausilio di una macchina Instron serie 8801, il cui funzionamento è simile a quello della Schenck, ma più moderna e quindi più comoda nell'alloggiamento del provino.



Figura 72: Macchina Instron 8801

In Figura 72 viene allegata un'immagine frontale della macchina, reperita direttamente dal catalogo dell'azienda madre. In Figura 73 viene invece mostrata la macchina in dotazione al laboratorio, con uno zoom alla zona di afferraggio provino; nello specifico è stata fotografata la situazione subito prima dell'inizio della prova, con il provino montato.



Figura 73: Macchina Instron

Come si vede dalle figure precedenti, anch'essa è costituita da un pistone libero di muoversi lungo l'asse verticale, comandato da attuatori idraulici e da una cella di carico posta nella parte superiore, capace di reggere carichi fino a 100kN. Differentemente rispetto alla Schenck, gli afferraggi in questo caso non sono meccanici ma idraulici. Il serraggio delle ganasce non è più comandato dalle viti ma dalla messa in pressione del fluido idraulico portato nella testa degli afferraggi dai tubi visibili nella figura precedente. Dal manuale è possibile verificare la forza massima che si può applicare al provino in base alla pressione idraulica del fluido, valori che vengono riportati in Tabella 10. La pressione del fluido viene regolata grazie ad una manopola posta nel retro della macchina ed è indicata da un barometro posto sul lato della stessa.



Figura 74: Dettaglio barometro Instron

Pressione idraulica sistema di afferraggio [bar]	Carico massimo applicabile [kN]
13.6	8.7
34	21.7
68	43.4
136	86.8
204	130.2

Tabella 10: Relazione pressione - forza applicabile

L'afferraggio del provino risulta molto più semplice e veloce rispetto a quanto avviene con la Schenck, non necessitando di cicli di serraggio di viti, avendo afferraggi idraulici.

Una volta che il provino è stato serrato sull'afferraggio inferiore, si solleva il pistone fino alla posizione desiderata e si serra anche l'estremità superiore. In questo caso per evitare delle tensioni di compressioni indesiderate durante il serraggio del provino è necessario attivare una modalità del programma definita 'Specimen Protection' che mantiene la forza applicata tra 0 e 200N. Prima di impostare i dati per il test deve essere caricato il file della curva di calibrazione della cella di carico.

Tramite un software dedicato (Instron LCF) si passa all'inserimento dei dati necessari all'avvio della prova, andando a modificare quello che viene chiamato 'file di metodo'.

I primi dati da inserire riguardano la geometria del provino. Poiché questo software non lavora con la forza ma con le tensioni, deve essere inserita l'area nominale. Nel caso specifico si considera un provino rettangolare di dimensioni $A \times B$ mm (misure nascoste per segretezza aziendale) la cui area è pari a 84mm^2 . In Figura 75 si vede l'inserimento dei dati di geometria.

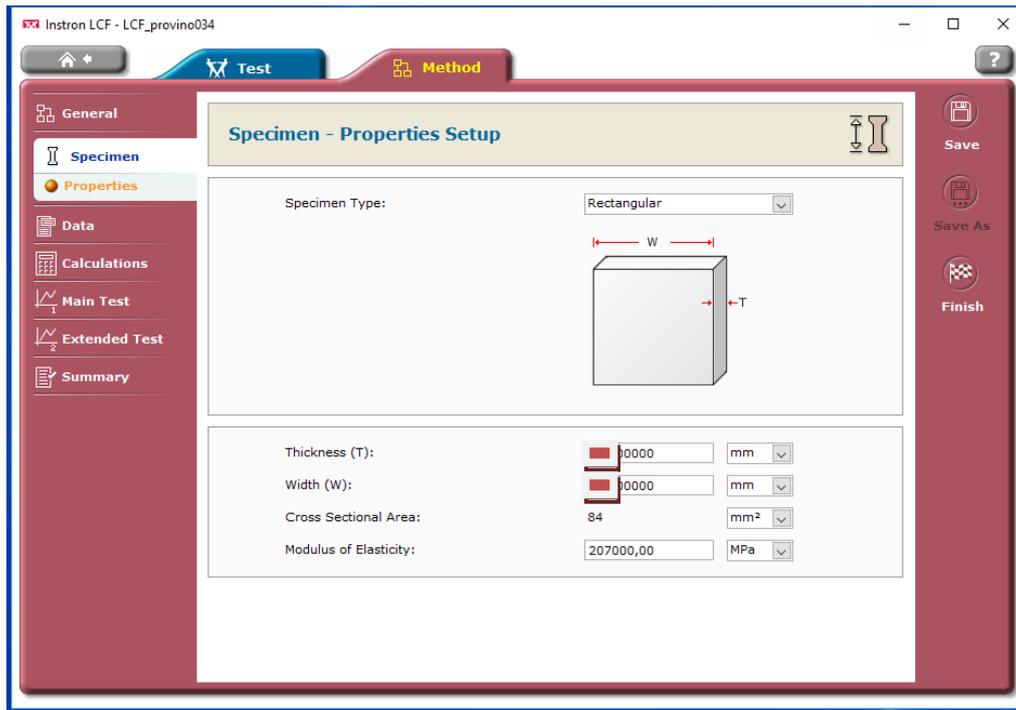


Figura 75: Inserimento dei dati sulla geometria

Il secondo passaggio riguarda l'inserimento dei dati relativi al carico da applicare. Come detto non si inserisce la forza ma la tensione voluta. È quindi necessario fare dei semplici calcoli relativi alla forza desiderata e la geometria introdotta al punto precedente.

