

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**Cássio Bettin Oliveira  
Diego Rafael dos Santos**

**Processo de estampagem a quente “Hot Stamping”  
utilizadas para fabricação de peças para a indústria  
automobilística**

**Taubaté – SP  
2018**

**Cássio Bettin Oliveira  
Diego Rafael dos Santos**

**Processo de estampagem a quente “Hot Stamping”  
utilizadas para fabricação de peças para a indústria  
automobilística**

Trabalho de Graduação apresentado para  
obtenção do Certificado de Graduação do  
curso de Engenharia Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.

Orientador(a): Prof. Me. José Carlos Sávio  
de Souza

**Taubaté – SP  
2018**

**SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU**

O482p Oliveira, Cássio Bettin  
Processo de estampagem a quente “Hot Stamping” utilizadas para  
fabricação de peças para a indústria automobilística / Cássio Bettin Oliveira;  
Diego Rafael dos Santos. -- 2018.  
61 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de  
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2018.

Orientação: Prof. Me. José Carlos Sávio de Souza, Departamento de  
Engenharia Mecânica.

1. Aço. 2. Automóveis. 3. Design. 4. Dureza. 5. Estampagem a  
quente. I. Título. II. Santos, Diego Rafael dos. III. Graduação em  
Engenharia Mecânica.

CDD – 620.0042

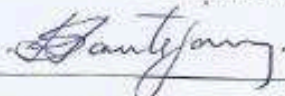
Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

Cássio Bettin Oliveira  
Diego Rafael dos Santos

Processo de estampagem a quente "Hot Stamping" utilizadas para  
fabricação de peças para a indústria automobilística


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO APROVADO COMO PARTE DO  
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUADO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA OU PRODUÇÃO"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO COORDENADOR DE CURSO DE GRADUAÇÃO DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA




Prof. Me. Fabio Henrique Fonseca Santejani  
Coordenador de Trabalho de Graduação

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Me. José Carlos Savio de Souza  
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ



Prof. Me. Ivair Alves dos Santos  
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

11/12/2018

## ***DEDICATÓRIA***

Dedico este trabalho a todos que me incentivaram a estudar e demonstraram o quanto é crucial aprender coisas novas para ser um bom profissional.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela fonte da vida e o dom da sabedoria.

Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao professor José Sávio, que acolheu meu trabalho em um momento crítico, tornando-o realidade.

Aos colegas de trabalho, que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

Aos Professores da Universidade de Taubaté que contribuíram e incentivaram a buscar novos conhecimentos sobre o tema.

A Professora Dione Figueira B. de Souza por ter nos auxiliado no decorrer do trabalho.

Aos Professores Me. Ivair Alves dos Santos e Me. Fábio Henrique Fonseca Santejani por aceitarem compor a banca examinadora.

## ***EPÍGRAFE***

“Não peça a Deus para guiar seu caminho se você não está disposto a mover seus pés”.

(CAIO CARNEIRO)

## RESUMO

Em 1973 com a crise do petróleo e no mesmo ano na qual a empresa sueca Plannja Hard Tech deu início a um novo processo de fabricação que visava à redução do peso através da diminuição da espessura da chapa a ser conformada a quente “Hot Stamping” e atingir altos valores de resistência mecânica devido ao processo de têmpera, grandes esforços foram gastos na época para desenvolver novas tecnologias e métodos de fabricação de novos produtos na indústria automobilística que reduziram o consumo de combustível devido ao alto custo do preço do barril de petróleo. O processo criado pela empresa sueca trouxe avanços significativos para a época, em que a indústria automobilística demandava por avanços tecnológicos, no final da crise em 1985 e em 1990 com o início do pensamento de preservação do meio ambiente os consumidores se tornaram mais exigentes em relação a emissão de CO<sub>2</sub>, em 1997 com a criação da Euro NCAP, trouxe um requisito a mais para as automobilísticas se preocuparem, com relação a segurança passiva, o que tornou viável o processo de “Hot Stamping” e teve grande aceitação no início do novo milênio, atingindo níveis exponenciais de produção. O processo que tem como sua principal característica a redução do peso e aumento significativo na resistência mecânica, é usado em peças anti-intrusão. O presente trabalho com caráter de pesquisa bibliográfica qualitativa visa demonstrar para os interessados em processos de fabricação da indústria de automóveis como é realizado o processo intrinsecamente com os passo a passos de cada operação e a evolução dos métodos para os dias atuais, cujo o resultado revelou que os estudos de novos materiais e métodos para o processo continuam, o que podemos chegar à conclusão que teremos cada vez mais design arrojados com geometrias complexas, estruturas mais leves e com altíssima resistência mecânica.

**Palavras-chave:** Estampagem a quente. Aço. Design. Dureza. Automóveis.



## ABSTRACT

In 1973 with the oil crisis and in the same year that the Swedish company Plannja Hard Tech began a new manufacturing process aimed at reducing weight by decreasing the thickness of the sheet to be conformed to hot "Hot Stamping" and reaches high mechanical strength values due to the quenching and tempering process, great efforts were expended at the time to develop new manufacturing process technologies and new products in the automotive industry that would reduce fuel consumption due to the high cost of oil prices. The process created by the Swedish company brought significant advances to the era when the automotive industry demanded technological advances at the end of the crisis in 1985 and in 1990 the beginning of the thought of the preservation of the environment the consumers became more demanding with regard to emission of CO<sub>2</sub> in 1997 with the creation of Euro NCAP brought an additional requirement for automakers to concern with regard passive safety, which made the stamping process feasible and was widely accepted at the beginning of the new millennium reaching exponential levels of production. The process that has as its main characteristic weight reduction and significant increase in mechanical strength is used in anti-intrusion parts. This qualitative bibliographical research aims at demonstrating to those interested in manufacturing processes in the automobile industry how the process is carried out intrinsically with the step by step of each operation and the evolution of the process to the present day, the result revealed that the studies of new materials and methods for the process continue what we can arrive at the conclusion that we will have more and more daring design with complex geometries, light structures and with very high mechanical resistance.

**KEYWORDS:** Hot Stamping, Steel, Design, Hardness, Automobiles.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva Tensão/Deformação (Springback).....	23
Figura 2 - Evolução dos diversos tipos de Aços.....	26
Figura 3 - Diagramas TRC relativos aos aços da tabela 1 .....	27
Figura 4 - Comportamento dos aços ao boro na estampagem a quente .....	29
Figura 5 - Componentes automotivos .....	29
Figura 6 - Diagrama de CCT para o aço 22MnB5.....	30
Figura 7 - Balanço entre resistência mecânica e ductilidade.....	30
Figura 8 - Evolução da produção de peças entre 1984 e 2008.....	31
Figura 9 - Teste frontal Fiat 500X + 6 Airbags.....	32
Figura 10 - Comparativo entre o Rover 100 e Honda Fit.....	33
Figura 11 - Representação esquemática do processo “Hot Stamping” .....	34
Figura 12 - Ciclo Térmico .....	35
Figura 13 - Processo direto de estampagem a quente.....	35
Figura 14 - Processo indireto de estampagem a quente.....	36
Figura 15 - Fases do processo de aquecimento resistivo, (a) Aquecimento e (b) Estampagem .....	37
Figura 16 - Prensa hidráulica .....	38
Figura 17 - Principais componentes de uma prensa hidráulica .....	39
Figura 18 - Componentes de ferramenta de corte.....	41
Figura 19 - Corte Laser .....	42
Figura 20 - Aquecimento não homogêneo do blanque na ferramenta .....	43
Figura 21 - Austenitização localizada.....	44
Figura 22 - Matriz com zona aquecida de forma seletiva .....	45
Figura 23 - Valores de referência Usibor 1500P .....	49
Figura 24 - Blanque aguardando para ser transportado para o forno .....	50
Figura 25 - Blanque sendo transportado para o forno.....	50
Figura 26 - Aquecimento do blanque na temperatura de austenitização .....	51
Figura 27 - Blanque aquecido a 900°C.....	52
Figura 28 - Transferência do blanque aquecido .....	52
Figura 29 - Posicionamento do blanque na matriz .....	53
Figura 30 - Fechamento da matriz e realização da estampagem.....	53

Figura 31 - Ferramenta de “Hot Stamping” .....	54
Figura 32 - Retirada da peça estampada .....	55
Figura 33 - Corte laser do túnel.....	55
Figura 34 - Propriedades Mecânicas.....	56
Figura 35 - Medição de pontos críticos de uma peça.....	57

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Composições químicas típicas de aços destinados para a estampagem a quente.....	26
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A+B - Austenita e Bainita

A+F - Austenita e ferrita

A+M - Martensita com austenita retida

A+P - Austenita e Perlita

$\bar{\sigma}$  - Tensão Limite de Escoamento

$\varepsilon$  - Deformação do material

$\dot{\varepsilon}$  - Taxa de Deformação

$\Theta$  - Temperatura

Al - Alumínio

C - Carbono

Cr - Cromo

Máx - Máximo

Mín - Mínimo

MnB - Magnésio e Boro

MPa - Mega Pascal

S - Enxofre

Si - Silício

P – Fósforo

B – Boro

Ti – Titânio

Cu – Cobre

Ni - Níquel

Mo – Molibdênio

AlSi – Alumínio e Silício

CMn – Carbono Marganês

TRC - Transformação por Resfriamento Contínuo

SAE – Society of Automotive Engineers

AISI – American Iron and Steel Institute

HV – Dureza Vickers

HR – Dureza Rockwell

CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono

NCAP – New Car Assessment Programme

IF – Interstitial Free

HSLA - High Strength Low Alloy

UHSS - Ultra High Strength Steel

UHSLA – Ultra High Strength Low Alloy

AHSS - Advanced High Strength Steel

°C - Graus Celsius

°C/s - Graus Celsius por segundo

R<sub>m</sub> – Ruptura do material

A<sub>r3</sub> – Temperatura de início da formação austenítica

A<sub>3</sub> – Temperatura de recristalização

B<sub>s</sub> – Bainita

M<sub>s</sub> - Martensitica

CCT – Diagrama de Transformação Isotérmico Temperatura versus Tempo

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	17
2.1 PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE METAIS NA FABRICAÇÃO .....	17
2.1.1 Classificação dos processos de fabricação .....	17
2.2 CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE METAIS.....	19
2.2.1 Caracterização do material.....	19
2.3 ESTAMPAGEM .....	20
2.3.1 Introdução .....	20
a) Corte.....	20
b) Dobramento e encurvamento .....	20
c) Estampagem profunda .....	20
2.3.2 Plasticidade .....	21
2.3.2.1 Introdução .....	22
2.3.2.2 Critérios .....	22
2.3.3 Temperabilidade.....	22
2.3.4 Springback .....	23
2.4 PROCESSO DE HOT STAMPING.....	24
2.4.1 Surgimento .....	24
2.4.3 Produção dos aços para o processo hot stamping.....	30
2.4.4 Órgão certificador de segurança .....	32
2.5 PROCESSO DE HOT STAMPING.....	34
2.5.1 Método de fabricação .....	35
2.5.1.1 Método direto .....	35
2.5.1.2 Método indireto.....	36

2.5.2 Aquecimento por resistência direto na matriz.....	37
2.6 MÁQUINA PARA ESTAMPAGEM.....	38
2.6.1 Prensas para conformação de peças a quente e a frio .....	38
2.6.1.1 Prensas hidráulicas .....	38
2.7 – MATRIZES PARA ESTAMPAGEM A FRIO E A QUENTE.....	39
2.8 CORTE LASER .....	41
2.9 INOVAÇÕES NA ESTAMPAGEM A QUENTE.....	42
2.9.1 Propriedades mecânicas sob medida .....	42
2.9.2 Outras inovações .....	45
3 METODOLOGIA.....	47
3.1 TIPOS DE PESQUISAS .....	47
3.2 NATUREZA DA PESQUISA .....	48
4 DESENVOLVIMENTO.....	49
4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM .....	49
4.1.2 Etapas de processo.....	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	56
6 CONCLUSÃO.....	59
6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO.....	59
REFERÊNCIAS.....	60



## 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda do mercado automobilístico, crescem, também, a preocupação com a diminuição de emissão de CO<sub>2</sub>, o crescimento da segurança passiva, a redução do peso e o consumo de combustível dos automóveis de forma que acabou gerando uma competição em inovação nos processos industriais das montadoras, fazendo com que buscassem cada vez mais desenvolvimento, trazendo benefícios para automóveis, com soluções construtivas mais leves, mais conforto e segurança para os passageiros. Isso se tornou um desafio para os fornecedores de componentes para as automobilísticas que estão sempre buscando criar novas tecnologias para atender às expectativas das montadoras. A fabricação de peças estampadas a quente vem ganhando destaque na era da indústria 4.0.

O aço é ainda hoje o material em maior volume na fabricação de um carro, e o processo de “Hot Stamping” vem aumentando os níveis de produção à medida em que novas evoluções de materiais e processos surgem, fazendo com que as empresas detentoras destas tecnologias possuam um diferencial em relação ao seu concorrente, trazendo assim um ambiente de disputa de mercado, na medida em que os usuários finais se tornam cada vez mais rigorosos em relação aos resultados dos testes de segurança, emissão de poluentes e design.

O processo de estampagem a quente, é mais conhecido como “Hot Stamping”, e consiste em conformar uma lâmina de aço aquecida na temperatura de austenitização em um único estágio.

O processo em si seguido de têmpera permite a fabricação de peças com alta resistência mecânica, menores cargas de conformação, redução significativa na espessura da peça, minimiza o efeito mola e o nível de tensões residuais da peça, o que melhora sua precisão dimensional. A melhor conformabilidade proporciona maior liberdade de design para as peças, no contexto geral é a combinação de conformação e de endurecimento em uma única operação.

