

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria meccanica

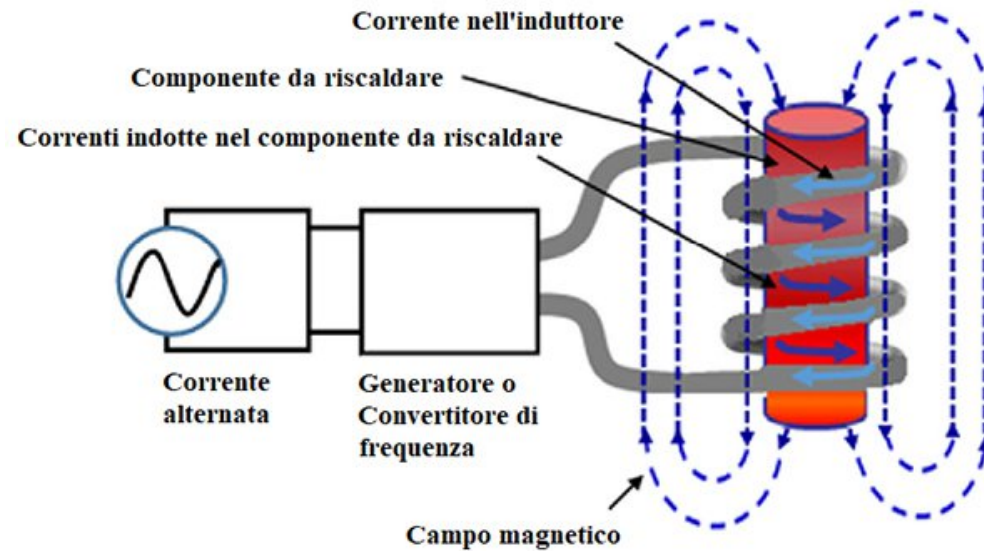
Relazione per la prova finale

**«INFLUENZA DEI PARAMETRI DI PROCESSO
PER LA TEMPRA AD INDUZIONE SULLE
TENSIONI RESIDUE»**

Tutor universitario: Prof.ssa Katya Brunelli

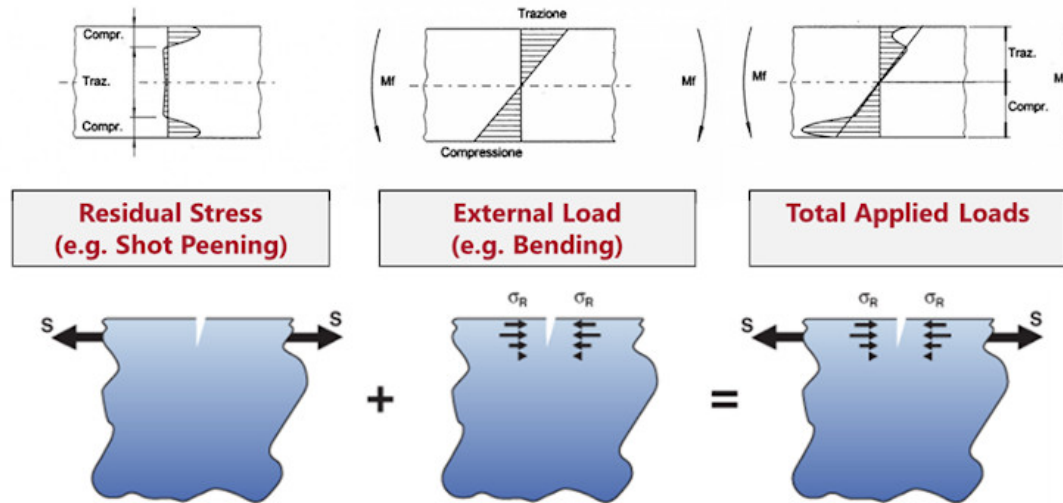
Laureando: *Riccardo Sambo*

Anno accademico 2025/2026



Il sistema si compone di:

