

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e della Produzione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

Studio dei processi di formatura per l'applicazione di nuovi acciai alto-resistenziali su componenti strutturali automotive



Relatore

Prof. Paolo MINETOLA

Tutor aziendale

Ing. Alessandro AGNELLO

Candidato

Fulvio ANASTASI

Anno Accademico 2019/20

Sommario

1. INTRODUZIONE	1
2. STRUTTURA DELL'AUTOMOBILE	2
2.1. REQUISITI DELLA STRUTTURA.....	2
2.2. ELEMENTI DELLA STRUTTURA DI UN AUTOVEICOLO	3
2.3. ACCIAI NELL'AUTOVEICOLO.....	4
3. CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI E APPLICAZIONI	7
3.1. ACCIAI CONVENZIONALI	9
3.1.1. MILD.....	9
3.1.2. INTERSTITIAL FREE (IF).....	10
3.1.3. BAKE HARDENING (BH).....	10
3.1.4. High Strength Low Alloy (HSLA).....	10
3.2. ADVANCED HIGH STRENGHT STEEL (AHSS).....	10
3.2.1. DUAL PHASE (DP).....	11
3.2.2. FERRITICO-BAINITICI (FB).....	14
3.2.3. COMPLEX PHASE (CP)	14
3.2.4. MARTENSITIC STEEL (MS).....	15
3.2.5. TRANSFORMATION INDUCED PLASTICITY STEEL (TRIP)	16
3.2.6. HOT FORMING STEEL.....	16
3.2.7. TWINNING INDUCED PLASTICITY STEEL (TWIP)	18
4. STAMPAGGIO DELLA LAMIERA	20
4.1. GENERALITA' SULL'IMBUTITURA	20
4.1.1. COMPORTAMENTO DELLE FIBRE DEL MATERIALE	22
4.2. FORMATURA A CALDO	24
4.2.1. DIRECT HOT FORMING PROCESS.....	24
4.2.2. INDIRECT HOT-FORMING PROCESS	29
4.3. CONFRONTO TRA STAMPAGGIO DIRETTO E INDIRETTO.....	30

4.4.	CONFRONTO TRA STAMPAGGIO A CALDO E A FREDDO	30
4.5.	PARTIAL HARDENING PROCESS	33
4.6.	DIAGRAMMA LIMITE DI FORMABILITA' (FLD)	35
5.	SIMULAZIONE DEI PROCESSI DI FORMATURA	39
5.1.	CENNI STORICI	39
5.2.	SIMULAZIONE FEM NEI PROCESSI DI FORMATURA.....	40
5.3.	MODELLAZIONE FEM.....	41
5.4.	NON LINEARITA'	42
5.5.	SOFTWARE UTILIZZATI.....	43
5.5.1.	AUTOFORM.....	43
5.5.2.	PAM STAMP.....	44
5.5.3.	CARD MATERIALE IN INPUT	44
5.6.	MATERIALI ANALIZZATI.....	46
6.	CASI STUDIO	49
6.1.	PARTIAL HARDENING B-PILLAR.....	49
6.1.1.	CASO STUDIO 1	49
	CONCLUSIONI CASO STUDIO 1	58
6.1.2.	CASO STUDIO 2 – PARTIAL HARDENING B-PILLAR MONOLITICO	59
	CONCLUSIONI CASO STUDIO 2	65
6.1.3.	CASO STUDIO 3 – PARTIAL HARDENING CON TEMPRA RAPIDA B-PILLAR MONOLITICO	66
	CONCLUSIONI CASO STUDIO 3	77
6.2.	PROCESSO DI SMARTFORM SU UN MONTANTE CENTRALE.....	78
6.2.1.	CASO STUDIO.....	81
	CONCLUSIONI CASO STUDIO	86
7.	CONCLUSIONI	87
	INDICE DELLE FIGURE	89
	INDICE DELLE TABELLE.....	93
	BIBLIOGRAFIA	94

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni l'industria automobilistica si è spinta verso l'applicazione di acciai con proprietà meccaniche sempre più performanti per raggiungere i rigidi obiettivi dettati dalla commissione europea in termini di inquinamento. Attraverso l'utilizzo di acciai ad elevate prestazioni, è infatti possibile ottenere una notevole riduzione del peso con conseguente riduzione delle emissioni di CO₂.

L'utilizzo dei processi di formatura per questi particolari acciai risulta però molto sfidante, perché si complica notevolmente la fattibilità di componenti di geometria complessa, ma anche l'ottenimento di componenti che stiano nelle tolleranze geometriche prestabilite. Un problema molto importante che riguarda la difficoltà di applicazione di questi acciai è, infatti, l'elevato ritorno elastico a cui sono soggette le lamiere una volta deformate.

Il presente lavoro di tesi è stato sviluppato presso l'area di Virtual Manufacturing del Centro Ricerche Fiat situato ad Orbassano (TO) e contiene lo studio di acciai di nuova generazione dal punto di vista di due processi differenti: un processo di formatura a caldo con tempra in stampo chiamato Partial Hardening, e un processo di formatura a freddo innovativo, brevettato da ThyssenKrupp, che permette una riduzione notevole del ritorno elastico e una riduzione del materiale di scarto. Gli acciai posti in esame sono rispettivamente un acciaio al Boro facente parte dei Press Hardening Steel e un acciaio TRIP a matrice bifasica.

Inoltre, il Partial Hardening è stato introdotto all'interno di un Progetto Europeo finanziato che si pone l'obiettivo di ottenere una tempra in stampo in tempi notevolmente ridotti grazie ad un processo brevettato che prende il nome di "0.5Tech".

Questo lavoro si articola in differenti capitoli. Oltre questa prima parte introduttiva, il Capitolo 2 contiene informazioni riguardanti la struttura di un autoveicolo e i requisiti di resistenza che devono possedere gli acciai impiegati. Nel capitolo 3 sono trattate tutte le tipologie di acciai utilizzati nei processi di formatura con particolare approfondimento per gli acciai AHSS (Advanced High Strength Steel). Nel capitolo 4 è affrontato il processo di stampaggio lamiera, con approfondimenti riguardanti la formatura a freddo, a caldo e il Partial Hardening. Nel capitolo 5 è mostrata una panoramica sui metodi di simulazione applicati ai processi di formatura, approfondendo le non linearità derivanti dal processo stesso. Inoltre sono esposti i software utilizzati e gli acciai analizzati nel presente lavoro di tesi. Il capitolo 6 è incentrato sull'analisi dei casi studio e la discussione dei risultati. Infine nel capitolo 7 sono presenti le conclusioni dell'intero studio.

2. STRUTTURA DELL'AUTOMOBILE

La carrozzeria di un'automobile è una struttura estremamente complessa che deve soddisfare contemporaneamente numerosi requisiti funzionali, di costo ed estetici. Inoltre la realizzazione di ciascun componente della carrozzeria deve generalmente essere a basso costo e adatta alla produzione di massa. Una tipica carrozzeria per veicoli passeggeri prodotta in serie è un grande insieme di componenti in lamiera stampata sia a freddo sia a caldo. Ogni componente può soddisfare una varietà di requisiti strutturali e funzioni specifiche. Di conseguenza la geometria e il tipo di materiale variano in modo significativo.

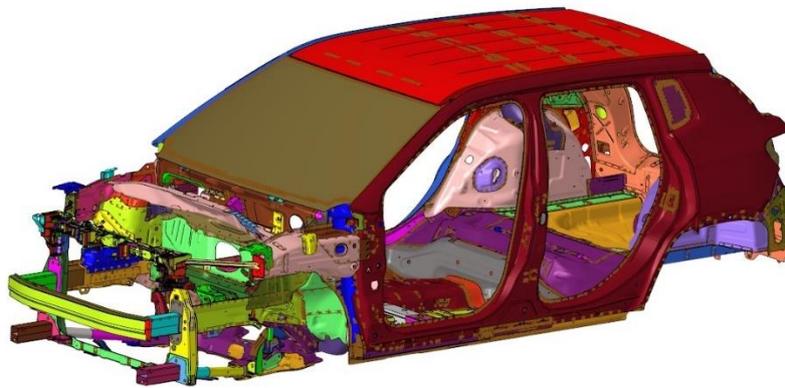


Figura 2.1 Esempio CAD Body In White di una vettura

2.1.REQUISITI DELLA STRUTTURA

I requisiti prestazionali chiave di una struttura di carrozzeria comprendono: rigidità statica strutturale, durabilità, resistenza agli urti e vibrazioni, e durezza. Mentre l'intera struttura deve soddisfare questi requisiti, a livello base i numerosi componenti individuali possono essere classificati in due classi [1]:

- Parti che reagiscono ai carichi con una deformazione minima;
- Parti che reagiscono ai carichi con una deformazione significativa.

Il primo gruppo è dominato dalle proprietà di rigidità, il secondo dipende dalle caratteristiche di resistenza e assorbimento di energia della struttura.

La *rigidezza* di un elemento strutturale è una funzione del modulo di elasticità del materiale e della geometria del componente, in particolare il suo momento di inerzia. La maggior parte dei componenti richiede un valore adeguato di rigidità per soddisfare i requisiti di carico, in particolare i componenti della carrozzeria che supportano i componenti del telaio e delle sospensioni, che devono offrire riduzioni adeguate delle vibrazioni e del rumore. Inoltre la carrozzeria stessa deve avere alta resistenza a flessione statica e rigidità torsionale per adattarsi ai carichi di entrata della strada e consentire la messa a punto della guida e della manovrabilità.

Il modulo elastico di tutti i tipi di acciaio è costante, pertanto la geometria del componente è il parametro di progettazione principale. Sostituire un tipo di acciaio con una resistenza maggiore o un acciaio avanzato ad alta resistenza non migliora la rigidità dei componenti; tuttavia è la migliore formabilità degli acciai AHSS (Advanced High Strength Steel) che consente di raggiungere una forma geometrica tale da migliorare la rigidità dei componenti. La rigidità più elevata dei componenti consente di ridurre lo spessore della lamiera per ridurre la massa complessiva del veicolo.

La *resistenza* di un componente dipende dalla sua geometria, dallo snervamento del materiale e dalla resistenza a trazione. Componenti ad alta resistenza possono essere richiesti per supportare un carico significativo con un livello controllato di deformazione della struttura. Altri componenti possono richiedere un elevato livello di assorbimento di energia per una deformazione molto ridotta. Per questi componenti in cui la resistenza è fondamentale esiste un evidente vantaggio nell'utilizzo di materiali di ultima generazione ad alta resistenza come AHSS.

2.2.ELEMENTI DELLA STRUTTURA DI UN AUTOVEICOLO

La tipica carrozzeria di un veicolo passeggeri costituisce circa il 20% della massa totale del veicolo, eppure è il più grande sottosistema fisico [2]. Il Body In White (BIW) è il sottosistema principale della carrozzeria del veicolo ed è spesso descritta come scheletro del veicolo. Il BIW può essere confinato nei pannelli "body-less doors" ed "hang on".

La carrozzeria ha due distinte caratteristiche di sicurezza: una cella di sicurezza impenetrabile, e zone di deformazione dedicate. La cella di sicurezza deve resistere a carichi estremamente elevati con minima deformazione o intrusione; le zone di deformazione dedicate tuttavia sono ottimizzate per collassare in modo controllato assorbendo la massima quantità di energia possibile. Numerosi scenari e standard di crash test vengono continuamente introdotti per garantire il miglioramento della sicurezza degli occupanti nei veicoli. Per la costruzione della monoscocca convenzionale, viene utilizzata una combinazione di pannelli in lamiera sottile, travi a profilo chiuso, giunti e staffe di supporto. La struttura primaria è in genere costituita da elementi del pavimento longitudinali e laterali e da un telaio tridimensionale che costituisce la cella di sicurezza. Quest'ultima è composta da pilastri verticali identificati come montanti A,B,C/D, travi del tetto laterali, supporti per giunti angolari e pannello del tetto stesso come mostrato in **Figura 2.2**.

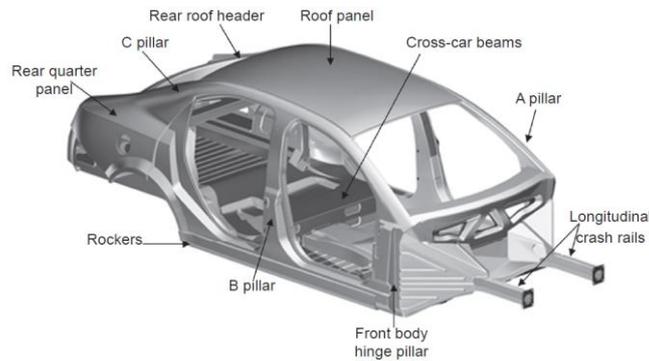


Figura 2.2 Struttura veicolo

Ognuno di questi elementi strutturali è progettato per soddisfare vari requisiti di carico e funzionali specifici. I pannelli esterni della carrozzeria come le portiere, i cofani e il pannello del tetto, richiedono elevati livelli di rigidità e resistenza all'ammaccatura per carichi fuori dal piano. Per i pannelli esterni è richiesta una finitura superficiale di classe A. La loro geometria è generalmente complessa e prevede l'impiego di materiali altamente formabili.

Il piano principale e le paratie anteriori e posteriori reagiscono al carico in piano richiedendo quindi un moderato livello di resistenza e rigidità. Per la rigidità è necessaria una forma geometrica complessa, e per questo è necessaria una formabilità del materiale adeguata.

Le travi longitudinali e laterali forniscono rigidità a trazione, compressione e flessione e resistenza agli urti controllata. Questi componenti sono spesso costituiti da un profilo stampato rinforzato all'interno e saldato a punti. Per questi componenti sono necessari diversi gradi di resistenza a seconda della loro funzione. Gli elementi strutturali della cella di sicurezza richiedono una resistenza molto elevata ma una deformazione minima o nulla, mentre gli elementi nelle zone di deformazione subiscono una deformazione significativa per assorbire la massima energia[3].

2.3.ACCIAI NELL'AUTOVEICOLO

A causa dell'esaurimento delle risorse energetiche non rinnovabili e del riscaldamento globale associato all'aumento dei gas nell'atmosfera in particolare del livello di biossido di carbonio, il settore automobilistico è sotto pressione per aumentare l'efficienza del combustibile nella combustione interna tradizionale nei veicoli a motore. Approssimativamente il 90 % dei consumi relativi ai trasporti deriva dall'utilizzo di veicoli come auto, camion e autobus. La Commissione Europea ha stabilito un obiettivo molto restrittivo per la riduzione delle emissioni di CO₂ fissando un valore del 20% dal 1990 al 2020 [4].

Numerose tecnologie sono state sviluppate per ridurre il consumo di carburante: turbocompressori, sovralimentazione, stop-start automatico e disattivazione dei cilindri [5]. Inoltre sono stati sviluppati propulsori alternativi come il GPL, l'elettrico, l'ibrido benzina-elettrico, idrogeno. Altre tecnologie sviluppate relative all'efficienza del carburante riguardano l'aerodinamica e la resistenza al rotolamento [6]. Di notevole

importanza è anche la sicurezza dei passeggeri che deve essere sempre garantita nel migliore dei modi quando si apportano modifiche ai componenti della struttura di un veicolo.

Per ridurre il consumo di carburante dei veicoli, la riduzione del peso è sicuramente vantaggiosa e infatti ampiamente richiesta nel settore nell'industria automobilistica. Sebbene l'applicazione delle lamiere di alluminio in molti componenti della carrozzeria delle auto è ricercata per la notevole riduzione di peso, l'alto costo e la scarsa formabilità sono problemi importanti, e così l'industria ha mostrato grande interesse verso l'utilizzo di lamiere di acciaio. Anche materiali come il magnesio e i polimeri rinforzati con fibre di varia natura garantiscono una riduzione notevole di peso, ma allo stesso tempo incrementano esponenzialmente i costi di realizzazione. La resistenza degli acciai alto resistenziali (HSS) aumenta notevolmente, in particolar modo negli acciai UHSS dove si raggiungono resistenze di oltre 1GPa[7].

Tabella 2.1 Proprietà High Strength Steels

Sheet	Tensile Strength	Specific Gravity	Strength-to-specific Gravity Ratio
Ultra High Tensile Strength Steel	980 – 1470 MPa	7.8	126 – 188 MPa
High Tensile Strength Steel	490 – 790 Mpa	7.8	63- 101 MPa
Mild Steel SPCC	340 Mpa	7.8	44 MPa
Aluminium Alloy A6061 (T6)	310 Mpa	2.7	115 MPa

Per una maggiore sicurezza dei passeggeri infatti le strutture automobilistiche che hanno un maggiore assorbimento di energia in una situazione di incidente sarebbero la soluzione ideale. Gli acciai avanzati ad alta resistenza (AHSS) sono stati sviluppati per supportare questi requisiti. In questa ottica una parte significativa dei componenti in acciaio a basso tenore di carbonio verrà sostituita da questi acciai ad alta resistenza che saranno analizzati in seguito nella trattazione.

In **Figura 2.3** viene mostrato come nel corso degli anni si è fatto un sempre maggiore utilizzo di acciai più prestanti nel BiW di un'autovettura. Si è partiti da acciai di 1^a generazione alla fine degli anni '80, arrivando al giorno d'oggi ad acciai di 3^a generazione.

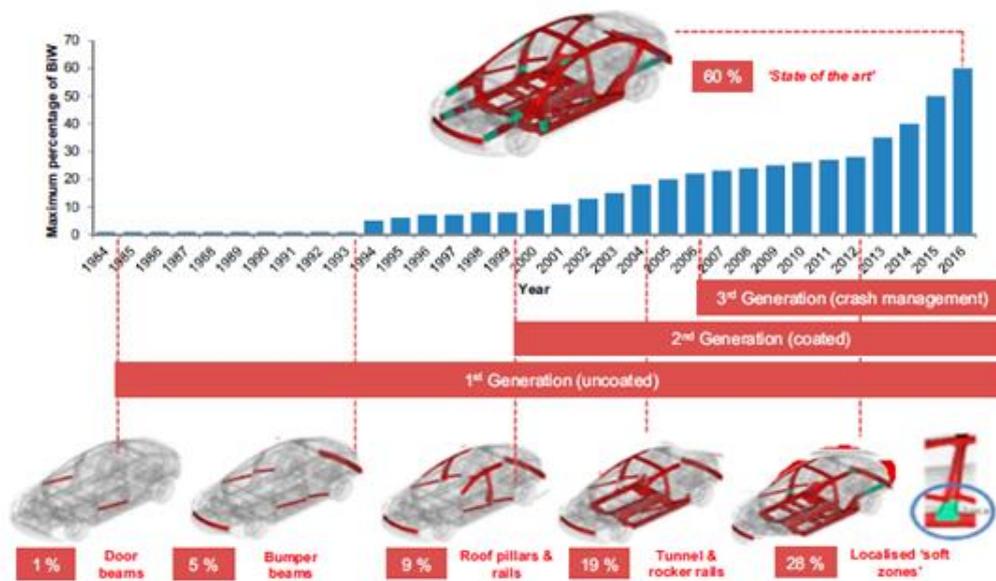


Figura 2.3 Evoluzione acciai in componenti automotive

Le riduzioni del peso dei veicoli e le normative sui requisiti dei crash test sembrano avere direzioni opposte: il risparmio di carburante è assicurato ma la sicurezza può essere messa in pericolo dai veicoli più leggeri. Tuttavia, studi condotti sull'uso degli AHSS per i progetti automobilistici hanno dimostrato che è possibile ottenere la riduzione del peso dei veicoli senza compromettere la sicurezza dei passeggeri[8].

3. CLASSIFICAZIONE DEGLI ACCIAI E APPLICAZIONI

Diverse considerazioni importanti guidano la scelta dei materiali per le applicazioni automobilistiche, come per esempio la sicurezza, l'efficienza energetica, la producibilità, la durata e la qualità. Questi fattori si manifestano in modo diverso in ogni componente del veicolo, e i materiali sono selezionati per soddisfare ogni serie di requisiti prestazionali nel modo più efficiente possibile.

La capacità di sostenere carichi statici e dinamici richiesti, in particolare in caso di incidenti, è una delle caratteristiche più importanti per la progettazione delle strutture dei veicoli. Sia la scelta dei materiali sia il design delle geometrie giocano un ruolo importante nel definire i cicli di carico finali e i dettagli delle parti.

Analizzando l'aspetto relativo ai fenomeni di crash, si possono individuare delle aree che hanno requisiti di sicurezza molto diverso come si evince dalla **Figura 3.1**.



Figura 3.1 Gabbia di sicurezza di un abitacolo

L'abitacolo racchiuso in una gabbia di sicurezza è progettato per proteggere i passeggeri in caso di incidente ad alta o bassa velocità; la struttura dovrebbe impedire qualsiasi deformazione o intrusione che potrebbe compromettere l'integrità della struttura andando ad incidere pericolosamente sui passeggeri. Le zone di deformazione sono situate nella parte anteriore e posteriore del veicolo in modo da assorbire quanta più energia possibile in caso di collisione. Assorbendo l'energia la zona di deformazione attenua l'impatto e contribuisce a preservare la struttura dell'abitacolo. Quindi le caratteristiche dei materiali da utilizzare possono essere riassunte come mostrato in **Tabella 3.1**.

Tabella 3.1 Requisiti degli acciai di un autoveicolo

	REQUISITI DI PRESTAZIONE	PROPRIETA' MECCANICHE	POTENZIALE ACCIAIO
ZONE DI DEFORMAZIONE	Elevato assorbimento di energia	Elevata temprabilità, resistenza e duttilità	DP,CP, TRIP
ABITACOLO	Nessuna deformazione o intrusione durante un crash	Elevato carico di snervamento	Martensitici, HF, DP

Chiaramente, la scelta delle proprietà dell'acciaio (come quelle mostrate in **Figura 3.2**) guida la scelta dei tipi di acciaio per applicazioni specifiche. I componenti sono progettati in modo da formare insieme una struttura che soddisfa tutti i requisiti, in particolare in tutti i casi di incidente, sia quelli imposti dalla National Highway Traffic Safety Administration sia quelli imposti internamente dalle case automobilistiche.

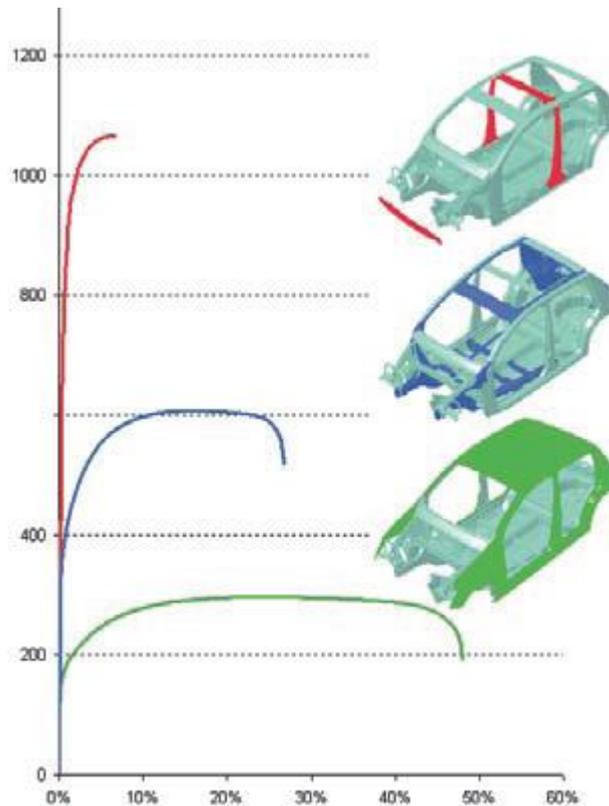


Figura 3.2 Curva σ - ϵ degli acciai presenti nel BiW di un'autovettura

Come già accennato, la rigidità è funzione della geometria del pezzo e del modulo elastico, ed è legata in particolar modo all'handling del veicolo e alla sicurezza, ma anche a problemi di rumori e vibrazioni. Anche se l'uso di acciai AHSS aiuta ad aumentare la resistenza e a ridurre il peso utilizzando lamiere più sottili, questo può influire negativamente sulla rigidità. La geometria, in particolare il momento di inerzia della sezione trasversale intorno all'asse di carico primario, gioca un ruolo significativo nella determinazione della rigidità. Una maggiore flessibilità nella variazione della sezione trasversale e delle geometrie complessive, consente soluzioni di progettazione strutturale che trasportano in modo più efficiente i carichi nel veicolo. L'uso di AHSS offre molti vantaggi in questo processo perché le elevate velocità di incrudimento aumentano la formabilità, consentendo di ottenere geometrie di varia forma ottimizzando le caratteristiche ricercate [9]. Inoltre gli AHSS possiedono tipicamente un'elevata capacità di indurimento tramite trattamento termico che può migliorare la resistenza finale di un componente dopo la formatura.

Gli AHSS sono stati sviluppati in parte per far fronte alla minore formabilità rispetto agli acciai convenzionali, con una maggiore resistenza. Man mano che l'acciaio diventa sempre più resistente, allo stesso tempo è più

difficile da formare in componenti automobilistici. Anche se molto più resistenti degli acciai convenzionali, gli AHSS, offrono elevate capacità di indurimento mediante deformazione ma anche mediante cottura e consentono una maggiore formabilità e possibilità di ottimizzazione delle geometrie[10].

Successivamente verrà esposta una panoramica su alcune delle numerose tipologie di acciaio utilizzate nel campo della formatura di lamiera, facendo riferimento alla **Figura 3.3**.

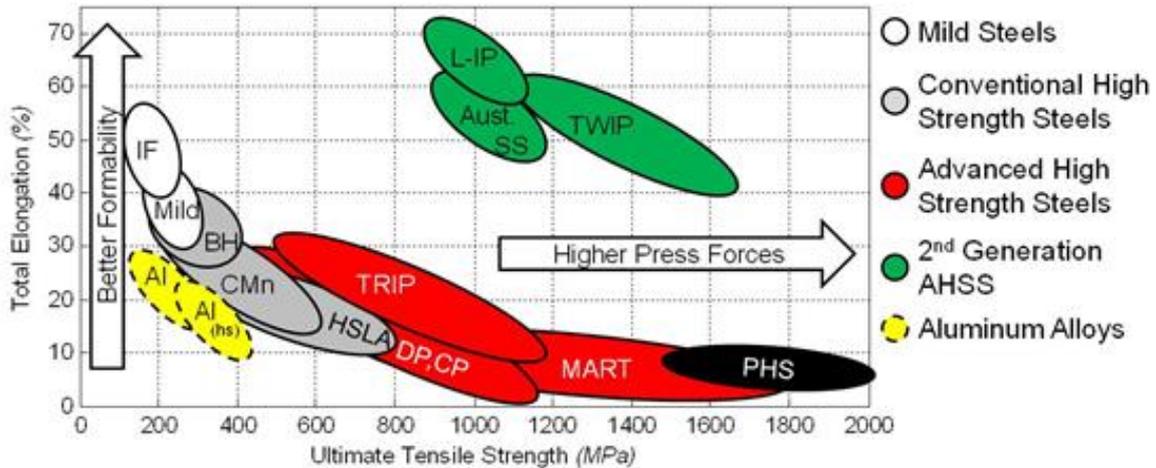


Figura 3.3 Collocazione delle principali categorie di acciai nel grafico A%-UTS

3.1.ACCIAI CONVENZIONALI

Acciai dolci, a bassa e ad alta resistenza sono stati ampiamente usati nelle automobili per molti anni. Di seguito verranno trattati i seguenti acciai convenzionali [10]:

- Mild;
- Interstitial Free (IF);
- Bake Hardening (BH);
- High-Strength Low Alloy (HSLA).

3.1.1. MILD

Gli acciai Mild convenzionali hanno una microstruttura ferritica relativamente semplice, con un basso contenuto di carbonio ed elementi di lega minimi che lo rendono formabile. Ampiamente prodotti ed utilizzati, gli acciai Mild sono economici e spesso servono come riferimento per il confronto con altri materiali. Gli acciai Mild hanno una resistenza relativamente bassa, ma una formabilità eccellente. Sono stati a lungo utilizzati per molte applicazioni nei veicoli, compresa la struttura della carrozzeria, le chiusure e altre parti accessorie.

3.1.2. INTERSTITIAL FREE (IF)

L'acciaio IF ha un bassissimo contenuto di carbonio ottenuto rimuovendo monossido di carbonio, idrogeno, azoto ed altri gas durante la produzione dell'acciaio attraverso un processo di degassaggio sottovuoto. Elementi interstiziali come l'azoto o il carbonio formano anche nitruri e carburi con elementi di lega come il Niobio e il Titanio per stabilizzare gli interstizi residui. Pertanto gli acciai IF sono tipicamente non invecchiati. La mancanza di atomi interstiziali nella struttura atomica permette all'acciaio IF di avere una duttilità estremamente alta, ideale per tutti gli imbutiti; infatti gli acciai IF sono a volte chiamati Extra-DeepDrawing Steels (EDDS). Hanno una resistenza relativamente bassa, ma elevato incrudimento e ottima formabilità. Le applicazioni includono elementi della struttura della carrozzeria e chiusure.

3.1.3. BAKE HARDENING (BH)

Gli acciai Bake Hardening sono caratterizzati da un incremento della resistenza grazie all'effetto combinato di incrudimento per deformazione plastica e invecchiamento conseguente ad un ciclo termico di cottura. Sebbene abbiano una semplice microstruttura ferritica, il rafforzamento per soluzione solida conferisce agli acciai BH un incremento di resistenza. Dal punto di vista chimico sono più complessi rispetto agli acciai dolci o IF, infatti presentano nella composizione chimica un quantitativo di alluminio che combinandosi con l'azoto forma dei composti duri (AlN). Vengono utilizzate alcune tecniche che permettono di mantenere il carbonio in soluzione attraverso operazioni fino al rilascio durante l'indurimento della vernice. La procedura di cottura in forno aumenta il carico di snervamento mantenendo comunque un'ottima formabilità. Questa tipologia di acciai è resistente alle ammaccature e sono spesso selezionati per pannelli di chiusura come porte.

3.1.4. High Strength Low Alloy (HSLA)

Gli acciai HSLA sono tra i primi acciai ad alta resistenza ampiamente utilizzati in applicazioni automotive. Presentano un basso tenore di elementi di lega come per esempio Nb, Ti e V che permettono di formare carburi andando ad incrementare la resistenza meccanica. Il rafforzamento di questo tipo di acciai avviene principalmente per affinamento del grano, ma anche per precipitazione di seconda fase. La percentuale di carbonio presente è minore di 0,1%. Questi acciai sono utilizzati per soddisfare specifiche esigenze meccaniche e sono tipicamente molto duri, resistenti alla corrosione, formabili e saldabili. Molti componenti della struttura della carrozzeria, delle sospensioni e del telaio sono realizzate in acciaio HSLA.

3.2. ADVANCED HIGH STRENGTH STEEL (AHSS)

Questi acciai sono più recenti ed hanno una resistenza ed una formabilità maggiore grazie allo sviluppo di microstrutture più complesse ottenute attraverso processi di raffreddamento controllati. La prima generazione di questi acciai ha base ferritica. Tra gli acciai AHSS troviamo:

- Dual Phase (DP);
- Ferritico-Bainitici (FB);
- Complex Phase (CP);
- Martensitici (MS);
- Transformation Induced Plasticity (TRIP);
- Da formatura a caldo.

La seconda generazione di questi acciai è a base di austenite ed è denominata:

- Twinning Induced Plasticity (TWIP).

3.2.1. DUAL PHASE (DP)

La microstruttura degli acciai DP (**Figura 3.4**) è costituita da una matrice di ferrite dolce che circonda delle isole di martensite dure:

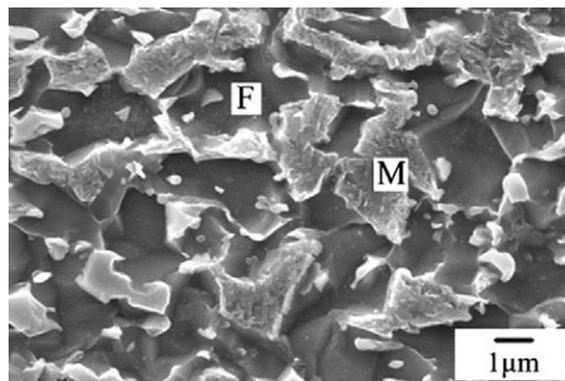


Figura 3.4 Microstruttura acciai Dual Phase

La ferrite è continua per molti gradi di acciaio fino al DP780, ma poiché le frazioni volumetriche di martensite superano il 50% come per esempio nei DP980, la ferrite può diventare discontinua. La combinazione di fasi dure e morbide si traduce in un eccellente equilibrio tra resistenza e duttilità, con una resistenza che aumenta all'aumentare della quantità di martensite [11].

La **Figura 3.5** indica un metodo di trattamento termico utilizzato per ottenere una microstruttura di ferrite-martensite tipica degli acciai Dual Phase. Tipicamente la procedura di ricottura finale per questi acciai consiste nel trattenere il materiale in un regime intercritico di austenite-ferrite seguito da tempra più un mantenimento a temperature leggermente inferiori all'inizio della formazione di martensite, per cui la frazione di austenite si trasforma in martensite[12].