A relevância do tema abordado neste trabalho é mostrar a importância da utilização deste novo processo na indústria de transformação, descrevendo, detalhadamente, a fabricação de um componente de um automóvel e apresentando

as melhorias que este componente apresenta em relação às suas propriedades mecânicas, após passar por este processo de conformação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE METAIS NA FABRICAÇÃO

Para Altan, Oh, Gegel (1999), um dado material, normalmente sem forma ou de geometria simples, é transformado em um componente útil através de um processo de fabricação. Este produto, na maioria das vezes, tem geometria complexa, tamanho, precisão, tolerâncias, aparência e propriedades definidas.

#### 2.1.1 Classificação dos processos de fabricação

Existem quatro características principais em qualquer processo de fabricação, a saber: geometria, tolerância, razão de produção e fatores ambientais e humanos.

- a) Geometria: Cada processo de manufatura é capaz de produzir uma família de geometrias. Dentro desta família há geometrias que podem ser produzidas através de extraordinário custo e esforço. Por exemplo, o processo de forjamento permite a produção de componentes que podem ser facilmente extraídos de uma matriz, isto é, matrizes superior e inferior. Através do uso de matriz especial com partes deslizantes é possível obter peças com detalhes perpendiculares à direção de forjamento e com formas mais complexas.
- b) Tolerâncias: Nenhuma dimensão pode ser produzida exatamente como é especificada pelo projetista. Portanto, cada dimensão é associada a uma tolerância, assim como cada processo de fabricação permite a obtenção de certas tolerâncias dimensionais, de forma e acabamento superficial. Tolerâncias dimensionais servem a um duplo propósito. Primeiro, elas permitem o funcionamento adequado dos componentes fabricados. O segundo propósito das tolerâncias dimensionais é proporcionar intercambiabilidade. Sem intercambiabilidade, a capacidade de substituir um componente defeituoso (um rolamento, por exemplo) por um novo, de um fabricante diferente – a moderna produção seriada seria inimaginável.
- c) Razão de produção: A razão de produção que pode ser atingida através de um dado processo de fabricação é provavelmente o

seu aspecto mais significativo, porque ela indica os aspectos econômicos e a produtividade que pode ser atingida. Nos países industrializados, as indústrias de produção representam cerca de 30% a 40% do produto interno bruto. Conseqüentemente, a produtividade destas indústrias, isto é, a produção de componentes discretos, conjuntos montados e produtos por unidade de tempo, é o fato mais importante a influenciar o padrão de vida num país, assim sua posição competitiva no mercado internacional de bens de produção.

- d) Fatores ambientais e humanos: Todo processo de fabricação deve ser examinado visando (a): seus efeitos ambientais, isto é, em termos de poluição do ar, água e sonora, (b); sua interface com os recursos humanos, isto é, em termos de segurança humano, efeitos fisiológicos e psicológicos, e (c) seu uso de energia e recursos materiais, particularmente em termos de escassez de energia e materiais.

Para Altan, Oh, Gegel (1999) a fabricação e montagem de componentes metálico podem ser classificados, de maneira simplificada, em cinco áreas gerais:

- a) Processos para formas primárias em metais, tais como fundição, lingotamento, coquilhamento e metalurgia do pó. Em todos estes processos de fabricação o material inicialmente não tem forma definida, mas obtém através do processo.
- b) Processos de conformação dos metais, tais como laminação, extrusão, forjamento a frio e a quente, dobramento e repuxo, nos quais o metal é conformado através de deformação plástica.
- c) Processos de usinagem dos metais, tais como corte em serra, torneamento, fresamento e brochamento, nos quais uma nova forma é gerada através da remoção de material.
- d) Processo de tratamento dos metais, tais como tratamento térmico, anodização e endurecimento superficial, nos quais a forma do componente permanece essencialmente imutável, mas sofre mudanças de aparência e propriedades.
- e) Processos de união, incluindo (a) união física, tais como aquelas por soldagem ou por difusão; e (b) união mecânica, tais como rebitagem, união eixo-cubo por contração e montagem mecânica, Altan, Oh, Gegel (1999, p. 1-2).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DE METAIS

Para Altan, Oh, Gegel (1999) na conformação de metais, um componente inicialmente simples – uma chapa metálica, por exemplo, é plasticamente deformado entre as ferramentas (matriz ou estampo) para obtenção da configuração final desejada. Portanto, um componente de geometria simples é transformado num outro complexo, em que as ferramentas guardam a geometria desejada e aplicam pressão ao material em deformação através da interface ferramenta-material. O processo de conformação de metais comumente produz pouca ou nenhuma sobra e a geometria final do componente aparece num curto período de tempo, normalmente com um ou poucos golpes de uma prensa.

Como resultado final, a conformação de metais apresenta um potencial para a economia de energia e material – especialmente em médios e grandes lotes, em que o custo de ferramental pode ser facilmente amortizado. Além disso, para um dado peso, componentes produzidos por conformação exibem melhores propriedades mecânicas, metalúrgicas e confiabilidade do que aqueles produzidos por fundição ou usinagem.

### 2.2.1 Caracterização do material

Segundo Altan, OH, Gegel (1999), para uma dada composição de material e uma história de deformação-tratamento térmico (microestrutura), a tensão de escoamento e a conformabilidade nas várias direções (anisotropia) são as mais importantes variáveis na análise de um processo de conformação de metais.

Para uma dada microestrutura, a tensão de escoamento,  $\bar{\sigma}$ , é escrita como função da deformação  $\epsilon$ , da taxa de deformação  $\dot{\epsilon}$  e da temperatura  $\theta$ :

$$\bar{\sigma} = F(\epsilon; \dot{\epsilon}, \theta)$$

*Equação 1*

Para formular a Equação Constitutiva, Equação 1, é necessário conduzir testes de torção, de deformação plana, de compressão e testes de compressão uniforme.

Para Altan, Oh, Gegel (1999) conformabilidade é a capacidade do material ser deformado sem apresentar ruptura, isto depende (a) das condições existentes durante o processo de deformação (tais como temperatura, taxa de deformação e a história anterior de tensão e deformação) e (b) das variáveis do material (como composição química, vazios internos, inclusões e microestrutura inicial). No processo de conformação a quente, gradientes de temperatura no material em deformação (por exemplo, devido a resfriamentos locais) também influenciam o fluxo metálico e os fenômenos de ruptura.

## 2.3 ESTAMPAGEM

### 2.3.1 Introdução

Chiaverini (1977) menciona que a deformação plástica é elevada a efeito com emprego de prensas de estampagem, com o auxílio de dispositivos especiais chamados estampos ou matrizes.

Basicamente, a estampagem compreende as seguintes operações:

- a) Corte
- b) Dobramento e encurvamento
- c) Estampagem profunda

Para Gouveia, Rodrigues e Martins (2011) a estampagem é um processo tecnológico que permite fabricar peças a partir de chapa plana. Trata-se de um dos processos de transformação de chapa metálica mais importantes, cujo campo de aplicação abrange um leque muito amplo na indústria de transformação mecânica, entre as quais se destacam como as principais utilizadoras; a automóvel (painéis de portas, 'capots', componentes estruturais, etc.), aeroespacial e aeronáutica (fuselagem, apoios, etc.), a de produtos alimentares, domésticos e decorativos

(taças, painéis, tampas, etc.), e a de produtos hospitalares (reservatórios, tabuleiros, etc.).

Para Gouveia, Rodrigues e Martins (2011) estampagem pode considerar-se um processo tecnológico de elevada produtividade, onde cadências médias de produção podem facilmente atingir a ordem das 5000 peças/hora. Naturalmente que este valor depende da complexidade e dimensões das peças que se está a produzir, pressupondo nos casos das maiores cadências uma alimentação da fita à ferramenta contínua.

De acordo com Gouveia, Rodrigues e Martins (2011) uma definição possível para o processo de estampagem, é de que trata-se de um processo tecnológico de transformação de chapa, no qual uma chapa plana de material metálico é forçada a escoar controladamente pela ação de um encostador para o interior de uma matriz, em consequência da atuação de um cunho, dando origem a uma peça oca com a geometria definida pelo cunho e pela matriz e onde ocorre pouca variação da espessura relativamente ao seu valor inicial.

Conforme Gouveia, Rodrigues e Martins (2011) esse processo de conformação permite que a forma das peças que se podem produzir é muito variada, sendo mesmo habitual classificar a estampagem através da geometria básica das peças que se pode obter através da estampagem de peças cilíndricas, cônicas, retangulares e de formas complexas, compreendendo esta última classe todas as peças que não são possíveis de incluir nas restantes operações. Naturalmente que cada uma destas operações tem características próprias, cujo estudo analítico se revela difícil de fazer para a maioria dos casos.

### **2.3.2 Plasticidade**

Não há como construir um entendimento sólido da estampagem se não for explicado a plasticidade na íntegra.

### 2.3.2.1 Introdução

Para Gouveia, Rodrigues e Martins (2011), a teoria da elasticidade tem a sua génese em duas propriedades fundamentais do comportamento elástico dos materiais metálicos: a configuração inicial do corpo é completamente recuperada quando as solicitações exteriores deixam de atuar; e a deformação elástica depende exclusivamente dos estados de tensão inicial e final. Pelo contrário, em regime plástico, ou seja, quando as extensões aplicadas no corpo ultrapassam as que determinam o limite de validade das leis de Hooke, surgem alterações comportamentais dos materiais, de tal modo que a deformação deixa de ser um processo reversível e as características mecânicas e geométricas do corpo passam a depender do modo (trajetória ou história) como o carregamento foi aplicado.

Para o regime de deformação plástica, surgem alguns fenômenos particulares que determinam o seu comportamento, designadamente o encruamento, a anisotropia plástica, a histerese elástica e o efeito de Bauschinger.

### 2.3.2.2 Critérios

Segundo Gouveia, Rodrigues e Martins (2011), um dos aspectos mais importantes da teoria da plasticidade é o de se estabelecerem relações que permitam conhecer as condições de entrada em domínio plástico de um material, quando sujeito a uma combinação arbitrária de tensões.

Os critérios de plasticidade são essencialmente relações empíricas comprovadas por um conjunto consistente de ensaios experimentais.

### **2.3.3 Temperabilidade**

Por temperabilidade entende-se que é a capacidade de um dado aço transformar-se em martensita, microconstituente com a maior resistência mecânica capaz de ser formado nesta mesma liga. A formação da martensita depende da



composição química e da microestrutura da austenita para transformação fora das condições de equilíbrio termodinâmico a taxa de resfriamento.

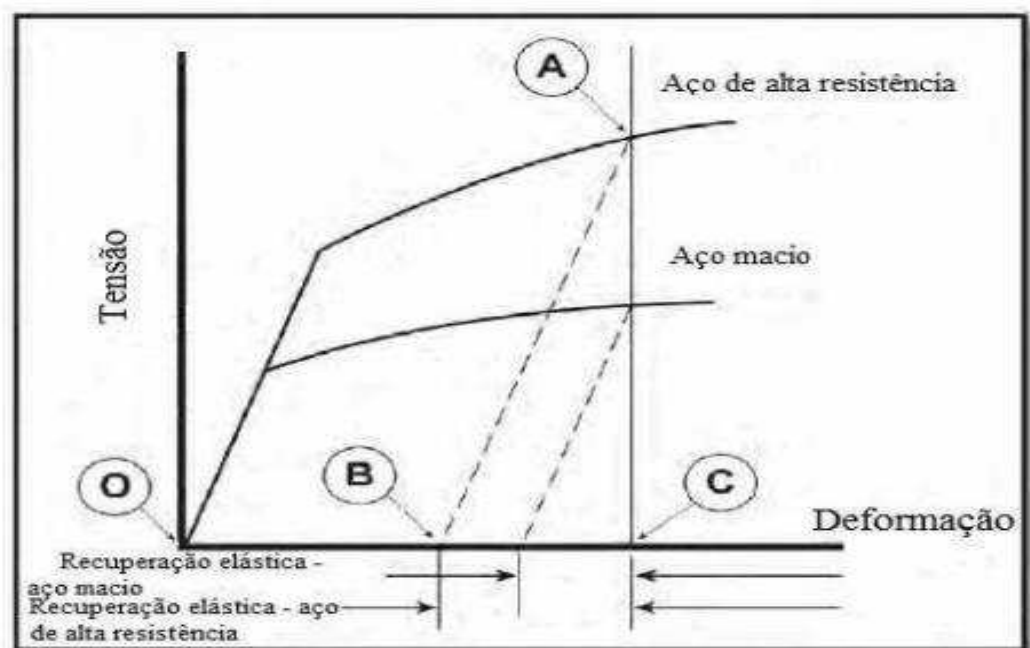
### 2.3.4 Springback

Segundo Ramezani (2010), springback ou retorno elástico, é o efeito mola ou recuperação elástica do material. Este efeito traz uma alteração indesejável de forma parcial que ocorre em chapas de aço em consequência da remoção de restrições após a conformação.

Quando um blaque é deformada plasticamente em um componente, a forma do mesmo se desvia um pouco da forma do punção e da matriz após a remoção da ferramenta.

Esse desvio dimensional da peça é mostrado como springback, causado pela recuperação elástica da peça, que pode ser ilustrada simplesmente na curva de tensão-deformação mostrada na Figura 1.

Figura 1 - Curva Tensão/Deformação (Springback)



Fonte: Site Scribd (2018)

A descarga dada pela remoção de todas as forças externas a partir do nível de deformação plástica indicada no ponto “A” seguiria a linha “AB” para “B”, onde “OB” é a deformação plástica permanente e BC é a recuperação elástica da deformação. Embora essa recuperação da deformação elástica em um determinado local seja muito pequena, isso pode causar uma significativa mudança na forma do componente que está sendo fabricado devido ao seu efeito mecânico multiplicador em outras localidades quando a deformação por dobramento e/ou superfícies curvadas estão envolvidas. Este efeito ocorre nos processos de estampagens tradicionais onde a conformação da chapa é feita a frio, ou seja, o material será processado a temperaturas abaixo da temperatura de recristalização.

## 2.4 PROCESSO DE HOT STAMPING

Nesse trabalho abordaremos em específico a estampagem a quente.