$$\sigma = \frac{\text{Forza desiderata}[N]}{\text{Area della sezione}[mm^2]}$$

I dati da inserire sono:

- Il range della tensione nominale;
- La tensione media nominale;
- Indicare se il test deve iniziare con un carico di compressione o di trazione;
- La forma d'onda del carico ciclico;
- La frequenza del ciclo;

In Figura 76 viene mostrato l'inserimento dei dati riguardanti il carico applicato.

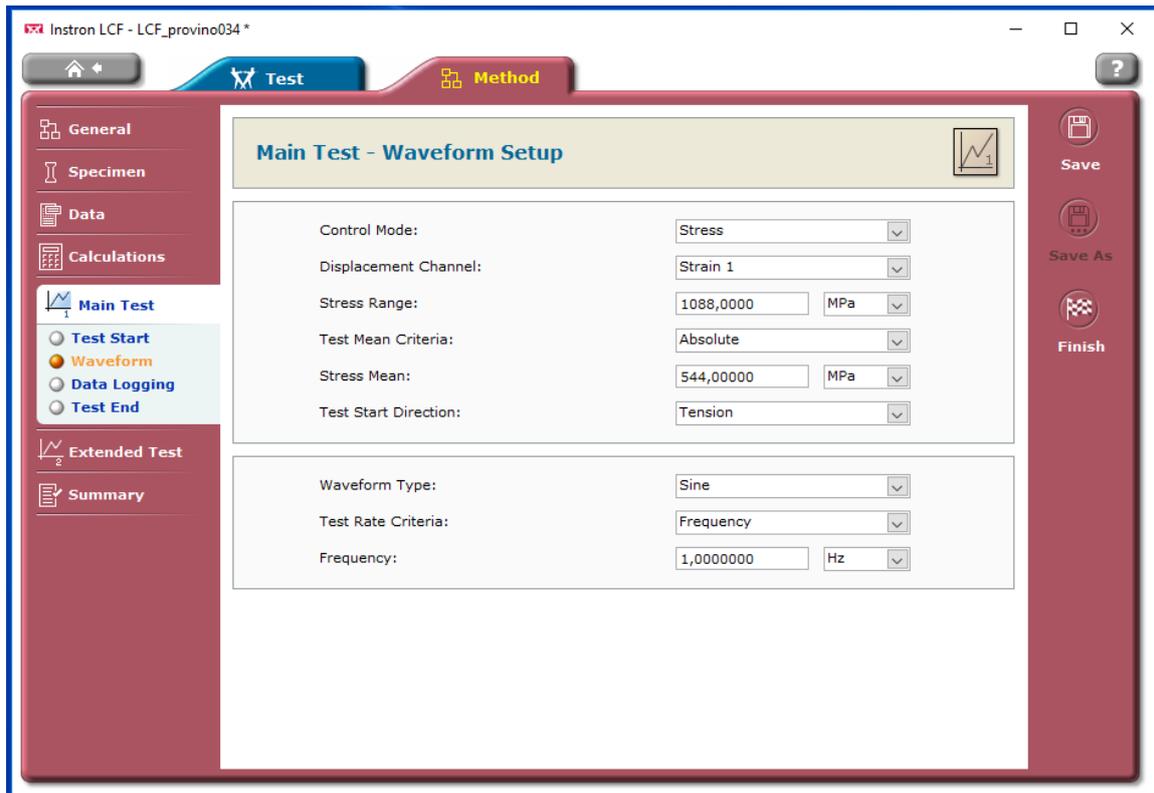


Figura 76: schermata inserimento dati prova LCF

Il lato negativo nell'utilizzo delle tensioni invece che delle forze come input della macchina risiede nel fatto che la macchina non è precisa nella forza applicata ed è quindi necessario creare un grafico che metta in relazione la tensione data con il carico effettivo risultante. In questo modo si possono interpolare i dati ottenuti con una retta, la cui equazione servirà per fare delle piccole correzioni sulla tensione introdotta in modo tale da ottenere con precisione il carico voluto.

Considerando ad esempio la Figura 76, relativa ad un test effettuato con carico pari a 90kN, si trova che la tensione nominale dovrebbe essere pari a 1071 MPa mentre quella introdotta per avere la forza richiesta è pari a 1088 MPa.

Il terzo passaggio riguarda la scelta del numero di dati che devono essere acquisiti durante lo svolgimento del test.

Infine, come visibile in figura 58, vengono inseriti i dati relativi alla conclusione del test:

- Il numero di cicli a cui la macchina deve concludere la prova

OPPURE

- Il dato limite per cui la macchina deve fermarsi: in questo caso il provino si considera rotto quando la deformazione aumenta del 100%, ossia raddoppia, rispetto a quella iniziale. Se succede, la macchina conclude la prova 50 cicli dopo la ricezione del dato inserito.