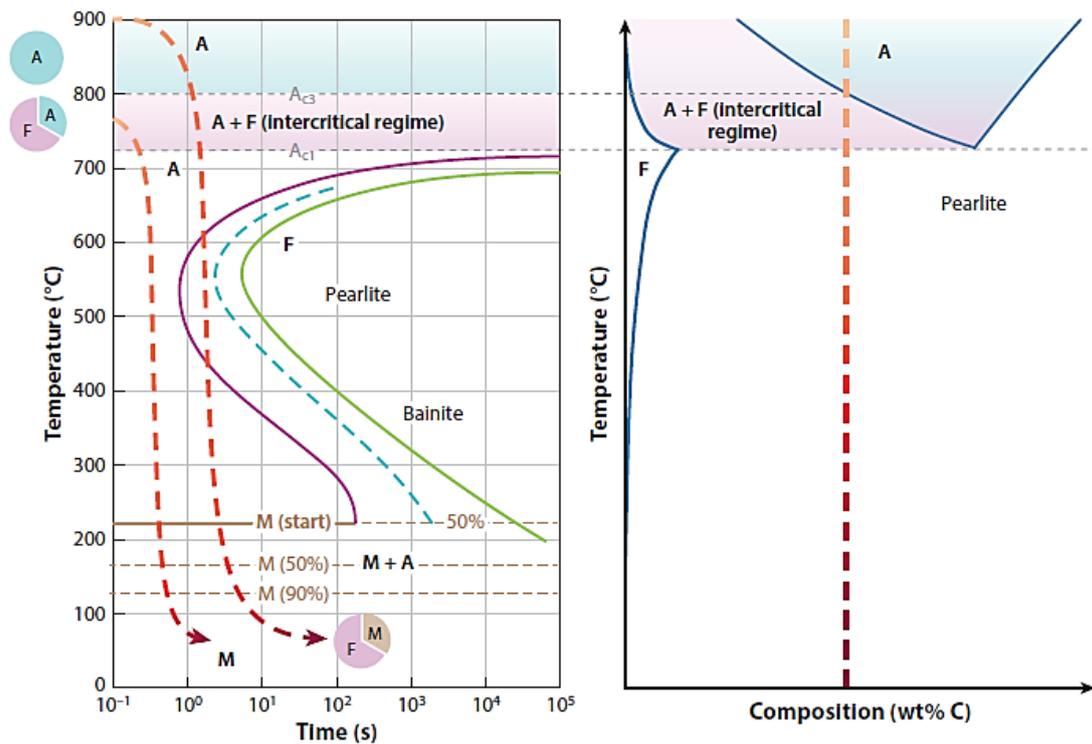


Figura 3.5 Trattamento termico per l'ottenimento della struttura caratteristica degli acciai DP

Nel grafico con le lettere A, F ed M si identificano rispettivamente Austenite, Ferrite e Martensite; con l'abbreviazione A_{c1} si intende la temperatura alla quale inizia a formarsi austenite durante il riscaldamento, mentre con A_{c3} si intende la temperatura alla quale la trasformazione in austenite è completa durante il riscaldamento [12].

Gli acciai Dual Phase possono essere formati a caldo o a freddo e hanno un'ottima temprabilità. Se laminati a caldo, il raffreddamento viene attentamente controllato per produrre la struttura ferritico-martensitica dall'austenite di partenza. Se continuamente ricotto o immerso a caldo, la struttura finale è ferritico-austenitica a doppia fase che viene raffreddata rapidamente per trasformare parte dell'austenite in martensite [13]. La ferrite dolce nel materiale Dual Phase è particolarmente duttile e assorbe la deformazione intorno alle isole martensitiche, consentendo un allungamento uniforme con elevata velocità di incrudimento e resistenza a fatica. Inoltre gli acciai DP possono assorbire molta energia di deformazione. A differenza degli acciai convenzionali, la tempra non diminuisce all'aumentare del pretensionamento degli acciai.

La composizione chimica prevede una percentuale in peso di 0,06-0,15% di Carbonio e 1,5-3% di Manganese (il primo rafforza la martensite, il secondo provoca il rafforzamento della soluzione solida in ferrite ed entrambi stabilizzano la ferrite), sebbene queste quantità possono variare in base al grado dell'acciaio.

Elevate percentuali di Carbonio e Manganese sono importanti per ottenere la necessaria temprabilità, che previene la creazione di perlite o bainite durante il processo di formatura. La presenza di Cromo e Molibdeno ritarda la formazione di perlite o bainite e quantitativi di Silicio possono essere aggiunti per promuovere la trasformazione della ferrite. Infine Vanadio e Niobio permettono il rafforzamento delle precipitazioni e il raffinamento della struttura.

L'acciaio DP è il più utilizzato tra gli acciai AHSS. Le case automobilistiche lo impiegano per aumentare la resistenza e diminuire lo spessore dei componenti strutturali. Quando si progetta con acciai DP, come anche altri AHSS, si deve considerare l'effetto dell'indurimento dato dalla deformazione plastica e dalla cottura. Acciai DP possono essere sviluppati con un esteso range di carico di snervamento (YS) e carico di rottura (UTS), il che consente un'ampia gamma di applicazioni. Il basso carico di snervamento è dettato dalla presenza di fase ferritica dolce, mentre l'elevata resistenza a trazione è dettata dalla presenza di regioni martensitiche. Variazioni di volume durante la trasformazione da austenite a martensite durante il processo generano delle dislocazioni all'interno della matrice ferritica che contribuiscono al basso carico di snervamento e al corrispettivo comportamento senza discontinuità.

Questi acciai hanno un'elevata velocità di indurimento rispetto ai convenzionali acciai HSLA; un'elevata velocità di indurimento significa che dopo la formatura, gli acciai DP presentano maggiore resistenza rispetto agli HSLA. Questa resistenza più alta è importante nei componenti soggetti a fatica e crash, e questo permette di utilizzare spessori ridotti di lamiera.

È talvolta selezionato per parti e chiusure visibili della carrozzeria, come porte, cofani, guide anteriori e posteriori. Altre applicazioni conosciute includono: travi e traverse e rinforzi per pilastri; cofano interno ed esterno, dispositivi di fissaggio e ruote.

3.2.2. FERRITICO-BAINITICI (FB)

Gli acciai Ferritico-Bainitici sono anche DP con ferrite dolce e bainite dura.

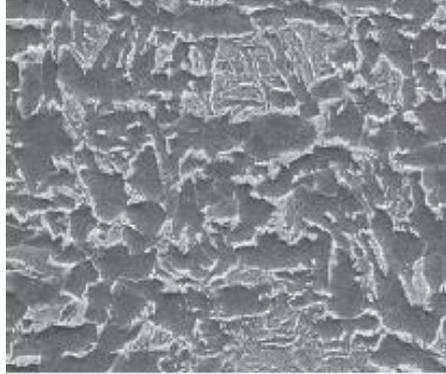


Figura 3.6 Microstruttura acciai FB

La microstruttura è più fine del tipico acciaio DP e può essere regolata ancora più finemente per aumentare la capacità di flangiabilità. Questa caratteristica può essere misurata con la prova di espansione dei fori (Hole Expansion) e fornisce la capacità di resistere all'allungamento sul bordo tranciato. La seconda fase dura di bainite e la raffinatezza dei grani rendono gli acciai FB resistenti con eccellente formabilità.

L'acciaio FB funziona bene in condizioni di carico dinamico, il che lo rende adatto a sopportare carichi vibrazionali. La capacità di estensibilità nei bordi tagliati lo rende una scelta eccellente per applicazioni in banco su misura. Spesso l'FB trafilato a freddo viene utilizzato per profili, parti meccaniche, traverse e rinforzi.

3.2.3. COMPLEX PHASE (CP)

Gli acciai CP hanno una microstruttura mista con una matrice ferritico-bainitica contenente isole di martensite, austenite residua e perlite.



Figura 3.7 Microstruttura acciai CP

L'affinamento dei grani è essenziale per ottenere le proprietà desiderate; la ricristallizzazione ritardata è spesso utilizzata per sviluppare grani molto piccoli per una microstruttura molto fine. Elementi di microlega come il titanio o il niobio possono anche essere precipitati.

La microstruttura fine e complessa conferisce all'acciaio CP un alto YS e un elevato allungamento a trazione simile a quello degli acciai DP. CP può avere una buona elasticità dei bordi. Inoltre gli acciai CP hanno buone caratteristiche di resistenza all'usura e alla fatica e possono anche essere induriti in forno. L'acciaio CP ha diverse applicazioni nel settore automotive, in particolare nella struttura della carrozzeria, nelle sospensioni e in componenti del telaio. L'alto YS e l'allungamento permette un elevato assorbimento di energia, rendendolo inoltre una buona scelta per i componenti di sicurezza in caso di urto, come i parafranghi, le travi d'urto delle porte e i rinforzi per il B-Pillar. Secondo gli studi di ThyssenKrupp Steel la sostituzione di acciai microlegati convenzionali con acciai CP nel rinforzo di un montante centrale, può raddoppiare la sua resistenza [14].

3.2.4. MARTENSITIC STEEL (MS)

Negli acciai MS quasi tutta l'austenite viene convertita in martensite. La risultante matrice martensitica contiene una piccola quantità di ferrite e/o bainite molto fini. In **Figura 3.8** è mostrata la microstruttura finale.



Figura 3.8 Microstruttura acciaio martensitico temprato [15]

Questa struttura si forma tipicamente durante le fasi di un rapido raffreddamento in seguito a laminazione a caldo, ricottura e post-trattamento termico. Aumentare il contenuto di carbonio aumenta la resistenza e la durezza. La struttura risultante è per lo più martensite a listelli, come in figura. Accurate combinazioni di silicio, cromo, manganese, boro, nichel, molibdeno e/o vanadio possono aumentare l'indurimento. L'acciaio martensitico è noto per la sua resistenza estremamente elevata; sono stati ottenuti acciai con UTS (Ultimate Tensile Strength) da 900 a 1700 MPa. Questi acciai hanno un allungamento a rottura relativamente basso, ma il rinvenimento post-tempra può migliorare la duttilità consentendo un'adeguata formabilità. Spesso utilizzato in applicazioni dove la resistenza è fondamentale, è tipicamente formato in coil e può essere

indurito tramite cottura in forno ed elettro-galvanizzato per applicazioni che richiedono resistenza alla corrosione, ma il trattamento termico ne riduce la resistenza.

Sebbene questi acciai abbiano un rapporto resistenza/peso molto elevato, sono leggeri ed economici. Sono raccomandati come rinforzi di paraurti, travi delle porte, pannelli interni.

3.2.5. TRANSFORMATION INDUCED PLASTICITY STEEL (TRIP)

Come gli acciai CP, gli acciai TRIP hanno una struttura multifase contenente tipicamente ferrite, austenite residua (~5%), bainite e/o martensite, come mostrato in **Figura 3.9**.

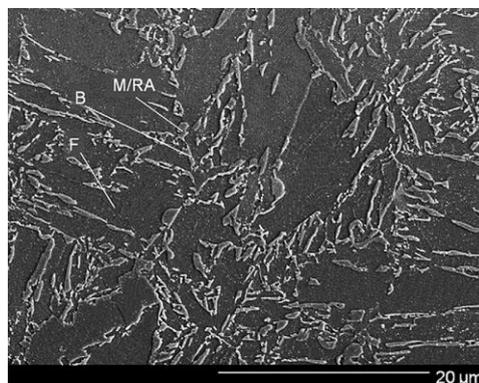


Figura 3.9 Microstruttura acciai TRIP

Questi acciai hanno un alto contenuto di carbonio per stabilizzare l'austenite meta-stabile al di sotto della temperatura ambiente. Silicio e/o alluminio sono spesso inclusi per accelerare la formazione di ferrite/bainite mentre sopprimono la formazione di carburi [16]. L'acronimo TRIP si riferisce all'incrudimento dato dalla transizione di fase che permette di avere austenite residua che, mediante sollecitazione, tende a trasformarsi in martensite incrementando così la resistenza meccanica dell'acciaio. La quantità di deformazione richiesta per iniziare la trasformazione può essere gestita regolando la stabilità dell'austenite controllando il suo contenuto di carbonio, le dimensioni, e la morfologia del contenuto di lega. Con meno stabilità, la trasformazione inizia non appena si manifesta la deformazione. Con maggiore stabilità, la trasformazione di austenite in martensite viene ritardata fino a raggiungere livelli più elevati di tensione, tipicamente oltre quelli del processo di formatura. Nelle parti automobilistiche in acciaio TRIP altamente stabilizzate, questo ritardo può consentire all'austenite di rimanere fino a quando un evento di incidente lo trasforma in martensite [17]. Gli acciai TRIP hanno comunque un'eccellente formabilità e un'elevata capacità di resistere a stretch, quindi forme complesse sono realizzabili. Essi hanno anche un'ottima capacità di indurimento in forno [10].

3.2.6. HOT FORMING STEEL

Gli acciai da formatura a caldo sono tipicamente a base di boro, in percentuale da 0,002-0,005%, e sono chiamati comunemente acciai al boro. Il boro all'interno della microstruttura dell'acciaio migliora la

temprabilità e facilita l'ottenimento di fase martensitica [8]. Dalla termodinamica classica, il boro disciolto in soluzione solida austenitica segrega ai bordi dei grani austenitici aumentando l'energia superficiale sul bordo stesso. Questo aumenta l'energia di attivazione per una trasformazione di fase ricostruttiva, ritarda la nucleazione di ferrite, aumenta la probabilità di una trasformazione di fase displasiva e quindi aumenta la temprabilità. Questa teoria è mostrata nella seguente **Figura 3.10** [18].

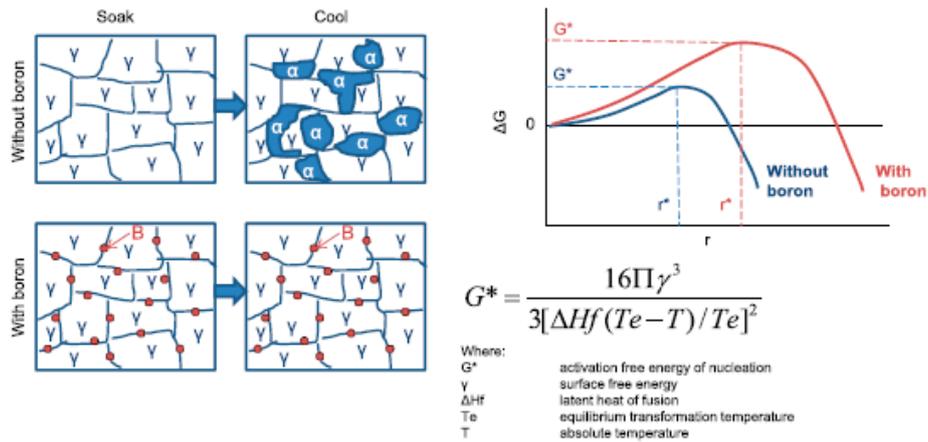


Figura 3.10 Effetto del Boro nella microstruttura degli acciai da Hot Forming

Analizzando la composizione chimica, il carbonio migliora la temprabilità e facilita il rafforzamento per soluzione solida interstiziale che garantisce un'elevata resistenza a trazione della parte finale martensitica; il manganese migliora la temprabilità e il rafforzamento per soluzione solida sostitutiva aumentando la resistenza a trazione ma non diminuendo l'allungamento a rottura comparato con il carbonio; il silicio è un agente disossidante nella produzione dell'acciaio e al contempo fornisce temprabilità e rafforzamento per soluzione solida sostitutiva, però è minimizzato per ridurre la formazione di ossido di silicio in superficie che impedisce l'adesione di rivestimenti metallici; il cromo favorisce il rafforzamento per soluzione solida sostitutiva e aumenta la temprabilità soprattutto nel caso di lamiere spesse, infatti nel settore automotive dove gli spessori sono minori di 2 mm e dove le velocità di raffreddamento sono molto elevate può essere non necessario. Di seguito è riportata la tabella relativa al più utilizzato acciaio al boro, il 22MnB5, con le composizioni chimiche relative ai vari produttori di acciaio (**Tabella 3.2**).

Tabella 3.2 Confronto composizione chimica 22MnB5 di produttori differenti

Manufacturer	Product	C (wt-%)	Mn (wt-%)	Si (wt-%)	Cr (wt-%)	Ti (wt-%)	B (wt-%)
ArcelorMittal	Usibor1500	0.20–0.25	1.10–1.40	0.15–0.35	0.15–0.35	0.02–0.05	0.002–0.005
Swedish Steel AB	DocolPHS1500	0.20–0.25	1.00–1.35	0.20–0.35	0.14–0.26	–	0.002–0.005
ThyssenKrupp Steel AG	MBW1500	0.20–0.25	1.00–1.40	0.20–0.40	0.20–0.50	0.02–0.05	0.002–0.005
Tata Steel	HQ1500	0.20–0.23	1.10–1.30	0.20–0.30	0.10–0.30	0.02–0.04	0.002–0.004
Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.	NS25CTB	0.22–0.28	0.90–1.20	≤ 0.35	0.10–0.40	≤ 0.03	0.001–0.003

I processi utilizzati per produrre acciai HF conferiscono una combinazione unica di proprietà. La formatura diretta a caldo può essere utilizzata per deformare il blank nello stato austenitico (ad alte temperature), mentre la formatura indiretta a caldo può essere utilizzata per riscaldare e finire il pezzo dopo che la formatura è stata completata a temperatura ambiente. In entrambi i casi, l'acciaio subisce una serie di transizioni di allungamento e resistenza, terminando con un rapido raffreddamento per raggiungere le proprietà meccaniche desiderate finali. Successivamente saranno analizzate più nel dettaglio queste tipologie di formatura.

L'uso degli acciai HF, chiamati anche acciai ad altissima resistenza (UHSS), è cresciuto rapidamente in Europa; sono sotto studio anche altri materiali per formatura a caldo, nonché nuovi rivestimenti per migliorare la resistenza alla corrosione. Altri campi di studio riguardano il miglioramento delle tecnologie di riscaldamento, formatura e utensili. Le applicazioni di questi acciai comprendono rinforzi per i montanti A e B, parti del tetto, elementi delle pareti laterali.

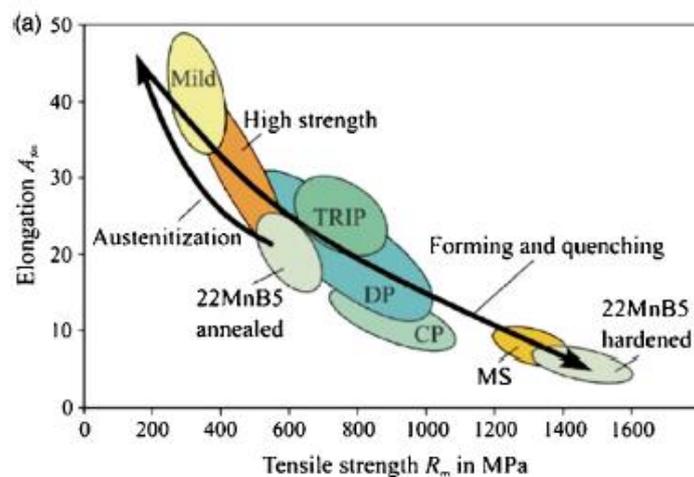


Figura 3.11 Variazione caratteristiche materiale durante la formatura a caldo

Dalla **Figura 3.11** si evince come il materiale di partenza, nel caso considerato un acciaio al boro, tramite austenitizzazione e successiva tempra arriva a possedere delle caratteristiche meccanica notevolmente migliorate [19].

3.2.7. TWINNING INDUCED PLASTICITY STEEL (TWIP)

Gli acciai TWIP (TWinning Induced Plasticity) fanno parte della seconda generazione degli acciai AHSS. Basato sull'austenite, si distingue dagli AHSS convenzionali e di prima generazione sul diagramma di resistenza a trazione e allungamento. L'alto contenuto di manganese (15÷30%) consente a questa struttura austenitica di esistere a temperatura ambiente [20].

L'acronimo TWIP è dovuto alla sua particolare modalità di deformazione plastica: lo slittamento delle dislocazioni provoca la formazione di bordi di grano gemelli simmetrici. Le strutture gemellate agiscono come barriera per le dislocazioni e riducono l'effettivo percorso medio libero delle dislocazioni stesse aumentando la resistenza. La risultante gamma di resistenza degli acciai TWIP è simile agli acciai DP e TRIP (600-1000 Mpa); tuttavia la duttilità è significativamente più elevata, raggiungendo il 40-80%. Duttilità e resistenza sono correlati al contenuto di Manganese. Inoltre è possibile avere delle aggiunte di alluminio e silicio che consentono rispettivamente il primo di sopprimere la formazione di martensite e il secondo invece di facilitarla. Di conseguenza gli acciai con aggiunte di silicio maggiori hanno maggiore forza e tendono a trasformarsi in martensite piuttosto che in strutture gemellari, mentre le aggiunte di alluminio riducono la resistenza alla trazione e l'incrudimento [3].

Facendo parte della seconda generazione, l'acciaio TWIP è noto per la sua combinazione di altissima resistenza con estrema capacità di allungamento [10].

4. STAMPAGGIO DELLA LAMIERA

Lo stampaggio della lamiera prevede una serie di operazioni che permettono di ottenere un oggetto di qualsiasi forma, anche con parti cave, a partire da un foglio di metallo laminato sviluppato su un piano. Per realizzare il componente finale si sottopone il foglio di lamiera a deformazione plastica. Per effettuare tutte le operazioni previste dal processo che verranno analizzate in seguito si utilizzano degli utensili speciali chiamati stampi che vengono montati su opportune macchine che prendono il nome di presse.

Le lavorazioni principali che prendono parte in un completo processo di stampaggio lamiera sono:

- Tranciatura;
- Piegatura e curvatura;
- Imbutitura.

Solitamente le prime due operazioni vengono eseguite a freddo, mentre l'ultima si può decidere se effettuarla a freddo o a caldo, in funzione della tipologia di materiale di cui è fatta la lamiera e soprattutto in funzione della geometria del componente da stampare. Per ottenere un pezzo nella sua configurazione finale è possibile utilizzare anche una delle tre operazioni introdotte, ma solitamente vengono sfruttate almeno due operazioni.

Di solito infatti si provvede ad una tranciatura iniziale e successivamente ad un'imbutitura per ottenere un elemento cavo; più correttamente quindi si deve individuare un ciclo di stampaggio. Il ciclo dipende da numerosi fattori come la forma, le dimensioni e la qualità del materiale del componente da realizzare.

È intuitivo che maggiore è la complessità geometrica del componente da realizzare più operazioni bisogna prevedere nel ciclo di stampaggio; al contrario, tanto più semplice è la geometria e meno profonde sono le parti cave da realizzare, tanto minore è il numero di operazioni di formatura del componente. Per quanto riguarda la dimensione se si considera un elemento molto profondo allora si dovranno impiegare più operazioni di imbutitura. Infine il materiale ha anche notevole importanza perché più esso è duttile e plastico meglio si riesce ad ottenere una determinata forma in imbutitura senza rischi di rottura.

Lo stampaggio a caldo invece viene utilizzato nei casi in cui vi siano notevoli variazioni sia di forma, sia di spessore nel componente. Spesse volte infatti non è possibile effettuare un'elevata deformazione a freddo del componente in funzione della sua geometria e del suo spessore. Lamiere con spessori oltre i 7 mm richiedono necessariamente una lavorazione a caldo[21].

4.1.GENERALITA' SULL'IMBUTITURA

Quando si parla di imbutitura si fa riferimento alla trasformazione di una lamiera piana in un oggetto di forma concava che si può ottenere in più passaggi.

Gli stampi sono costituiti essenzialmente da matrice, punzone, premilamiera e un espulsore che viene solitamente azionato da una molla o da un sistema idraulico. Una delle possibili configurazioni è quella rappresentata nella **Figura 4.1**. L'azione del punzone sulla lamiera obbliga il materiale ad assumere la forma dettata dalla matrice. Terminata l'imbutitura, la molla, che è stata compressa dalla chiusura dello stampo, restituisce l'energia immagazzinata e spinge fuori dallo stampo il pezzo imbutito. Di seguito si riporta la posizione dei diversi elementi dell'attrezzatura durante le fasi del processo (**Figura 4.1**):

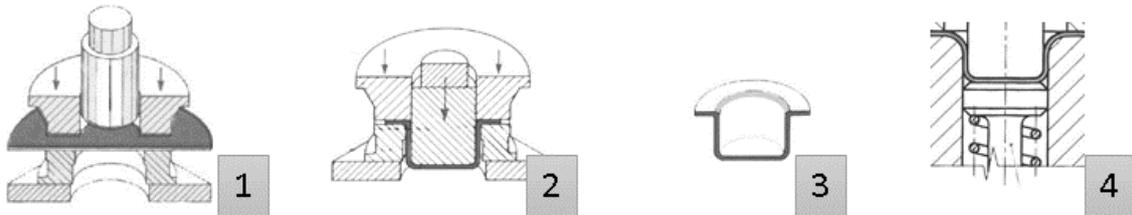


Figura 4.1 Fasi del processo di imbutitura

- Nella prima fase punzone e premilamiera si trovano in posizione superiore alla matrice; successivamente la lamiera viene posta sulla matrice; in questa fase la molla non interviene nel processo;
- Nella seconda fase il premilamiera si poggia sulla lamiera in modo tale da premere la superficie anulare della lamiera sulla matrice; è possibile impostare il valore di pressione da esercitare sulla lamiera, esso dipende dalla tipologia di materiale e dallo spessore della lamiera;
- Nella terza fase il punzone scende fino ad avere contatto con la lamiera ed inizia il processo di imbutitura; la forza dettata dal punzone costringe la lamiera a scorrere verso l'interno della matrice causando la sua deformazione;
- Nella quarta fase lo stampo si apre con la corsa del punzone verso l'alto successivamente seguito dal premilamiera; in questo istante avviene l'espulsione del pezzo attraverso il rilassamento della molla precedentemente caricata con la chiusura dello stampo.

La differenza principale tra imbutitura e stampaggio risiede nella forza applicata sulla lamiera dal premilamiera. Infatti nell'imbutitura si deve avere uno scorrimento della lamiera e quindi non deve essere eccessiva la forza di chiusura, mentre nello stampaggio il premilamiera deve tenere ferma la lamiera che si deforma sotto l'azione del punzone [22].

4.1.1. COMPORTAMENTO DELLE FIBRE DEL MATERIALE

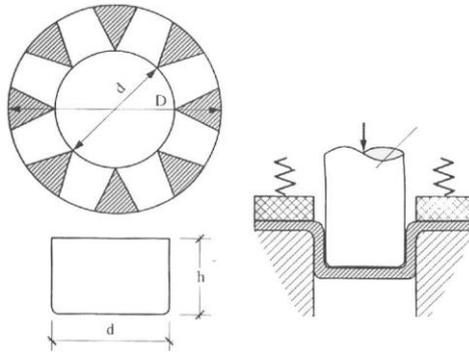


Figura 4.2 Rappresentazione fibre di materiale durante la formatura di un contenitore cilindrico

Considerando la realizzazione di un contenitore cilindrico come mostrato in **Figura 4.2**, la trasformazione della lamiera di partenza richiede che i triangoli tratteggiati evidenziati vengano cancellati, in modo tale da ottenere le pareti verticali del componente finale. Durante la lavorazione la compressione del materiale tende a formare delle pieghe che sono impedito dal prelamiera. Inoltre la parte di lamiera che si deforma all'interno della matrice è soggetta a trazione verticale. In particolare si può affermare che ogni elemento di materiale è soggetto a sforzi radiali di tensione e a sforzi tangenziali di compressione. Sono queste sollecitazioni che causano variazioni di spessore nel componente finito. In particolare nelle zone tese si assiste ad assottigliamenti, mentre nelle zone compresse si assiste a ispessimenti. Questo dimostra che i pezzi imbutiti non hanno spessore costante.

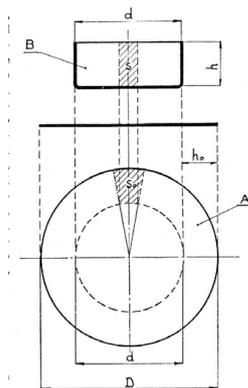


Figura 4.3 Deformazioni parete verticale contenitore cilindrico

Dalla **Figura 4.3** si evidenzia che il fondo del cilindro non ha subito deformazioni mentre la parete verticale si è deformata notevolmente, infatti l'elemento s_0 tratteggiato ha cambiato la sua forma da trapezoidale a rettangolare; allo stesso tempo lo stesso elemento si piega di 90° . Teoricamente la lavorazione che riguarda l'imbutitura non dovrebbe alterare lo spessore iniziale della lamiera; nella realtà però si può assistere a variazioni anche notevoli di spessore che bisogna opportunamente controllare.

Lo studio del comportamento delle fibre del materiale è molto importante per poter prevedere possibili stiramenti che se eccessivi portano a strappi della lamiera, o anche eccessive compressioni che possono portare ad accumuli di materiale in determinate zone del componente.

In componenti di grandi dimensioni è necessario controllare adeguatamente il bordo del blank iniziale inserendo il premilamiera che agisce in modo da distendere la lamiera mentre nella parte centrale avviene l'imbutitura. Questo è molto importante nel caso dello stampaggio a freddo, perché nello stampaggio a caldo, il premilamiera oltre che per la motivazione precedentemente esposta, serve per accompagnare nel migliore dei modi la lamiera sul punzone. Infatti la lamiera che è inizialmente portata ad una temperatura di 950°C subisce sia una dilatazione termica, sia un aumento della duttilità, diventando così più difficile da gestire durante la sua discesa all'interno dello stampo.

L'utilizzo del premilamiera permette di evitare la formazione di grinze; queste si verificano nel momento in cui la lamiera non è tesa uniformemente, quindi si avrebbe uno scorrimento non uniforme del materiale verso il centro dello stampo. Il premilamiera deve quindi esercitare la massima pressione possibile tenendo conto della resistenza del materiale.

Successivamente (**Figura 4.4**) viene riportato uno schema completo di stampo semplice per imbutitura.

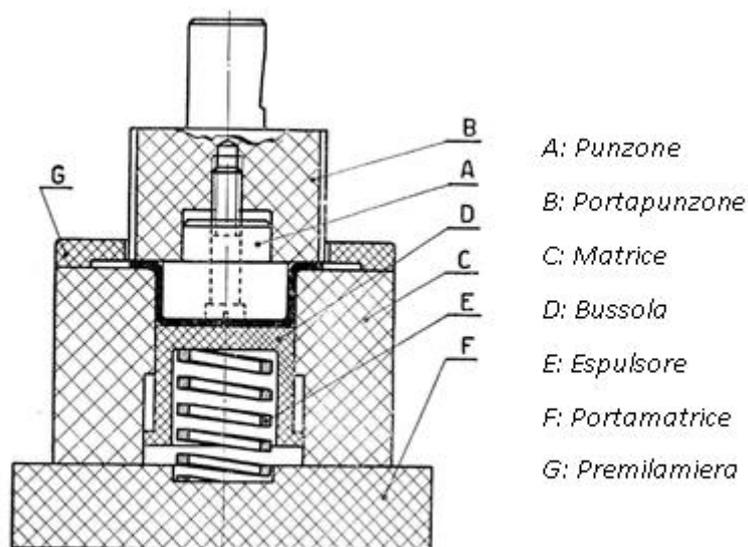


Figura 4.4 Componenti di uno stampo

4.2.FORMATURA A CALDO

L'obiettivo della formatura a caldo è ottenere geometrie complesse e parti ad elevata resistenza, minimizzando allo stesso tempo il ritiro elastico e la distorsione. I più comuni acciai da formatura a caldo sono a base di Boro (tra 0.001% e 0.005% di Boro); il più utilizzato a livello industriale è il 22MnB5. La formatura a caldo con questi acciai è in uso dal 1990 per varie parti della struttura dei veicoli e vi sono due tipologie di processo: formatura diretta e formatura indiretta [23].

4.2.1. DIRECT HOT FORMING PROCESS

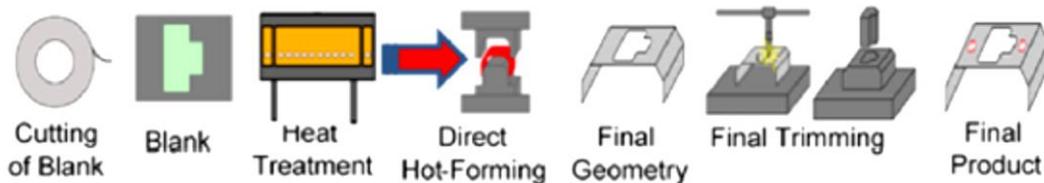


Figura 4.5 Fasi del processo di formatura a caldo diretto

Durante il Direct Hot Forming, la formatura del blank è eseguita ad una temperatura di completa austenitizzazione (minimo di 850°C), seguita da una tempra con velocità di raffreddamento maggiore di 50°C/s. Inizialmente la microstruttura dell'acciaio è composta da ferrite e perlite, con le seguenti proprietà a temperatura ambiente: carico di snervamento pari a 350-400 MPa, carico di rottura pari a 550-600 MPa e allungamento a rottura pari al 25%.

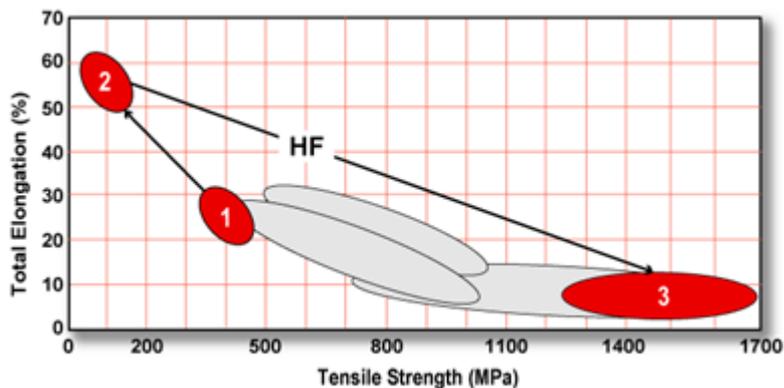


Figura 4.6 Variazione proprietà acciai durante le fasi della formatura a caldo

Dalla **Figura 4.6** si evince a titolo di esempio come variano le caratteristiche del materiale durante le fasi di riscaldamento (1→2) e successiva tempra (2→3).

