

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

THAÍS GREGÓRIO MORATO BUENO

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE ESTAMPAGEM A QUENTE E  
ESTAMPAGEM A FRIO DE UM AÇO AVANÇADO DE ULTRA ALTA RESISTÊNCIA  
22MnB5

PORTO ALEGRE, RS

2021

THAÍS GREGÓRIO MORATO BUENO

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE ESTAMPAGEM A QUENTE E  
ESTAMPAGEM A FRIO DE UM AÇO AVANÇADO DE ULTRA ALTA RESISTÊNCIA  
22MnB5

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer

Porto Alegre, RS

2021

(página reservada para inserção da ficha catalográfica)

THAÍS GREGÓRIO MORATO BUENO

ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS PROCESSOS DE ESTAMPAGEM A QUENTE E  
ESTAMPAGEM A FRIO DE UM AÇO AVANÇADO DE ULTRA ALTA RESISTÊNCIA  
22MnB5

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. Dr. Afonso Reguly (coordenador do curso)

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Luis Folle  
Campus Integrado de Manufatura e Tecnologia – CIMATEC/BA

---

Prof. Dr. João Henrique Corrêa de Souza  
Universidade Federal do Rio Grande – FURG

---

Profa. Dra. Luana de Lucca de Costa  
Instituto Federal Sul-Rio-Grandense – IFSul

---

Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes  
Universidade Federal do Paraná – UFPR

PORTO ALEGRE, RS

2021

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me capacitar na execução de tal tarefa. Ao Prof Dr. –Ing. Lírio Schaeffer pela oportunidade de orientação e ensinamentos no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também ao meu amado esposo Marcelo Bueno, que sempre foi o meu apoio e grande incentivador. Sem ele a caminhada certamente seria ainda mais árdua. Aos meus pais Wilson Morato e Isabel Gregório que mesmo de longe sempre me apoiaram. Aos colegas do Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) MSc. Eng. André Rosiak, MSc. Eng. Thomas MSc. Eng, Leonardo, Eng. Rafael Pandolfo, Eng. Matheus Riffel, por toda ajuda. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de mestrado e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) pela oportunidade.

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo estabelecer a influência do processo de estampagem a frio (com posterior austenitização e têmpera) e estampagem a quente na força de estampagem e propriedades microestruturais do aço 22MnB5 com revestimento de Alumínio-Silício. Foram utilizadas duas condições para a estampagem a quente. Na primeira condição os corpos de prova foram aquecidos a 950°C por 15 minutos e, em seguida, estampados com a ferramenta a temperatura ambiente e na segunda condição, os corpos de prova foram aquecidos a uma temperatura de 1100°C, sendo em seguida estampados com a ferramenta na temperatura ambiente. Foi realizada a estampagem a frio dos corpos de prova com a ferramentas na temperatura ambiente e, após a estampagem, foram duas condições de austenitização. Na primeira, os corpos de prova foram aquecidos a 950°C por 15 minutos e, em seguida temperados em água. Na segunda, os corpos de prova foram aquecidos a 1100°C e, em seguida temperados em água. Nos processos descritos foi medida a força de estampagem. Ainda foram realizados cálculos analíticos para alcançar a força de estampagem para o processo a quente e a frio. Após a realização dos ensaios, foram analisadas a microestrutura e a dureza com o intuito de comparar os resultados entre si. Além disso, também foi realizada a simulação computacional do processo via software *Simufact Forming*, utilizada para comparação dos resultados de força de estampagem. Para o caso da estampagem a quente, também foi medida a evolução da temperatura da peça de trabalho ao longo da estampagem via simulação numérica. Os resultados de força máxima de estampagem a quente para os processos a temperatura de austenitização de 950°C e 1100°C foram iguais. Os resultados obtidos via simulação numérica e cálculos analíticos também apresentaram valores próximos de força máxima.. A microestrutura final para os processos estudados foi possivelmente composta por martensita, bainita e austenita retida. Não houve diferença nos resultados de dureza média correspondente ao processo de estampagem a quente com austenitização a 950°C e 1100°C. Uma maior dureza foi encontrada nos ensaios de estampagem a frio com posterior têmpera.

**Palavras-chave:** Estampagem a quente. 22MnB5. Estampagem a frio. Força de estampagem.

## ABSTRACT

This work aimed to establish the influence of the cold stamping process (with subsequent austenitization and quenching) and hot stamping on the stamping strength and microstructural properties of 22MnB5 steel with Aluminum-Silicon coating. Two conditions were used for hot stamping. First, the specimens were heated at 950 °C for 15 minutes and then stamped with the tool at room temperature. Second, they were heated to 1100 °C and were then stamped with the tool at room temperature. The cold stamping of the specimens was carried out with the tool at room temperature. After stamping, the material was subjected to two austenitization conditions. In the first, the specimens were heated at 950 °C for 15 minutes and then quenched in water. In the second, the specimens were heated to 1100 °C and then quenched in water. The stamping force was measured in the processes described above. Analytical calculations were performed to achieve the stamping force for the hot and cold process. The microstructure and hardness were analyzed after the tests were carried out to compare the results with each other. In addition, a computer simulation of the process was also performed using the Simufact Forming software to compare the stamping force results. For hot stamping, the evolution of the temperature of the workpiece during the stamping process was also measured via numerical simulation. The maximum hot stamping force results were the same for the austenitizing temperature processes of 950 °C and 1100 °C. The results obtained via numerical simulation and analytical calculations also presented values close to maximum force. The final microstructure for the processes studied was possibly composed of martensite, bainite and retained austenite. There was no difference in the average hardness results corresponding to the hot stamping processes with austenitization at 950 °C and 1100 °C. Higher hardness was obtained for the material subjected to cold stamping with subsequent quenching.

**Keywords:** Hot stamping. 22MnB5. Cold stamping. Stamping force.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alongamento x Limite de Resistência dos Aços.....	20
Figura 2 – Diferentes zonas de gerenciamento de colisões em um veículo.....	21
Figura 3 – Projeção de venda de carros elétricos até o ano de 2040. ....	22
Figura 4 – Possíveis transformações da austenita: as linhas sólidas mostram transformação difusional e a tracejada, transformações não-difusionais. ....	23
Figura 5 – Formação de austenita em um aço hipoeutetóide (contendo menos de 0,76%p C) ilustrada por (a) representação esquemática da microestrutura e (b) evolução em um diagrama de fase Fe-C (somente a região hipoeutetóide). ....	25
Figura 6 – Curvas de escoamento do 22MnB5 e microestruturas características durante o processo de estampagem a quente. ....	26
Figura 7 – Diagrama TRC do 22MnB5. ....	27
Figura 8 – (a) Nucleação da ferrita ( $\alpha$ ) no contorno de grão austenítico. (b) Crescimento: a ferrita rejeita o carbono por conta da baixa solubilidade enriquecendo a austenita de carbono. ....	29
Figura 9 – Diagrama CCT do 22MnB5 e os efeitos dos elementos de liga neste aço. ....	29
Figura 10 – Esquema do processo de estampagem de um copo. ....	30
Figura 11 – Esquema de estampagem e forma de determinar as deformações verdadeiras.....	31
Figura 12 – Círculo antes da deformação (a) e (b) elipse após a deformação.....	32
Figura 13 – Resumo do processo de estampagem a quente. ....	33
Figura 14 – Peças de automóveis produzidas por estampagem a quente na empresa automotiva Benteler. ....	34
Figura 15 – Processo Indireto de Estampagem a Quente.....	35
Figura 16 – Processo Direto de Estampagem a Quente. ....	35
Figura 17 – Diferentes sistemas de aquecimento. (a) forno de aquecimento rolante, (b) aquecimento por indução e (c) aquecimento por condução.....	36
Figura 18 – Relação entre a tensão de engenharia x deformação relativa. 22MnB5 como recebido e após a estampagem a quente.....	38
Figura 19 – Durante o tratamento térmico, ocorre a difusão do Fe do metal base para o revestimento formando o revestimento AlSiFe.....	39
Figura 20 – (a) Microestrutura do 22MnB5 no estado como recebido (GÜLER, 2013); (b) Perfil de revestimento Al-Si do 22MnB5.....	41
Figura 21 – Curva de escoamento obtidas experimentalmente e por modelos matemáticos para o aço 22MnB5.....	42
Figura 22 – Parâmetros geométricos utilizados no cálculo da força de estampagem de geometrias axissimétricas. ....	43

Figura 23 – Geometria da peça com suas dimensões antes e após a conformação. ....	44
Figura 24 – Curva limite de conformação para um processo de estampagem a frio do 22MnB5 via software DYNAFORM. ....	46
Figura 25 – Regiões da peça a serem analisadas após o processo de estampagem. ....	48
Figura 26 – Esquema do processo analisado. ....	48
Figura 27 – Dimensões do corpo de prova antes e depois da conformação. ....	48
Figura 28 – Esquema do processo de estampagem a quente. ....	50
Figura 29 – Esquema do processo de estampagem a frio com posterior têmpera no material estudado. ....	52
Figura 30 – Malha da peça de trabalho. ....	53
Figura 31 – Geometria utilizada na simulação do processo de estampagem a quente. ....	54
Figura 32 – Curva de escoamento a frio do aço 22MnB5 definida através do software <i>Simufact Forming</i> para uma velocidade de deformação $\dot{\varphi} = 0,01 \text{ s}^{-1}$ . ....	56
Figura 33 – Curva de engenharia do 22MnB5. ....	59
Figura 34 – Curva de escoamento a frio do DIN 22MnB5 definida experimentalmente para uma velocidade de deformação $\dot{\varphi} = 0,01 \text{ s}^{-1}$ . ....	60
Figura 35 – Microestrutura do material em estudo na condição como recebido. Aumento: 500x. ....	61
Figura 36 – Vista superior e frontal da peça de trabalho após o processo de estampagem. ....	62
Figura 37 – Força de estampagem x deslocamento do punção para as temperaturas de austenitização de : (a) 950°C e (b) 1100°C. ....	63
Figura 38 – Temperatura da matriz em função do processo de estampagem a quente com temperatura de austenitização de (a) 950°C e (b) 1100°C. ....	64
Figura 39 – Microestrutura encontrada em função das regiões analisadas para temperatura de austenitização de 950°C (a) região I, (b) região II (c) região III e (d) região IV. Aumento 500x. ....	65
Figura 40 – Microestrutura encontrada em função das regiões analisadas para temperatura de austenitização de 1100°C (a) região I, (b) região II (c) região III e (d) região IV. Aumento 500x. ....	66
Figura 41 – Força de estampagem x deslocamento do punção para processo de estampagem a frio. ....	68
Figura 42 – Microestrutura encontrada em função das regiões analisadas para (a) região I, (b) região II, (c) região III e (d) região IV, processo de estampagem a frio com posterior têmpera. Temperatura de autenitização: 950°C. Aumento 500x. ....	69
Figura 43 – Microestrutura encontrada em função das regiões analisadas para (a) região I, (b) região II (c) região III e (d) região IV, processo de estampagem a frio com posterior têmpera. Temperatura de autenitização: 1100°C. Aumento 500x. ....	69

Figura 44 – Deformação para estampagem com temperatura de austenitização de 950°C. ....	74
Figura 45 – Força de estampagem (F) em função do deslocamento do punção (Dp) obtido via simulação numérica para a temperatura de austenitização de 950°C. ....	75
Figura 46 – Gráfico de resfriamento a partir da temperatura de austenitização de 950°C obtida via software <i>Simufact</i> . ....	75
Figura 47 – Deformação plástica para a temperatura de austenitização de 1100°C. ....	76
Figura 48 – Principais momentos da estampagem a quente com a evolução da deformação na chapa. ....	77
Figura 49 - Força de estampagem (F) em função do deslocamento do punção (Dp) obtido via simulação numérica para a temperatura de austenitização de 1100°C. ....	77
Figura 50 – Curva de resfriamento do 22mnB5 a partir da temperatura de austenitização de 1100°C obtida via software <i>Simufact</i> . ....	78
Figura 51 – Resultado de deformação plástica para estampagem a frio. ....	79
Figura 52 - Força de estampagem (F) em função deslocamento do punção (Dp) via simulação numérica para a estampagem a frio. ....	79
Figura 53 – Temperatura da matriz em função do processo de estampagem a quente para as temperaturas de austenitização de 950°C e 1100°C. ....	81
Figura 54 – Gráfico de força de estampagem (F) em função do deslocamento do punção (Dp) experimental e via simulação numérica para austenitização a 950°C. ....	83
Figura 55 – Gráfico de força de estampagem (F) em função do deslocamento do punção (Dp) experimental e via simulação numérica para austenitização a 1100°C. ....	84
Figura 56 – Comparativo das microdurezas em relação à região da peça analisada. ....	85
Figura 57 – Força de estampagem (F) em função do deslocamento do punção (Dp) via simulação numérica e resultados experimentais para o processo de estampagem a frio. ....	86
Figura 58 – Comparativo entre a evolução da força de estampagem para o processo de estampagem em relação ao deslocamento do punção para as condições a frio e a quente com austenitização de 950°C e 1100°C. ....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de alguns aços utilizados na estampagem a quente. ....	37
Tabela 2 – Propriedades dos aços utilizados na estampagem a quente. ....	38
Tabela 3 – Percentual em massa dos elementos químicos presentes no 22MnB5 com revestimento Al-Si de acordo com a literatura.....	40
Tabela 4 – Coeficientes da equação de Hensel-Spittel para o 22MnB5. ....	42
Tabela 5 – Especificações do ferramental utilizado no processo de estampagem estudado.....	49
Tabela 6 – Resumo das configurações para os processos de estampagem a quente. ....	50
Tabela 7 – Resumo do processo de estampagem a quente. ....	51
Tabela 8 – Resumo das configurações para os processos de estampagem a frio. ...	51
Tabela 9 – Parâmetros do processo de têmpera após a estampagem a frio do aço ao boro 22MnB5.....	52
Tabela 10 – Principais parâmetros e dados de entrada utilizados para a simulação da estampagem a quente.....	55
Tabela 11 – Parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica do processo de estampagem a frio.....	57
Tabela 12 – Percentual em massa dos elementos químicos presentes no 22MnB5.....	58
Tabela 13 – Propriedades Mecânicas obtidas do ensaio de tração a temperatura ambiente.....	59
Tabela 14 – Microdureza Vickers para as diferentes temperaturas de austenitização analisadas. ....	67
Tabela 15 – Microdureza Vickers das diferentes temperaturas de austenitização analisadas para o processo de estampagem a frio com posterior têmpera. ....	70
Tabela 16 – Tensão de escoamento calculada através da equação de Hensel-Spittel para o aço DIN 22MnB5 para as temperaturas utilizadas. ....	71
Tabela 17 – Equações e parâmetros utilizados para o cálculo da força de estampagem teórico ( <i>F<sub>pt</sub></i> ).....	71
Tabela 18 – Força de estampagem teórica calculada em função da força de estampagem ideal e força de atrito no prensa chapas para as temperaturas de ensaio de 950°C e 1100°C. ....	72
Tabela 19 – Tensão de escoamento para trabalho a frio calculada através da equação da tensão de escoamento para o aço 22MnB5. ....	72
Tabela 20 – Força de estampagem teórica calculada em função da força de estampagem ideal e força de atrito no prensa chapas para a estampagem a frio. ...	72
Tabela 21 – Equação e parâmetros utilizados para o cálculo analítico da força de dobramento em "U". ....	73

Tabela 22 – Limite de Resistencia utilizados para o cálculo da força máxima de dobramento em “U”, .....	73
Tabela 23 – Força de dobramento em “U” calculada para o trabalho a frio e a quente. ....	73
Tabela 24 – Resumo das forças máximas encontradas através dos distintos métodos utilizados neste estudo. ....	88

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHSS	Aços Avançados de Alta Resistência ( <i>Advanced High Strength Steels</i> )
BH	<i>Bake Hardening</i>
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
CP	Aço de fase complexa ( <i>Complex Fase</i> )
DP	Aço bifásico ( <i>Dual Phase</i> )
$f$	Folga entre punção e matriz
FB	Ferrítico-bainítico
Fe <sub>3</sub> C	Cementita
HF	<i>Hot Forming</i>
HSLA	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga ( <i>High Strength Low Alloy</i> )
IF	Aço livre de interstícios ( <i>Interstitial Free</i> )
IF-HS	Aços livre de interstício para estampagem a quente ( <i>Interstitial Free High Strength</i> )
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
L	Líquido
MS	Aço Martensítico
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
TRC	Diagrama de Transformação por Resfriamento Contínuo
TWIP	Aços com Plasticidade Induzida por Maclação ( <i>Twinning Induced Plasticity</i> )
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHSS	Aços de Ultra Alta Resistência ( <i>Ultra High Strength Steels</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_l$	Alongamento [%]
$A_{c1}$	Temperatura de Transformação Eutetóide [°C]
$A_1$	Temperatura de Transformação Eutetóide no equilíbrio termodinâmico [°C]
$A_{c3}$	Temperatura de início de austenitização [°C]
$A_3$	Temperatura de início de austenitização no equilíbrio termodinâmico [°C]
$b$	Comprimento da seção inferior [mm]
$D_p$	Deslocamento do punção [mm]
$F$	Força de Estampagem [kN]
$F_{apc}$	Força de atrito teórica no prensa chapa [kN]
$F_{pc}$	Força do prensa chapa [kN]
$F_{pt}$	Força de estampagem calculada [kN]
$F_{id}$	Força de estampagem ideal [kN]
$F_U$	Força máxima para operação de dobramento em “U” [kN]
$h$	Profundidade de Estampagem [mm]
$k_f$	Tensão de Escoamento [MPa]
$L_0$	Comprimento inicial da geratriz [mm]
$l_0$	Largura da geratriz [mm]
$n$	Coefficiente de encruamento [-]
$R_e$	Limite de Escoamento [MPa]
$R_m$	Resistência a Tração [MPa]
$r_{cm}$	Raio do canto da matriz [mm]
$r_M$	Raio da matriz [mm]
$r_P$	Raio do punção [mm]
$T$	Temperatura [°C]
$T_m$	Temperatura da matriz [°C]
$s_0$	Espessura inicial da geratriz [mm]
$s$	Espessura final [mm]
$t$	tempo [s ou min]

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\alpha$	Ferrita [-]
$\varepsilon$	Deformação relativa [%]
$\varphi$	Deformação verdadeira [-]
$\dot{\varphi}$	Velocidade de deformação [ $s^{-1}$ ]
$\mu$	Coefficiente de atrito [-]
$\sigma$	Tensão [MPa]
$\gamma$	Austenita [-]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS GERAIS .....	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1	OS AÇOS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA .....	19
<b>2.1.1</b>	<b>Aços avançados de alta resistência - AHSS</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Aços avançados de ultra alta resistência (UHSS)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1.3</b>	<b>O futuro da estampagem no setor automotivo</b> .....	<b>21</b>
2.2	MICROESTRUTURA PRESENTES NOS AÇOS .....	23
<b>2.2.1</b>	<b>Ferrita</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Bainita</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Austenita</b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Martensita</b> .....	<b>24</b>
2.3	DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO POR RESFRIAMENTO CONTÍNUO - TRC .....	26
2.4	EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA.....	28
2.5	ESTAMPAGEM DE CHAPAS.....	30
<b>2.5.1</b>	<b>Deformações na estampagem</b> .....	<b>30</b>
2.6	ESTAMPAGEM A QUENTE .....	32
2.7	AÇOS PARA ESTAMPAGEM A QUENTE .....	37
2.8	REVESTIMENTO AL-SI .....	39
2.9	22MNB5 COM REVESTIMENTO AL-SI .....	40
2.10	CÁLCULO NUMÉRICO DA FORÇA DE ESTAMPAGEM.....	43
2.11	SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	45
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>47</b>
3.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	47
3.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	47
3.3	MICROESTRUTURA.....	47
3.4	PROCESSO DE ESTAMPAGEM .....	48
<b>3.4.1</b>	<b>Estampagem a quente</b> .....	<b>49</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Estampagem a frio com posterior têmpera</b> .....	<b>51</b>
3.5	SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	52
<b>3.5.1</b>	<b>Simulação da estampagem a quente</b> .....	<b>54</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Simulação da estampagem a frio</b> .....	<b>55</b>

<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>58</b>
4.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	58
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS .....	58
4.3	MICROESTRUTURA.....	60
4.4	ESTAMPAGEM A QUENTE .....	61
4.5	ESTAMPAGEM A FRIO COM POSTERIOR TÊMPERA.....	67
4.6	CÁLCULO ANALÍTICO DA FORÇA DE ESTAMPAGEM .....	70
4.7	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	74
<b>4.7.1</b>	<b>Simulação da estampagem a quente</b> .....	<b>74</b>
<b>4.7.2</b>	<b>Simulação da estampagem a frio</b> .....	<b>78</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>80</b>
5.1	CARATERIZAÇÃO DO MATERIAL COMO RECEBIDO .....	80
5.2	ESTAMPAGEM A QUENTE .....	80
<b>5.2.1</b>	<b>Temperatura da chapa e temperatura das matrizes</b> .....	<b>80</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Microestrutura e microdureza</b> .....	<b>82</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Força de estampagem</b> .....	<b>82</b>
5.3	ESTAMPAGEM A FRIO COM POSTERIOR TÊMPERA.....	84
<b>5.3.1</b>	<b>Microestrutura e microdureza</b> .....	<b>84</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Força de estampagem</b> .....	<b>85</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Força de Estampagem Global</b> .....	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>89</b>
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Novos materiais e processos de manufatura estão sendo utilizados na indústria automotiva com objetivo de reduzir o peso do veículo sem comprometer seu desempenho, levando o menor consumo de combustível, no caso de automóveis com motores de combustão interna, ou para elevar a autonomia da bateria, se tratando de veículos elétricos e híbridos (DE CASTRO, 2017). Essa demanda por produção de novas peças de alta resistência, com custos e produtividade convenientes, cresceu com a redução de peso e melhorias na segurança contra acidentes no design de automóveis (MORI *et al.*, 2017).

Um dos motivos para o desenvolvimento e estudo dos AHSS foi resolver o decréscimo da conformabilidade conforme a resistência se elevava nos aços convencionais (DIAS, 2013). Reduções de peso podem ser alcançadas utilizando-se polímeros, magnésio e alumínio, porém somente com aços avançados de alta (AHSS) e ultra-alta resistência (UHSS) se obtém uma maior razão resistência-peso se comparado com materiais mais leves (CARON; DAUN; WELLS, 2014).

A estampagem a quente dos aços de alta resistência consiste num processo de conformação onde a geratriz é conformada em um único passo que combina conformação em altas temperaturas com têmpera utilizando matrizes resfriadas. O blank que possui uma microestrutura inicial composta por ferrita e perlita e propriedades mecânicas baixas é aquecido em um forno acima da temperatura de austenitização e mantido por tempo suficiente para formação de uma microestrutura homogeneamente austenítica. Depois, a geratriz é transferida para uma prensa e simultaneamente conformado e temperado, a uma velocidade de deformação mínima de 27°C/s (VENTURATO *et al.*, 2017).

### 1.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho teve como principal objetivo estabelecer a influência do processo de estampagem a frio (com posterior austenitização e têmpera) e estampagem a quente na força de estampagem e propriedades microestruturais do aço 22MnB5 com revestimento de Alumínio-Silício.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para este trabalho também foram determinados objetivos específicos, os quais se encontram a seguir:

- a) Analisar o gráfico de força x deslocamento do punção resultante dos processos de estampagem;
- b) Realizar a simulação computacional via software *Simufact Forming* a fim de comparar com os resultados experimentais obtidos;
- c) Efetuar o cálculo numérico da força de estampagem para os processos analisados;
- d) Analisar a microestrutura final via Microscopia Óptica nas amostras; e
- e) Realizar o Ensaio de Microdureza Vickers nas amostras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 OS AÇOS NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

O desenvolvimento tecnológico do aço na siderurgia mundial foi sempre incentivado pela indústria automotiva, com objetivo de produzir aços com maior estampabilidade. Este desenvolvimento, no entanto, não foi suficiente para que a indústria siderúrgica não sofresse pressão para produzir aços com maior competitividade, redução do consumo de energia e menor agressão ao meio ambiente. Neste contexto surgiram os Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) (DIAS, 2013).

A respeito da segurança veicular, novos testes e padrões mais severos que influenciam as estruturas do corpo dos automóveis. *Design* e materiais estão sendo exigidos, além de uma maior exigência dos consumidores por carros mais seguros, que definem a compra do veículo de acordo com seu desempenho de segurança (KEELER; KIMCHI, 2014).

#### 2.1.1 Aços avançados de alta resistência - AHSS

Os Aços Avançados de Alta Resistência (AHSS) possuem uma microestrutura usualmente multifásica, da qual se obtêm uma adequada combinação entre resistência e ductilidade. Esta associação é construída para alcançar os requisitos de desempenho desejados mantendo ótima conformabilidade (KEELER; KIMCHI, 2014). A figura 1 mostra algumas classes de aços comuns e AHSS, sendo possível comparar suas diferentes propriedades.

O transporte produz a segunda maior emissão de CO<sub>2</sub> após a produção de eletricidade. Aproximadamente 90% da emissão no transporte vêm de automóveis, como carros, caminhões e ônibus (MORI *et al.*, 2017). Os AHSS foram introduzidos nas peças automotivas com objetivo de reduzir o peso da carroceria para cumprir os regulamentos de CO<sub>2</sub> (AZUSHIMA; UDA; YANAGIDA, 2011). Alumínio, magnésio e polímero de fibra de carbono reforçada são materiais mais leves, com custos mais elevados que os do aço. A aplicação dos aços de alta resistência para peças automotivas, especialmente na carroceria, aumenta notavelmente por conta da possibilidade de redução do peso (MORI *et al.*, 2017).

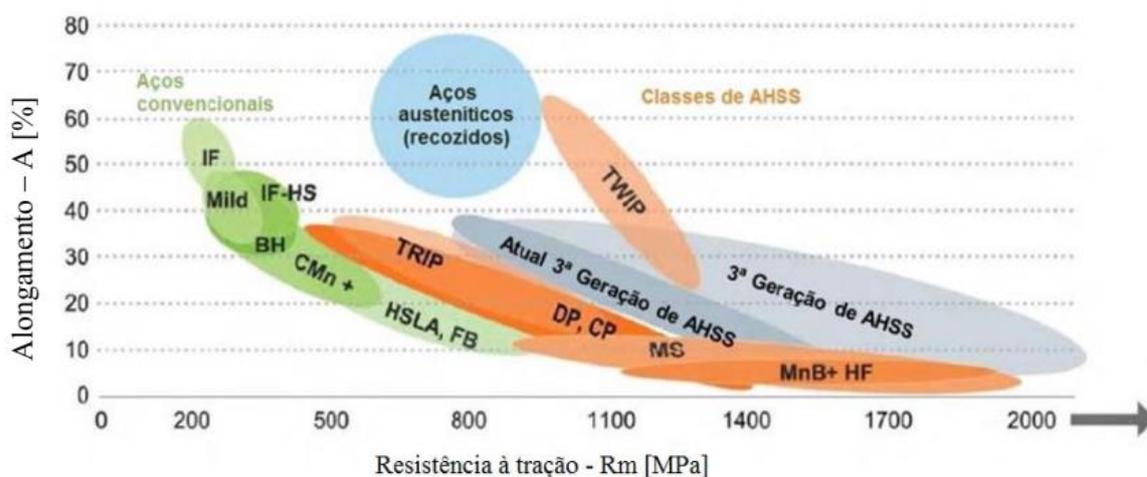


Figura 1 – Alongamento x Limite de Resistência dos Aços.