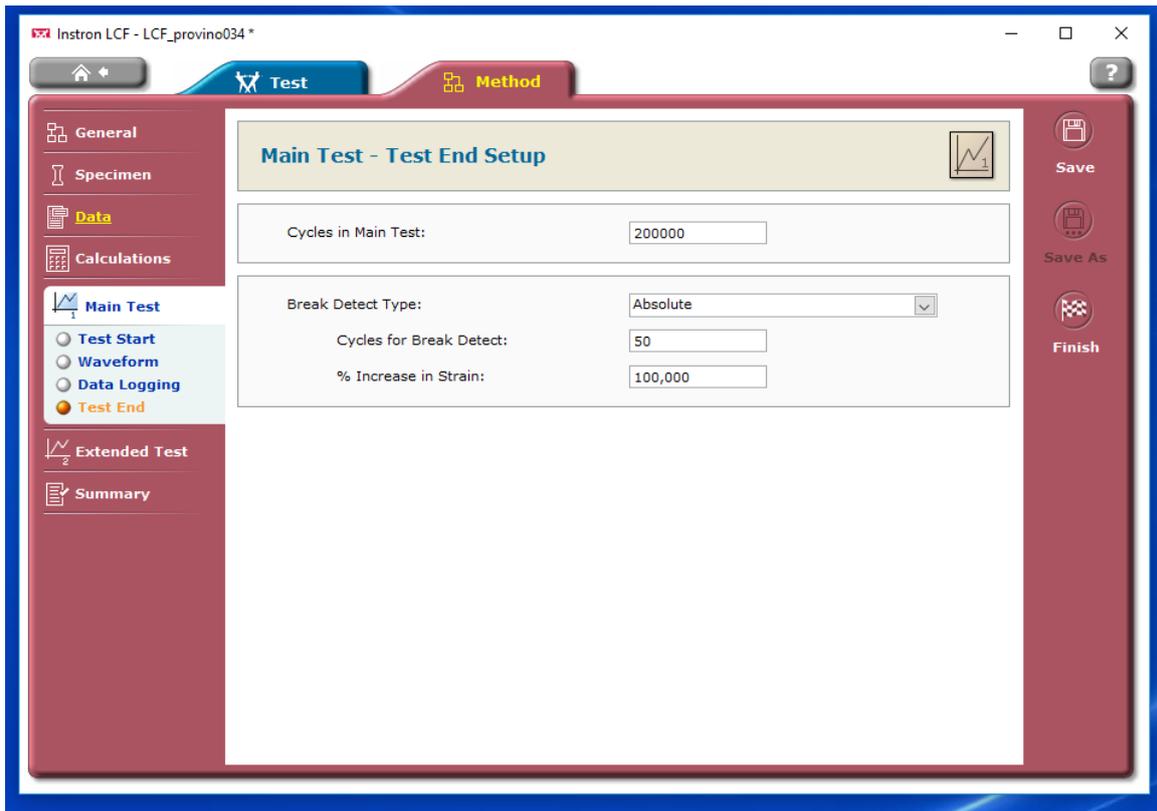


Figura 77: Inserimento parametri per la conclusione della prova

Come detto per la macchina Schenck però, i nostri test continuano sempre fino alla rottura del provino. Per questo motivo è necessario, prima dell'avvio della prova, introdurre i limiti sulla forza e sulla posizione, superati i quali la macchina si blocca autonomamente. Per farlo la Instron offre un pannello di controllo, visibile in Figura 78:

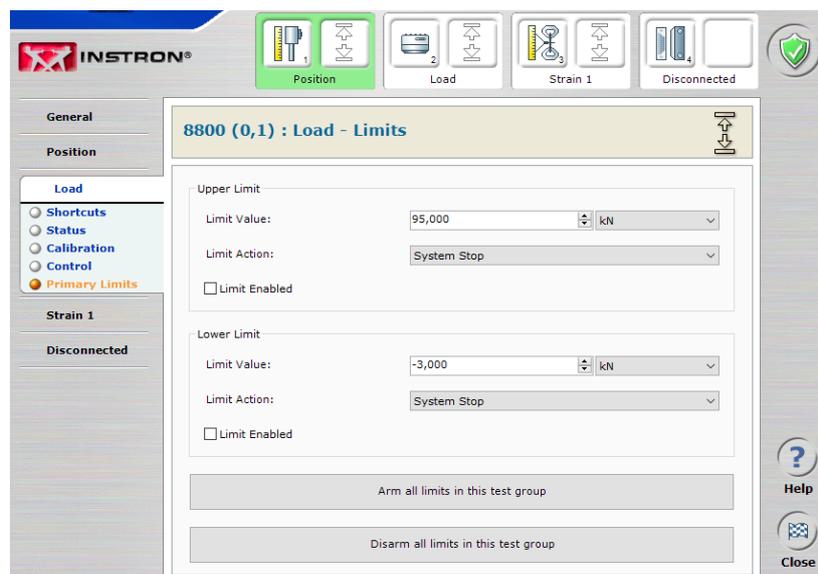


Figura 78: Inserimento limiti su forza e spostamento

Dopo tutti questi passaggi è possibile iniziare il test. In Figura 79 viene riportata la schermata di controllo durante la prova. I dati riguardanti le deformazioni vengono ricavati dall'uso di un estensometro.