1. Generatore di corrente;
2. Convertitore di frequenza;
3. Induttore;
4. Componente da lavorare;

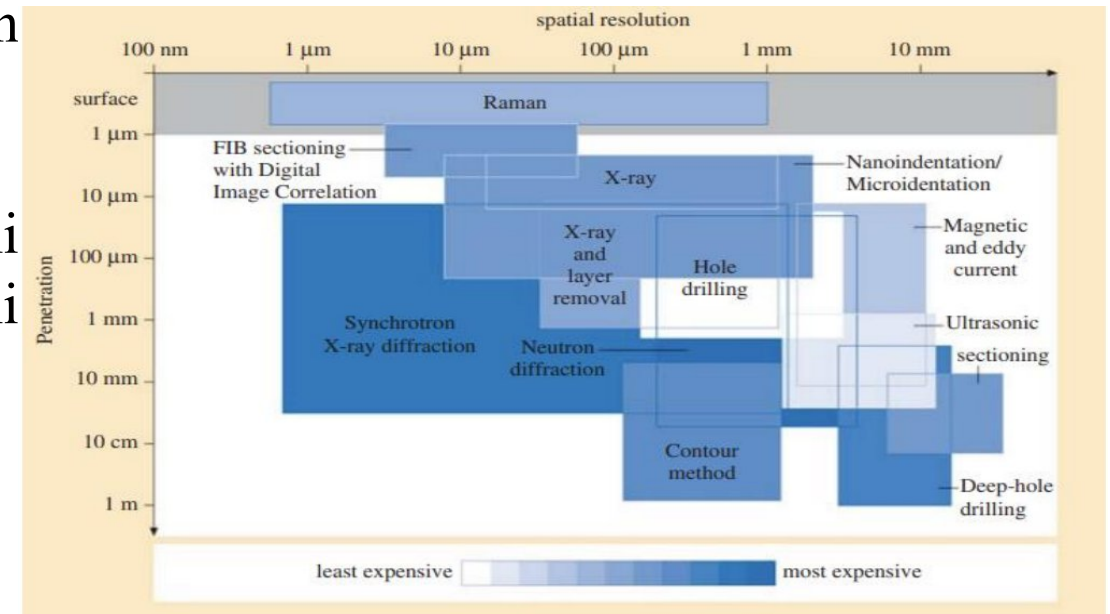


I meccanismi per la creazione delle tensioni residue includono:

1. Deformazione plastica non uniforme;
2. Modifica superficiale;
3. Variazioni di fase e/o densità del materiale, spesso in presenza di ampi gradienti termici;

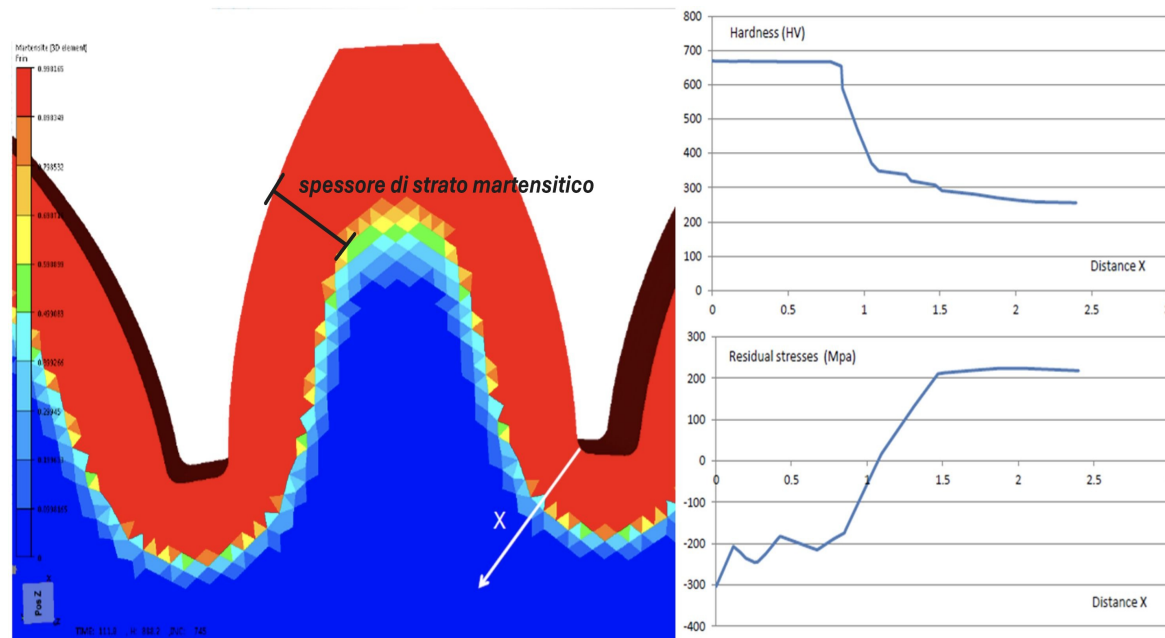
I metodi di misurazione delle tensioni si classificano in:

1. **“relaxation method”**: identificano le tensioni residue a partire dalle deformazioni indotte da un adeguata rimozione di materiale.
2. **“diffraction method”**: monitorano le variazioni del reticolo cristallino e le correlano alle tensioni residue.



Si possono individuare i parametri chiave della tempra ad induzione che sono:

1. Potenza;
2. Frequenza;
3. Distanza d'accoppiamento;
4. Induttore: geometria, numero di spire;
5. Velocità di scansione;



Per manufatti di diversa forma geometrica la potenza è data empiricamente da:

$$P = 1.987 \times 10^{-9} \times H^2 \times A \times m \times \sqrt{\rho \times \mu \times f}$$

[KW]

Alta Potenza:

1. Gradiente termico molto ripido;
2. Migliorano notevolmente la resistenza a fatica e la resistenza all'usura del componente;
3. Un'eccessiva potenza può portare a surriscaldamento locale;

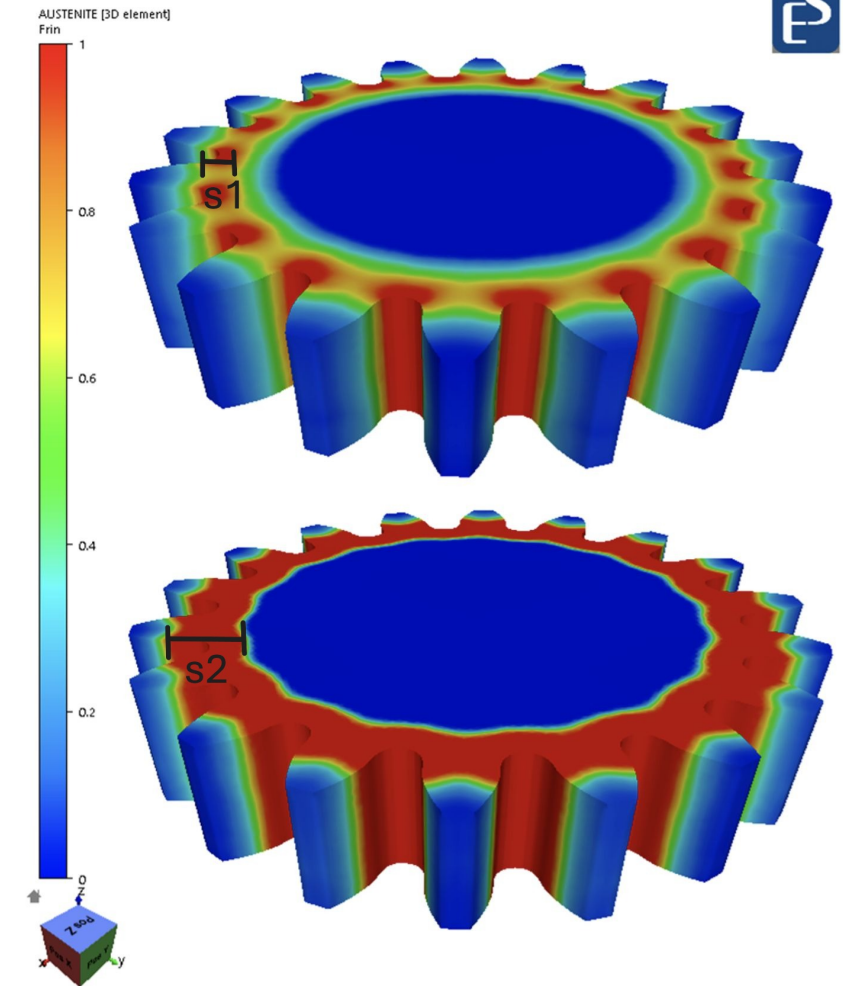
Bassa Potenza:

1. genera tensioni di compressione minori;
2. il calore diffonde più in profondità;
3. rischio di distorsioni geometriche aumenta a causa della maggiore zona di transizione;

In base alla scelta della frequenza, si possono avere spessori di martensite piccoli o grandi, generando una zona di transizione più spessa o meno spessa.

La profondità di penetrazione si calcola tramite la seguente formula:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \times \mu_0 \times \mu_r \times f}}$$



La distanza di accoppiamento determina l'efficienza del trasferimento energetico e la profondità di riscaldamento.

Distanza ridotta:

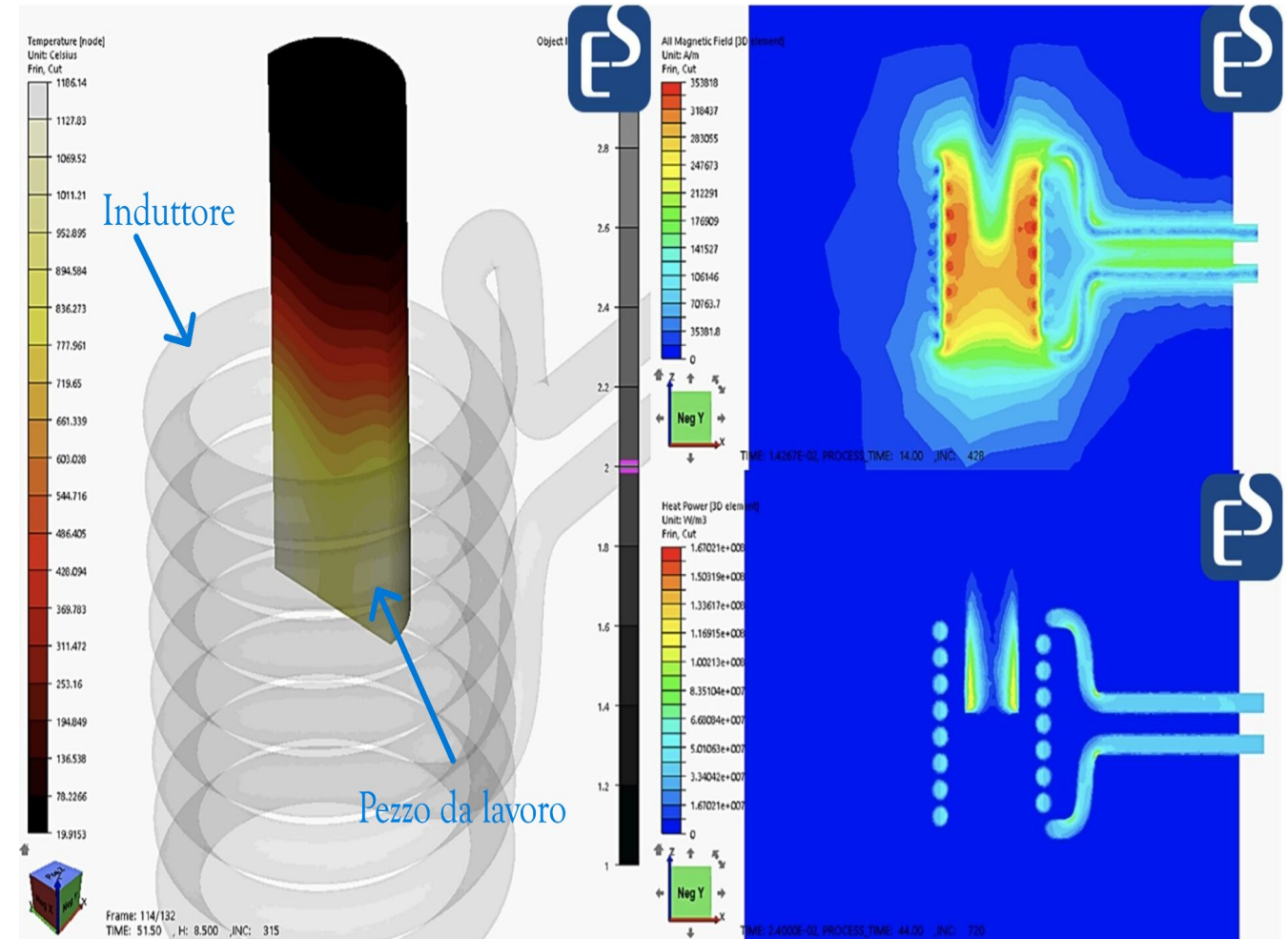
1. Densità di potenza trasferita è elevata;
2. Riscaldamento molto rapido;
3. Forti gradienti termici e meccanici;
4. Elevate tensioni residue di compressione;