### 2.4.1 Surgimento

A indústria automobilística impulsionou enormes avanços na evolução dos processos metalúrgicos com o objeto de produzir aço barato e com alta estampabilidade. Essa fase encontrou seu auge nos anos de 1950, quando ocorreu o predomínio de um estilo automotivo exuberantemente curvilíneo, não por acaso apelidado de rabo-de-peixe, em função do formato extravagante da região posterior dos automóveis daquela época Gorni (2009).

Para Gorni (2009) esse bucólico estilo dos anos dourados, certamente uma desforra pelos duros anos da II Guerra Mundial, foi repentinamente inviabilizado pela primeira crise do petróleo, em 1973, talvez o primeiro aviso sério sobre a finitude dos recursos do planeta. O exorbitante aumento do preço dos combustíveis obviamente impôs a redução de seu consumo. Uma das formas mais eficazes para se conseguir esse objetivo foi a redução do peso dos automóveis, a adoção de design mais sóbrio e do uso de materiais mais leves.

A crise terminou em meados de 1985, e no período pós-guerra a indústria automobilística continuou demandando por avanços nos materiais por ela adotados, visando diminuir o preço de aquisição e manutenção de seus produtos. Além disso, as crescentes exigências dos consumidores por maior conforto a bordo, como ar condicionado, direção hidráulica, vidros elétricos, etc. Finalmente, o ambiente extremamente competitivo em escala global que surgiu a partir dos anos 1990 e os desafios ecológicos do início do milênio vêm impondo desafios cada vez mais sérios ao setor Gorni (2009).

A estampagem a quente foi originalmente desenvolvida pela empresa sueca Plannja Hard Tech em 1973, justamente o ano em que surgiram os primeiros grandes desafios para a indústria automobilística, em função dos desenfreados aumentos que então ocorreram na cotação do petróleo. Contudo, sua aplicação industrial foi restrita até o início do novo milênio, quando sua aceitação aumentou de forma exponencial. Atualmente a estampagem a quente é empregada basicamente para a produção de componentes anti-intrusão e de reforços estruturais para carros de passageiros, cujo tamanho relativamente grande, formato complexo e altos níveis de resistência mecânica tornam difícil o uso de aços AHSS estampados a frio Gorni (2010, p.3).

#### **2.4.2 Classificação dos aços no processo “Hot Stamping”**

Para Soares (2008) os aços aplicados na indústria automobilística, em especial na carroceria, podem ser definidos de várias formas diferentes, que pode ser verificado na Figura 2 a evolução dos aços avançados de alta resistência ao longo das últimas três décadas. A lista abaixo apresenta uma definição, por designação metalúrgica:

- a) Aços de baixa resistência: aços macios de elevada ductilidade (Mild Steels) / (IF);
- b) Aços convencionais de alta resistência: aços carbono-manganês (CMn); aços “bake hardenable” (BH), aços microligados de alta resistência (HSLA);
- c) Aços de ultra-alta resistência (UHSS): aços bifásicos (DP), aços trifásicos (TRIP), aços ao boro, aços martensíticos.

Outra possibilidade é a classificação dos materiais segundo as suas propriedades mecânicas de tração:

- a) Mild Steels – Aços macios (baixo carbono) –  $R_m < 270$  MPa;
- b) HSLA – Aços de alta resistência baixa liga (microligados) –  $R_m > 270$  MPa;
- c) AHSS – Aços avançados de alta resistência –  $R_m > 600$  MPa;
- d) UHSS – Aços avançados de ultra-alta resistência –  $R_m > 1000$  Mpa.

**Figura 2 - Evolução dos diversos tipos de Aços**



Fonte: Gorni (2009)

A Tabela 1 mostra a composição química de 4 tipos de aços processados pelo processo de “Hot Stamping”. As ligas foram otimizadas para os aços destinados à estampagem a quente e possui teores de carbono da ordem de 0,20% e teores de manganês relativamente elevados, a partir de 1,20%. O último elemento é muito efetivo para retardar a transformação da austenita, ou seja, para melhorar a temperabilidade do aço.

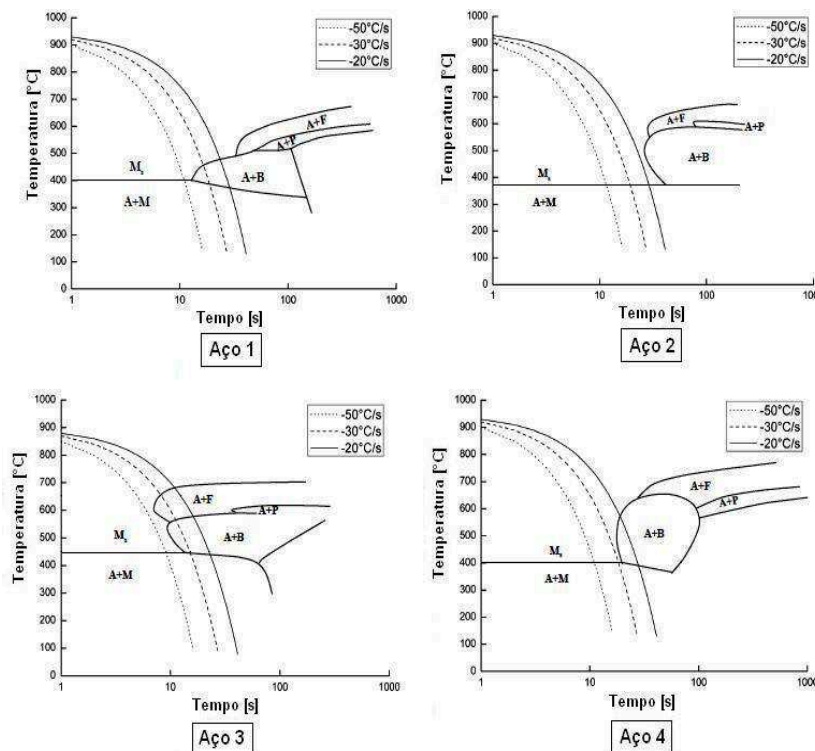
**Tabela 1- Composições químicas de aços para o processo de “Hot Stamping”**

Aço	C	Mn	Si	Cr	B	Al	Ti	Mo
1	0,23	1,25	0,29	0,21	0,0030	-	-	-
2	0,21	2,14	0,25	-	-	0,031	-	-
3	0,20	1,22	0,19	0,24	0,0019	-	-	-
4	0,23	1,25	0,25	0,16	0,0035	0,015	0,035	0,10

Fonte: Gorni (2010)

A Figura 3 mostra os diagramas dos aços 1, 2, 3 e 4 mencionado na Tabela 1, de transformação durante o resfriamento contínuo (TRC) Fan (2007 apud GORNI 2010).

**Figura 3 - Diagramas TRC relativos aos aços da tabela 1**



Fonte: Gorni (2011)

Adições de boro também são muito efetivas para atrasar a transformação ferrítica. Esse elemento, quando presente na forma de solução sólida, segrega para os contornos de grão austeníticos e impede a nucleação da ferrita. Contudo, como é a prática usual com esse elemento, seu teor deve ser da ordem apenas alguns milésimos de unidades percentuais. Teores mais elevados desse elemento levam à formação de boretos nos contornos de grãos austeníticos, o que reverte seu efeito sobre a temperabilidade. Além disso, uma vez que o boro possui grande afinidade com o oxigênio e nitrogênio, é necessário a adição de elementos de liga suplementares para evitar sua reação com esses elementos. Por esse motivo é requerida a respectiva presença de alumínio e titânio nos aços ao boro Fan (2007, p. 99-109 apud GORNI, 2011, p. 6-7).

O cromo é outro elemento de liga que promove grande aumento de temperabilidade no aço, sendo especialmente importante para restringir a transformação bainítica, deslocando-a menores temperaturas no diagrama TRC. Note-se que o aço 1, que apresenta combinação de maiores teores de cromo e de boro, apresenta campo bainítico localizado sob temperaturas mais baixas em comparação com as demais ligas.

De forma geral, quanto maior o teor de elementos de liga de um aço, menor a taxa de resfriamento crítica, ou seja, a velocidade de resfriamento mínima necessária para que a austenita se transforme integralmente em martensita. Isso geralmente contribui para simplificar o projeto do ferramental, reduzindo seu custo. É o caso do aço 2 da tabela 1, o qual apresenta a menor taxa de

resfriamento crítica dentre as ligas listadas na tabela. Em compensação, o material tenderá a ficar mais caro, o que requer uma cuidadosa análise da relação custo x benefício desta abordagem Fan (2007, p. 99-109 apud GORNI, 2011, p. 6-7).

Uma liga que já se tornou clássica para a fabricação de peças através de estampagem a quente é a 22MnB5, cujos limites de composição química são: 0,22-0,25% C, 1,20-1,40% Mn, 0,20-0,30% Si, 0,020% P máx, 0,005% S máx, 0,020-0,050% Al total, 0,020-0,050% Ti, 0,11-0,20% Cr, 0,0020-0,0035% B, 0,10% Mo máx, 0,10% Cu máx e 0,10% Ni máx. Pode-se observar que o aço 4 da tabela 1 enquadra-se dentro desta especificação Gorni (2010, p. 67).

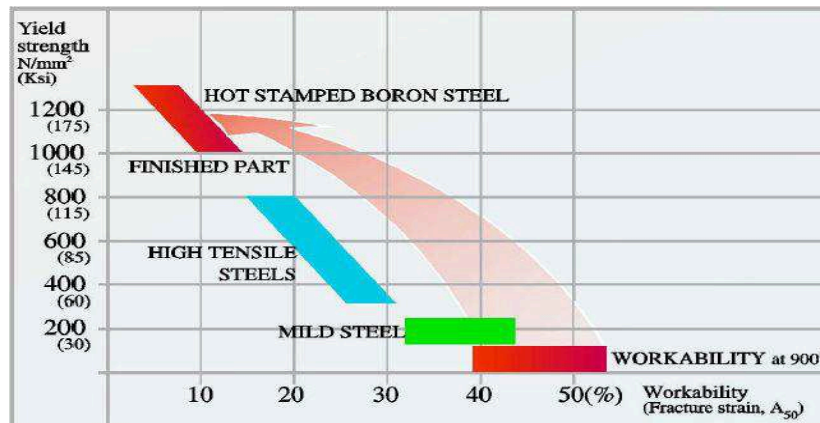
É necessário considerar também que, na estampagem a quente, a temperabilidade do aço não é função exclusiva de sua composição química. Há muito tempo é plenamente reconhecido o fato de que a conformação mecânica a quente reduz a temperabilidade do aço, uma vez que ela refina o tamanho de grão e promove algum encruamento na microestrutura. Dessa forma a austenita tem aumentada sua energia livre, o que promove aumento nas taxas de nucleação e crescimento da ferrita, o que se traduz na elevação da temperatura em que a sua transformação se inicia (ponto Ar3). O efeito da deformação plástica na transformação bainita e martensita tende a ser inverso, ocorrendo abaixamento na temperatura de início dessas transformações (Bs e Ms). Ocorre neste caso uma estabilização mecânica da austenita, fenômeno que tende a elevar a fração de austenita residual eventualmente presente na microestrutura final do componente. Logo, a taxa crítica determinada a partir dos diagramas TRC da Figura 2 não é exatamente correta no caso da estampagem a quente, já que esses diagramas foram determinados a partir de amostras não-deformadas Gorni (2011, p. 7).

Segundo Fan (2007 apud GORNI, 2011) o ideal é que os diagramas TRC a serem utilizados nas análises de processos de estampagem a quente sejam determinados a partir da austenita deformada a quente.

Para Soares (2008) o processo foi particularmente desenvolvido para utilizar os designados aços ao boro, que são em primeiro lugar aquecidos a temperaturas de aproximadamente 900 °C, tendendo o aço para a região austenítica com temperaturas mais elevadas que A<sub>3</sub> e, em seguida, processado e arrefecido rapidamente. A conformação plástica a temperaturas elevadas permite obter geometrias complexas devido a elevada conformabilidade a quente do material, proporcionada pela fase austenítica que se caracteriza por ser muito maleável.

O aço 22MnB5 tem uma aceitável temperabilidade e produz plenamente a microestrutura martensítica após estampagem a quente, como se encontra representado na Figura 4. A tensão limite de elasticidade e resistência a tração são de aproximadamente 1000MPa a 1500MPa, respectivamente.

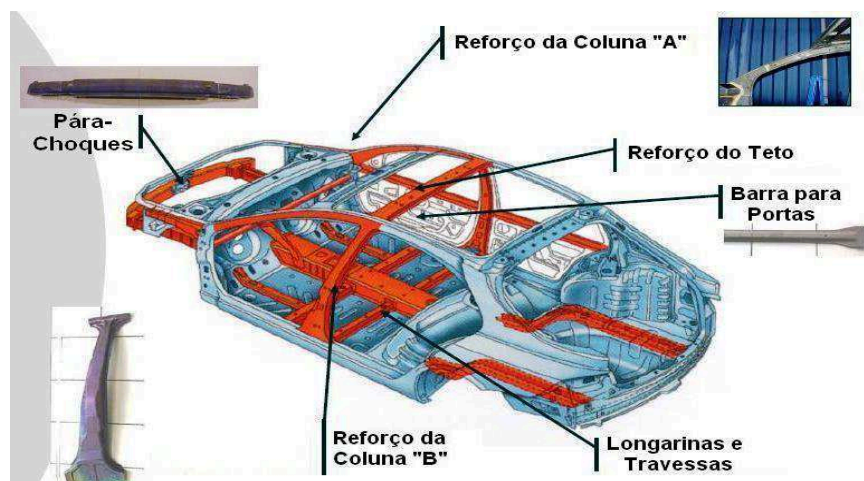
Figura 4 - Comportamento dos aços ao boro na estampagem a quente



Fonte: Gorni (2011)

A Figura 5 evidencia os principais componentes automotivos fabricados pelo processo de “Hot Stamping” que necessitam desse perfil de propriedades: para-choques, reforços para o teto, colunas A e B, barras de impacto, travessa traseira, túnel, entre outras.