Fonte: Keeler e Kimchi (2014).

O uso dos AHSS é explicado por seu melhor desempenho para absorção de energia em colisões e maior limite de resistência, permitindo o uso de materiais mais finos, sem afetar as propriedades dos materiais, o que se traduz em veículos mais leves. Essa diminuição de peso representa um menor gasto de combustíveis, resultando assim em uma menor emissão de gases de efeito estufa. (KEELER; KIMCHI, 2014).

### 2.1.2 Aços avançados de ultra alta resistência (UHSS)

Não há uma definição específica para os aços avançados de ultra alta resistência (Ultra High Strength Steels - UHSS), mas esses são geralmente denominados por terem seu limite de escoamento superior a 560 MPa. Os grupos de aços que se enquadram nesta categoria são, por exemplo: aços de médio carbono com elementos de liga endurecedores, aços de média liga ou aços ferramenta, aços inoxidáveis martensíticos, aços maraging com alto teor do elemento Ni, aços com alta liga e aços inoxidáveis endurecíveis por semi precipitação austenítica (NADERI, 2007).

Sobre a segurança veicular, em um evento de colisão, a capacidade de distribuir cargas estáticas e dinâmicas, é uma das principais considerações de design para estruturas de veículos. Existem duas regiões no automóvel com requisitos de segurança bem diferentes entre si, como se pode observar na figura 2. A primeira dessas é a “cabine dos passageiros (safety cage)” rígida, que é projetada para

suportar cargas elevadíssimas sem se deformar, em altas ou baixas velocidades, o que garante a integridade dos passageiros dentro do veículo. A segunda é a “região de deformação (crumple zone)”, localizada nas partes dianteira e traseira do automóvel, com o objetivo de absorver o máximo de energia possível durante uma colisão, amortecendo o impacto e reduzindo possíveis danos na “cabine dos passageiros” (KEELER; KIMCHI, 2014).

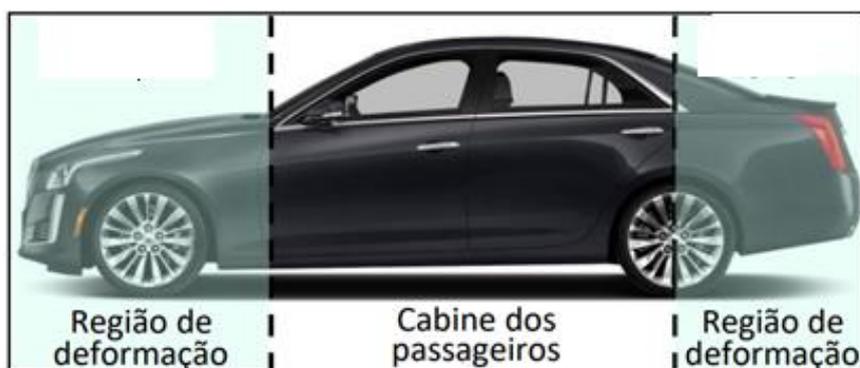


Figura 2 – Diferentes zonas de gerenciamento de colisões em um veículo.

Fonte: Adaptado de Keeler e Kimchi (2014).

Para alcançar esta ultra-alta resistência existem alguns mecanismos como solução sólida de endurecimento por elementos intersticiais ou substitucionais como C, Mn e Si, endurecimento por precipitação (Ti, Nb, V), refinamento de grão, endurecimento por discordância ou endurecimento por precipitação (NADERI, 2007).

Os *Advanced High Strength Steels* (AHSS) e *Ultra High Strength Steels* (UHSS) são materiais estratégicos para as empresas montadoras de carrocerias. O uso desses materiais permite que o setor automotivo atenda a demandas por estruturas leves, visando redução do consumo de combustível e elevando a segurança veicular e as propriedades de resistência ao choque. Devido à espessura reduzida e maior limite de resistência dos AHSS e UHSS em comparação com os aços tradicionais se tornaram a tendência atual para novos veículos (COUTO *et al.*, 2020).

### 2.1.3 O futuro da estampagem no setor automotivo

As estruturas das carrocerias dos automóveis das gerações atuais têm apresentado pesos ainda mais reduzidos. Tal modelo pode ser observado, pois novos protótipos de marcas de carros populares são mais leves que os anteriores em pelo menos 20%. Essa tendência aumentou ainda mais em projetos de carros elétricos, onde o peso da bateria precisa ser compensado. (WROBEL; SIDZINA, 2021)

Conforme dados da S&P Global Inc., as vendas globais de carros elétricos cresceram 63% em 2018 – 79% na China, 81% nos EUA e 34% na Europa. Segundo a Agência Internacional de Energia, em 2030 os veículos elétricos crescerão de 3 milhões hoje para 125 milhões (BACHMAN, 2020). A figura 3 apresenta a projeção de venda dos carros elétricos nos próximos anos.

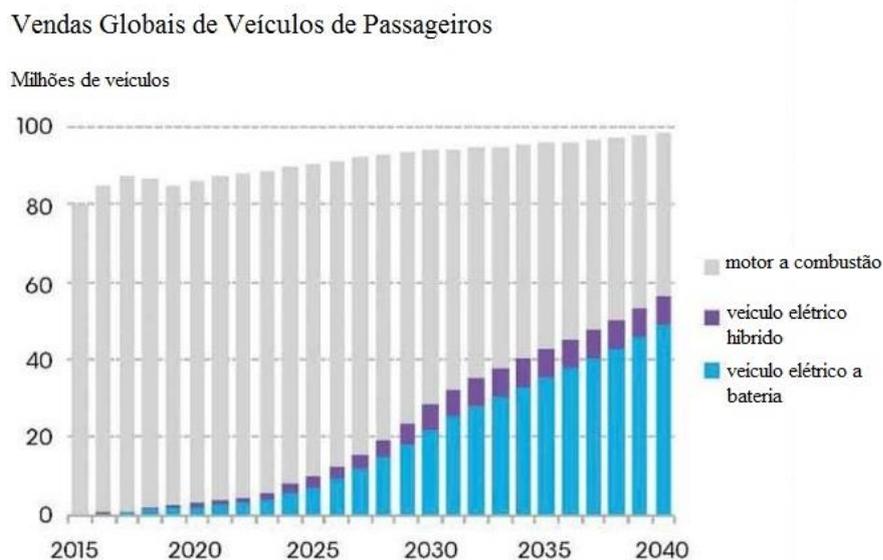


Figura 3 – Projeção de venda de carros elétricos até o ano de 2040.

Fonte: (BACHMAN, 2020).

Em 2020, o custo das baterias caiu 90% ao longo da década e sua capacidade aumentou. Com a adição de baterias de zinco recarregáveis, os veículos elétricos estão prontos para aumentar sua participação no mercado. No entanto, o ferramental é um dos maiores desafios enfrentados atualmente na fabricação de veículos elétricos. Reduzir o tempo necessário para fazer ferramentas ou matrizes melhorará a qualidade e permitirá um menor tempo de lançamento no mercado (BACHMAN, 2020).

As empresas de estampagem podem se colocar à frente tomando medidas proativas, como é o caso da fabricante de peças de aço estampado, Gestamp. A empresa desenvolveu o que diz ser seu processo de estampagem a quente de quarta geração, caixas de bateria para carros elétricos. Tal estrutura tem o desafio de ser suficientemente forte e ao mesmo tempo leve. Com isso, a peça deve atender a uma série de critérios rigorosos de resistência a colisões e à prova de intempéries, além de ser parte integrante da estrutura do veículo (HOLT, 2019).

## 2.2 MICROESTRUTURA PRESENTES NOS AÇOS

### 2.2.1 Ferrita

A ferrita é normalmente conhecida como ferro  $\alpha$ , e possui uma microestrutura CCC (cúbica de corpo centrado). Aços com baixo teor de carbono são praticamente constituídos de microestrutura ferrítica, enquanto que aços médio e alto teor de carbono são normalmente constituídos de ferrita com alguma porcentagem de perlita (BILLUR, 2019).

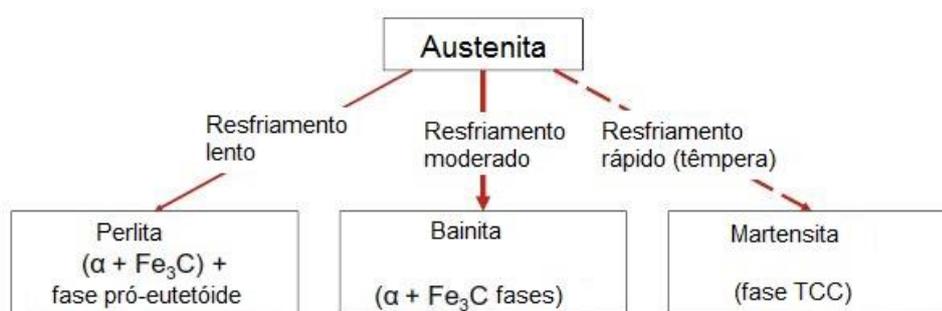


Figura 4 – Possíveis transformações da austenita: as linhas sólidas mostram transformação difusional e a tracejada, transformações não-difusionais.

Fonte: Billur (2019).

### 2.2.2 Bainita

De acordo com a figura 4, caso a austenita seja submetida a uma taxa de resfriamento moderada, produz-se bainita. A bainita não é uma fase, mas uma microestrutura composta de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) e ferrita (BILLUR, 2019). Existem algumas opiniões divergentes acerca da transformação bainítica. Alguns autores assumem que é uma transformação reconstrutiva onde a difusão de carbono determina a cinética de transformação. Já outros autores descrevem essa transformação como uma transformação deslocada onde a nucleação é a etapa determinante da taxa (THIBAUX; MÉTENIER; XHOFFER, 2007).

### 2.2.3 Austenita

A austenita, também conhecida como ferro  $\gamma$ , possui a microestrutura cúbica de face centrada (CFC). Esta fase normalmente não é estável em baixas temperaturas, apesar de outros elementos de liga conseguirem estabilizar a austenita

como nos aços TWIP (Twinning-Induced Plasticity) e nos aços inoxidáveis austeníticos. Outros tratamentos térmicos se iniciam na fase austenítica (BILLUR, 2019).

A formação de austenita é um processo controlado por difusão e é determinado principalmente pela microestrutura inicial do material. A cinética da austenitização é considerada principalmente um processo controlado pela difusão de carbono. Isso ocorre porque a difusividade do carbono no aço é aproximadamente  $10^5$  a  $10^6$  vezes maior que os solutos substitucionais (por exemplo, o Mn). Portanto, na estampagem a quente de aços ao boro em aplicações industriais, dentro do tempo prático de encharque, o estabelecimento do equilíbrio é em relação ao carbono, sem tomar solutos de substituição em conta. Como o teor de carbono está na faixa de 0,02% a 0,76%p, o aço ao boro 22MnB5 é um aço hipoeutetóide (LI *et al.*, 2016).

A nucleação da austenita nos aços hipoeutetóides ocorre nas interfaces das lamelas de ferrita e cementita na perlita, bem como nas interseções ou interfaces de colônias de perlita (CABALLERO; MILLER; GARCIA-MATEO, 2010). Os novos grãos de austenita crescem em colônias de perlita difundindo o carbono da ferrita eutetóide; ao mesmo tempo a cementita se dissolve na austenita. (COSTA, 2020). A figura 5 (a) demonstra esquematicamente a formação da austenita pela microestrutura.

A formação de austenita em aços ao boro normalmente envolve o aquecimento do material através da região bifásica ( $\alpha+\gamma$ ) para a região monofásica de austenita ( $\gamma$ ). Nesta condição, a temperatura de início e final da transformação não segue mais o diagrama de equilíbrio (LI *et al.*, 2015). Para De Andrés *et al.* (2002) tais temperaturas são deslocadas para temperaturas mais altas, chamados de Ac1 e Ac3, as quais são sensíveis a taxa de aquecimento. A figura 5 (b) ilustra esquematicamente a formação de austenita em um diagrama de fases Fe-C.

#### 2.2.4 Martensita

Outro importante microconstituente presente no aço é a martensita, que é formada quando ligas Fe-C austenitizadas são rapidamente resfriadas até temperaturas relativamente baixas (próximas da temperatura ambiente), conforme figura 4. Martensita é uma fase monofásica que não ocorre no equilíbrio e resulta numa transformação não difusional da austenita. A transformação martensítica ocorre quando a taxa de resfriamento é rápida suficiente para prevenir a difusão do carbono (CALLISTER, 2008).

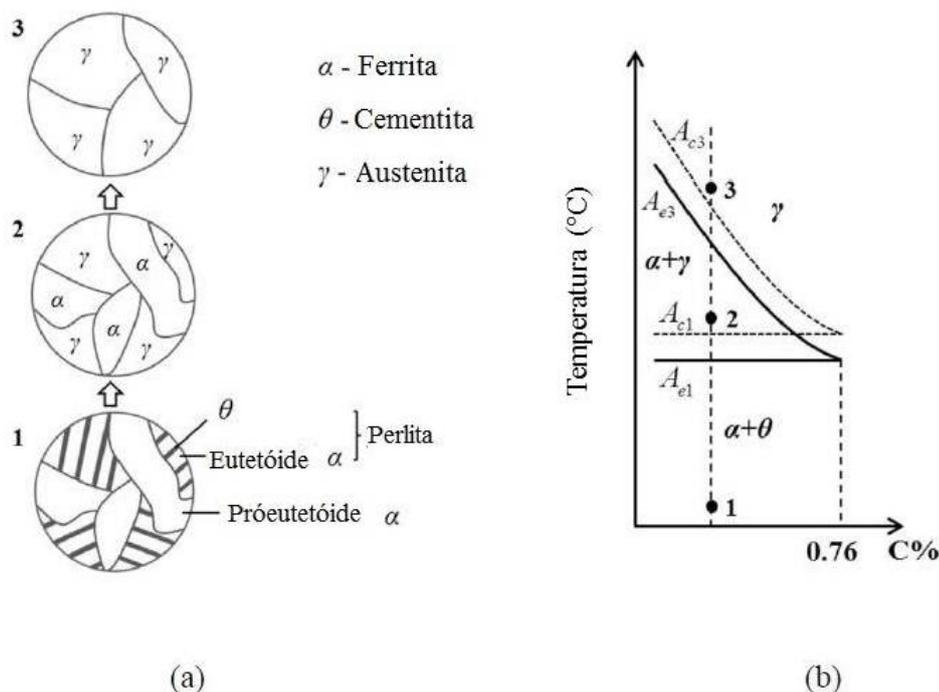


Figura 5 – Formação de austenita em um aço hipoeutetóide (contendo menos de 0,76%p C) ilustrada por (a) representação esquemática da microestrutura e (b) evolução em um diagrama de fase Fe-C (somente a região hipoeutetóide).

Fonte: Li *et al.* (2016).

Por conta de a difusão ser suprimida, geralmente por resfriamento rápido, os átomos de carbono não se dividem em cementsita e ferrita, mas em vez disso, estão presos em sítios octaédricos de uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), produzindo assim, uma nova fase, a martensita. A solubilidade de carbono em uma estrutura CCC é muito ampliada na formação de martensita, logo, a martensita assume uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC). Conforme a concentração de carbono aumenta na martensita, mais sítios intersticiais são preenchidos e a tetragonalidade aumenta (KRAUSS, 2015).

A reação martensítica ocorre por cisalhamento de planos cristalográficos, levando a uma microestrutura em forma de ripa ou lenticular. Essa reação nos aços geralmente ocorre atermicamente, ou seja, ao longo do resfriamento do aço (ROSA, 2015). A figura 6 mostra a curva de escoamento do aço 22MnB5 e as microestruturas características para cada etapa do processo de estampagem a quente.

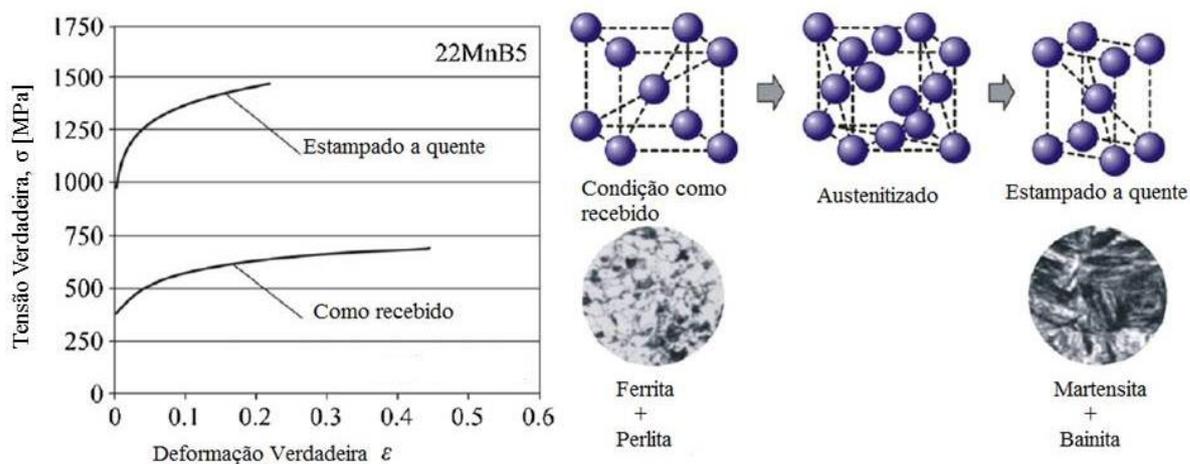


Figura 6 – Curvas de escoamento do 22MnB5 e microestruturas características durante o processo de estampagem a quente.

Fonte: Karbasian e Tekkaya (2010).

### 2.3 DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO POR RESFRIAMENTO CONTÍNUO - TRC

Os tratamentos térmicos isotérmicos não são de realização mais prática, devido a uma liga ter de ser resfriada rapidamente desde uma temperatura mais alta, acima da eutetóide, até uma temperatura igualmente elevada, onde deve ser mantida. Um diagrama de transformação isotérmica só tem validade para situações de temperatura constante, sendo necessária a modificação para um diagrama em que as transformações ocorram enquanto a temperatura estiver variando constantemente. Para um resfriamento contínuo, os tempos fundamentais para o início e término da reação são retardados. Sendo assim, as curvas isotérmicas são alteradas para tempos mais longos e temperaturas mais baixas. Um gráfico incluindo essas curvas modificadas para início e final da reação é denominado Diagrama de Transformação por Resfriamento Contínuo (TRC) (CALLISTER, 2008).

As operações de estampagem a quente ocorrem na fase austenítica do material, devido à sua conformabilidade. A figura 7 apresenta o diagrama TRC para o 22MnB5 dividido em três zonas distintas a fim de compreender as condições nas quais esta operação ocorre (DE SOUZA, 2013).

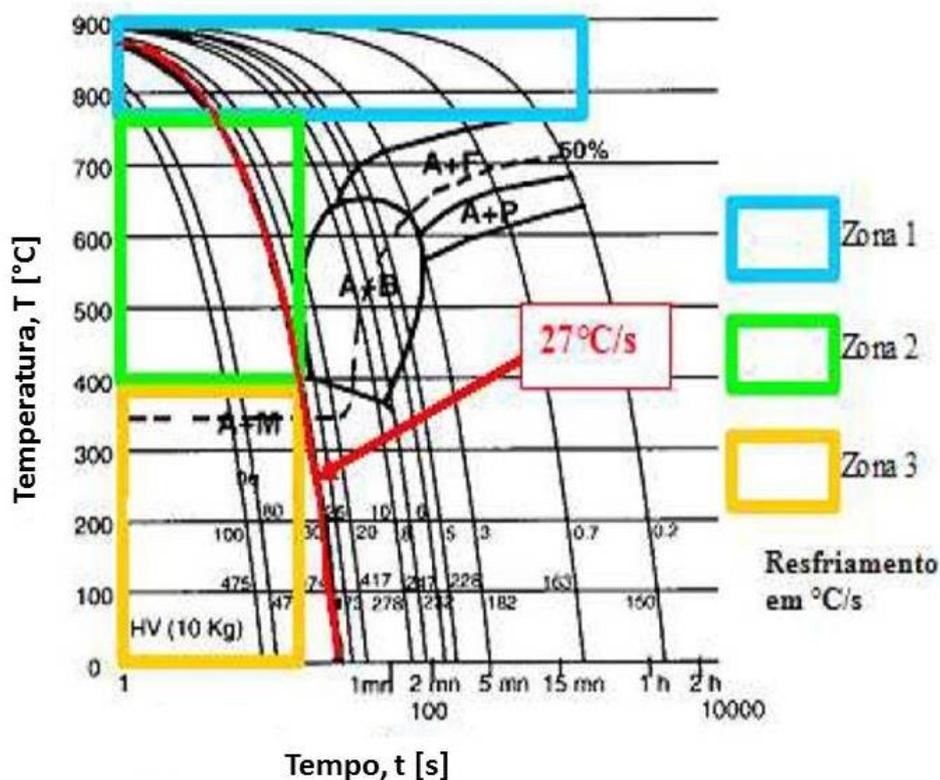


Figura 7 – Diagrama TRC do 22MnB5.

Fonte: De Souza (2013).

A partir da observação da figura 7, verifica-se que ao longo do resfriamento, a austenita se transforma em ferrita e perlita se houver um resfriamento lento, em bainita, caso ocorra a uma taxa de resfriamento moderada e martensita em altas taxas de resfriamento (BILLUR, 2019).

Além disso, observa-se que a zona 1 corresponde a austenita estável. Neste intervalo não ocorre transformação de fase. A zona 2 equivale à austenita instável. Nesta região a peça é estampada, e, como é possível observar, a velocidade de resfriamento deve ser de pelo menos 27°C/s, a fim de se evitar a transformação bainítica. Para De Souza (2013), velocidades de resfriamento superiores a 27°C/s permitem a obtenção de uma microestrutura completamente martensítica. Já para George, Bardelcik e Worswick (2012), para obtenção deste tipo de microestrutura, a velocidade de resfriamento deve ser superior aos 30°C/s. A zona 3 representa a microestrutura martensítica alcançada durante o processo de têmpera dentro da ferramenta de estampagem (DE SOUZA, 2013).

A presença do Carbono e outros elementos de liga deslocam as inflexões da perlita e da bainita para tempos maiores, reduzindo a taxa de resfriamento crítica. Uma das explicações para a adição de elementos de liga ao aço é para facilitar a formação

de martensita, de modo que estruturas totalmente martensíticas possam ser alcançadas em seções transversais relativamente mais grossas. Alguns elementos de liga capazes de tornar os aços tratáveis termicamente são o cromo, o níquel, o molibdênio, o manganês, o silício e o Tungstênio; no entanto, esses elementos precisam estar em solução sólida com a austenita no momento da Itêmpera (CALLISTER, 2008).

## 2.4 EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA

Cada elemento de liga no aço possui um efeito especial. A seguir, os efeitos principais de alguns elementos de liga na resistência e, especialmente na ductilidade estão apontados (NADERI, 2007):

- a) Manganês – contribui com a resistência e dureza. O aumento da resistência é dependente do teor de carbono. Elevando o teor de manganês reduz-se a ductilidade e a soldabilidade, porém a redução é menor que a do carbono nessas propriedades. O elemento manganês possui um efeito significativo no endurecimento do aço (NADERI, 2007).

A fim de obter aços de ultra alta resistência no final do processo de estampagem a quente, a transformação de austenita para martensita é necessário. As transformações de fase ocorrem tanto ao longo do aquecimento do aço (ferrita e perlita se transformando em austenita), quanto no seu resfriamento (austenita se tornando outras) (BILLUR, 2019).

A adição de boro nos aços para estampagem a quente possui o objetivo principal de dificultar a formação de ferrita durante a etapa de transferência do blank do forno de austenitização para a prensa de estampagem. A figura 8 apresenta a nucleação da ferrita localizada no contorno de grão da austenita e o crescimento ocorre dentro do grão austenítico por meio do movimento de fronteira. Através da adição de boro nos aços, este elemento segrega no contorno de grão da austenita (DE SOUZA, 2013). A segregação do boro atrasa a nucleação da ferrita e mantém o aço austenítico durante a transferência do blank do forno para a prensa.

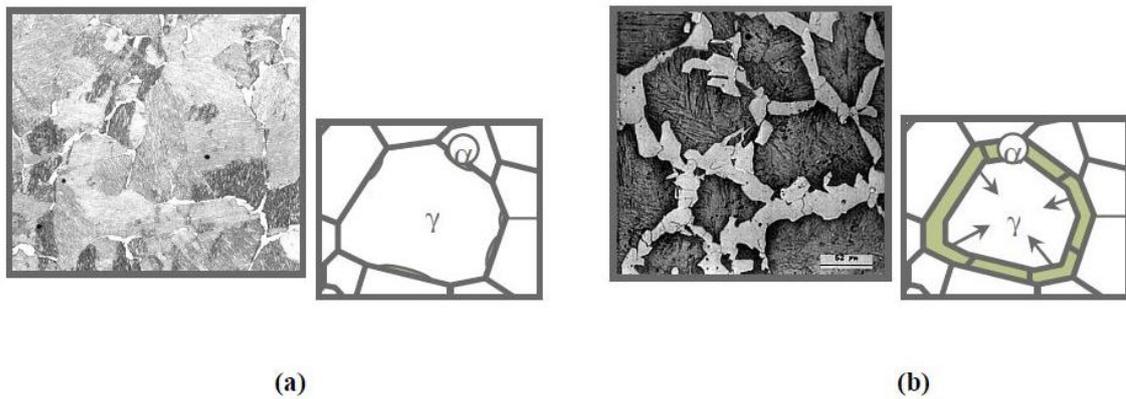


Figura 8 – (a) Nucleação da ferrita ( $\alpha$ ) no contorno de grão austenítico. (b) Crescimento: a ferrita rejeita o carbono por conta da baixa solubilidade enriquecendo a austenita de carbono.

Fonte: De Souza (2013).

O impacto da segregação do boro pode ser visto na figura 9, onde o campo ferrítico e perlítico é deslocado para o lado direito do diagrama TRC, ou seja, em direção a menores taxas de resfriamento (DE SOUZA, 2013). O efeito da adição do boro e outros elementos de liga no diagrama TRC dos aços pode ser visto na figura 9.

