

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale  
«Studio e selezione dei materiali per  
roll cage in vetture da rally»***

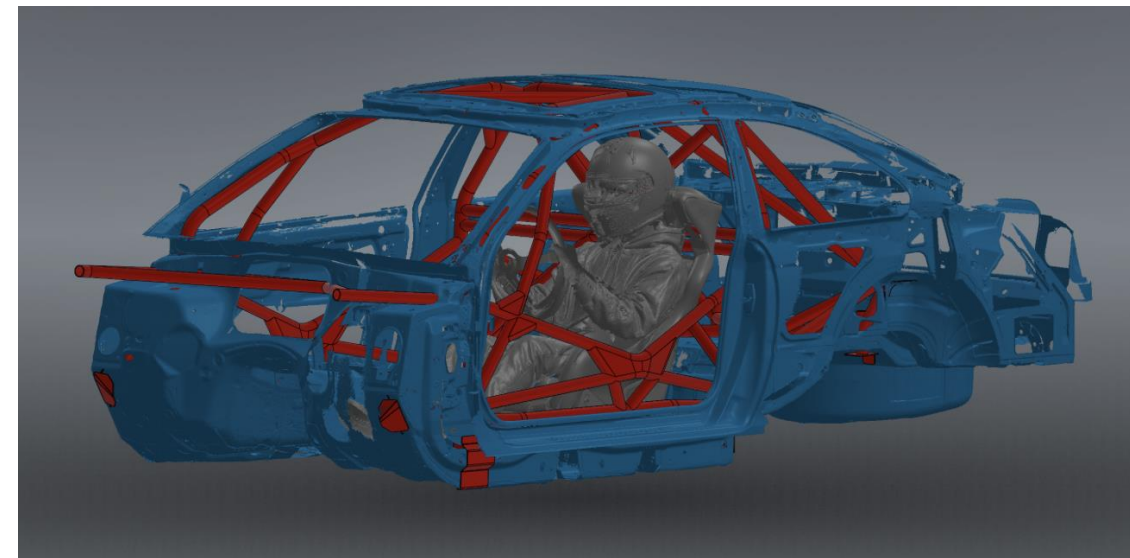
Tutor universitario: Prof.ssa Katya Brunelli

Laureando: *Giuseppe Iseppi*

Padova, 16/07/2026

Il *roll cage* è una struttura reticolare tubolare integrata all'interno dell'abitacolo e rappresenta l'elemento cardine della sicurezza passiva nelle vetture da rally. Le sue funzioni principali sono tre:

- creazione di una cellula di sopravvivenza (spazio tridimensionale sicuro);
- assorbimento dell'energia cinetica e integrità della cabina;
- irrigidimento per la dinamica del veicolo e protezione dei sottosistemi.



In grigio: pilota, volante, sedile;

In rosso: *roll cage*;

In blu: scocca;

La realizzazione di un *roll cage* efficiente impone un complesso compromesso, che trova la sua risoluzione nell'attenta **selezione dei materiali**. Una struttura eccessivamente rigida trasmetterebbe pericolose decelerazioni agli occupanti, mentre una troppo deformabile non garantirebbe i volumi minimi di sopravvivenza.

Il presente lavoro di tesi si propone di analizzare le soluzioni tubolari metalliche destinate ai *roll cage*. Verrà condotta una revisione critica della letteratura tecnica per confrontare le classi di materiali più diffuse, trattando quindi gli acciai al carbonio, i tradizionali acciai legati da bonifica (come il 25CrMo4), fino ad arrivare ai più moderni acciai avanzati ad alta resistenza (AHSS).

La sfida principale è una sola  Rendere il *roll cage* **resistente** e, allo stesso tempo, **tenace**.

Un'attenzione particolare sarà dedicata alla fabbricazione e, nello specifico, alla saldabilità, che rappresenta la criticità principale nella realizzazione di queste strutture.