Figura 5 - Componentes automotivos

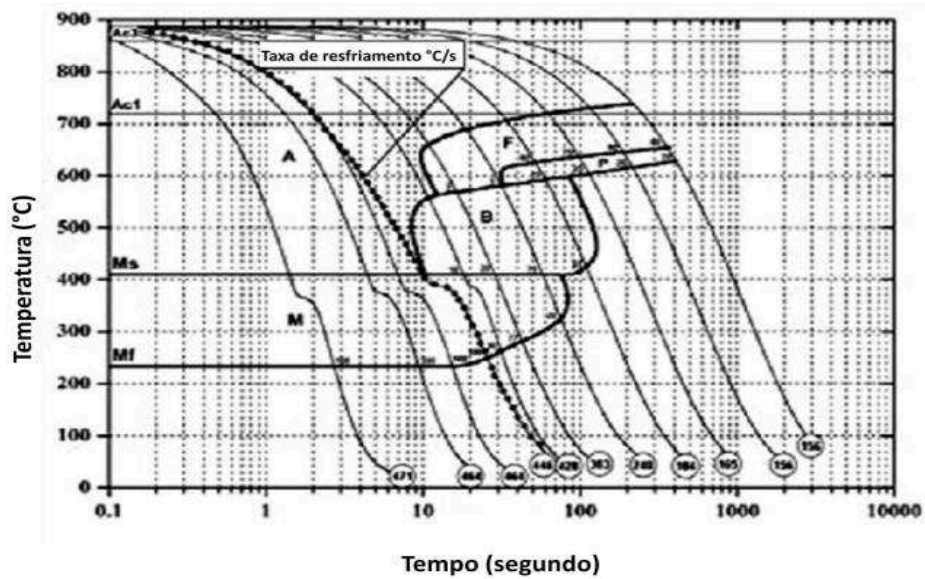


Fonte: Brandão (2013)

Na Figura 6 o Diagrama de CCT para o aço 22MnB5, mostra a relação de temperatura e tempo, onde pode-se verificar a importância do controle corretamente da temperatura e tempo, pois os dois influenciam diretamente na resistência mecânica final do material, identificado em cada linha um valor de dureza circulado.



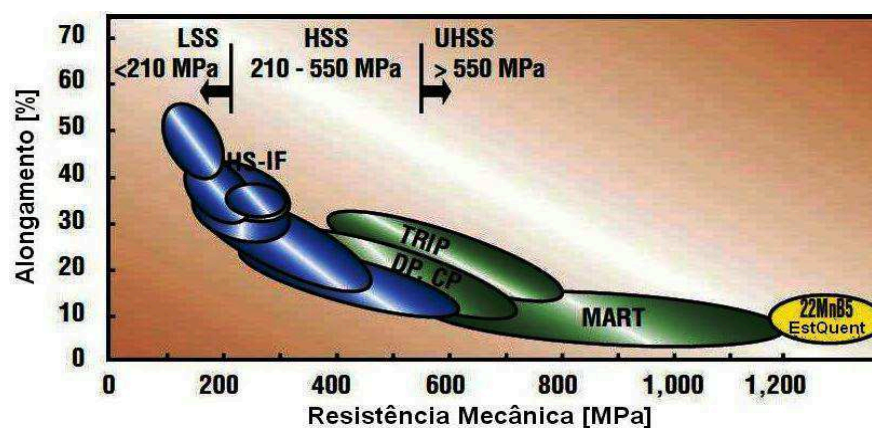
Figura 6 - Diagrama de CCT para o aço 22MnB5



Fonte: Gorni (2010)

De fato, a partir da comparação entre resistência mecânica e alongamento para os variados tipos de aço AHSS, o qual pode ser visualizado na Figura 7, podemos entender que os componentes obtidas por “Hot Stamping” seguido de têmpera, apresentam máxima resistência mecânica e ductilidade mínima segundo Altan (2006 apud GORNI, 2010).

Figura 7 - Balanço entre resistência mecânica e ductilidade



Fonte: Altan (2006)

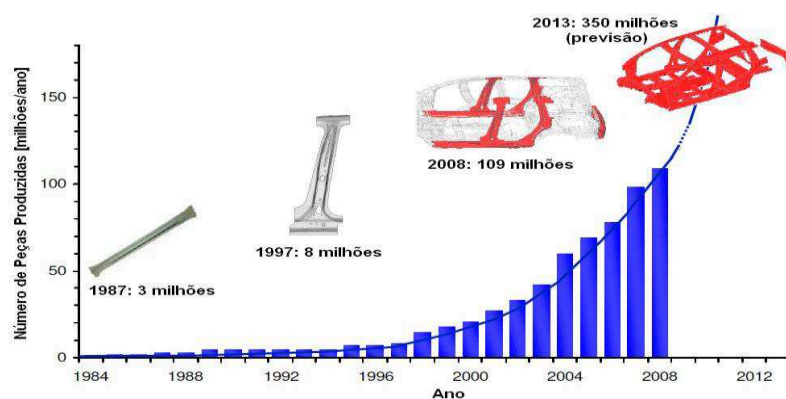
### 2.4.3 Produção dos aços para o processo “Hot Stamping”



Previu-se que em 2004 o processo tenha utilizado 60 mil a 80 mil toneladas de chapas na Europa. Em 2008, antes da crise, foi previsto que, no próximo ano, esse processo consumiria 300.000 toneladas de chapas só na Europa e que seriam implantadas mais vinte novas linhas de estampagem a quente nesse continente segundo Fan (2007 apud GORNI, 2010). O processo também foi bem sucedido nos EUA: em 2004 foram compiladas 33 versões de para-choques fabricados nesse país através do “Hot Stamping” para diversos tipos de veículos em várias montadoras, como Citroen, Ford, General Motors, Smart e Volkswagen. Os aços mais usados foram o SAE 10B21 e 15B21, na forma de blanques com espessura variando entre 1,50 e 3,50 mm. Os valores médios das propriedades típicas pós-têmpera foram: limite de escoamento 1.140 MPa; limite de resistência 1.520 MPa; alongamento total de 12%; dureza 479 HV AISI (2006 apud GORNI, 2010).

A Figura 8, mostra o avanço da produção de componentes fabricadas pelo processo entre 1984 e 2008 que foram produzidas anualmente. Note que a fabricação subiu de 3 milhões de unidades em 1987 para 109 milhões em 2008, ou seja, um maravilhoso aumento de mais de 3.500% em aproximadamente vinte anos. A previsão de fabricação para 2013, feita antes da crise financeira de 2008, era de 350 milhões de componentes estampadas a quente, ou seja, uma evolução de mais de 220% em comparação aos dados de 2008 segundo Siebels (2009 apud GORNI, 2010). Muito provável que essa previsão terá de ser revista, ainda assim, é notável o progresso que o “Hot Stamping” está fazendo em termos industriais.

**Figura 8 - Evolução da produção de peças entre 1984 e 2008**



Fonte: Siebels (2009)

A consistente evolução na indústria de automóveis tem vindo a ser apresentada de diversas formas. Uma das mais importantes é o “crash-tests”, onde os resultados reais dos novos processos são combinados com a aplicação dos novos materiais de ultra-alta resistência que constituem boa parte da estrutura da carroceria do automóvel. Nestes testes verificam-se resultados extremamente importantes ao nível da resistência e absorção de energia.

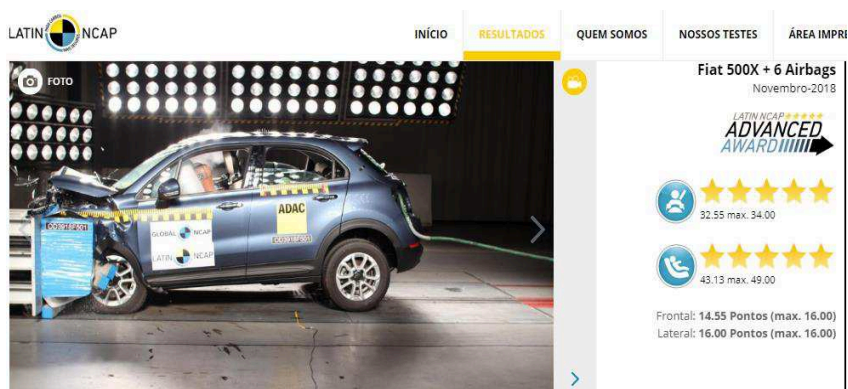
#### 2.4.4 Órgão certificador de segurança

O órgão responsável pelos testes de colisão de carros vendidos na Europa é a Euro NCAP criada em 1997 e na América do Sul é o Latin NCAP, que ainda é recente e foi criado no final do ano de 2010 Quatro Rodas (2017).

O Latin NCAP realiza testes de colisão para assim oferecer aos consumidores informações precisas sobre o desempenho em segurança de seus carros. O órgão oferece aos consumidores a oportunidade de comparar o desempenho em segurança de carros de massa similar aos escolhidos por eles.

Os resultados com estrelas de duas cores correspondem aos protocolos de avaliação utilizados de 2010 a 2015 inclusive. A partir de 2016, os protocolos de avaliação se expandiram e são mais exigentes. Essa alteração de protocolo inclui a unificação da cor de estrelas usada “amarela” para identificar, claramente, quais são os carros testados sob o novo protocolo como pode ser visto na Figura 9 Latin NCAP (2018).

Figura 9 - Teste frontal Fiat 500X + 6 Airbags



Fonte: Latin NCAP (2018)

Os aços usados na construção evoluíram, as técnicas e até as soldas usadas também. Só os “crash-tests” deixam evidente que os aços mais fortes precisam estar nos locais certos, na parede corta-fogo, nas colunas, no assoalho e não nos para-lamas e capô.

Nestes 20 anos de testes a Euro NCAP deu perda total em 1.800 carros em “crash-tests” que custaram ao todo 160 milhões de euros. O órgão estima ter ajudado a evitar 78.000 mortes em acidentes. Tão importante quanto isso foi a conscientização do consumidor europeu, que hoje considera a nota recebida pelo veículo no teste antes de uma compra.

No Brasil ainda é raro encontrar alguém que decida uma compra pela nota em “crash-tests”, mais o cenário está começando a mudar a cada ano.

Logo abaixo na Figura 10, temos o comparativo entre o primeiro Rover 100, recebeu duas estrelas de quatro possíveis em 1997 e o Honda Fit 2015, onde nem parece que a colisão foi nos mesmos 64 km/h. Isso demonstra a evolução que ocorreu entre 1997 e 2015 nos testes realizados pela Euro NCAP e Latin NCAP.

**Figura 10 - Comparativo entre o Rover 100 e Honda Fit**



**Fonte: Latin NCAP (2015) – adaptado pelo autor**

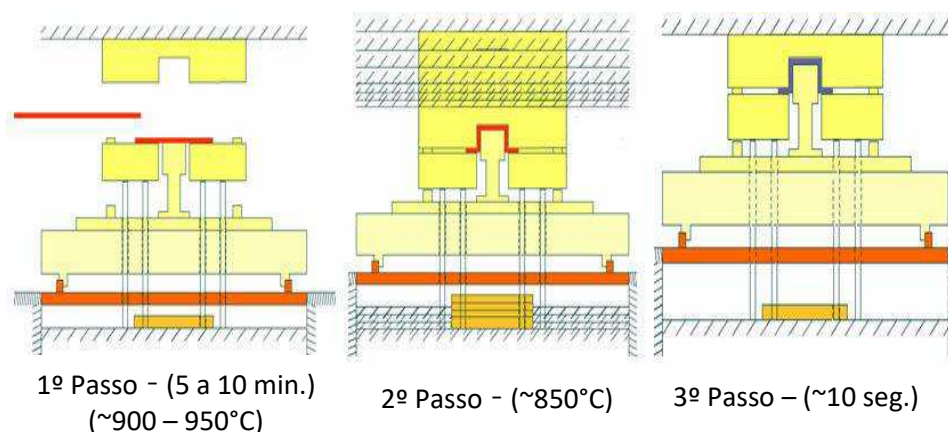
## 2.5 PROCESSO DE HOT STAMPING

A conformação e o tratamento térmico simultâneo das chapas a quente, após a austenitização, resultam numa plena transformação em microestrutura martensítica dos produtos finais. Esta tecnologia utiliza uma linha de aquecimento para aquecer as chapas de aço até temperaturas de austenitização, onde a capacidade de alongamento é superior, em seguida as chapas são transferidas para as ferramentas dentro da prensa, através de robôs, e assim se procede a estampagem das mesmas, seguido de um arrefecimento ainda dentro da ferramenta Soares (2008).

Na Figura 11 pode ser visto o esquema resumido do processo de “Hot Stamping” com tempos e temperaturas. Uma observação é que a temperatura e o tempo de resfriamento pode ser alterado de acordo com a geometria, composição química do material e resistência desejada.

- a) 1º Passo – Aquecimento 5 a 10 minutos ( $\sim 900 - 950^{\circ}\text{C}$ ); – Fase austenítica;
- b) 2º Passo – Transformação – Estampagem a quente ( $\sim 850^{\circ}\text{C}$ );
- c) 3º Passo – Arrefecimento rápido na ferramenta chamado de (“Quenching Dies”);

**Figura 11 - Representação esquemática do processo “Hot Stamping”**

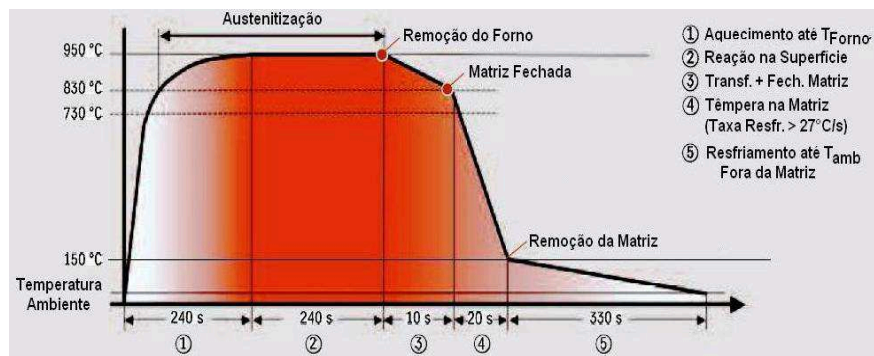


**Fonte: Gorni (2010)**



Na Figura 12 pode ser visto o ciclo térmico do processo de “Hot Stamping” com têmpera na matriz, lembrando que pode ocorrer variações mencionados anteriormente.