Distanza maggiore:

1. Piccola quantità di energia;
2. Tempi più elevati;
3. Il calore ha il tempo di penetrare più a fondo;
4. Gradiente termico meno severo;
5. Zona termicamente alterata più ampia;
6. Tensioni di compressione superficiali più basse;

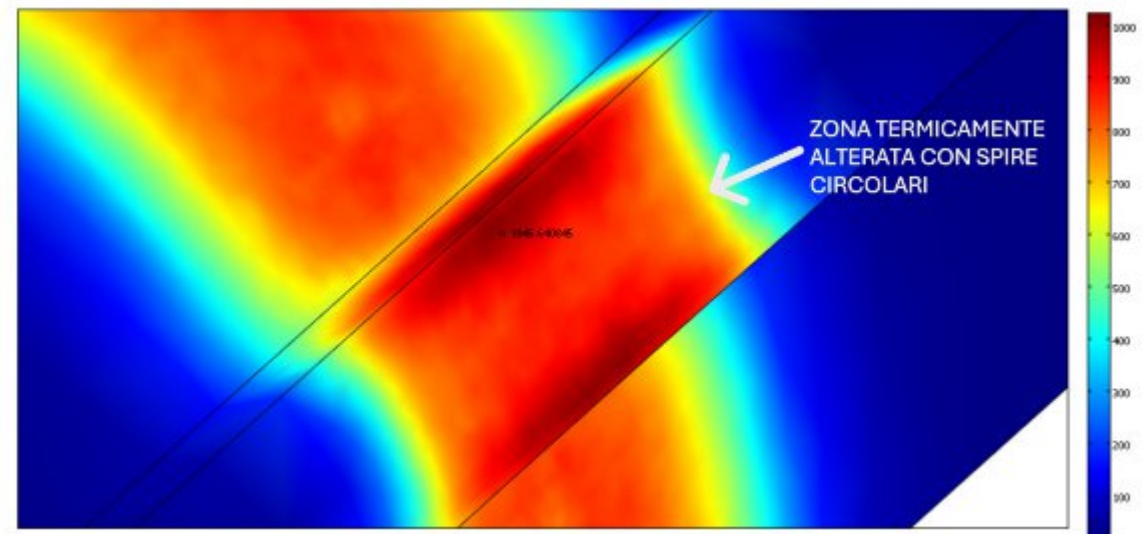
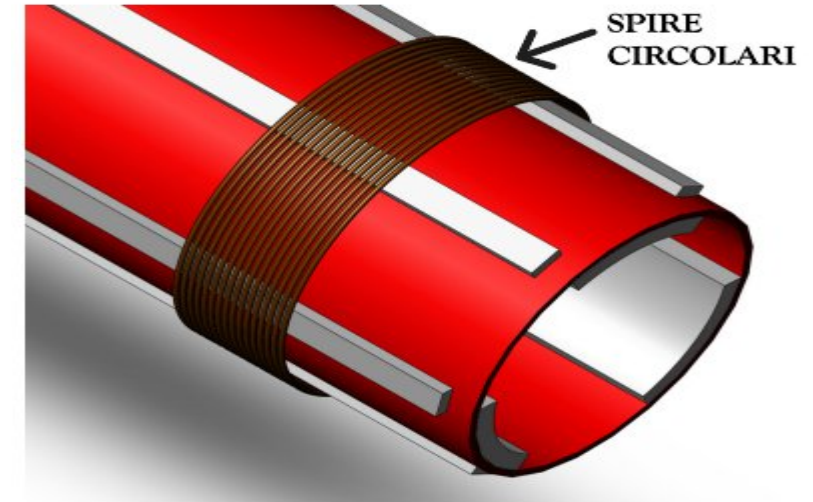
La geometria dell'induttore influenza:

1. Stato di tensione residua del pezzo;
2. Gradienti termici;
3. Trasformazioni di fase;
4. Campo magnetico;



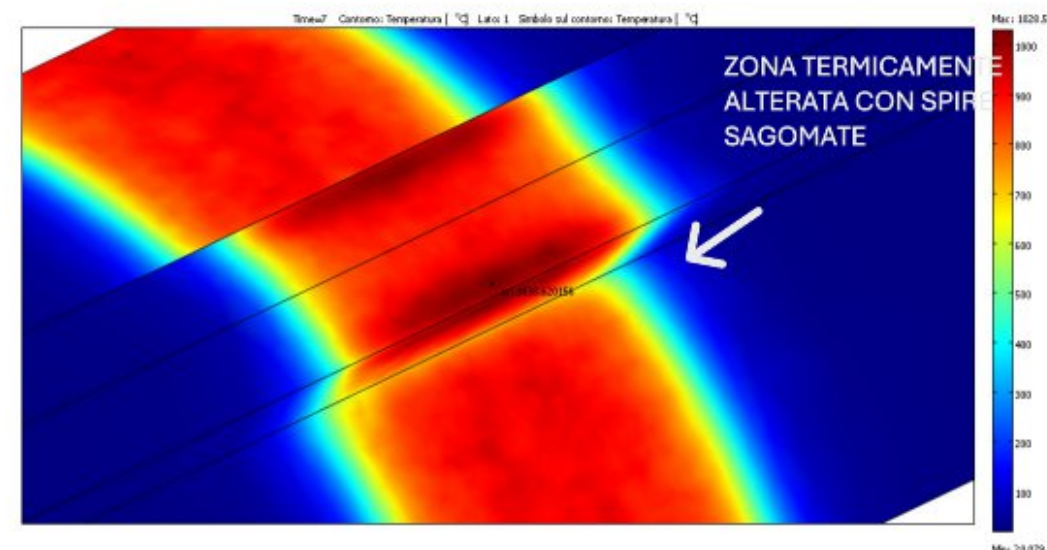
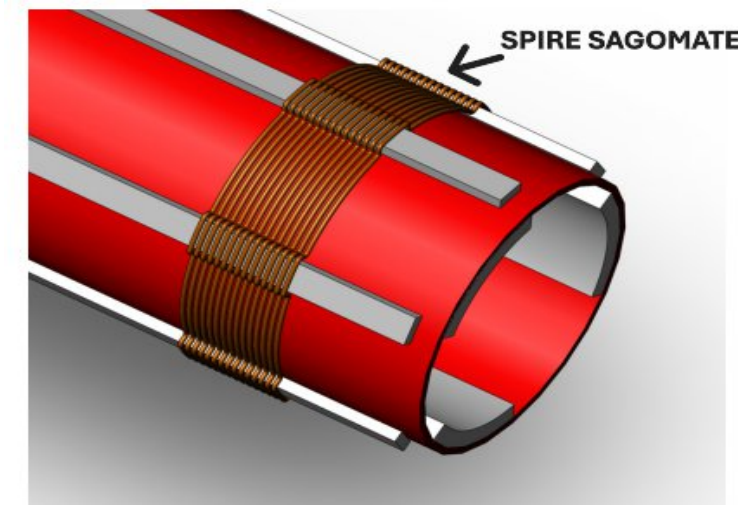
Le condizioni fissate per questa simulazione sono:

- induttore con 15 spire circolari e passo 9 mm;
- spire in rame a sezione circolare cava Ø6mm(tubo 1/8')raffreddate ad acqua;
- densità di corrente nelle spire $J = 2.501 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$;
- frequenza della corrente $f = 7000 \text{ Hz}$;
- temperatura iniziale $T = 20^\circ\text{C}$;



Le condizioni fissate per questo secondo caso di simulazione sono:

- induttore con 15 spire sagomate e passo 9 mm;
- spire in rame a sezione circolare cava Ø6 mm (tubo 1/8') raffreddate ad acqua;
- densità di corrente nelle spire $J = 2.501 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$;
- frequenza della corrente $f = 7000 \text{ Hz}$;
- temperatura iniziale $T = 20^\circ\text{C}$;



La velocità di scansione definisce quanto rapidamente l'induttore e la doccia di spegnimento si muovono lungo il pezzo influenzando: tensioni sul pezzo, cricche e distorsioni.

-Velocità bassa:

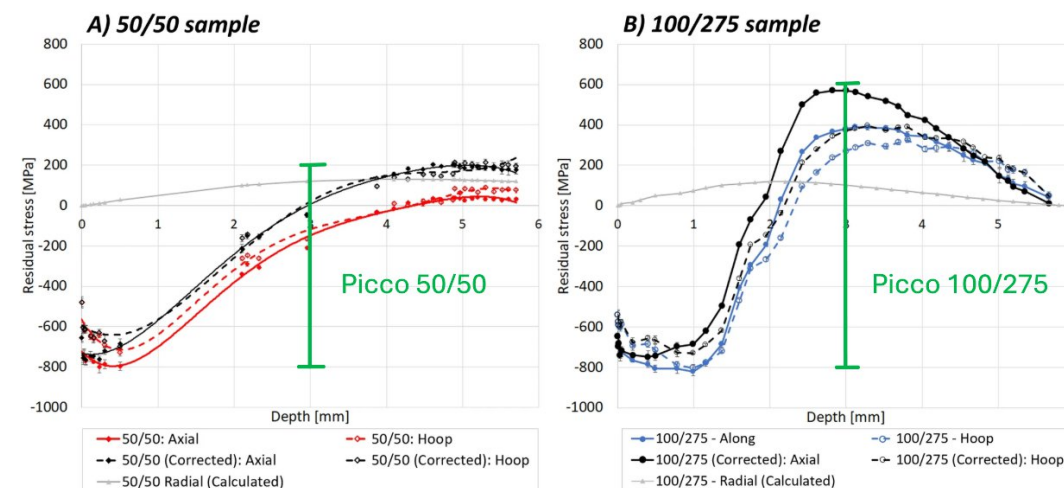
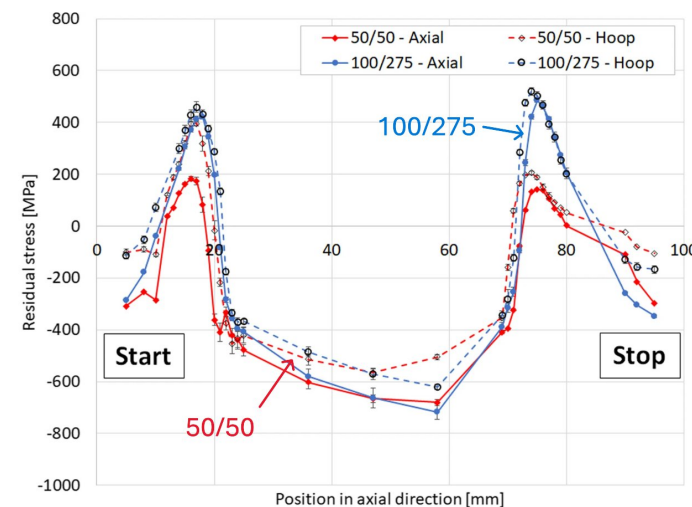