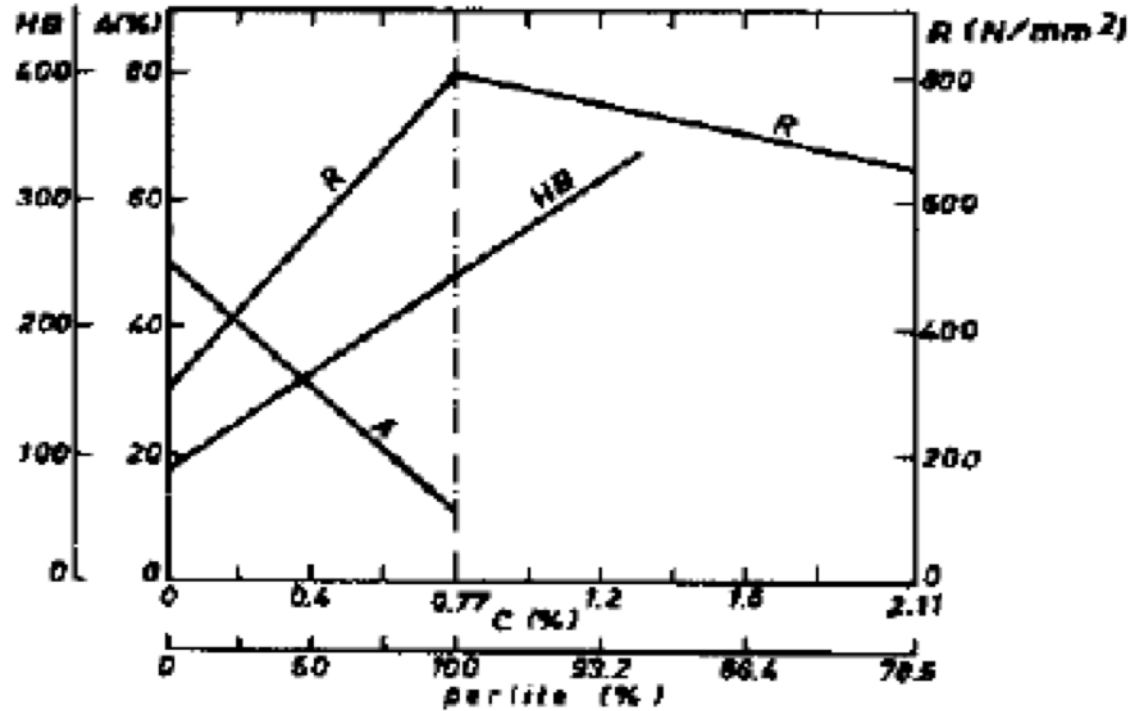
- I regimi di carico più critici per questo tipo di strutture sono
  - flexione
  - torsione
  - carico di punta
- *Crashworthiness* : il roll cage deve essere progettato specificamente per **assorbire** l'enorme **energia cinetica** generata durante gli impatti, riducendo al minimo le forze trasmesse agli occupanti e abbassando drasticamente il rischio di lesioni letali.
- I vincoli imposti dalla FIA: dimensioni minime oppure omologazione.



Vettura gruppo N



Vettura WRC



Variazione delle proprietà meccaniche in funzione del tenore di carbonio negli acciai

All'aumentare del tenore di carbonio:

- Durezza aumenta;
- Resilienza diminuisce.