Nel primo step il foglio di lamiera è tranciato in modo da ottenere il cosiddetto blank che rappresenta la forma iniziale della lamiera, prima di cominciare il processo. Gli spessori variano in funzione del processo di ottenimento della lamiera: nel caso di laminazione a caldo la lamiera assume spessori maggiori a 2 mm, nel

caso di laminazione a freddo la lamiera raggiunge spessori inferiori a 2 mm. Questo step prende il nome di *blanking*. Esso è un processo che avviene a freddo nel quale il blank (**Figura 4.7**) è ottenuto tagliando la lamiera applicando una sufficiente forza di taglio. Il punzone e la matrice che realizzano il taglio sono realizzati in acciai ad alta durezza e le loro geometrie sono customizzate in funzione del tipo di geometria da ottenere.

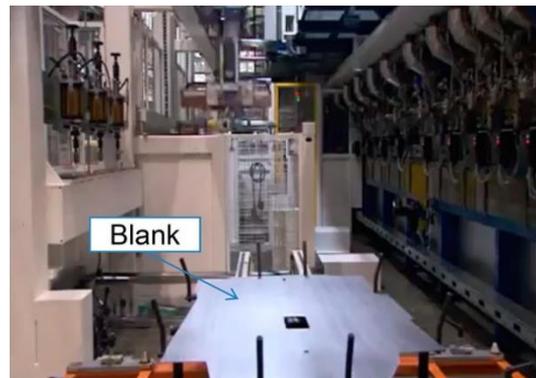


Figura 4.7 Blank

Nel secondo step il blank viene posto all'interno del forno (**Figura 4.8**). Per far aumentare la formabilità del materiale, esso deve prima essere riscaldato fino a circa 900°C per trasformare la microstruttura in austenite. Generalmente si utilizza un processo di riscaldamento continuo; tipicamente il tempo in forno è di 5-8 minuti per garantire una completa ed omogenea austenitizzazione. La gran parte dei forni opera in atmosfera inerte mediante azoto, idrogeno o argon per evitare l'ossidazione e la decarburazione dell'acciaio.

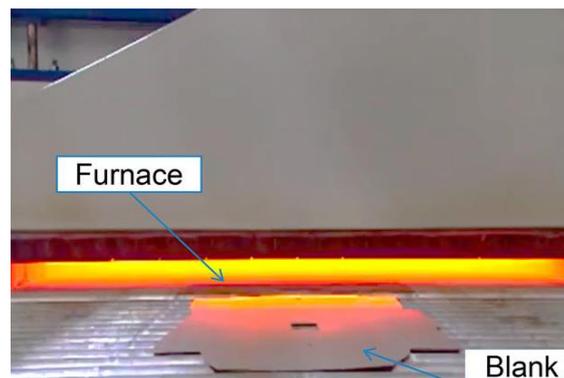


Figura 4.8 Inserimento del blank all'interno del forno

L'esposizione dell'acciaio ad alte temperature può causare grandi variazioni di attrito a causa dei cambiamenti riguardanti la topografia superficiale, la rimozione dello strato di ossido e l'eccessiva usura dello stampo. Un approccio possibile per superare questo problema di attrito è quello di applicare idonei rivestimenti o effettuare altri trattamenti superficiali sull'acciaio [24].

Al momento il più usato è un rivestimento di Al-Si per prevenire la formazione di ossido. Altri rivestimenti includono zincatura a caldo, Ni-Fe, Zn-Ni, e sostanze organiche[23].

Nel terzo step il blank caldo viene trasferito in uno stampo (**Figura 4.9**). Robot o trasportatori lineari possono trasferire il blank nello stampo in circa 5 secondi. Per proteggere il sistema di trasporto dall'eccessivo riscaldamento e minimizzare la perdita di calore del blank, potrebbe essere usato un isolante termico. Un esempio è il posizionamento di scudi termici tra il blank e il sistema di trasporto. Una volta trasferito il blank, il posizionamento assicura che il blank sia disposto precisamente nello stampo.

È importante che il tempo di trasporto sia il più basso possibile per minimizzare l'ossidazione e la decarburazione delle lamiere non rivestite e ancor più per far diminuire il meno possibile la temperatura in modo tale che si mantenga una microstruttura austenitica. Nel caso in cui dovesse raggiungersi la temperatura limite di austenitizzazione prima della tempra, la microstruttura presenterà zone di ferrite proeutetoidica e quindi, dopo la tempra, non risulterà completamente martensitica. Inoltre la presenza di ferrite proeutetoidica durante lo stampaggio a caldo compromette la formabilità della lamiera.

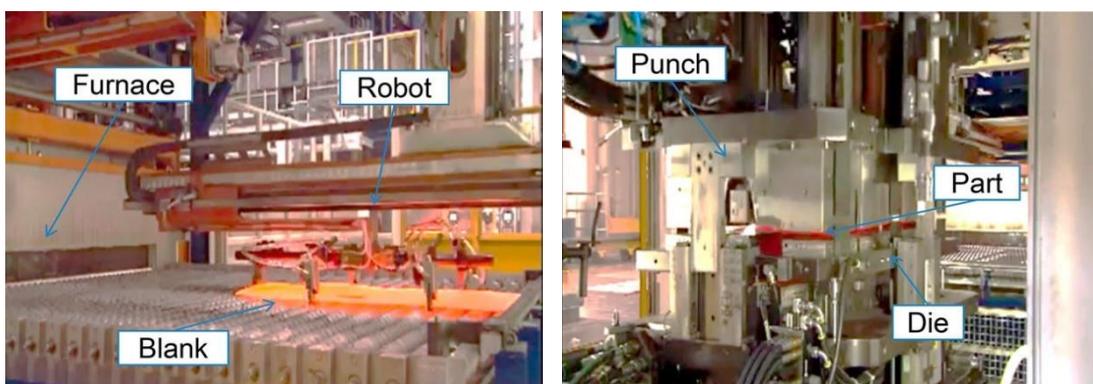


Figura 4.9 Trasferimento del blank dal forno alla pressa

Nel quarto step la pressa realizza la geometria definitiva. Le presse per formatura a caldo sono costituite da punzone, matrice, e premilamiera. Il blank vincolato all'interno dello stampo viene rapidamente stampato in circa 2s. Le temperature di formatura tipicamente partono da 850°C e scendono a 650°C alla fine dello stampaggio. Mentre in campo austenitico il carico di snervamento vero si mantiene circa costante a 150-300 MPa con un allungamento a rottura più grande del 50%. Questo facilita lo stampaggio con geometrie complesse e l'indurimento della parte da formare con limitati problemi di ritorno elastico. L'austenitizzazione omogenea elimina anche la texture sviluppata durante la laminazione assicurando l'isotropia plastica.

Nello step 5 avviene la tempra che garantisce il miglioramento della resistenza del componente stampato. Quando la formatura è completa, la lamiera stampata è a contatto con punzone e matrice e si tempra su

entrambi i lati. Differentemente dallo stampaggio a freddo, il punzone e/o la matrice sono raffreddati con acqua che scorre attraverso opportuni canali di raffreddamento realizzati all'interno dei due componenti della pressa. La pressione applicata dal sistema punzone-matrice viene mantenuta per circa 8-12s con una significativa velocità di raffreddamento più alta di 30°C/s [25]. Così, la parte formata è rapidamente temprata passando attraverso il range di temperatura Ms-Mf, rispettivamente di 410-230 °C nel caso di un acciaio 22MnB5 ; la velocità di raffreddamento critica è di 25 °C/s (**Figura 4.10**).

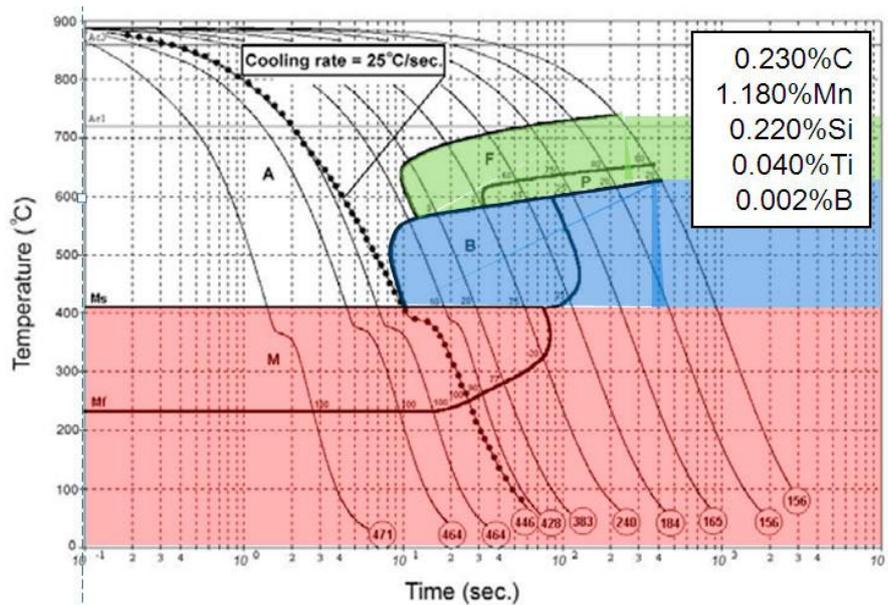


Figura 4.10 Curve di raffreddamento diagramma CCT di un acciaio 22MnB5

Dopo la tempra, la parte formata a caldo presenta una microstruttura martensitica con l'eccezione di una piccola frazione (<5%) che presenta austenite residua. Il componente viene successivamente fatto raffreddare a temperatura ambiente al di fuori dello stampo come illustrato in **Figura 4.11**.

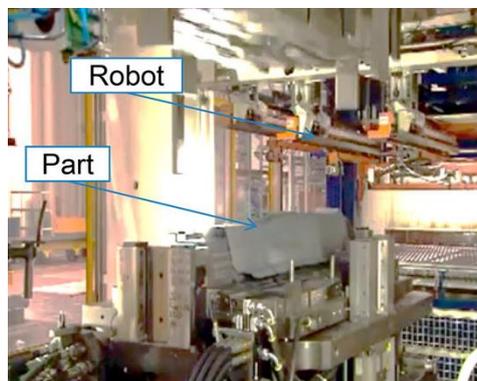


Figura 4.11 Raffreddamento in aria

Le proprietà a temperatura ambiente del componente dopo tempra sono: carico di snervamento pari a 1000-1250 MPa, carico di rottura pari a 1400-1700 MPa, e allungamento a rottura pari a 4-8%. Il tempo totale dal

trasferimento della lamiera tramite il robot e la fine della tempra è di circa 20-30 sec e dipende marcatamente dalla velocità di tempra e dal sistema di tempra. Con componenti di piccole dimensioni la formatura e la tempra di pezzi multipli riduce il tempo di processo[23].

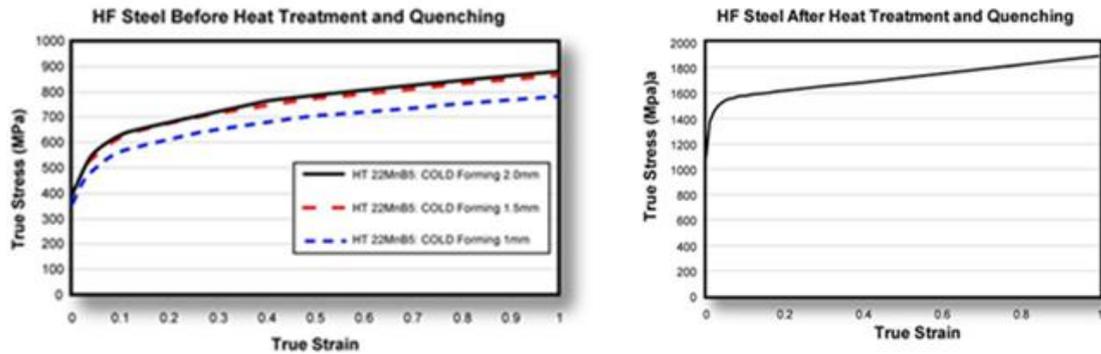


Figura 4.12 Curve σ - ϵ per differenti spessori della lamiera prima e dopo il trattamento di riscaldamento e successiva tempra

In **Figura 4.12** si evidenziano le differenti proprietà meccaniche dell'acciaio 22MnB5 prima e dopo il trattamento termico. In particolare si nota come si passa da un valore di snervamento pari a circa 400 MPa a un valore di circa 1400 MPa.

Lo **step 6** riguarda le operazioni post-formatura. Esse includono la granigliatura per rimuovere lo strato di ossido in modo tale da facilitare sia la saldatura a punti, sia l'adesione della vernice. Lavorazioni come taglio, rifilatura e/o punzonatura possono essere utilizzate per affinare la geometria, come mostrato in **Figura 4.13**.

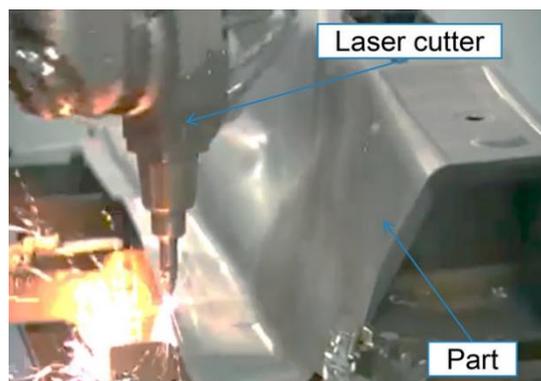


Figura 4.13 Rifila del componente mediante laser

Il limite della microstruttura martensitica degli acciai UHSS è relativo alle lavorazioni meccaniche che rendono più difficoltose le lavorazioni di post-processing. Qualunque strumento di taglio, trancitura, punzonatura richiede materiali appropriati e capacità dell'apparecchiatura per resistere agli elevati carichi generati durante queste operazioni; in generale sono infatti utilizzate lavorazioni meccaniche tramite laser [26].

4.2.2. INDIRECT HOT-FORMING PROCESS

Il processo di formatura indiretta comprende la formatura e la rifila a freddo prima della formatura a caldo. Lo stampo dopo la rifila è soggetto al ciclo di riscaldamento classico. La formatura a caldo aggiuntiva è possibile per quelle aree dello stampato che sono difficili da formare a temperatura ambiente. Comunque il processo di formatura a caldo indiretto ha un incremento di costi rispetto il processo di formatura a caldo diretto a causa dei due step di formatura che sono richiesti al posto di uno.

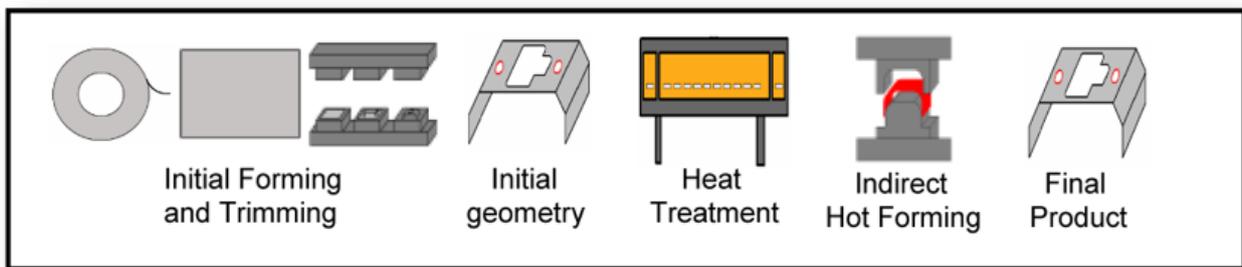


Figura 4.14 Fasi del processo indiretto di formatura a caldo

Il processo di formatura a caldo indiretto è stato sviluppato per ridurre l'usura dello stampo quando si tratta un acciaio non rivestito. L'aggiunta della formatura a caldo riduce il movimento tra l'acciaio e lo stampo, ottenendo così una minore usura dello stampo. Al contrario con la formatura a caldo indiretta il raffreddamento veloce dello stampato finito avviene attraverso le superfici dello stampo. Il processo di formatura indiretto è stato introdotto per migliorare lo stampaggio di forme più complesse. Poiché la formatura principale è fatta con lo stampaggio a freddo e i dettagli con lo stampaggio a caldo, possono essere realizzate geometrie più complesse e la distorsione è minimizzata.

Un altro processo simile allo stampaggio a caldo indiretto è il Post-Forming Heat-Treating. Generalmente gli acciai alto resistenti hanno un allungamento percentuale molto ridotto. L'obiettivo di questo processo è quello di creare la stampata da un acciaio basso resistente ma formabile con un processo di formatura a freddo. Il processo finale di riscaldamento e tempra crea una stampata alto resistente. Il problema principale che ha limitato la diffusione del PFHT è il mantenimento della geometria durante il trattamento di riscaldamento e tempra.

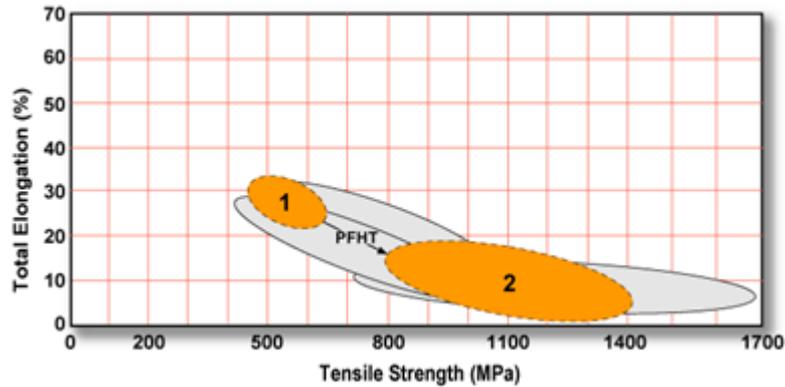


Figura 4.15 Variazione proprietà acciaio durante il processo di PFHT

4.3.CONFRONTO TRA STAMPAGGIO DIRETTO E INDIRECTO

Il vantaggio principale dello stampaggio a caldo indiretto è la prevenzione per quel che riguarda l'infragilimento da metallo liquido e quindi la compatibilità con le lamiere d'acciaio zincato che provvede alla protezione dalla corrosione nella parte finale del processo. Comunque l'utilizzo dello stampaggio a caldo indiretto non è diffuso come quello diretto. Lo stampaggio indiretto comprende il costo aggiuntivo del processo di formatura a freddo ed ha gli stessi svantaggi della formatura a freddo tradizionale. La protezione catodica contro la corrosione data dall'acciaio zincato stampato a caldo col metodo indiretto è irrilevante nelle applicazioni tipiche dei componenti del BiW [25].

4.4.CONFRONTO TRA STAMPAGGIO A CALDO E A FREDDO

Lo stampaggio a freddo è un processo che avviene al di sotto della temperatura di ricristallizzazione. Lo stampaggio a caldo, invece, avviene almeno alla temperatura di ricristallizzazione. Sopra la temperatura di ricristallizzazione, la microstruttura è esclusivamente austenite FCC. A causa dell'elevato impaccamento, la struttura cristallina di austenite FCC presenta uno scorrimento preferenziale rispetto alla struttura CCC della ferrite. Tutti questi fattori si combinano per fornire minore resistenza allo snervamento, maggiore duttilità, maggiore isotropia plastica e quindi maggiore formabilità durante la formatura a caldo. Lo stampaggio a caldo permette all'acciaio di mantenersi in una fase microstrutturale ottimale e mostra ottimali proprietà meccaniche in ogni stadio del processo: tenero e duttile durante la formatura e estremamente duro nello stadio finale.

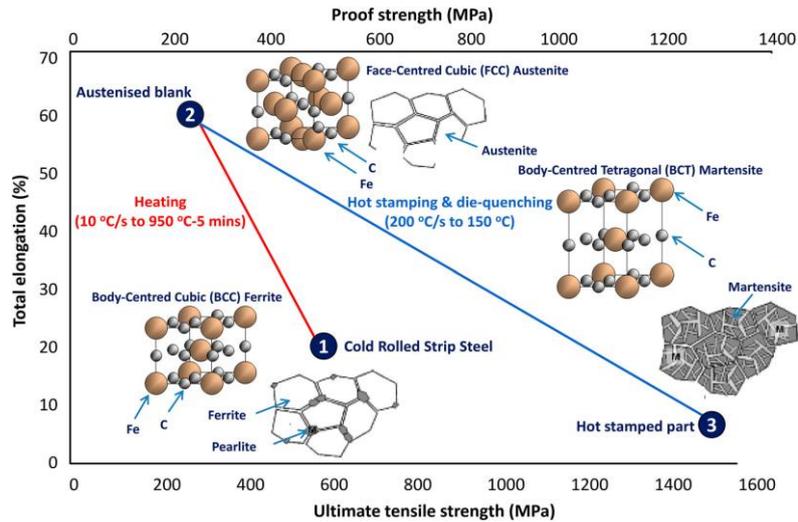


Figura 4.16 Analisi della microstruttura dell'acciaio durante le trasformazioni di fase

Un'elevata formabilità permette una riduzione dello spessore non compromettendo il limite di formatura, dove il limite di formatura è proporzionale allo spessore. Il limite di formatura è inteso come il massimo delle deformazioni principali che è tollerabile senza avere quindi rottura.

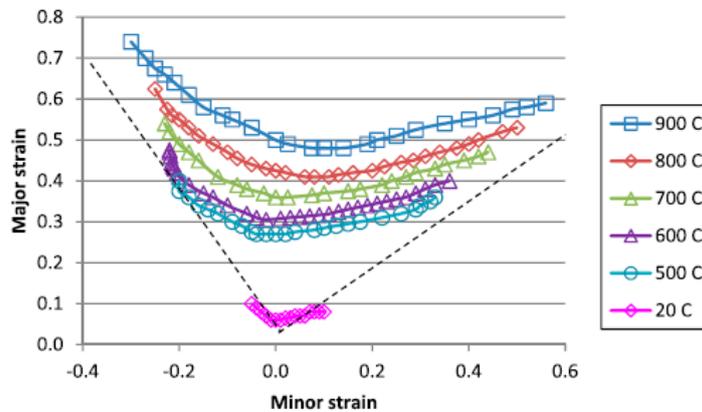


Figura 4.17 Forming Limit Curve di un acciaio 22MnB5 al variare della temperatura

Dalla **Figura 4.17** si possono osservare le curve di formatura dell'acciaio 22MnB5 (0,23% C, 1,18% Mn, e 0,002% B); esse sono state ottenute considerando un provino di spessore pari a 1,5 mm e sono rappresentate al variare della temperatura, includendo le temperature tipiche dello stampaggio a caldo 600-900 °C in cui il limite di formabilità è approssimativamente 0,3-0,4 [27]. Al contrario, a temperatura ambiente in fase martensitica il limite di formabilità è pari a 0,05.

La **Figura 4.18** mostra la variazione del limite di formabilità teorico dipendente sia dallo spessore sia dal valore del coefficiente di incrudimento n .

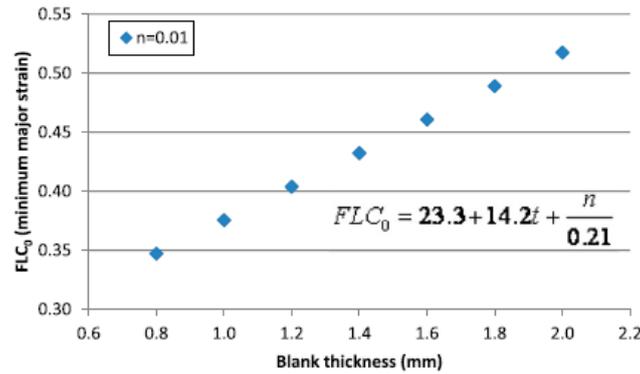
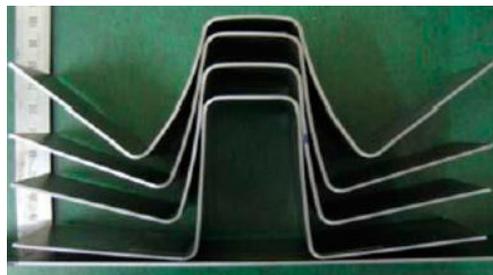


Figura 4.18 Andamento del minimo del FLC in funzione dello spessore della lamiera

Una elevata formabilità permette di formare parti complesse e di varia geometria. La libertà nelle geometrie comporta numerosi vantaggi come l’ottimizzazione della rigidità locale nel componente.

La rigidità locale è importante per la guidabilità del veicolo e per lo smorzamento di rumori e vibrazioni; soprattutto è importante per la resistenza agli urti, dove un’elevata rigidità ostacola l’accesso all’interno del veicolo di oggetti che impattano dall’esterno, mentre le parti a bassa resistenza deformandosi garantiscono un elevato assorbimento di energia dovuto all’urto. La rigidità è funzione del modulo elastico e del materiale e della geometria, dove la riduzione dello spessore può ridurre la rigidità e peggiorare la resistenza agli urti.

Altro parametro fondamentale è il ritorno elastico che si verifica quando il componente stampato cerca di tornare nella sua configurazione iniziale. Una maggiore resistenza del materiale aumenta il ritorno elastico all’aumentare della deformazione elastica. La riduzione di spessore aumenta il ritorno elastico riducendo la rigidità della parte e le zone con deformazione plastica diminuiscono. Il ritorno elastico può condurre ad imprecisioni dimensionali che devono essere corrette con delle operazioni post processo o devono essere eliminate forzando la formatura del materiale per contrastare il ritorno elastico costringendo il pezzo a stare nella configurazione finale.



- Rp0.2 = 600 MPa (1.5 mm)
- Rp0.2 = 350 MPa (1.5 mm)
- Rp0.2 = 250 MPa (1.5 mm)
- Rp0.2 = 150 MPa (1.5 mm)

Figura 4.19 Ritorno elastico al variare della resistenza del materiale di pari spessore

Dalla **Figura 4.19** si può vedere l’influenza della resistenza del materiale sul ritorno elastico nel caso di stampaggio a freddo di una lamiera con spessore pari a 1,5 mm. Al contrario nella **Figura 4.20** si nota

l'assenza di ritorno elastico nello stampaggio a caldo di acciaio 38MnB5 con uno spessore di 1,5 mm e un carico di snervamento finale di 1400Mpa [28].

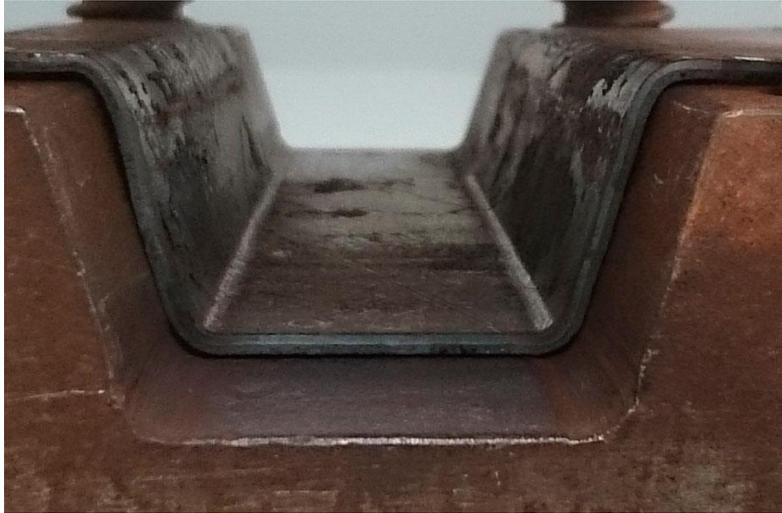


Figura 4.20 Ritorno elastico di un materiale ad alta resistenza

4.5.PARTIAL HARDENING PROCESS

I componenti formati a caldo in una fase completamente martensitica presentano resistenze a trazione e durezza molto elevate; inoltre presentano livelli molto bassi di duttilità prima della rottura, il che limita il loro uso a determinati componenti. Per alcune applicazioni come i montanti centrali e altri componenti che possono essere sottoposti a carichi d'urto, può essere migliorativo creare delle regioni del componente con microstrutture più duttili. In definitiva quindi si avrà una zona completamente martensitica con elevate prestazioni meccaniche, e una zona in cui si evita la formazione di martensite mantenendo una struttura ferritica che si presenta più duttile e con minore resistenza a trazione.

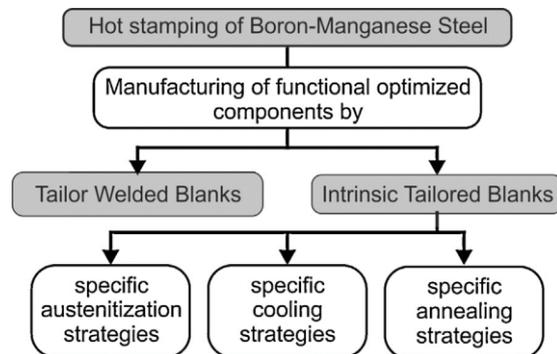


Figura 4.21 Varianti del processo di Partial Hardening

La **Figura 4.21** mostra che per ottenere quindi una microstruttura differenziata è possibile agire in due differenti modi:

- Lamiera TWB (Tailored Welded Blank);
- Differenziazione termica.

Nel primo caso si utilizzano due materiali differenti che vengono saldati da loro; in particolare vi sarà un materiale temprabile e uno non temprabile in modo tale che esso non risenta del processo di austenitizzazione e successiva tempra all'interno dello stampo.

Nel secondo caso si può operare in due modi differenti:

- Riscaldamento differenziato della lamiera;
- Riscaldamento differenziato dello stampo.

Nel primo caso, quando la lamiera viene posta all'interno del forno per effettuare l'austenitizzazione, si cerca di isolare una parte della lamiera in modo tale che non raggiunga la temperatura di austenitizzazione (**Figura 4.22 a**).

Nel secondo caso invece si agisce direttamente sullo stampo mantenendo una temperatura elevata ($T \sim 400^\circ\text{C}$) in una parte dello stesso (**Figura 4.22 b**).

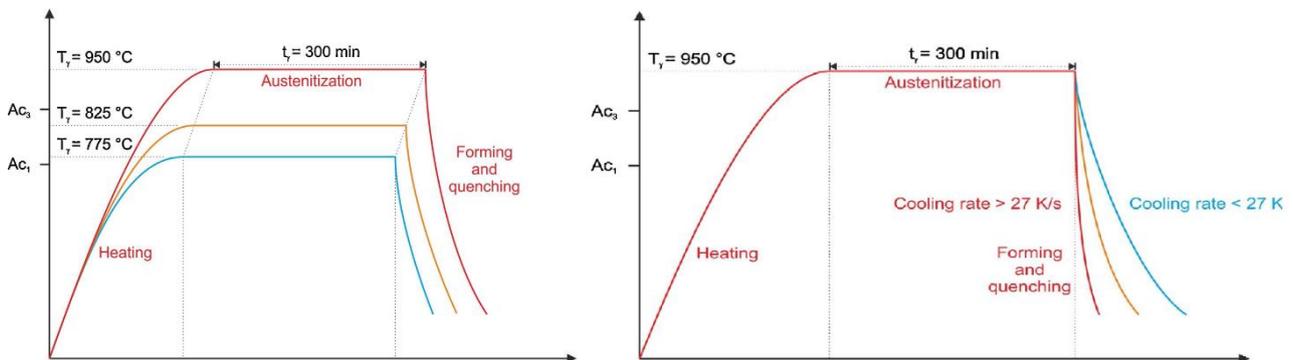


Figura 4.22 Andamento della temperatura nei due casi di: a) Riscaldamento differenziato della lamiera; b) Riscaldamento differenziato dello stampo

Per avere contezza di quanto si verifica microstrutturalmente in queste ultime due alternative è necessario analizzare il diagramma CCT del materiale in questione; infatti tramite le curve di raffreddamento si evidenziano le fasi che si creano durante il processo di formatura (**Figura 4.23**).

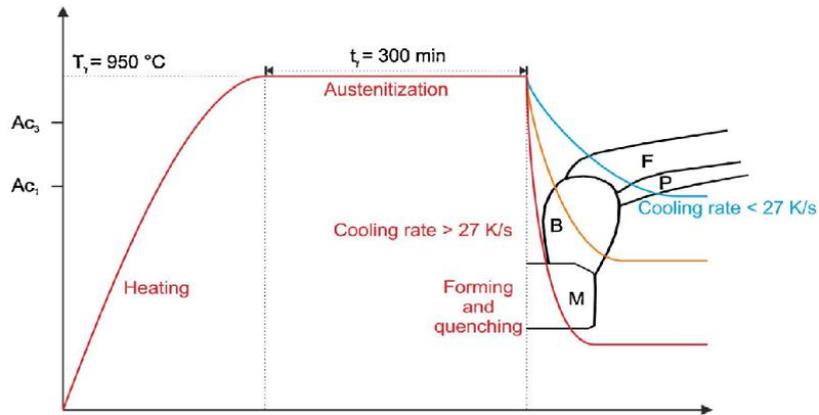


Figura 4.23 Andamento delle temperature nel caso di riscaldamento differenziato dello stampo con sovrapposizione al diagramma CCT

Si nota che una velocità di raffreddamento minore di 27 K/sec evita la formazione di martensite dando origine ad una microstruttura ferritica duttile [29].

