# Meccanica della Frattura

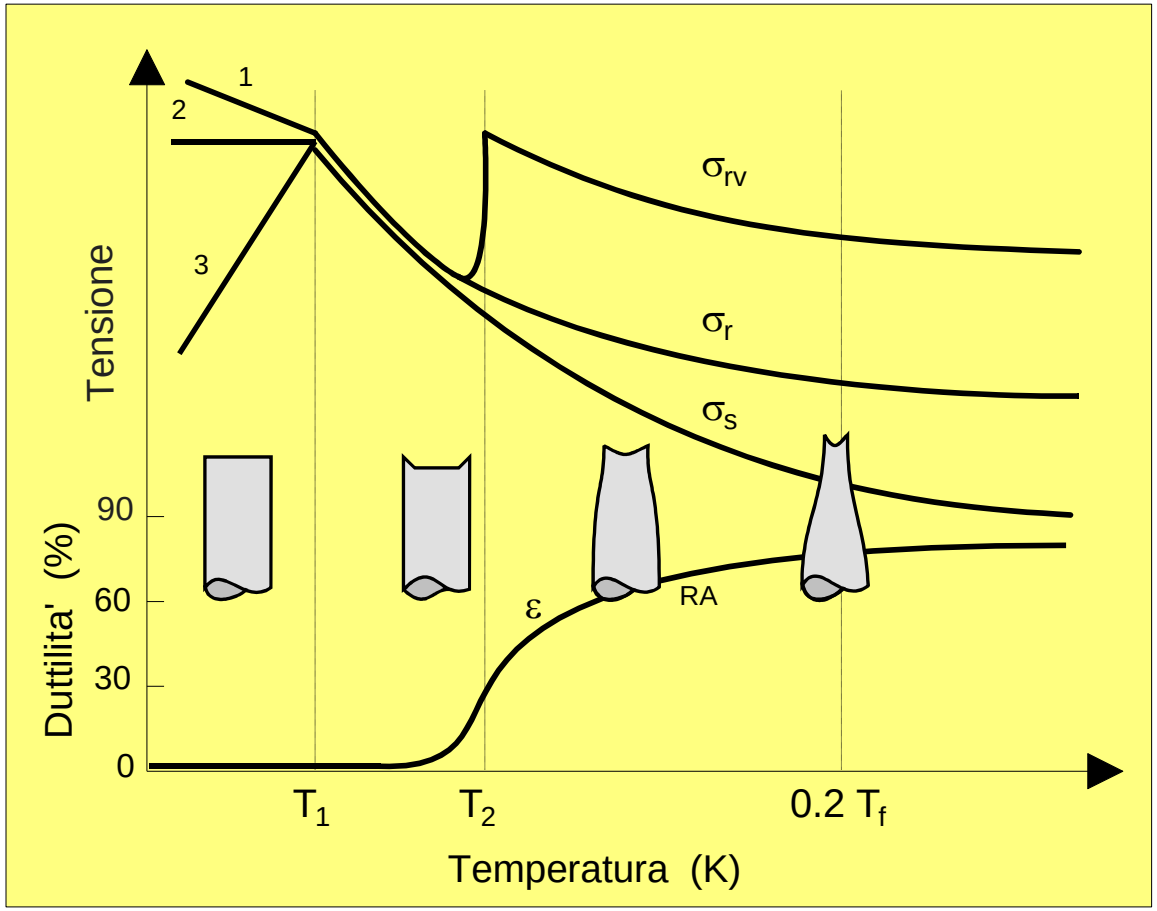
Lecture 10 – Temperatura di transizione duttile-fragile

# Introduzione

- I metalli e le leghe (acciai) mostrano una dipendenza della tensione di snervamento e della rottura dalla temperatura.

- Nei materiali a struttura BCC e HFC, al ridursi della temperatura corrisponde una perdita di duttilità: la rottura passa da **duttile** a **fragile**

- I materiali a struttura FCC, pur esibendo un innalzamento della tensione di snervamento con la riduzione di temperatura, non mostrano un cambio nel modo di rottura: la rottura rimane duttile anche a bassa temperatura (es. Accia austenitici inossidabili)

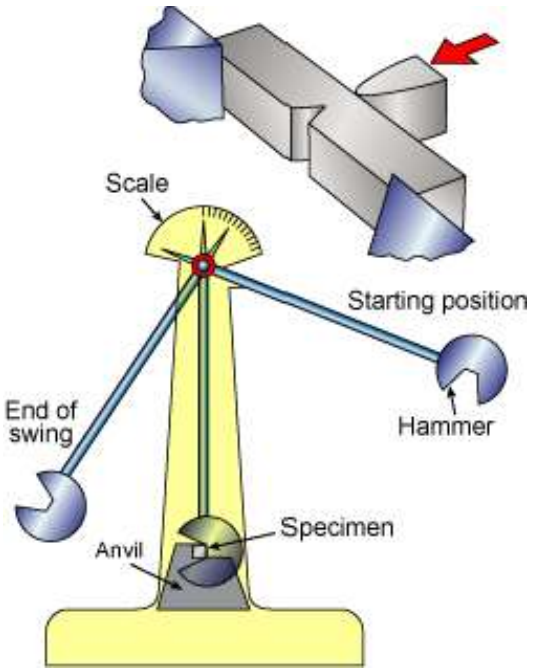


# Charpy impact energy

- I fattori che promuovono la rottura fragile in un materiale sono:
  1. Triassialità dello stato di sforzo
  2. Temperatura (bassa)
  3. Velocità di deformazione

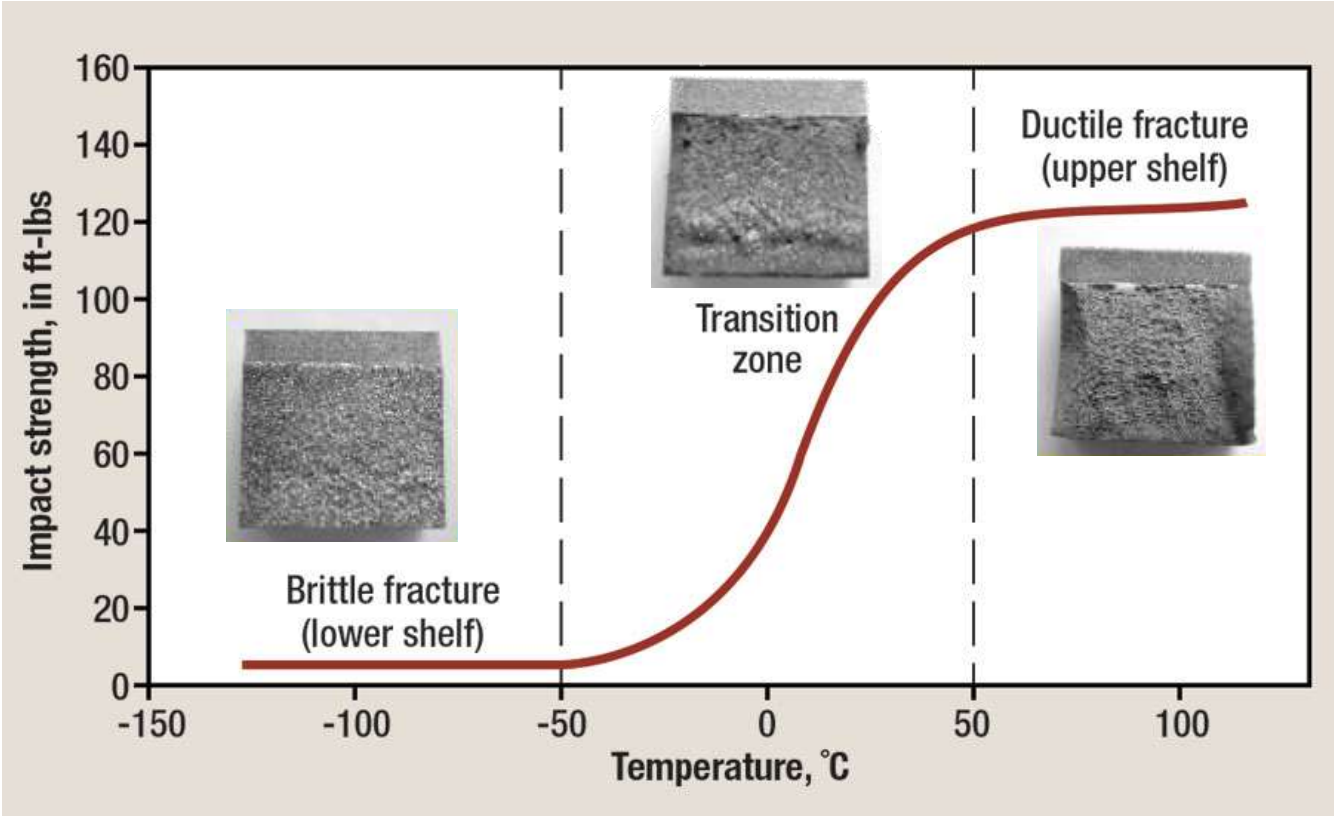
- Prova di impatto per misura della suscettibilità alla frattura fragile: **Charpy V-notch impact test**

- Misura: energia assorbita all'impatto. Non direttamente correlabile ad un livello di sforzo e pertanto poco utile nella progettazione