**Figura 12 - Ciclo Térmico**



Fonte: Gorni (2010)

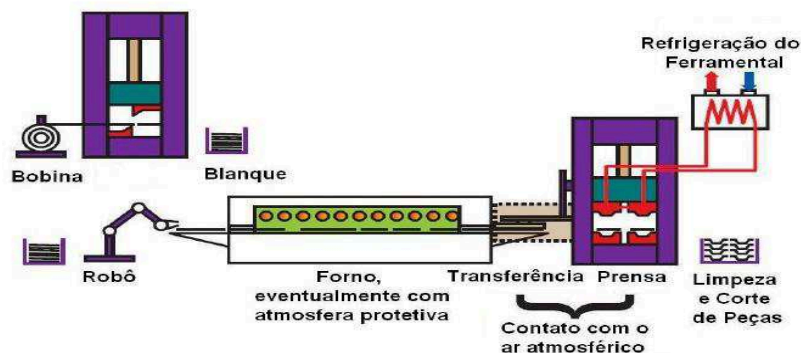
Para o processo de “Hot Stamping” temos dois métodos de fabricação, abordados na sequência.

## 2.5.1 Método de fabricação

### 2.5.1.1 Método direto

Este método é composto somente pela conformação a quente e realizado a estampagem em apenas um golpe da ferramenta como pode ser visto na Figura 13.

**Figura 13 - Processo direto de estampagem a quente**

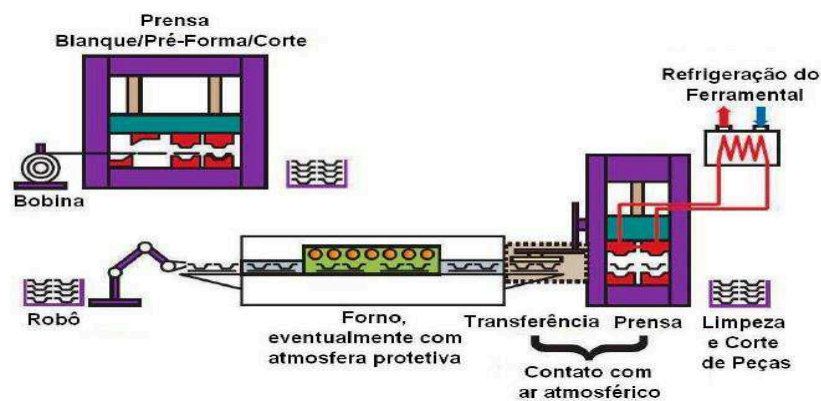


Fonte: Altan (2006)

### 2.5.1.2 Método indireto

Ao contrário do processo direto, este necessita de uma parte a ser estampada a frio, em matriz convencional, com forma de aproximadamente 80% a 90% da geometria final da peça, seguido de ajuste de acordo com a tolerância, como pode ser visto na Figura 14.

**Figura 14 - Processo indireto de estampagem a quente**



Fonte: Altan (2006)

Para Soares (2008) a intenção subjacente a este método é o de reduzir o desgaste nas ferramentas e diminuir o adelgaçamento dos produtos finais estampados, devido a elevada fricção entre as mesmas. No processo de "Hot Stamping" não pode usar lubrificante como o processo convencional a frio, devido as elevadas temperaturas de trabalho. Por exemplo, quando utilizado um aço ao boro 22MnB5, com formas muito complexas, a relação entre os movimentos da chapa e ferramenta durante o processo a quente pode resultar em pesados efeitos de desgaste na superfície das ferramentas.

A utilização de peças pré-conformadas reduz os movimentos relativos, logo, minimiza o desgaste das ferramentas e das próprias peças. Um fator que deve ser levado em conta nessa prática de estampagem é o fato da chapa que deve ser revestida, porque o contato da chapa aquecida com o oxigênio atmosférico favorece a oxidação e decarbonetação superficial, o que é indesejável do ponto de vista das propriedades finais da peça, sem falar que a camada de óxido formada tem extrema dureza e pode acarretar em maior desgaste da matriz ou estampo.

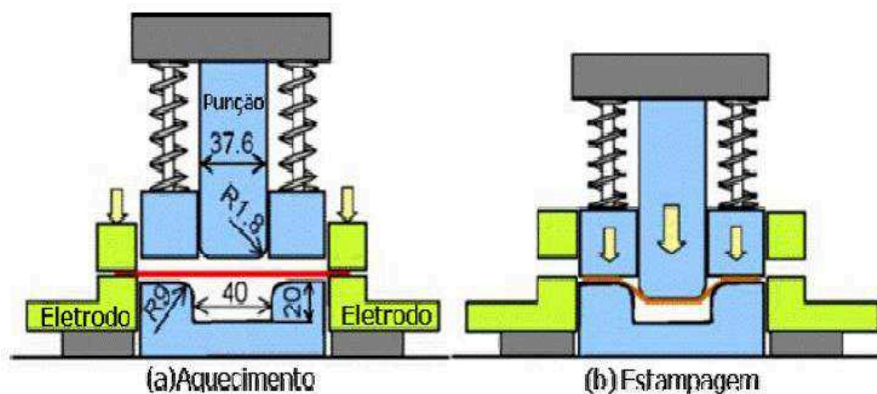
Adicional a essa situação, a presença de oxidação da chapa emprega mais um processo produtivo, a limpeza com jato de areia, o que implica em custo e problemas de acabamento.

### 2.5.2 Aquecimento por resistência direto na matriz

No ano de 2005 no Japão, foi desenvolvido um novo sistema para aquecer a chapa diretamente na ferramenta. A diminuição da temperatura da chapa antes da conformação é impedida neste processo, devido ao aquecimento direto da chapa em conjunto com a ferramenta por meio de resistência elétrica.

Este processo consiste em aquecer a chapa através de eletrodos, aplicando o efeito Joule. Primeiro, a chapa sofre uma pressão que estabelece contato da mesma com os eletrodos, iniciando o aquecimento, conferindo a temperatura desejada. Salienta-se que nesta etapa, não há contato da chapa com o ferramental na Figura 15 mostra a etapa de aquecimento. O tempo para se obter uma determinada temperatura, depende apenas de parâmetros geométricos (largura e espessura) e propriedades físicas (densidade, calor específico e resistividade) da chapa, além da corrente. Isso porque o aquecimento é muito rápido, aproximando-se de uma transformação adiabática e tem maior eficiência energética. Após a primeira etapa, realiza-se a estampagem da peça, algo que se realiza em torno de 0,2 segundos após o fim do aquecimento, o que garante a não formação de camada de óxidos.

Figura 15 - Fases do processo de aquecimento resistivo, (a) Aquecimento e (b) Estampagem



Fonte: Adaptado pelo autor (2018)

## 2.6 MÁQUINA PARA ESTAMPAGEM

Para Altan, Oh, Gegel (1999), a seleção de uma máquina para um dado processo é influenciada pelo tempo, precisão e pelas características de carga-energia da mesma. A seleção do equipamento ótimo requer considerações do sistema completo de conformação, incluindo tamanho do lote, condições na fábrica, efeitos ambientais e necessidades de manutenção, assim como as necessidades de cada componente específico e do processo sob estudo.

### 2.6.1 Prensas para estampagem de peças a quente e a frio

#### 2.6.1.1 Prensas hidráulicas

Altan, Oh, Gegel (1999), mencionam que existem basicamente três tipos de prensas: hidráulicas, mecânica e de fuso ou fricção. Estas máquinas são usadas para forjamento e estampagem de chapas a quente e a frio, extrusão a frio e cunhagem. Martelos são de uso mais limitado e são empregados mais para forjamento a quente, cunhagem, e algumas operações de conformação de chapas. Será abordado no presente trabalho as prensas hidráulicas, visto que são as mais utilizadas no processo de estampagem de chapas metálicas a quente.

**Figura 16 - Prensa hidráulica**

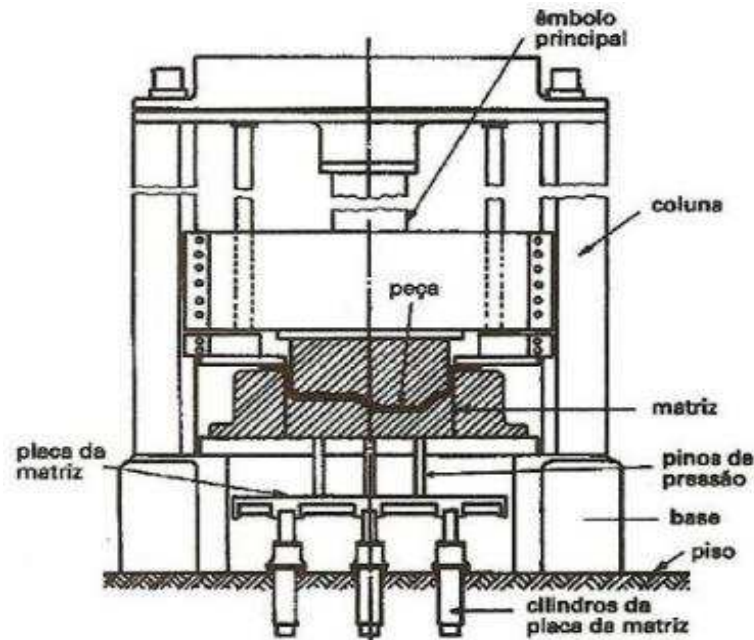


**Fonte: Site Direct industry (2018)**



A Figura 17 mostra uma prensa em corte, onde pode-se ver os principais componentes que a compõem.

**Figura 17 - Principais componentes de uma prensa hidráulica**



Fonte: Chiaverini (1997)

## 2.7 – MATRIZES PARA ESTAMPAGEM A FRIO E A QUENTE

Para Altan, Oh, Gegel (1999) o projeto e construção de matrizes ou estampos, assim como a seleção dos materiais, são muito importantes na fabricação de componentes por meio dos processos de estampagem. A matriz deve ser fabricada por métodos modernos, a partir de materiais apropriados, a fim de fornecer uma vida aceitável a um custo razoável. Frequentemente, o sucesso econômico de um processo de estampagem depende da vida da ferramenta e do custo por peça produzida. Para uma dada aplicação, a seleção do material apropriada para a ferramenta depende de três tipos variáveis:

- a) Variáveis relacionadas com o processo propriamente, incluindo fatores tais como o tamanho da cavidade da matriz, o tipo de máquina usada e a velocidade de deformação, tamanho inicial do tarugo e temperatura, temperatura da matriz a ser usada, lubrificação, razão de produção e a quantidade de peças a ser produzido.

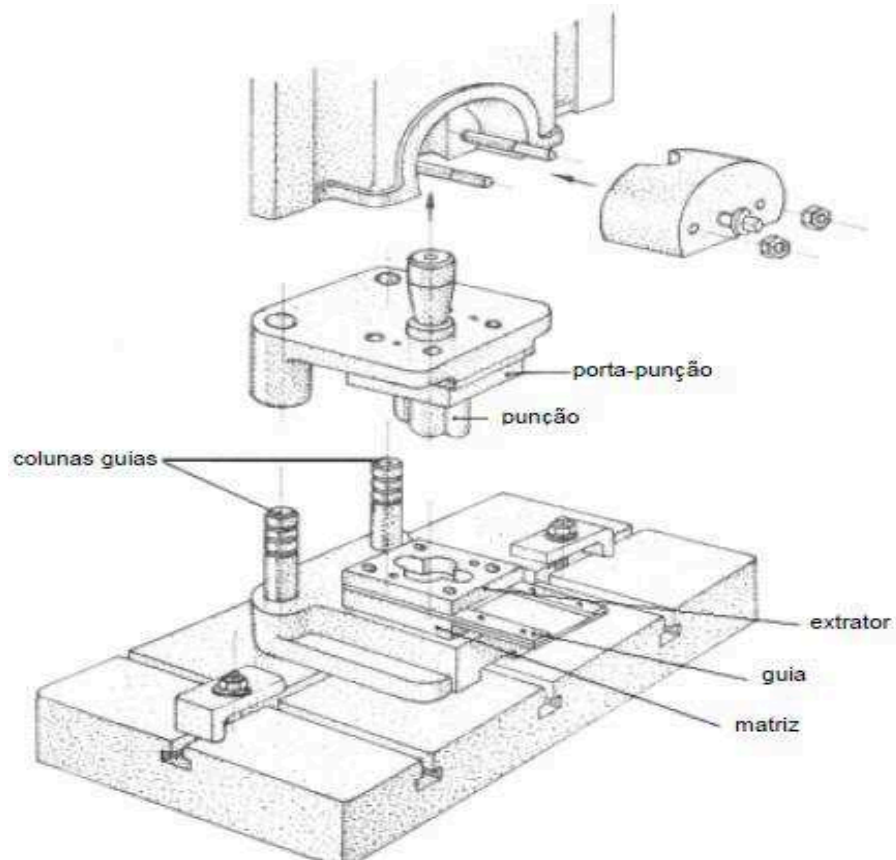
- b) Variáveis relacionadas ao tipo de carga na matriz, incluindo velocidades de carregamento, isto é, tempo de contato entre a matriz e o metal sendo deformado na forma de impacto ou aplicação gradual de carga (este tempo de contato é especialmente importante na conformação a quente), carga máxima e pressão na matriz, temperatura máxima e mínima na matriz e número de ciclos de carregamento ao qual a matriz será submetida.
- c) Propriedades mecânicas do material da matriz, incluindo endurecimento, resistência ao impacto, resistência a quente (se estampagem a quente for considerada) e a resistência à fadiga térmica e mecânica.