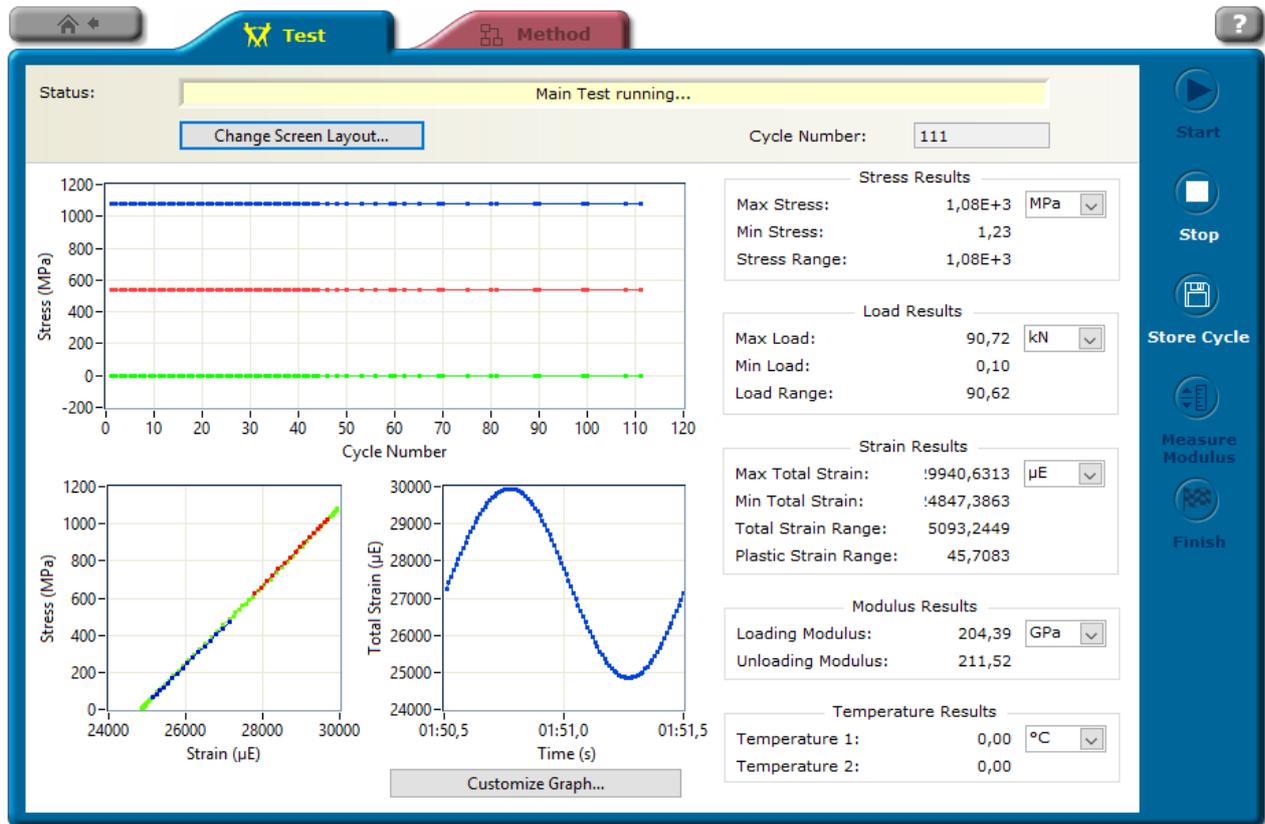


Figura 79: Schermata di controllo della prova

Da tale schermata possono essere monitorati diversi parametri:

- La *tensione massima, media e minima* calcolata dividendo la forza per l'area assegnata nella geometria;
- La *curva σ - ϵ* con la tensione calcolata e la deformazione misurata dall'estensimetro;
- La *variazione ciclica* della deformazione
- La *forza massima, minima* e la loro differenza, misurate dalla cella di carico per ogni ciclo;
- La *deformazione massima, minima* e la loro differenza. Viene inoltre indicato il range della deformazione plastica;
- Il *modulo di Young* calcolato dalla curva σ - ϵ durante le fasi di carico e di scarico di ogni ciclo;

Tutti questi dati vengono salvati su un file .CSV e possono essere utilizzati per controllare se ed in che modo la macchina abbia tenuto il range della forza o di quanto sia variato nel tempo.

III.IV RISCALDATORE AD INDUZIONE

Per riscaldare i provini destinati alle prove ad alte temperature è necessaria una fonte di calore, facendo in modo che il riscaldamento sia il più possibile localizzato ed omogeneo. A questo scopo è molto utile il riscaldamento per induzione, realizzato con un riscaldatore in dotazione al laboratorio.

Vale la pena dare un primo quadro generale sulle caratteristiche del riscaldamento ad induzione. Esso è un metodo abbastanza veloce e preciso di riscaldamento di metalli o di altri materiali elettricamente conduttivi. Il sistema è composto da un generatore di radiofrequenza, che converte la corrente di alimentazione in corrente alternata ad alta frequenza, e da una testa di adattamento del carico che genera un forte campo elettromagnetico nell'induttore. Il provino viene posto all'interno dell'induttore, dove assorbe la corrente elettrica indotta e si riscalda per effetto Joule. L'induttore è costituito da un tubo di rame raffreddato ad acqua.