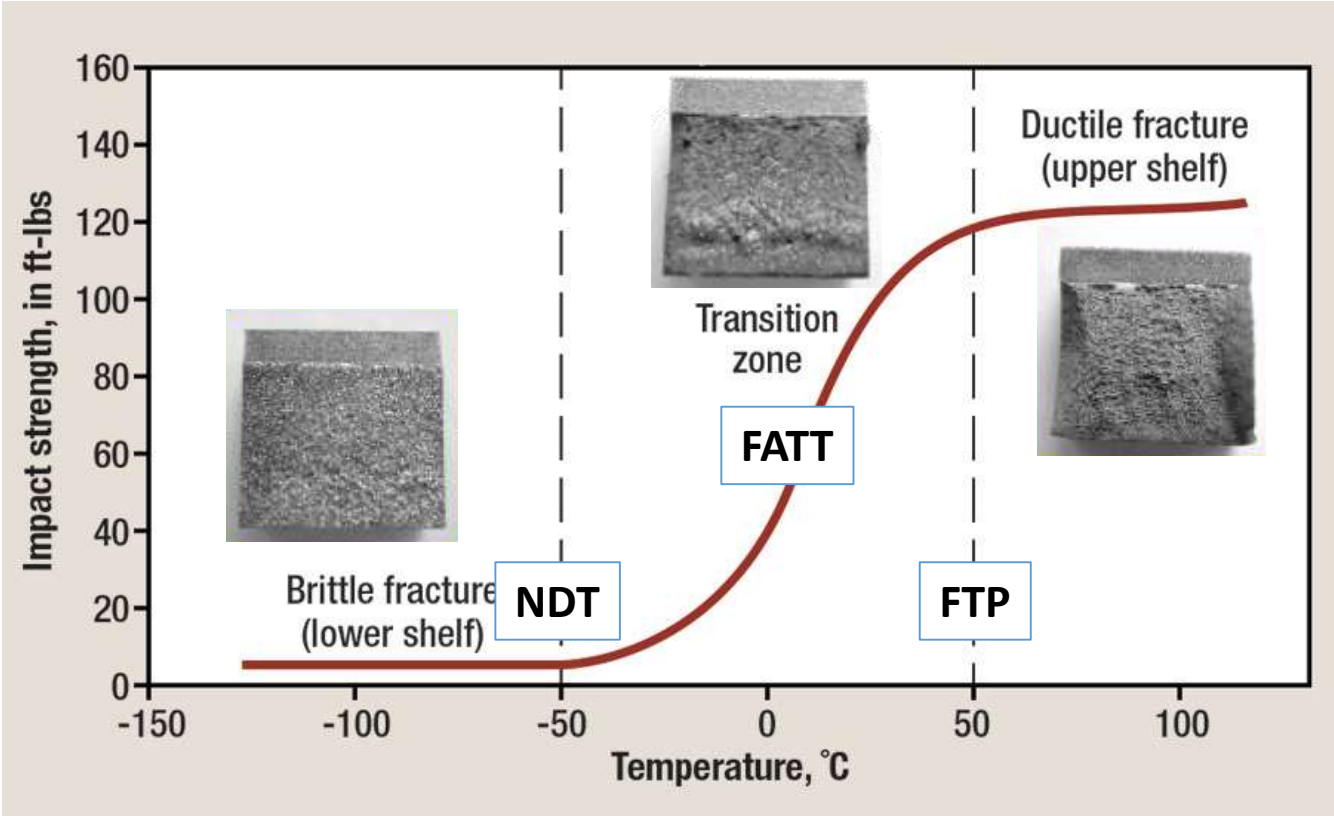
# Charpy impact energy

- L'energia assorbita viene diagrammata in funzione della temperatura.
- Lower shelf. La frattura è completamente fragile (clivaggio) l'energia assorbita è minima
- Upper shelf. La rottura è completamente duttile. L'energia assorbita è massima
- Transizione. Comportamento misto, elevata dispersione dei dati sperimentali



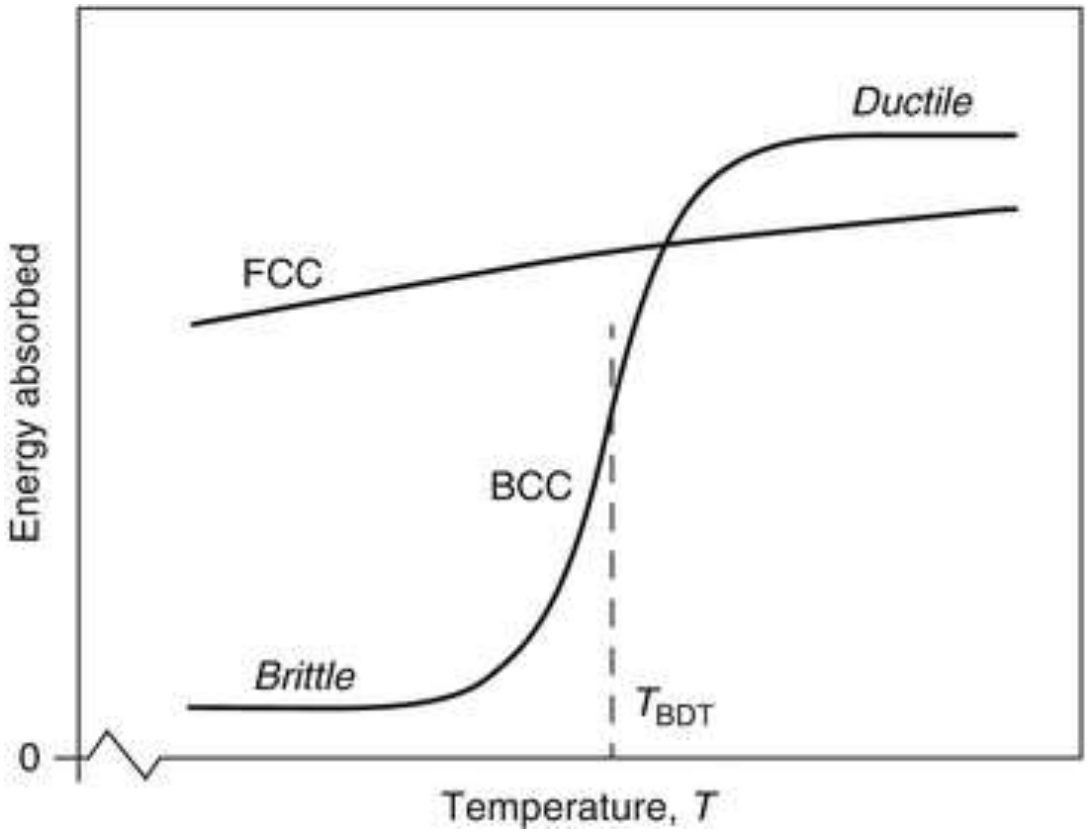
# Charpy impact energy

- L'energia assorbita viene diagrammata in funzione della temperatura.
- **FTP – Fracture Transition Plastic ($T_1$).** Indica la temperatura al di sopra della quale la rottura è 100% fibrosa ( o per taglio) e 0% clivaggio
- **NDT - Nihil Ductility Temperature ($T_5$).** È la temperatura al di sotto della quale la rottura è 100% fragile clivaggio
- **FATT ($T_2$)- Fracture Appearance Transition temperature.** È la temperatura alla quale la superficie è 50% clivaggio e 50% duttile
- **Transition Temperature $T_3$.** Temperatura di transizione al 50% dell'energia di deformazione assorbita



# Charpy impact energy

- Solo i materiali BCC manifestano una transizione duttile-fragile
- Nei materiali FCC, l'energia assorbita diminuisce con la temperatura ma il comportamento rimane duttile

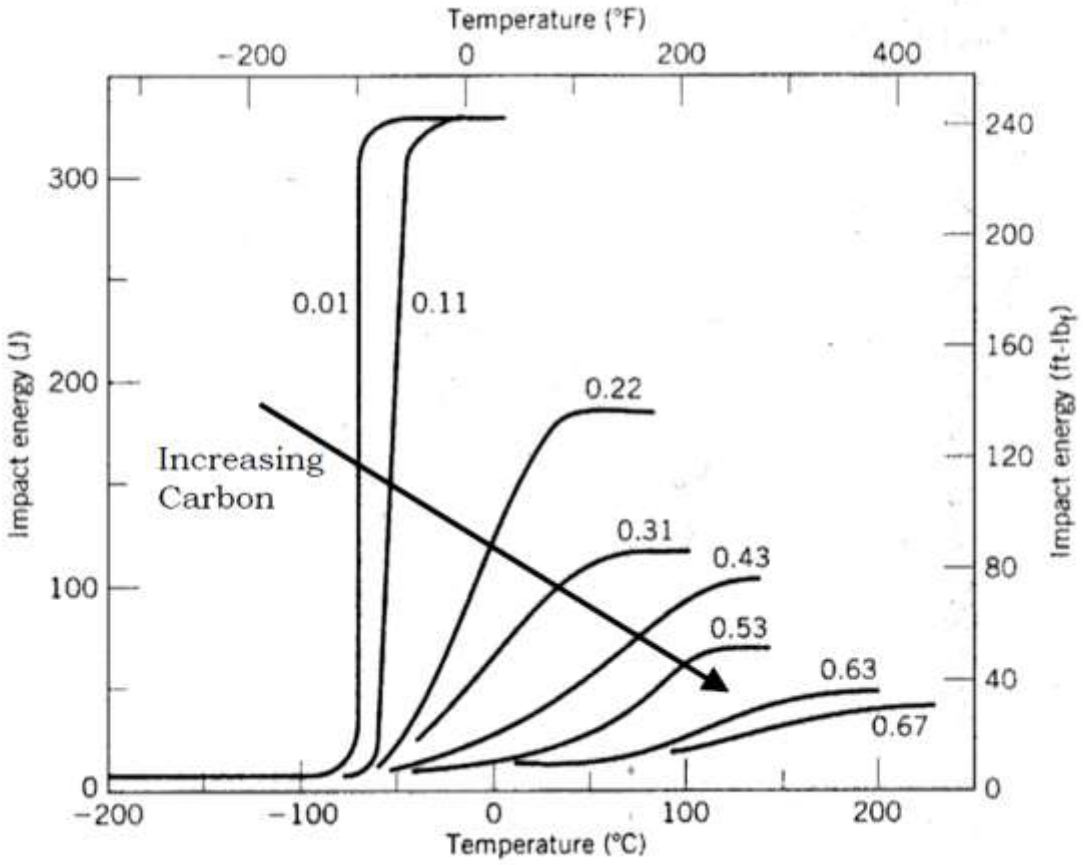


# Charpy impact energy: parametri di influenza

- La curva di resistenza all'impatto (curva Charpy) per una classe di materiali è influenzata da diversi fattori:
  - Atomi interstiziali
  - Dimensione del grano
  - Trattamento termico
  - Direzionalità
  - Spessore del campione