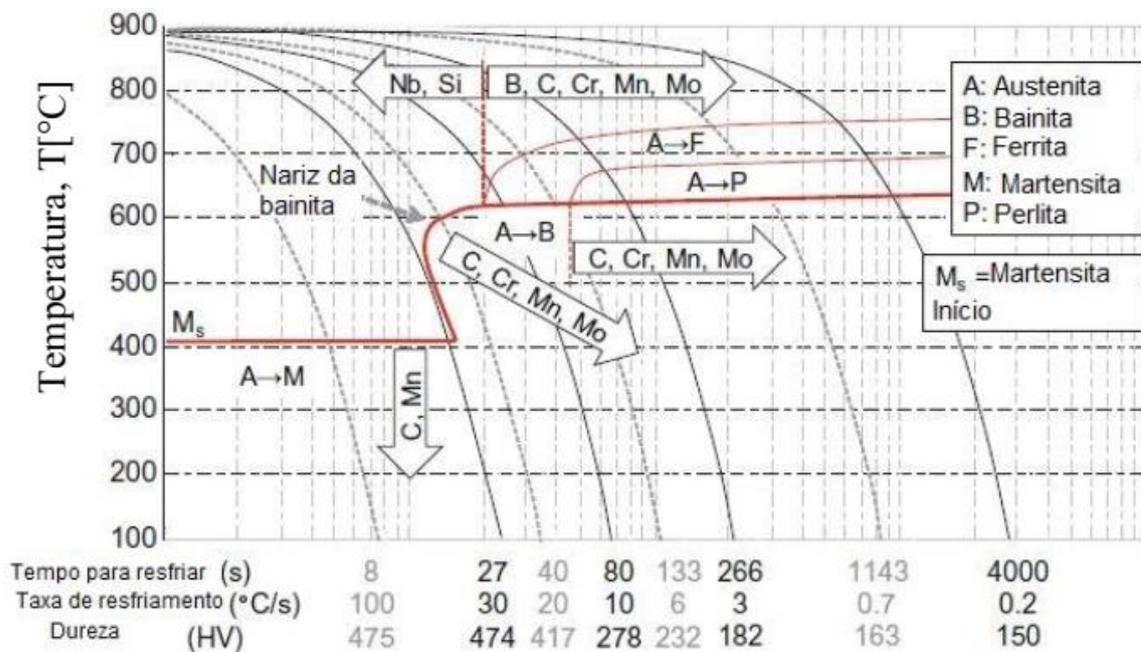


Figura 9 – Diagrama CCT do 22MnB5 e os efeitos dos elementos de liga neste aço.

Fonte: Billur (2019).

## 2.5 ESTAMPAGEM DE CHAPAS

Para Melconian (2014) a estampagem é definida como uma técnica de transformação, onde não há produção de cavaco, na qual a chapa metálica é forçada a escoar de maneira controlada pela atuação de um punção para o interior de uma matriz. O processo de estampagem de chapas baseia-se essencialmente na utilização de uma matriz, um prensa chapas e um punção, todos acoplados a uma prensa hidráulica ou mecânica (BAÚ, 2015). A principal característica que as chapas devem possuir é a boa conformação (MELCONIAN, 2014).

A figura 10 mostra um esquema em corte do punção, matriz e prensa chapas empregados na estampagem de um copo. O punção tem a utilidade de conduzir a peça pelo interior da matriz, conferindo forma à peça. O prensa chapas opera restringindo o deslizamento da chapa para o interior da matriz, impedindo, desta forma, o enrugamento e possibilitando o estiramento da chapa (BAÚ, 2015).

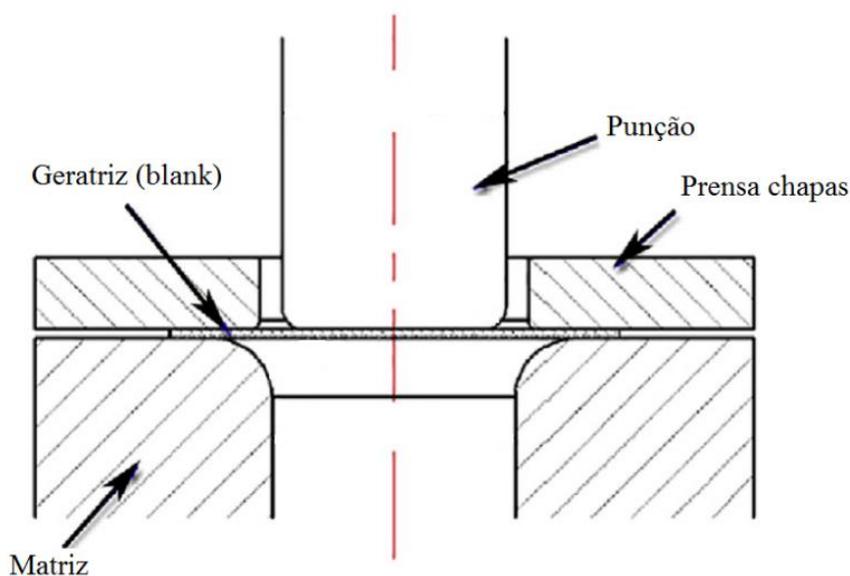


Figura 10 – Esquema do processo de estampagem de um copo.

Fonte: Mu *et al.* (2018).

### 2.5.1 Deformações na estampagem

A deformação consiste na alteração das dimensões de um corpo em virtude da aplicação de forças externas à estrutura, de modo momentâneo ou definitivo. Esta deformação depende essencialmente da força aplicada e das propriedades físicas do

corpo. No processo de estampagem a deformação acontece quando o blank é conformado pelo punção e toma a forma da matriz (MELCONIAN, 2014).

É possível medir a distribuição das deformações da chapa após a estampagem através da técnica de visioplasticidade, na qual uma grade com geometria conhecida é gravada na superfície da chapa e, após o procedimento de estampagem medem-se as deformações no círculo deformado no comprimento e na largura (SCHAEFFER; NUNES; BRITO, 2017). O método para imprimir a grade na peça é o método eletroquímico (BAÚ, 2015). Para Schaeffer (2004), a medição das deformações verdadeiras após o processo de estampagem ocorre após a definição de uma região crítica.

Ao longo do processo de estampagem ocorrem diversas deformações no comprimento, largura e espessura do corpo de prova. A ruptura acontece quando as deformações de certa região fazem com que a espessura do material se reduza comparando-a com a espessura inicial, até que o material não sustente mais as deformações empregadas. O método das grades possibilita a definição das deformações verdadeiras em cada direção (BAÚ, 2015). Na figura 11, é possível observar o esquema de estampagem e medição da deformação da chapa após a deformação e quando ocorre o rompimento na região analisada.

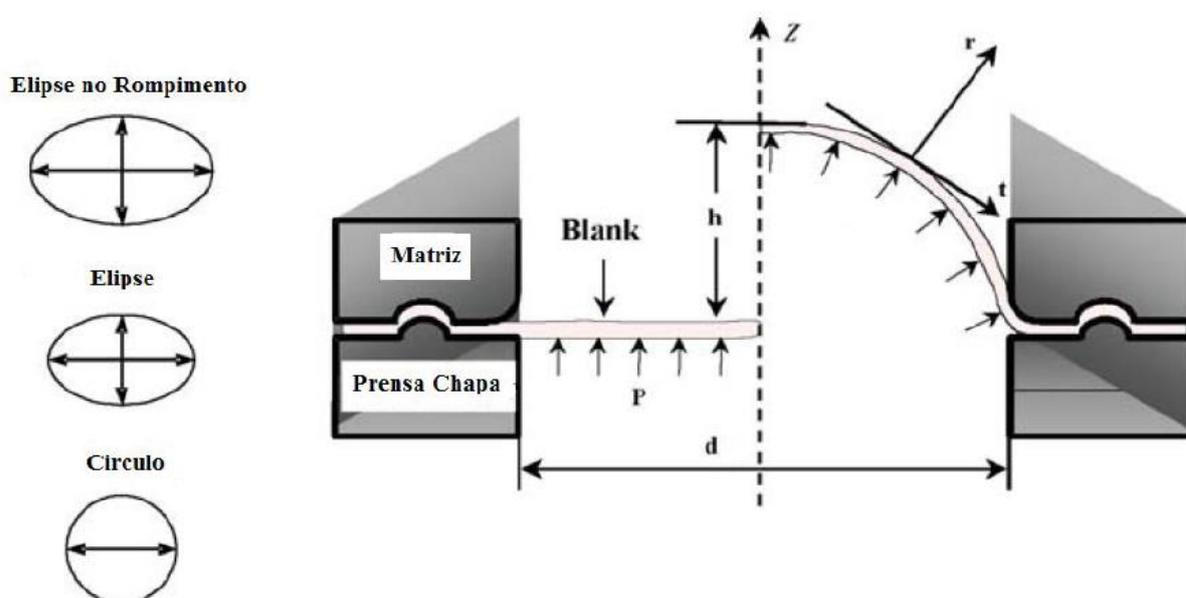


Figura 11 – Esquema de estampagem e forma de determinar as deformações verdadeiras.

Fonte: Baú (2015).

A figura 12 (a) contém um círculo com o diâmetro  $d_0$  antes do processo de estampagem e a figura 12 (b) possui uma elipse com os comprimentos  $a$  e  $b$  após a deformação.

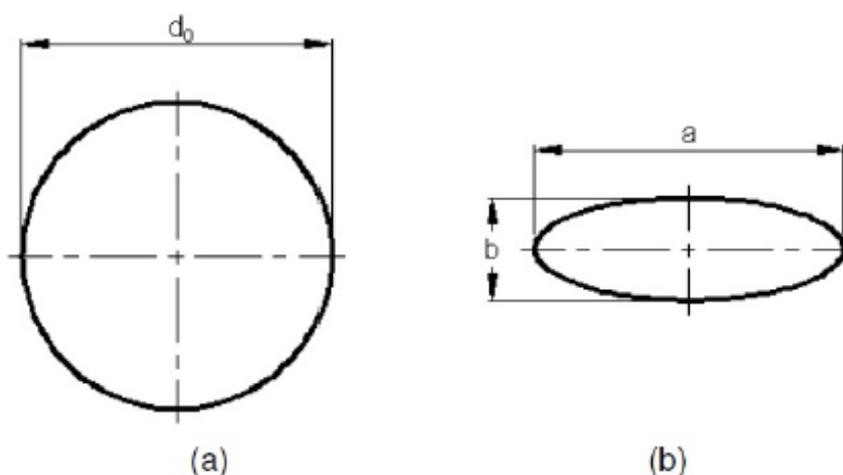


Figura 12 – Círculo antes da deformação (a) e (b) elipse após a deformação.

Fonte: Baú (2015).

Em geral, observam-se as deformações resultantes na superfície da chapa, denominadas  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  (nas duas direções principais) e na espessura ( $\varphi_3 = \varphi_s$ ) (SCHAEFFER, 2016).

Com objetivo de manter a qualidade do produto acabado, a espessura final deve ser controlada. Através da Lei da Constância de Volume, é possível determinar a deformação na espessura da chapa ( $\varphi_3 = \varphi_s$ ), como mostra a equação 1.

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0 \quad (1)$$

Uma das características fundamentais da estampagem a quente é a influência da deformação na transformação de fases. Entende-se que a deformação leva a um aumento nos sítios de nucleação da ferrita. Devido à deformação, o diagrama TRC é deslocado para a esquerda, elevando a taxa de resfriamento necessária para a têmpera do material (DE SOUZA, 2013).

## 2.6 ESTAMPAGEM A QUENTE

A estampagem a quente consiste em uma tecnologia de conformação de chapas, não isotérmica, por meio da qual os blanks austenitizados são conformados e temperados simultaneamente em um único processo (MERKLEIN; LECHLER;

STOEHR, 2009). Tal tecnologia é relativamente nova e tem como objetivo aperfeiçoar a deformação dos AHSS e UHSS. (COUTO *et al.*, 2020).

Na estampagem a quente o aço percorre duas etapas de transformação microestrutural: de ferrita-perlita em austenita por meio de aquecimento específico seguido por uma transformação de fase martensítica durante a têmpera na prensa. (MERKLEIN; LECHLER; STOEHR, 2009). Após conformada, a peça temperada possui alta resistência. Uma peça de 22MnB5 tem mais de 1000 MPa de limite de escoamento e aproximadamente 1500 MPa de limite de resistência. O processo de estampagem a quente pode ser exemplificado pela figura 13 (BILLUR, 2019).

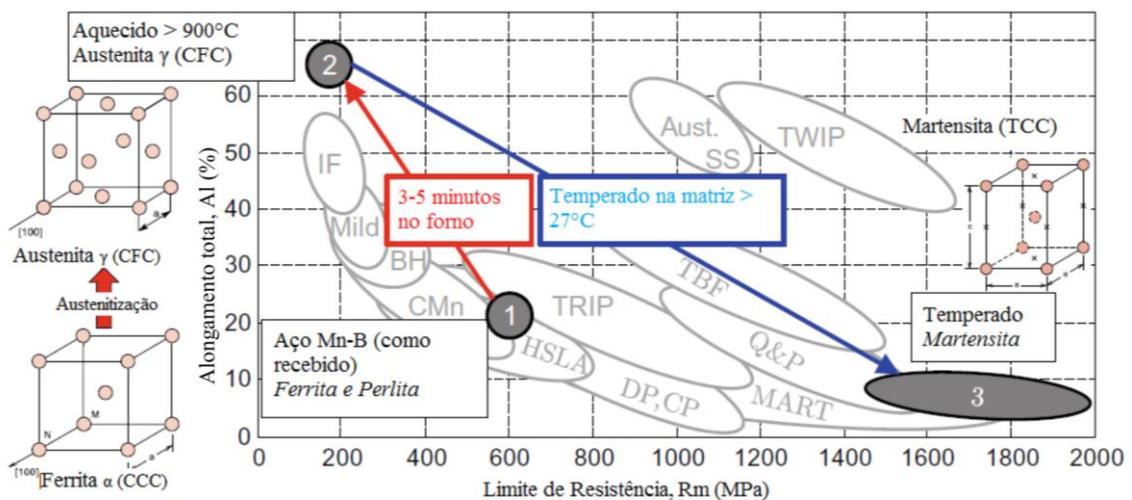


Figura 13 – Resumo do processo de estampagem a quente.

Fonte: Billur (2019).

Na estampagem a quente a força de estampagem é baixa, a ductilidade é alta e o retorno elástico é consideravelmente baixo. As peças estampadas a quente são mostradas na figura 14 (MORI *et al.*, 2017).

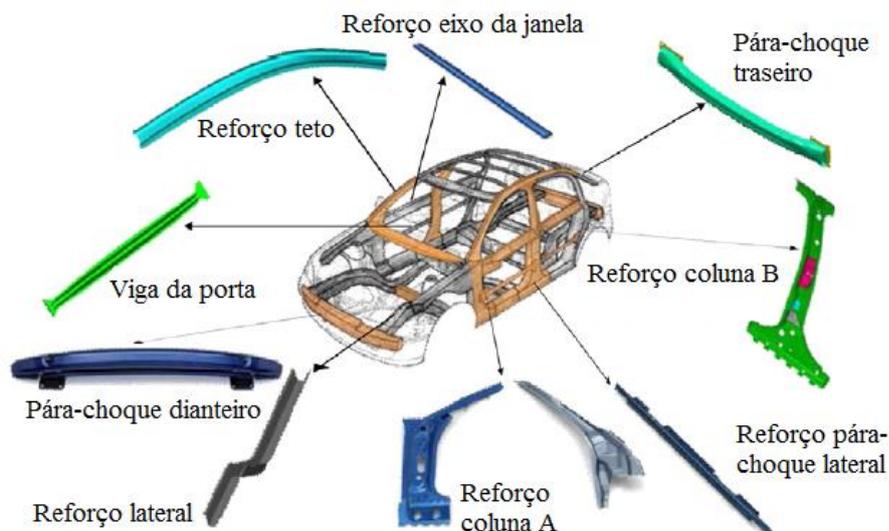


Figura 14 – Peças de automóveis produzidas por estampagem a quente na empresa automotiva Benteler.

Fonte: Mori *et al.* (2017).

Existem dois principais métodos de estampagem a quente: o método direto e o indireto. No processo indireto, o blank é conformado a frio e, em seguida, aquecido acima da temperatura de austenitização (acima de  $880^{\circ}\text{C}$ ) e temperado em uma matriz para atingir propriedades de alta resistência, como pode ser visto na figura 15. Para o 22MnB5, se a taxa de têmpera for maior que  $27^{\circ}\text{C/s}$ , a peça irá se transformar em praticamente 100% de martensita. Ciclos de tempo para o processo indireto é 10-20s (BILLUR, 2019).

No método direto, um blank plano é aquecido em um forno, homogeneamente austenitizado por certo período de tempo acima da temperatura  $A_{c3}$  específica para o material, transferido para a prensa por um sistema de alimentação robótica, conformado e temperado simultaneamente em um processo de etapa única (GEIGER; MERKLEIN; LECHLER, 2008). A figura 16 apresenta um esquema do método direto de estampagem a quente.

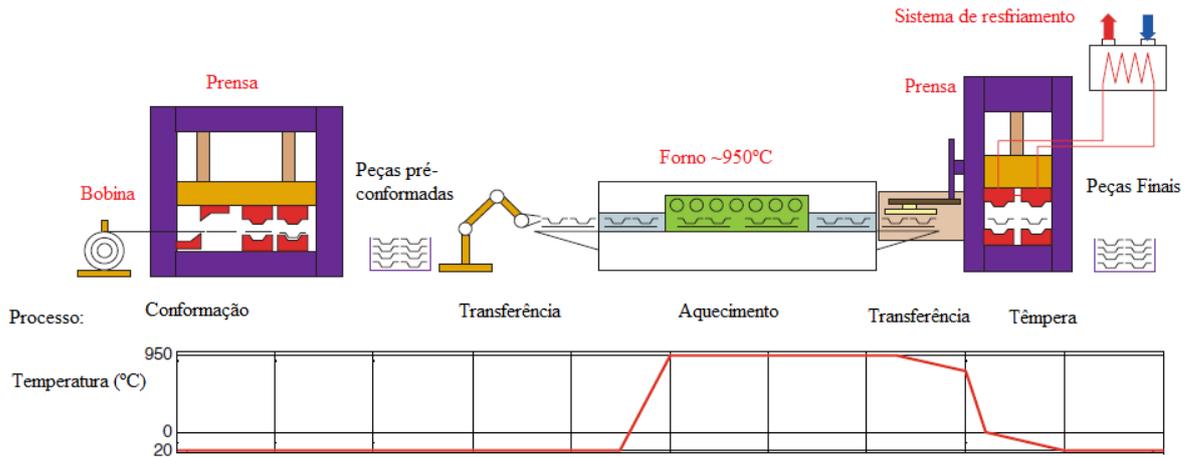


Figura 15 – Processo Indireto de Estampagem a Quente.

Fonte: Billur (2019).

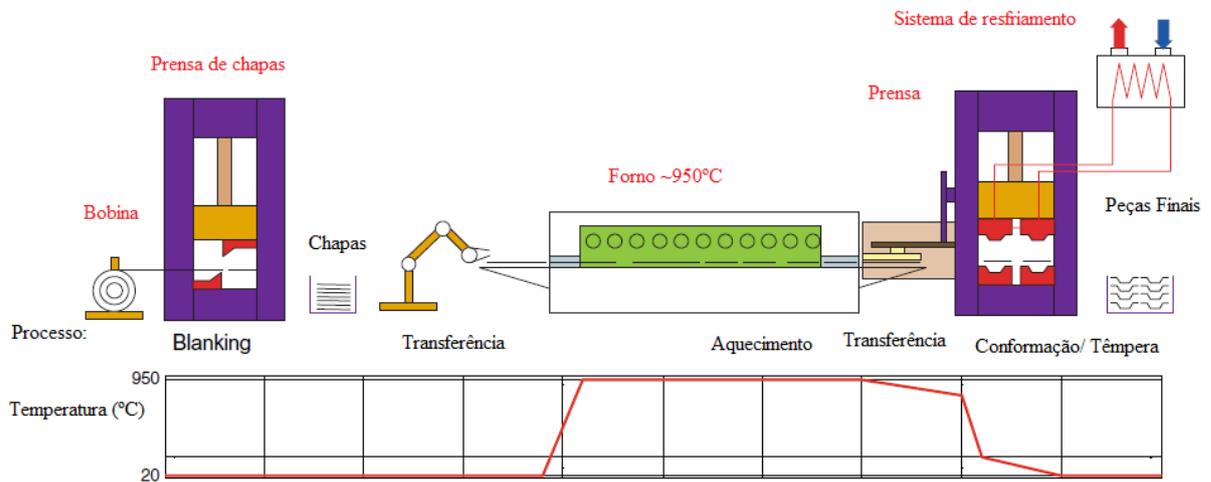


Figura 16 – Processo Direto de Estampagem a Quente.

Fonte: Billur (2019).

A estampagem a quente possui algumas vantagens: a carga para conformação é consideravelmente reduzida por conta da diminuição da tensão, o retorno elástico é reduzido, a conformabilidade do material é largamente aumentada de acordo com o aumento de sua ductilidade e o limite de resistência do material é de aproximadamente 1,5 GPa devido ao processo de têmpera (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010). No entanto, todas essas inovações tem um custo. A energia necessária para aquecer e temperar o blanké é quatro vezes mais elevada à exigida para o processo de estampagem a frio. As providências para proteção contra a oxidação ou o acondicionamento do blanké oxidado também geram custos adicionais. O ferramental deve ser resistente ao calor, o que torna seu projeto mais complexo e necessita que sejam fabricados com materiais especiais. Além disso, a têmpera após a estampagem a quente

expande o tempo de ciclo da manufatura, ocasionando em níveis menores de produtividade (GORNI, 2010).

Há três maneiras distintas para o aquecimento do blank: em forno de aquecimento rolante, por condução e por indução, conforme ilustrado na figura 17 (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

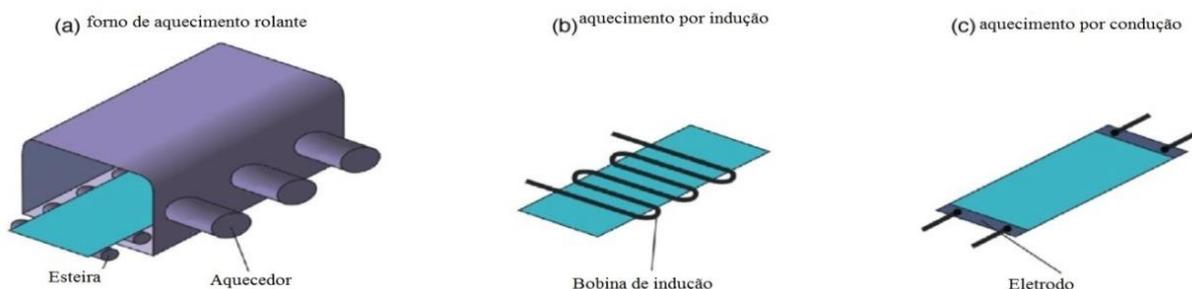


Figura 17 – Diferentes sistemas de aquecimento. (a) forno de aquecimento rolante, (b) aquecimento por indução e (c) aquecimento por condução.

Fonte: Adaptado de Karbasian e Tekkaya (2010).

Para estes sistemas de aquecimento apresentados, o mais utilizado industrialmente é o forno de aquecimento rolante, mostrado na figura 17 (a). Eles possuem de 30 a 40 metros de comprimento e os custos de investimento demonstram a necessidade de estudo de outras formas de aquecimento dos blanks (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

Outro sistema de aquecimento do blank citado na figura 17 (b) é por indução. Em princípio, todas as substâncias eletricamente condutoras ou semicondutoras podem ser aquecidas por indução, e a área resultante desta aplicação é grande para esta tecnologia. Comparado com o forno de aquecimento rolante, a eficiência energética do aquecimento por indução pode ser até duas vezes maior, por conta do processo no forno apresentar maiores perdas pela exaustão dos gases e dos rolos (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

Um sistema de aquecimento alternativo é o aquecimento por condução apresentado na figura 17 (c). Para o processo de aquecimento, o blank é preso entre dois pares de eletrodos. A corrente passa através da peça de metal. O aquecimento por condução de substâncias metálicas é baseada a Lei de Joule, segundo a qual o calor gerado num circuito elétrico é proporcional à potência deste circuito (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

## 2.7 AÇOS PARA ESTAMPAGEM A QUENTE

Todas as operações de conformação de metais iniciam com o material do blank. As propriedades finais da peça são dependentes das propriedades iniciais e como elas podem ser modificadas ao longo do processo (BILLUR, 2019). Os aços Hot-Formed, ou para estampagem a quente, são aços que contém em sua composição o elemento Boro, (em proporções entre 0,001% e 0,005% de Boro), e já são usados nas carrocerias dos automóveis desde os anos 90 (KEELER; KIMCHI, 2014). A tabela 1 mostra algumas composições químicas típicas de aços para estampagem a quente.

Tabela 1 – Composição química de alguns aços utilizados na estampagem a quente.

Aço	C	Si	Mn	Cr	Ni	Al	Ti	B	N
8MnCrB3	0,070	0,210	0,750	0,370	0,010	0,050	0,048	0,002	0,006
20MnB5	0,160	0,400	1,050	0,230	0,010	0,040	0,034	0,001	-
22MnB5	0,230	0,220	1,180	0,160	0,120	0,030	0,040	0,002	0,005
27MnCrB5	0,250	0,210	1,240	0,340	0,010	0,030	0,042	0,002	0,004
37MnB4	0,330	0,310	0,810	0,190	0,020	0,030	0,046	0,001	0,006

Fonte: Naderi (2007).

Os aços ao boro-manganês têm sido apontados como os mais materiais mais adequados para o processo de estampagem. Na indústria automotiva o aço amplamente utilizado é o 22MnB5. Antes do processo de conformação a quente, o aço consiste em uma microestrutura composta de ferrita-perlita e possui um limite de resistência de aproximadamente 600 MPa. No final da estampagem a quente, a microestrutura do aço se torna totalmente martensítica e seu limite de resistência pode chegar a 1500 MPa (COUTO *et al.*, 2020). Esta diferença na resistência do material se deve à transformação martensítica que ocorre durante a têmpera (COUTO *et al.*, 2021). A figura 18 mostra a curva tensão de engenharia x deformação relativa do 22MnB5 em duas condições: como recebido e após a estampagem a quente.