Prendendo come esempio il montante centrale della struttura di un autoveicolo è possibile osservare l'obiettivo di questo particolare processo, come mostrato nella seguente figura [30]:

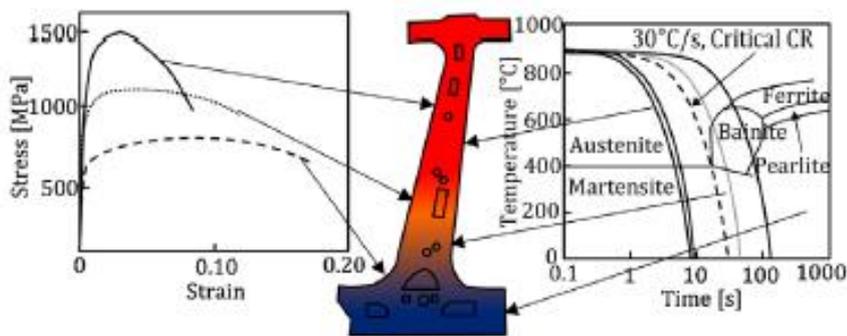


Figura 4.24 Esempio del Partial Hardening su montante centrale

Si nota come le caratteristiche tra le zone estreme sono completamente differenti in termini di proprietà meccaniche e inoltre si nota la presenza di una zona di transizione inevitabile per i meccanismi di diffusione del calore tra le due parti a differente temperatura.

4.6. DIAGRAMMA LIMITE DI FORMABILITA' (FLD)

L'FLD (Forming Limit Diagram) è una rappresentazione grafica dei limiti imposti dalla deformazione di un materiale sottoposto a formatura, cioè le deformazioni principali maggiori e minori in cui si verifica la strizione locale. Sebbene le rotture rappresentino il limite ultimo nelle operazioni di formatura, la strizione locale è generalmente indesiderata. La curva mostrata in **Figura 4.25** è chiamata FLC (Forming Limit Curve)

e separa le zone di rottura da quelle salve. Le parti sinistra e destra del grafico sono state originariamente proposte da Goodwin (1968) e da Keeler (1961), attraverso test meccanici.

Il grafico può essere ottenuto mappando sui due assi di riferimento le deformazioni maggiori e minori (ϵ_1 ed ϵ_2). Queste possono essere misurate utilizzando mediante delle griglie che prevedono schemi regolari di cerchi, linee o punti applicati in modo casuale. Deformando il provino si deforma anche la griglia. La deformazione maggiore è definita come la deformazione nella direzione della deformazione massima, la deformazione minore è la deformazione perpendicolare alla precedente. La deformazione maggiore è sempre positiva e tracciata sull'asse delle ordinate, mentre la deformazione minore viene tracciata lungo l'asse delle ascisse e può essere positiva o negativa come mostrato in **Figura 4.25** [31]:

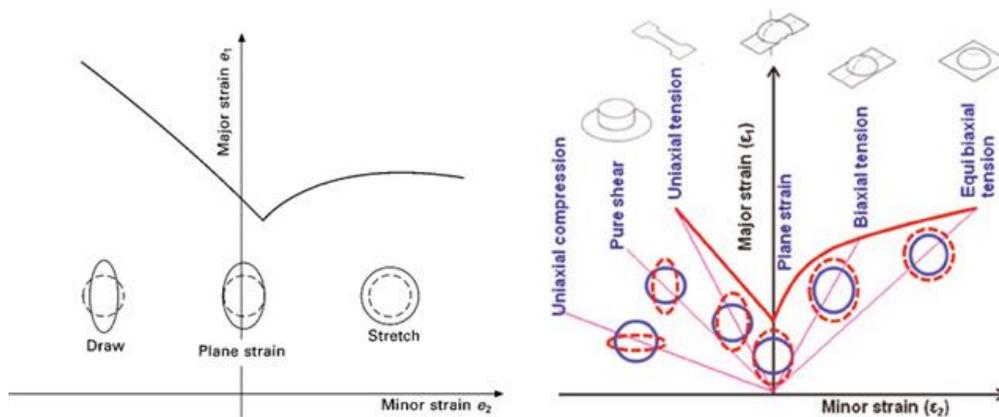


Figura 4.25 Curva limite di formabilità

L'intersezione della curva limite con l'asse verticale è nota come FLD_0 , la quale dipende principalmente dal coefficiente di incrudimento n e dallo spessore del materiale. Le curve limite di formabilità sono state studiate per acciai MILD, HSS e AHSS e approssimate mediante l'equazione di Keeler-Brazier dipendente dal coefficiente di incrudimento n e dallo spessore iniziale del materiale t_0 :

$$FLD_0 = \ln \left[1 + (23.3 + 14.13t_0) \frac{n}{0.21} \right]$$

Più comunemente i dati sono rilevati mediante un test effettuato con un punzone emisferico. Diverse condizioni di stress vengono simulate modificando la larghezza delle strisce di forma circolare utilizzate per le prove. Il diagramma limite di formatura può essere determinato per le deformazioni derivanti dalla tensione biassiale (come nella formatura) ma anche per la trazione e la compressione, come mostrato di seguito [32]:

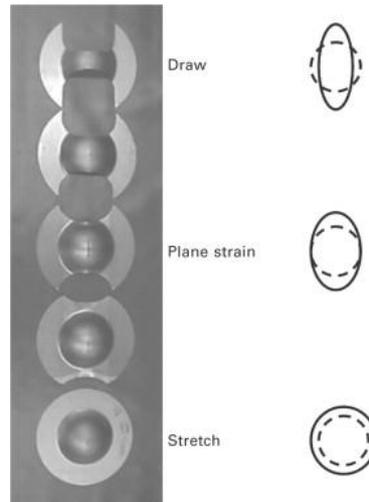


Figura 4.26 Provino per la determinazione sperimentale della curva di formabilità

Quello appena descritto è il Nakajima test, basato sul principio di deformazione di lamiere metalliche di differenti geometrie utilizzando un punzone emisferico fino alla rottura della lamiera stessa. Variando lo spessore del provino si verificano diverse condizioni di imbutitura e stiramento sulla superficie della lamiera, passando da una deformazione biassiale ad un semplice carico di trazione.

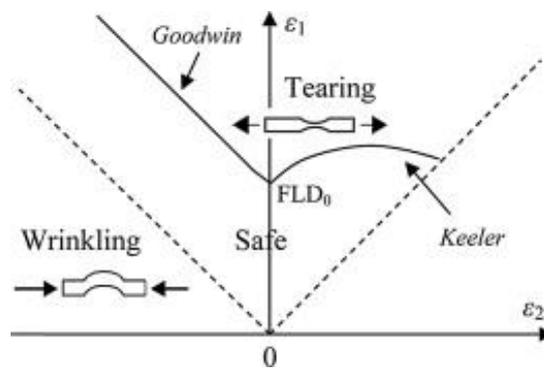


Figura 4.27 Curva limite di formabilità

Analizzando l'FLC i punti situati sotto la linea tratteggiata a -45° indicano un ispessimento della lamiera e quindi una forte tendenza a formare grinze.

Un altro punto da tenere in considerazione è dettato dai fattori che influenzano l'FLC tra cui lo spessore del provino, le condizioni di prova e la storia di deformazione. È stato rilevato che un aumento dello spessore del provino posticipa la rottura. Questo sposta la curva verso la direzione positiva dell'asse delle ordinate, quindi verso deformazioni ϵ_1 maggiori. Inoltre il raggio di curvatura del punzone emisferico e le condizioni di attrito influenzano la deformazione del materiale durante il test. L'aumento della condizione di attrito comporta un più facile cedimento spostando verso il basso la curva lungo l'asse delle ordinate. Pertanto i risultati dei test di due diverse dimensioni degli utensili non possono essere confrontati direttamente. Inoltre nei test utilizzati

per stimare gli FLC il materiale viene sottoposto ad una deformazione costante fino alla frattura, mentre nei processi di formatura pratica le storie di deformazione non sono costanti.

Per tali ragioni questi diagrammi devono essere utilizzati con attenzione nel prevedere le rotture durante il processo di formatura.

5. SIMULAZIONE DEI PROCESSI DI FORMATURA

5.1. CENNI STORICI

Il concetto di *virtual manufacturing* è stato sviluppato per migliorare le prestazioni industriali, essendo uno dei modi più efficienti per ridurre i tempi di produzione e migliorare la qualità dei prodotti. La simulazione numerica dei processi di formatura dei metalli, come componente del processo di fabbricazione virtuale, ha un contributo molto importante nella riduzione dei tempi di consegna.

Il metodo degli elementi finiti (FEM) è attualmente la procedura numerica più utilizzata per la simulazione dei processi di formatura della lamiera. La precisione dei programmi di simulazione utilizzati nell'industria è influenzata dai modelli costitutivi e dalle curve limite di formatura derivanti dalla struttura dei materiali utilizzati. Da quanto evidenziato possiamo notare una connessione molto stretta tra la produzione virtuale come concetto generale, il metodo degli elementi finiti come strumento di analisi e le leggi costitutive del materiale. Di conseguenza la modellistica del materiale è strategica quando devono essere realizzati dei modelli reali.

La possibilità di eseguire simulazioni dei processi di formatura sulle lamiere è stata per lungo tempo un desiderio irraggiungibile nel settore del manufacturing. Molto importante per gli ingegneri di processo è poter prevedere eventuali difetti e minimizzare la necessità di costose modifiche agli stampi.

Da un punto di vista teorico il problema della formatura è stato considerato molto complicato a partire dai primi anni degli anni 60-70 quando ha cominciato a diffondersi l'analisi FEM.

La modellazione dei problemi di formatura della lamiera richiede una caratterizzazione accurata di effetti, come il comportamento non lineare del materiale, grandi deformazioni in gioco e le complicate condizioni di contatto tra lo stampo e il blank.

La simulazione di un processo reale di formatura, considerando il tempo di calcolo e la potenza computazionale diventa un compito estremamente impegnativo [33].

Nel 1970 la prima formulazione FEM teoricamente corretta per il problema delle grandi deformazioni è stata presentata da Hibbitt et al. [34]. Più tardi nel 1975 McMeeking [35] e Rice e Bathe [36] hanno presentato le formulazioni UL (Updated Lagrangian) corrette del problema.

I tentativi di risolvere i problemi di formatura erano basati su sollecitazioni piane o formulazioni assialsimmetriche, e dal punto di vista teorico erano spesso non del tutto coerenti.

La prima formulazione 3D del problema di formatura teoricamente corretta fu presentata da Wang e Budiansky nel 1978 [37]. Il metodo presentato era basato su una formulazione TL (Total-Lagrangian) e coinvolgeva elementi membrana triangolari a sollecitazione costante. Il modello di materiale era elastoplastico. La soluzione è stata calcolata con uno schema incrementale di Eulero in avanti. I metodi basati su tale schema di soluzione sono a volte indicati come metodi statici espliciti.

Il decennio successivo ha visto lo svilupparsi di molte attività nel settore. Diversi metodi basati su formulazioni 2D e 3D sono stati realizzati. A seconda della scelta della cinematica, della legge costitutiva e delle procedure di soluzione, i problemi erano descritti con metodi statici impliciti, statici espliciti, rigido-plastici.[33]

5.2.SIMULAZIONE FEM NEI PROCESSI DI FORMATURA

Nello sviluppo di un prodotto si parte dalle specifiche tecniche richieste e si procede a realizzare tutta l'attrezzatura necessaria per ottenere il componente voluto. Quando ancora non era possibile utilizzare la simulazione virtuale ci si affidava a prototipi che permettevano di ottenere delle risposte concrete ancor prima di procedere con la realizzazione vera e propria delle attrezzature. Nel caso in cui il test sui prototipi non avesse portato a risultati positivi si doveva tornare indietro e modificare il progetto. Questo processo poteva ripetersi per più volte comportando sia una perdita di tempo, ma soprattutto un impiego notevole di denaro. In particolare quando si avviava il processo produttivo potevano verificarsi delle problematiche che portavano all'interruzione del processo con ulteriore dispendio di risorse sia in termini di tempo lavoro sia in termini di denaro.

Con la simulazione si cerca di eliminare le problematiche precedentemente esposte contribuendo allo stesso tempo a migliorare la qualità del componente in esame. Tramite la simulazione infatti è possibile:

- Ridurre il time to market;
- Ridurre i costi di sviluppo dell'attrezzatura;
- Predire l'influenza dei parametri di processo;
- Ridurre il costo della produzione complessivo;
- Migliorare la qualità del prodotto;
- Conoscere maggiormente il comportamento del materiale;
- Ridurre lo spreco di materiale.

Attraverso la simulazione si realizza un modello matematico che cerca di mantenersi il più fedelmente possibile alla realtà. In questo modo avendo a disposizione elevate potenze di calcolo è possibile mediante metodo *trial and error* individuare i colli di bottiglia del processo, superandoli nel minor tempo possibile. L'utilizzo della simulazione non implica la necessità di realizzare modelli fisici, in cui è richiesto un elevato impiego di risorse.

È possibile inoltre prevedere risultati in termini di *manufacturing* come per esempio:

- Predire il flusso di materiale;
- Prevedere l'esistenza di difetti;
- Determinare tensioni, temperature e tensioni residue nel pezzo;

- Determinare la preforma ottimale.

Oltre ad avere informazioni sul componente di lamiera si possono analizzare anche alcuni aspetti degli stampi utilizzati:

- Determinare i carichi pressa durante la formatura;
- Determinare le sollecitazioni degli stampi;
- Valutare la fatica degli stampi;
- Simulare l'influenza della lubrificazione;
- Ottimizzare i processi.

5.3.MODELLAZIONE FEM

La simulazione mediante gli elementi finiti prevede una serie di operazioni di seguito elencate:

- Modellazione della geometria;
- Discretizzazione della geometria;
- Definizione proprietà del materiale;
- Definizione delle condizioni al contorno, delle condizioni iniziale e delle condizioni di carico;
- Definizione dei contatti.

Per quanto concerne la modellazione della geometria degli stampi e del blank, si possono creare linee, curve, solidi e superfici, mediante l'utilizzo di software CAD. Successivamente si procede importando la geometria nel software di simulazione di riferimento per effettuare la discretizzazione della stessa.

Poiché non è possibile risolvere analiticamente problemi molto complessi approssimando il meno possibile la realtà, si ricorre alla discretizzazione della geometria. Quest'operazione consiste nel dividere il dominio in elementi regolari che approssimano la superficie del componente. All'interno della discretizzazione si possono individuare i nodi che delimitano gli elementi utilizzati; gli elementi possono essere:

- Triangolari (2D);
- Quadrangolari (2D);
- Tetraedrici (3D);
- Esaedrici (3D);

Gli elementi generati sono necessari per ottenere un sistema di equazioni che permette di ricavare le soluzioni per ogni elemento.

Per quanto riguarda le proprietà del materiale, esse dipendono dal tipo di problema. È consigliato non utilizzare database di materiali disponibili commercialmente, ma effettuare prima alcune prove sperimentali per identificare più accuratamente le proprietà del materiale nelle condizioni di lavoro inerenti al caso studio.

Le condizioni al contorno, iniziali e le condizioni di carico sono fondamentali per una più precisa simulazione del sistema; esse possono essere applicate alle identità geometriche come punti, curve, superfici e solidi, ma anche ad elementi della mesh.

Dopo la discretizzazione della geometria è necessario ottenere un sistema di equazioni che permetta di traslare il modello fisico in modello matematico. Per la soluzione delle equazioni si distinguono due metodi

- Metodi diretti;
- Metodi iterativi.

I metodi diretti come l'eliminazione di Gauss e la decomposizione LU si utilizzano nel caso di sistemi piccoli fino a 2 dimensioni; i metodi iterativi come Jacobi ,Seidel etc. si utilizzano per sistemi molto grandi oltre le 3 dimensioni.

Per i problemi non lineari, come nel caso dei processi di lavorazione dei metalli, si deve integrare un ulteriore loop di iterazioni. Infatti nei problemi dipendenti dal tempo è necessario ricavare l'avanzamento nel tempo del processo mediante due possibili approcci:

- Approccio implicito;
- Approccio esplicito.

L'approccio implicito è accurato ma computazionalmente molto dispendioso; l'approccio esplicito è più semplice ma meno accurato.

5.4. NON LINEARITA'

Le soluzioni di molti problemi ingegneristici sono basate su un'approssimazione lineare. Nell'analisi strutturale queste approssimazioni sono rappresentate dalle seguenti considerazioni [38]:

- Gli spostamenti sono piccoli e possono essere trascurati nelle equazioni di equilibrio;
- La deformazione è proporzionale alla tensione (modello di Hooke);
- I carichi sono conservativi, indipendenti dagli spostamenti.

Di conseguenza nell'analisi agli elementi finiti il sistema di equazioni che descrive il comportamento della struttura è lineare ed è:

$$Kd = F$$

Dove K è la matrice di rigidità della struttura, d è il vettore degli spostamenti nodali ed F è il vettore delle forze esterne. Le caratteristiche della soluzione di questo problema lineare sono:

- Gli spostamenti sono proporzionali ai carichi;
- La rigidità della struttura è indipendente dal valore del carico.

In realtà il comportamento delle strutture è non lineare, ma le divergenze dalla risposta lineare sono tipicamente piccole e possono essere trascurate in molti problemi.

Da un altro punto di vista però la soluzione di molti problemi ingegneristici necessita di abbandonare le approssimazioni lineari. Per esempio, spostamenti di strutture sottili possono essere così grandi che i cambiamenti della forma della struttura non possono essere trascurati. Molti materiali si comportano in modo non lineare o il modello di materiale lineare non può essere utilizzato se la sollecitazione supera un certo valore. Inoltre i carichi possono cambiare il loro orientamento in funzione degli spostamenti e i supporti possono cambiare durante la sollecitazione. Di conseguenza la struttura risulta non lineare. Se questi fenomeni sono inclusi nell'analisi agli elementi finiti, il sistema di equazioni diventa non lineare e al posto del sistema di equazioni lineari mostrato in precedenza si ottiene un sistema di equazioni non lineare:

$$R(d) = F$$

Le non-linearità strutturali possono essere specificate come segue:

- **Non-linearità geometriche:** l'effetto di grandi spostamenti sulla configurazione geometrica generale della struttura;
- **Non-linearità del materiale:** il comportamento del materiale è non lineare. È possibile distinguere alcuni modelli come:
 - a) Elastico non lineare;
 - b) Elastoplastico;
 - c) Viscoelastico;
 - d) Viscoplastico.
- **Non-linearità delle condizioni al contorno:** gli spostamenti dipendono dalle condizioni al contorno. La più frequente non linearità di questo tipo è rappresentata dal problema dei contatti

5.5.SOFTWARE UTILIZZATI

Nel presente lavoro di tesi sono stati utilizzati in particolare due software commerciali dedicati alla simulazione della formatura della lamiera, AutoForm e Pam-Stamp; una breve descrizione delle caratteristiche di questi software è riportata di seguito.

5.5.1. AUTOFORM

AutoForm è un software basato sugli elementi finiti che viene comunemente utilizzato dalle case automobilistiche per definire, eseguire e analizzare simulazioni di formatura della lamiera sia a freddo, sia a caldo. Il metodo degli elementi finiti utilizzato nel software si basa su tecniche incrementali implicite che consentono risultati accurati per i calcoli numerici. I vantaggi dell'utilizzo della soluzione implicita consistono nel fatto che consente dei time steps maggiori rispetto al metodo esplicito; è possibile combinare elementi grandi e piccoli senza che il tempo di calcolo sia influenzato dalla dimensione dell'elemento più piccolo. Un altro vantaggio del metodo implicito è che consente tempi di calcolo più brevi anche in modelli di materiali

più complessi. Il software utilizza anche un controllo adattivo dei passi temporali che ottimizza gli stessi nella simulazione per quanto riguarda l'accuratezza e il tempo di calcolo. Ciò si ottiene adattando i passi temporali utilizzati nella simulazione in base alla deformazione ed è controllato dal parametro "spostamento massimo" del materiale. AutoForm utilizza anche mesh adattive che consentono una mesh a densità più elevata in punti con geometrie fortemente curve. Questa mesh adattiva permette letture più accurate dei risultati ma porta anche ad un aumento della potenza computazionale necessaria. La strategia di perfezionamento utilizzata nella mesh adattiva per il software è più comunemente nota come metodo h [39].

5.5.2. PAM STAMP

Pam-Stamp è un software basato sul metodo degli elementi finiti sviluppato da ESI Group e il suo utilizzo è dedicato alla formatura della lamiera. È possibile progettare, ottimizzare e verificare i processi di formatura di tubi e lamiera sia a freddo, sia a caldo. Il software è diffuso in tutti i settori in cui è applicata la formatura dei metalli, tra cui quello automobilistico, aerospaziale, elettronico.

Nel dettaglio del metodo degli elementi finiti questo software utilizza elementi shell per effettuare la discretizzazione delle geometrie. Esso utilizza nei metodi di soluzione un approccio esplicito che permette di ottenere risultati molto accurati in termini di gestione dei contatti, di fattibilità e di validazione. Il metodo esplicito con minori time steps permette un'integrazione più precisa del comportamento del materiale durante la fase di formatura; infatti con un approccio implicito su modelli di grandi dimensioni, utilizzare piccoli time steps richiederebbe un eccessivo tempo di calcolo. Il software garantisce inoltre un calcolo accurato della plasticità e delle tensioni residue dopo la formatura, che è la condizione preliminare per l'analisi accurata del ritorno elastico [40].

5.5.3. CARD MATERIALE IN INPUT

Il modello del materiale è un modello matematico che descrive il comportamento di un materiale e consente di prevedere il risultato di un processo complesso come la formatura della lamiera. In AutoForm e Pam-Stamp il modello del materiale fa parte dell'input della simulazione e consiste in tre gruppi principali: Diagramma Limite di Formatura (FLD), la curva di incrudimento e la curva di plasticizzazione.

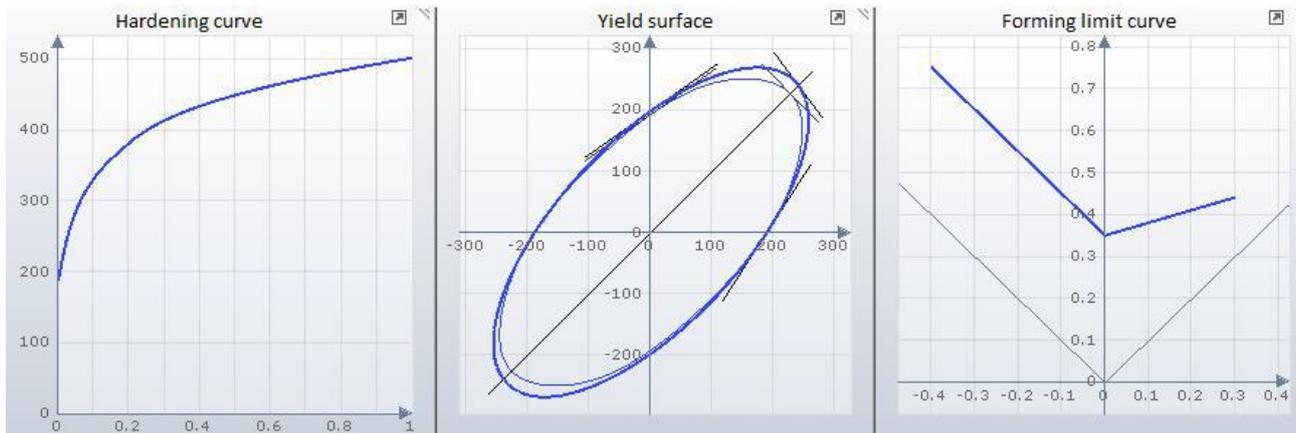


Figura 5.1 Esempio card materiale in input sul software AutoForm

La *curva di incrudimento* descrive come il materiale acquisisce resistenza mentre si deforma. Questo può essere visualizzato usando una curva di deformazione-sollecitazione in cui siano visibili una regione elastica e una regione plastica. La regione elastica viene calcolata dal software mediante la legge di Hooke e quindi non sarà necessaria come input. La parte importante della curva è la regione plastica e può essere prodotta mediante una prova di trazione.

La curva di plasticizzazione è una rappresentazione visiva di come il materiale si deformerà a seconda del tipo di sollecitazione che sta agendo sul sistema. Qualsiasi sollecitazione che non supera i confini della curva provocherà solo una deformazione elastica, il che significa che il campione tornerà nella configurazione iniziale. Nel caso di incrudimento isotropo, la curva crescerà con una maggiore deformazione plastica, e la velocità di crescita della superficie racchiusa dalla curva dipenderà dalla curva di incrudimento. Ciò si verifica poiché il materiale avrà bisogno di una sollecitazione maggiore per la deformazione plastica dopo l'incrudimento. La prima implementazione della curva di plasticizzazione risale a Tresca (1870) e fu successivamente migliorata da Von Mises (1913).

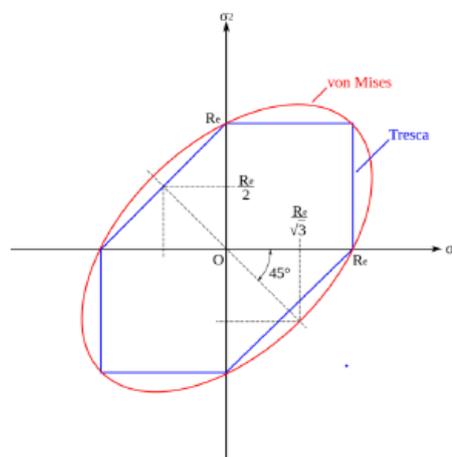


Figura 5.2 Curve di plasticizzazione di Von Mises e Tresca

La curva di plasticizzazione è composta da diversi punti principali che sono evidenziati nella seguente figura:

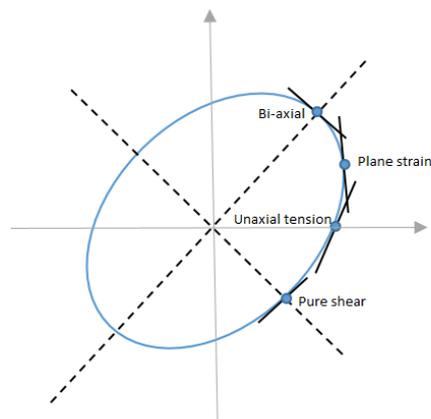


Figura 5.3 Curva di plasticizzazione e individuazione di alcuni stati tensionali principali

In funzione del tipo di sollecitazione dalla curva si può individuare una tensione biassiale, uniassiale, stato di deformazione piano o puro taglio.

5.6.MATERIALI ANALIZZATI

In questo lavoro di tesi viene analizzato il processo di formatura di acciai alto resistenziali di nuova generazione non ancora in produzione, su alcuni componenti strutturali di un veicolo. In particolare viene effettuata una sostituzione dei materiali utilizzati al giorno d'oggi in produzione con nuovi materiali più performanti in modo da agire favorevolmente sia alla riduzione di peso, sia quindi alla riduzione delle emissioni di CO₂, come discusso nella parte introduttiva.

Di seguito vengono riportate alcune delle principali caratteristiche di questi materiali di nuova generazione andando ad individuare sul classico grafico allungamento a rottura (A%)- carico di snervamento (YS) il posizionamento di questi materiali rispetto alle principali classi di acciai esistenti.

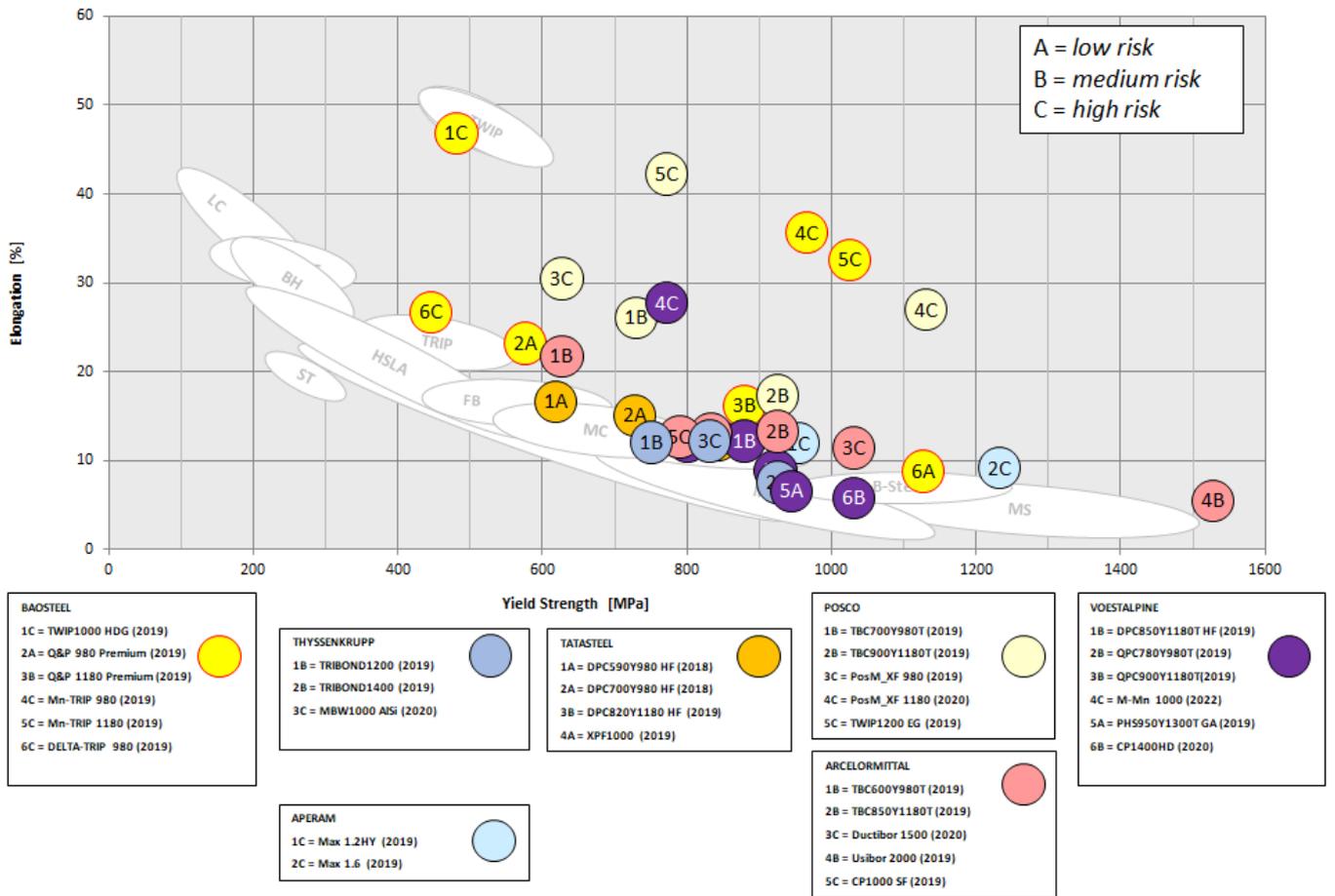


Figura 5.4 Grafico riassuntivo dei materiali

In particolare, per la simulazione del processo di Partial Hardening è stata posta l'attenzione su un nuovo acciaio al boro della stessa famiglia degli Usibor già noti in commercio, ma con delle proprietà meccaniche notevolmente migliorate, come è possibile osservare nel seguente grafico.

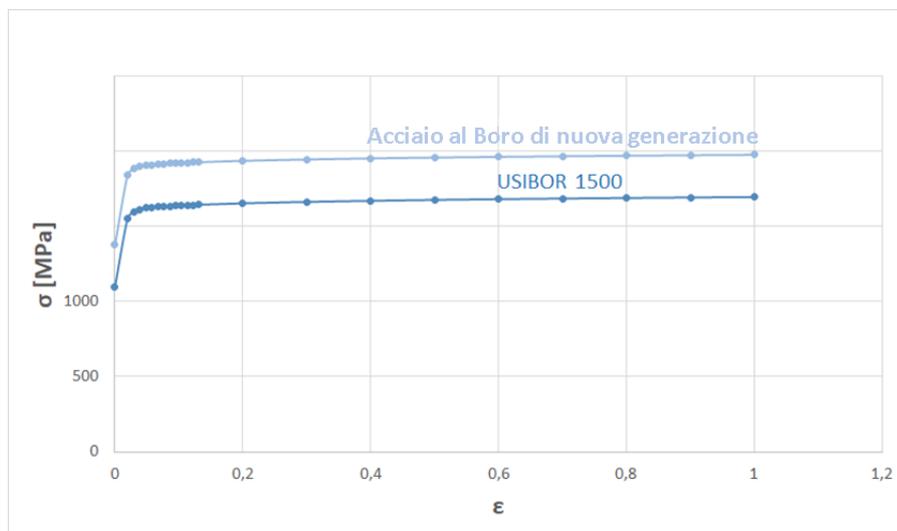


Figura 5.5 Confronto tra acciai al Boro di vecchia e nuova generazione

Gli andamenti delle tensioni sono stati ricavati considerando una legge di approssimazione, la legge di Swift-Voce.

Invece, per quanto riguarda la simulazione relativa al processo di SmartForm, è stato studiato il comportamento di un acciaio TRIP di nuova generazione. Esso infatti è un acciaio TRIP definito come Bainitico assistito. Questi acciai mostrano prestazioni migliori rispetto agli acciai TRIP convenzionali; infatti presentano un carico di snervamento e un carico di rottura superiori grazie alla presenza di una matrice bainitico-ferritica e una maggiore duttilità grazie alla presenza di austenite residua stabile. Questa microstruttura inoltre garantisce una migliore flangiabilità ed un comportamento migliore nelle operazioni di piegatura [41]. In **Figura 5.6** viene mostrato un grafico di confronto delle proprietà meccaniche tra l'acciaio TRIP Bainitico assistito e alcuni acciai TRIP convenzionali.