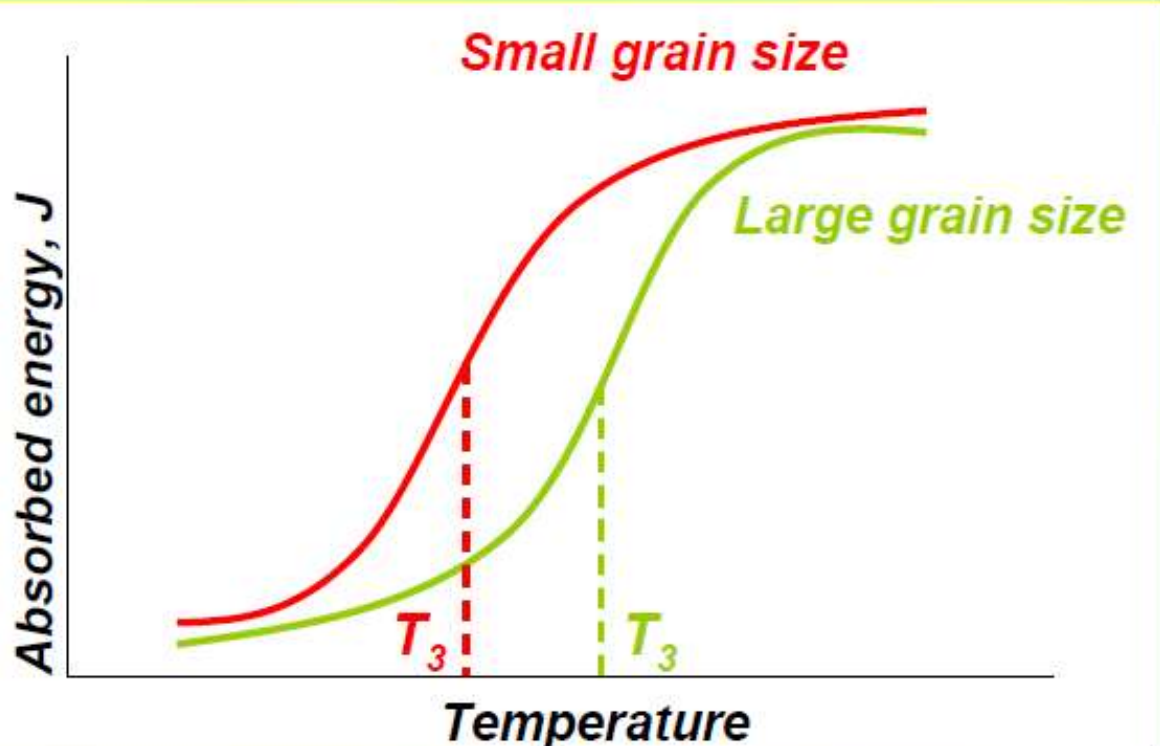
# Charpy impact energy: parametri di influenza

- La curva di resistenza all'impatto (curva Charpy) per una classe di materiali è influenzata da diversi fattori:
  - **Atomi interstiziali.** Il contenuto di carbonio e di manganese modificano la curva DBTT. All'aumentare del tenore di carbonio la curva diventa meno ripida e la temperatura di transizione si innalza: fragile a temperature più elevate anche se lo snervamento si innalza
  - Dimensione del grano
  - Trattamento termico
  - Direzionalità
  - Spessore del campione



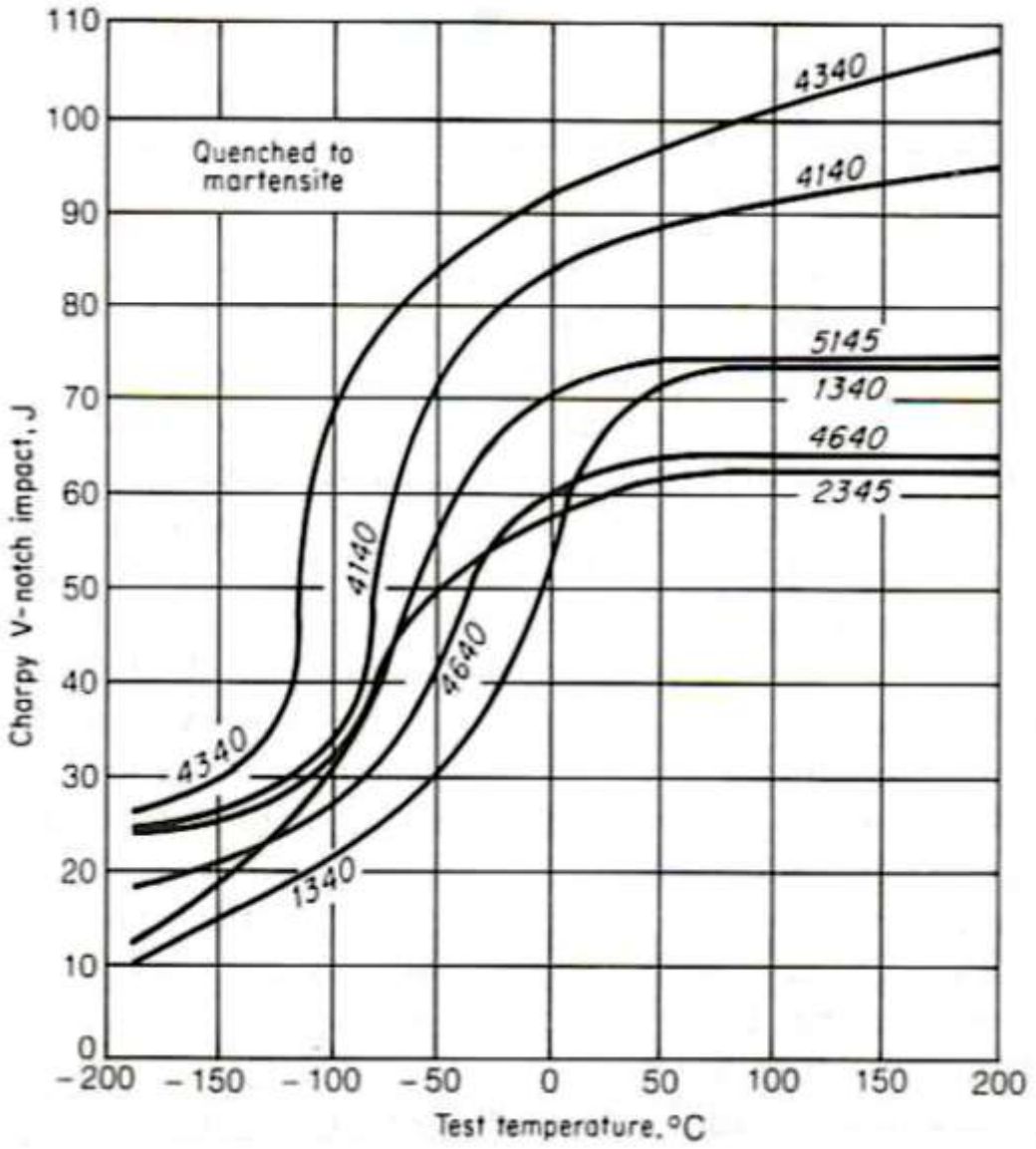
# Charpy impact energy: parametri di influenza

- La curva di resistenza all'impatto (curva Charpy) per una classe di materiali è influenzata da diversi fattori:
  - **Atomi interstiziali.**
  - **Dimensione del grano.** Un aumento della dimensione media del grano sposta la $T_3$ verso sinistra: maggiore campo di duttilità
  - Trattamento termico
  - Direzionalità
  - Spessore del campione



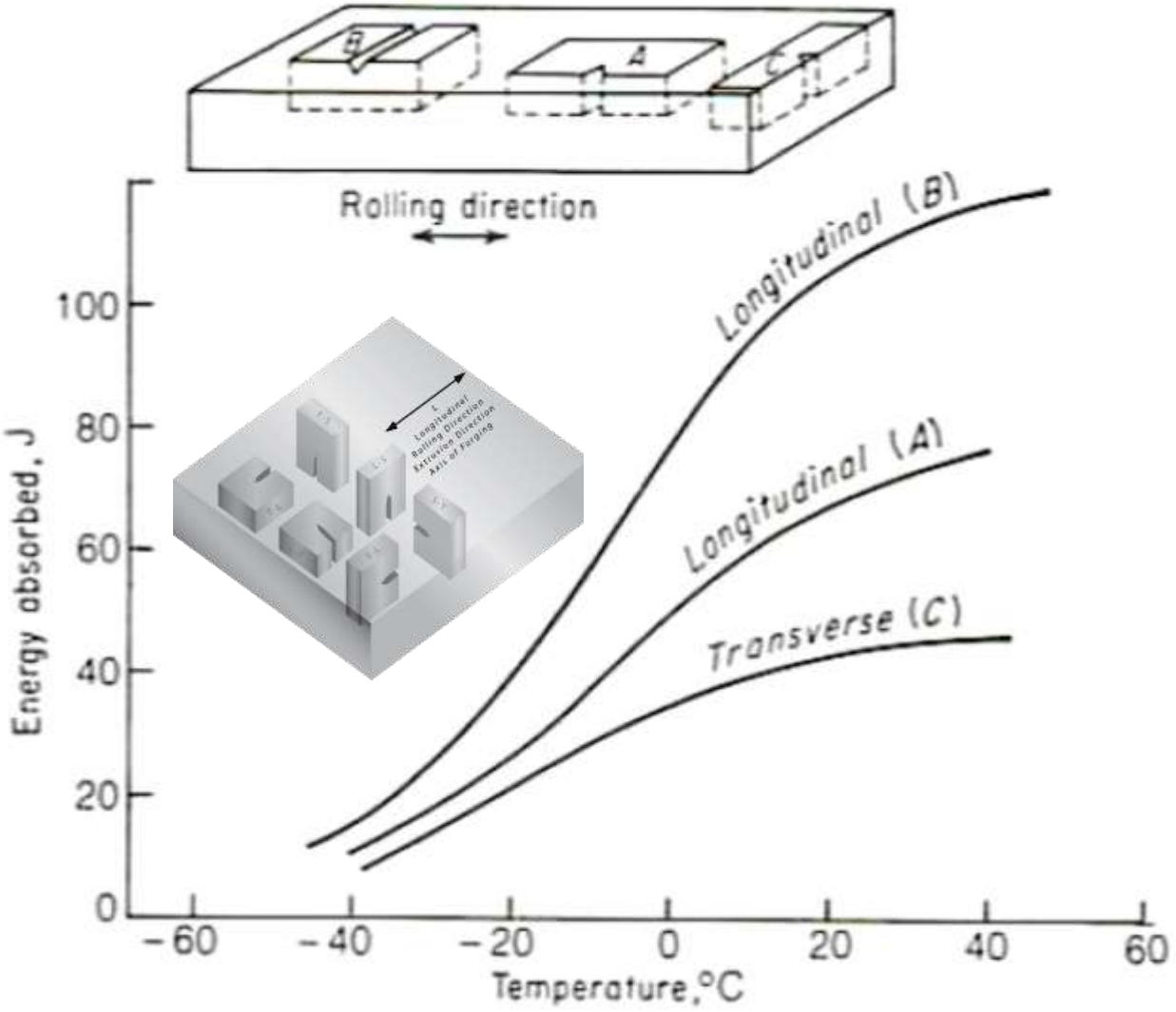
# Charpy impact energy: parametri di influenza