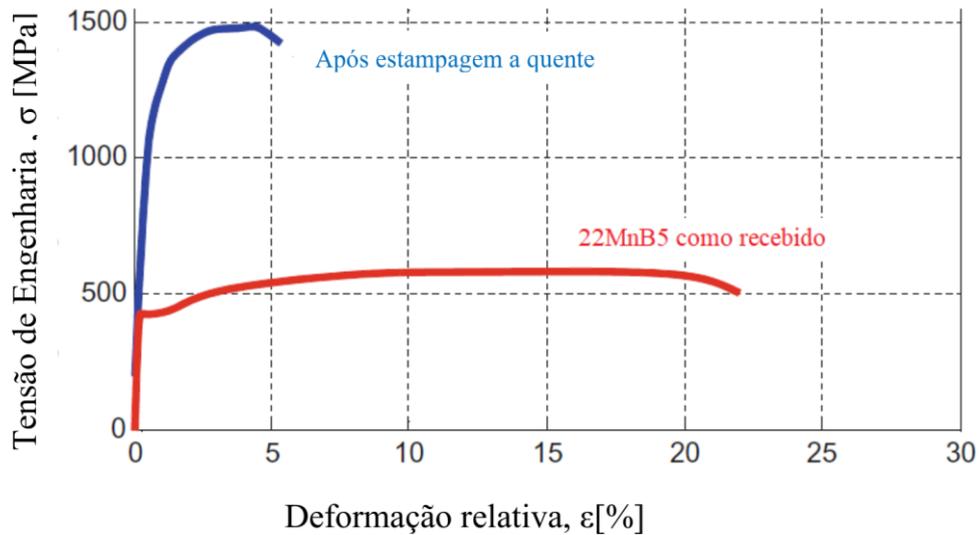


Figura 18 – Relação entre a tensão de engenharia x deformação relativa. 22MnB5 como recebido e após a estampagem a quente.

Fonte: Billur (2019).

A janela de temperatura para o processo de formação real dentro da matriz é limitada ao estado austenítico do 22MnB5, resultado da transformação de fase martensítica ao longo da estampagem a quente. Devido a temperatura de início de martensita ( $M_s$ ) do material em aproximadamente 400°C e a transferência dependente do resfriamento dos blanks ao ar, a conformação do blank normalmente ocorre em uma faixa de temperatura entre 850 e 600°C (MERKLEIN; LECHLER; STOEHR, 2009). A tabela 2 apresenta as propriedades dos aços utilizados na estampagem a quente.

Tabela 2 – Propriedades dos aços utilizados na estampagem a quente.

Aço	Temperatura de início de martensita, $M_s$ , [°C]	Taxa de resfriamento crítica, [K/s]	Limite de escoamento, $R_e$ [MPa]		Limite de resistência, $R_m$ [MPa]	
			Como recebido	Estampado a quente	Como recebido	Estampado a quente
20MnB5	450	30	505	967	637	1354
22MnB5	410	27	457	1010	608	1478
27MnCrB5	400	20	478	1097	638	1611
37MnB4	350	14	580	1378	810	2040

Fonte: Adaptado de Karbasian e Tekkaya (2010).

## 2.8 REVESTIMENTO AL-SI

Com objetivo de evitar a oxidação e descarbonetação do aço, o substrato normalmente é protegido com um revestimento metálico antes da estampagem a quente. O alumínio – silício por imersão a quente (Si 10% em massa) é o principal revestimento metálico aplicado para estampagem a quente. O sistema Al-Si já foi utilizado em sistemas de exaustão por conta da sua resistência à corrosão e oxidação em altas temperaturas, devido à presença de uma camada de óxido densa e estável (COUTO *et al.*, 2021).

O silício é adicionado para formar camadas dúcteis no revestimento. Na ausência do Si, o revestimento seria muito duro, mas também frágil. Uma vez o blank pré-revestido aquecido, ocorre a difusão do ferro e formação de uma espessura de 40  $\mu\text{m}$  de AlSiFe com 5 camadas, como mostrado na figura 19 (BILLUR, 2019).

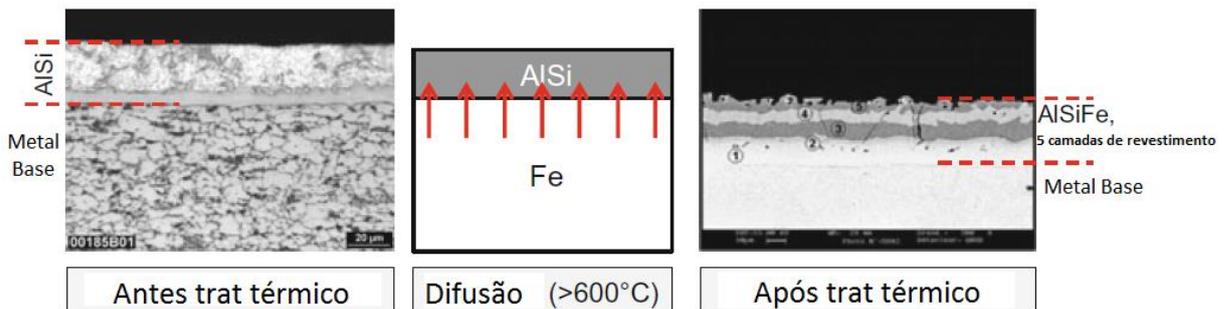


Figura 19 – Durante o tratamento térmico, ocorre a difusão do Fe do metal base para o revestimento formando o revestimento AlSiFe.

Fonte: Billur (2019).

Sabe-se que a morfologia do revestimento é altamente influenciada pelos parâmetros do processo durante a estampagem a quente (COUTO *et al.*, 2021). Windmann, Röttger e Theisen (2014) mostraram que o aumento da temperatura de encharque aumenta o crescimento de fases intermetálicas dúcteis na camada de revestimento, como a difusão do ferro é promovida.

A difusão do revestimento é extremamente importante para a soldabilidade da peça final e para propriedades de pintura na superfície da peça acabada. Revestimentos de Al-Si previnem com sucesso a formação de carepa e descarbonetação mesmo sem a atmosfera do forno controlada. O revestimento promove uma proteção à corrosão por barreira. Como desvantagem, esses revestimentos custam mais se comparados com blanks sem revestimento e exigem

um tempo maior no forno. O tempo total no forno é igual à soma do aquecimento e tempos de permanência, e depende de três variáveis (BILLUR, 2019):

- a) a espessura inicial do blank: tempo de aquecimento para alcançar a austenitização (BILLUR, 2019);
- b) o tipo de revestimento: o revestimento de AlSi requer um máximo de 12°C/s, pois irá fundir acima dessa taxa (BILLUR, 2019);
- c) a espessura inicial do revestimento: tempo de permanência para garantir a difusão do revestimento (BILLUR, 2019).

## 2.9 22MnB5 COM REVESTIMENTO AL-SI

Aços para estampagem a quente normalmente são protegidos pelo revestimento Al-Si por imersão a quente (COUTO *et al.*, 2020). A composição química normalmente encontrada no 22MnB5 com revestimento Al-Si está apresentada na tabela 3:

Tabela 3 – Percentual em massa dos elementos químicos presentes no 22MnB5 com revestimento Al-Si de acordo com a literatura.

	C	Mn	Cr	B	Ti	Al	Si	Al	B
22MnB5 rev. Al-Si	0,22	1,23	0,2	0,004	0,037	0,03	0,25	0,03	0,003

Fonte: Shi, Daun e Wells (2016).

Na figura 20 (a) temos a microestrutura do 22MnB5 apresentada por Güler (2013), com o material na condição de como recebido, exibindo uma microestrutura composta por ferrita e perlita de grãos finos com dureza no valor de 191 HV. Na figura 20 (b) é possível observar o revestimento com um perfil médio de 30,19 µm encontrado por Lisboa (2019).

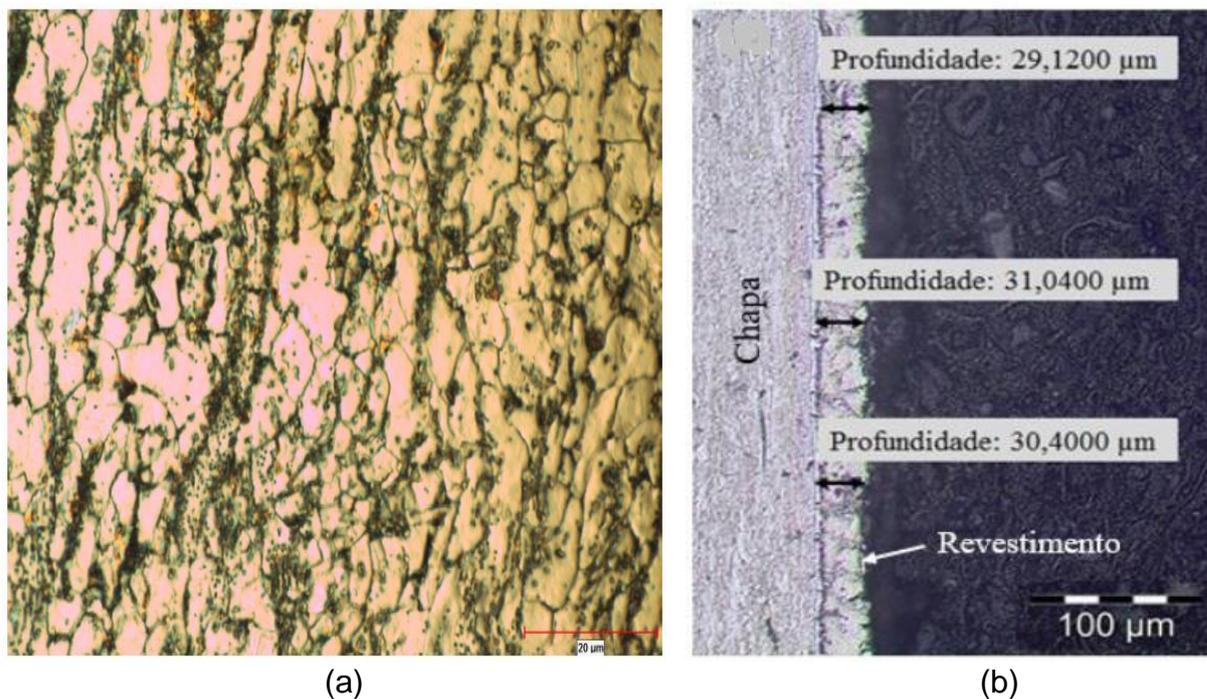


Figura 20 – (a) Microestrutura do 22MnB5 no estado como recebido (GÜLER, 2013);  
(b) Perfil de revestimento Al-Si do 22MnB5.

Fonte: LISBOA, 2019.

As propriedades mecânicas do 22MnB5 antes do processo de estampagem a quente contam com um Limite de Resistência ( $R_m$ ) de 543 MPa, limite de escoamento de 418 MPa, já após o processo, o Limite de Resistência pode chegar a 1500 MPa (GÜLER, 2013).

A figura 21 apresenta as curvas de escoamento a quente do 22MnB5 para as temperaturas de conformação de 650°C e 800°C obtidas de maneira experimental por Karbasian e Tekkaya (2010) comparadas com modelos matemáticos desenvolvidos por diversos autores. A partir das curvas apresentadas é possível observar que a alteração na temperatura influencia diretamente a tensão de escoamento do material. Com isso, vemos que para a temperatura de processo de 650°C os resultados dos métodos matemáticos bem como o resultado experimental concordam, já para a temperatura de ensaio de 800°C ocorre uma divergência de resultados (DE COSTA, 2020).

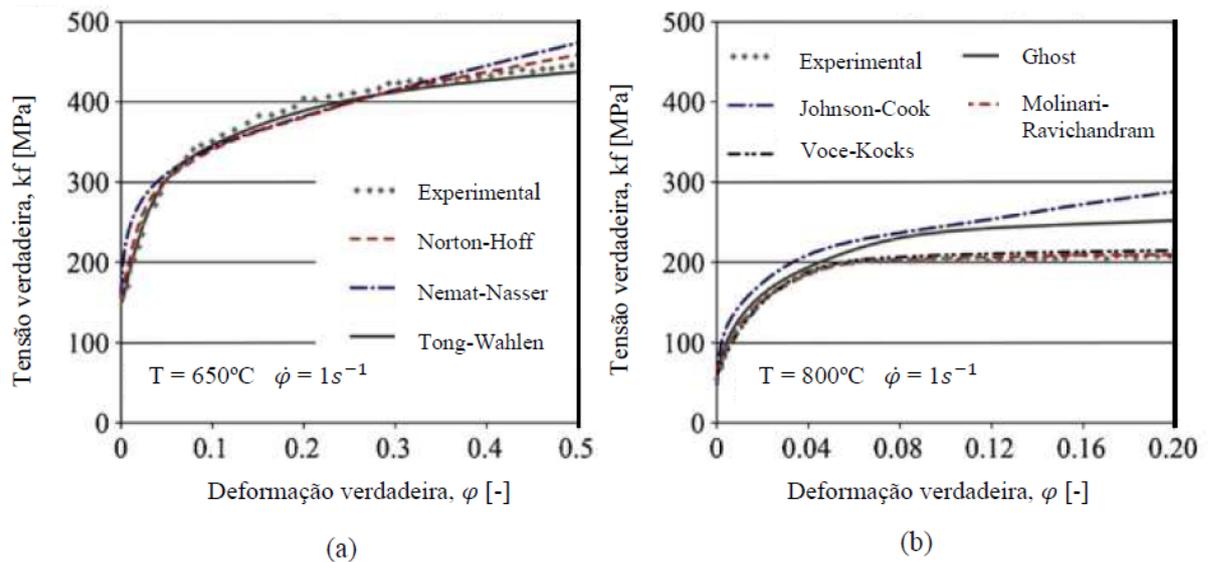


Figura 21 – Curva de escoamento obtidas experimentalmente e por modelos matemáticos para o aço 22MnB5.

Fonte: De Costa (2020).

As curvas de escoamento podem também ser representadas a partir do modelo matemático de Hensel-Spittel, na equação 2. Esse modelo é utilizado para caracterizar o comportamento da deformação plástica a quente dos metais e observa os fatores de temperatura, deformação e taxa de deformação (BATALHA, 2015). Os coeficientes da equação empregados encontram-se na tabela 4:

$$k_f = A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot \varphi^{m_2} \cdot \dot{\varphi}^{m_3} \cdot e^{\frac{m_4}{\varphi}} \cdot (1 + \varphi)^{m_5 \cdot T} \cdot e^{m_7 \cdot \varphi} \cdot \dot{\varphi}^{m_8 \cdot T} \cdot T^{m_9} \quad (2)$$

Tabela 4 – Coeficientes da equação de Hensel-Spittel para o 22MnB5.

A	m1	m2	m3	m4	m5	m7	m8	m9
0,18151	-0,00465	0,35149	-0,02881	0,00281	-0,00179	-0,13348	0,000020	1,7299

Fonte: Turetta (2008).

No qual A é uma constante do material, m1, m3 e m9 são constantes de sensibilidade à temperatura, deformação e velocidade de deformação, na devida ordem e m4, m5, m7, m8 e m9 constantes de ajustes. Os coeficientes descritos normalmente são obtidos via ensaio de tração ou torção a quente (BATALHA, 2015).

Para Schaeffer e Rocha (2007), a equação de Hollomon (equação 3) para obter a curva de escoamento a frio do material pode ser encontrada analiticamente, a partir

dos resultados do ensaio de tração. Para isso, considera-se que o instante da força máxima a deformação ( $\phi$ ) é igual ao coeficiente de encruamento ( $n$ ):

$$k_f = C \phi^n \quad (3)$$

$$\phi = n \quad (4)$$

Sendo assim, para verificar a tensão verdadeira correspondente a tensão máxima do material, utiliza-se a equação 5, onde  $\sigma$  é a tensão de engenharia do material e  $\varepsilon$  a deformação de engenharia encontrados após tratamento dos dados do ensaio de tração:

$$k_f = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (5)$$

## 2.10 CÁLCULO NUMÉRICO DA FORÇA DE ESTAMPAGEM

A partir do desempenho do material ao longo da estampagem, fornecidas por sua tensão de escoamento e também de sua geometria, é possível elaborar o cálculo teórico da força de estampagem. Para Schaeffer (2004) o cálculo da força de estampagem teórica ideal ( $F_{id}$ ) para o processo embutimento de geometrias axissimétricas sem atuação do prensa-chapas pode ser expressa pela equação 6:

$$F_{id} = A_0 \cdot k_{fm} \cdot \ln\left(\frac{D}{d_0}\right) \quad (6)$$

Nesta equação, são negligenciados os efeitos do atrito e do retorno elástico e  $A_0$ ,  $k_{fm}$ ,  $d_0$  e  $D$  correspondem, respectivamente, a seção inferior da peça, a tensão de escoamento média do material de trabalho, o diâmetro da seção inferior da peça e o diâmetro do flange no momento da força máxima. Os parâmetros geométricos desta equação são apresentados na Figura 22.

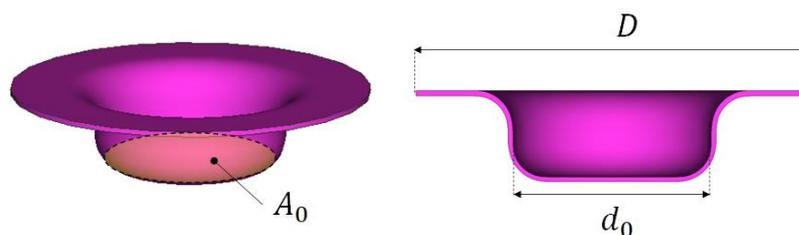


Figura 22 – Parâmetros geométricos utilizados no cálculo da força de estampagem de geometrias axissimétricas.

Para o cálculo da força de estampagem de tiras, Bueno (2017) propôs uma equação para o cálculo da estampagem teórica  $F_{pt}$ , considerando a geometria trabalhada, através das contribuições da força de estampagem ideal ( $F_{id}$ ) e força de atrito do prensa chapas ( $F_{apc}$ ).

$$F_{pt} = F_{id} + F_{apc} \quad (7)$$

Para a força de estampagem ideal, foram realizadas adaptações na equação 6, que resultaram em:

$$F_{id} = A_0 \cdot k_f \cdot \ln\left(\frac{L}{b}\right) \quad (8)$$

Onde  $L$  e  $b$  correspondem, respectivamente, ao comprimento total final da peça e o comprimento da seção inferior da peça, assim como os demais parâmetros geométricos utilizados na equação 6. A figura 23 apresenta a geometria correspondente aos parâmetros apresentados na equação 8.

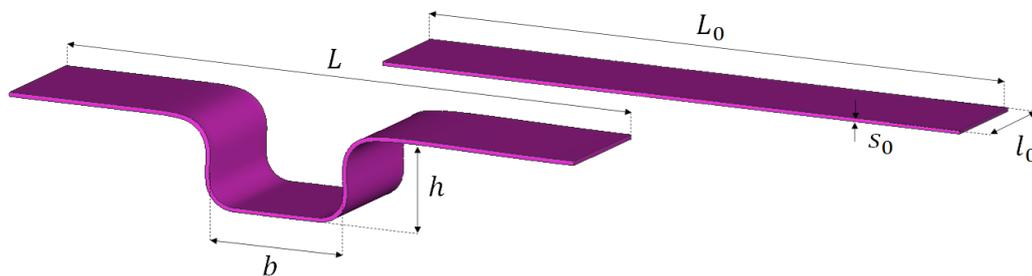


Figura 23 – Geometria da peça com suas dimensões antes e após a conformação.

A área da seção transversal  $A_0$  pode ser calculada pela equação 9:

$$A_0 = l_0 \cdot s_0 \quad (9)$$

A equação para o cálculo da força de atrito no prensa chapas ( $F_{apc}$ ) adaptada para a conformação de tiras também é apresentada por Bueno (2017) na equação 10. Assim, a força de atrito no prensa chapas pode ser calculada sendo conhecidas as dimensões da chapa e da peça conformada, o coeficiente de atrito ( $\mu$ ) e a força do prensa chapas ( $F_{pc}$ ).

$$F_{apc} = 2 \times \mu \times F_{pc} \times \left(\frac{b}{L}\right) \quad (10)$$

A deformação verdadeira adaptada de Schaeffer (2004) para a estampagem de tiras encontra-se na equação 11:

$$\varphi = \frac{\sqrt{L_0^2 + b^2} - L^2}{b} \quad (11)$$

Para a velocidade de deformação ao longo do processo de estampagem é calculada por Schaeffer (2004) de acordo com a velocidade de deslocamento do punção ( $v$ ) e da profundidade de estampagem ( $h$ ):

$$\dot{\varphi} = \frac{v}{h} \quad (12)$$

Uma abordagem distinta a respeito da força máxima do processo de estampagem de tiras seria através da sua semelhança com uma operação de dobramento em “U”, na qual, caso a aplicação de força pelo prensa chapas seja eliminada, o estiramento ao longo da altura ( $h$ ) é reduzido significativamente. A equação 13 apresenta a previsão da força máxima de dobramento em “U” proposta por Rodrigues e Martins (2005):

$$F_U = \frac{K \cdot R_m \cdot L_0 \cdot (s_0)^2}{r_M + f + r_P} \quad (13)$$

Na qual  $K$  é um fator corretivo que varia entre 0,4 e 1,  $\sigma_R$  é a tensão de ruptura do material,  $f$  a folga entre o punção e a matriz e  $r_M$  e  $r_P$  são os raios do canto da matriz e do punção, respectivamente.

## 2.11 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Recentemente, a fabricação de chapas metálicas se tornou uma das tecnologias mais importantes na indústria automotiva e na estampagem o principal processo de fabricação de painéis automotivos. No entanto, há grande dificuldade de prever os resultados da estampagem por conta da complexidade de sua geometria (GÜLER; ÖZCAN, 2014).

Além disso, caso os elementos do molde e o processo não sejam planejados razoavelmente, as peças serão produzidas com alguns defeitos (GÜLER; ÖZCAN, 2014). Caso o produto não cumpra todos os requisitos funcionais do projeto, o mesmo deve ser reavaliado, recomeçando grande parte do ciclo de desenvolvimento do produto. Por meio da simulação numérica no estágio de elaboração, a eficiência no

desenvolvimento do produto pode ser fortemente melhorada, resultando em redução de custos e tempo de desenvolvimento (DE SOUZA, 2013). A figura 24 mostra a peça em sua geometria final e a curva limite de conformação para o 22MnB5 para a simulação numérica do processo de estampagem a frio.

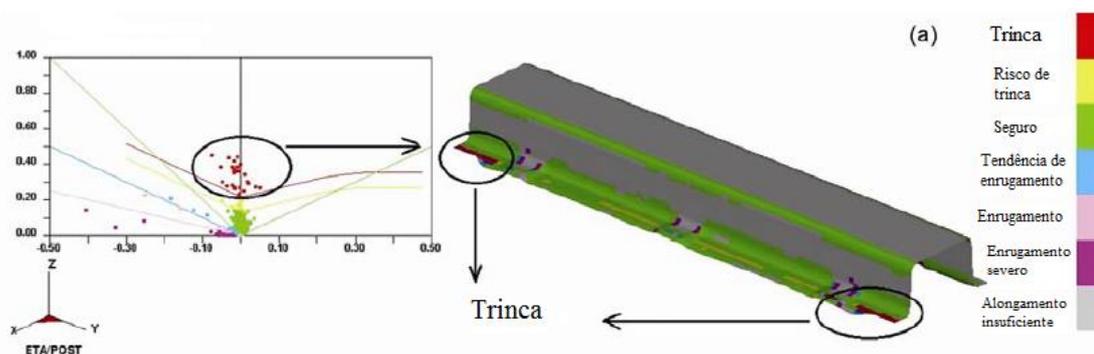


Figura 24 – Curva limite de conformação para um processo de estampagem a frio do 22MnB5 via software DYNAFORM.

Fonte: Güler e Özcan (2014).

Comparada com a estampagem a frio convencional, a estampagem a quente possui numerosos aspectos de modelagem e simulação (AKERSTRÖM, 2006). A estampagem a quente é um processo termomecânico de conformação com transformação de fase pretendida. Dependendo do histórico de temperatura e da deformação mecânica, fases diferentes e misturas de fases evoluem. Durante as transformações de fase no estado sólido, calor é liberado, o que influencia o campo térmico. Além disso, dependendo da mistura de microconstituintes, tanto as propriedades mecânicas quanto térmicas variam com a temperatura e deformação (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

A peça, inicialmente aquecida para formação de austenita, é subsequentemente resfriada por transferência de calor para as peças frias da ferramenta e ocorre a decomposição da austenita. Dependendo do histórico de temperatura e deformação, diferentes fases e mistura de fases podem ser encontradas (AKERSTRÖM, 2006). Devido à transferência de dados da evolução microestrutural dentro da simulação do processo, propriedades finais, tais como dureza e resistência à tração podem ser adequadamente modeladas (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O material utilizado no presente estudo foi o aço ao boro 22MnB5, com espessura de 1,5 mm e revestimento composto por Al-Si. A composição química em percentual de massa dos elementos foi realizada no material sem revestimento no espectrômetro de emissão ótica Q2ION, da marca BRUKER, localizado no Laboratório de Fundição (LAFUN) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

#### 3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os ensaios de tração do 22MnB5 foram realizados em temperatura ambiente na máquina universal de ensaios, a EMIC, modelo 23-20, de acordo com a norma ASTM E 8M, com corpos de prova retangulares de dimensões 200 mm x 20 mm x 1,5 mm. Com isso, foi possível obter o limite de escoamento, limite de resistência e alongamento do material em estudo.

#### 3.3 MICROESTRUTURA

A microestrutura do material na condição como recebido foi obtida através de ensaios metalográficos. Para análise metalográfica, as amostras foram lixadas com lixas de granulometria 100  $\mu\text{m}$ , 220  $\mu\text{m}$ , 320  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , 600  $\mu\text{m}$  e 1200  $\mu\text{m}$  alterando o sentido de lixamento em 90° a cada troca de lixa também realizando a limpeza com água da baquelite. Foi realizado também o polimento das amostras com pasta de diamante com granulometria de 1  $\mu\text{m}$  e o ataque químico com Nital 2%. A análise metalográfica do material foi realizada através de um microscópio óptico da marca Olympus, modelo Gx51. Para a microdureza foi utilizado o microdurômetro Insize Hardness Tester ISH-TDV1000, com carga de 0,2 kgf.

Após o processo de estampagem, a peça foi seccionada nas seguintes regiões (a), (b), (c) e (d) para a microestrutura ser analisada, conforme mostra a figura 25.

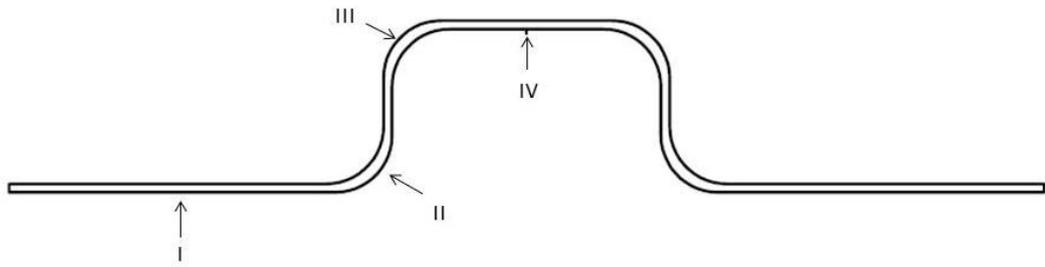


Figura 25 – Regiões da peça a serem analisadas após o processo de estampagem.