### **2.7.1 Nomenclatura básica de ferramenta de corte**

Segundo Penteado (2016), podemos evidenciar a nomenclatura básica de alguns componentes de uma ferramenta, por exemplo uma ferramenta de corte.

- a) Punção: é o elemento da ferramenta que provoca a perfuração através de movimento e força transmitido pela prensa.
- b) Matriz: é o elemento da ferramenta que fica fixo na base da prensa e sob o qual se apoia a peça.
- c) Folga: é o espaço existente entre o punção e a matriz na parte paralela de corte.
- d) Alívio da ferramenta: é o ângulo dado a matriz, após a parte paralela de corte, para permitir o escape fácil da parte cortada.

Na Figura 18 temos os componentes mais utilizados de uma ferramenta de corte.

**Figura 18 - Componentes de ferramenta de corte**

Fonte: Site Scribd (2018)

## 2.8 CORTE LASER

O corte a laser é um processo de separação térmica. O material, ao ser atingido pelo feixe de laser, aquece-se ao ponto de se derreter ou se vaporizar completamente. Depois que o feixe de laser transpassa por completo o material em determinado ponto, inicia-se o processo de corte propriamente dito. O sistema segue a geometria selecionada, separando o material. Dependendo da aplicação, os gases gerados pelo processo podem ter efeito benéfico no resultado final, Trotec Laser GmbH (2018).

O site do fornecedor Trotec Laser GmbH (2018) diz que o corte a laser é, atualmente, um processo amplamente utilizado no corte de diversos materiais. A alta precisão, velocidade e versatilidade da máquina a laser são as principais vantagens

do processo de corte a laser e por isso está sendo muito utilizado, na Figura 19, mostra uma chapa sendo cortado a laser.

**Figura 19 - Corte Laser**



**Fonte: NBSO-Brazil (2018)**

## 2.9 INOVAÇÕES DO “Hot Stamping”

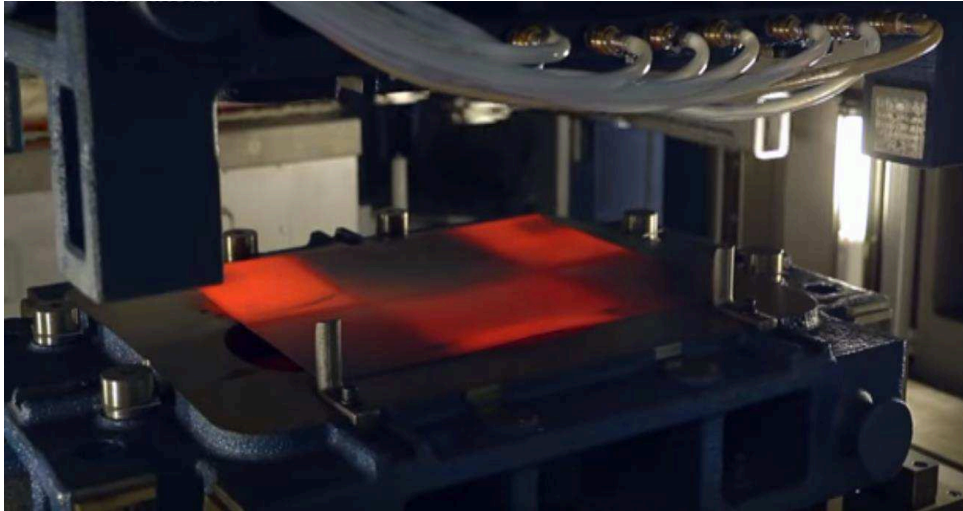
### 2.9.1 Propriedades mecânicas sob medida

Para Hein, Kolleck (2009) uma variável do conceito de blanques sob medida são as propriedades mecânicas obtidas sob medida. No caso o blanque pode ser constituído de um único tipo de aço, porém em determinadas regiões do componente passam por tratamentos de têmpera diferentes, durante ou após o “Hot Stamping”, de forma a gerar um perfil mais adequado de propriedades mecânicas para a aplicação desejada.

As ideias vistas até o momento do conceito são:

- Aquecimento parcial no forno: somente uma zona da peça é aquecida sob temperaturas acima da temperatura de austenitização, como na Figura 20.

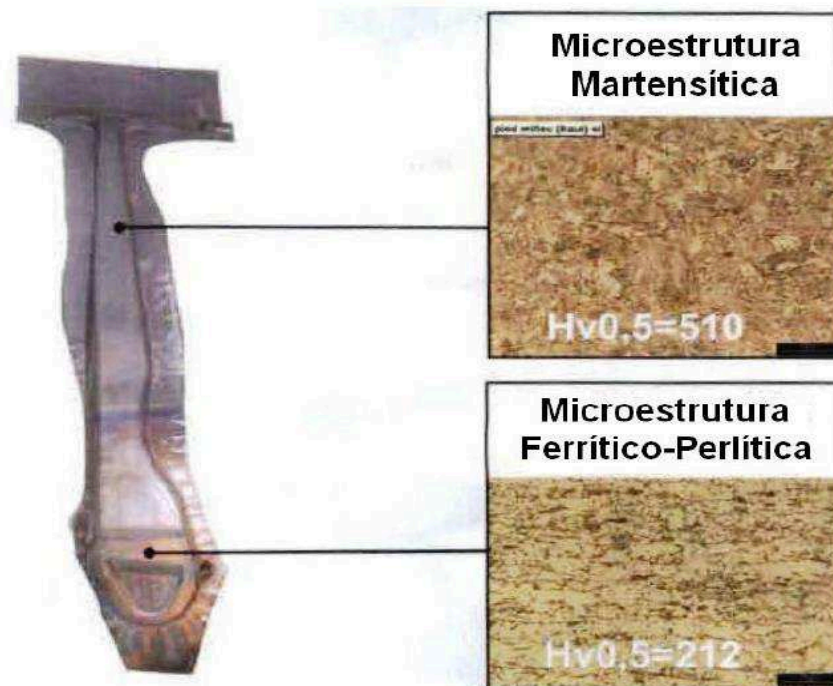
**Figura 20 - Aquecimento não homogêneo do blanque na ferramenta**



**Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)**

Somente uma área do blanque correspondente a essa área da peça que passará pelo tratamento térmico durante o resfriamento, as demais regiões da peça não sofrerá impacto significativo porque não será temperada. Esse método pode ser visto na Figura 21, uma Coluna B estampada quente que apresenta propriedades mecânicas sob medida, obtidas pela austenitização localizada. Esse tipo de têmpera pode ser feito em fornos com zonas aquecidas de forma seletiva, através da proteção térmica nas regiões do blanque que não deverão ser aquecidas. O aquecimento seletivo é feito por indução.

**Figura 21 - Austenitização localizada**



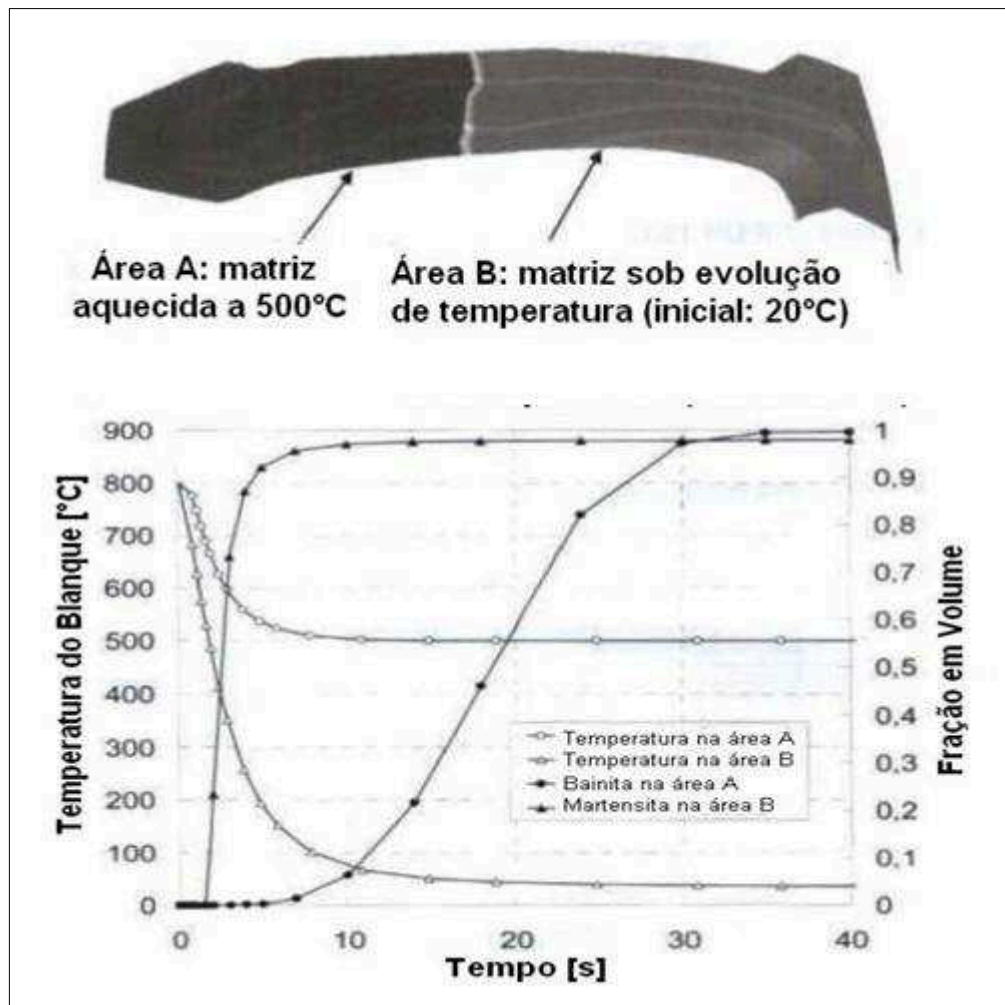
**Fonte: Hein (2008)**

Têmpera parcial na matriz. Neste caso, todo o branco é austenitizado, mas apenas uma parte dele é temperada. Isto pode ser conseguido através do uso de matrizes com zonas aquecidas Hein (2005, p.17 apud GORNI 2011, p.15).

Contudo, deve-se levar em conta que o tempo de ciclo deste método que é mais alto em função do resfriamento mais lento, o que diminui ainda mais a razão de produção. Na Figura 22 podemos ver o exemplo esse variante, onde os dados obtidos através de análise por elementos finitos sobre a evolução microestrutural numa coluna B estampada pelo processo de “Hot Stamping” usando matriz com zona aquecida de forma seletiva mostra o tempo de resfriamento da matriz aquecida em determinadas regiões.



Figura 22 - Matriz com zona aquecida de forma seletiva



Fonte: Gorni (2011)

Revenido parcial. Aqui as peças são integralmente austenitizadas e temperadas, mas somente algumas porções dela passam por revenido de forma a melhorar localmente sua ductilidade. Aqui podem ser usados fornos convencionais, com aquecimento por indução ou resistência.

### 2.9.2 Outras inovações

Há ainda outras inovações no processo de estampagem a quente cuja aplicação ainda está engatinhando. Uma delas é a extensão desse conceito à estampagem hidrodinâmica e à hidroconformação a quente de blanques em forma de tubos. Também está sendo considerado o uso de blanques laminados a frio sob medida ou produzidos através de perfilação, os quais proporcionam características melhoradas de rigidez e de resistência ao dobramento, bem como flexibilidade em termos de perfil de seção

transversal. Estão sendo estudados novos tipos de revestimentos para blanques, inclusive do tipo orgânico, mas o mais provável é que os revestimentos aplicados por imersão a quente continuem a ser os mais usados, em função da ampla disponibilidade de linhas que aplicam esse tipo de revestimento Hein (2008, p.85-91 apud GORNI, 2011, p.16-17).

Por esse mesmo motivo, deverão continuar os estudos visando a melhoria do desempenho dos revestimentos à base de zinco usados nos blanques processados por estampagem a quente. Finalmente, está sendo estudada a possibilidade de estampagem a morno ou a quente também no caso de ligas de metais leves, como alumínio e magnésio Hein (2008, p.85-91 apud GORNI, 2011, p.16-17).



### 3 METODOLOGIA

Segundo Gil (2002) as pesquisas podem-se classificar de acordo com seus objetivos gerais, sendo possível classificá-las em três vertentes: pesquisas exploratórias, descritivas e explicativas. Existe também a possibilidade de serem classificadas, de acordo com a abordagem do problema, como qualitativas ou quantitativas. Para classificá-las de acordo com os procedimentos técnicos usados, elas podem ser: bibliográficas, experimentais, documentais, estudo de caso, ação e participantes.

Neste estudo de caso está classificado como exploratório, em que há como objetivo entender os fenômenos físicos que determinam o processo e como um estudo quantitativo, pois se utiliza de dados e ferramentas estatísticas para gerar informações que comprovam os resultados metalúrgicos e mecânicos objetivados pelo processo. Inicialmente foi realizado um levantamento bibliográfico de autores da área de Engenharia Metalúrgica e Mecânica. Fez-se então uma coleta dos dados no chão-de-fábrica da empresa, trabalhando junto com os colaboradores envolvidos no problema, por meio de pesquisas, questionamentos e observações. Na conclusão final do trabalho foram expostos os resultados em relação as propriedades mecânicas, metalúrgicas e em relação as tolerâncias dimensionais e geométricas esperadas pelo processo.