Generalmente questo metodo di riscaldamento è applicabile ad acciai, rame, alluminio ed altri materiali elettricamente conduttivi.

Le temperature che si possono raggiungere sono comprese tra 100 °C e 3000 °C.

L'induzione fornisce energia al componente attraverso un forte campo elettromagnetico alternato; quando la corrente elettrica scorre nell'induttore genera un campo magnetico attorno ad esso. Ogni volta che la corrente alternata cambia direzione anche il campo magnetico cambia direzione. Nel provino immerso in un campo magnetico alternato, la corrente indotta al suo interno (circuitto secondario) risulta proporzionale alla corrente che circola all'interno dell'induttore (circuitto primario) ed è inversa al quadrato della loro distanza. La corrente elettrica indotta crea calore sulla superficie del provino a causa della resistenza elettrica del materiale, per effetto Joule. [6] Ciò che avviene è schematizzato in Figura 80:

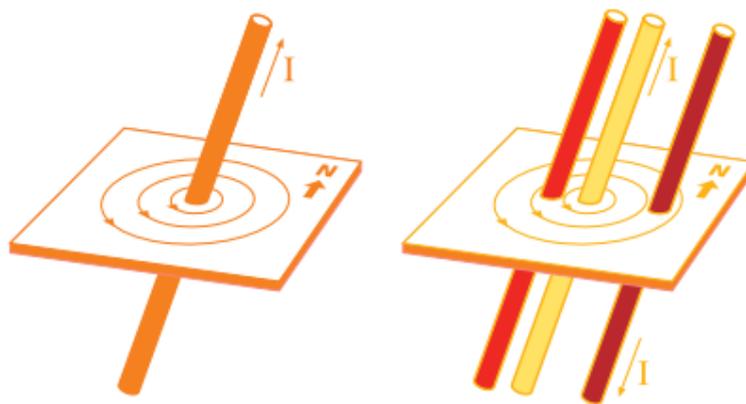


Figura 80: Induzione elettromagnetica

Per quanto riguarda il riscaldatore, si riporta in Figura 81 ciò che avviene:

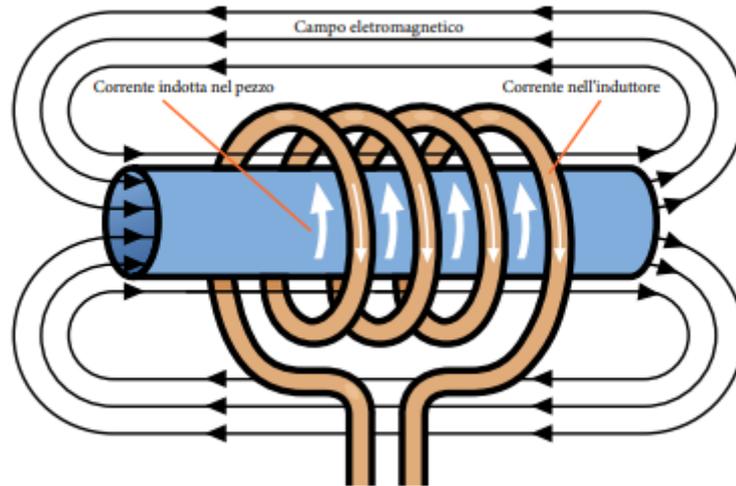


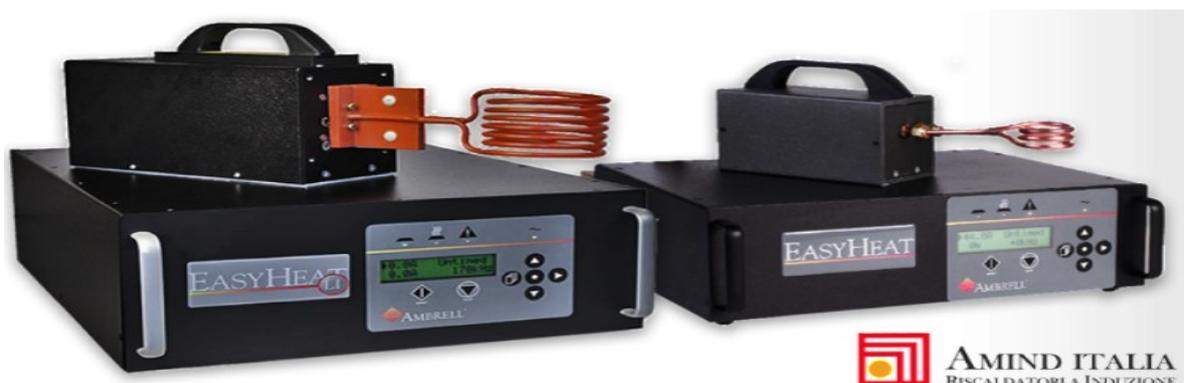
Figura 81: Generazione di corrente e campo magnetico nell'induttore

viene usata una bobina che trasferisce energia nel provino con un campo elettromagnetico alternato, generato dalla corrente elettrica che scorre attraverso la bobina; a sua volta, il campo elettromagnetico produce la corrente nel provino. La bobina rappresenta l'induttore.