Possibile soluzione → Acciai al silicio

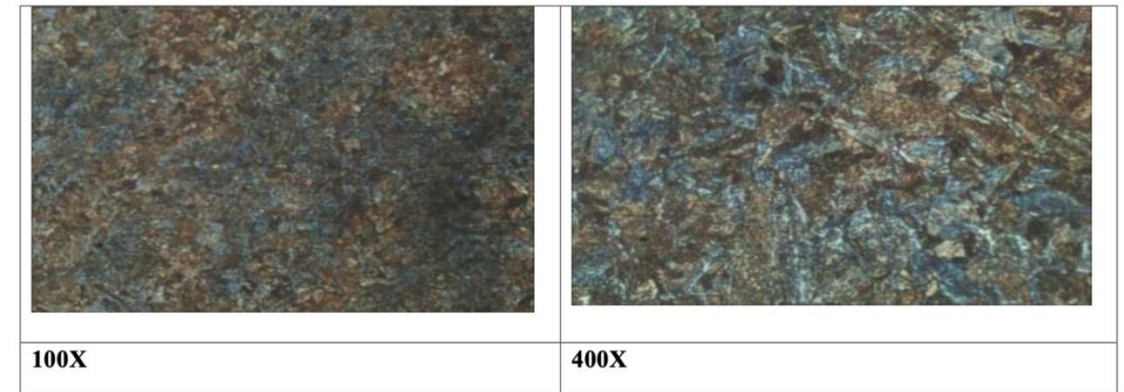
Problema → Saldabilità

## RAFFORZAMENTO PER PRECIPITAZIONE E TRASFORMAZIONE DI FASE

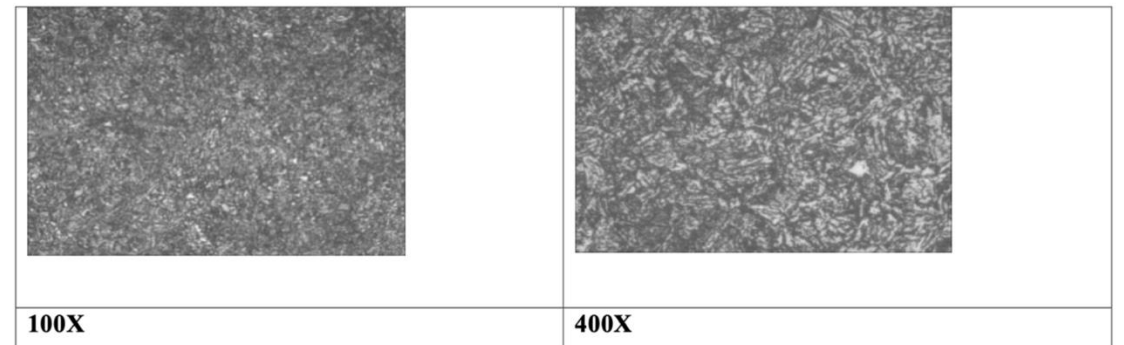
Il trattamento termico di **tempra** da origine alla martensite.

Per ottenere il bilanciamento ottimale tra resistenza meccanica e tenacità nei tubi, è fondamentale il successivo processo di **rinvenimento**.

TEMPRA + RINVENIMENTO = BONIFICA



Microstruttura di un provino di AISI 4130 rinvenuto a 472°C



Microstruttura di un provino di AISI 4130 rinvenuto a 518°C

Negli acciai legati, la temperatura di rinvenimento governa la transizione di fase dei carburi stessi; c'è quindi un enorme differenza tra rinvenimento a diverse temperature

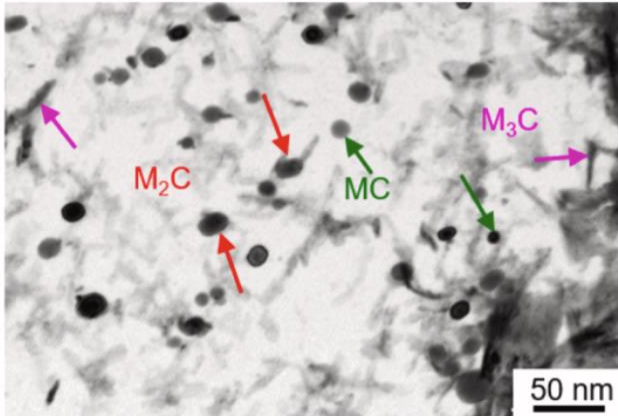


Immagine TEM su replica estrattiva  
dell'acciaio  $30Cr2Ni3Mo3V$  rinvenuto a  $600^{\circ}C$

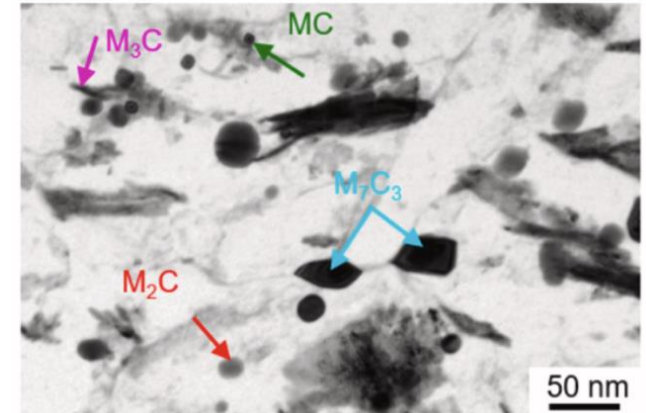
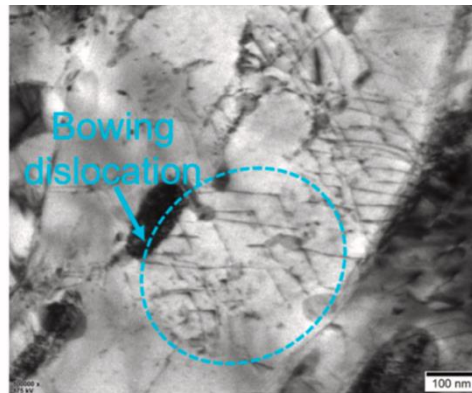


Immagine TEM su replica estrattiva  
dell'acciaio  $30Cr2Ni3Mo3V$  rinvenuto a  $650^{\circ}C$



Ricostruzioni APT  
del provino di  
acciaio  
 $30Cr2Ni3Mo3V$  a  
seguito della prova  
di trazione

## RAFFORZAMENTO PER INCRUDIMENTO

Un acciaio dolce come l'ST 35 è composto da una struttura a base di ferrite e perlite. All'aumentare del numero di passaggi di trafilatura, i grani metallici si deformano e si allungano progressivamente nella direzione della trafilatura; **l'accumulo di dislocazioni** e le **tensioni interne** generate dal lavoro meccanico a freddo induriscono fortemente la matrice metallica.