- La curva di resistenza all'impatto (curva Charpy) per una classe di materiali è influenzata da diversi fattori:
  - Atomi interstiziali.
  - Dimensione del grano.
  - **Trattamento termico.** I trattamenti che causano un rifinemento del grano migliorano il comportamento duttile. Processi di rinvenimento a temperature più elevate aumenta l'energia assorbita.
  - Direzionalità
  - Spessore del campione



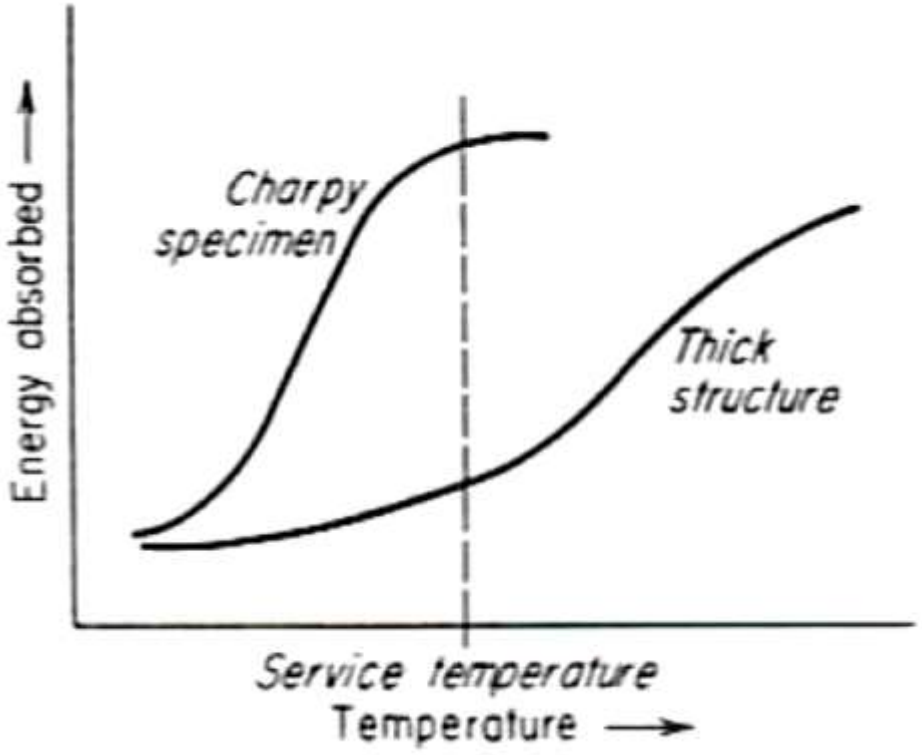
# Charpy impact energy: parametri di influenza

- La curva di resistenza all'impatto (curva Charpy) per una classe di materiali è influenzata da diversi fattori:
  - Atomi interstiziali.
  - Dimensione del grano.
  - Trattamento termico.
  - **Direzionalità.** Prodotti soggetti a processi termomeccanici (rollatura, etc.) mostrano una significativa direzionalità. L'energia assorbita è maggiore nella direzione longitudinale (L-T) in quanto la frattura è normale alle fibre mentre è minore in quella trasversa (T-L)
  - Spessore del campione



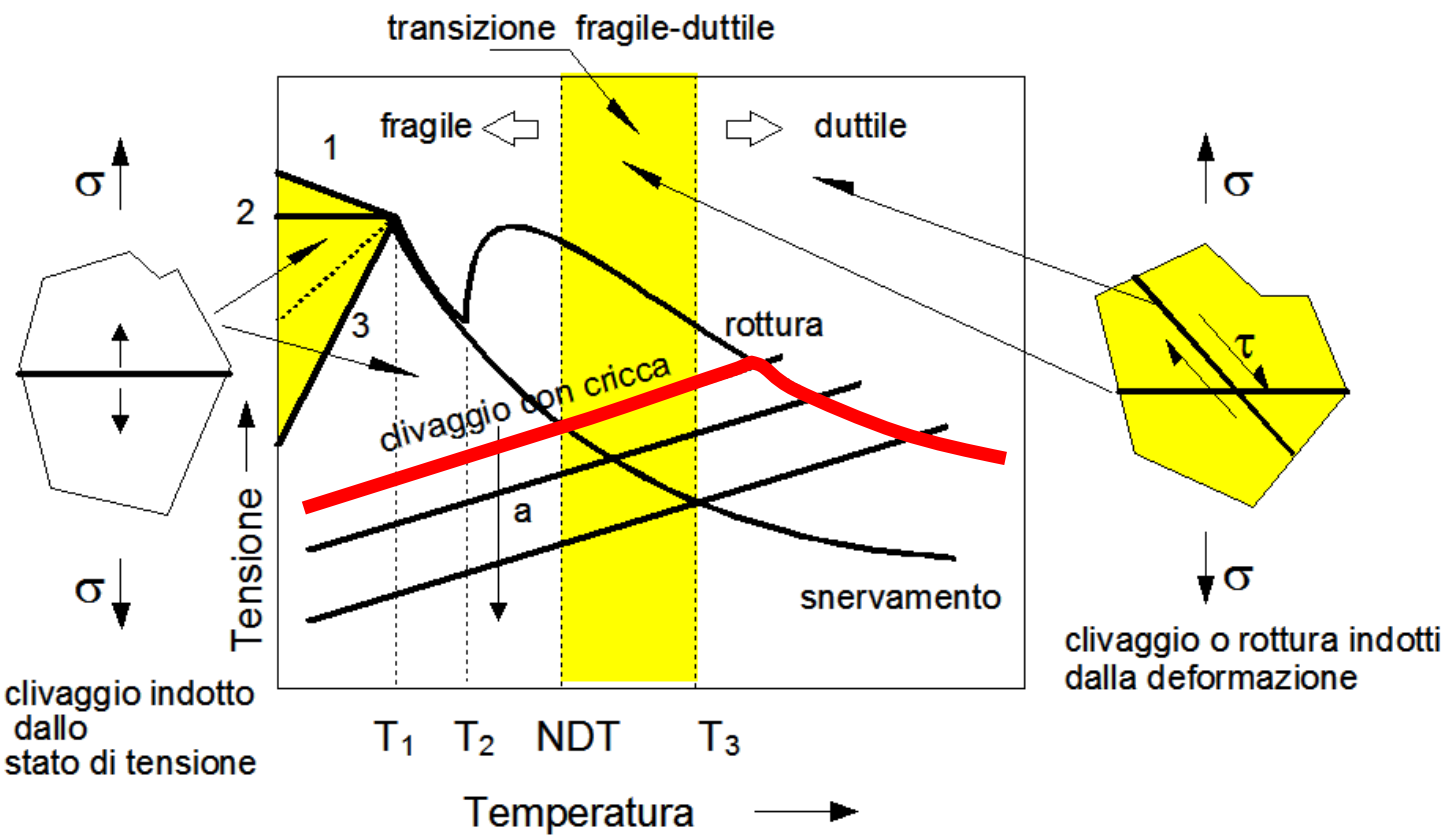
# Charpy impact energy: parametri di influenza

- La curva di resistenza all'impatto (curva Charpy) per una classe di materiali è influenzata da diversi fattori:
  - Atomi interstiziali.
  - Dimensione del grano.
  - Trattamento termico.
  - Direzionalità.
  - **Spessore del campione.** Anche negli Charpy si riscontra un effetto spessore. Maggiore lo spessore, più alta la $T_3$ ( pericolo rottura fragile ad elevate temperature). Problema: trasferibilità dai campioni alle strutture a pieno spessore.