Alcuni fattori da tenere in considerazione sono:

- La velocità e la potenza necessaria sono determinate dal materiale che costituisce il pezzo da riscaldare, per esempio acciaio, ferro e ghisa si riscaldano con meno potenza rispetto a rame ed alluminio, che presentano una bassa resistenza elettrica;
- Alcuni acciai hanno delle proprietà magnetiche, per cui l'isteresi magnetica aggiunge un effetto di riscaldamento;
- La potenza del sistema dipende molto dal tipo di materiale, dalle dimensioni del pezzo, dalla temperatura da raggiungere;
- Al crescere della temperatura del componente la convezione e l'irraggiamento diventano fattori importanti di perdite del sistema.

Per le prove in laboratorio è stato utilizzato un riscaldatore ad induzione della ditta Amind Italia, serie Ambrell EasyHeat, riportato nella Figura di seguito:



Esso è un'ottima apparecchiatura per il riscaldamento ad induzione, con potenza da 1 a 10 kW e frequenza da 150 a 400 kHz, permettendo di ottenere un riscaldamento preciso, controllato e ripetibile.

È una buona apparecchiatura in quanto riscalda localmente solo dove necessario, eliminando sprechi di energia, ha un display di controllo ed interfaccia facilmente utilizzabile, possibilità di regolazione in automatico (con l'ausilio di un pirometro di misura e di un controllo digitale I/O 0-10 V e 4-20 mA). Nelle figure seguenti vengono mostrati la testa con l'induttore ed il display di interfaccia del riscaldatore.



Figura 82: Testa con spire di induzione e display interfaccia

III.VI PIROMETRO

Come spiegato nella tesi, durante le prove in temperatura si è sfruttata la possibilità del riscaldatore di essere controllato in modo automatico. Per fare ciò si utilizza un misuratore puntuale di temperatura, collegato al controllore del riscaldatore a formare un ciclo chiuso. Come misuratore si utilizza un pirometro Rayteck, riportato in Figura 83:

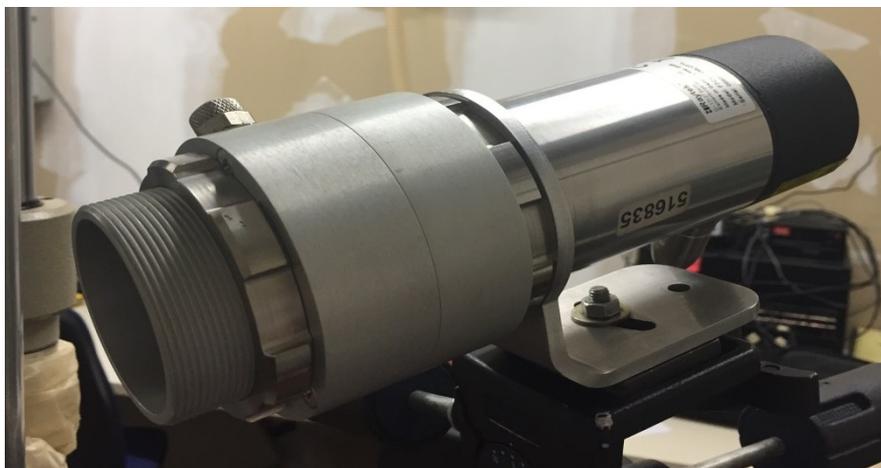


Figura 83: Pirometro per misura di temperatura

Il pirometro è uno strumento, utile per queste applicazioni, capace di misurare la temperatura di un oggetto o di una sostanza senza necessità di entrare in contatto con esso. Generalmente il range di temperatura spazia da $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+4000\text{ }^{\circ}\text{C}$, ma lo strumento in dotazione al laboratorio capta solo temperature superiori ai $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Attraverso una luce laser permette un buon puntamento nella zona in cui si vuole misurare la temperatura.

Il principio di funzionamento si basa sulla radiazione termica: qualsiasi oggetto con una temperatura superiore agli 0 K emette radiazione termica che viene captata dal pirometro. La radiazione termica captata dallo strumento è nel campo dell'infrarosso; di questa radiazione termica il calcolatore collegato al pirometro quantifica la lunghezza d'onda e da essa determina la temperatura dell'oggetto che l'ha emessa, in questo caso il provino portato ad alte temperature.

III.VII TERMOCOPPIA

L'altro strumento usato per la misurazione della temperatura del provino è la termocoppia saldata su una faccia. Essa capta la temperatura nel punto in cui è applicata. Un esempio è visibile nella Figura seguente:

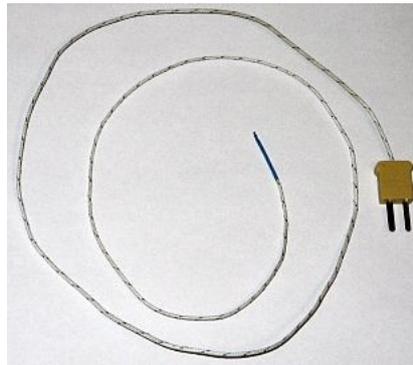


Figura 84: Termocoppia

La termocoppia è un trasduttore di temperatura che si basa sull'effetto termoelettrico. Il principio su cui si basa il funzionamento di una termocoppia fu scoperto nel 1821 da Thomas Johann Seebeck, il quale dimostrò che in un circuito costituito da due conduttori di materiale differente, sottoposto ad un gradiente di temperatura, si genera una differenza di potenziale. Questo viene appunto chiamato Effetto Seebeck.