| Sample no. | Sample condition                  | Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> ) | Hardness (BHN) | % elongatin | % reductin | Yield strength (N/mm <sup>2</sup> ) |
|------------|-----------------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------|------------|-------------------------------------|
| 1          | Hollow tube                       | 415.26                                | 70-72          | 22.80       | 59.23      | 208.74                              |
| 2          | First pass before heat treatment  | 660.53                                | 86-87          | 8.53        | 32.89      | 444.66                              |
| 3          | First pass after heat treatment   | 376.46                                | 60-61          | 42.93       | 59.13      | 300.46                              |
| 4          | Second pass before heat treatment | 555.66                                | 83-84          | 10.94       | 39.78      | 547.20                              |
| 5          | Second pass after heat treatment  | 353                                   | 58-59          | 45.94       | 59.62      | 200                                 |
| 6          | Final pass before heat treatment  | 378.21                                | 84-85          | 37.55       | 59.53      | 203.035                             |
| 7          | Final pass after heat treatment   | 514.63                                | 60-62          | 13.02       | 50.32      | 504.86                              |



Provino 1



Provino 2



Provino 4

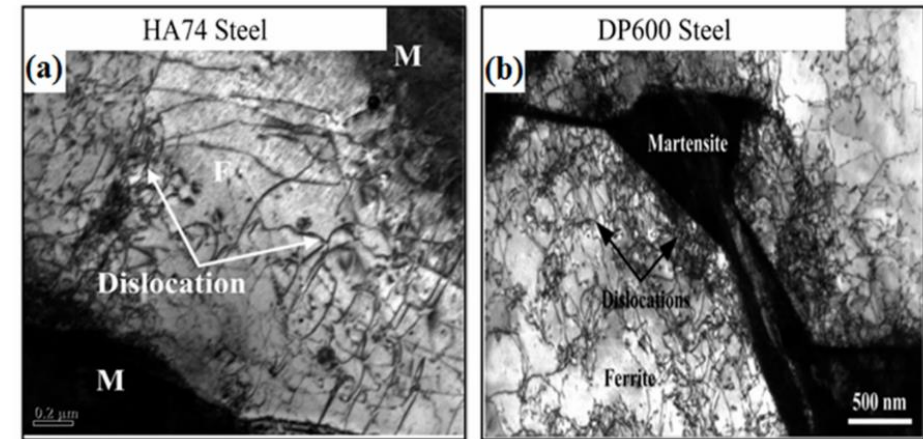


Provino 6

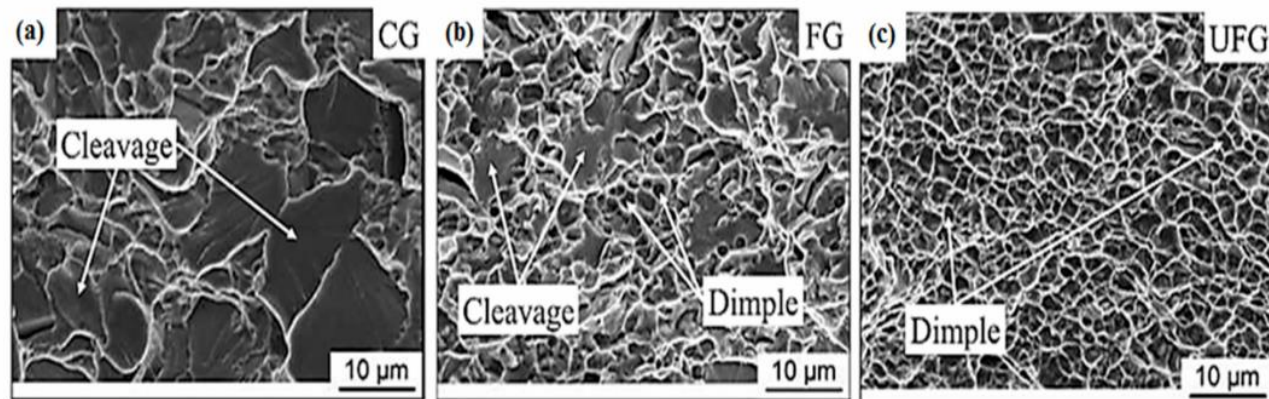
## RAFFORZAMENTO PER AFFINAMENTO DEL GRANO CRISTALLINO

Microstruttura degli acciai DP:

- **Matrice di ferrite:** dolce e duttile, funge da base deformabile.
- **Isole di martensite:** dure e disperse, agiscono da rinforzo.