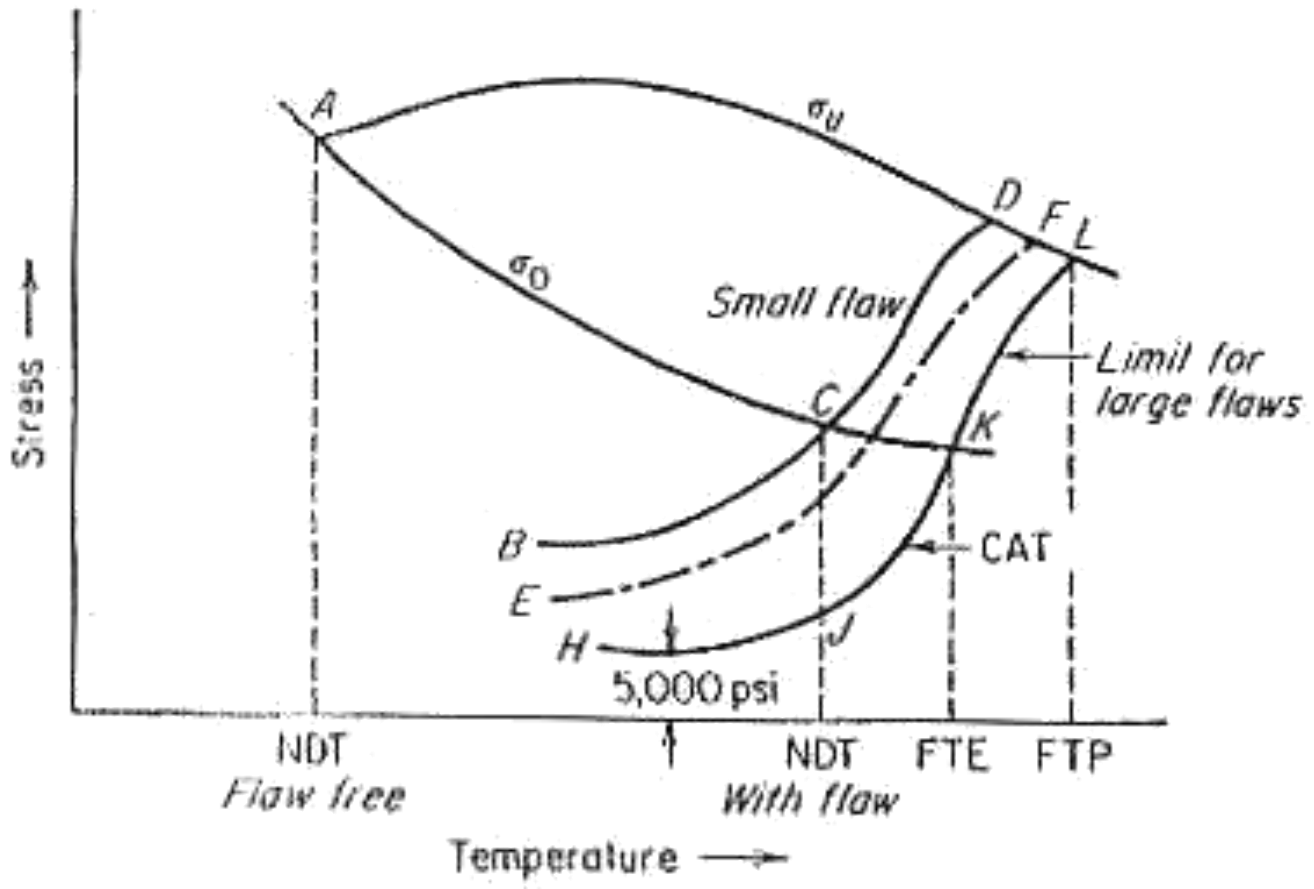
# Transizione nella curva di tenacità a frattura

- La curva di resistenza all'impatto costruita con le prove Charpy soffre del fatto che l'intaglio, per quanto acuto, non è una cricca.
- In presenza di difetti acuti, la temperatura di transizione si innalza: comportamento fragile a temperatura più elevata.
- La presenza di un difetto infragilisce il materiale!



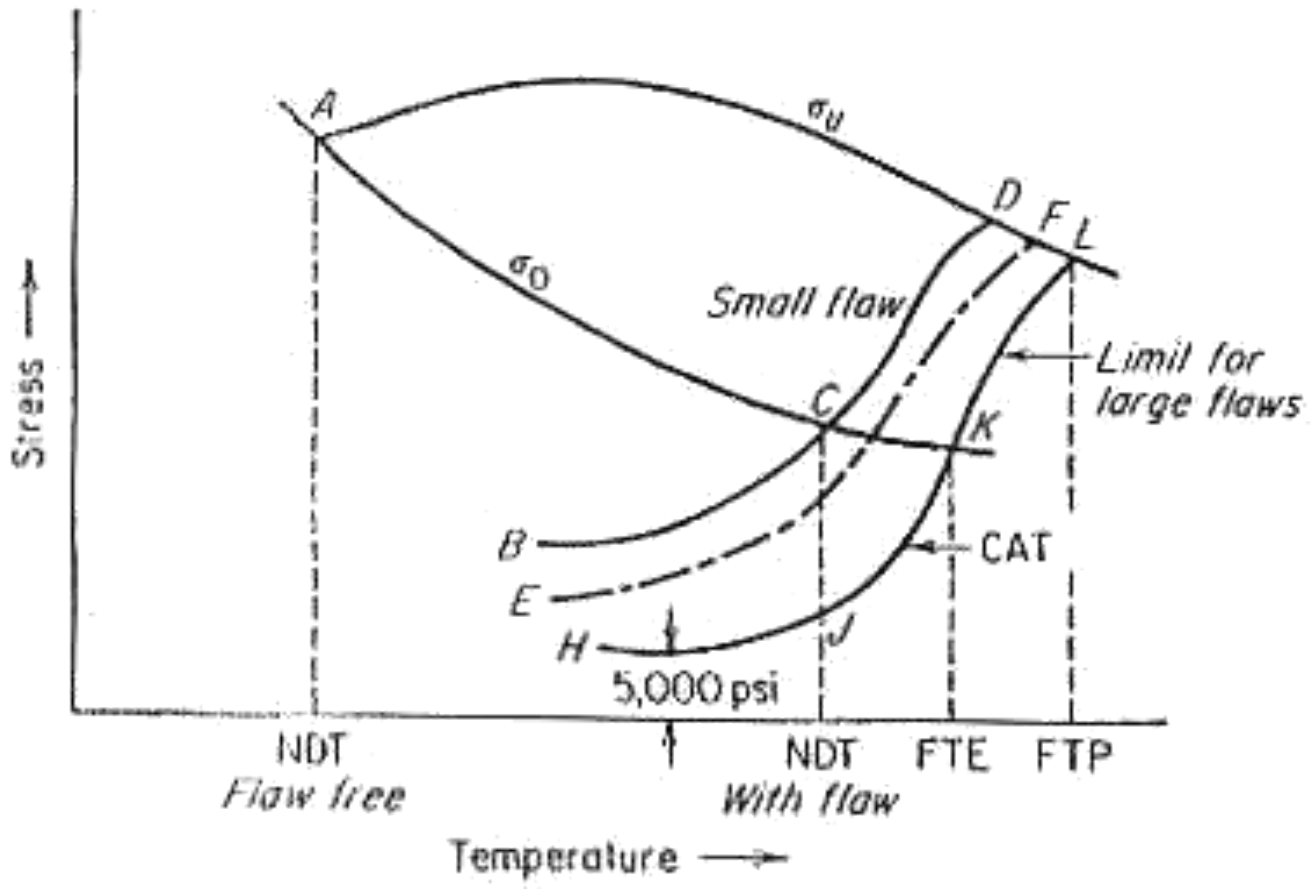
# Transizione nella curva di tenacità a frattura

- 1969 – Pellini e collaboratori osservarono che:
  - L'introduzione di un difetto causa un aumento della NDT di circa 200°F (110°C)
  - L'aumento della dimensione del difetto causa una progressiva riduzione dello sforzo a frattura
  - Sotto la NDT (con difetto), lo sforzo è considerato SAFE se inferiore a 33-55 MPa.



# Transizione nella curva di tenacità a frattura

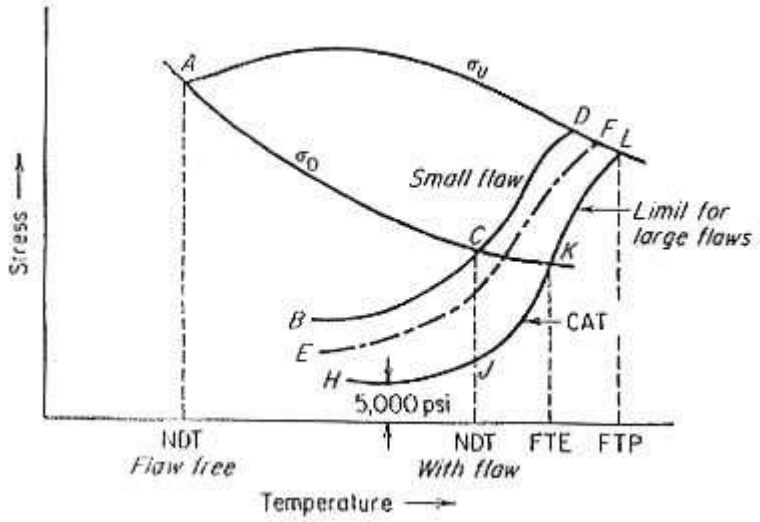
- 1969 – Pellini e collaboratori osservarono che:
  - Al di sopra della NDT lo sforzo necessario per avere una propagazione instabile di difetti di grandi dimensioni aumenta rapidamente con la temperatura (Curva JKL): questa è definita come **CAT – crack arrest temperature curve**
  - La temperatura sopra la quale uno sforzo elastico non può più far propagare il difetto è detto: FTE (fracture transition elastic)