In virtù di questo effetto, una termocoppia è formata da una coppia di conduttori elettrici di diverso materiale uniti in un punto, detto giunzione calda, che è il punto dove avviene la misurazione. Le altre estremità libere dei due conduttori sono dette giunzione fredda. Nel momento in cui esiste una differenza di temperatura tra la zona del giunto caldo e quella del giunto freddo, si instaura una differenza di potenziale elettrico tra le estremità dei conduttori della termocoppia nel giunto freddo. Questo valore è dipendente dalla differenza di temperatura. I due estremi liberi sono in genere inseriti in una morsettiera. La temperatura sul

giunto freddo viene misurata con una termoresistenza ed usata, nello strumento di misura, per una compensazione elettrica del segnale proveniente dalla termocoppia. In questo modo, qualsiasi sia la temperatura presente nella zona, è come se il giunto freddo fosse sempre a 0 °C; questo procedimento viene detto compensazione della temperatura ambiente e rende la misura il più precisa possibile.

IV INCONEL 718

L'Inconel 718 è il materiale utilizzato per la fabbricazione dei provini utilizzati nei test, sia a temperatura ambiente che ad alte temperature. Questo materiale è un marchio brevettato dell'azienda statunitense Special Metals Corporation e facente parte della famiglia delle superleghe di Nichel – Cromo a base austenitica.

Esso è infatti una lega, contenente principalmente Nichel (tra 48% e 72%) e Cromo (tra 14% e 29%). In Figura 85 vengono riportati range entro cui variano i tenori dei vari elementi costituenti la lega Inconel 718:

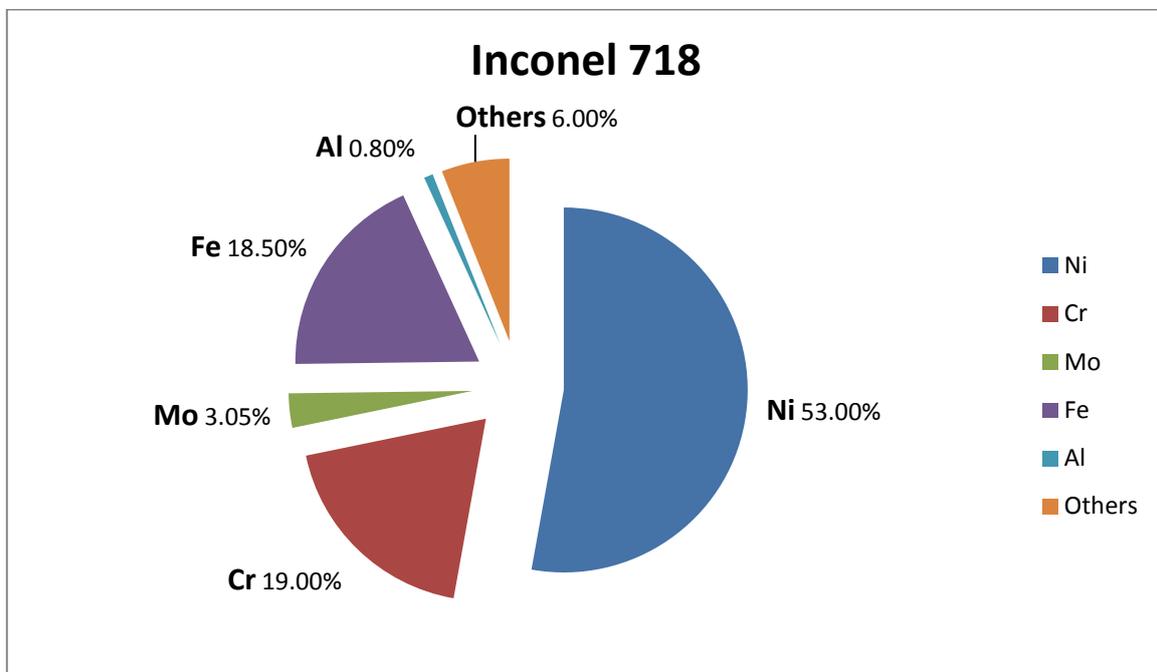


Figura 85: Tenori elementi dell'Inconel 718

Tra le caratteristiche di principale rilievo di questo materiale vi è sicuramente un'ottima resistenza all'ossidazione alle alte temperature ed alla corrosione. Inoltre è caratterizzato da un'alta resistenza all'usura ed alla rottura, un'ottima tolleranza a stress meccanici ed una resistenza termica fino a temperatura anche di 980 °C.