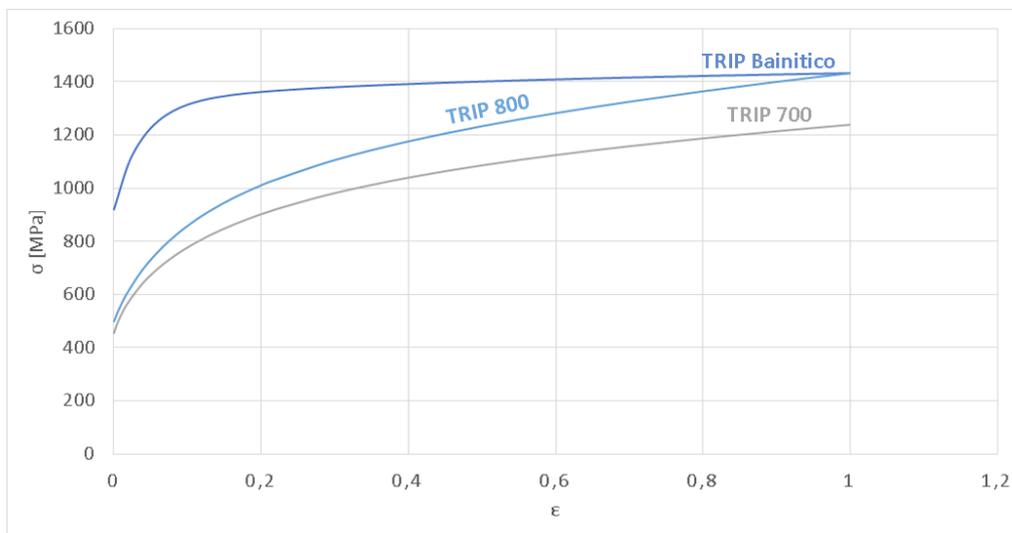


Figura 5.6 Confronto tra acciaio TRIP Bainitico di nuova generazione e acciai TRIP convenzionali

6. CASI STUDIO

In questo lavoro di tesi viene analizzato il comportamento di nuovi materiali alto-resistenziali in particolari processi di formatura come il Partial Hardening e lo SmartForm; il primo è stato esposto in precedenza, mentre il secondo è un processo sviluppato da ThyssenKrupp per minimizzare il ritorno elastico del componente stampato. Di seguito verranno descritti i diversi casi studio analizzati per i processi in esame.

6.1.PARTIAL HARDENING B-PILLAR

Introduzione al problema

Il montante centrale è un elemento fondamentale per limitare l'intrusione, in quanto su di esso si scaricano le forze derivanti dalle portiere; quindi l'intrusione delle portiere è governata dal suo comportamento meccanico. Nella seguente immagine è mostrato il componente con la sua collocazione nel BiW della vettura:



Figura 6.1 Posizionamento del montante centrale all'interno del BiW dell'autovettura

Nelle sezioni successive sono riportate varie simulazioni che presentano delle caratteristiche di processo derivanti da richieste specifiche dettate dalle simulazioni di crash. Essendo infatti questi componenti fondamentali per salvaguardare chi è presente all'interno della vettura in caso di incidenti, devono essere rispettati particolari requisiti di resistenza a impatti dall'esterno variabili.

6.1.1. CASO STUDIO 1

Una prima analisi del processo di Partial Hardening è stata effettuata utilizzando un Tailored Welded Blank (TWB) in cui è presente una patch saldata sulla faccia interna della lamiera. Il TWB è un blank caratterizzato da due lamiere di materiali differenti saldate tra loro. In particolare i materiali utilizzati sono:

- USIBOR 1500
- H340F per la parte inferiore
- USIBOR 1500 per la patch

Si può osservare in **Figura 6.2** la struttura del TWB (Tailored Welded Blank) appena descritto:



Figura 6.2 Struttura del blank nel caso studio 1 Partial Hardening

L'USIBOR 1500 è un acciaio temprabile con un carico di snervamento di circa 1500 MPa, mentre l'acciaio FEE340 è un acciaio che non subisce la trasformazione di fase data dal processo di tempra. Infatti l'obiettivo dello studio è quello di ottenere, come discusso in precedenza, un componente caratterizzato da elevata resistenza nella parte superiore, ed elevata deformabilità nella parte inferiore in cui si mantiene la microstruttura di partenza.

Per il raffreddamento all'interno dello stampo è stato sviluppato un sistema di canalizzazione conforme ottimizzata per migliorare lo scambio termico. La canalizzazione conforme è un tipo di sistema di raffreddamento che viene realizzato tramite tecnologia di Additive Manufacturing; questa tecnologia permette di ottenere dei canali che seguono precisamente il profilo del componente. Si deve sottolineare il fatto che il sistema di canalizzazione è stato considerato ai fini dell'analisi termica, ma non è stata analizzata la resistenza strutturale dello stampo durante il processo di formatura.

Di seguito è esplicitata la realizzazione del modello.

Realizzazione del modello

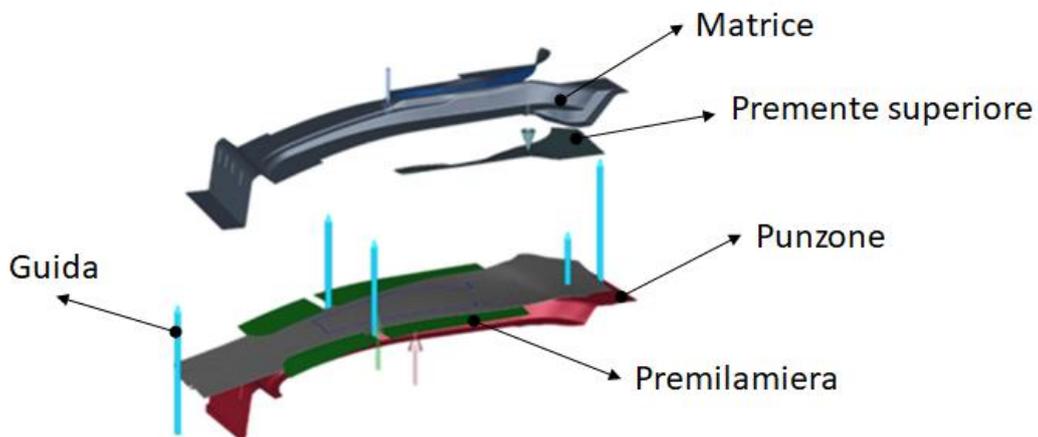


Figura 6.3 Modello dello stampo in ambiente di simulazione

Realizzazione dei canali di raffreddamento

Per realizzare i canali di raffreddamento è stata considerata la configurazione mostrata in **Figura 6.4** , in cui il dettaglio tecnico è riservato.

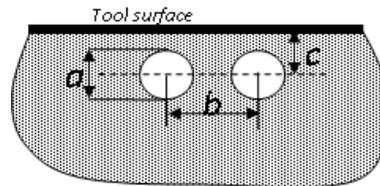


Figura 6.4 Schematizzazione della canalizzazione con le relative dimensioni principali

Per ottenere gli assi dei canali sono state intersecate le geometrie degli utensili con piani perpendicolari agli stessi ottenendo curve come mostrato in **Figura 6.6**.

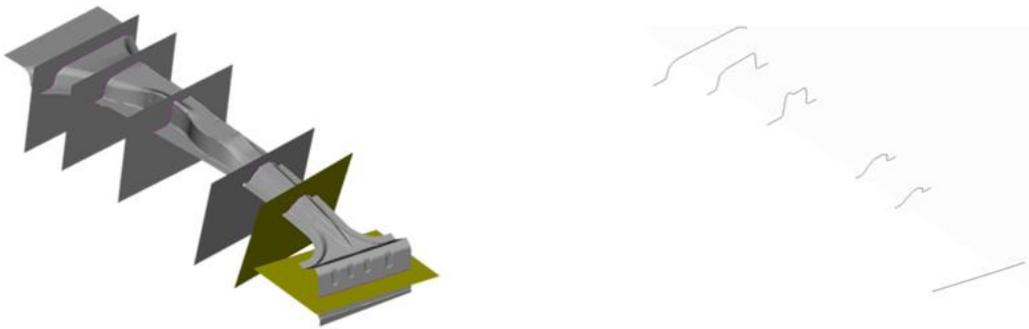


Figura 6.5 Esempio di estrazione della canalizzazione dal punzone

In questo modo è stata realizzata tutta la canalizzazione dello stampo come mostrato nelle figure che seguono.

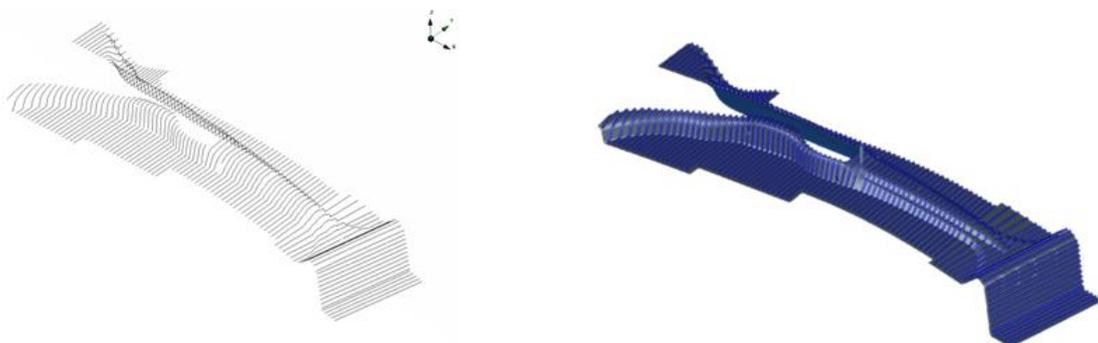


Figura 6.6 Canalizzazione della matrice

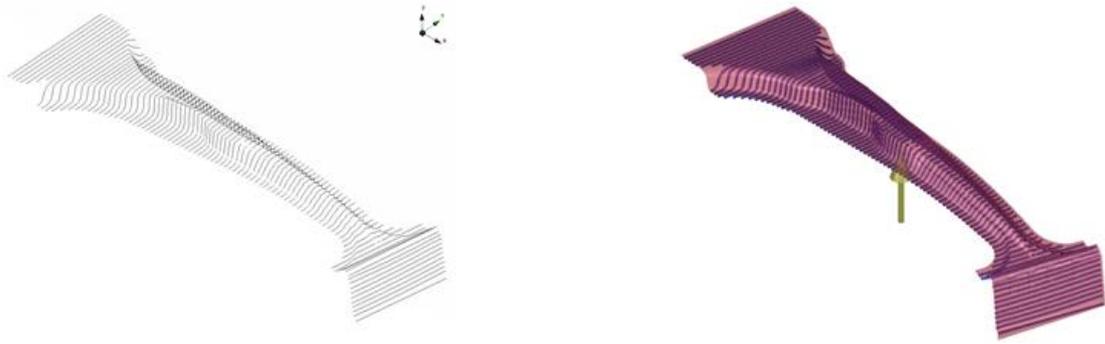


Figura 6.7 Canalizzazione del punzone

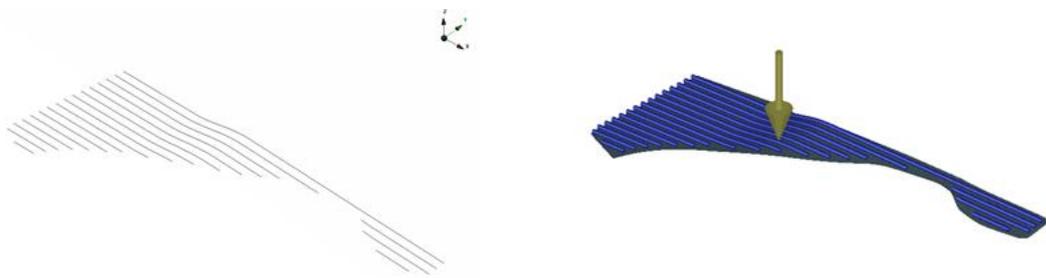


Figura 6.8 Canalizzazione del premente superiore

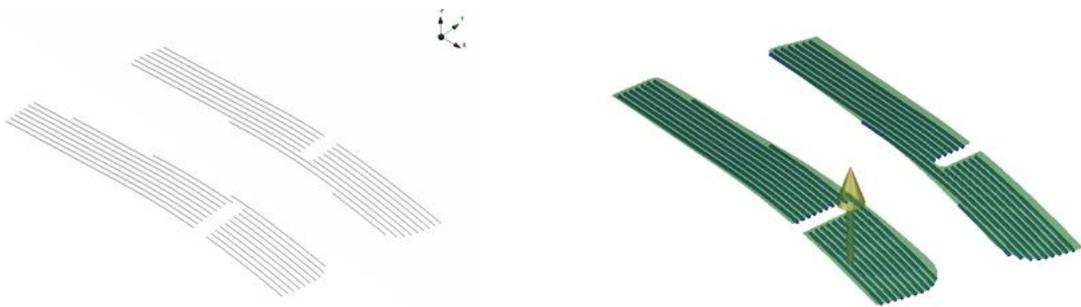


Figura 6.9 Canalizzazione del prelamiera

Ottenendo lo stampo finale riportato in **Figura 6.10**.

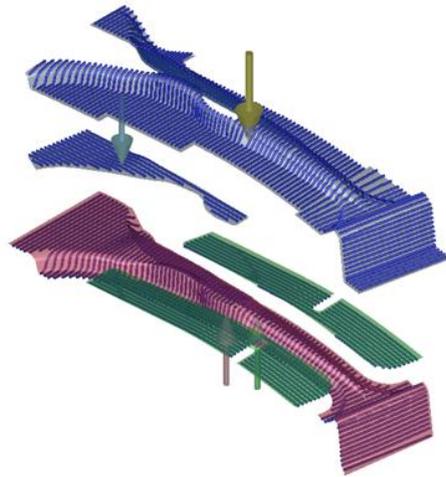


Figura 6.10 Stampo completo con canali di raffreddamento conformali

Impostazione del processo

Per impostare i parametri di processo sono stati utilizzati i valori presenti nella normale produzione e riassunti in **Tabella 6.1**.

Tabella 6.1 Parametri di processo caso studio 1

Parameters	Value
Blank Heating Temperature	950°C
Transport Time	5 s
Positioning and Drawing Time	7s
Cooling Fluid Temperature	15°C
Quenching Force	400 ton
Part Temperature at press opening	150 °C

Analisi dei risultati

Per quanto riguarda l'analisi di fattibilità si analizza la mappa degli assottigliamenti in **Figura 6.11**.

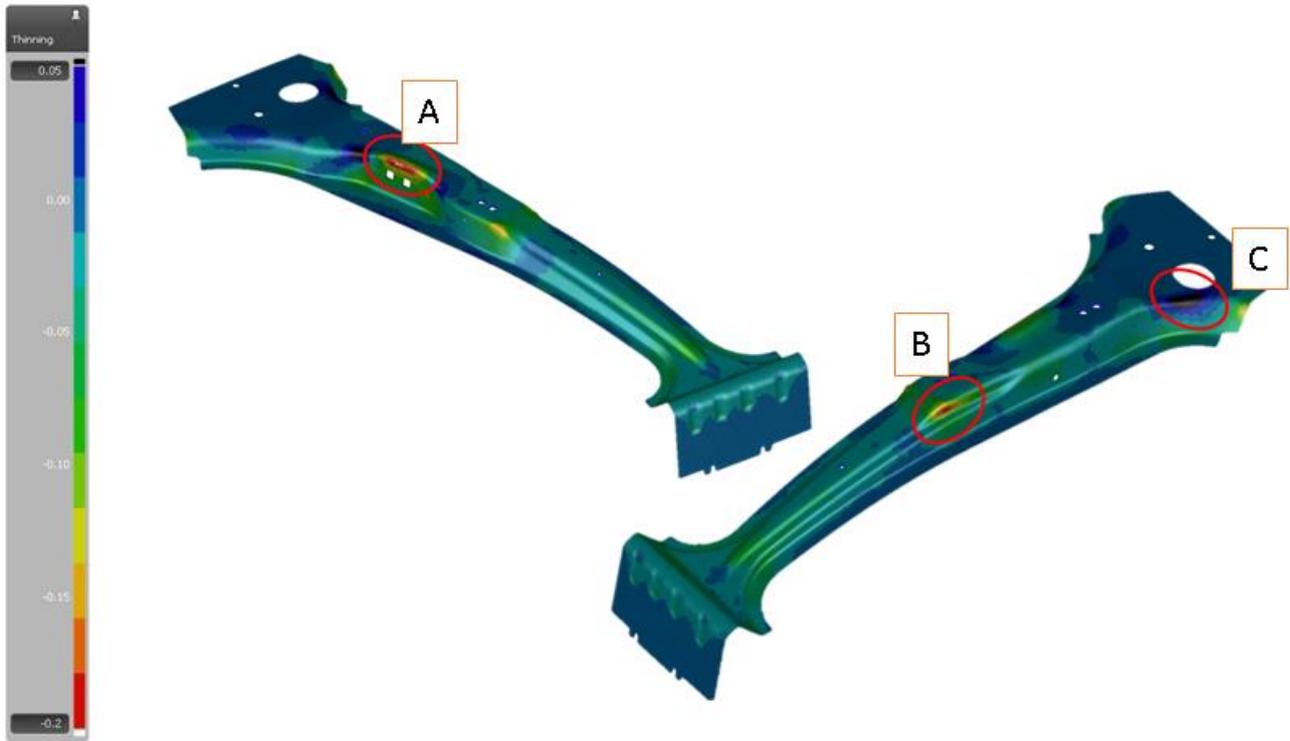


Figura 6.11 Mappa degli assottigliamenti e relativo range di variabilità

Si può osservare come emergano delle criticità in corrispondenza delle zone evidenziate e contrassegnate dalle lettere A, B e C. In particolare si notano due zone con criticità di assottigliamento (A e B) ed una zona con criticità di ispessimento (C). I valori per gli assottigliamenti ottenuti sono prossimi al 20 %, mentre nel caso dell'ispessimento si arriva a valori dello 0,08 %. Dalle specifiche interne a FCA, questi risultati sono considerati nei limiti delle tolleranze, quindi accettabili. Di seguito vengono mostrate le tre zone di interesse:

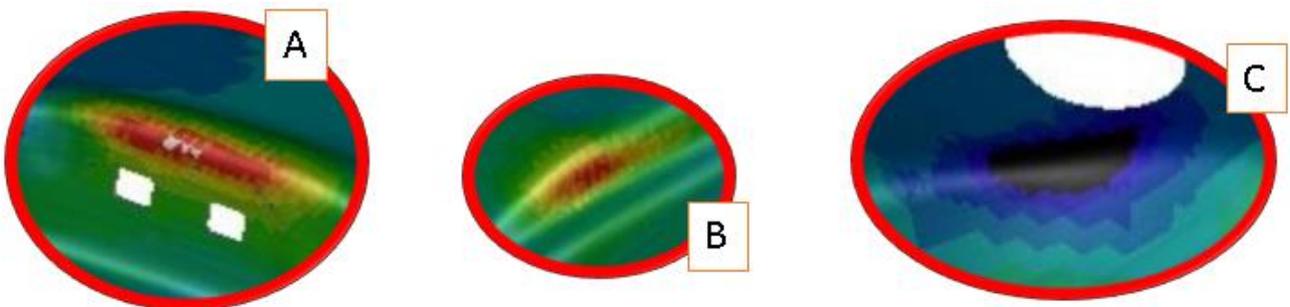


Figura 6.12 Zoom delle zone evidenziate

Una successiva analisi molto importante riguarda le *trasformazioni di fase* che si susseguono durante il processo di tempra. Prima viene rappresentato come evolve la mappa delle fasi durante il processo di

tempra, e successivamente si effettua un'analisi di dettaglio di 3 zone caratteristiche del componente. Quel che interessa in questa fase è verificare che alla fine del processo di tempra si ottenga una struttura che abbia almeno l'80% di martensite nella parte superiore e che mantenga la configurazione iniziale nella parte inferiore del montante centrale.

Di seguito è riportata la storia delle trasformazioni di fase al variare del tempo durante il processo di tempra:



Figura 6.13 Mappa della martensite durante il processo di tempra in varie fasi: a) Dopo 2 sec; b) Dopo 4 sec; c) Dopo 5 sec; d) Dopo 8 sec; e) Dopo 11 sec; f) Dopo 14 sec

È molto interessante notare come dopo 14 secondi si abbia una percentuale di martensite maggiore dell'80% nella zona superiore del montante centrale; viceversa nella zona inferiore dello stesso non si ha trasformazione di fase. Rispetto alla situazione di normale produzione in cui il tempo di tempra è di 18 secondi è stata ottenuta una notevole ottimizzazione del tempo-ciclo del processo, parametro molto importante nelle produzioni in serie con grandi volumi di produzione.

Per dare più enfasi questo risultato si riporta l'andamento della percentuale di martensite in funzione del tempo in una zona casuale della parte superiore del montante centrale ottenendo quanto segue:



Figura 6.14 Andamento della percentuale di martensite ottenuta in funzione del tempo

Successivamente si riporta la storia di deformazione della lamiera durante il processo di formatura con annesse le relative mappe di temperatura:

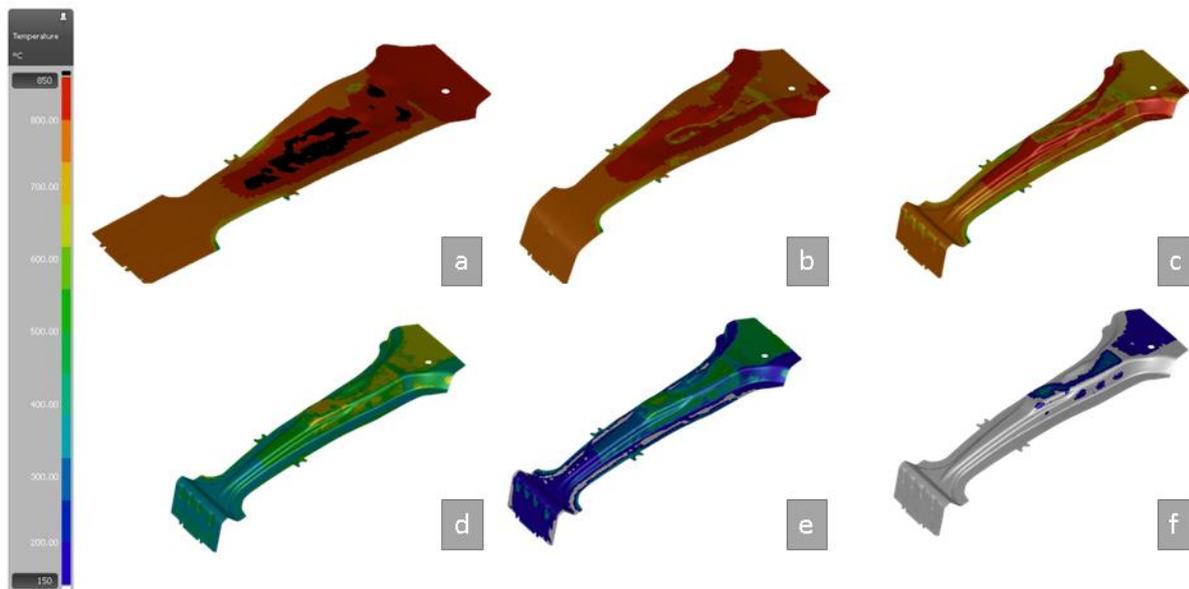


Figura 6.15 Mappa delle temperature in varie fasi: a) Dopo la chiusura del premante superiore; b) Dopo la chiusura del prelamiera; c) Dopo la formatura; d) Dopo 2 sec di tempra; e) Dopo 5 sec di tempra; f) Dopo 14 sec di tempra

Terminato il processo di tempra dalla mappa di temperatura si evince che il componente è completamente al di sotto dei 150 °C , temperatura che permette facilmente la movimentazione dello stesso fuori dallo stampo.

Non si riscontrano particolari problematiche relative alla distribuzione della temperatura nella lamiera.

Per comprendere più nel dettaglio come si comporta termicamente il materiale durante le fasi del processo, vengono analizzati di seguito tre punti caratteristici (**Figura 6.16**).

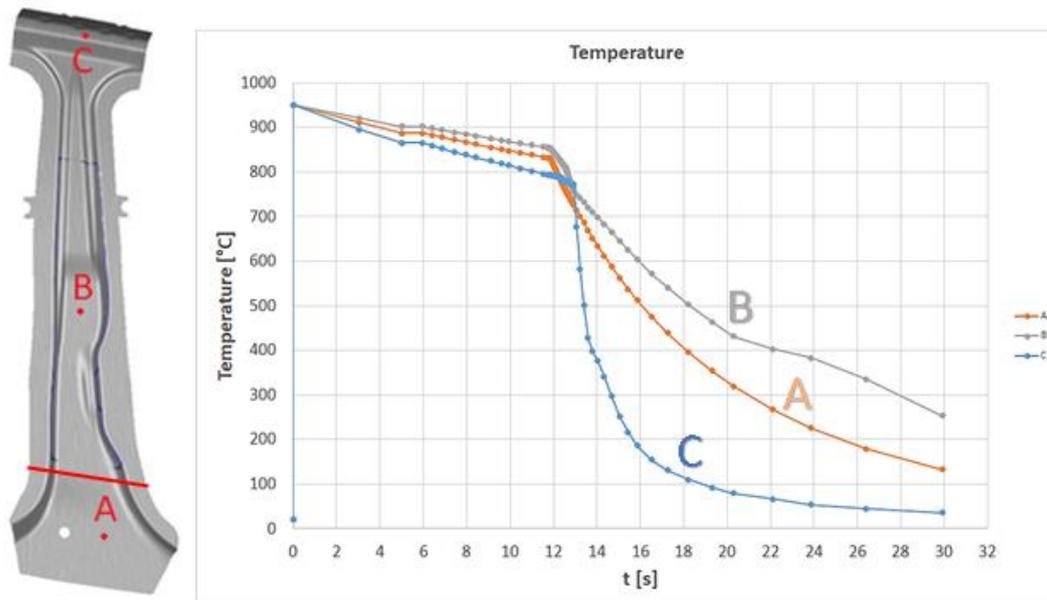


Figura 6.16 Andamento della temperatura durante il processo in tre punti caratteristici

Il raffreddamento nel punto B è più lento in quanto la zona è caratterizzata da uno spessore maggiorato, dato dalla presenza della patch, per complessivi 2,7 mm, diversamente dai punti A e C che presentano uno spessore di 1,7 mm.

L'elevata velocità di raffreddamento registrata sul punto C è dovuta invece al materiale utilizzato, che ha per caratteristiche meccaniche un'elevata temprabilità, al contrario del materiale presente nel punto A.

Anche dall'andamento della percentuale di martensite nei punti considerati si evince come nel punto B, in corrispondenza della patch, la martensite si forma più lentamente, come mostrato in **Figura 6.17**. Il tempo-ciclo dipende quindi dalla velocità di raffreddamento di questa zona a maggiore spessore.

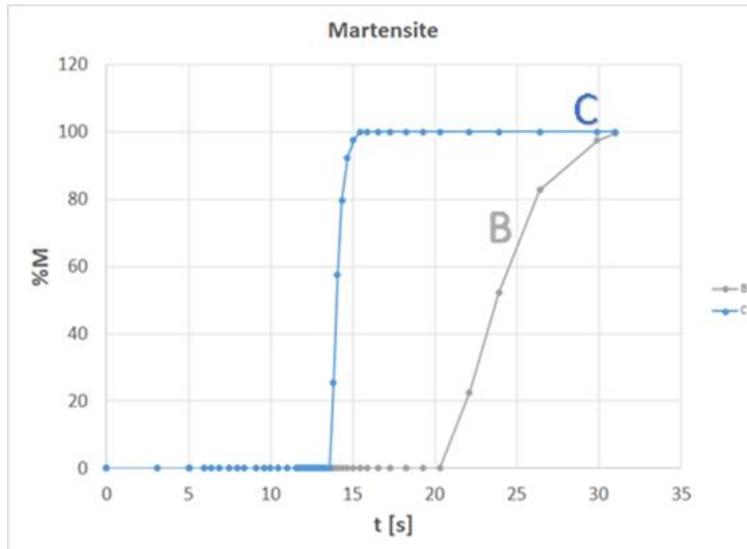


Figura 6.17 Andamento della percentuale di martensite in funzione del tempo in due punti caratteristici del componente

CONCLUSIONI CASO STUDIO 1

Il caso precedentemente analizzato ha previsto uno studio termico e di fattibilità del montante centrale di un autoveicolo, costituito da un innovativo acciaio al Boro ad alte prestazioni avente un carico di snervamento di circa 1500 MPa. Inizialmente è stata introdotta una canalizzazione conformale con determinate specifiche geometriche dettate da studi precedentemente sviluppati. La canalizzazione ottenuta ha permesso di ottenere vantaggi in termini di riduzione del tempo ciclo, agendo in particolare sul tempo di tempra che ha visto una riduzione di 4 secondi rispetto a quello del processo produttivo standard.

Successivamente è stata effettuata un'analisi di fattibilità evidenziando possibili zone critiche tramite una mappa degli assottigliamenti, che ha dato un esito positivo in quanto le riduzioni di spessore si sono assestate a valori di circa 20 %, mentre gli ispessimenti si sono assestati a valori di circa 0,08 %. In entrambi i casi infatti le zone individuate non sono risultate critiche rispetto alle normative interne vigenti sulla fattibilità di componenti con spessori e materiali considerati.

Si è passati allora ad uno studio sulla termica del processo di Partial Hardening del montante centrale. Dall'analisi di formazione della percentuale di martensite è emerso che con la canalizzazione conformale è possibile ridurre il tempo ciclo di produzione di circa 4 secondi rispetto al processo standard attualmente impiegato in produzione.

Infine dall'analisi delle temperature è emerso come alla fine del processo di tempra il componente presenti quasi omogeneamente una temperatura inferiore a 150 °C, valore che, senza eccessivi accorgimenti, consente di estrarre il componente dallo stampo facendolo successivamente raffreddare in aria.

6.1.2. CASO STUDIO 2 – PARTIAL HARDENING B-PILLAR MONOLITICO

Introduzione al problema

In questa sezione viene mostrata l'analisi del componente studiato in precedenza, ma con una modifica nella strutturazione del blank. In questo caso è utilizzato un blank monospessore di un unico materiale più performante del precedente. Il materiale in questione è sempre un acciaio al Boro, ma con caratteristiche superiori che permettono di raggiungere valori di carico di snervamento maggiori di 1500 Mpa.

Si è optato per mantenere uno spessore costante di 1,7 mm in quanto, essendo il materiale più performante, esso permette una riduzione del peso rimuovendo la patch e il suo spessore aggiuntivo (**Figura 6.18**).

Utilizzando un blank monolitico per realizzare la differente microstruttura nelle due parti del componente è necessario differenziare il raffreddamento tra le due zone corrispondenti dello stampo.

Viene quindi valutata la temperatura che consente di ottenere la tipologia di microstruttura desiderata sfruttando il Partial Hardening.

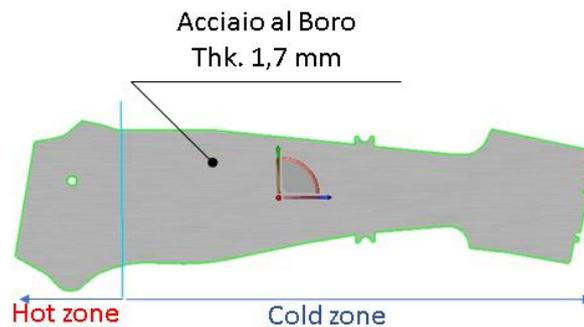


Figura 6.18 Blank caso studio 2 Partial Hardening

Realizzazione del modello

Per la realizzazione del modello è stato necessario intervenire sulla geometria del punzone dello stampo di produzione in quanto esso presenta la sede per la patch. In particolare unendo tutte le geometrie della parte superiore dello stampo (matrice e lama superiore) è stato ricavato un offset delle superfici ottenendo una geometria senza la sede per la patch e quindi idonea a realizzare un componente monospessore.

Inoltre per garantire la differenziazione in temperatura dello stampo, mantenendo la configurazione dello studio precedente è stato necessario separare gli utensili realizzando un'apposita canalizzazione (**Figura 6.19 e Figura 6.20**).

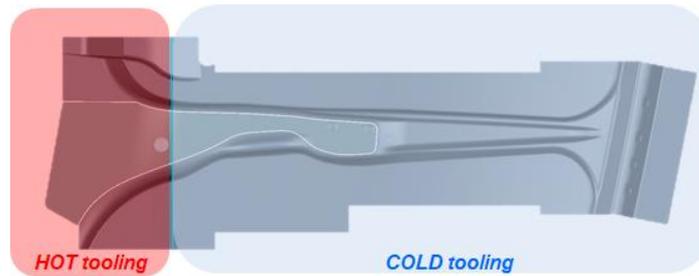


Figura 6.19 Rappresentazione della differente temperatura applicata allo stampo

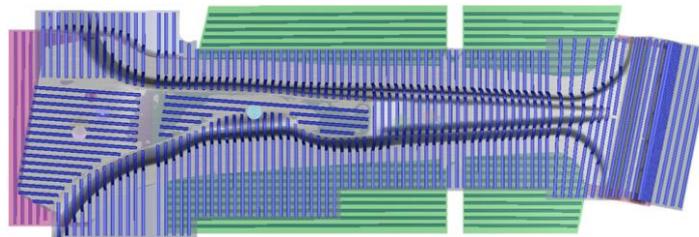


Figura 6.20 Rappresentazione della divisione della canalizzazione realizzata su tutti gli utensili dello stampo

Impostazione del processo

I parametri di processo utilizzati sono quelli mostrati nello studio precedente con l'aggiunta della temperatura della parte calda dello stampo (**Figura 6.2**). Per quanto riguarda quest'ultima, è stato necessario effettuarne l'ottimizzazione in modo da ottenere l'assenza completa di martensite nella parte interessata, come verrà mostrato nel seguito.