### 3.4 PROCESSO DE ESTAMPAGEM

Para o processo de estampagem, foram utilizados corpos-de-prova no formato de tiras com comprimento inicial  $L_0 = 240$  mm, largura  $l_0 = 40$  mm e espessura  $s_0 = 1,5$  mm. O esquema do processo é apresentado na figura 26 e as dimensões do corpo de prova no início e final do processo encontram-se ilustradas na figura 27.

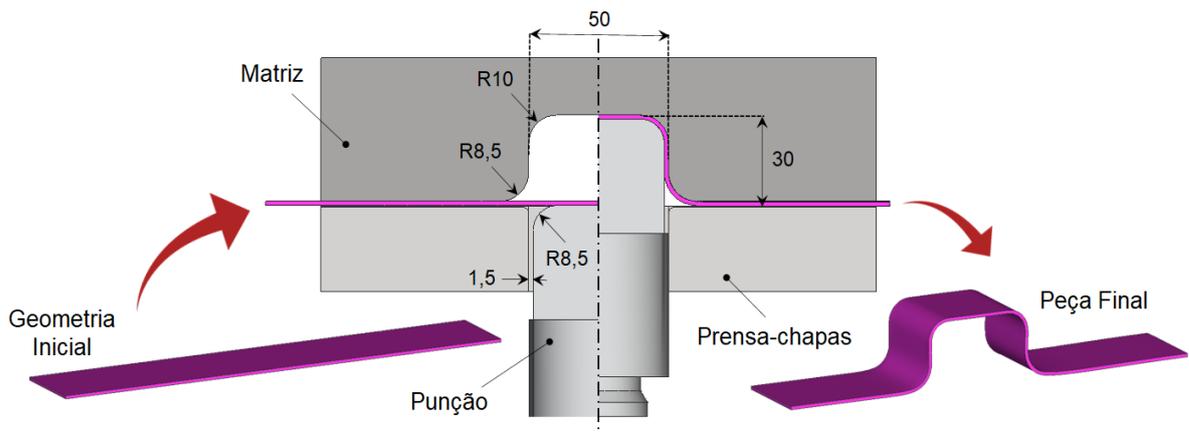


Figura 26 – Esquema do processo analisado.

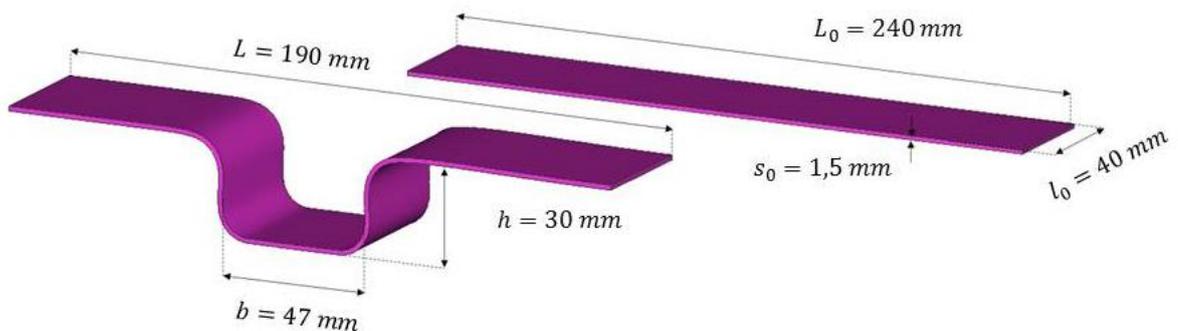


Figura 27 – Dimensões do corpo de prova antes e depois da conformação.

A geometria final é obtida mediante a ação de uma prensa hidráulica de duplo efeito marca Dan Presse, com capacidade de 200 kN e velocidade de 19,5 mm/s. A força do prensa chapas foi de 3 kN. Durante os experimentos, dados de força e deslocamento do punção foram adquiridos através de um transdutor de deslocamento variável linear (*Linear Variable Differential Transformer-LVDT*) e uma célula de carga mantada sob o punção. Os dados dos sensores foram obtidos através de um sistema de aquisição de dados da marca HBM, modelo *Spider 8*, conectado a um computador, sendo a leitura dos dados obtida pelo software *Catman*.

A tabela 5 mostra as especificações do ferramental utilizado no processo de estampagem.

Tabela 5 – Especificações do ferramental utilizado no processo de estampagem estudado.

Descrição	Especificação
Prensa	Hidráulica de duplo efeito (Dan Presse)
Força Normal máxima	200 kN
Raio do punção $r_p$	8,5 mm
Raio da matriz $r_m$	10 mm
Raio de canto da matriz $r_{cm}$	8,5 mm
Folga entre punção e matriz $f$	1,5 mm
Material do punção e da matriz	AISI H13
Velocidade da prensa $v$	19,5 mm/s
Força do prensa chapas $F_{pc}$	3 kN

### 3.4.1 Estampagem a quente

Anteriormente a conformação do material, para a realização da estampagem a quente, o blank é aquecido na temperatura de austenitização em um forno elétrico da marca Sanchis. As temperaturas utilizadas são de 950°C e 1100°C e, em seguida, o blank é transferido para a matriz em temperatura ambiente de aproximadamente 25°C. As temperaturas e tempos escolhidos foram baseados no estudo de (NADERI, 2007), adequando os tempos e temperaturas para as condições existentes no laboratório. O tempo de estampagem foi de aproximadamente 5 segundos para o processo de conformação, onde a têmpera e a conformação ocorrem simultaneamente. O tempo

de processo entre o material sair do forno e ser completamente estampado foi inferior a 15 segundos, de forma a conferir que a microestrutura do material permaneça austenítica até o momento do início da estampagem. A figura 28 mostra um esquema do processo realizado.

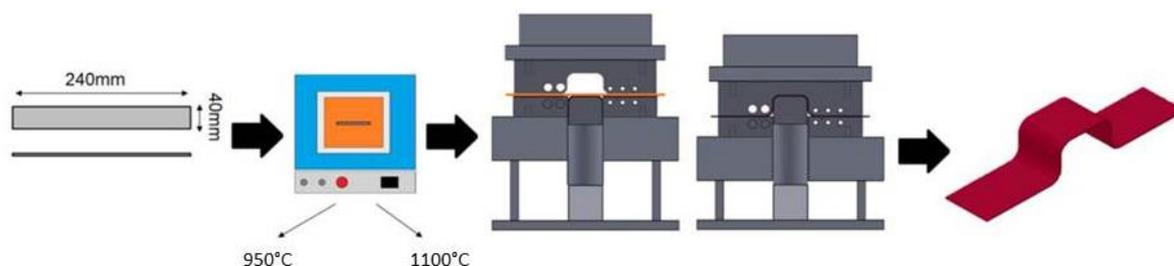


Figura 28 – Esquema do processo de estampagem a quente.

A tabela 6 mostra um resumo dos processos citados:

Tabela 6 – Resumo das configurações para os processos de estampagem a quente.

Processo	Temperatura, T (°C)	Tempo de austenitização, t (min)	Quantidade de corpos de prova
Estampagem a Quente	950	15	5
Estampagem a Quente	1100	10	5

A temperatura na matriz e prensa chapas foi aferida através de termopares instalados no ferramental. O software empregado para aquisição de dados de temperatura foi o LYNX. Esse procedimento foi utilizado para captar a perda de calor por condução do material para o ferramental. A tabela 7 apresenta os principais parâmetros do processo de estampagem a quente.

Tabela 7 – Resumo do processo de estampagem a quente.

Descrição	Valor
Aquecimento	Forno elétrico (tipo Câmara)
Temperatura inicial das ferramentas	~25°C (ambiente)
Temperaturas de austenitização testadas	950°C e 1100°C
Tempo de austenitização	15 e 10 min
Coeficiente de atrito	0,30
Lubrificação	Sem lubrificação

### 3.4.2 Estampagem a frio com posterior têmpera

Para o processo de estampagem a frio, o 22MnB5 foi estampado na temperatura ambiente na mesma matriz dos ensaios de estampagem a quente e, em seguida foi levado ao forno nas mesmas temperaturas de austenitização da estampagem a quente, 950°C e 1100°C, seguido de têmpera em água. O processo de estampagem a frio e sua posterior austenitização foi resumido na tabela 8.

Tabela 8 – Resumo das configurações para os processos de estampagem a frio.

Processo	Temperatura, T (°C)	Tempo de austenitização – após estampagem, t (min)	Quantidade de corpos de prova
Estampagem a Frio	950	15	5
Estampagem a Frio	1100	10	5

Um esquema do processo de estampagem a frio com posterior têmpera pode ser observado na figura 29.

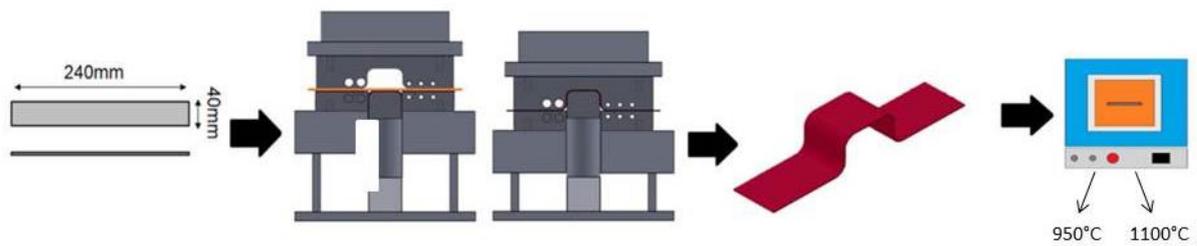


Figura 29 – Esquema do processo de estampagem a frio com posterior têmpera no material estudado.

A tabela 9 apresenta os parâmetros utilizados no processo de têmpera após a estampagem a frio do 22MnB5.

Tabela 9 – Parâmetros do processo de têmpera após a estampagem a frio do aço ao boro 22MnB5.

Descrição	Valor
Aquecimento	Forno elétrico (tipo Câmara)
Temperatura inicial da geratriz	~25°C (ambiente)
Temperaturas de austenitização testadas (após a estampagem)	950°C e 1100°C
Tempo de austenitização	15 e 10 min
Têmpera	Em água
Coeficiente de atrito	0,55
Lubrificação	Sem lubrificação

### 3.5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O software empregado no presente estudo foi o *Simufact Forming 15.0*. A análise numérica do processo foi realizada através do Método dos Elementos Finitos e, por conta da geometria da peça, foram realizadas simulações numéricas em três dimensões.

O software em questão possibilita simulações em temperaturas elevadas e também em temperatura ambiente. Assim, essa ferramenta foi utilizada com objetivo de comparar os resultados da simulação numérica com os resultados da análise experimental. Os parâmetros escolhidos para comparação foram força do processo de estampagem a quente e a frio, a deformação plástica e a curva de resfriamento do material para as conformações realizadas a quente. É importante salientar que o

material utilizado na simulação foi o 22MnB5 sem revestimento pois foi o material presente na biblioteca do programa.

A chapa foi considerada como um objeto elastoplástico e as outras geometrias (matriz, punção e prensa-chapas) foram consideradas rígidas. O coeficiente de atrito entre as superfícies das ferramentas e da amostra foi retirado de (AZUSHIMA; UDA; YANAGIDA; 2012), com um valor igual a 0,30 para o processo de estampagem a quente e 0,55 para a estampagem a frio.

Inúmeros modelos de elementos finitos foram criados para estabelecer a densidade da malha e sua função adaptativa para o processo em análise. A malha refinada compreende uma área de 8000 mm<sup>2</sup>. Nesta área, a malha hexaédrica possui arestas de 1,05517 mm. Ao longo da espessura, a amostra é dividida em 3 elementos, gerando uma malha com 21432 elementos. A malha da peça de trabalho é apresentada na figura 30.

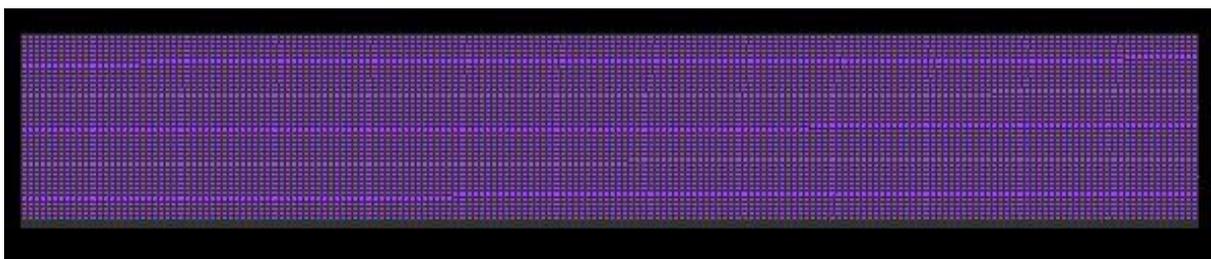


Figura 30 – Malha da peça de trabalho.

Nos modelos numéricos, foi considerado o critério de escoamento isotrópico de von Mises. Desta forma, presume-se que as propriedades mecânicas do 22MnB5 definidas experimentalmente sejam idênticas em todas as direções.

A figura 31 mostra a geometria completa dos processos de estampagem analisados.

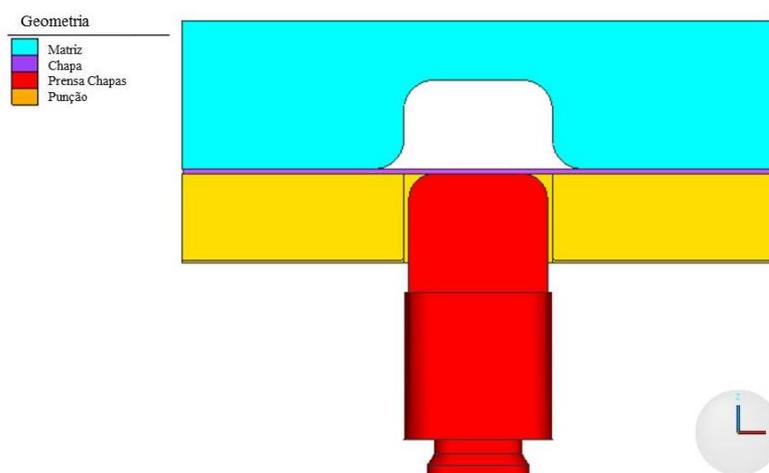


Figura 31 – Geometria utilizada na simulação do processo de estampagem a quente.

### 3.5.1 Simulação da estampagem a quente

Para a simulação a quente foi realizada anteriormente ao início da estampagem uma simulação de resfriamento do material. Essa simulação representa o processo de aquecimento da geratriz no forno elétrico pelo tempo determinado e realizado experimentalmente e, em seguida sua transferência para a matriz. Foi escolhido um tempo de transferência de 10 segundos entre o forno e a matriz de estampagem

A tabela 10 apresenta os principais parâmetros utilizados para a simulação da estampagem a quente:

Tabela 10 – Principais parâmetros e dados de entrada utilizados para a simulação da estampagem a quente.

Descrição	Valor
Tipo de malha	Hexaédrica
Material das ferramentas	AISI H13
Temperatura inicial das ferramentas	35°C
Temperatura inicial da geratriz	950°C e 1100°C
Tempo de austenitização	15 min e 10 min
Tempo de transferência forno-matriz	10 s
Coefficiente de atrito	0,30
Velocidade da Ferramenta	19,5 mm/s
Coefficiente de transferência de calor por convecção	50 W/ m <sup>2</sup> .K
Coefficiente de transferência de calor por irradiação	20000 W/ m <sup>2</sup> .K
Emissividade por radiação térmica ao meio ambiente	0,77

### 3.5.2 Simulação da estampagem a frio

As informações referentes ao comportamento mecânico do aço 22MnB5 utilizadas nos modelos numéricos e na abordagem analítica foram obtidas experimentalmente e inseridas na biblioteca do software. A curva de escoamento obtida via software para temperatura de 25°C e velocidade de deformação  $\dot{\phi} = 0,01 \text{ s}^{-1}$  encontra-se na figura 32. Para a realização das simulações numéricas também foram inseridos no software dados referentes ao limite de escoamento e a resistência à tração do material. Estas propriedades foram pré-determinadas experimentalmente em 415 MPa e 513 MPa, respectivamente, e estão de acordo com os valores obtidos por Çavuşoğlu *et al.* (2020).

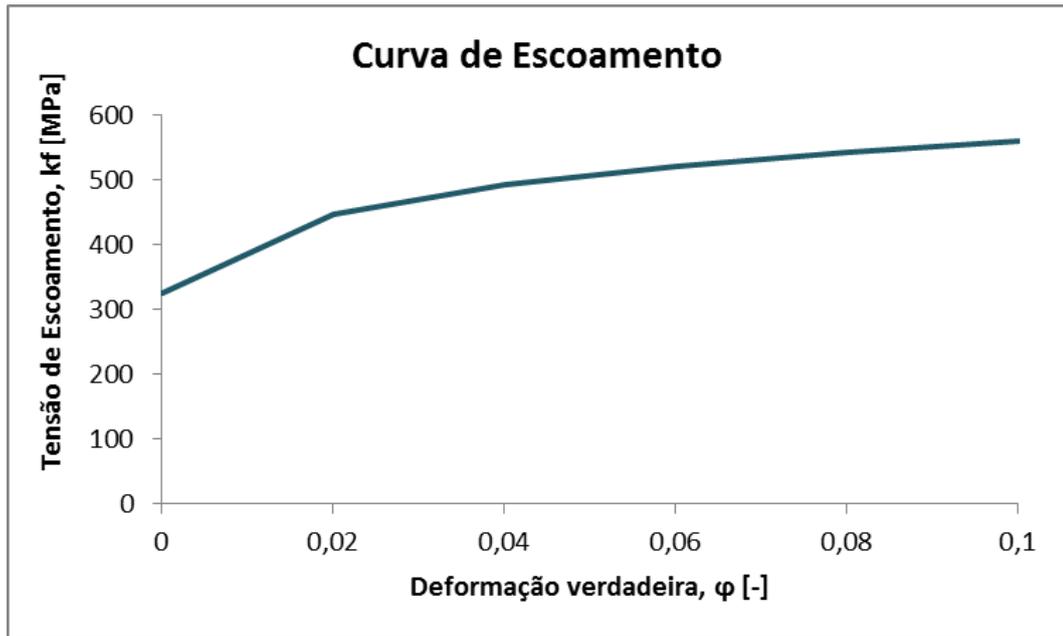


Figura 32 – Curva de escoamento a frio do aço 22MnB5 definida através do software *Simufact Forming* para uma velocidade de deformação  $\dot{\phi} = 0,01 \text{ s}^{-1}$ .

A equação de Hollomon para a curva de escoamento do material na temperatura ambiente foi obtida a partir do banco de dados do software. A equação de Hollomon é amplamente empregada para modelar o comportamento plástico dos aços e possibilita resultados para deformações superiores aquelas geradas nos ensaios de tração uniaxial (DIETER, 1981). A equação 14 descreve o comportamento mecânico do 22MnB5 quando deformado plasticamente a frio.

$$k_f = 770 \cdot \phi^{0,14} \quad (14)$$

As informações referentes às simulações numéricas para o processo de estampagem a frio encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica do processo de estampagem a frio.

Descrição	Valor
Tipo de malha	Hexaédrica
Material das ferramentas	AISI H13
Temperatura inicial das ferramentas	35°C
Temperatura inicial da geratriz	35°C
Coeficiente de atrito	0,55
Velocidade da Ferramenta	19,5 mm/s

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

O material em estudo possui a composição química apresentada na tabela 12.

Tabela 12 – Percentual em massa dos elementos químicos presentes no 22MnB5.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Mínimo	0,23	0,23	1,19	0,007	0,001	0,17	<0,005	<0,005	0,04
Máximo	0,25	0,23	1,24	0,012	0,002	0,18	<0,005	<0,005	0,04
	Cu	Nb	Ti	V	Co	Pb	Sn	Mg	B
Máximo	<0,01	0,001	0,036	<0,001	<0,01	<0,002	<0,001	<0,002	0,0018
Mínimo	<0,01	0,003	0,041	<0,001	<0,01	<0,002	<0,001	<0,002	0,0019

A composição química apresentada pela tabela 12 possui proporções de elementos próximas às encontradas por Shi, daun e Wells (2016) e Naderi (2007), apresentadas nas tabelas 1 e 3.

### 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

A curva de engenharia obtida através do ensaio de tração de três corpos de prova ensaiados no sentido de laminação encontra-se na figura 33.

A tabela 13 apresenta os dados de tensão de escoamento, limite de resistência à tração e alongamento do material obtidos nos ensaios realizados em temperatura ambiente (antes da estampagem a quente) no LdTM e presentes no catálogo do fornecedor ArcelorMittal (2015).

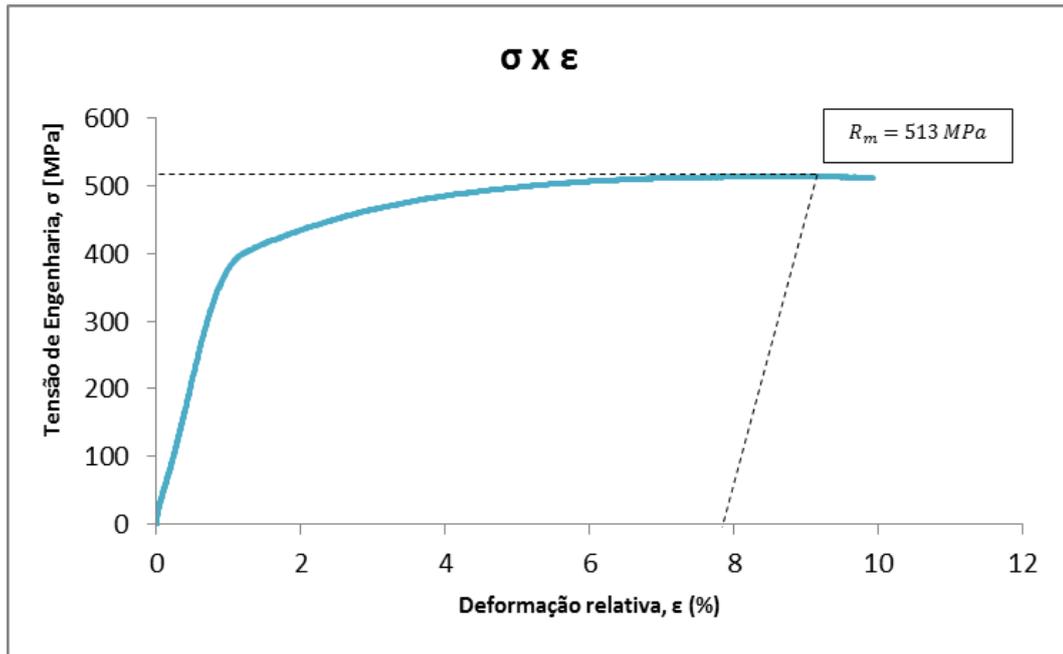


Figura 33 – Curva de engenharia do 22MnB5.

Tabela 13 – Propriedades Mecânicas obtidas do ensaio de tração a temperatura ambiente.

	Limite de Escoamento, LE (MPa)	Limite de Resistência à Tração, Rm (MPa)	Alongamento, Al (%)
LdTM	415	513	10
ArcelorMittal	350-550	500-700	10 (mínimo)

A curva de escoamento a frio do material foi encontrada selecionando-se somente a região plástica da curva Tensão ( $\sigma$ ) x Deformação de engenharia ( $\epsilon$ ), ou seja, os pontos da curva após o limite de escoamento até o limite de resistência do material. Em seguida estes pontos foram transformados em tensão de escoamento ( $k_f$ ) e deformação ( $\varphi$ ). Assim, obteve-se a curva de escoamento do material, apresentada na figura 34, para uma velocidade de deformação  $\dot{\varphi} = 0,01 \text{ s}^{-1}$ .

Para chegar à equação de Hollomon para trabalho a frio do material, utilizou-se os resultados de tensão de escoamento ( $k_f$ ) e deformação ( $\varphi$ ) do ensaio de tração uniaxial do material. Com esses resultados e auxílio do software Excel, linearizou-se a curva e obteve-se a equação da reta referente à linearização. Com essa equação foi possível alcançar os resultados da constante referente ao material (C) e do coeficiente de encruamento (n), apresentados na equação 15:

$$k_f = 844\varphi^{0,16} \quad (15)$$

Através da substituição dos valores de deformação ( $\varphi$ ) para a curva de escoamento obtidos experimentalmente, obteve-se a curva de escoamento através da equação de Hollomon do material, também apresentada na figura 34.

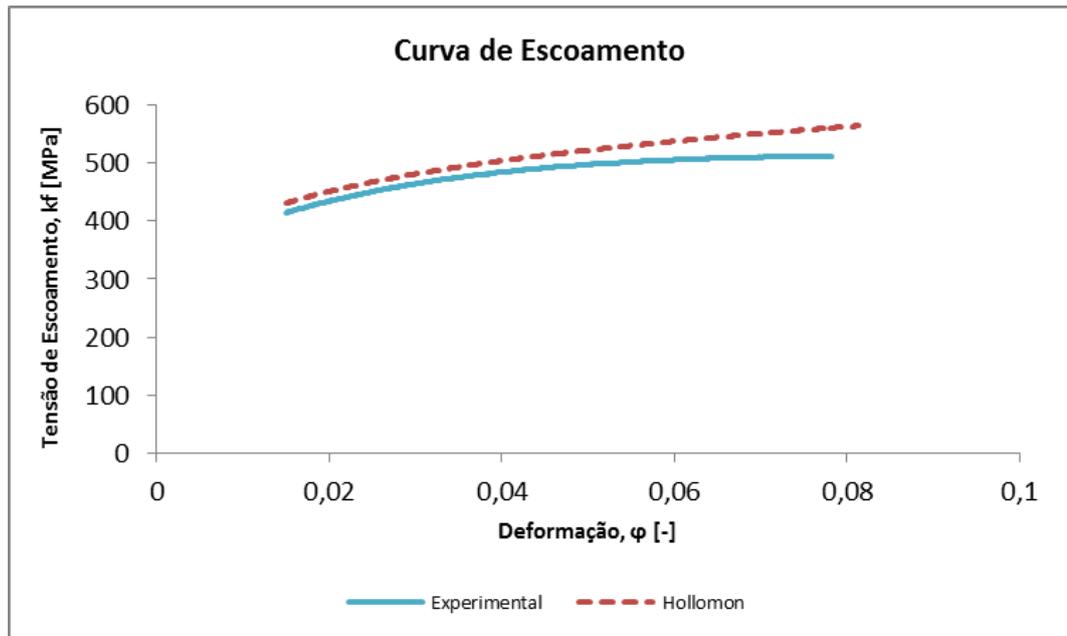


Figura 34 – Curva de escoamento a frio do DIN 22MnB5 definida experimentalmente para uma velocidade de deformação  $\dot{\varphi} = 0,01 \text{ s}^{-1}$ .