Tutte queste buone proprietà lo rendono un materiale adatto e molto usato in applicazioni ad alte temperature come parti delle turbine a gas.

Altro aspetto positivo è che un pezzo realizzato in Inconel 718 si adatta bene a diverse lavorazioni meccaniche, da elettroerosione a pallinatura a lucidatura. Può inoltre subire trattamenti termici come la tempra per miglioramento delle proprietà meccaniche.

RINGRAZIAMENTI

Il primo ringraziamento lo rivolgo *ai miei genitori*, che mi hanno permesso di intraprendere la carriera universitaria e mi hanno sempre incoraggiato, sostenendomi e consigliandomi sia nei momenti positivi che in quelli di sconforto o di ansia, insegnandomi a credere in me stesso e credendoci loro stessi. Insieme a loro ringrazio la mia famiglia, *zii e cugini*, che hanno sempre speso belle parole nei miei confronti e mi hanno sostenuto in tutto il mio percorso.

Il secondo ringraziamento lo rivolgo a quella che posso definire una seconda famiglia, cioè *i miei amici*. Gli amici con cui ho condiviso momenti importanti della mia vita, con cui sono cresciuto, ho imparato e con cui ho condiviso anche momenti di studio supportandosi a vicenda.

Vorrei ringraziare *Luca*, per aver creduto fermamente in me, spendendo parole di incoraggiamento nei momenti di sconforto e spingendomi a tirare fuori il meglio di me e delle mie capacità.

Vorrei ringraziare *Riccardo M.* (detto Master) per tutti i ricordi ed i momenti importanti vissuti insieme e, nello specifico della carriera universitaria, per tutti e tanti pomeriggi (e sere) passati a studiare insieme, alternando risate a momenti di visione pessimistica e catastrofica della sessione esame.

Vorrei ringraziare *Giorgia* per il suo esserci sempre, nei momenti belli ed in quelli di aiuto, per il suo insegnamento che con un po' di impegno e sacrificio si raggiungono tutti gli obiettivi che si desiderano, nella vita come nella carriera universitaria, senza farsi bloccare dal primo ostacolo, ma tirandosi su le maniche e saltando l'ostacolo.

Vorrei ringraziare *Manuela* per le parole che sa spendere verso di me, consigli, confronti e pareri. Per il suo modo di riportare il sorriso quando manca, con una semplice battuta; inoltre, non dimentichiamo il suo motto universitario che mi ha ripetuto (e non solo a me) come un mantra: "forza e coraggio, che l'esame (o la Laurea) non è un miraggio".

Vorrei ringraziare *Riccardo F.* (detto Pacman), partito come un semplice compagno di Laurea Triennale e diventato un amico fidato. Direi che possiamo ricordare diversi momenti di collaborazione e sostegno reciproco a stretto contatto durante il comune percorso triennale, che non sono però mancati durante i nostri percorsi magistrali. Riassumerei il tutto in un "mal comune mezzo gaudio".

Vorrei ringraziare *Tommaso*, con cui ho iniziato a collaborare diversi mesi fa, con cui ho condiviso sia le attività vere e proprie di laboratorio sia momenti di relax e risate, metodi infallibili per sdrammatizzare le situazioni in cui tutto andava per il verso sbagliato e non come volevamo.

Vorrei ringraziare il *Professore Daniele Botto*, per la disponibilità, l'aiuto, il coordinamento ed i chiarimenti durante tutte le attività di laboratorio e di stesura della Tesi.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Lucjan Witek : Failure analysis of turbine disc of an aero engine, Engineering Failure Analysis 13 (2006) 9–17
- [2] <http://www.sig1.com/turbo.htm>
- [3] TESI Tommaso Battocchio, “*Resistenza a fatica della sede attacco pala nel disco di turbina*”
- [4] Mechanical Metallurgy, George E. Dieter, Adapted by David Bacon
- [5] ASTM (2000), Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture, vol. 03.01 edition Testinf ASTM designation E1823
- [6] <http://www.aminditalia.com/it/faq.html>
- [7] J.A. Collins, Failures of materials in mechanical design
- [8] Amaresh H Ga, Amith Kumar S Nb & Basavaraj Noolvic; Design and Analysis on Dovetail Joint of an Aero Engine Compressor Disc and Blade with Different Skew Angle, International Journal for Ignited Minds (IJIMIINDS) ,Volume: 02 Issue: 12 | Dec-2015
- [9] Tecnologia meccanica, Serope Kalpakjian – Steve R. Schmid, IV Edizione a cura dei Proff. Stefania Bruschi ed Enrico Savio e dei dott. Simone Carmignato, Andrea Ghiotti e Giovanni Lucchetta
- [10] Heyman J., Plastic design of rotating discs, Proceedings Institution Mechanical Engineers 1847-1996, Vol. 172 , 1958
- [11] Corso di tecnologia meccanica, LIUC
- [12] David L. Davidson, Gas turbine disk-blade attachment crack, Journal of Failure Analysis and Prevention 5(1):55-71 · February 2005
- [13] Javadi, H., Jomaa, W., Texier, D., Brochu, M., Bocher, P. : Surface roughness effects on the fatigue behavior of as-machined inconel 718, Solid State Phenomena, 2017, Vol.258, pp.306-309