Immagini EM di acciai DP

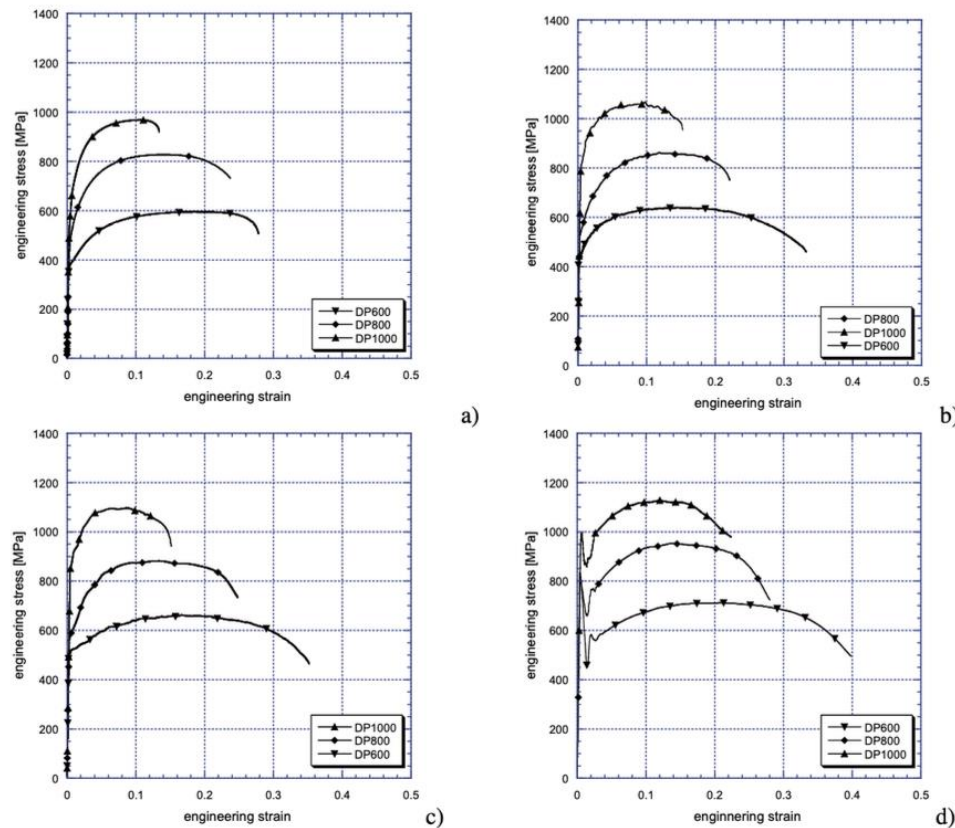


Analisi frattografica tramite SEM a seguito della prova di trazione per acciai DP con differenti dimensioni del grano ferritico.

Effetti dell'affinamento del grano:

- Conversione dei meccanismi di rottura da fragili (*cleavage*) a duttili (*dimples*).
- Abbassamento della temperatura di transizione duttile-fragile.

## INFLUENZA DELLA VELOCITA' DI DEFORMAZIONE SULLE PRESTAZIONI MECCANICHE



Curve di sforzo-deformazione ingegneristiche a  $10^{-3}$ , 2.5, 25 e  $500 \text{ s}^{-1}$ ; rispettivamente nelle figure a), b), c) e d)

Acciai DP nei *roll cage*:

- Impatto frontale: Deformazione plastica per assorbire energia.
- Impatto laterale: Alta rigidità per impedire intrusioni.

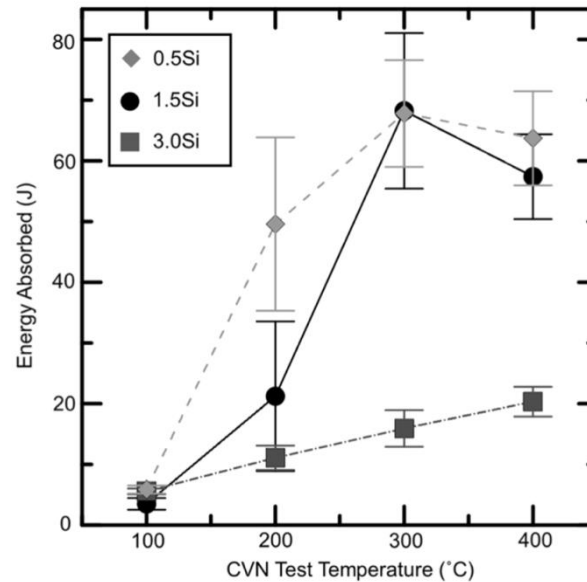
Il vantaggio: L'aumento di resistenza ad alte velocità permette di ridurre gli spessori delle lamiere mantenendo la sicurezza.