#### 3.1 TIPOS DE PESQUISAS

Os métodos podem ser:

- a) Pesquisa de campo: visa obter informações e conhecimentos a respeito de problemas que se procura respostas.
- b) Pesquisa Laboratorial: o pesquisador procura refazer as condições do fenômeno a ser estudado para observá-lo sob controle (pesquisa de laboratório e instrumentos).
- c) Pesquisa Bibliográfica: consulta de livros ou documentação escrita que se fez sobre determinado assunto.
- d) Pesquisa Quantitativa: utiliza-se de técnicas estatísticas (traduz em números a informação para ser classificada).

- e) Pesquisa Qualitativa: é descritiva, isto é, as informações não são quantificáveis.

### 3.2 NATUREZA DA PESQUISA

- a) Básica: gera conhecimento e não possui finalidades imediatas.
- b) Aplicada: gera produtos e/ou processos e possui finalidades imediatas.

## 4 DESENVOLVIMENTO

### 4.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM

O processo se inicia na definição do material, onde o material usado como referência para fazer o trabalho é o Usibor 1500P, pois o mesmo tem as características necessárias para obter as propriedades mecânicas requeridas nos projetos de peças anti-intrusão, através de transformação final do aço para a fase martensítica, a seguir na Figura 23 os valores de composição química e propriedades mecânicas referência do aço Usibor 1500P.

**Figura 23 - Valores de referência Usibor 1500P**

ESPECIFICAÇÃO / specification			Esp./Thk (mm)	COMPOSIÇÃO QUÍMICA / chemical composition (%)					PROPRIEDADES MECÂNICAS / mechanical properties			
Norma/ Standard	GRAU/GRADE	Revestimento / Coating		C (máx)	Mn (máx)	P (máx)	S (máx)	Outros/ Other	LE/YS (MPa)	LR/TS (MPa)	Base medida/ Gauge Length	Al/Elong min (%)
Usibor®	1500P <sup>(1)(4)(5)</sup>	AS	0,8-2,00	0,30	1,50			B <sub>min</sub> = 0,001% T <sub>máx</sub> = 0,15% Al <sub>min</sub> = 0,015% Mn <sub>máx</sub> = 0,35% Cr <sub>máx</sub> = 0,35%	350-550 <sup>(2)</sup> 1100 <sub>min.</sub> <sup>(3)</sup>	500-700 <sup>(2)</sup> 1500 <sub>min.</sub> <sup>(3)</sup>	80	10 <sup>(2)</sup> 6 <sup>(3)</sup>

**Fonte: Arcelor Mittal (2018) – adaptado pelo autor**

Após estabelecido o material a ser utilizado, dá se então seguimento ao processo. É feito um planejamento da quantidade de material que será consumido diariamente, semanalmente e mensalmente e é passado para os fornecedores de matéria prima a previsão de quanto será consumido até o final do projeto, tendo como base a previsão do cliente, que é a montadora de automóveis, porém os valores podem variar, pois o mercado automobilístico sofre fortes variações de mercado.

Com o planejamento feito, e as bobinas entregues na estamparias de acordo com a demanda diária ou semanal.

É levado a bobina de aço Usibor 1500P, por meio de ponte rolante até o local de corte laser, nessa etapa é feito o desbobinamento controlado através de uma máquina e então é cortada a chapa plana com as dimensões estabelecidas na fase de projeto, essa chapa cortada recebe o nome de blanche, em seguida é verificado se o blanche está com o dimensional aprovado através de dispositivo de controle. Se aprovado então é colocado em uma caixa metálica do tipo gaiola ou jig e enviado para a área produtiva através de ponte rolante ou empilhadeira, na Figura 24 é mostrado o blanche aguardando para ser transportado para o forno.

**Figura 24 - Blanche aguardando para ser transportado para o forno**



Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)

O blanche é então transportado para a esteira do forno através de robô com ventosas que sugam-o mesmo, como pode ser visto na Figura 25.

**Figura 25 - Blanche sendo transportado para o forno**



Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)

Com o blanque na esteira Figura 26. A partir dessa fase, será abordado o processo de “Hot Stamping” por etapas, visto que a tecnologia do processo está nas próximas fases a seguir.

**Figura 26 - Aquecimento do blanque na temperatura de austenitização**

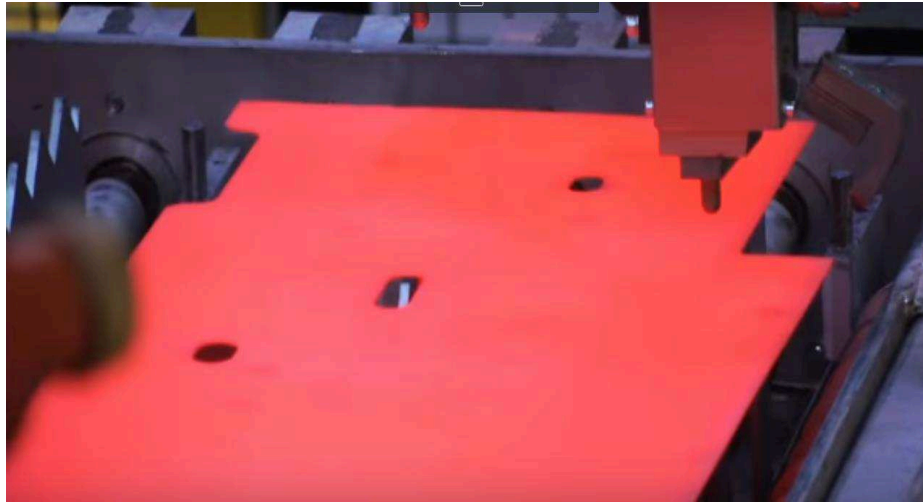


**Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)**

#### **4.1.2 Etapas de processo**

- a) Tratamento de austenitização – A chapa é aquecida de 900-950 °C durante um tempo determinado em minutos que pode variar de acordo com o tipo de peça que se está fabricando, sendo entre 5 a 10 minutos. A altas temperaturas o aço se torna dúctil o que permite a obtenção de geometrias complexas como pode ser visto na Figura 27. O aquecimento depende da espessura da chapa. É necessário controlar a atmosfera do forno para limitar problemas de descarbonetação.

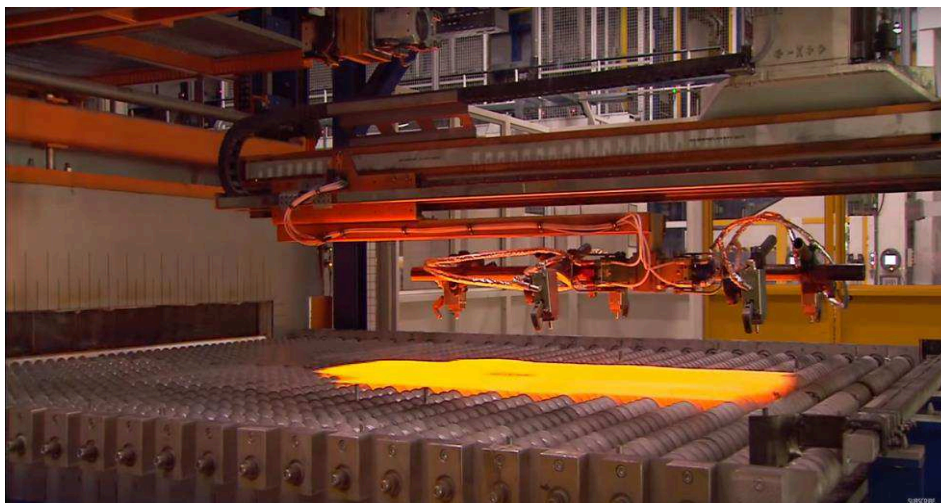
**Figura 27 - Blanque aquecido a 900°C**



**Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)**

- b) Transferência da chapa aquecida – A chapa aquecida é transportada, através de um sistema robótico como na Figura 28 na ferramenta. A operação de transferência deve ser realizada o mais rápido possível para garantir as exigidas propriedades mecânicas. Uma temperatura de chapa abaixo de 780°C, dará origem a uma microestrutura bainítica e/ou ferrítica em vez da desejada, martensítica.

**Figura 28 - Transferência do blanque aquecido**

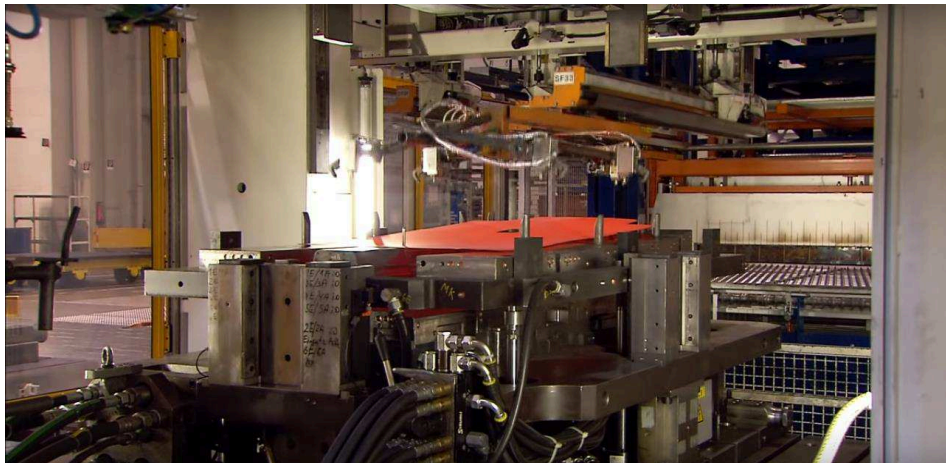


**Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)**

Na Figura 29, o blanque transportado é colocado e posicionado através de furos nos pinos posicionadores da matriz.



**Figura 29 - Posicionamento do blanque na matriz**

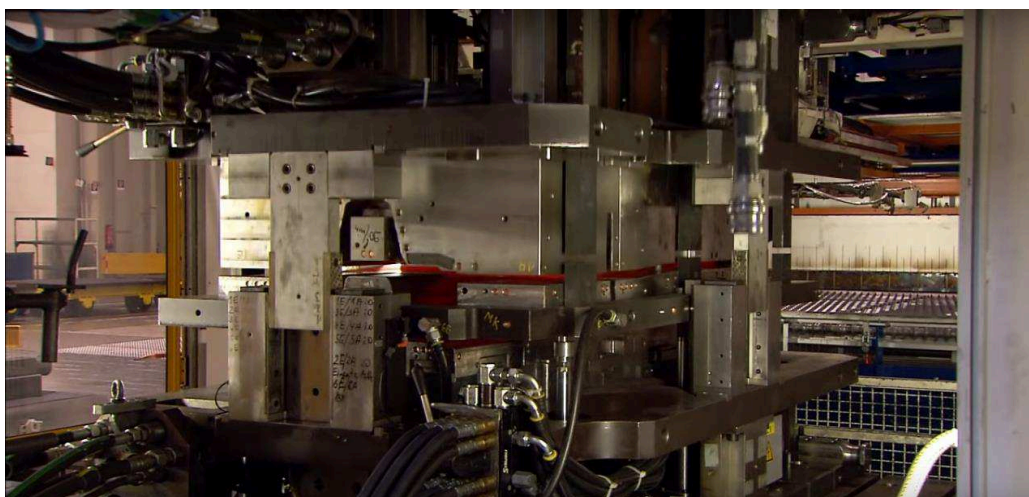


**Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)**

- c) Estampagem a quente - A matriz é fechada e então é estampado o blanque na geometria da matriz como na Figura 30.

A estampagem a quente através de uma matriz refrigerada, utiliza-se um anti-rugas e um punção, todos acoplados a uma prensa hidráulica ou mecânica.

**Figura 30 - Fechamento da matriz e realização da estampagem**



**Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)**

O prensa-chapas e o anti-rugas, como o próprio nome diz, têm a função de evitar a formação de rugas na peça e ou no flange, retendo a chapa metálica de forma a induzir seu estiramento. O flange é a região da chapa presa entre o anti-

rugas e a face horizontal da matriz. O punção força a chapa a entrar na matriz, dando-lhe a forma final.

- d) Arrefecimento - A peça estampada é arrefecida dentro da ferramenta que ainda está fechada. O tempo de arrefecimento na ferramenta e de aproximadamente 10 segundos. Este arrefecimento rápido provoca um tratamento térmico de têmpera no interior da ferramenta, proporcionando assim a transformação da austenita em martensita. É possível obter outros tipos de estruturas através de velocidades controladas visto no diagrama CCT do aço 22MnB5 visto anteriormente.

A parte mais crítica do “Hot Stamping” para a definição das propriedades mecânicas da peça pronta é o tratamento térmico, que é feita dentro da matriz refrigerada a água e/ou nitrogênio. Logo, propriedade química do aço a ser utilizada é definida em função das propriedades mecânicas finais requeridas, da espessura do blank e das velocidades de resfriamento obtidas durante a têmpera na matriz, garantindo-se um nível de temperabilidade adequado, na Figura 31, mostra uma ferramenta de “Hot Stamping” com o sistema de bomba para impulsionar o líquido de arrefecimento, fazendo com que circule dentro dos canais da ferramenta.

**Figura 31 - Ferramenta de “Hot Stamping”**

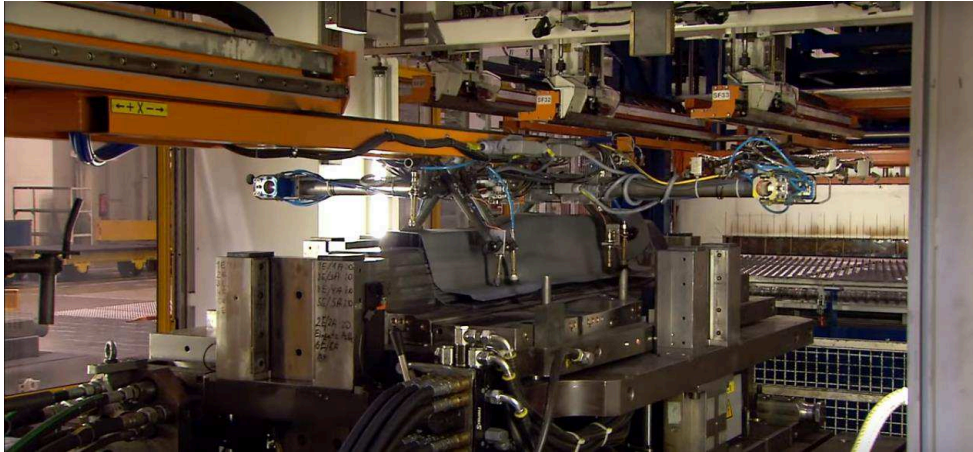


Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)



- e) Transporte da peça - Após abertura da ferramenta, a peça é extraída através do robô Figura 32, a uma temperatura entre 80°C a 150°C, e colocada por robô ou operador em um “rack” para posteriormente ser levado para o corte laser.