De outra maneira, utilizando-se o método proposto por Schaeffer e Rocha (2007) encontrados nas equações 3, 4 e 5 para o cálculo analítico da equação de Hollomon, obteve-se a equação apresentada na equação 16:

$$k_f = 676\varphi^{0,08} \quad (16)$$

#### 4.3 MICROESTRUTURA

A figura 35 apresenta a microestrutura do material em estudo na condição como recebido.

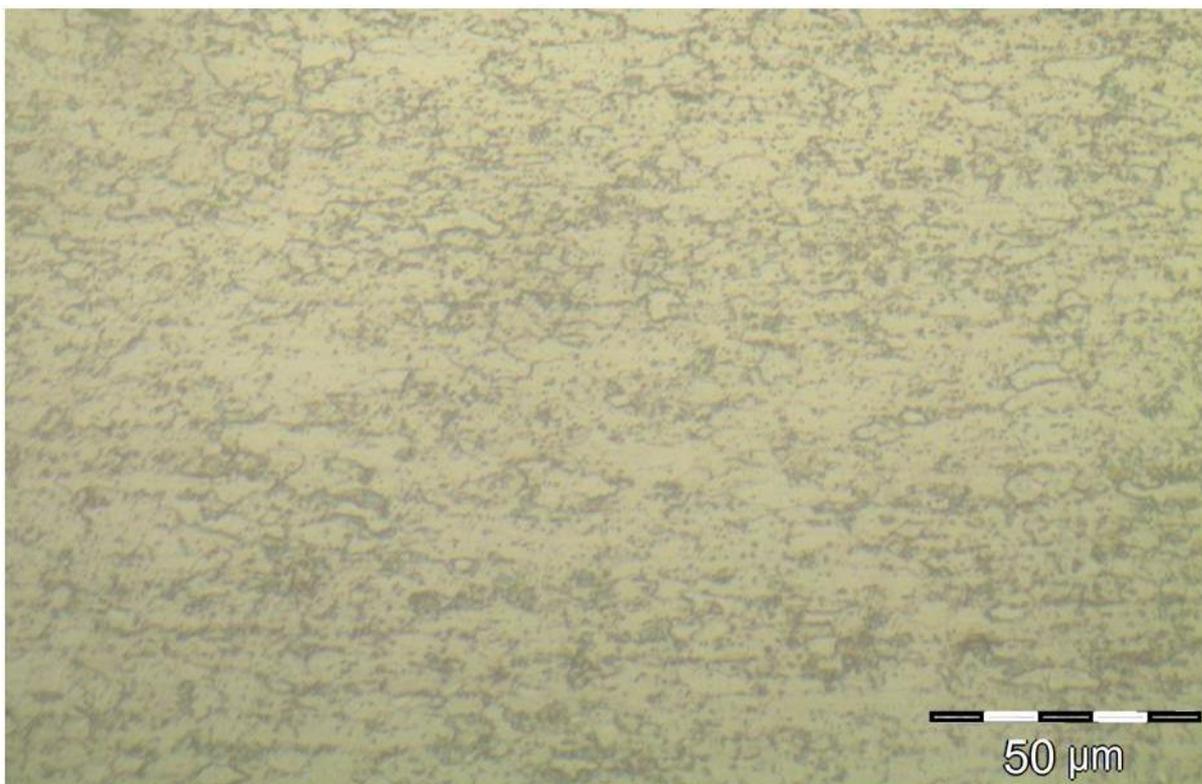


Figura 35 – Microestrutura do material em estudo na condição como recebido.  
Aumento: 500x.

A partir da análise da figura 35, podemos visualizar que a microestrutura inicial do material em estudo é formada por ferrita e perlita fina. A dureza do material nessa condição apresenta um valor médio de 194 HV.

#### 4.4 ESTAMPAGEM A QUENTE

Conforme visto anteriormente na seção 3.4.1, foi realizada a estampagem a quente do material em estudo e analisadas a força em relação ao deslocamento do punção no processo, a microestrutura e microdureza do material em estudo.

Ao final do processo, o material se deformou plasticamente obtendo o comprimento total do corpo de prova  $L = 190$  mm, comprimento da seção inferior  $b = 50$  mm e altura correspondente ao deslocamento do punção  $h = 30$  mm. A figura 36 apresenta as imagens da peça de trabalho após a estampagem.

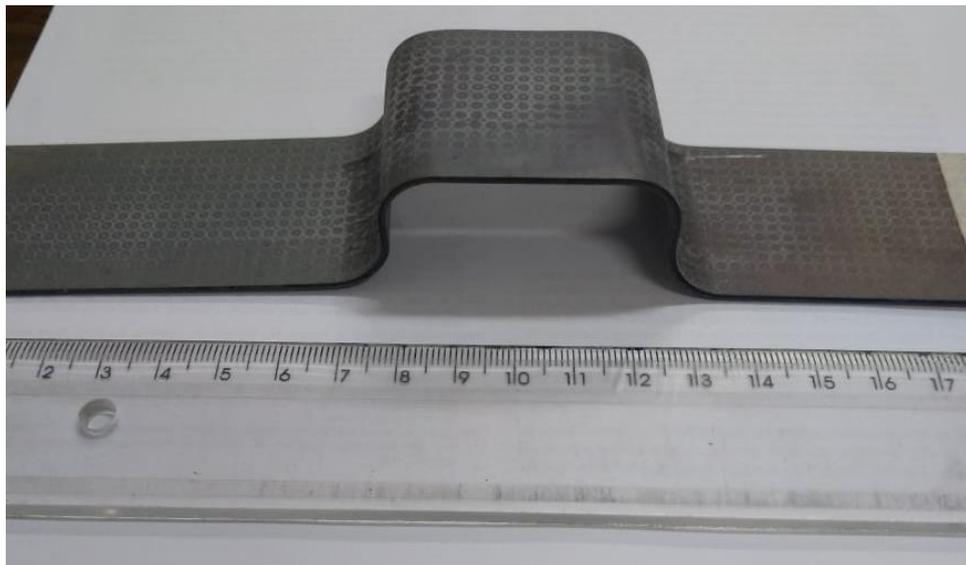
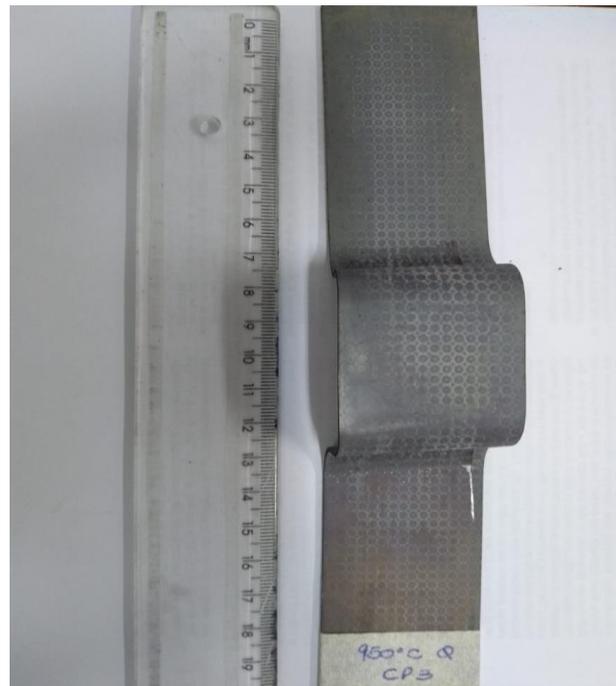
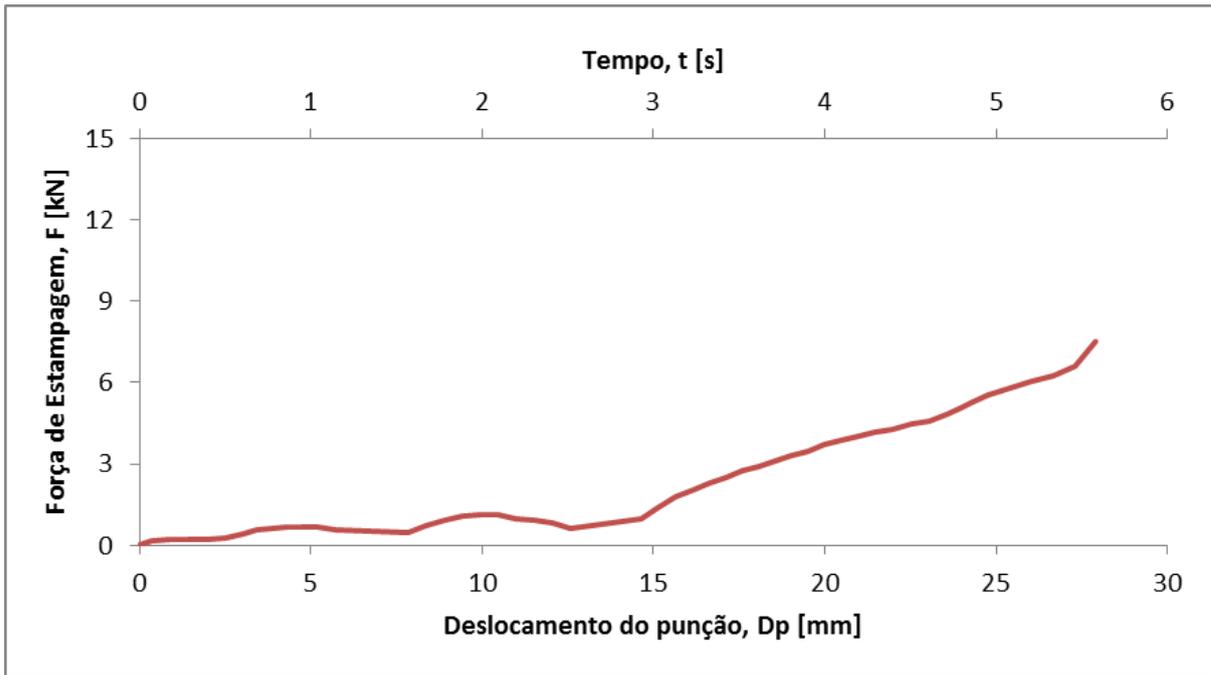
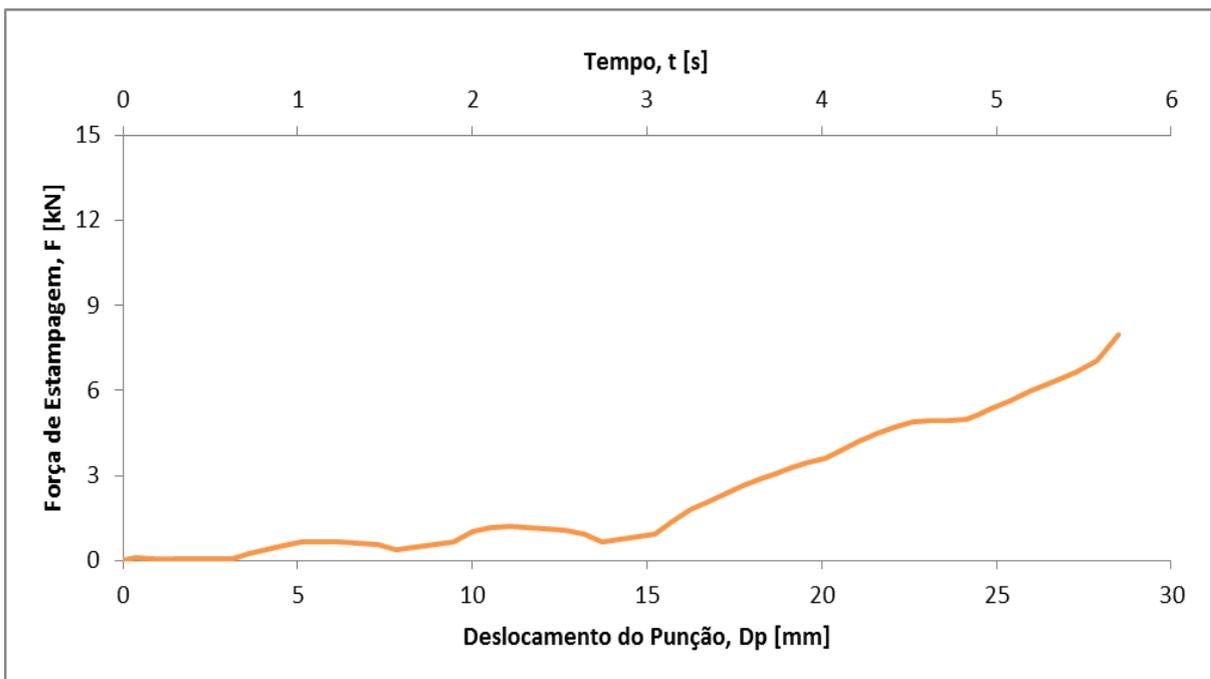


Figura 36 – Vista superior e frontal da peça de trabalho após o processo de estampagem.

A figura 37 (a) e (b) mostra a evolução da força de estampagem ( $F$ ) ao longo do deslocamento do punção ( $D_p$ ) para as diferentes temperaturas de austenitização utilizadas: 950°C e 1100°C.



(a)



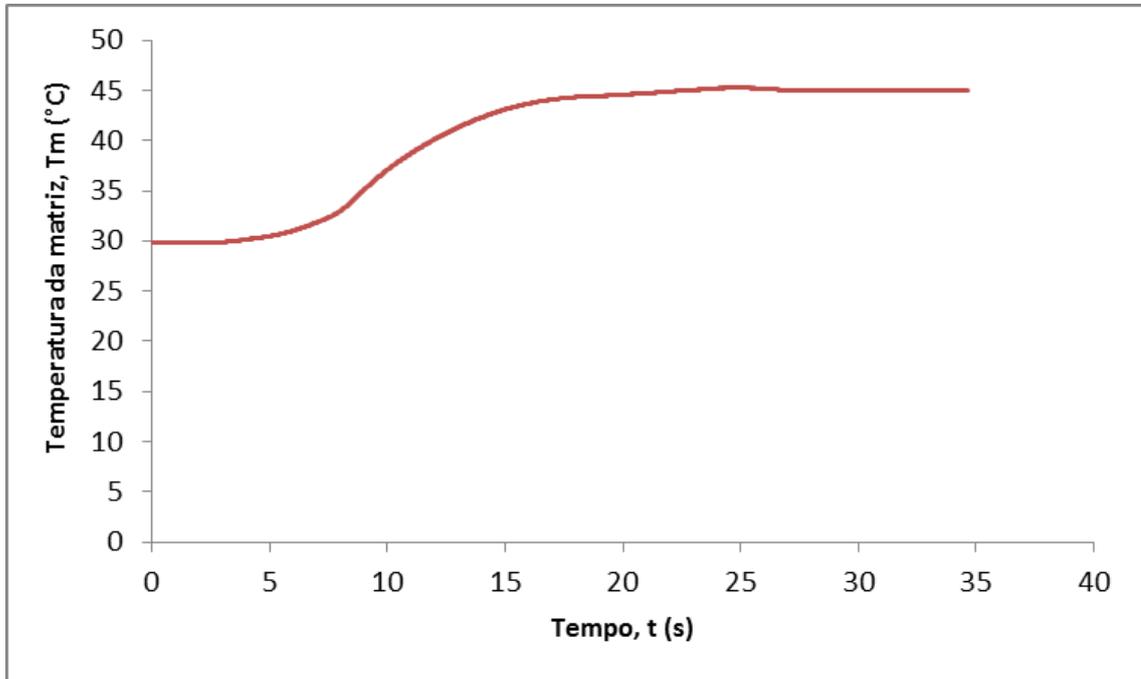
(b)

Figura 37 – Força de estampagem x deslocamento do punção para as temperaturas de austenitização de : (a) 950°C e (b) 1100°C.

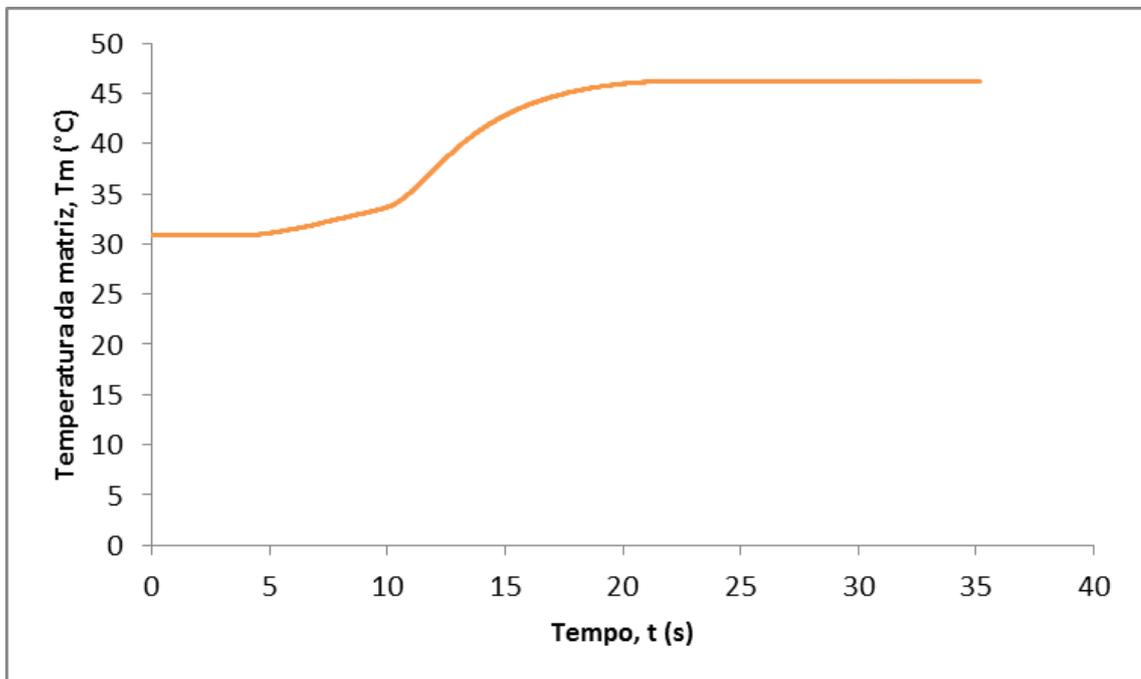
Durante o processo, a força de estampagem apresenta um aumento praticamente linear com o avanço do punção até uma profundidade de 28,5 mm, quando a força alcança seu valor máximo. Para a temperatura de austenitização de

950°C, a força máxima de estampagem foi de 7 kN e para 1100°C, a força máxima obtida foi de 8 kN. O tempo de estampagem foi de aproximadamente 5 segundos.

Os resultados da figura 38 (a), (b) mostram a evolução da temperatura na matriz ao longo do processo de estampagem.



(a)



(b)

Figura 38 – Temperatura da matriz em função do processo de estampagem a quente com temperatura de austenitização de (a) 950°C e (b) 1100°C.

No processo de estampagem a quente, observando a figura 38, nota-se que no momento em que a chapa entra em contato com a matriz, esta experimenta um aumento abrupto na sua temperatura. A matriz atingiu uma temperatura máxima de aproximadamente 45°C para o processo de austenitização a 950°C e 47°C para austenitização a 1100°C.

A figura 39 revela a microestrutura encontrada para o processo de austenitização a temperatura de 950°C. As regiões da peça estampada correspondentes estão apresentadas na figura 25.

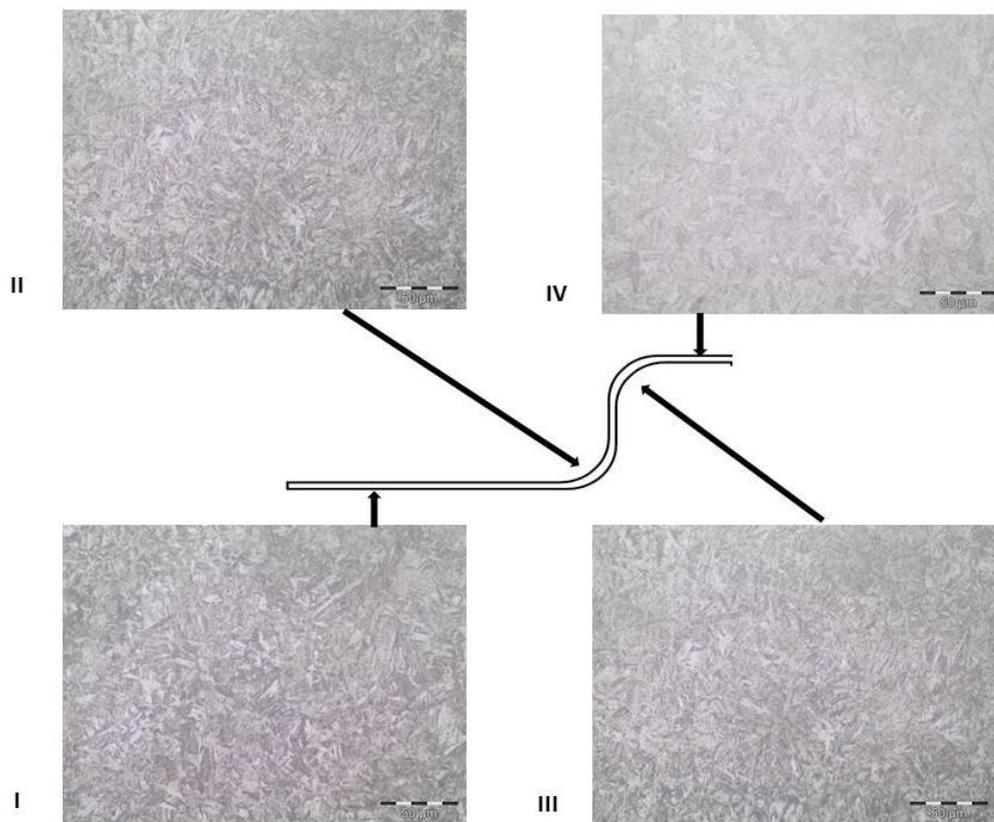


Figura 39 – Microestrutura encontrada em função das regiões analisadas para temperatura de austenitização de 950°C (a) região I, (b) região II (c) região III e (d) região IV. Aumento 500x.

A figura 40 revela a microestrutura encontrada para o processo de austenitização a temperatura de 1100°C.

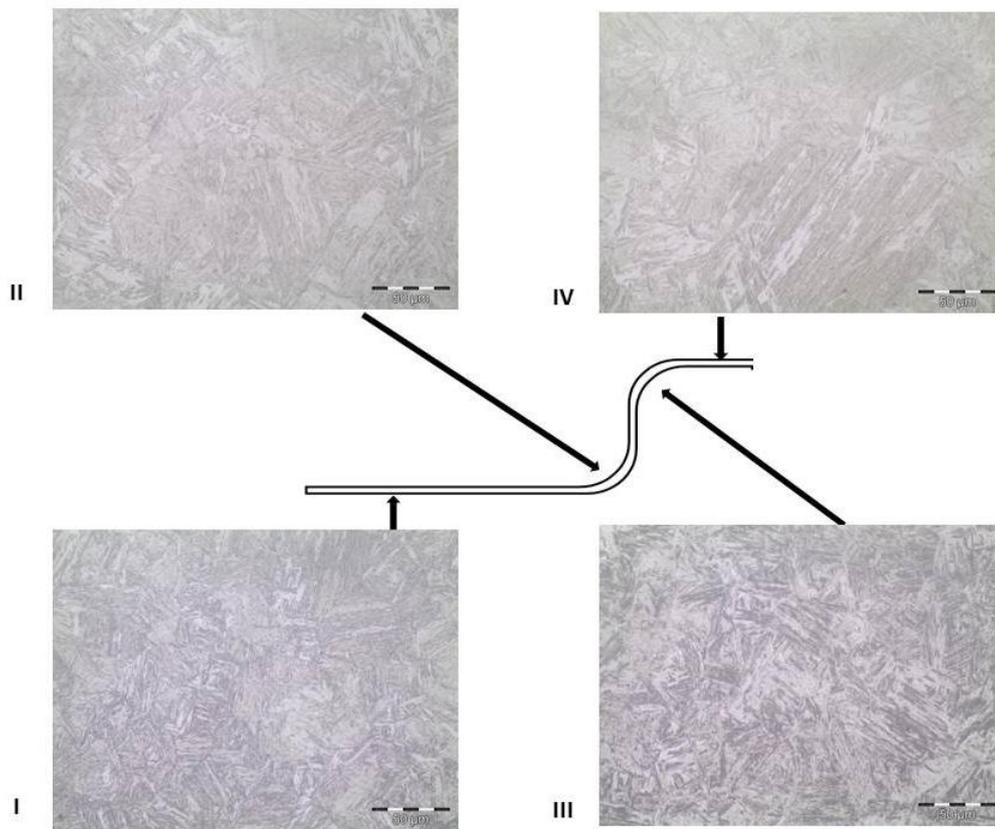


Figura 40 – Microestrutura encontrada em função das regiões analisadas para temperatura de austenitização de 1100°C (a) região I, (b) região II (c) região III e (d) região IV. Aumento 500x.

Ao observar as figuras 39 e 40, constata-se que a microestrutura final para os processos foi homogênea, ou seja, tanto a região I que esteve em contato com o prensa chapas, como a região IV que esteve em contato com o punção obtiveram a mesma apresentação de microestrutura. Tal microestrutura é possivelmente composta por martensita, bainita e austenita retida. O motivo de a microestrutura ter permanecido igual ao longo de toda a chapa pode ser devido a matriz não ser refrigerada, proporcionando taxas de resfriamento de valores aproximados em cada região analisada.

Na tabela 14 estão indicados os valores médios das cinco microdurezas medidas em cada região analisada, além da média geral da microdureza na peça por temperatura de austenitização.

Tabela 14 – Microdureza Vickers para as diferentes temperaturas de austenitização analisadas.

Temperatura de Austenitização	Região analisada	Microdureza média (HV)
950°C	Região I	452 ± 8,9
	Região II	459 ± 10,1
	Região III	461 ± 9,3
	Região IV	482 ± 8,8
	Média das regiões	464 ± 13,0
1100°C	Região I	444 ± 8,1
	Região II	469 ± 18,3
	Região III	472 ± 6,2
	Região IV	479 ± 10,9
	Média das regiões	466 ± 15,5

A partir dos resultados apresentados na tabela 14, pode-se concluir que o valor médio das microdurezas para as temperaturas de austenitização analisadas foi o mesmo. Não foi possível observar que a diferença entre as temperaturas de encharque foram suficientes para alcançar mudança nos valores de dureza.

#### 4.5 ESTAMPAGEM A FRIO COM POSTERIOR TÊMPERA

Como visto anteriormente na seção 3.4.2., foi realizada a estampagem a frio do material em estudo com posterior aquecimento e têmpera. Nesse processo foram analisadas a força em relação ao deslocamento do punção no processo, a microestrutura e microdureza do material. A figura 41 mostra a evolução da força de estampagem (F) ao longo do deslocamento do punção ( $D_p$ ) para o processo de estampagem a frio.