$$FATT = A - \frac{B}{\sqrt{D}}$$

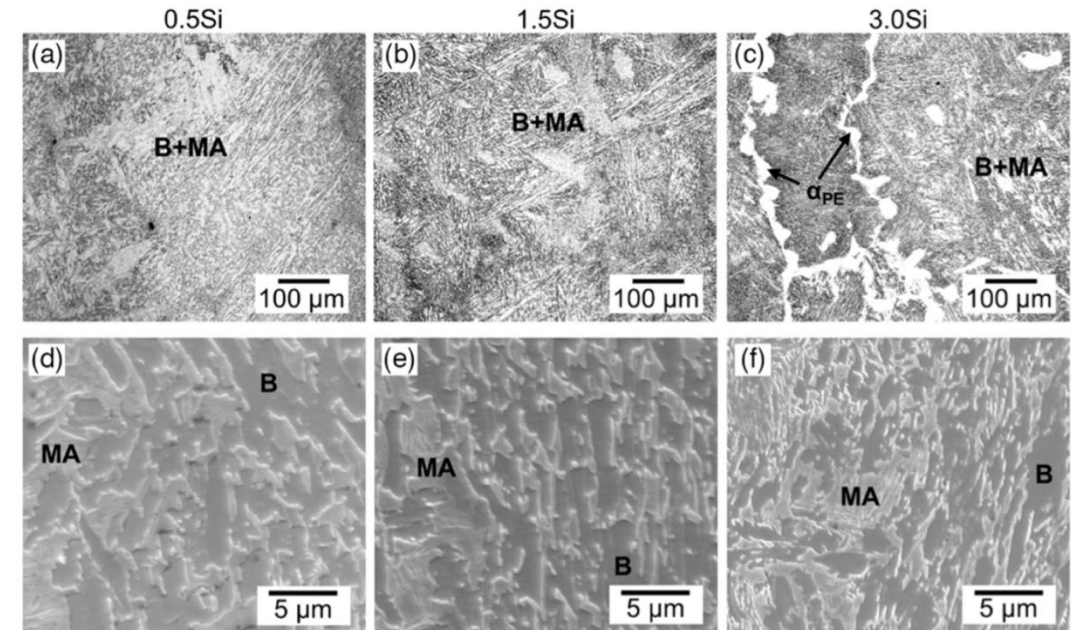


Affinando l'acciaio, l'aumento vertiginoso della densità dei bordi di grano crea una miriade di barriere che arrestano l'avanzamento delle microcricche fragili, forzando l'acciaio a **cedere in modo duttile**.

Negli acciai AHSS,  
un'elevata  
concentrazione di silicio,  
provoca l'innalzamento  
della temperatura di  
transizione DBTT



Misure dell'energia assorbita CVN per gli acciai allo 0.5Si, 1.5Si e 3.0Si



Immagini delle microstrutture degli acciai allo 0.5Si (a,d), 1.5Si (b,e) e 3.0Si (c,f)

## SALDATURA AL LASER

Effetti della saldatura:

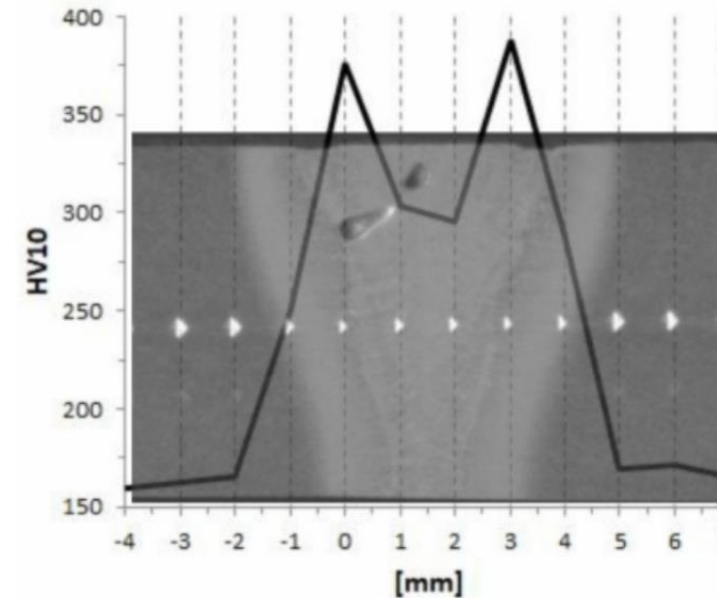
- Trasformazione microstrutturale del materiale.
- Formazione di un picco di durezza localizzato.