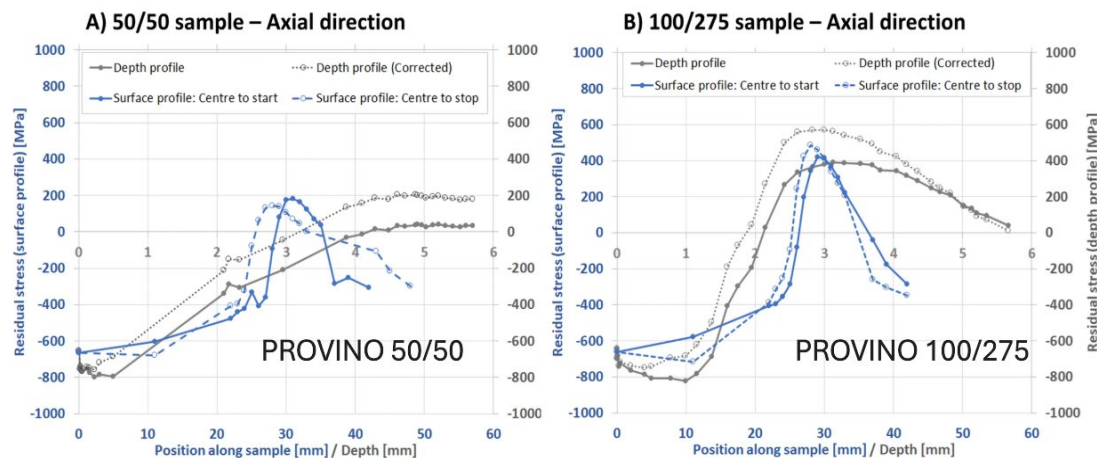
1. Profili termici più uniformi;
2. Transizione più graduale;
3. Valori di tensione di trazione interna ridotti;

-Velocità alta:

1. Gradienti termici più ripidi;
2. Transizione brusca tra lo strato indurito e il cuore del pezzo;
3. Maggiori picchi di tensione di trazione interna;

Prova sperimentale condotta con più provini di acciaio C45E dove:

1. Materiale tornito a 24 mm di diametro e tagliati a 100 mm di lunghezza;
2. Potenza nominale del generatore di 150 kW; Induttore a spira singola;
3. Diametro interno dell'induttore 30 mm (distanza di accoppiamento di 3 mm);
4. velocità di scansione lenta e veloce, denominate rispettivamente ID di processo 50/50 e 100/275;



Si ricavano le seguenti conclusioni:

1. Adattando la frequenza alla geometria del pezzo, si ottiene un profilo di durezza ottimale senza alterare la tenacità del nucleo non trattato;
2. Regolando la potenza del generatore e la velocità di scansione si ha un impatto significativo sullo stato di stress residuo;