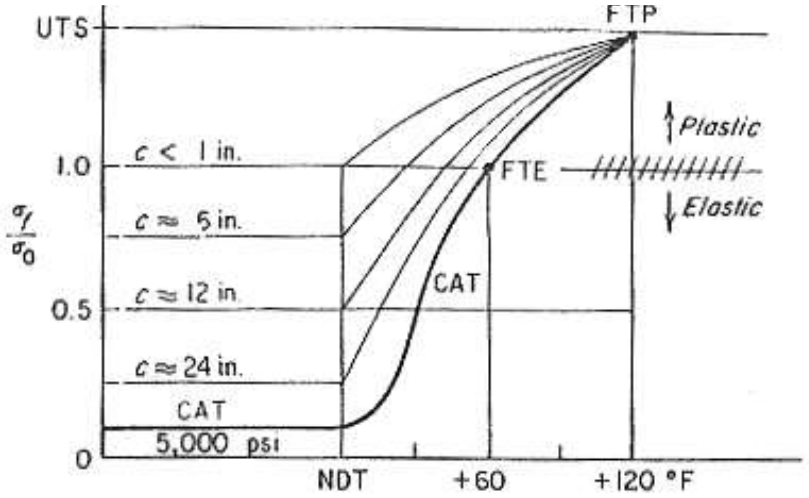


# Transizione nella curva di tenacità a frattura

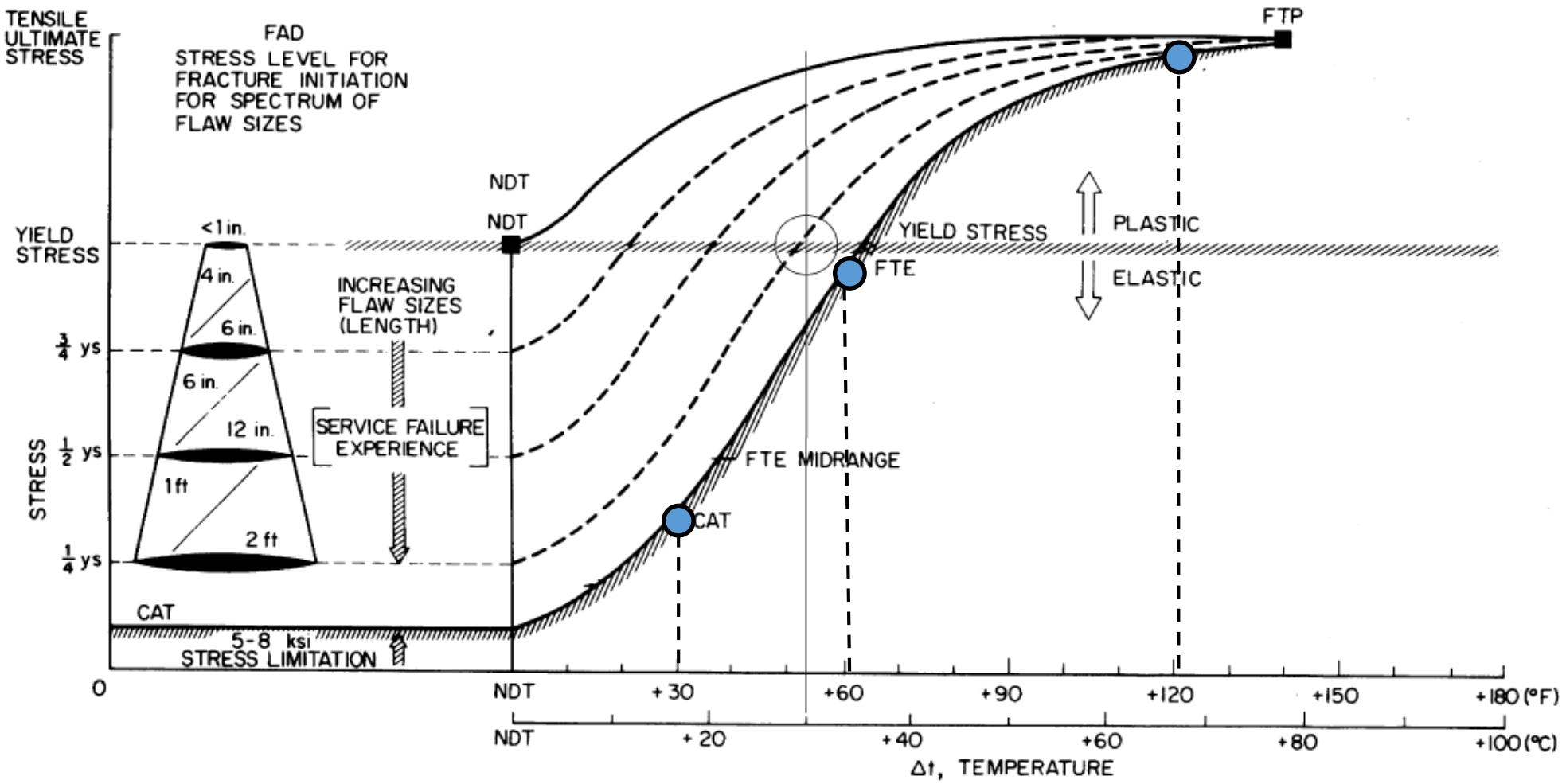
- Nell'approccio Pellini:
  - Uno sforzo superiore a 35-55 Mpa causa rottura fragile indipendentemente dalla dimensione iniziale del difetto
  - **NDT+30°F**: stima conservativa del CAT per uno sforzo pari a $\sigma_0/2$.
  - **NDT+60°F**: stima del CAT per uno sforzo pari a $\sigma_0$ (ovvero **FTE**)
  - NDT+120°F: stima del **FTP**.

- Pertanto, determinata la NDT, è possibile tracciate la curva CAT e procedere al progetto.



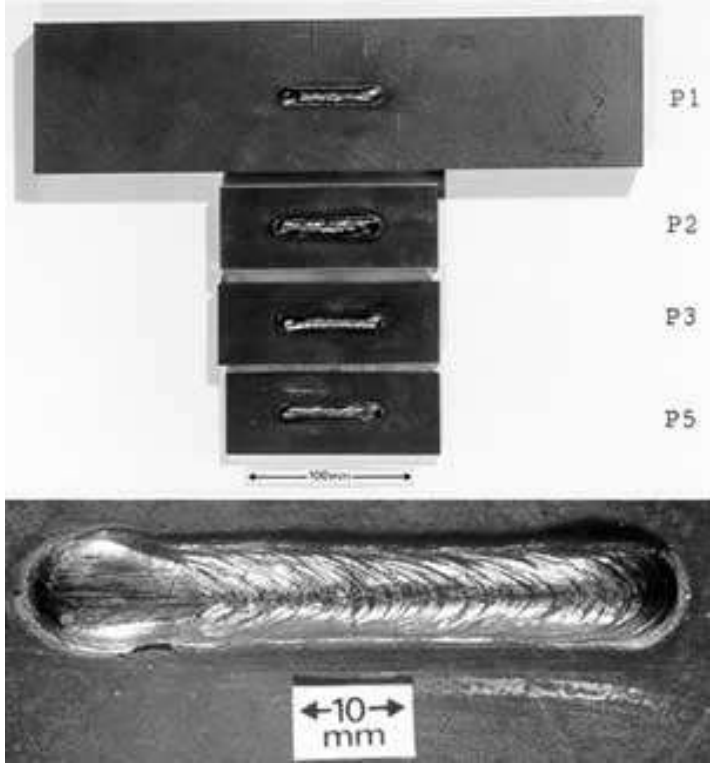



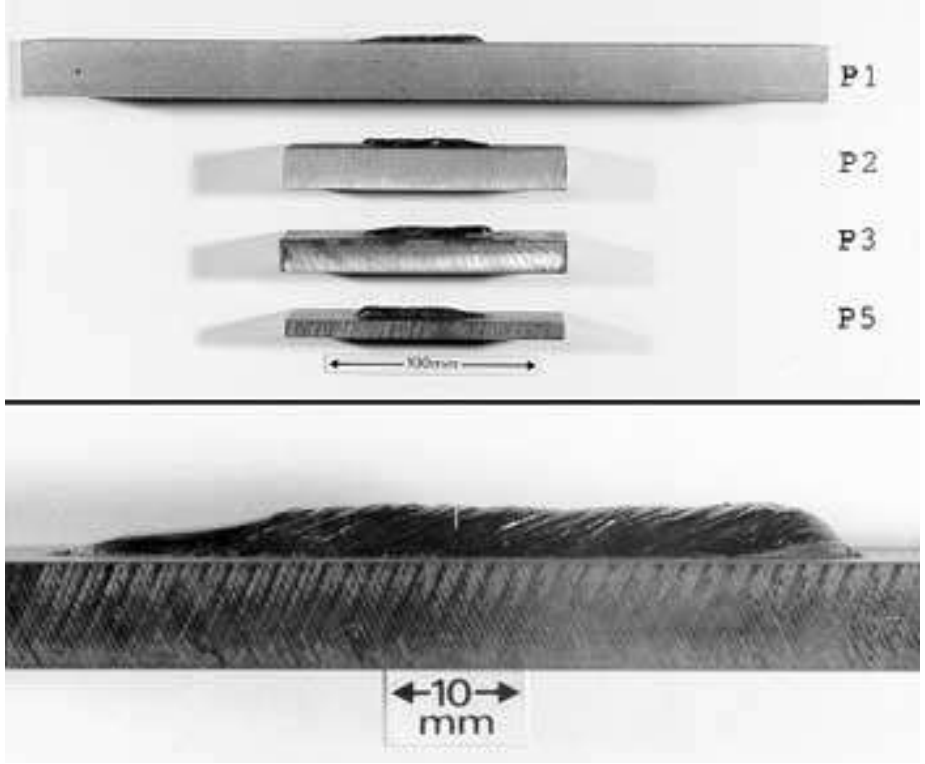
# Transizione nella curva di tenacità a frattura