Tabella 6.2 Parametri di processo caso studio 2 Partial Hardening

Parameters	Value
Blank Heating Temperature	950°C
Transport Time	5 s
Positioning and Drawing Time	7s
Temperature of Cold Tool	20°C
Temperature of Hot Tool	450 °C
Quenching Force	400 ton

Analisi dei risultati

Come in precedenza, si effettua un'analisi di fattibilità:

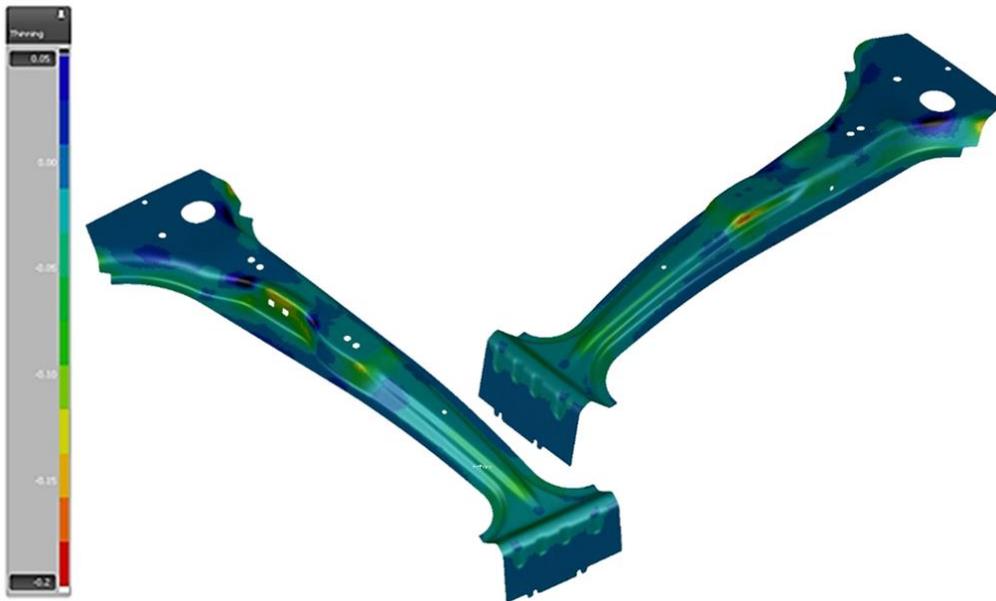


Figura 6.21 Mappa degli assottigliamenti caso studio 2 Partial Hardening

Dalla **Figura 6.21** si può osservare che non sono presenti particolari criticità in quanto gli assottigliamenti in percentuale sono contenuti all'interno del range di variabilità consentito dalle normative interne. Questo risultato è importante perché mette in mostra le caratteristiche notevolmente migliorative di un acciaio di 3^a generazione. L'acciaio al Boro selezionato, avente caratteristiche meccaniche in termini di resistenza notevolmente superiori rispetto al materiale utilizzato nel caso di studio precedente, presenta anche una formabilità migliore. Caratteristica principale degli acciai di nuova generazione è il possesso di una resistenza meccanica elevata, insieme ad un'elevata formabilità.

Successivamente si analizza il comportamento termico del materiale, considerando sia la storia termica, sia la storia della microstruttura.

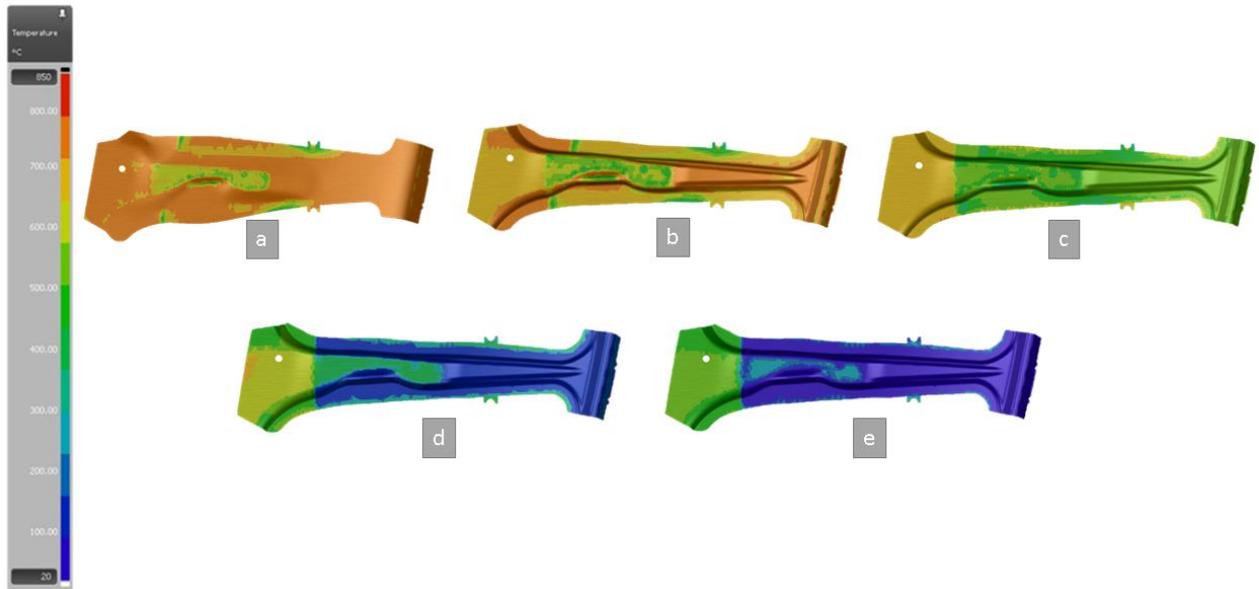


Figura 6.22 Mappa delle temperature in varie fasi del processo: a) Dopo la chiusura del prelamiera; b) Dopo la formatura; c) Dopo 0,2 sec di tempra; d) Dopo 2 sec di tempra; e) Dopo 6 sec di tempra

Dalla mappa di temperatura non si evincono particolari problematiche in fase di stampaggio, tuttavia è importante mettere in evidenza che alla fine del trattamento di tempra nella parte inferiore del componente si registrano temperature che raggiungono 560 °C circa. Questo risultato è da tenere in considerazione perché in produzione si deve garantire, durante la movimentazione del pezzo a fine processo, la mancanza assoluta di distorsioni del componente. Le temperature molto elevate rappresentano una criticità da questo punto di vista.

In **Figura 6.23** viene mostrato l'andamento della temperatura nella zona riscaldata del componente.

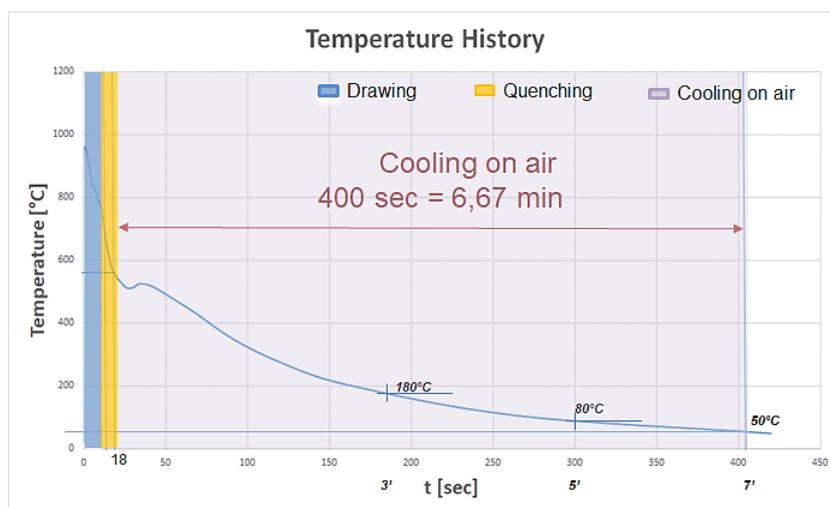


Figura 6.23 Andamento della temperatura nella zona riscaldata

Dal grafico si osserva come, per arrivare ad una temperatura del componente raffreddato di circa 180°C, occorrono 3 minuti.

Successivamente si riporta il comportamento nel tempo delle trasformazioni di fase durante il processo di tempra:

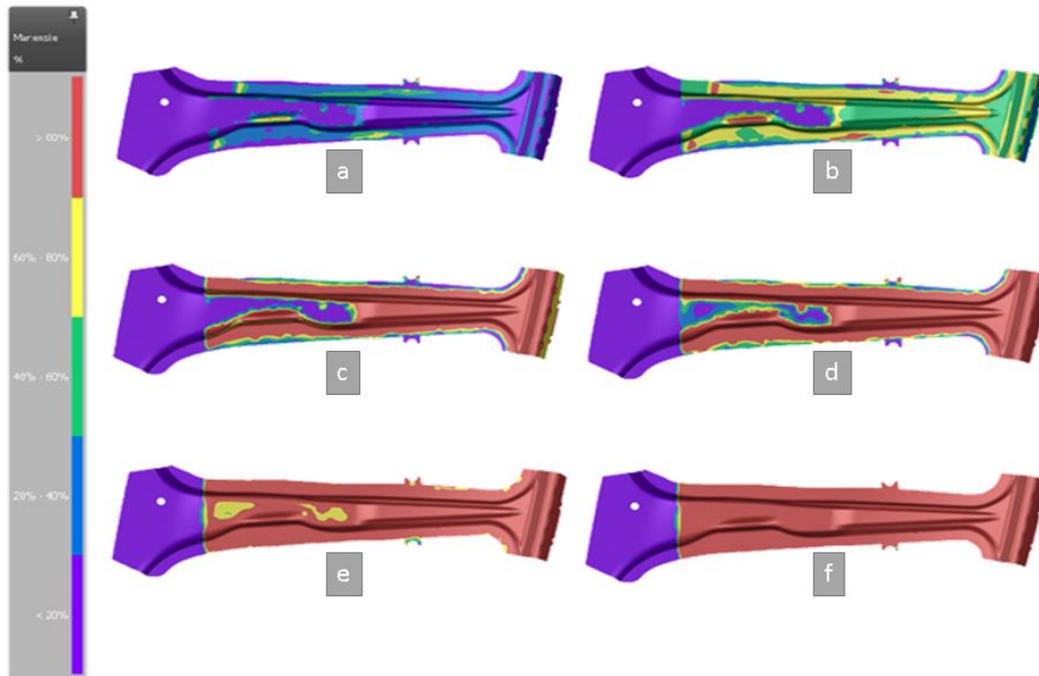


Figura 6.24 Mappa della martensite in varie fasi del processo di tempra: a) Dopo 0,6 sec; b) Dopo 0,8 sec; c) Dopo 1,1 sec; d) Dopo 2 sec; e) Dopo 4 sec; f) Dopo 6 sec

Dalle mappe di martensite si nota come, alla fine della tempra, si ottenga una differente microstruttura come previsto da obiettivo. Infatti il componente presenta un quantitativo di martensite inferiore al 20% nella parte inferiore del componente, mentre presenta una completa martensitizzazione nella zona superiore.

Tuttavia considerando ulteriori trasformazioni di fase durante il raffreddamento in aria, emerge la formazione di zone a più alta concentrazione di martensite, come mostrato di seguito:

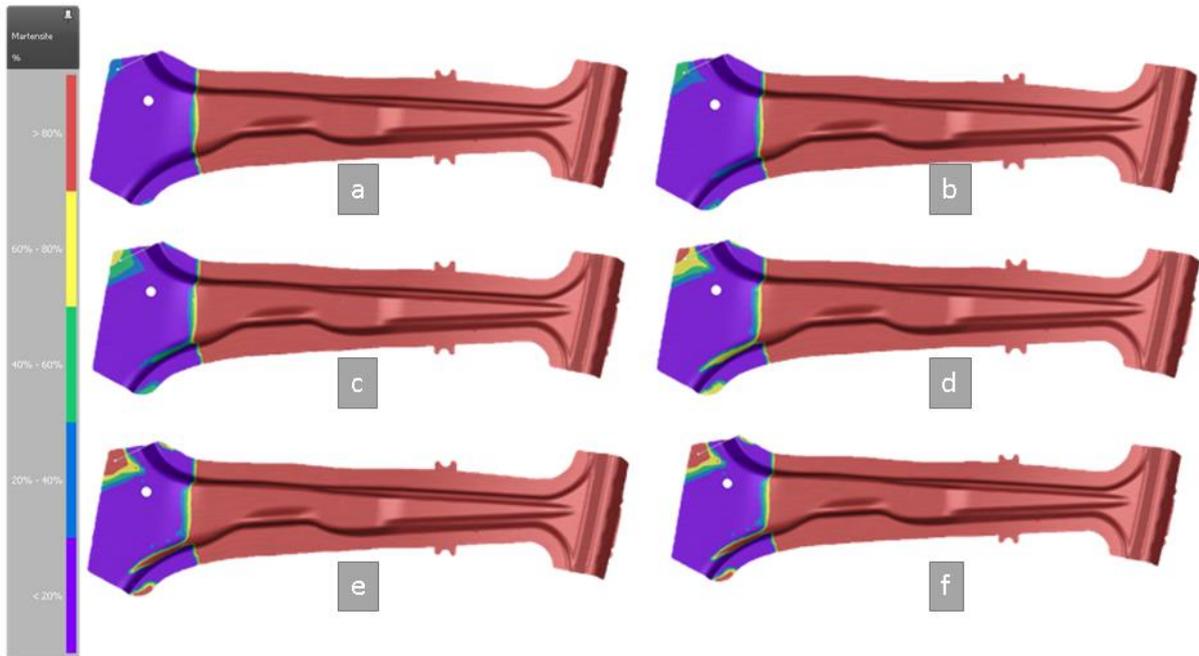


Figura 6.25 Mappa della martensite durante il raffreddamento in aria in diversi istanti di tempo: a) Dopo 24 sec; b) Dopo 37 sec; c) Dopo 50 sec; d) Dopo 1 min; e) Dopo 4 min; f) Dopo 7 min

Durante il raffreddamento in aria, la formazione di martensite è da attribuirsi alla bassa temperatura della zona calda. Analizzando il grafico CCT, la curva di raffreddamento nell'area in cui si ha formazione di martensite, interseca la zona di formazione di strutture bainitiche e martensitiche.

Per evitare questo fenomeno è stato scelto di portare la temperatura della zona calda a 500°C. Tale accorgimento ha comportato una completa assenza di martensite nel piede del montante, come da obiettivo.

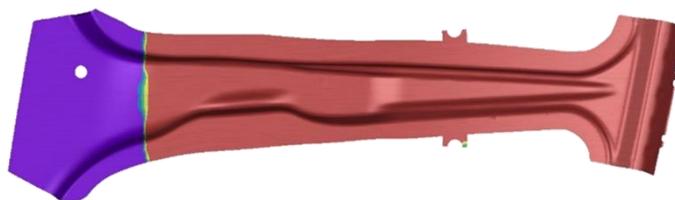


Figura 6.26 Mappa martensite all'inizio del raffreddamento in aria

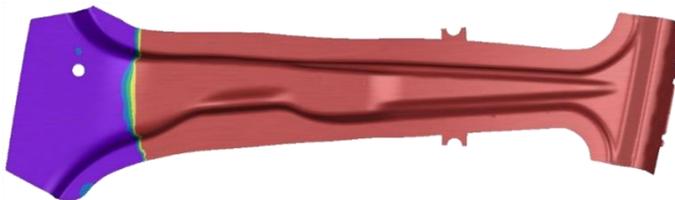


Figura 6.27 Mappa martensite alla fine del raffreddamento in aria

Questa modifica ha generato delle differenze in termini di tempo di raffreddamento, in quanto, al termine della tempra, la temperatura della parte non temprata presenterà una temperatura superiore a quella mostrata nel caso analizzato.

CONCLUSIONI CASO STUDIO 2

Il caso studio precedentemente esposto presenta l'utilizzo di un materiale di nuova generazione alto-resistenziale, un acciaio al Boro di 3^a generazione con proprietà meccaniche superiori rispetto a quello utilizzato nel caso studio 1. L'acciaio di 3^a generazione infatti possiede un carico di snervamento che supera i 1500 MPa, e va a collocarsi tra i materiali con prestazioni più elevate nel processo di stampaggio della lamiera.

In particolare questo materiale è stato applicato al processo di Partial Hardening nel caso di lamiera monolitica, avente uno spessore costante di 1,7 mm. Rispetto al primo caso si è scelto di rimuovere la patch ed utilizzare un materiale più prestante, in modo da perseguire una riduzione complessiva di peso. Lo studio è stato effettuato per verificare la fattibilità del componente e i limiti imposti dal processo.

Dallo studio degli assottigliamenti è emersa una situazione migliorativa rispetto al caso studio 1. Infatti non si sono evidenziate zone con particolare criticità, ma lo spessore di tutto il componente si è mantenuto all'interno dei vincoli imposti dalle normative interne. Questo risultato è molto importante perché mette in risalto il miglioramento conseguito dal materiale. Oltre a presentare proprietà meccaniche notevolmente superiori a quello utilizzato nel caso studio 1, l'acciaio di 3^a generazione presenta anche una formabilità maggiore se si confrontano i due studi sugli assottigliamenti.

Dal punto di vista termico le condizioni si complicano in quanto bisogna garantire una temperatura molto elevata nel piede del montante centrale. È stato trovato un valore ottimale pari a 500 °C, che permette di evitare la formazione di martensite, rendendo più lento il raffreddamento della zona interessata. Questo implica che, alla fine del processo di tempra, la zona calda presenti una temperatura molto alta, prossima ai 600 °C. Temperature così alte possono causare problemi di distorsioni anche elevate nel momento in cui il componente viene movimentato al di fuori dello stampo.

Infine con questa configurazione si riduce anche il tempo di tempra, perché la trasformazione martensitica interessa uno spessore minore nella zona centrale rispetto al caso di studio 1. Eliminando la patch si è passati da uno spessore complessivo di 2,7 mm (lamiera+patch) ad uno spessore di 1,7 mm.

6.1.3. CASO STUDIO 3 – PARTIAL HARDENING CON TEMPRA RAPIDA B-PILLAR MONOLITICO

Introduzione al problema

Lo studio del comportamento del materiale nel processo di Partial Hardening è stato introdotto successivamente all'interno di un Progetto Europeo finanziato che si pone come obiettivo la riduzione drastica del tempo ciclo, agendo in particolare sul tempo di tempra in stampo. La riduzione del tempo di tempra in stampo è ottenuta mediante l'utilizzo di una tecnica brevettata da un partner del Progetto Europeo.

Per effettuare questo studio è stata posta l'attenzione su un parametro di processo fondamentale, rappresentato dal coefficiente di scambio termico dello stampo. Il caso studio sarà suddiviso in alcuni sotto casi che prevedranno una distribuzione differente del coefficiente di scambio termico sui vari utensili dello stampo, verificando in ultima analisi la fattibilità del processo su questo tipo di acciaio.

Inoltre secondo le direttive derivanti dalle analisi di crash è stato necessario modificare la suddivisione dello stampo e lo spessore della lamiera in esame (**Figura 6.28**). In questo caso, infatti, la zona da temprare sarà quella centrale, mentre le zone estreme saranno mantenute ad alta temperatura senza prevedere trasformazione di fase, come mostrato di seguito:

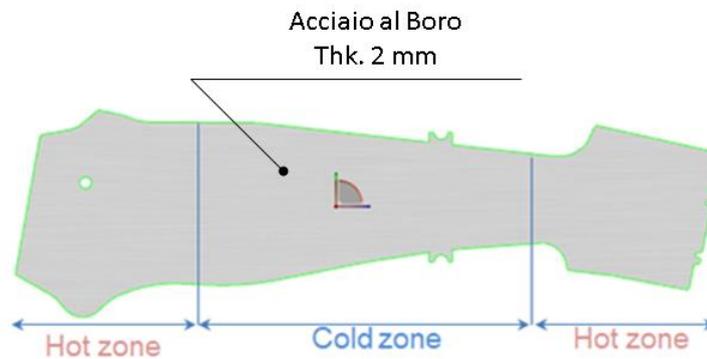


Figura 6.28 Blank caso studio 3 Partial Hardening

Realizzazione del modello

La preparazione del modello è stata effettuata come in precedenza, ma in questo caso è aumentata la complessità degli utensili, a causa dell'introduzione di una ulteriore zona in cui si deve mantenere una temperatura di 500 °C. In **Figura 6.29** è riportata la rappresentazione dello stampo con la divisione delle temperature degli utensili:

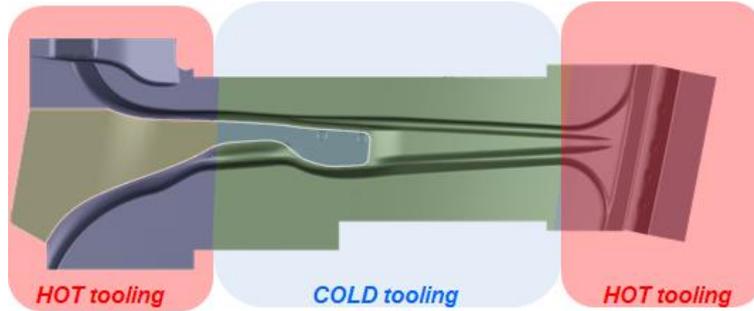


Figura 6.29 Suddivisione termica dello stampo

Nel caso in esame, come già sottolineato, è di notevole importanza il coefficiente di scambio termico. In ambiente di simulazione è necessario inserire un valore massimo di questo parametro ed inoltre una dipendenza dello stesso dalla pressione di contatto tra utensili e lamiera.

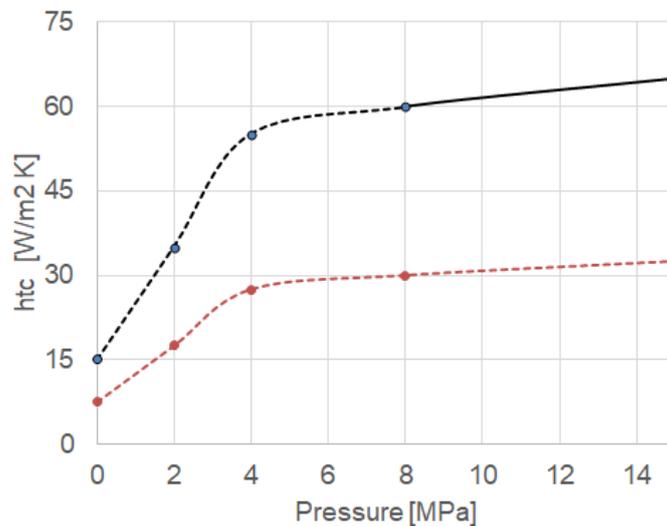


Figura 6.30 Andamento del coefficiente di scambio termico in funzione della pressione applicata dagli utensili sulla lamiera

In **Figura 6.30** sono riportati due andamenti del coefficiente di scambio termico HTC (Heat Transfer Conductivity) derivanti da test effettuati da una società partner del Progetto Europeo. In particolare la curva in nero è stata estrapolata da una campagna sperimentale, mentre la curva in rosso presenta un andamento più conservativo, da poter utilizzare in ambiente di simulazione.

Nel caso standard il coefficiente di scambio termico assume un valore massimo pari a $3,5 \text{ mW/mm}^2\text{K}$ mentre nel processo in esame assume un valore massimo di circa $65 \text{ mW/mm}^2\text{K}$. Il valore conservativo massimo invece è rappresentato da $35 \text{ mW/mm}^2\text{K}$.

Considerando la suddivisione degli utensili, si ottiene lo stampo mostrato in **Figura 6.31**.

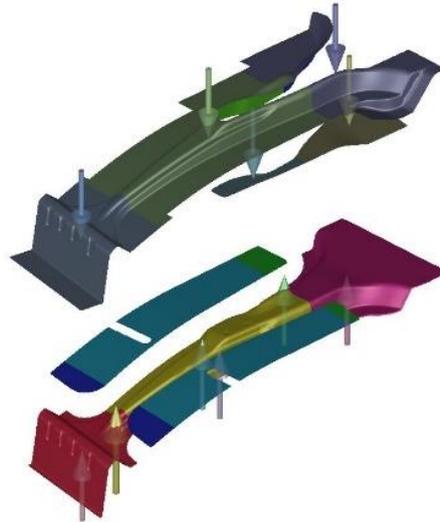


Figura 6.31 Stampa completo caso studio 3 del Partial Hardening

Sarà posta l'attenzione solo sulle zone degli utensili che interessano la parte centrale della lamiera, e verrà distribuito il coefficiente di scambio termico secondo 4 differenti configurazioni, come evidenziato di seguito:

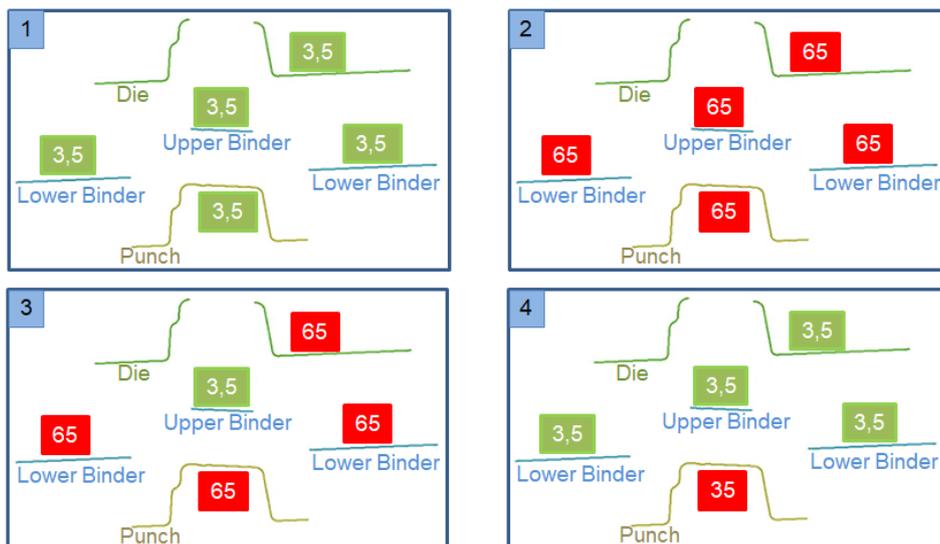


Figura 6.32 Distribuzione del coefficiente di scambio termico secondo 4 configurazioni

Nel seguito tali configurazioni saranno analizzate singolarmente.

CONFIGURAZIONE 1

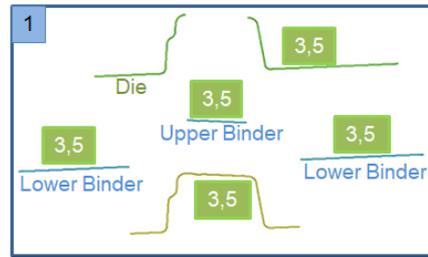


Figura 6.33 Rappresentazione della prima configurazione

Impostazione del processo

In questa configurazione a tutti gli utensili è stato attribuito un valore standard di $3,5 \text{ mW/mm}^2\text{K}$ al coefficiente di scambio termico. Le temperature degli utensili caldi sono state impostate a 500°C , valore ottimizzato nelle simulazioni precedenti.

Tabella 6.3 Parametri di processo caso studio 3 Partial Hardening configurazione 1

Parameters	Value
Blank Heating Temperature	950°C
Transport Time from furnace to press	5 s
Positioning and Drawing Time	7s
Temperature of Cold Tool	20°C
Temperature of Hot Tool	500°C
Quenching Force	400 ton
Heat Thermal Conductivity	$3,5 \text{ mW/mm}^2\text{K}$

Analisi dei risultati

Da una prima analisi relativa alla fattibilità non si evidenziano particolari problemi considerando la mappa degli assottigliamenti. Nelle zone più critiche l'assottigliamento non va molto oltre il 20% quindi il componente può considerarsi realizzabile non evidenziando criticità né di ispessimenti, né di assottigliamenti, come mostrato nella seguente figura:



Figura 6.34 Mappa degli assottigliamenti configurazione 1 caso studio 3 Partial Hardening

Successivamente si analizza la storia termica sia dal punto di vista delle temperature, sia dal punto di vista delle trasformazioni di fase:

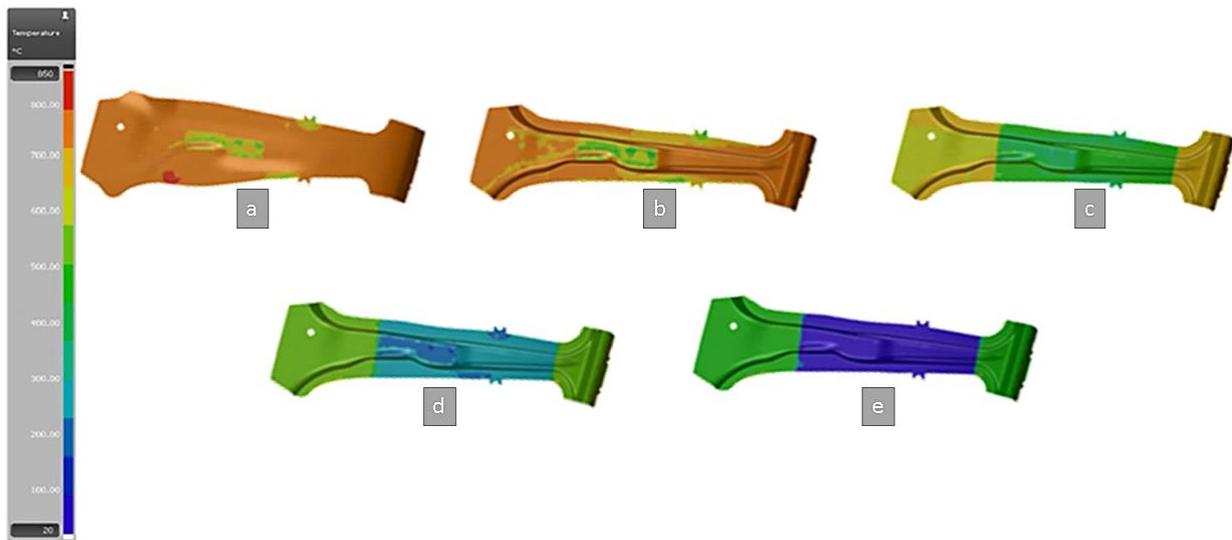


Figura 6.35 Mappa delle temperature in alcune fasi del processo: a) Dopo la chiusura del prelamiera; b) Dopo la formatura; c) Dopo 0,5 sec di tempra; d) Dopo 2 sec di tempra; e) Dopo 6 sec di tempra

La distribuzione delle temperature non presenta grosse criticità; va sottolineato però che alla fine del processo di tempra le temperature delle zone più CALDE arrivano a poco meno di 600 °C.

Per quanto riguarda invece la formazione della martensite durante il processo di tempra in stampo si riportano le seguenti immagini:



Figura 6.36 Mappa della martensite: a) Dopo 0,5 sec; b) Dopo 1 sec; c) Dopo 2 sec; d) After 3 sec; e) Dopo 6 sec

Dalla sequenza di immagini di nota come dopo circa 6 secondi di tempra si completa la martensitizzazione della zona centrale.

CONFIGURAZIONE 2

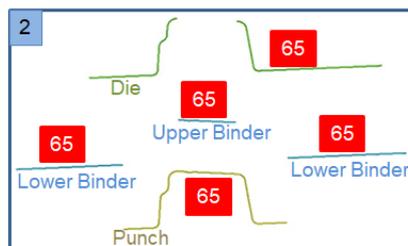


Figura 6.37 Rappresentazione della configurazione 2

Impostazione del processo

Nella seconda configurazione si considera un valore del coefficiente di scambio termico massimo su tutti gli utensili. Come si evince dalla figura precedente il valore utilizzato è di $65 \text{ mW/mm}^2\text{K}$.

Tabella 6.4 Parametri di processo configurazione 2 caso studio 3 Partial Hardening

Parameters	Value
Blank Heating Temperature	950°C
Transport Time from furnace to press	5 s
Positioning and Drawing Time	7s
Temperature of Cold Tool	20°C
Temperature of Hot Tool	500 °C
Quenching Force	400 ton
Heat Thermal Conductivity	65 [mW/mm ² K]

Analisi dei risultati

L'analisi di fattibilità mostra notevoli criticità dal punto di vista degli assottigliamenti:

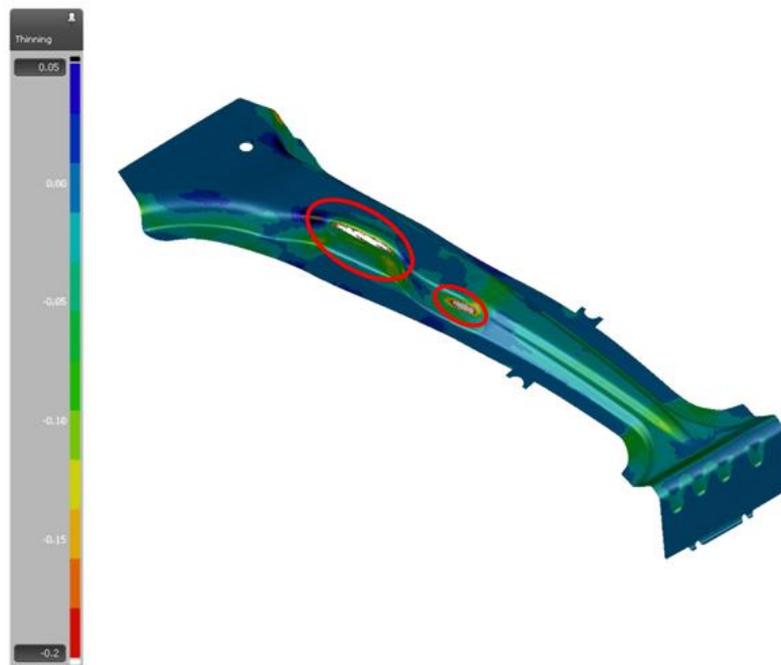


Figura 6.38 Mappa degli assottigliamenti caso studio 3 configurazione 2 Partial Hardening

Infatti nella zona di rottura si arriva a valori di assottigliamento del 40%, andando considerevolmente oltre il valore minimo del 20%.