Esempio:

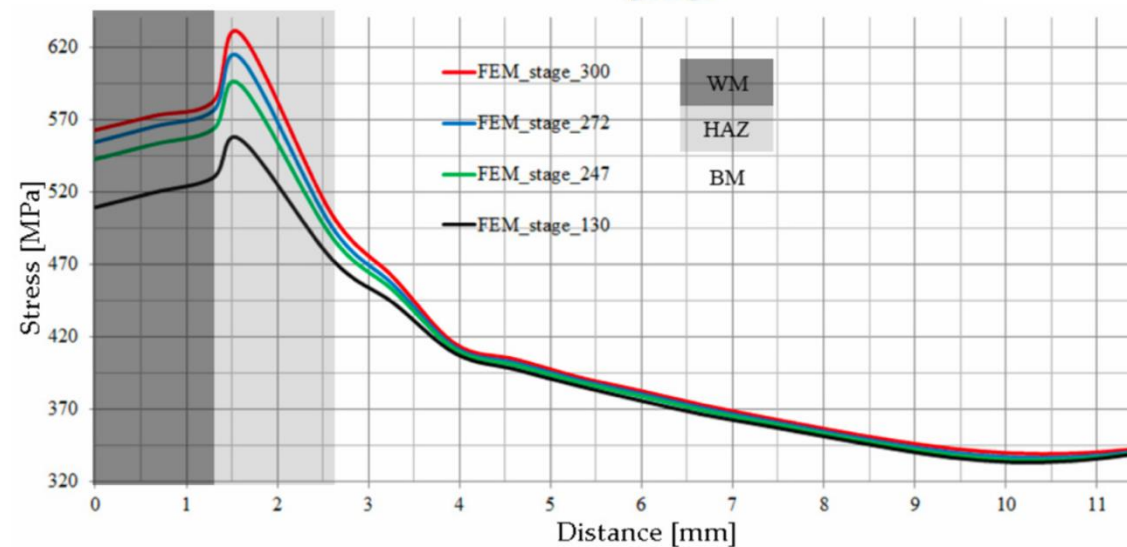
- Materiale base: 155 HV10
- Linea di fusione: ~380 HV10

Comportamento a trazione del giunto saldato:

- Tensioni elevate nella HAZ
- Assenza di plasticizzazione
- Cedimento nel materiale base



Distribuzione della durezza sovrapposta alla sezione della saldatura per giunto realizzato in acciaio 13CrMo4-5: Laser

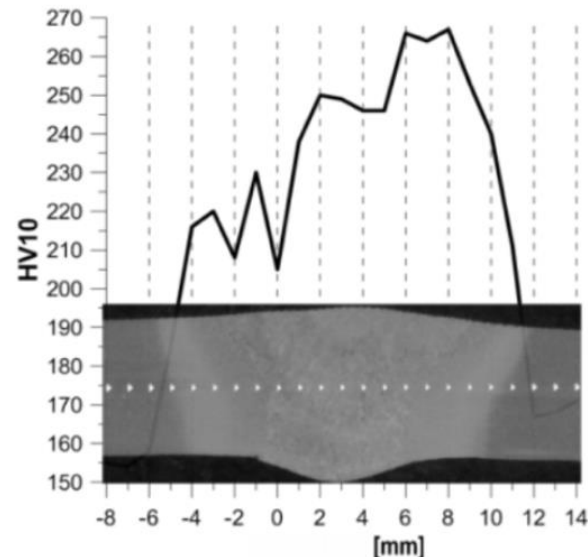


Distribuzione delle tensioni nel giunto saldato

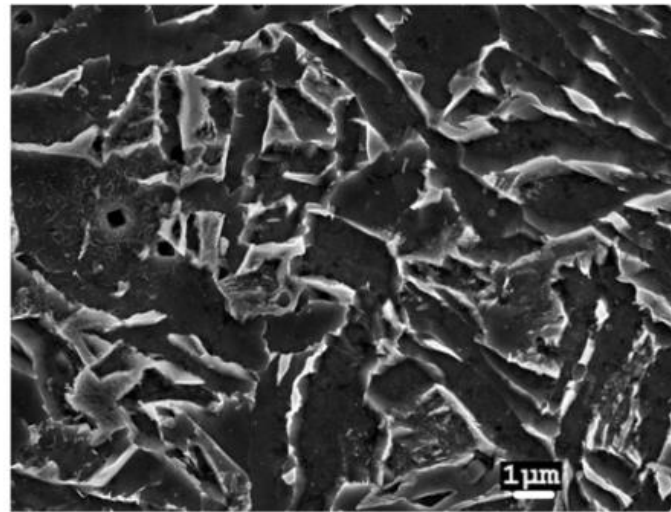
## SALDATURA A TIG

Effetti della saldatura a più passate :