# Transizione nella curva di tenacità a frattura

- Prova Pellini o  Drop Weight Test (DWT): flessione su tre punti

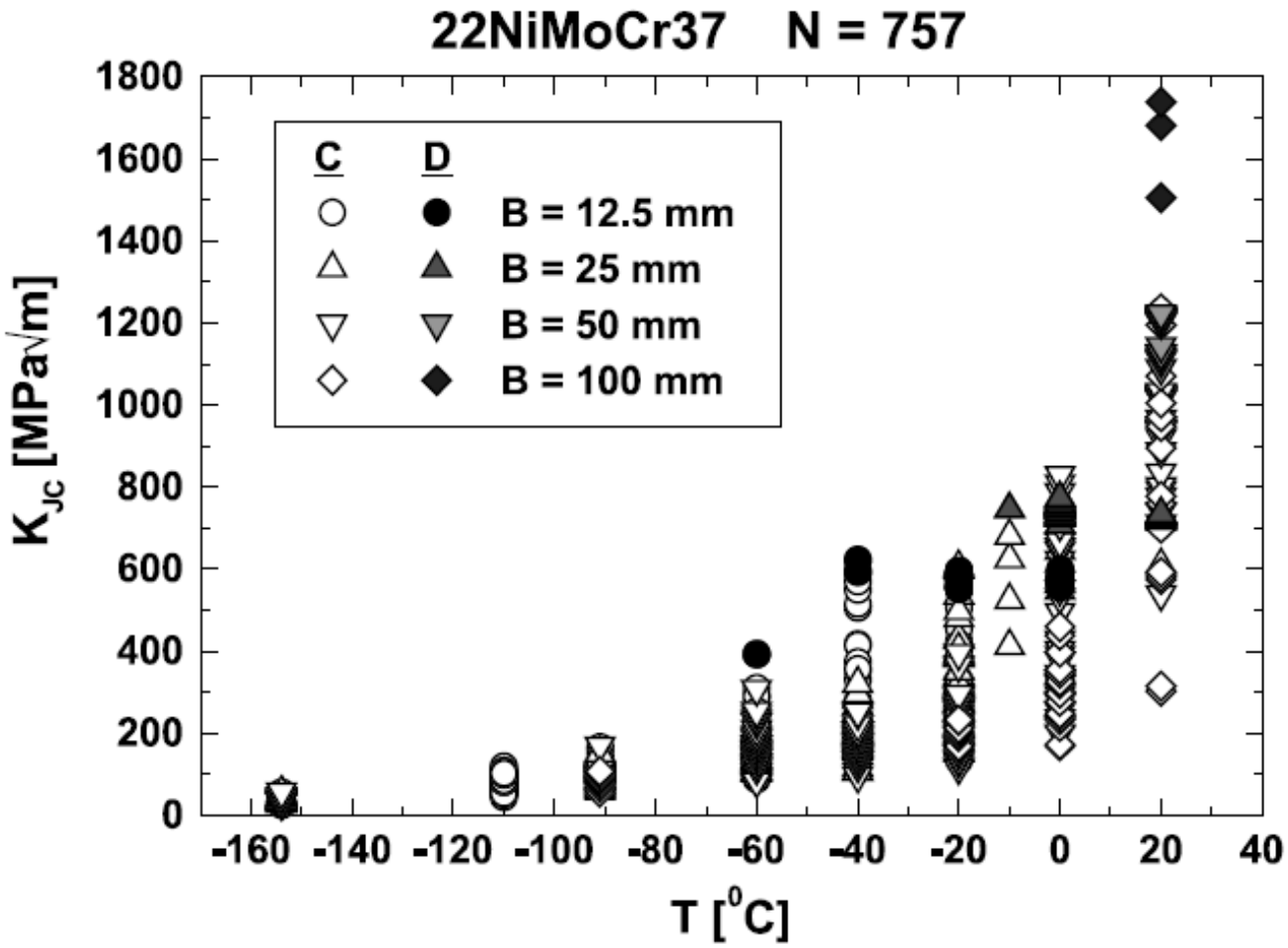



- La NDTT è definita come la temperatura più alta alla quale la frattura si propaga fragilmente lungo tutto uno o entrambi i tratti della saldatura in stato di trazione.

# Curva di transizione: tenacità a frattura.

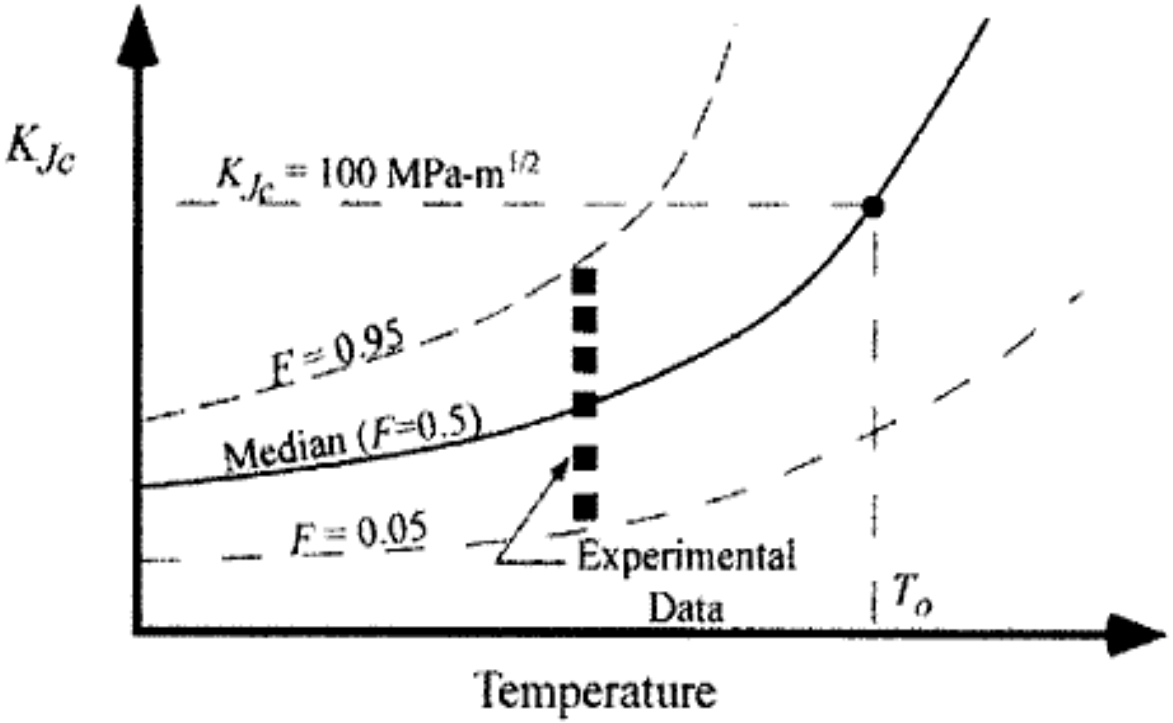
- La zona di transizione si ritrova anche in termini di tenacità a frattura.
- In lower shelf: il materiale mostra il minimo di tenacità
- In upper shelf: la rottura avviene per «ductile tearing»
- In zona di transizione: i valori di tenacità presentano un'elevata dispersione statistica. La frattura fragile può avvenire dopo una crescita sottocritica del difetto



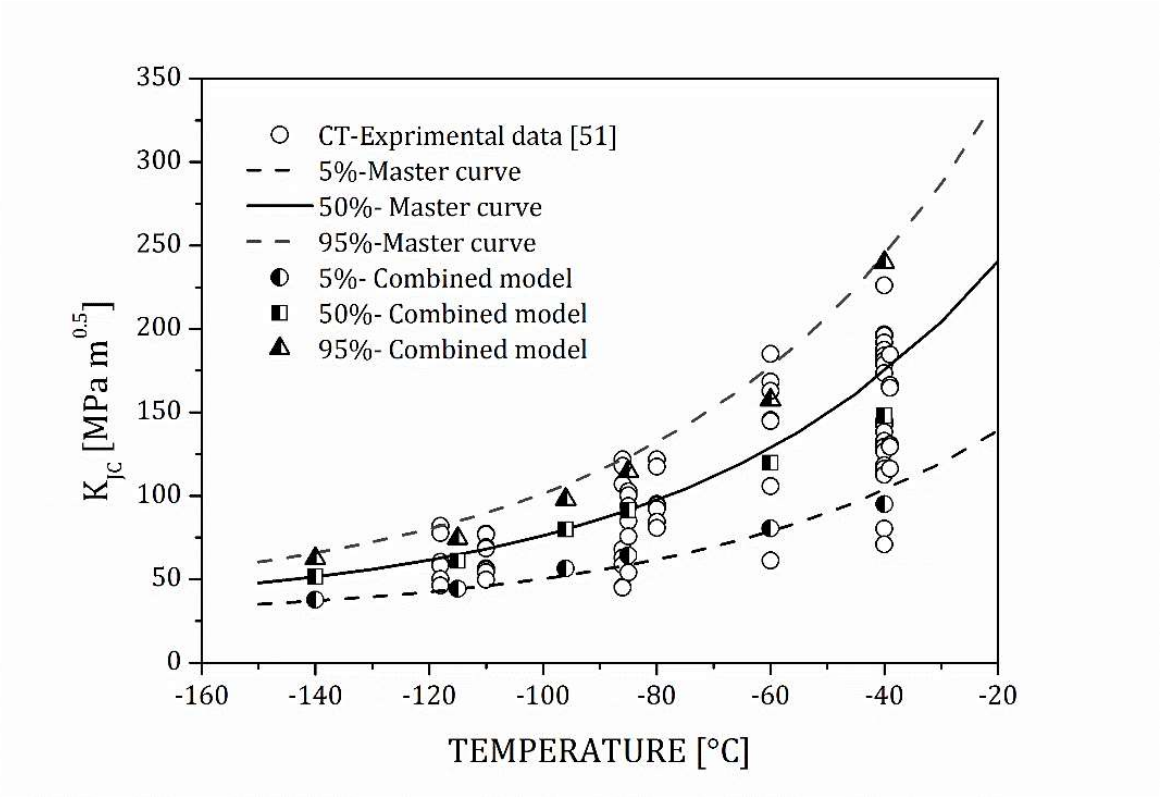
# Curva di transizione: Master curve approach