La rottura avviene per via dello scambio termico molto rapido tra premente superiore e lamiera. Quando il premente superiore serra la lamiera, quest'ultima si trova tra due utensili (premente e punzone) con delle proprietà termiche molto elevate. Ciò fa in modo che la temperatura locale diminuisca drasticamente ancor prima di cominciare la fase vera e propria di formatura. A questo punto si forma molto velocemente una fase

martensitica, che non permette alla lamiera di deformarsi successivamente in modo corretto, evidenziando successivamente rotture in corrispondenza del raggio di raccordo. Nella **Figura 6.39** vengono mostrate le mappe di temperatura e di percentuale di martensite nell'istante in cui il premente superiore ha completato la fase di serraggio sulla lamiera.

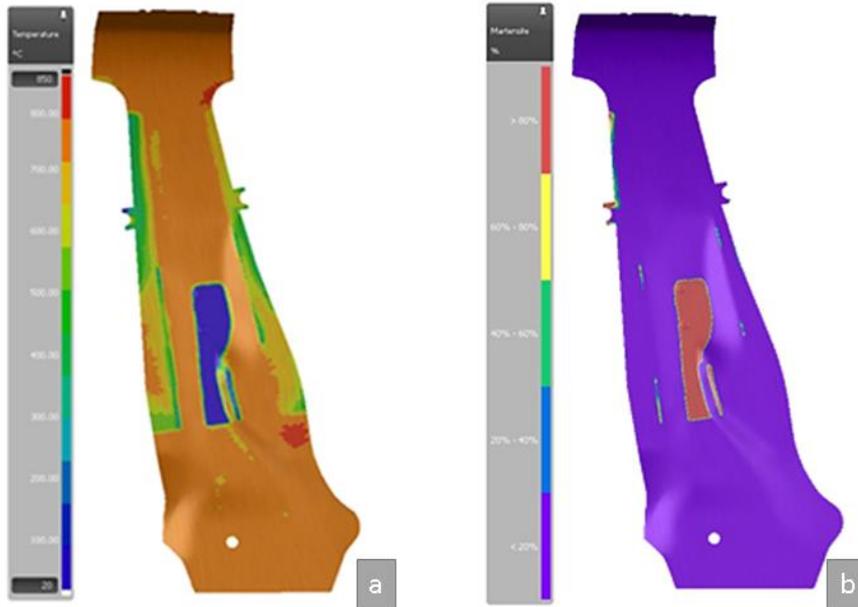


Figura 6.39 Mappe di temperatura (a) e di martensite (b) terminata la fase di serraggio del premente superiore

Dalla figura emerge come, nella zona sottostante il premente superiore, ancor prima di cominciare la formatura la temperatura arrivi al di sotto dei 200 °C, ad indicazione che la tempra è già cominciata. Come evidenziato precedentemente, durante la formatura, si verifica la rottura della lamiera perchè il materiale non riesce a scorrere all'interno dello stampo a causa delle elevate proprietà meccaniche attribuibili alla martensite.

CONFIGURAZIONE 3

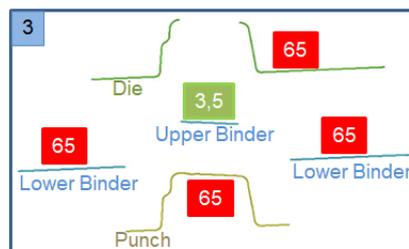


Figura 6.40 Rappresentazione configurazione 3 caso studio 3 Partial Hardening

Impostazione del processo

Nella terza configurazione si è cercato di minimizzare il problema della tempra troppo rapida nella zona critica, aspetto emerso nella precedente configurazione. È stato pensato, quindi, di imporre al premente superiore un valore di coefficiente di scambio termico standard pari a $3,5 \text{ mW/mm}^2\text{K}$, mantenendo per i restanti utensili il coefficiente di scambio termico massimo.

Tabella 6.5 Parametri di processo configurazione 3 caso studio 3 Partial Hardening

Parameters	Value
Blank Heating Temperature	950°C
Transport Time from furnace to press	5 s
Positioning and Drawing Time	7s
Temperature of Cold Tool	20°C
Temperature of Hot Tool	500 °C
Quenching Force	400 ton
Heat Thermal Conductivity	variable

Analisi dei risultati

Anche in questo caso l’analisi di fattibilità considerando gli assottigliamenti, mostra delle notevoli criticità anche se più contenute rispetto alla configurazione 2.

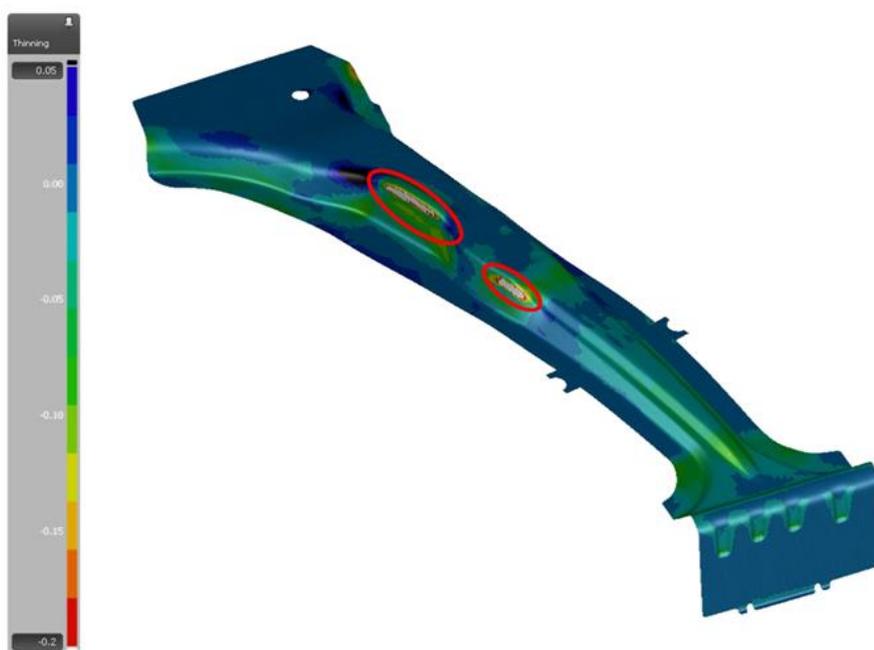


Figura 6.41 Mappa degli assottigliamenti configurazione 3 caso studio 3 Partial Hardening

Nelle zone evidenziate in **Figura 6.41** si ottengono valori di assottigliamento del 30% su una scala con range massimo consentito del 20%.

Con questa terza configurazione, quindi, non si elimina il problema emerso nella configurazione 2, in quanto il punzone con valore di HTC pari a $65 \text{ mW/mm}^2\text{K}$, sottrae calore istantaneamente quando il premente superiore serra la lamiera. Infatti considerando l'istante della chiusura del premente superiore (**Figura 6.42**), sebbene la temperatura al di sotto del premente superiore non sia uniformemente inferiore ai $200 \text{ }^\circ\text{C}$, non si limita la formazione di martensite nel momento di serraggio del premente superiore sulla lamiera.

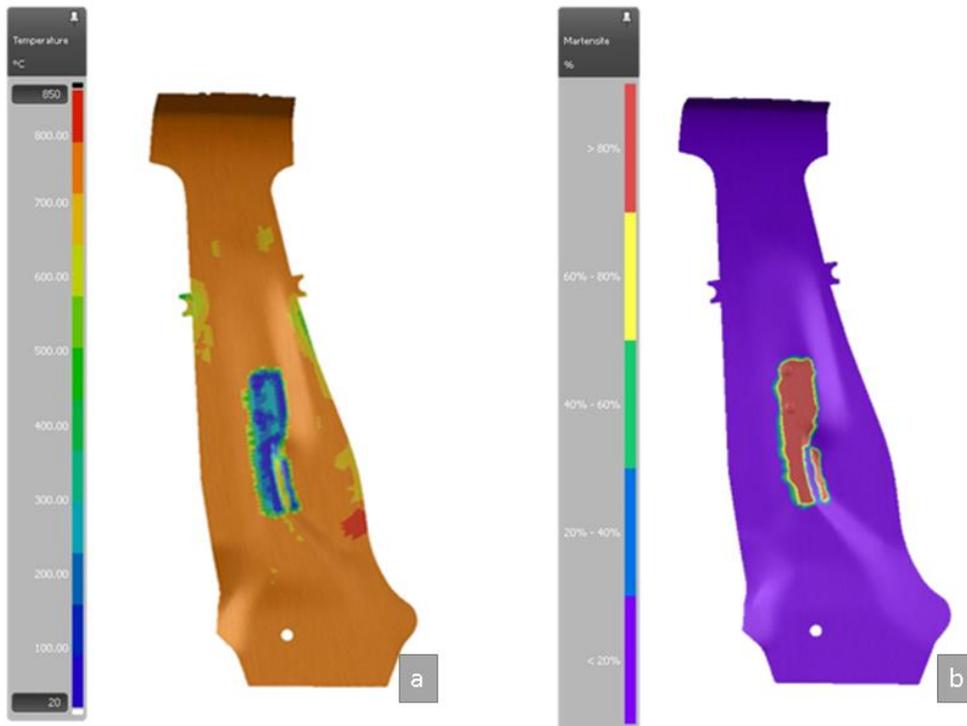


Figura 6.42 Mappa delle temperature (a) e di martensite (b) dopo la fase di serraggio del premente superiore

CONFIGURAZIONE 4

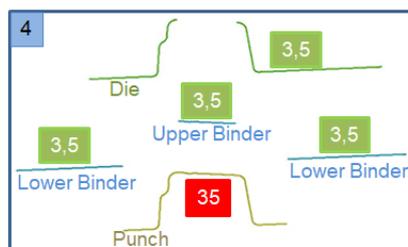


Figura 6.43 Rappresentazione configurazione 4 caso studio 3 Partial Hardening

Impostazione del processo

Nella quarta e ultima configurazione si è deciso di considerare tutti gli utensili con un coefficiente di scambio termico standard pari a $3,5 \text{ mW/mm}^2\text{K}$, ad eccezione del punzone per il quale viene utilizzato coefficiente di scambio termico più cautelativo pari a $35 \text{ mW/mm}^2\text{K}$.

Tabella 6.6 Parametri di processo configurazione 4 caso studio 3 Partial Hardening

Parameters	Value
Blank Heating Temperature	950°C
Transport Time from furnace to press	5 s
Positioning and Drawing Time	7s
Temperature of Cold Tool	20°C
Temperature of Hot Tool	500 °C
Quenching Force	400 ton
Heat Thermal Conductivity	variable

Analisi dei risultati

Partendo dall’analisi di fattibilità, si considera la mappa degli assottigliamenti del componente stampato:

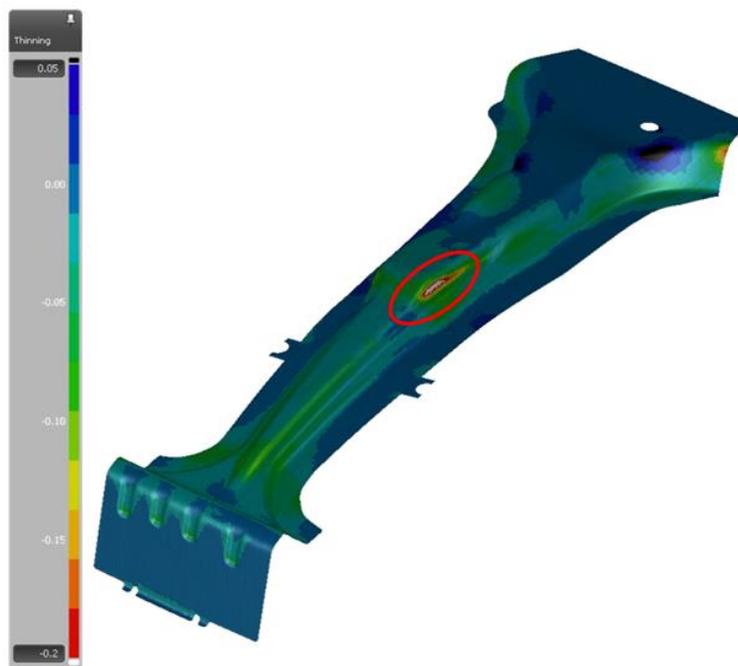


Figura 6.44 Mappa degli assottigliamenti configurazione 4 caso studio 3 Partial Hardening

Nella zona evidenziata in **Figura 6.44** si ottengono valori di assottigliamento del 24%, quindi è ancora evidente il rischio di rottura ma questo è stato notevolmente ridotto rispetto alle configurazioni precedenti.

Analizzando la mappa di temperature e distribuzione della martensite alla fine della fase di serraggio del premente superiore sulla lamiera, si nota che le temperature sono diminuite notevolmente (**Figura 6.45**).

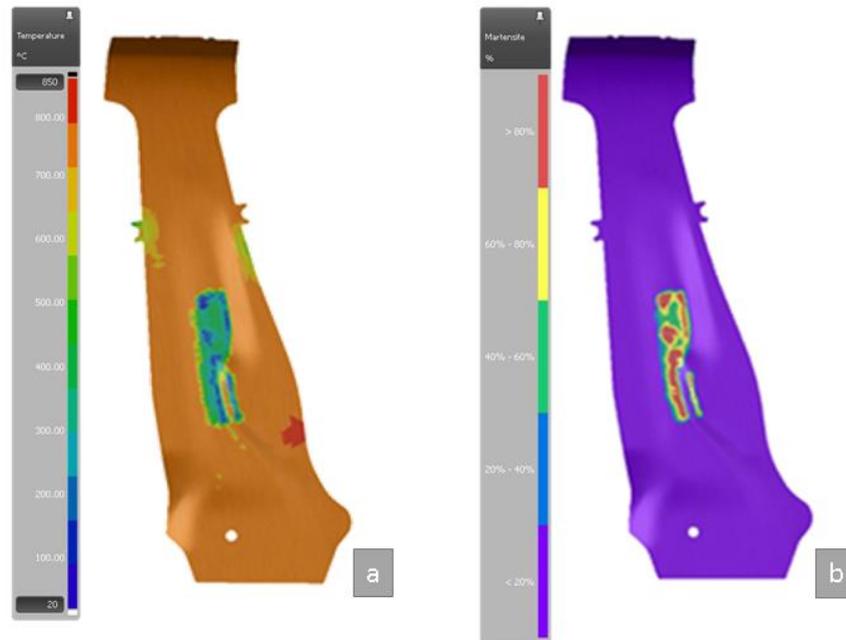


Figura 6.45 Mappa di temperatura (a) e di martensite (b) dopo la fase di serraggio del premente superiore

Le temperature nella zona sottostante il premente superiore si trovano in un range compreso tra i 200 °C e i 400 °C, tale da comportare la formazione di martensite ancor prima di cominciare la formatura della lamiera.

Una volta studiato il comportamento termico del materiale con le condizioni di processo della configurazione 4, per cercare di ottenere risultati compatibili con le direttive aziendali in termini di fattibilità, è necessario modificare la scomposizione degli utensili o addirittura intervenire sulla geometria del componente.

CONCLUSIONI CASO STUDIO 3

Nel caso studio affrontato sono state considerate varie configurazioni di ripartizione del coefficiente di scambio termico sugli utensili dello stampo per verificare il comportamento del materiale di nuova generazione utilizzato, nel processo di Partial Hardening con tempra rapida.

Nella prima configurazione considerando gli utensili standard è stata verificata la fattibilità del componente in un normale processo di formatura mediante Partial Hardening. Nelle configurazioni successive è stato introdotto il coefficiente di scambio termico maggiorato per simulare il processo di tempra rapida.

Nella seconda configurazione, applicando a tutti gli utensili un coefficiente di scambio termico massimo pari a $65 \text{ mW/mm}^2\text{K}$, la fattibilità del componente non è stata confermata. Nel momento di serraggio del

premente superiore sulla lamiera, si è presentata una immediata formazione di martensite causata dal veloce scambio termico con gli utensili (premente superiore e punzone). In questo modo la successiva fase, ovvero la formatura, è avvenuta in condizioni sfavorevoli per lo scorrimento di materiale all'interno dello stampo.

Nella terza configurazione si è passati ad imporre al premente superiore un coefficiente di scambio termico standard pari a $3,5 \text{ mW/mm}^2\text{K}$, cercando di eliminare il problema della formazione di martensite prima della formatura. Questa configurazione non ha portato ai risultati sperati in quanto l'elevato coefficiente di scambio termico imposto a tutti i restanti utensili, ha causato lo stesso problema della seconda configurazione.

Infine nella quarta configurazione, infine è stato utilizzato un coefficiente di scambio termico maggiorato solamente per il punzone. In particolare è stato utilizzato un valore cautelativo pari a $35 \text{ mW/mm}^2\text{K}$ suggerito per la simulazione dall'azienda partner del Progetto Europeo. In questo modo è stata ridotta notevolmente la percentuale di assottigliamento nelle zone più critiche, assestandosi su valori di circa il 24 %, a fronte del limite del 20 %.

Dagli studi termici è emersa una criticità derivante dalle temperature delle zone calde del componente alla fine della fase di tempra. In queste zone, infatti, si raggiungono temperature di circa $600 \text{ }^\circ\text{C}$ che rendono difficile la movimentazione del componente a causa dell'elevata probabilità di innescare distorsioni della sua geometria finale.

6.2.PROCESSO DI SMARTFORM SU UN MONTANTE CENTRALE

Lo SmartForm è un processo di formatura a freddo sviluppato da ThyssenKrupp che si pone come obiettivo la minimizzazione del ritorno elastico nei componenti. Questo processo si articola in due formature consecutive con caratteristiche differenti: la prima formatura ha lo scopo di deformare il componente con una geometria della sezione distorta, mentre la seconda formatura prevede oltre alla formatura classica anche l'azione di utensili che agiscono lateralmente comprimendo la sezione del componente. Le due fasi del processo SmartForm sono mostrate in **Figura 6.46**.

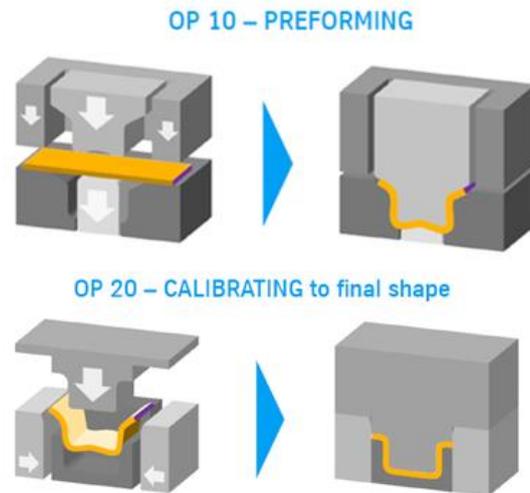


Figura 6.46 Rappresentazione grafica del processo di SmartForm [42]

Dalla **Figura 6.46** si può osservare la movimentazione complessiva degli utensili, con particolare riferimento al movimento laterale degli utensili che comprimono il materiale negli ultimi istanti della formatura. Considerando una generica sezione ad Omega (**Figura 6.47**) in un componente strutturale presente nello studio di ThyssenKrupp, si possono distinguere le due fasi di pre-formatura e formatura finale.

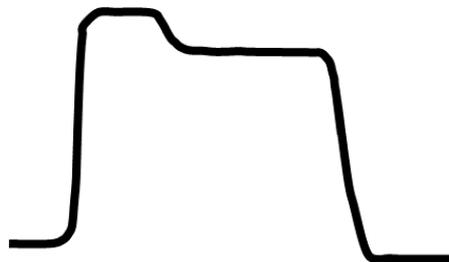


Figura 6.47 Generica sezione ad Omega

Per in componente con una sezione di questo tipo viene effettuata una pre-formatura come mostrato nella **Figura 6.48**.

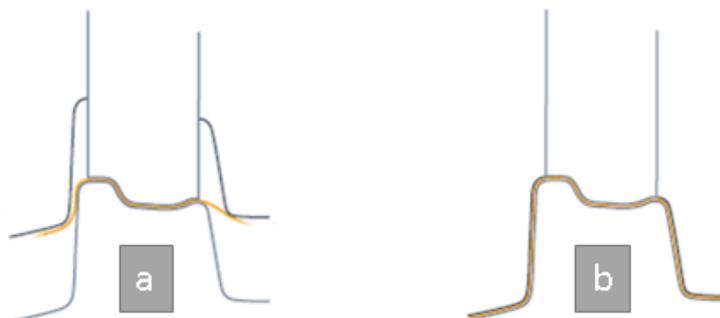


Figura 6.48 Esempio di pre-formatura SmartForm

Successivamente nella formatura finale si può apprezzare più in dettaglio l'azione degli utensili laterali, come mostrato negli ultimi istanti del processo in **Figura 6.49**.

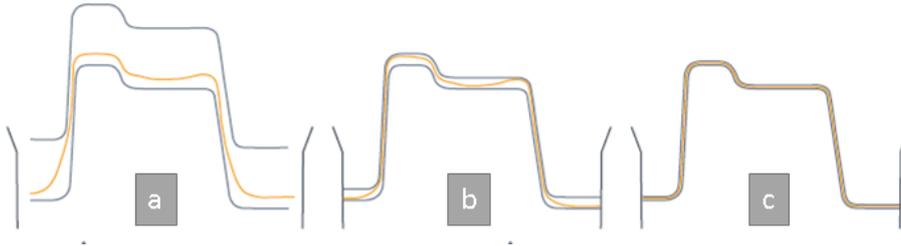


Figura 6.49 Esempio di formatura SmartForm con azione degli utensili laterali a fine formatura

L'azione della matrice negli ultimi millimetri della formatura è accompagnata anche dal movimento degli utensili laterali, che comprimono l'intera sezione. Il risultato della compressione è mostrato in **Figura 6.50**.

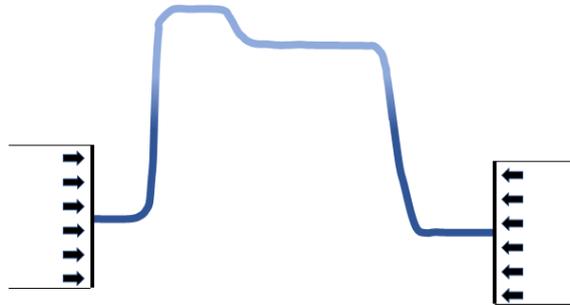


Figura 6.50 Rappresentazione della compressione della sezione di un componente ad omega con l'azione degli utensili laterali SmartForm

Idealmente si riesce a raggiungere una distribuzione omogenea della compressione sulla sezione completa del componente. Il processo SmartForm ha portato a risultati notevolmente migliorativi in termini di ritorno elastico **Figura 6.51**.



Figura 6.51 Ritorno elastico in alcune sezioni caratteristiche del componente formato con SmartForm

Un altro vantaggio molto importante ottenibile con questo processo riguarda la riduzione dello sfrido. Infatti mediante un opportuno studio della cinematica degli utensili laterali, è possibile ottenere alla fine del processo un componente che, nel caso ottimale, non necessiti di una rifila completa.

6.2.1. CASO STUDIO

Introduzione al problema

Il modello in esame è stato realizzato considerando come componente il B-Pillar, costituito da un acciaio TRIP Bainitico assistito di nuova generazione. Di seguito è riportata la struttura del blank di partenza per il processo:



Figura 6.52 Blank nel caso studio del processo di SmartForm

Per il componente in esame si dovranno opportunamente modellare le superfici degli utensili laterali, come verrà mostrato nel corso della trattazione. In **Figura 6.53** si riporta una rappresentazione grafica del caso in esame.

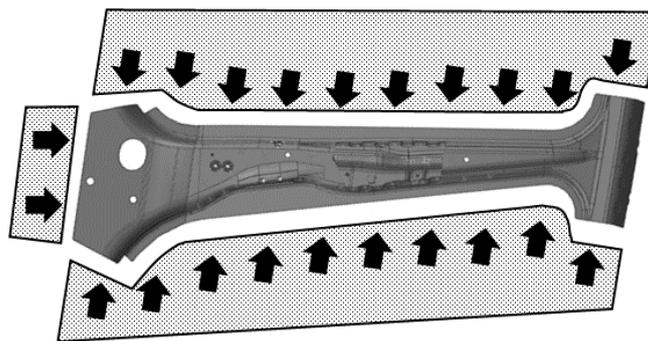


Figura 6.53 Rappresentazione grafica della cinematica degli utensili laterali

Nel seguito verrà spiegato come sono stati ottenuti i modelli sia per la preformatura, sia per la formatura finale.

La realizzazione della geometria degli utensili è stata effettuata utilizzando il software AutoForm, mentre per la simulazione degli utensili di compressione laterali è stato necessario l'utilizzo del software Pam-Stamp che

ha permesso l'applicazione di una pressione distribuita lungo lo spessore della lamiera, effetto non applicabile all'interno di AutoForm.

Realizzazione modello

Nella prima formatura, per ottenere le superfici dello stampo, si è partiti dalla geometria del componente e successivamente è stata effettuata una deformazione delle superfici mediante un'operazione di *morphing* utilizzando il software AutoForm.

La deformazione è stata realizzata facendo ruotare di 5 gradi metà sezione longitudinale del componente, come mostrato in **Figura 6.54**.

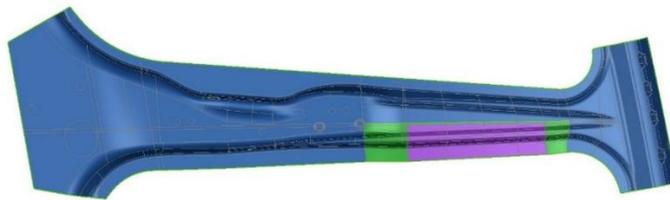


Figura 6.54 Operazione di *morphing* delle superfici del componente

Ruotando di 5 gradi ciascuna delle due metà longitudinali si è riusciti ad ottenere la geometria prevista dal processo di SmartForm nella preformatura.

Effettuando una sezione della geometria si può osservare più attentamente quanto esposto:

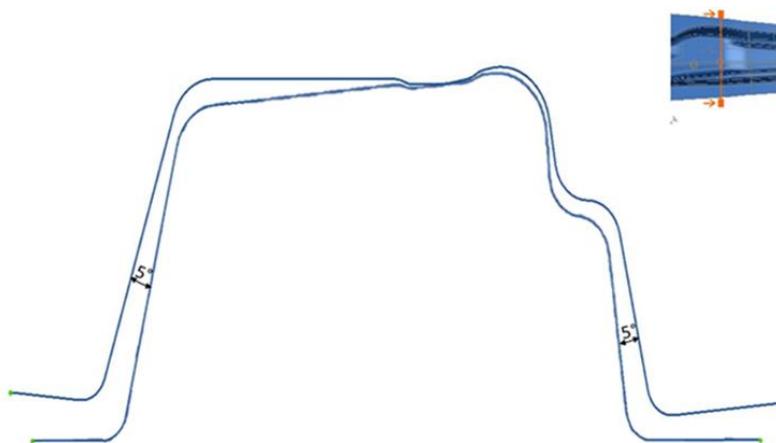


Figura 6.55 Confronto tra le sezioni prima e dopo del *morphing*

Dopo aver ottenuto la geometria del componente deformato, è stato possibile ricavare le superfici degli utensili dello stampo. Esse sono state successivamente esportate nel software Pam-Stamp per poter realizzare il processo completo. Le superfici della seconda formatura sono quelle ricavate dalla geometria originale del componente. Successivamente sono state esportate le superfici per realizzare il modello nel software Pam-Stamp, come mostrato in **Figura 6.56**.

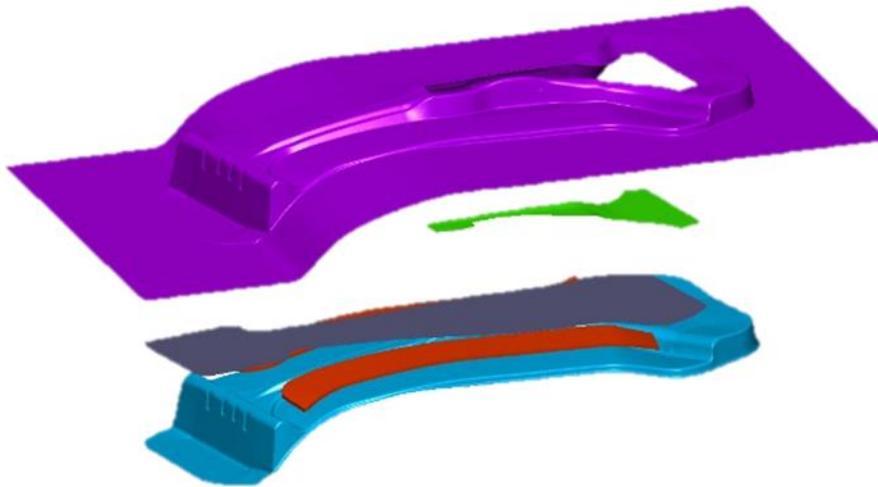


Figura 6.56 Stampa di preformatura del montante centrale

Gli utensili che agiscono comprimendo la sezione del componente sono stati ricavati partendo dalla geometria finale del componente, mediante il software Ansa di Beta CAE Systems.

Inoltre è stato aggiunto un utensile nella parte posteriore che ha permesso di ottenere una compressione omogenea anche nella zona interessata, poiché formata da un'area maggiore rispetto al resto del componente. In **Figura 6.57** sono mostrate le geometrie ottenute.

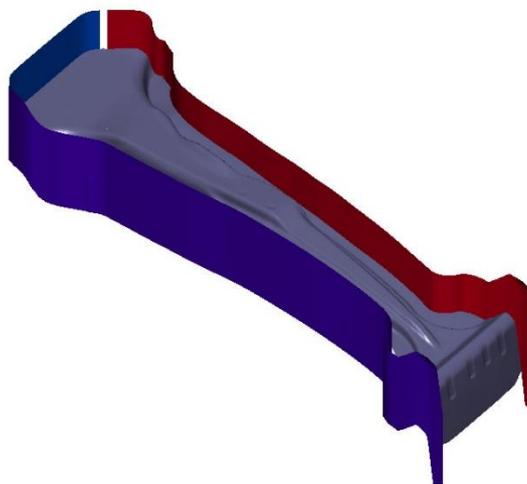


Figura 6.57 Utensili di compressione laterali

Come già accennato molto importante in questo processo è la cinematica degli utensili.

In funzione della corsa sostenuta dagli utensili laterali varia il risultato finale sia in termini di forza da applicare al bordo della lamiera, sia in termini di ritorno elastico del componente finito. Infatti variando la corsa degli utensili varia la percentuale di incremento di materiale all'interno dello stampo.

Di seguito viene mostrato il risultato relativo al processo ottimizzato, ma verrà riportato alla fine delle analisi un grafico che fa emergere come la forza di contatto e il ritorno elastico varino al variare della corsa degli utensili.

Nella configurazione ottimizzata è stato previsto un posizionamento degli utensili laterali a 4 mm dalla fine della corsa nel processo di formatura. Negli ultimi istanti del processo di formatura gli utensili percorrono la corsa completa di 4 mm, mantenendo il componente entro la curva di rifila.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti sul componente in termini di ritorno elastico sia nel processo normale, sia nel processo di SmartForm.

Analisi dei risultati

Prima di procedere all'analisi dei risultati ottenuti dal processo di SmartForm è bene mostrare i risultati che si otterrebbero senza l'utilizzo degli utensili laterali. Di seguito si fa riferimento quindi ad un processo che non prevede l'utilizzo della tecnologia di SmartForm sul medesimo componente avente lo stesso spessore e stesso materiale.

Per quanto riguarda il ritorno elastico, è stata ottenuta la seguente mappa degli spostamenti normali alla superficie:

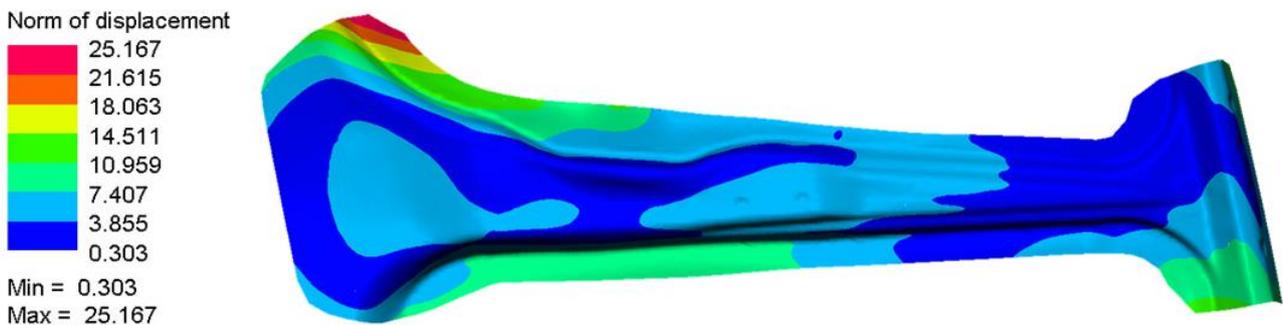


Figura 6.58 Mappa del ritorno elastico nel processo standard

Dall'analisi del ritorno elastico è emerso un valore massimo di spostamento pari a 25 mm.