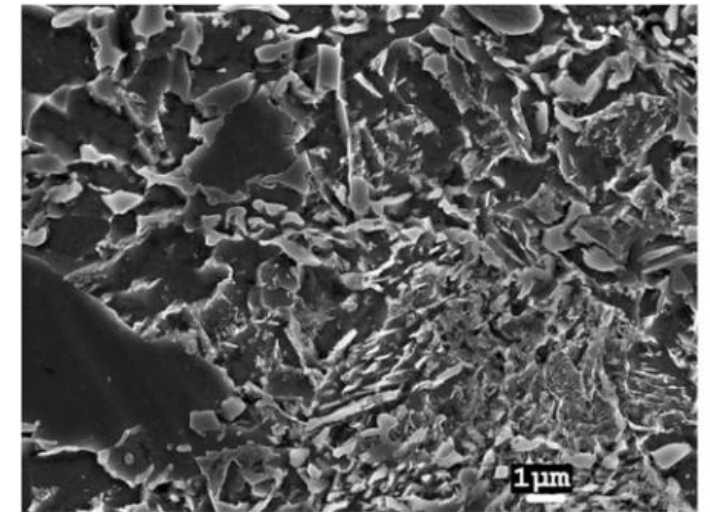
- L'effetto termico è prolungato e il raffreddamento è lento.
- Formazione di una microstruttura di ferrite a grana fine.
- Zona termicamente alterata (HAZ): Sferoidizzazione della perlite e coagulazione delle particelle, generando una struttura mista bainitico-ferritica.



Giunto realizzato in acciaio 13CrMo4-5: TIG



(a)



(b)

Microstruttura di un giunto TIG (acciaio 13CrMo4-5): (a) al centro della zona fusa; (b) nella HAZ

## ePA-CF (poliammide rinforzata con fibra di carbonio)

Vantaggio principale  
rispetto all'uso  
dell'acciaio:  
**riduzione del peso**

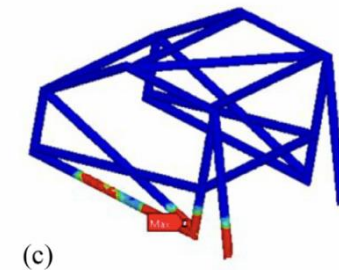
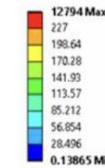


| Weight particulars    | Car with steel roll cage | Car with carbon fiber roll cage |
|-----------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Kerb weight (Kg)      | 1560                     | 1560                            |
| Driver weight (Kg)    | 60                       | 60                              |
| Roll cage weight (Kg) | 130.07                   | 29.99                           |
| Total weight (Kg)     | 1750.07                  | 1649.99                         |

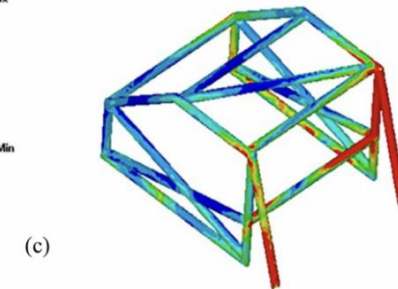
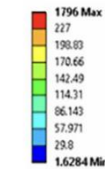


Ma non solo →

| Analysis                 | Results              | Steel roll cage | Carbon fiber roll cage |
|--------------------------|----------------------|-----------------|------------------------|
| Front crash Analysis     | Impact force (N)     | 84231.38        | 79881.57               |
|                          | Maximum stress (Mpa) | 8.7941          | 6.8857                 |
|                          | Factor of Safety     | 28.43           | 627.24                 |
| Side crash Analysis      | Impact force(N)      | 36,495          | 34,408                 |
|                          | Maximum stress (Mpa) | 12,794          | 553.89                 |
|                          | Factor of Safety     | 0.019           | 7.791                  |
| Roll over crash Analysis | Impact force(N)      | 55389.71        | 52222.18               |
|                          | Maximum stress (Mpa) | 1796            | 1292                   |
|                          | Factor of Safety     | 0.13            | 3.34                   |



Impatto laterale



Impatto roll-over

La progettazione dei *roll cage* nel motorsport richiede un delicato compromesso tra abbattimento dei pesi e massima sicurezza:

**Materiali chiave:** Utilizzo di acciai AHSS (come i Dual-Phase) per massimizzare la tenuta riducendo le masse.

**Resistenza dinamica:** Aumento della resistenza ad alti *strain-rate* (deformazioni veloci) senza sacrificare la formabilità.

**Assorbimento dell'energia:** Microstruttura ottimizzata per un perfetto bilanciamento tra alto snervamento ed elevata tenacità.

**Saldature sicure:** Controllo termico per evitare cricche nella HAZ; la deformazione viene forzata nel materiale base adiacente.