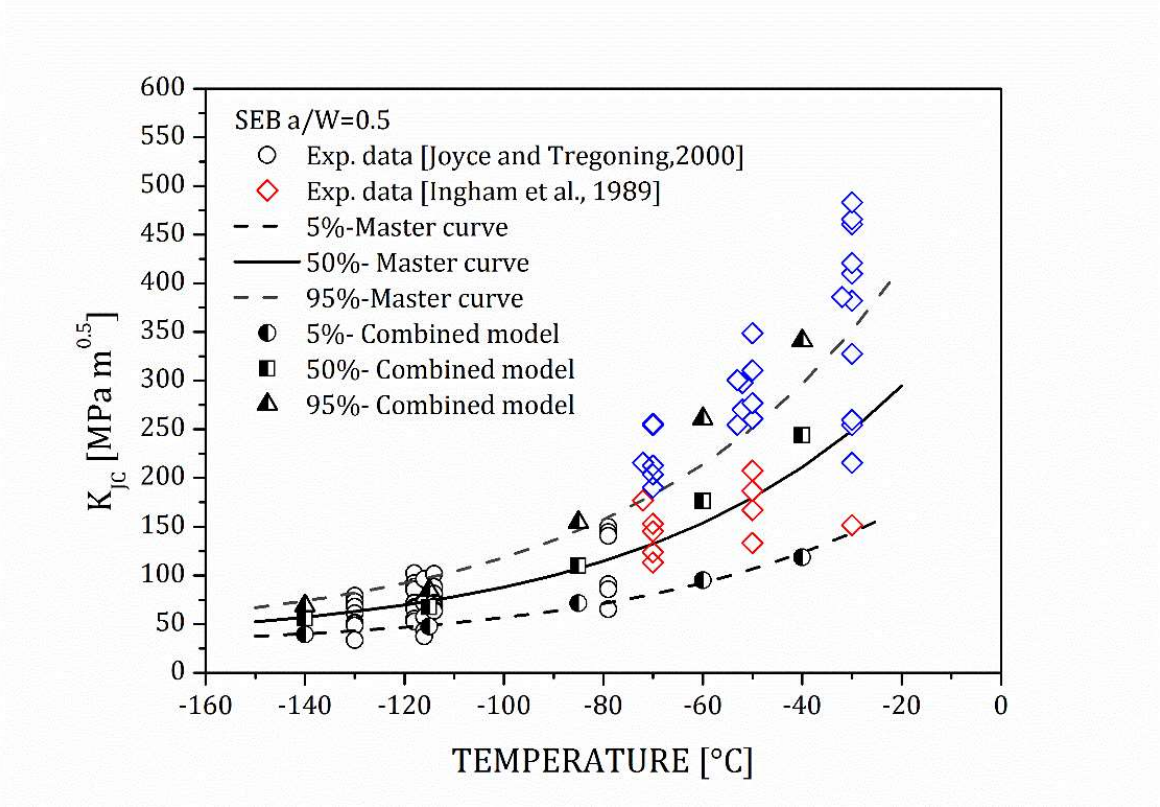
- L'approccio Master curve fornisce una stima conservativa della curva di tenacità in funzione della temperatura.
- Il metodo si basa sul concetto del «reference temperature» invece del «reference stress».
- $T_0$ è la temperatura alla quale il valore mediano di tenacità per un provino di spessore 25mm è: 100 MPa m ½
- Questo valore si ottiene sperimentalmente attraverso prove di tenacità ripetute a bassa temperatura
- La curva di tenacità è quindi data da:

$$K_{Ic} = 30 + 70\exp[0.019(T - T_0)]$$



# Curva di transizione: Master curve approach

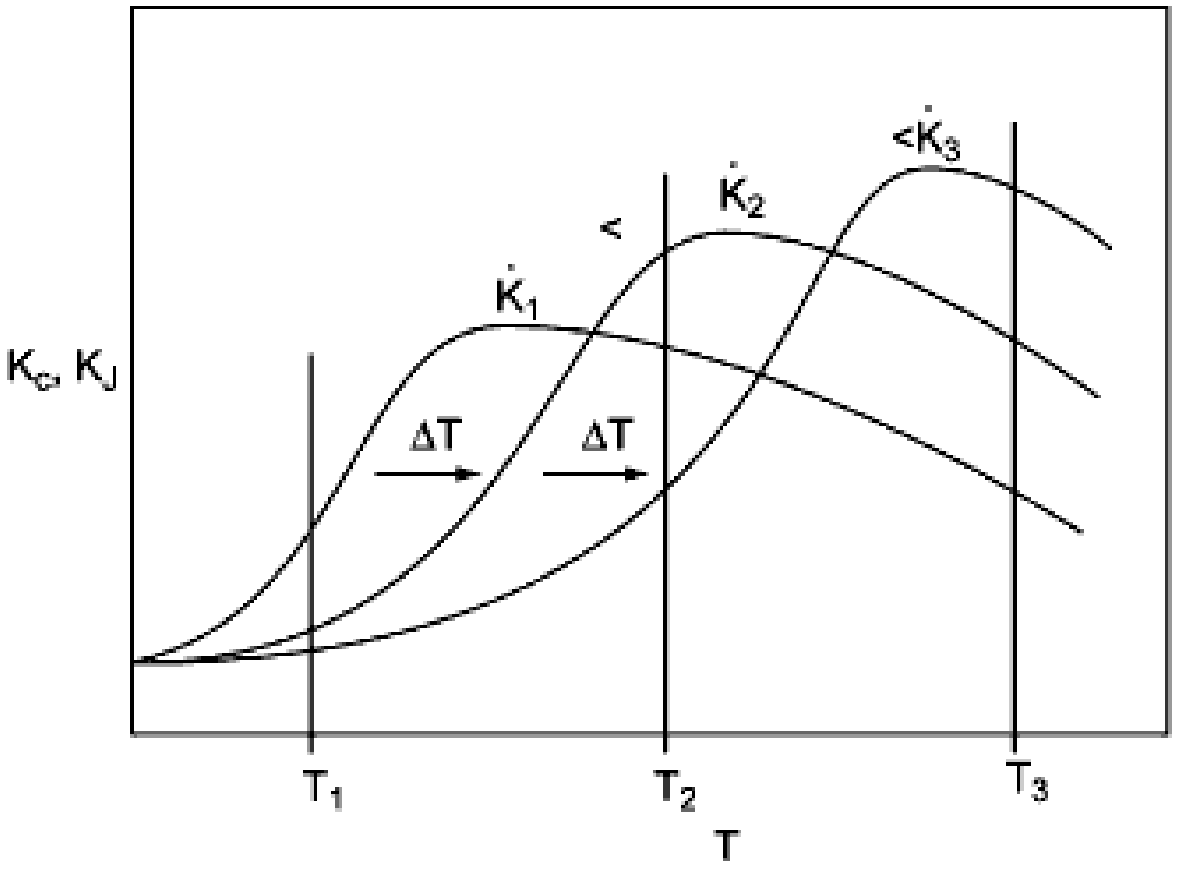


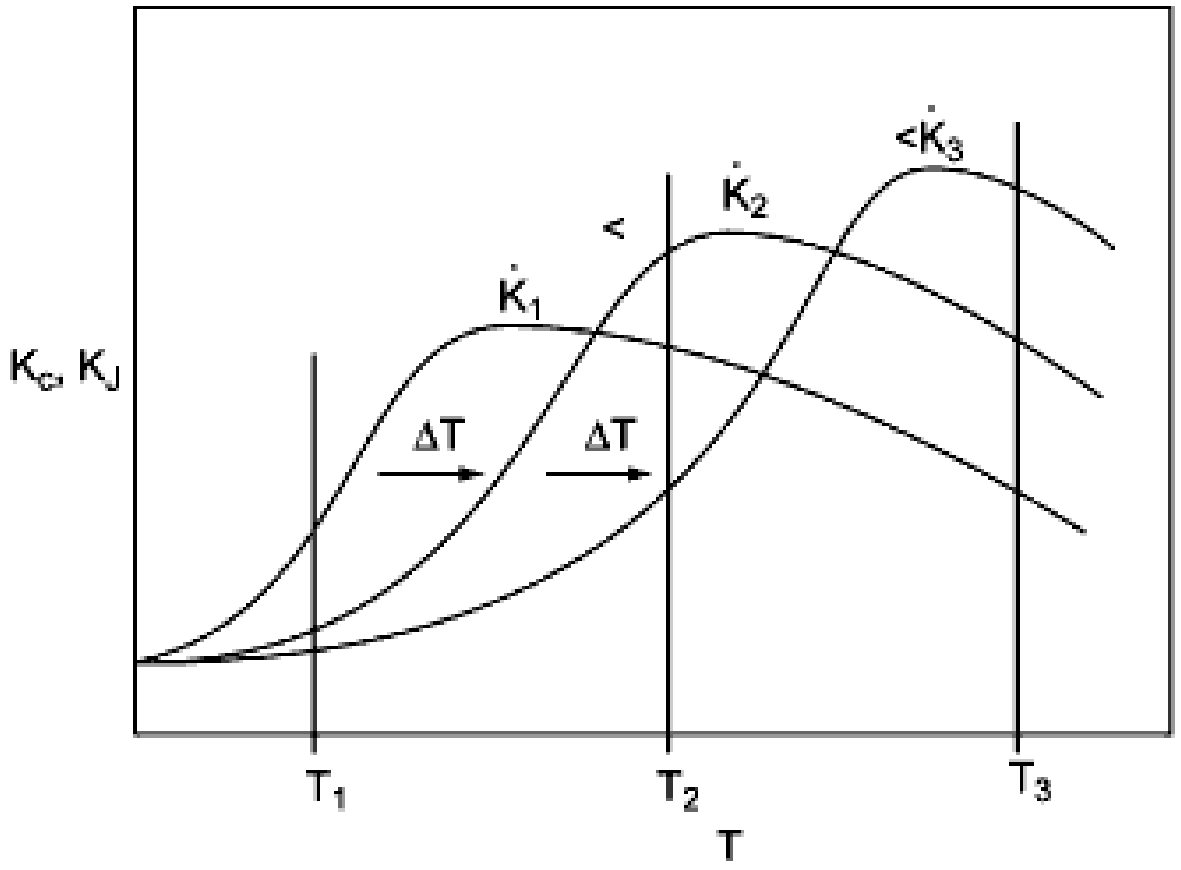




- Moattari M., Sattari-Far I., Persechino I., Bonora N., *Prediction of fracture toughness in ductile-to-brittle transition region using combined CDM and Beremin models*, Materials Science and Engineering A, 657, 2016.

# Tenacità a frattura: effetto strain rate

- La tenacità a frattura è influenzata dalla velocità di applicazione del carico
- In lower shelf, l'aumento della velocità di applicazione del carico provoca una riduzione della tenacità
- In campo duttile, la tenacità corrispondente all'iniziazione di del difetto aumenta con la velocità di applicazione del carico
- In zona di transizione, la velocità di applicazione del carico può aumentare la tenacità se prevale il comportamento duttile.
- In ogni caso, velocità di applicazione del carico elevate provocano un aumento della temperatura di transizione



# Tenacità a frattura: effetto strain rate

- Questo comportamento è imputabile all'effetto che la velocità di deformazione ha sulla tensione di snervamento.
- In termini del tutto generali ( e semplificando): maggiore è la velocità di snervamento, maggiore lo snervamento, minore la zona plastica all'apice e quindi minore resistenza alla frattura.
- Nota. se la velocità di deformazione è elevata, non è detto che all'apice si instaurino condizioni stazionare: stress wave propagation.