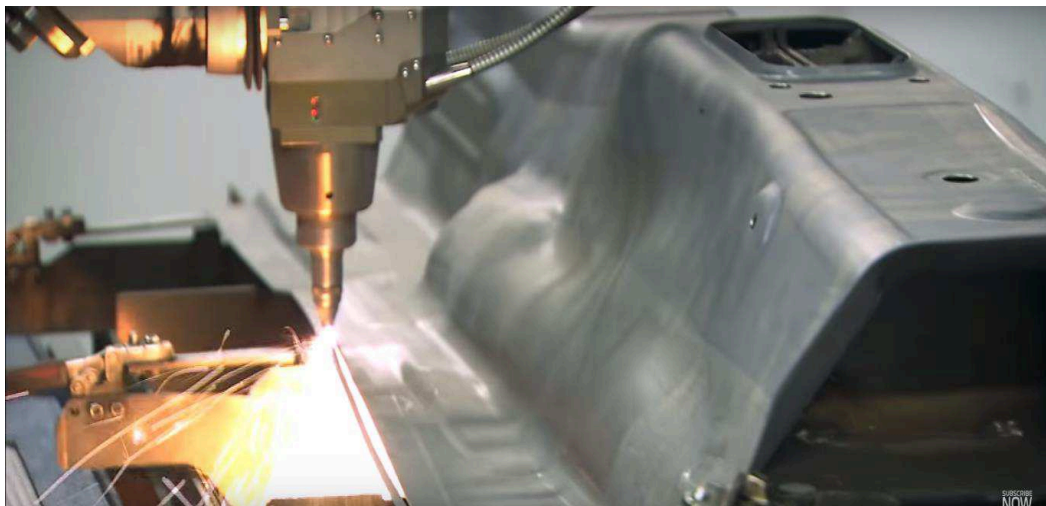
**Figura 32 - Retirada da peça estampada**



**Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)**

- f) Corte da peça estampada – As operações são realizadas por corte mecânico convencional ou corte laser, contudo a alta dureza do aço após tratamento térmico nas ferramentas, leva a uma definição de materiais específicos. Pode ser visto na Figura 33 o corte laser do túnel, componente do carro.

**Figura 33 - Corte laser do túnel**

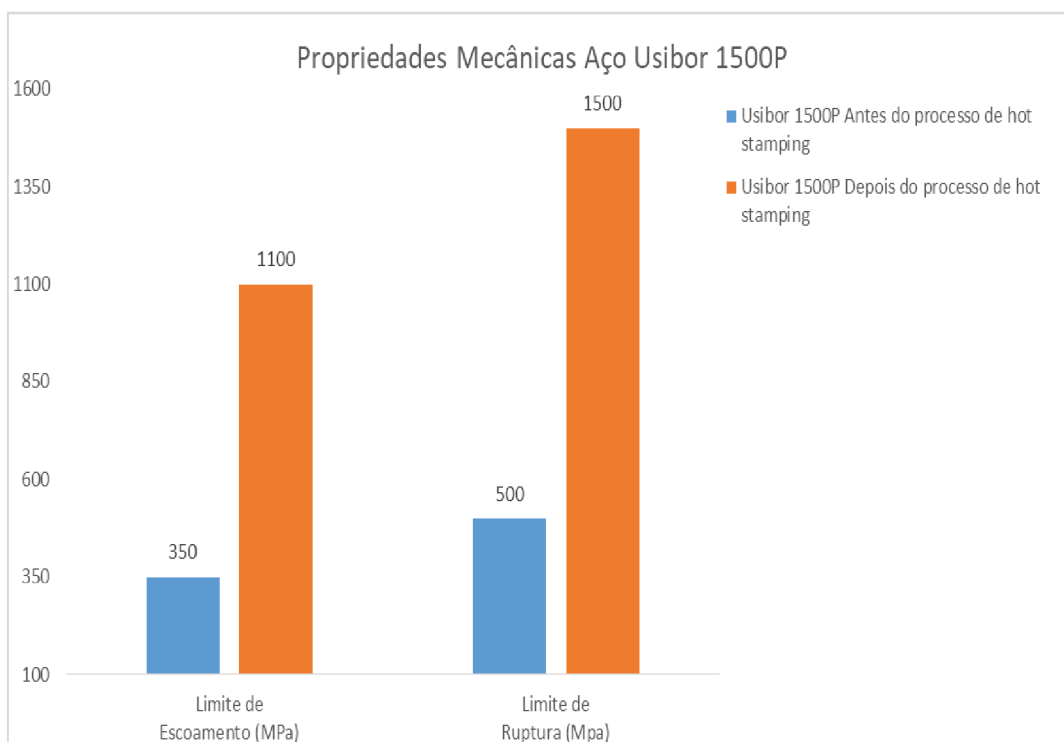


**Fonte: Adaptado pelo Autor (2018)**

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando Figura 34 – Propriedades Mecânicas Aço Usibor 1500P, fica evidente o aumento de resistência mecânica do aço estampado a quente quando comparado os valores de antes e depois da conformação a quente.

**Figura 34 - Propriedades Mecânicas**



**Fonte: Elaborado pelo autor (2018)**

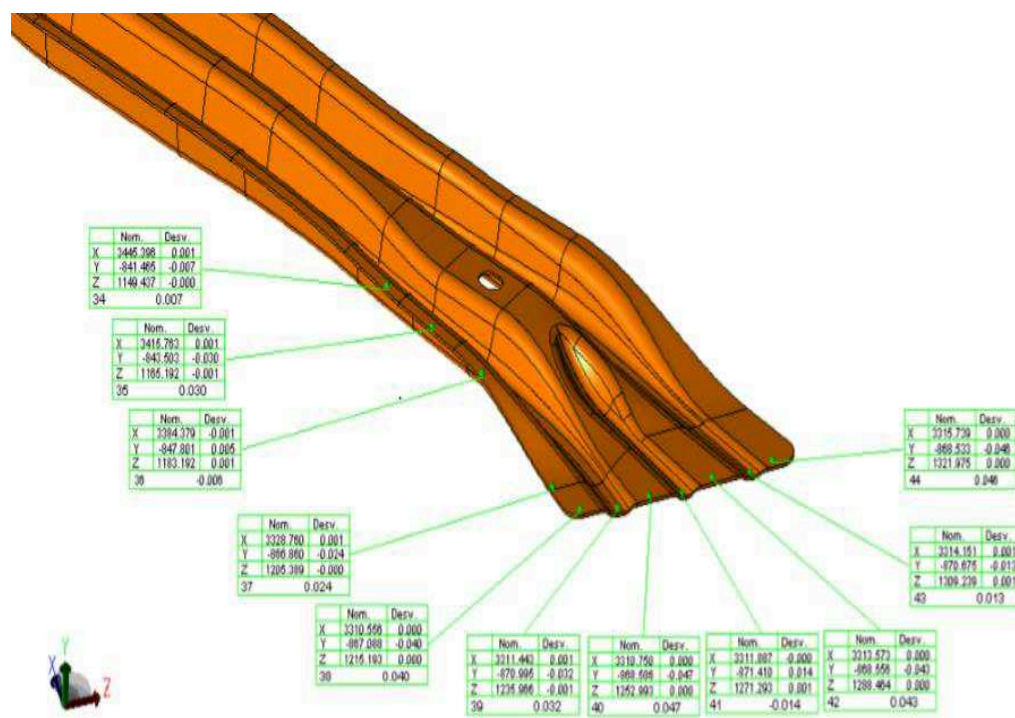
Fica provado que a evolução dos automóveis nas últimas duas décadas não se resume ao design, aos motores mais potentes e a lista de equipamentos opcionais e de série quase infinita, a evolução estrutural também aumentou bastante, e um dos processos que proporcionou esse aumento foi o “Hot Stamping”, que na medida que são descobertos novos métodos do processo e também da metalurgia dos materiais, vão melhorando no quesito peso e resistência mecânica.

Podemos verificar no trabalho que o processo de conformação a quente é utilizado para construir peças anti-intrusão e/ou com geometrias complexas, visto que o processo de conformação a frio não tem a mesma precisão se comparado ao “Hot Stamping”. Como no processo de conformação a quente o blank é aquecida até a temperatura de recristalização, conformado e resfriado em matriz fechada, o

efeito de “springback” não acontece e isso torna o processo mais estável, com menores variações geométricas e dimensionais o que permite maior controle e padronização do processo.

Isto foi confirmado na Figura 35, através da evidência de medições realizadas nas peças utilizadas para o estudo, na área onde está definido o ponto crítico de montagem da peça, atendendo os requisitos do projeto onde a tolerância é de  $\pm 0,5$  mm.

**Figura 35 - Medição de pontos críticos de uma peça**



**Fonte: Adaptado pelo autor (2018)**

O custo de produção em função do volume de peças produzidas por ano e do tipo de processo para a manufatura da coluna B, o aumento do volume de produção na ordem de 1 milhão comparado os processos de estampagem a frio, a estampagem a morno e a quente; o processo de estampagem a quente diminui o custo do valor da peça, tornando-o mais atrativo para o mercado, tomando como base os valores da Figura 8, que em 1997 teve a produção de 8 milhões de peças da coluna B e em seguida em 2008 foram produzidas 109 milhões peças de diferentes partes do carro, o que podemos chegar num resultado que aumentou o número de peças produzidas por “Hot Stamping” e no novo milênio podemos

verificar que o design mais modernos dos automóveis, com certeza pôde ser viável com o processo de “Hot Stamping”.

## 6 CONCLUSÃO

O processo de “Hot Stamping” em crescente desenvolvimento tem estabelecido sua permanência dentro da indústria de estampagem, devido aos benefícios que trouxe para os automóveis na parte estrutural, no design, no consumo de combustível e a principal que é a de segurança dos passageiros. O processo em si se for bem controlado, os custos de falta de qualidade tende a serem menores que a estampagem a frio, isso é porque o retorno elástico tende a zero, o que torna o dimensional mais fácil de controlar, diminuindo os custo com qualidade. Com o presente trabalho foi possível identificar que o processo de estampagem a quente vem ganhando mais espaço no mercado, aumentando o número de peças produzidas. Para ser viável o processo de estampagem a quente é necessário que o volume de peças produzidas seja em grande escala, visto que os custos inerentes do processo vão se diluindo na medida que a quantidade de peças produzidas aumentam.

Acredito que as peças produzidas pelo processo de estampagem a quente tenha uma maior permanência no mercado por atingir altos valores de resistência mecânica e leveza, mais com o desenvolvimento dos polímeros e de outros metais mais leves, a tendência são os aços serem substituídos, o que levaria a uma diminuição de peças fabricados pelos processos de estampagem de aços, essa é a tendência do mercado para os próximos anos.

### 6.1 SUGESTÃO PARA TRABALHO FUTURO

Realizar estudo sobre o assunto da estampagem hidrodinâmica e hidroconformação.

## REFERÊNCIAS

- ALTAN, T.; OH S.; GEGEL H. **Conformação de Metais: fundamentos e aplicações.** Trad. Reginaldo T. Coelho. São Carlos: EESC/USP, 1999. 366p.
- GOUVEIA, B.; RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia Mecânica: tecnologia de deformação plástica.** Lisboa: Escolar, 2011.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: estruturas e propriedades dos metais e ligas.** São Paulo: McGraw-Hill, 1977, vol.1.
- GORNI, A. A. **Novas tendências para o processo de estampagem a quente.** Corte & Conformação de Metais, São Paulo, p. 62-77, jun. 2010.
- GORNI, A. A. **Novas tendências no processo de estampagem a quente de chapas.** In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2009, Joinville.
- GORNI, A. A. **Seleção de materiais para aplicações automotivas: competição ou simbiose.** In: CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA FUNDIÇÃO. set. 2012. s.l.p
- GORNI, A. A. **Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas.** In: CONGRESSO DE CORTE E CONFORMAÇÃO DE METAIS, 5. São Paulo: Aranda, out. 2009. 20 p.
- SOARES, Tiago J. M. **Análise Técnica e econômica do processo de estampagem a quente com aços microligados ao boro: Aplicação da simulação numérica nos estudos de factibilidade e estimativa de custos do processo de estampagem a quente em relação ao convencional a frio.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade do Porto, Porto.
- SOUZA, Fabricio B. P. **Simulação numérica do processo de estampagem a quente do aço usibor® 1500p.** 2013. Dissertação (Mestrado em Metalurgia de Transformação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- AISI. **Steel Bumper Systems for Passenger Vehicles and Light Trucks.** American Iron and Steel Institute, Southfield, 2006, 184 p.

Crash-test compara a segurança dos carros de hoje com os de 1997, Quatro Rodas, 2017. Disponível em: <<https://quatorrodas.abril.com.br/noticias/crash-test-compara-a-seguranca-dos-carros-de-hoje-com-os-de-1997/>> Acesso em: 20 de nov. de 2018.

Mais opções de aço para a indústria automobilística, ArcelorMittal, 2016. Disponível em:<<http://blog.arcelormittal.com.br/mais-opcoes-de-acos-para-a-industria-automobilistica/>> Acesso em: 20 de nov. de 2018.

Ramezani, M., Ripin, M. Z.: **Rubber-pad forming processes**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. p. 285.