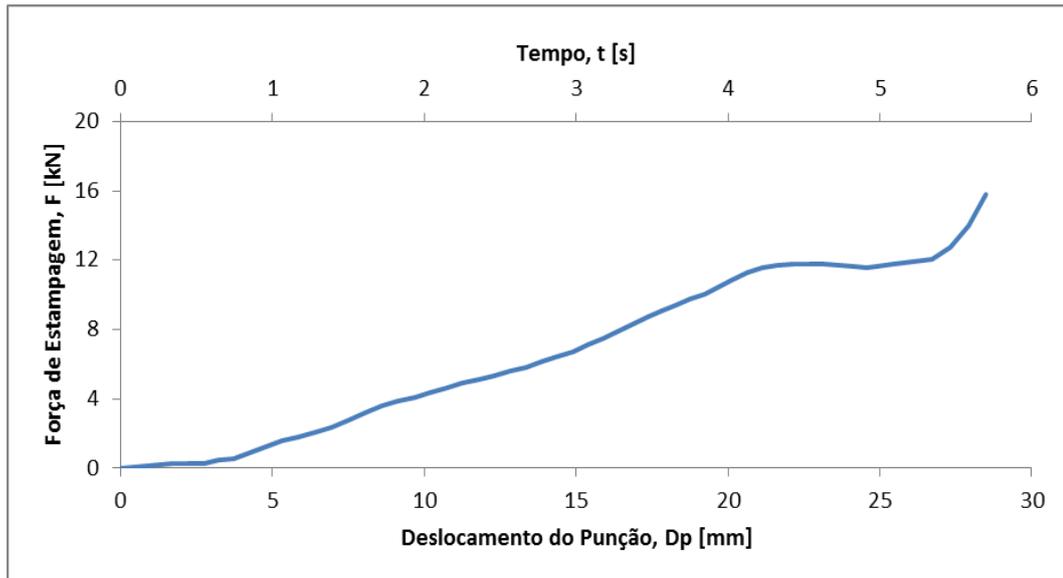


Figura 41 – Força de estampagem x deslocamento do punção para processo de estampagem a frio.

Para o processo de estampagem a frio do material, a força de estampagem apresenta um aumento praticamente linear com o avanço do punção. Quando o punção atinge uma profundidade de 28,5 mm, a força alcança seu valor máximo para o processo. A força máxima para o processo de estampagem a frio foi de 15 kN. O tempo de estampagem foi de aproximadamente 5,5 segundos.

A figura 42 apresenta a microestrutura resultante da têmpera posterior ao processo de estampagem a frio. A temperatura de austenitização foi de 950°C. As regiões correspondentes retiradas da peça estampada estão apresentadas na figura 25.

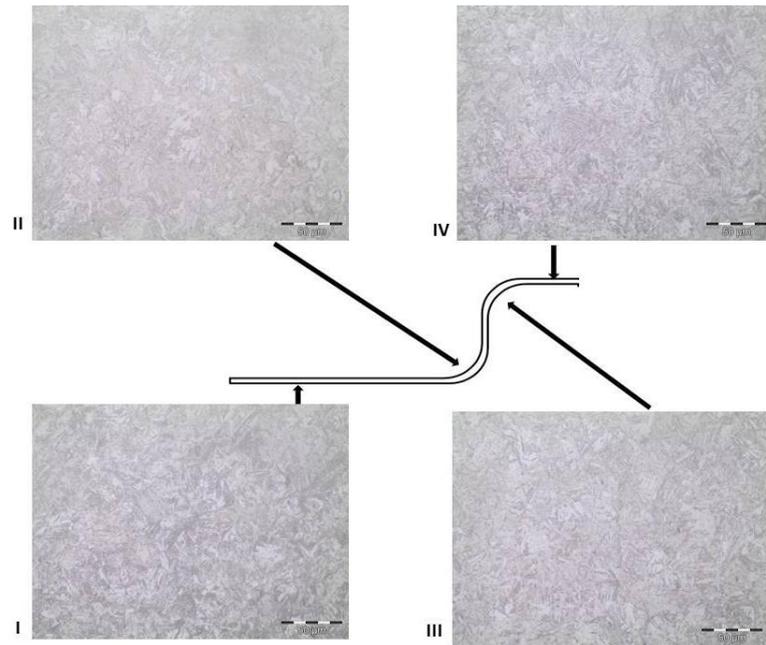


Figura 42 – Microestrutura encontrada em função das regiões analisadas para (a) região I, (b) região II, (c) região III e (d) região IV, processo de estampagem a frio com posterior têmpera. Temperatura de austenitização: 950°C. Aumento 500x.

A figura 43 apresenta a microestrutura referente à têmpera posterior ao processo de estampagem a frio do material em estudo com temperatura de austenitização na temperatura de 1100°C.

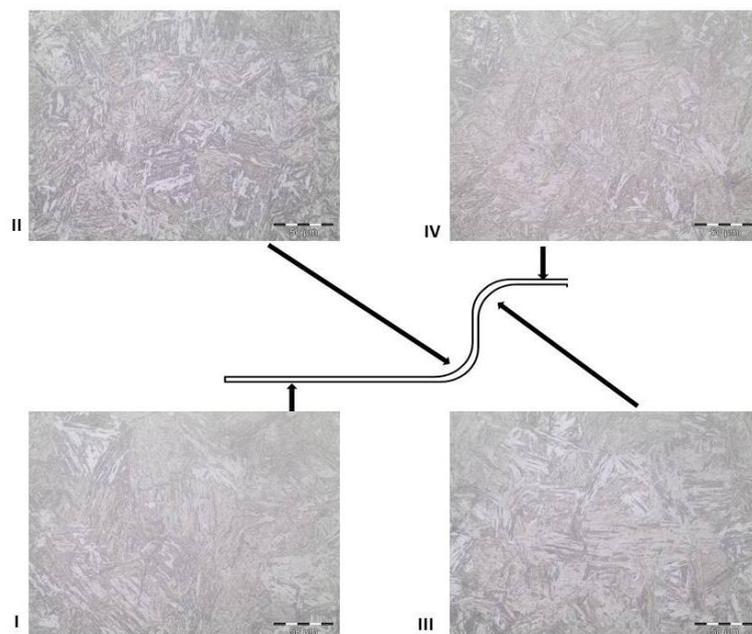


Figura 43 – Microestrutura encontrada em função das regiões analisadas para (a) região I, (b) região II (c) região III e (d) região IV, processo de estampagem a frio com posterior têmpera. Temperatura de austenitização: 1100°C. Aumento 500x.

Para a microestrutura encontrada nas figuras 42 e 43, assim como para Naderi (2007), o processo de estampagem a frio seguido de têmpera em água o DIN 22MnB5 resultou em grandes agulhas de martensita orientadas em diversos ângulos. O aquecimento a 1100°C proporcionou uma formação de martensita na forma de agulhas maiores e em maiores angulações se comparadas com o aquecimento a 950°C. Também é possível observar que a taxa de resfriamento não foi alta o suficiente para alcançar uma microestrutura completamente martensítica, sendo a microestrutura possivelmente composta de martensita, bainita e austenita retida.

A tabela 15 mostra os valores médios das cinco microdurezas medidas em cada região analisada, além da média geral da microdureza na peça por temperatura de austenitização.

Tabela 15 – Microdureza Vickers das diferentes temperaturas de austenitização analisadas para o processo de estampagem a frio com posterior têmpera.

Tempo de Austenitização	Região analisada	Microdureza média
950°C	Região I	504 ± 7,4
	Região II	495 ± 11,6
	Região III	488 ± 6,0
	Região IV	501 ± 7,3
	Média das regiões	497 ± 7,3
1100°C	Região I	528 ± 15,7
	Região II	510 ± 7,3
	Região III	508 ± 4,8
	Região IV	501 ± 13,4
	Média das regiões	512 ± 9,2

A partir da análise da tabela 15, observa-se que a média de dureza é a mesma para as duas temperaturas de austenitização utilizadas, próxima aos 500 HV, sendo inferior à encontrada por Naderi (2007) que foi de 530 HV.

#### 4.6 CÁLCULO ANALÍTICO DA FORÇA DE ESTAMPAGEM

Para o processo a quente, a partir da equação de Hensel-Spittel foi possível encontrar o valor teórico da tensão de escoamento do aço DIN 22MnB5 para as temperaturas utilizadas neste experimento. A tabela 16 apresenta os parâmetros

utilizados na equação de Hensel-Spittel e o respectivo valor da tensão de escoamento encontrada.

Tabela 16 – Tensão de escoamento calculada através da equação de Hensel-Spittel para o aço DIN 22MnB5 para as temperaturas utilizadas.

Temperatura, T [°C]	Deformação verdadeira $\varphi = \frac{\sqrt{L_0^2 + b^2} - L^2}{b}$ [-]	Velocidade de deformação $\dot{\varphi} = \frac{v}{h}$ [s <sup>-1</sup> ]	Tensão de escoamento $k_f \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$
950	1,18	0,7	113
1100	1,18	0,7	59

A partir da observação da tabela 16, nota-se que o valor de  $k_f$  é extremamente sensível à temperatura e velocidade de deformação, sendo obtidos valores distintos em função da variação da temperatura.

A tabela 17 mostra as equações da seção 2.10 utilizadas para o cálculo da força de estampagem a quente para o DIN 22MnB5. A força de estampagem calculada para as temperaturas de estampagem encontra-se na tabela 18.

Tabela 17 – Equações e parâmetros utilizados para o cálculo da força de estampagem teórico ( $F_{pt}$ ).

Parâmetro	Equação
Força de estampagem calculada $F_{pt}$ [kN]	$F_{pt} = F_{id} + F_{apc}$
Força de estampagem ideal $F_{id}$ [kN]	$F_{id} = A_0 \cdot k_f \cdot \ln\left(\frac{L}{b}\right)$
Força de atrito no prensa chapas $F_{apc}$ [kN]	$F_{apc} = 2 \times \mu \times F_{pc} \times \left(\frac{b}{L}\right)$
Área da seção transversal $A_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$A_0 = s_0 \times l_0$
Largura da chapa $l_0$	$l_0 = 40 \text{ mm}$
Espessura da chapa $s_0$	$s_0 = 1,5 \text{ mm}$
Largura do punção $b$	$b = 47 \text{ mm}$
Comprimento da peça estampada $L$	$L = 190 \text{ mm}$

Tabela 18 – Força de estampagem teórica calculada em função da força de estampagem ideal e força de atrito no prensa chapas para as temperaturas de ensaio de 950°C e 1100°C.

Temperatura, T [°C]	Força de estampagem ideal $F_{id}$ [kN]	Força de atrito no prensa chapas $F_{apc}$ [kN]	Força de estampagem calculada $F_{pt}$ [kN]
950	9,5	0,4	9,9
1100	4,9	0,4	5,3

Para o cálculo da tensão e escoamento no trabalho a frio foi utilizada a equação 15, obtida experimentalmente neste estudo. A tabela 19 descreve a tensão de escoamento do 22MnB5 para a estampagem a frio.

Tabela 19 – Tensão de escoamento para trabalho a frio calculada através da equação da tensão de escoamento para o aço 22MnB5.

Equação	Deformação verdadeira $\varphi = \frac{\sqrt{L_0^2 + b^2} - L_0}{b}$ [-]	Tensão de escoamento $k_f$ [ $\frac{N}{mm^2}$ ]
$k_f = 844\varphi^{0,16}$	1,18	866

A tabela 20 apresenta os valores de força teórica calculada a partir da equação proposta por Bueno (2017) para o trabalho a frio. Os parâmetros utilizados encontram-se na tabela 17.

Tabela 20 – Força de estampagem teórica calculada em função da força de estampagem ideal e força de atrito no prensa chapas para a estampagem a frio.

Força	Valor calculado
Força de estampagem ideal $F_{id}$ [kN]	73
Força de atrito no prensa chapas $F_{apc}$ [kN]	0,8
Força de estampagem calculada $F_{pt} = F_{id} + F_{apc}$ [kN]	73,8

Conforme já comentado, uma abordagem distinta para cálculo teórico da força máxima de estampagem de tiras seria a comparação deste processo com processo de dobramento em “U”. Os parâmetros utilizados e a equação para cálculo da força

máxima de dobramento em “U” proposta por Martins (2005) encontram-se na tabela 21.

Tabela 21 – Equação e parâmetros utilizados para o cálculo analítico da força de dobramento em “U”.

Parâmetro	Equação
Força de dobramento em “U” $F_U$ [kN]	$F_U = \frac{K \cdot R_m \cdot L_0 \cdot (s_0)^2}{r_{cm} + f + r_p}$
Espessura da chapa $s_0$	$s_0 = 1,5 \text{ mm}$
Folga entre punção e matriz, $f$	$f = 1,5 \text{ mm}$
Fator de correção $K$	$K = 0,9$
Raio da matriz $r_{cm}$	$r_{cm} = 8,5 \text{ mm}$
Raio do punção $r_p$	$r_p = 8,5 \text{ mm}$

O limite de resistência ( $R_m$ ) para os materiais encontra-se na tabela 22. Para a estampagem a frio, o limite de resistência foi obtido experimentalmente. Já para a a estampagem a quente, o limite de resistência foi retirado da literatura.

Tabela 22 – Limite de Resistencia utilizados para o cálculo da força máxima de dobramento em “U”,

Temperatura, T (°C)	Limite de Resistência, $R_m$ (MPa)
950°C (NADERI, 2007)	1478
1100°C (RAMALHO, 2021)	1295
frio	513

A tabela 23 indica os resultados encontrados para a força máxima de dobramento em “U” para os ensaios a frio e a quente nas temperaturas estudadas (950 e 1100°C).

Tabela 23 – Força de dobramento em “U” calculada para o trabalho a frio e a quente.

Força	Temperatura, T (°C)	Valor calculado
Força máxima de dobramento em “U” $F_U$ [kN]	950	39
Força máxima de dobramento em “U” $F_U$ [kN]	1100	34
Força máxima de dobramento em “U” $F_U$ [kN]	ambiente	13,5

## 4.7 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

### 4.7.1 Simulação da estampagem a quente

Os resultados de deformação plástica equivalente para a simulação a quente com temperatura de austenitização de 950°C encontram-se na figura 44:

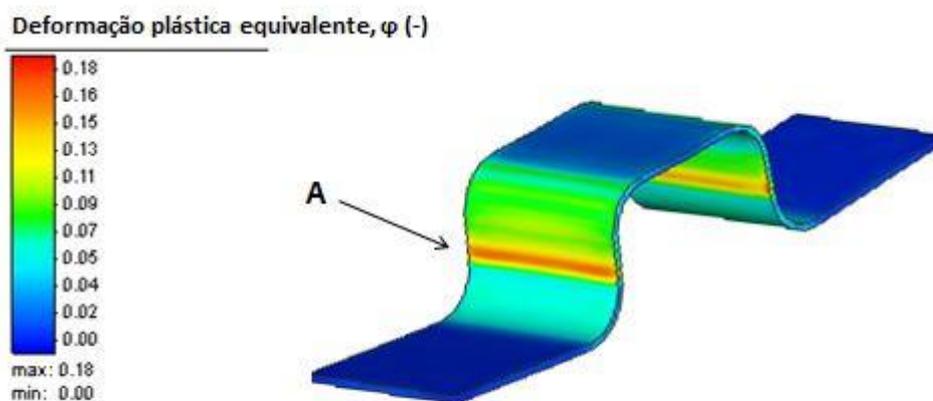


Figura 44 – Deformação para estampagem com temperatura de austenitização de 950°C.

Como pode se observar na figura 44, a deformação plástica após a estampagem na peça é relativamente maior próximo da região A, onde se obtém um valor médio de deformação de 0,18.

A figura 45 mostra o gráfico de Força de estampagem (F) em função deslocamento do punção ( $D_p$ ) via simulação numérica para a temperatura de austenitização de 950°C.

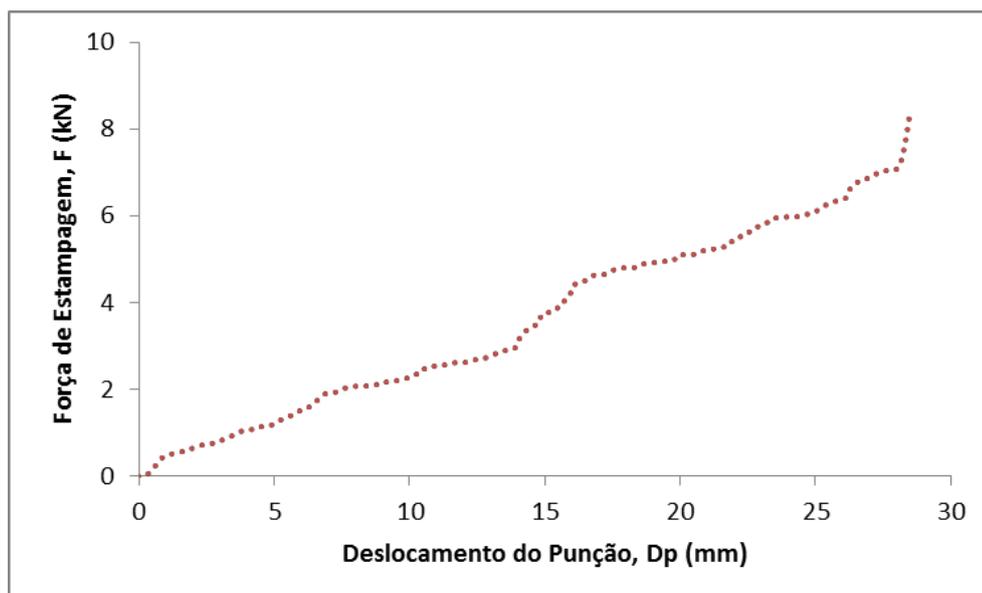


Figura 45 – Força de estampagem ( $F$ ) em função do deslocamento do punção ( $D_p$ ) obtido via simulação numérica para a temperatura de austenitização de  $950^{\circ}\text{C}$ .

A partir da análise da figura 45, nota-se que a força máxima de estampagem obtida via processo de simulação numérica foi de aproximadamente 8 kN.

A figura 46 mostra a curva de resfriamento obtida pelo software Simufact para o processo de resfriamento do material para austenitização a  $950^{\circ}\text{C}$  e posterior estampagem.

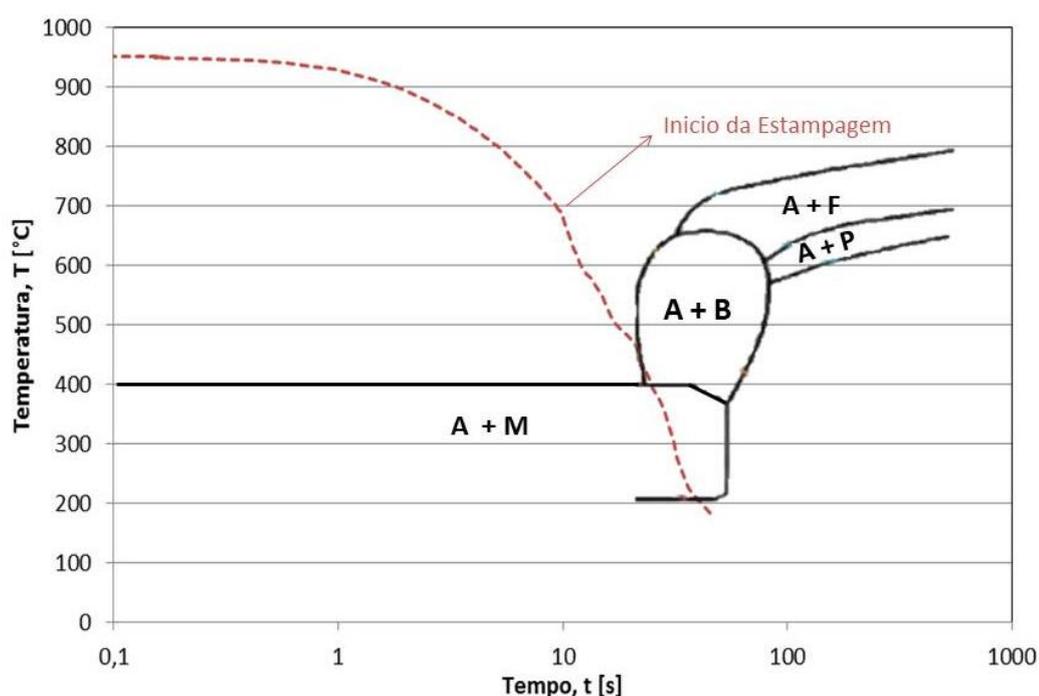


Figura 46 – Gráfico de resfriamento a partir da temperatura de austenitização de  $950^{\circ}\text{C}$  obtida via software *Simufact*.

A partir da análise da figura 46, para a temperatura de encharque de 950°C é possível observar que a condição de resfriamento do material ocasionou uma passagem da curva de resfriamento pelo campo bainítico, ou seja, durante o resfriamento uma pequena quantidade de bainita e austenita retida podem ter sido formadas.

Para a temperatura de austenitização de 1100°C, a deformação plástica equivalente é exibida na figura 47.

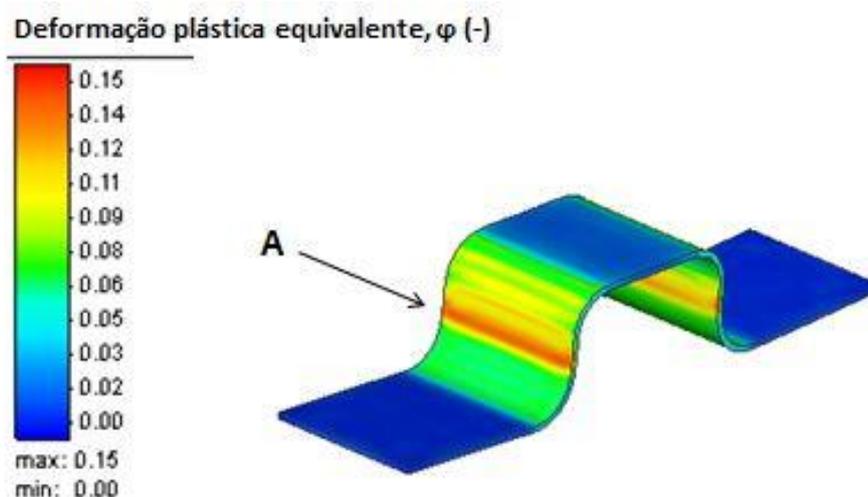


Figura 47 – Deformação plástica para a temperatura de austenitização de 1100°C.

A partir dos resultados da figura 47, podemos obter um valor médio de deformação 0,15. Nota-se que temperatura de austenitização de 1100°C provocou uma deformação equivalente na chapa caso comparada com a austenitização a 950°C, sendo possível verificar que, de acordo com a simulação numérica, a temperatura de austenitização não causou diferença significativa na deformação da peça de trabalho.

A figura 48 apresenta os principais momentos da estampagem a quente e a evolução da deformação ( $\varphi$ ) na chapa.

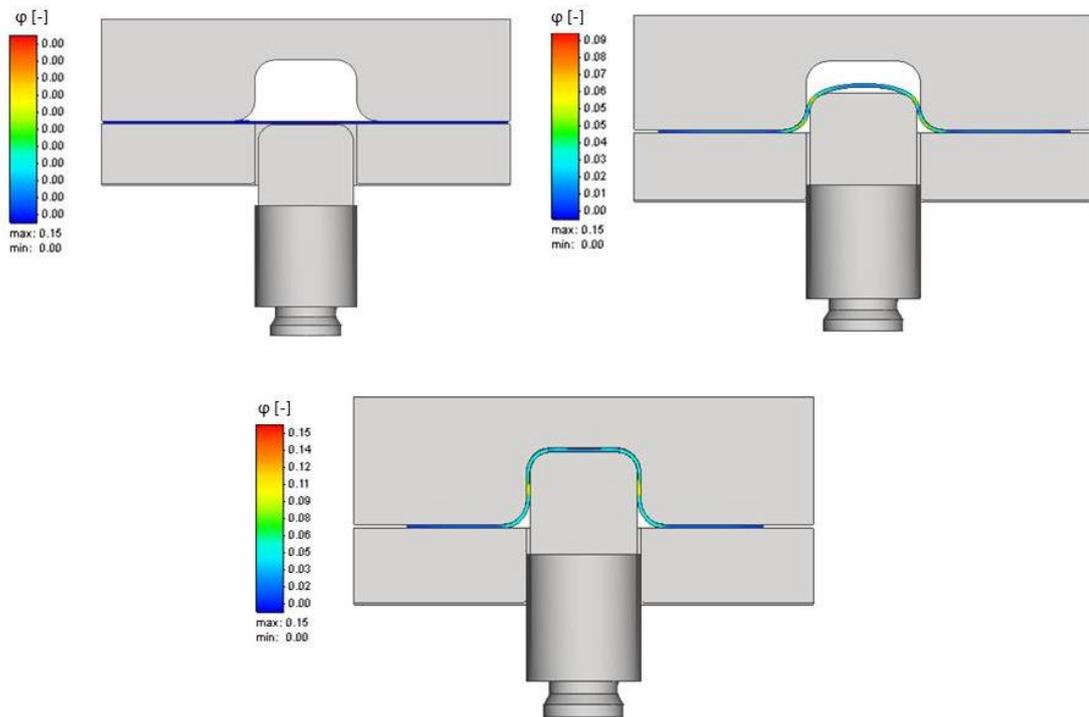


Figura 48 – Principais momentos da estampagem a quente com a evolução da deformação na chapa.

A figura 49 mostra o gráfico de Força de estampagem ( $F$ ) em função deslocamento do punção ( $D_p$ ) via simulação numérica para a temperatura de austenitização de 1100°C.

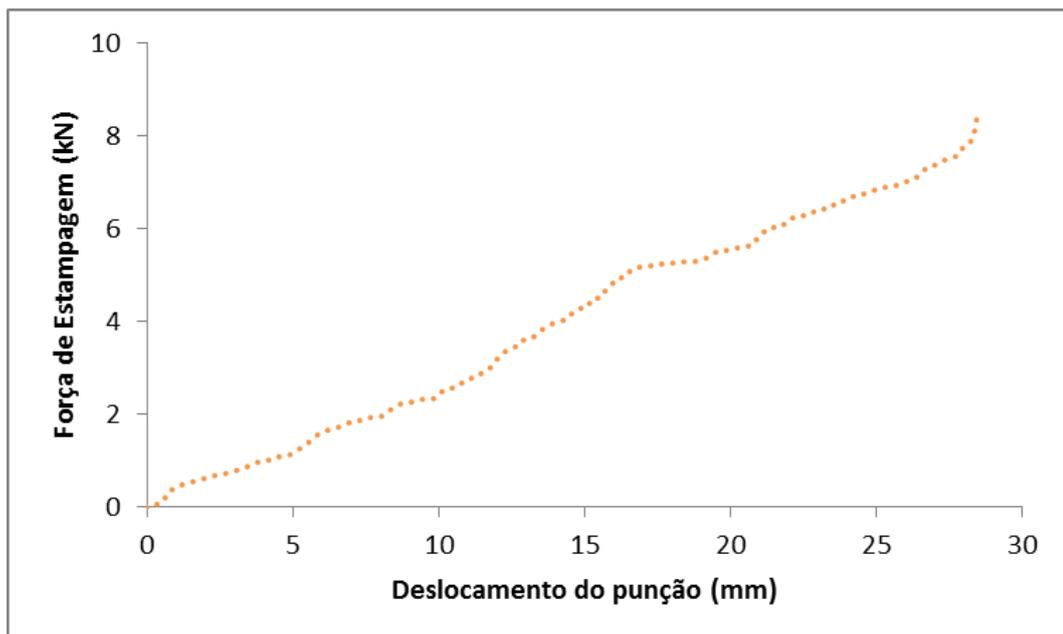


Figura 49 - Força de estampagem ( $F$ ) em função do deslocamento do punção ( $D_p$ ) obtido via simulação numérica para a temperatura de austenitização de 1100°C.