Per confronto, si è passati allora all'analisi dei risultati nel processo di SmartForm. L'utilizzo degli utensili di compressione laterali, ha permesso di ottenere una compressione dell'intera sezione del componente, come mostrato in **Figura 6.59**.

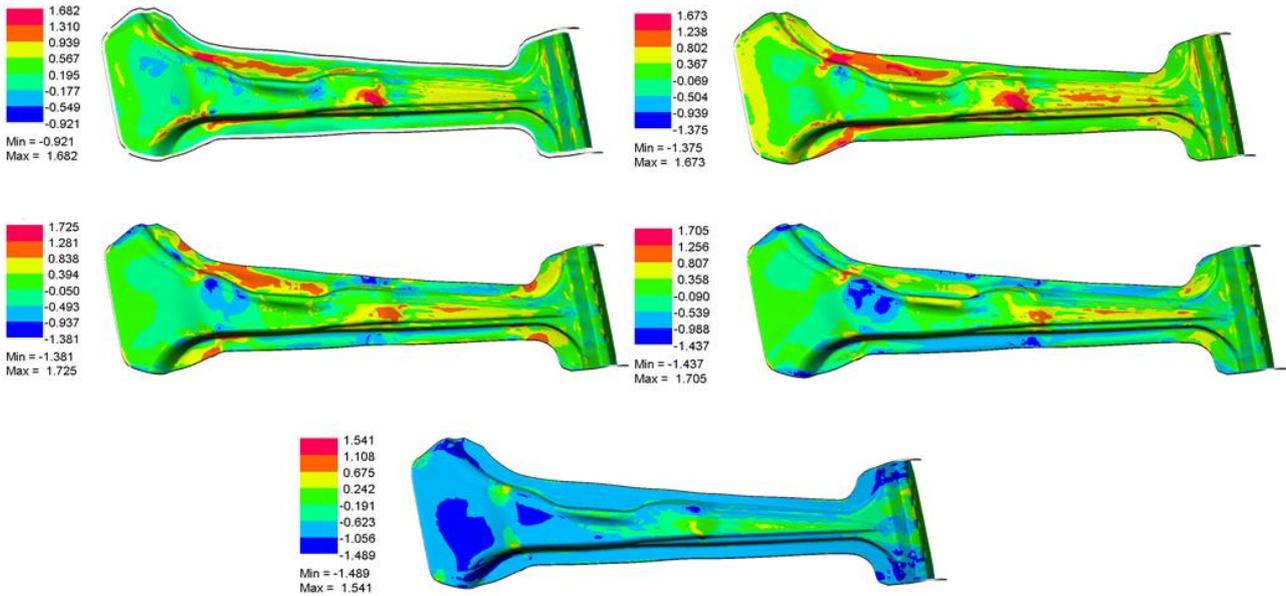


Figura 6.59 Mappa delle tensioni: a) A 10 mm dal fondo corsa; b) Posizionamento degli utensili laterali a contatto con la lamiera; c) A 4 mm dal fondo corsa; d) A 2 mm dal fondo corsa; e) A fondo corsa

Passando successivamente all'analisi del ritorno elastico, il risultato ottenuto è evidenziato in **Figura 6.60**.

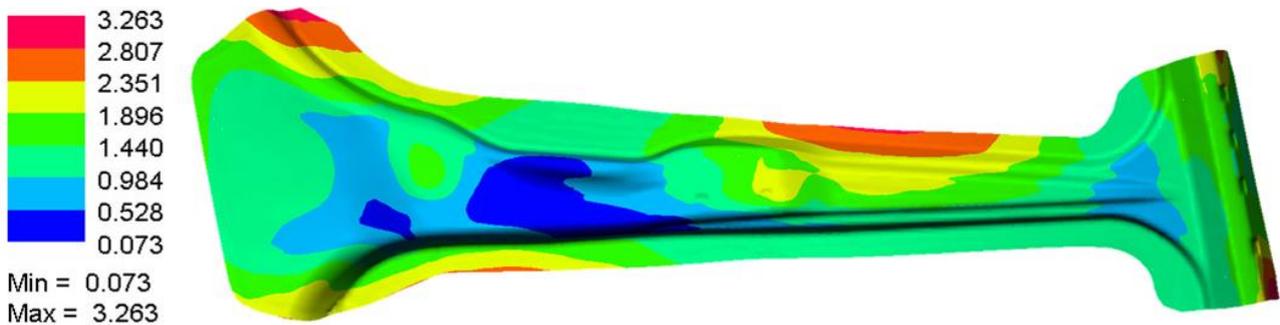


Figura 6.60 Mappa del ritorno elastico nella condizione ottimizzata

Rispetto alla configurazione senza utensili laterali (**Figura 6.58**), è stato ottenuto un miglioramento notevole del ritorno elastico (**Figura 6.60**). La criticità del processo riguarda però le elevate forze che gli utensili laterali devono applicare sulla lamiera. Nel grafico di **Figura 6.61** si può osservare come l'andamento della forza di contatto e del ritorno elastico varino al variare della corsa degli utensili, cambiando la percentuale di materiale spinto all'interno dello stampo nelle ultime fasi del processo.

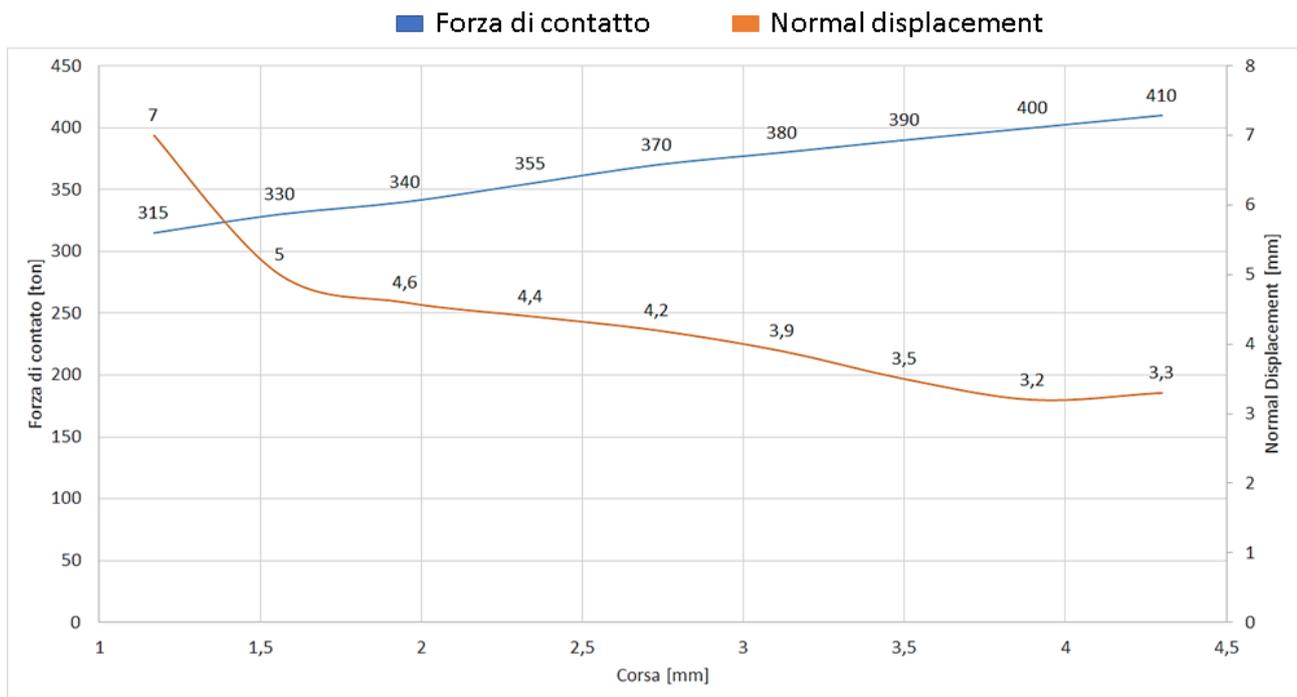


Figura 6.61 Andamento della forza di contatto e del ritorno elastico al variare della corsa degli utensili laterali

CONCLUSIONI CASO STUDIO

In quest'ultimo caso studio è stato analizzato il comportamento di un acciaio TRIP Bainitico assistito di nuova generazione in un processo innovativo di formatura a freddo, lo SmartForm.

L'analisi dei risultati sul componente ha permesso di ottenere un evidente miglioramento in termini di ritorno elastico. Gli utensili laterali svolgono un ruolo fondamentale per il conseguimento di questo risultato, infatti la diminuzione del ritorno elastico dipende dalla quantità di materiale che si riesce a comprimere nelle ultime fasi del processo. Da un altro punto di vista, però, questo rappresenta un limite del processo in quanto è stato notato che le forze esercitate dagli utensili laterali sulla lamiera devono essere elevate per garantire un buon risultato.

Un'altra considerazione molto importante riguarda la qualità superficiale delle zone in cui gli utensili laterali esercitano la pressione. Infatti, se tale pressione è molto elevata, con molta probabilità si verificheranno ondulazioni notevoli nel bordo del componente, che causano un decadimento della qualità superficiale dello stesso. In particolare, nel componente in esame, le alette che vengono portate in compressione sono elementi di connessione con altri componenti del Body in White del veicolo, quindi è necessario attenzionare la forza da applicare al bordo della lamiera.

7. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di tesi è stato svolto uno studio sul comportamento di due acciai alto-resistenziali di nuova concezione in due particolari processi di formatura. Un acciaio al Boro di nuova generazione in un processo di formatura a caldo, denominato Partial Hardening ed un acciaio TRIP Bainitico assistito nel processo di SmartForm.

Nella prima parte della tesi è stata analizzata la formatura nel processo di Partial Hardening.

Il primo caso studio ha riguardato un Tailored Welded Blank in cui è presente anche una patch, formato dai seguenti materiali: USIBOR 1500 per lamiera e patch ed H340F per la parte inferiore del componente. Il blank in esame ha uno spessore di 1,7 mm al quale si aggiunge lo spessore di 1 mm della patch nella zona centrale. L'attenzione è stata posta sul tempo ciclo del componente, in particolare sul raffreddamento. La canalizzazione conformale introdotta ha permesso di ottimizzare lo scambio termico tra lamiera e stampo. Infatti i risultati in termini di scambio termico hanno mostrato una riduzione di 4 s del tempo di tempra che, comparato con il corrispettivo della produzione standard dello stesso componente, passa da 18 a 14 secondi. In termini di fattibilità il componente è rientrato nelle tolleranze dettate dalla normativa interna. Per quanto riguarda le variazioni di spessore, infatti, sono stati ottenuti assottigliamenti di circa il 20 % e ispessimenti dell'1 % non presentando particolari criticità. Infine, dall'analisi delle temperature, non sono emerse particolari criticità in quanto al termine del processo di tempra in stampo, tutto il componente è risultato essere al di sotto dei 150 °C, temperatura alla quale è possibile estrarre il componente dallo stampo senza incorrere in problemi di distorsioni.

Nel secondo caso studio è stato analizzato il comportamento di un acciaio alto-resistenziale di nuova generazione con proprietà meccaniche superiori rispetto al precedente. Nel caso in esame è stata considerata una configurazione del blank monolitica, con spessore di materiale costante e pari a 1,7 mm.

Dall'analisi di fattibilità è stato notato un miglioramento rispetto al caso studio 1, in quanto le percentuali di assottigliamenti e ispessimenti sono risultate essere ridotte. Questo risultato ha messo in evidenza il miglioramento in termini di proprietà meccaniche del materiale perché questo acciaio, oltre a presentare un carico di snervamento superiore, ha mostrato anche una formabilità migliore. Dal punto di vista termico, le condizioni sono state più complesse in quanto è stato necessario prevedere il mantenimento ad elevata temperatura della parte inferiore del componente. Questo ha comportato, al termine del processo di tempra, il raggiungimento di temperature di circa 600 °C nella zona più calda. Temperature così elevate possono causare problemi di distorsione, anche notevoli, nel momento in cui viene estratto il componente dallo stampo.

Nel terzo caso studio è stato introdotto il processo di tempra rapida, considerando 4 configurazioni possibili di distribuzione del coefficiente di scambio termico sugli utensili dello stampo.

Nella prima configurazione è stato utilizzato un valore standard di HTC pari a $3,5 \text{ mW/mm}^2\text{K}$ su tutti gli utensili dello stampo ed è stata verificata e confermata la fattibilità del componente. Nella seconda configurazione è stato applicato un valore massimo di HTC pari a $65 \text{ mW/mm}^2\text{K}$ a tutti gli utensili. Come risultato non è stata confermata la fattibilità del componente a causa dell'eccessiva velocità dello scambio termico tra stampo e lamiera. Nello specifico, il serraggio del premente superiore ha causato la formazione di martensite prima dell'inizio della fase di formatura. La nascita di zone con proprietà meccaniche elevate ha comportato la lacerazione della lamiera in corrispondenza di esse. Nelle configurazioni successive è stato quindi necessario limitare la formazione di martensite prima del processo di formatura. Nella terza configurazione è stato applicato un valore di HTC standard ($3,5 \text{ mW/mm}^2\text{K}$) al premente superiore mantenendo invariate le proprietà termiche dei restanti utensili. Anche mediante questa modifica non è stato arginato il problema di formazione precoce di martensite. Nell'ultima configurazione è stato utilizzato il valore cautelativo pari a $35 \text{ mW/mm}^2\text{K}$ solo sul punzone, mentre per gli altri utensili è stato impostato un valore standard del coefficiente di scambio termico. Con questa soluzione sono stati ottenuti valori di assottigliamento pari al 24 % su un limite ammissibile del 20 %. In questo risultato è rimasta una certa criticità probabilmente superabile a fronte di modifiche sulle geometrie degli utensili o del componente stesso. Dagli studi termici sono emerse criticità derivanti dalle temperature elevate raggiunte nelle zone calde del componente al termine del processo di tempra in stampo. In queste zone, infatti, sono state evidenziate temperature di circa $600 \text{ }^\circ\text{C}$ che rendono difficile la movimentazione del componente fuori dallo stampo.

Nella seconda parte della tesi, è stato trattato il processo di SmartForm. Lo studio è stato incentrato sul comportamento di una lamiera costituita da acciaio TRIP Bainitico con spessore pari a 1,5 mm.

Il processo innovativo ha permesso l'ottenimento di un evidente miglioramento in termini di ritorno elastico. L'utilizzo di utensili laterali di compressione ha permesso di ottenere una diminuzione del ritorno elastico da 25 mm a 3 mm. Allo stesso tempo è emerso che una riduzione così drastica del ritorno elastico è dovuta all'applicazione di forze molto elevate degli utensili di compressione. Questo aspetto rappresenta un limite alla realizzazione del processo SmartForm. Inoltre con elevate forze che agiscono lungo lo spessore della lamiera, è probabile l'instaurarsi di ondulazioni sul bordo del componente, che ne compromettono la qualità superficiale. In dettaglio nel particolare in esame le alette che sono state portate in compressione, rappresentano degli elementi di connessione con altri componenti del Body in White. Un peggioramento in termini di qualità superficiale non potrebbe quindi essere tollerato.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.1 Esempio CAD Body In White di una vettura.....	2
Figura 2.2 Struttura veicolo.....	4
Figura 2.3 Evoluzione acciai in componenti automotive	6
Figura 3.1 Gabbia di sicurezza di un abitacolo	7
Figura 3.2 Curva σ - ϵ degli acciai presenti nel BiW di un'autovettura	8
Figura 3.3 Collocazione delle principali categorie di acciai nel grafico A%-UTS	9
Figura 3.4 Microstruttura acciai Dual Phase	11
Figura 3.5 Trattamento termico per l'ottenimento della struttura caratteristica degli acciai DP	12
Figura 3.6 Microstruttura acciai FB	14
Figura 3.7 Microstruttura acciai CP.....	14
Figura 3.8 Microstruttura acciaio martensitico temprato [15].....	15
Figura 3.9 Microstruttura acciai TRIP	16
Figura 3.10 Effetto del Boro nella microstruttura degli acciai da Hot Forming	17
Figura 3.11 Variazione caratteristiche materiale durante la formatura a caldo.....	18
Figura 4.1 Fasi del processo di imbutitura	21
Figura 4.2 Rappresentazione fibre di materiale durante la formatura di un contenitore cilindrico	22
Figura 4.3 Deformazioni parete verticale contenitore cilindrico	22
Figura 4.4 Componenti di uno stampo.....	23
Figura 4.5 Fasi del processo di formatura a caldo diretto.....	24
Figura 4.6 Variazione proprietà acciai durante le fasi della formatura a caldo	24
Figura 4.7 Blank	25
Figura 4.8 Inserimento del blank all'interno del forno	25
Figura 4.9 Trasferimento del blank dal forno alla pressa.....	26
Figura 4.10 Curve di raffreddamento diagramma CCT di un acciaio 22MnB5.....	27
Figura 4.11 Raffreddamento in aria	27
Figura 4.12 Curve σ - ϵ per differenti spessori della lamiera prima e dopo il trattamento di riscaldamento e successiva tempra	28
Figura 4.13 Rifila del componente mediante laser	28
Figura 4.14 Fasi del processo indiretto di formatura a caldo.....	29
Figura 4.15 Variazione proprietà acciaio durante il processo di PFHT.....	30
Figura 4.16 Analisi della microstruttura dell'acciaio durante le trasformazioni di fase.....	31
Figura 4.17 Forming Limit Curve di un acciaio 22MnB5 al variare della temperatura	31
Figura 4.18 Andamento del minimo del FLC in funzione dello spessore della lamiera	32

Figura 4.19 Ritorno elastico al variare della resistenza del materiale di pari spessore	32
Figura 4.20 Ritorno elastico di un materiale ad alta resistenza	33
Figura 4.21 Varianti del processo di Partial Hardening.....	33
Figura 4.22 Andamento della temperatura nei due casi di: a)Riscaldamento differenziato della lamiera; b) Riscaldamento differenziato dello stampo.....	34
Figura 4.23 Andamento delle temperature nel caso di riscaldamento differenziato dello stampo con sovrapposizione al diagramma CCT.....	35
Figura 4.24 Esempio del Partial Hardening su montante centrale	35
Figura 4.25 Curva limite di formabilità.....	36
Figura 4.26 Provino per la determinazione sperimentale della curva di formabilità	37
Figura 4.27 Curva limite di formabilità.....	37
Figura 5.1 Esempio card materiale in input sul software AutoForm	45
Figura 5.2 Curve di plasticizzazione di Von Mises e Tresca.....	45
Figura 5.3 Curva di plasticizzazione e individuazione di alcuni stati tensionali principali	46
Figura 5.4 Grafico riassuntivo dei materiali	47
Figura 5.5 Confronto tra acciai al Boro di vecchia e nuova generazione	47
Figura 5.6 Confronto tra acciaio TRIP Bainitico di nuova generazione e acciai TRIP convenzionali	48
Figura 6.1 Posizionamento del montante centrale all'interno del BiW dell'autovettura	49
Figura 6.2 Struttura del blank nel caso studio 1 Partial Hardening	50
Figura 6.3 Modello dello stampo in ambiente di simulazione	50
Figura 6.4 Schematizzazione della canalizzazione con le relative dimensioni principali	51
Figura 6.5 Esempio di estrazione della canalizzazione dal punzone	51
Figura 6.6 Canalizzazione della matrice	51
Figura 6.7 Canalizzazione del punzone	52
Figura 6.8 Canalizzazione del premente superiore	52
Figura 6.9 Canalizzazione del premilamiera.....	52
Figura 6.10 Stampo completo con canali di raffreddamento conformali.....	53
Figura 6.11 Mappa degli assottigliamenti e relativo range di variabilità.....	54
Figura 6.12 Zoom delle zone evidenziate.....	54
Figura 6.13 Mappa della martensite durante il processo di tempra in varie fasi: a) Dopo 2 sec; b) Dopo 4 sec; c) Dopo 5 sec; d)Dopo 8 sec; e) Dopo 11 sec; f) Dopo 14 sec	55
Figura 6.14 Andamento della percentuale di martensite ottenuta in funzione del tempo.....	56
Figura 6.15 Mappa delle temperature in varie fasi: a) Dopo la chiusura del premente superiore; b) Dopo la chiusura del premilamiera; c) Dopo la formatura; d)Dopo 2 sec di tempra; e) Dopo 5 sec di tempra; f) Dopo 14 sec di tempra	56

Figura 6.16 Andamento della temperatura durante il processo in tre punti caratteristici.....	57
Figura 6.17 Andamento della percentuale di martensite in funzione del tempo in due punti caratteristici del componente	58
Figura 6.18 Blank caso studio 2 Partial Hardening.....	59
Figura 6.19 Rappresentazione della differente temperatura applicata allo stampo.....	60
Figura 6.20 Rappresentazione della divisione della canalizzazione realizzata su tutti gli utensili dello stampo	60
Figura 6.21 Mappa degli assottigliamenti caso studio 2 Partial Hardening.....	61
Figura 6.22 Mappa delle temperature in varie fasi del processo: a) Dopo la chiusura del prelamiera; b) Dopo la formatura; c) Dopo 0,2 sec di tempra; d) Dopo 2 sec di tempra; e) Dopo 6 sec di tempra.....	62
Figura 6.23 Andamento della temperatura nella zona riscaldata.....	62
Figura 6.24 Mappa della martensite in varie fasi del processo di tempra: a) Dopo 0,6 sec; b) Dopo 0,8 sec; c) Dopo 1,1 sec; d) Dopo 2 sec; e) Dopo 4 sec; f) Dopo 6 sec	63
Figura 6.25 Mappa della martensite durante il raffreddamento in aria in diversi istanti di tempo: a) Dopo 24 sec; b) Dopo 37 sec; c) Dopo 50 sec; d) Dopo 1 min; e) Dopo 4 min; f) Dopo 7 min	64
Figura 6.26 Mappa martensite all'inizio del raffreddamento in aria	64
Figura 6.27 Mappa martensite alla fine del raffreddamento in aria.....	64
Figura 6.28 Blank caso studio 3 Partial Hardening.....	66
Figura 6.29 Suddivisione termica dello stampo	67
Figura 6.30 Andamento del coefficiente di scambio termico in funzione della pressione applicata dagli utensili sulla lamiera.....	67
Figura 6.31 Stampo completo caso studio 3 del Partial Hardening	68
Figura 6.32 Distribuzione del coefficiente di scambio termico secondo 4 configurazioni.....	68
Figura 6.33 Rappresentazione della prima configurazione.....	69
Figura 6.34 Mappa degli assottigliamenti configurazione 1 caso studio 3 Partial Hardening	70
Figura 6.35 Mappa delle temperature in alcune fasi del processo: a) Dopo la chiusura del prelamiera; b) Dopo la formatura; c) Dopo 0,5 sec di tempra; d) Dopo 2 sec di tempra; e) Dopo 6 sec di tempra.....	70
Figura 6.36 Mappa della martensite: a) Dopo 0,5 sec; b) Dopo 1 sec; c) Dopo 2 sec; d) After 3 sec; e) Dopo 6 sec.....	71
Figura 6.37 Rappresentazione della configurazione 2	71
Figura 6.38 Mappa degli assottigliamenti caso studio 3 configurazione 2 Partial Hardening	72
Figura 6.39 Mappe di temperatura (a) e di martensite (b) terminata la fase di serraggio del premente superiore	73
Figura 6.40 Rappresentazione configurazione 3 caso studio 3 Partial Hardening.....	73
Figura 6.41 Mappa degli assottigliamenti configurazione 3 caso studio 3 Partial Hardening	74

Figura 6.42 Mappa delle temperature (a) e di martensite (b) dopo la fase di serraggio del premente superiore	75
Figura 6.43 Rappresentazione configurazione 4 caso studio 3 Partial Hardening.....	75
Figura 6.44 Mappa degli assottigliamenti configurazione 4 caso studio 3 Partial Hardening	76
Figura 6.45 Mappa di temperatura (a) e di martensite (b) dopo la fase di serraggio del premente superiore	77
Figura 6.46 Rappresentazione grafica del processo di SmartForm [42]	79
Figura 6.47 Generica sezione ad Omega.....	79
Figura 6.48 Esempio di pre-formatura SmartForm	79
Figura 6.49 Esempio di formatura SmartForm con azione degli utensili laterali a fine formatura	80
Figura 6.50 Rappresentazione della compressione della sezione di un componente ad omega con l'azione degli utensili laterali SmartForm	80
Figura 6.51 Ritorno elastico in alcune sezioni caratteristiche del componente formato con SmartForm	80
Figura 6.52 Blank nel caso studio del processo di SmartForm.....	81
Figura 6.53 Rappresentazione grafica della cinematica degli utensili laterali	81
Figura 6.54 Operazione di morphing delle superfici del componente.....	82
Figura 6.55 Confronto tra le sezioni prima e dopo del morphing.....	82
Figura 6.56 Stampa di preformatura del montante centrale.....	83
Figura 6.57 Utensili di compressione laterali	83
Figura 6.58 Mappa del ritorno elastico nel processo standard	84
Figura 6.59 Mappa delle tensioni: a) A 10 mm dal fondo corsa; b) Posizionamento degli utensili laterali a contatto con la lamiera; c) A 4 mm dal fondo corsa; d) A 2 mm dal fondo corsa; e) A fondo corsa	85
Figura 6.60 Mappa del ritorno elastico nella condizione ottimizzata	85
Figura 6.61 Andamento della forza di contatto e del ritorno elastico al variare della corsa degli utensili laterali	86

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2.1 Proprietà High Strength Steels	5
Tabella 3.1 Requisiti degli acciai di un autoveicolo.....	7
Tabella 3.2 Confronto composizione chimica 22MnB5 di produttori differenti.....	17
Tabella 6.1 Parametri di processo caso studio 1.....	53
Tabella 6.2 Parametri di processo caso studio 2 Partial Hardening.....	60
Tabella 6.3 Parametri di processo caso studio 3 Partial Hardening configurazione 1.....	69
Tabella 6.4 Parametri di processo configurazione 2 caso studio 3 Partial Hardening.....	72
Tabella 6.5 Parametri di processo configurazione 3 caso studio 3 Partial Hardening.....	74
Tabella 6.6 Parametri di processo configurazione 4 caso studio 3 Partial Hardening.....	76

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. E. Malen, *Fundamentals of Automobile Body Structure Design*. SAE International.
- [2] Geoffrey Davies, *Materials for Automobile Bodies*. 2012.
- [3] T. B. Hilditch, T. de Souza, and P. D. Hodgson, *Properties and automotive applications of advanced high-strength steels (AHSS)*. Elsevier Ltd, 2015.
- [4] K. Mori *et al.*, “Hot stamping of ultra-high strength steel parts,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 755–777, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.007.
- [5] D. W. Michael McGhee, Ziman Wang, Alexander Bech, Paul J Shayler, “The effects of cylinder deactivation on the thermal behaviour and fuel economy of a three-cylinder direct injection spark ignition gasoline engine,” *Sage J.*, vol. 233, no. 11, pp. 2838–2849, 2018.
- [6] M. Granovskii, I. Dincer, and M. A. Rosen, “Economic and environmental comparison of conventional, hybrid, electric and hydrogen fuel cell vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 1186–1193, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.11.086.
- [7] K. Mori, S. Maki, and Y. Tanaka, “Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 209–212, 2005, doi: 10.1016/S0007-8506(07)60085-7.
- [8] T. Taylor and A. Clough, “Critical review of automotive hot-stamped sheet steel from an industrial perspective,” *Mater. Sci. Technol. (United Kingdom)*, vol. 34, no. 7, pp. 809–861, 2018, doi: 10.1080/02670836.2018.1425239.
- [9] B. K. Shaw, J. R. and Zuidema, “New High Strength Steels Help Automakers Reach Future Goals for Safety, Affordability, Fuel Efficiency and Environmental Responsibility,” *SAE*, 2001.
- [10] C. M. Tamarelli, “AHSS 101: the evolving use of advanced high-strength steel for automotive applications,” *Steel Mark. Dev. Inst.*, p. 42, 2011.
- [11] M. C. Yong-lin Kang, Qi-hang Han, Xian-meng Zhao, “Influence of nanoparticle reinforcements on the strengthening mechanisms of an ultrafine-grained dual phase steel containing titanium,” *Elsevier Sci.*, 2013.
- [12] C. C. Tasan *et al.*, “An Overview of Dual-Phase Steels: Advances in Microstructure-Oriented Processing and Micromechanically Guided Design,” *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 45, no. 1, pp. 391–431, 2015, doi: 10.1146/annurev-matsci-070214-021103.
- [13] “Arcelor Mittal.” [Online]. Available: <http://www.arcelormittal.com/>.
- [14] “ThyssenKrupp Steel.” .
- [15] UltraLight Steel Auto Body Consortium, “ULSAB-AVC - Advanced Vehicle Concepts Overview Report.,” p. 52, 2002.
- [16] J. Chiang, B. Lawrence, J. D. Boyd, and A. K. Pilkey, “Effect of microstructure on retained austenite

- stability and work hardening of TRIP steels,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 13–14, pp. 4516–4521, 2011, doi: 10.1016/j.msea.2011.02.032.
- [17] K. ichi Sugimoto, M. Kobayashi, A. Nagasaka, and S. ichi Hashimoto, “Warm Stretch-formability of TRIP-aided Dual-phase Sheet Steels,” *ISIJ Int.*, vol. 35, no. 11, pp. 1407–1414, 1995, doi: 10.2355/isijinternational.35.1407.
- [18] E. J. M. Bastian Rheingans, “Modelling precipitation kinetics: Evaluation of the thermodynamics of nucleation and growth,” *Elsevier Sci.*, 2015.
- [19] J. H. Schmitt and T. lung, “New developments of advanced high-strength steels for automotive applications,” *Comptes Rendus Phys.*, vol. 19, no. 8, pp. 641–656, 2018, doi: 10.1016/j.crhy.2018.11.004.
- [20] G. Frommeyer, U. Br ux, and P. Neumann, “Supra-ductile and high-strength manganese-TRIP/TWIP steels for high energy absorption purposes,” *ISIJ Int.*, vol. 43, no. 3, pp. 438–446, 2003, doi: 10.2355/isijinternational.43.438.
- [21] “1. Il processo di imbutitura 1.1.,” pp. 1–28.
- [22] P. E. Stampi and L. I. N. Serie, “Lavorazioni delle lamiere,” pp. 1–12.
- [23] I. H. Forming, “a Hot Forming Process : Direct and Indirect,” pp. 1–6, 2019.
- [24] K. Steinhoff, M. Oldenburg, B. Prakash, and (Edtrs.), “Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel,” *Proc. 6th Int. Conf. Hot Sheet Met. Form. High-Performance Steel*, 2017.
- [25] D. W. Fan, H. S. Kim, S. Biroasca, and B. C. De Cooman, “Critical review of hot stamping technology for automotive steels,” *Mater. Sci. Technol. Conf. Exhib. MS T’07 - "Exploring Struct. Process. Appl. Across Mult. Mater. Syst.*, vol. 1, no. January, pp. 98–109, 2007.
- [26] M. S. Dr. Stuart Keeler, Sc.D., Dr. Menachem Kimchi, *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines*. WorldAutoSteel, 2014.
- [27] G. L. Junjia Cui, Guangyong Sun, Junrui Xu, Xiaodong Huang, “A method to evaluate the formability of high-strength steel in hot stamping,” *Elsevier Sci.*, 2015.
- [28] Tom Taylor John McCulloch, “Effect of Part/Die Boundary Conditions on Microstructural Evolution during Hot Stamping 2000 MPa Class Boron Steel,” *Steel Res. Int.*, 2018.
- [29] M. Merklein, M. Wieland, M. Lechner, S. Bruschi, and A. Ghiotti, “Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: A review,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 228, pp. 11–24, 2016, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.09.023.
- [30] T. K. Eller *et al.*, “Plasticity and fracture modeling of quench-hardenable boron steel with tailored properties,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 214, no. 6, pp. 1211–1227, 2014, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.015.
- [31] W. F. Hosford, R. Caddell, W. F. Hosford, and R. Caddell, “Forming Limit Diagrams,” *Met. Form.*, pp. 245–262, 2012, doi: 10.1017/cbo9780511976940.017.

- [32] L. J. C. N.J. Den Uijl, "Advanced metal-forming technologies for automotive applications," in *Advanced Materials in Automotive Engineering*, 2012.
- [33] D. Banabic, *Sheet Metal Forming Process*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [34] I.H.D.HibbittP.V.MarcJ.R.Rice, "A finite element formulation for problems of large strain and large displacement," *Elsevier Sci.*
- [35] R.M.McMeekingJ.R.Rice, "Finite-element formulations for problems of large elastic-plastic deformation," *Elsevier Sci.*, 2003.
- [36] Klaus-Jürgen Bathe Ekkehard Ramm Edward L. Wilson, "Finite element formulations for large deformation dynamic analysis," *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 1975.
- [37] B. B. N.-M. Wang, "Analysis of Sheet Metal Stamping by a Finite-Element Method," *J. Appl. Mech.*
- [38] C. J. Gantes, "Nonlinear Finite Element Analysis," *Encycl. Earthq. Eng.*, no. June, pp. 1–35, 2014, doi: 10.1007/978-3-642-36197-5_138-1.
- [39] K. Nilsson and K. Nilsson, "Material modeling in Sheet Metal Forming Simulations Quality comparison between commonly used material models," no. June, 2019.
- [40] "Accurate Numerical Methods – Key for Accurate Virtual Prototyping." [Online]. Available: <https://www.esi.com.au/software/pamstamp-features/numericalmethods/>.
- [41] *Normativa materiali FCA*. .
- [42] ThyssenKrupp, "Efficient and robust cold forming process for high-strength steels," 2018.