A partir da análise da figura 49, verifica-se que a força máxima de estampagem obtida via processo de simulação numérica foi de aproximadamente 8 kN.

A figura 50 apresenta a curva de resfriamento obtida pelo software Simufact para o processo de resfriamento do material para austenitização a 1100°C e posterior estampagem.

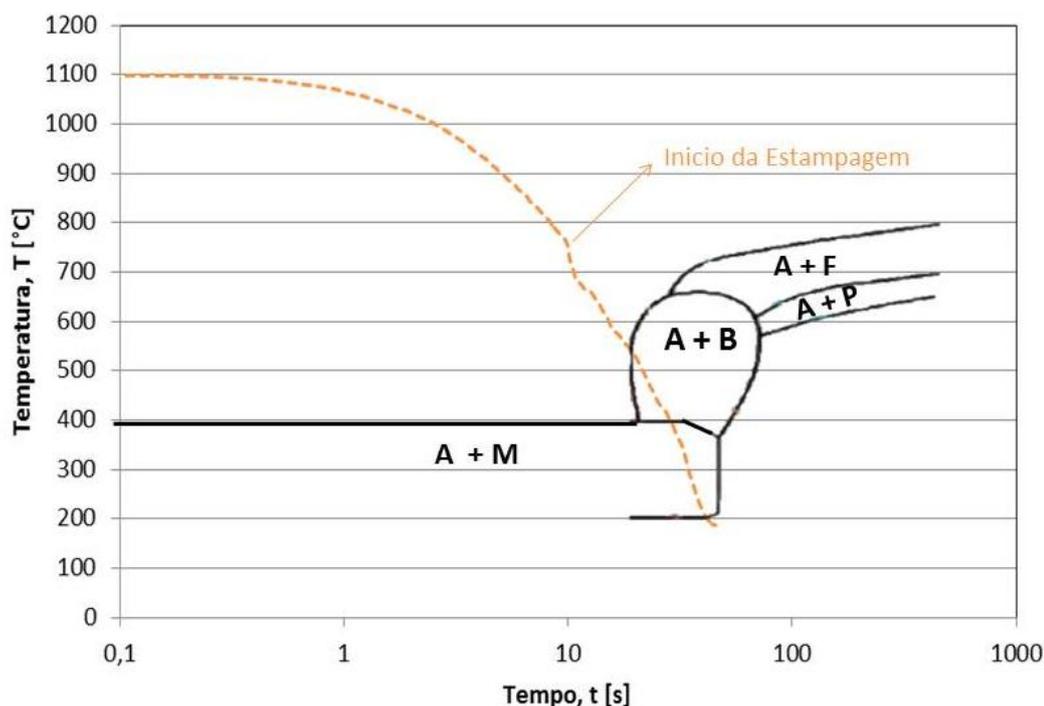


Figura 50 – Curva de resfriamento do 22mnB5 a partir da temperatura de austenitização de 1100°C obtida via software *Simufact*.

A partir da observação da figura 50, é possível perceber o mesmo padrão para o resfriamento na temperatura de encharque de 1100°C, ou seja, a curva de resfriamento cruza igualmente o campo bainítico. Durante o resfriamento, uma pequena quantidade de bainita e austenita retida podem ter sido formadas. Tal comportamento para as situações citadas pode ter se dado devido a não refrigeração das matrizes no momento da estampagem, condição reproduzida também na simulação numérica, onde as ferramentas iniciaram o processo de conformação na temperatura ambiente.

#### 4.7.2 Simulação da estampagem a frio

A figura 51 apresenta o resultado para deformação plástica equivalente para a simulação da estampagem a frio.

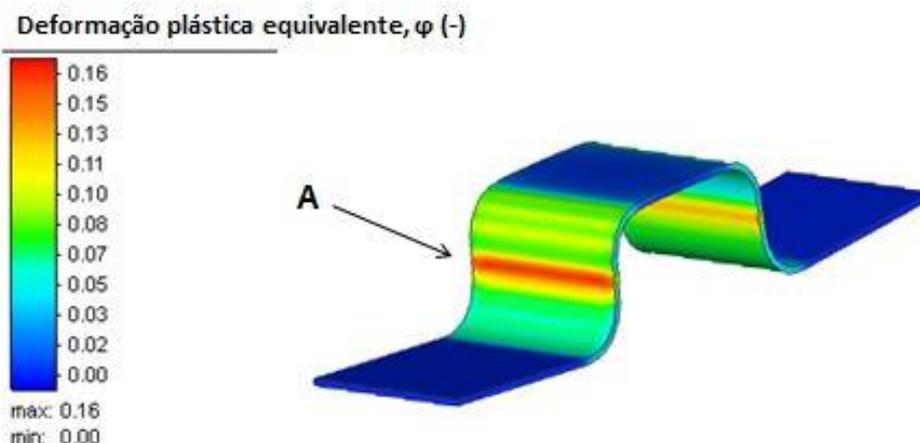


Figura 51 – Resultado de deformação plástica para estampagem a frio.

Nota-se que na região A apresentada na figura 51 seria a região que provavelmente ocorreria ruptura do material nessas condições de estampagem. Na situação estudada a ruptura não ocorreu talvez por conta da força no prensa-chapas não ter sido suficientemente alta para bloquear o escoamento do material através da matriz. A deformação plástica média para o material encontra-se em 0,16.

A figura 52 apresenta o gráfico de Força de estampagem (F) em função deslocamento do punção ( $D_p$ ) via simulação numérica para a estampagem a frio.

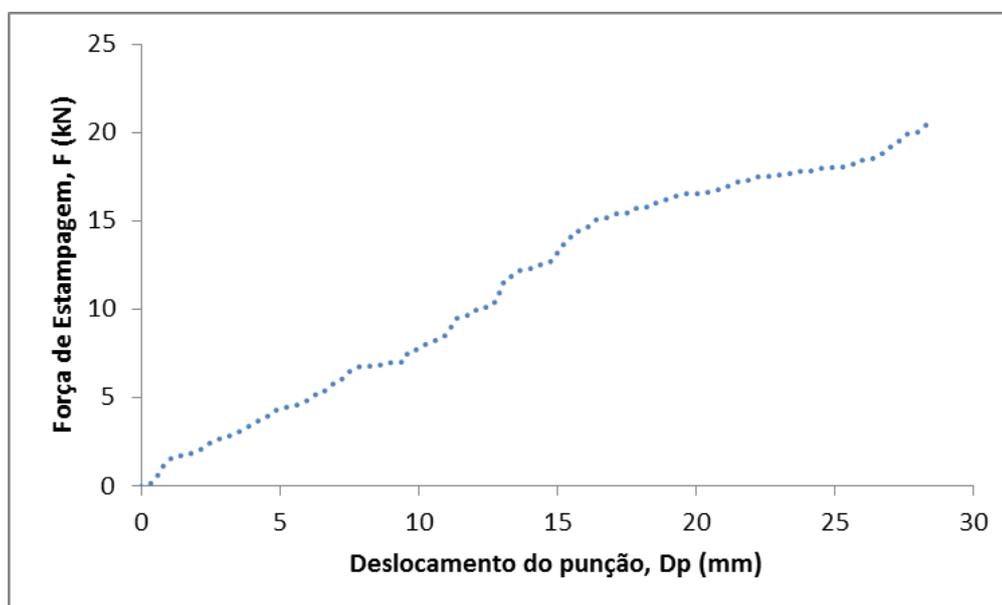


Figura 52 - Força de estampagem (F) em função deslocamento do punção ( $D_p$ ) via simulação numérica para a estampagem a frio.

A partir da análise da figura 52, observa-se que a força máxima de estampagem obtida via processo de simulação numérica foi de aproximadamente 20 kN.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 CARATERIZAÇÃO DO MATERIAL COMO RECEBIDO

A partir da composição química apresentada pela tabela 12 e, comparando-a com as tabelas 1 e 3, é possível constatar que a composição química do 22MnB5 obtida possui proporções de elementos próximas as encontradas por Shi, daun e Wells (2016) e Naderi (2007). A microestrutura encontrada está de acordo com os resultados de Lisboa (2019) para o 22MnB5 com revestimento Al-Si, bem como sua microdureza inicial de 194 HV. Esse valor está adequado por conta da microestrutura do material como recebido ser composta de ferrita e perlita.

A respeito das propriedades mecânicas, é possível observar que os dados obtidos no ensaio encontram-se dentro do intervalo plausível para limite de escoamento e limite de resistência apresentados pelo fornecedor do aço. A respeito do alongamento, é importante observar que, apesar de mínimo, este encontra-se dentro dos valores apresentados pelo fornecedor.

Podemos observar que as curvas de escoamento apresentam comportamentos semelhantes, conforme os valores de deformação se alteram. No entanto, a curva obtida experimentalmente não possui a tendência de se elevar conforme mudança dos valores de deformação. Observa-se também que os resultados encontrados através dos cálculos analíticos propostos por Schaeffer e Rocha (2007) não se adequaram à equação obtida através do software Excel experimental ou através das informações contidas no banco de dados do *Simufact Forming*.

### 5.2 ESTAMPAGEM A QUENTE

#### 5.2.1 Temperatura da chapa e temperatura das matrizes

A figura 53 mostra as variações da temperatura das matrizes para as duas temperaturas de austenitização estudadas.

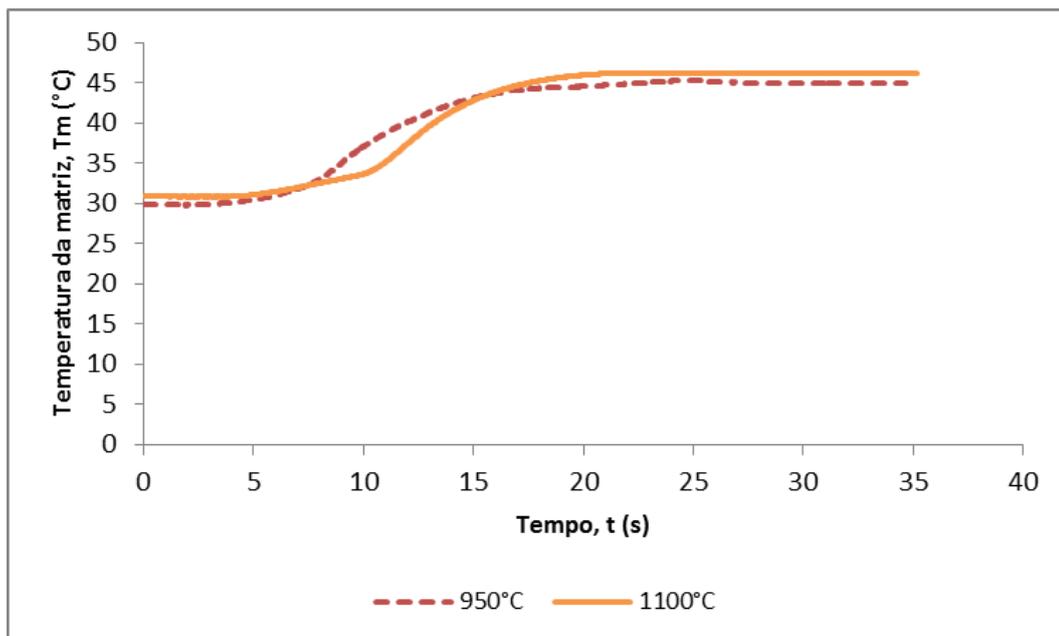


Figura 53 – Temperatura da matriz em função do processo de estampagem a quente para as temperaturas de austenitização de 950°C e 1100°C.

No processo de estampagem a quente, observando a figura 53, nota-se que, comparativamente, não foi possível visualizar uma diferença muito clara entre as temperaturas de austenitização utilizadas. A matriz atingiu uma temperatura máxima de aproximadamente 45°C para o processo de austenitização a 950°C e 47°C para austenitização a 1100°C. Resultado diferente foi encontrado por Naderi (2007), no qual a temperatura máxima atingida pela matriz no processo foi de aproximadamente 80°C.

Sobre a curva de resfriamento do material, esta foi realizada através da simulação numérica. Na figura 46, para a temperatura de encharque de 950°C é possível observar que a condição de resfriamento do material ocasionou uma passagem pelo campo bainítico da curva de resfriamento, ou seja, formou-se uma pequena quantidade de bainita, e não somente martensita. A partir da análise da figura 50 é possível observar o mesmo comportamento para o resfriamento na temperatura de encharque de 1100°C, cruzando também o campo bainítico. Tal comportamento pode ter se dado devido a não refrigeração das matrizes no momento da estampagem, condição reproduzida também na simulação numérica, onde as ferramentas iniciaram o processo de conformação na temperatura ambiente.

### 5.2.2 Microestrutura e microdureza

Para Naderi (2007) a microestrutura se mostrou variável ao longo da espessura da peça. Tal fato ocorreu por conta de seu estudo ter sido realizado com punção refrigerado, ocasionando uma mudança de propriedades decorrente da diferença de taxa de resfriamento em cada região da peça. Ainda assim, a microestrutura encontrada por Naderi (2007) é completamente martensítica somente na região na qual o blank esteve em contato com o punção refrigerado. Nas demais regiões a microestrutura também é composta por martensita e bainita.

O processo de estampagem a quente tem como objetivo a obtenção de uma microestrutura 100% martensítica após a estampagem, no entanto, nas duas situações apresentadas esse objetivo não foi alcançado.

A respeito da microdureza, pode-se observar que o valor médio das microdurezas encontra-se de acordo com a literatura. Para Naderi (2007) e Cordeiro *et al.* (2020), o valor para a microdureza na condição de austenitização a 950°C é igual ou superior aos 500 HV. Isso ocorre, pois os autores citados realizaram experimentos com a matriz refrigerada, proporcionando uma maior taxa de resfriamento e, conseqüentemente, microestrutura completamente martensítica. Para Ramalho (2021), a microdureza média encontrada referente à temperatura de austenitização de 1000°C após o processo de estampagem é de 455 HV assemelhando-se do valor encontrado para o estudo a 950°C. Para Lisboa (2019) na temperatura de austenitização de 1000°C a microdureza média encontrada foi de 474 HV.

Já para a temperatura de 1100°C, a microdureza média obtida por Ramalho *et al.* (2017) foi de 468 HV, o que concorda com o valor encontrado nos ensaios experimentais realizados. Quanto à comparação dos resultados entre as diferentes austenitizações utilizadas, não foi possível observar que a diferença entre as temperaturas de aquecimento foram suficientes para alcançar mudança nos valores de dureza.

### 5.2.3 Força de estampagem

A figura 54 apresenta um gráfico comparativo entre a evolução da força de estampagem x deslocamento do punção para o processo experimental e a simulação numérica para estampagem a quente com austenitização a 950°C.

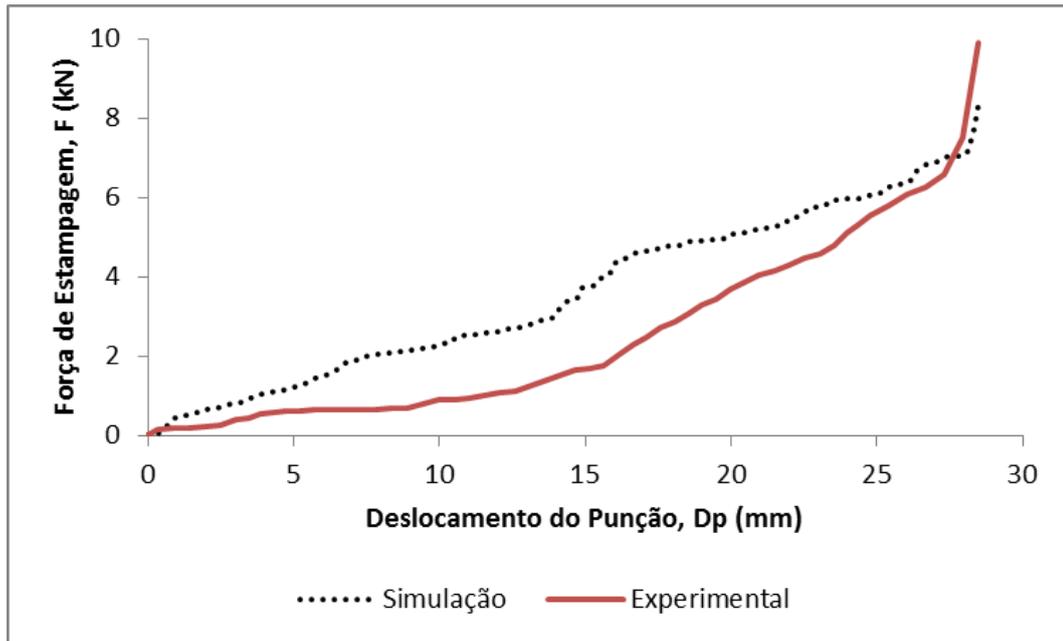


Figura 54 – Gráfico de força de estampagem (F) em função do deslocamento do punção (Dp) experimental e via simulação numérica para austenitização a 950°C.

Podemos observar que a evolução da força de estampagem via simulação numérica foi relativamente diferente da evolução via experimentos, apresentando uma taxa de crescimento maior durante todo o processo. Para o processo com austenitização a 950°C, a força máxima de estampagem para as duas situações é similar, sendo de aproximadamente 10 kN para o processo experimental e 8 kN para a simulação numérica.

A figura 55 mostra um diagrama comparativo entre a evolução da força de estampagem x deslocamento do punção para o processo experimental e a simulação numérica para estampagem a quente com austenitização a 1100°C.

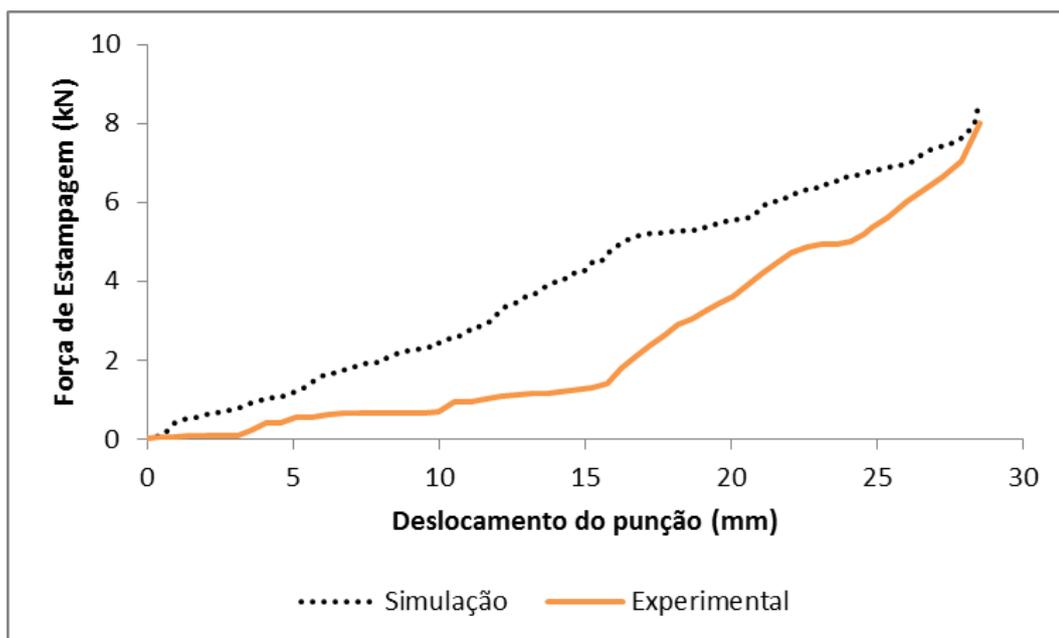


Figura 55 – Gráfico de força de estampagem (F) em função do deslocamento do punção (Dp) experimental e via simulação numérica para austenitização a 1100°C.

A partir da análise da figura 55, podemos inferir que, da mesma forma que para a condição de austenitização de 950°C, para 1100°C a evolução da força de estampagem via simulação numérica apresentou uma taxa de crescimento maior ao longo de todo o processo se comparada à evolução do processo experimental. Para o processo com austenitização a 1100°C, a força máxima de estampagem para as duas situações é de 8 kN.

### 5.3 ESTAMPAGEM A FRIO COM POSTERIOR TÊMPERA

#### 5.3.1 Microestrutura e microdureza

Para a microestrutura encontrada nas figuras 42 e 43, assim como para Naderi (2007), o processo de estampagem a frio seguido de têmpera em água o DIN 22MnB5 resultou em grandes agulhas de martensita orientadas em diversos ângulos. O aquecimento a 1100°C proporcionou uma formação de martensita na forma de agulhas maiores e em maiores angulações se comparadas com o aquecimento a 950°C. Também é possível observar que a taxa de resfriamento não foi alta o suficiente para alcançar uma microestrutura completamente martensítica, sendo a microestrutura possivelmente composta de martensita, bainita e austenita retida.

A figura 56 mostra um gráfico comparativo entre as durezas encontradas para todos os processos analisados.

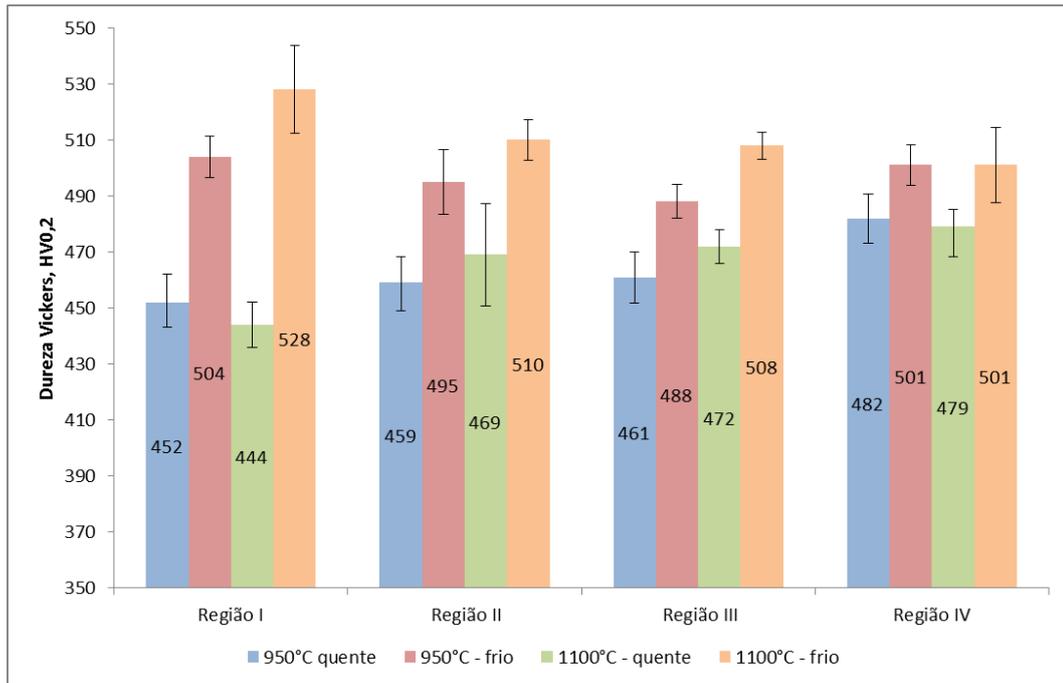


Figura 56 – Comparativo das microdurezas em relação à região da peça analisada.

Na figura 56, é possível observar em cada região analisada as diferenças entre a dureza relativa ao processo a quente e a frio. Para os processos a quente, tanto para a temperatura de austenitização de 950°C quanto para a temperatura de austenitização de 1100°C, a dureza ficou próxima de 465 HV. Já para o processo de estampagem a frio com posterior têmpera, nota-se que a dureza se mostrou mais elevada, próxima aos 500 HV.

### 5.3.2 Força de estampagem

A figura 57 apresenta o gráfico comparativo de evolução da força de estampagem (F) em função do deslocamento do punção (Dp) para o processo de estampagem a frio do material.

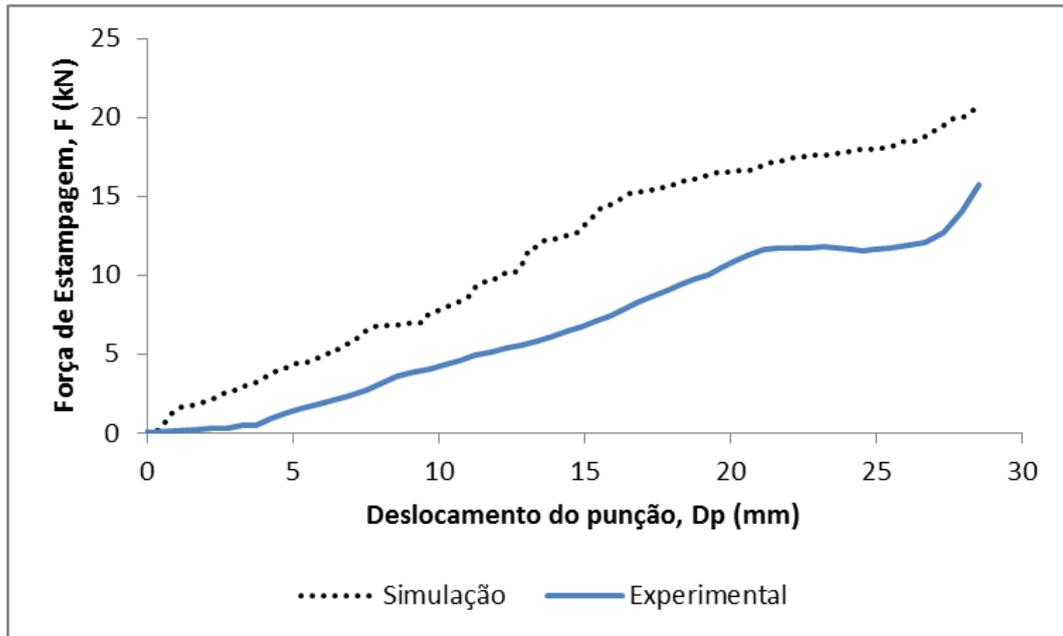


Figura 57 – Força de estampagem ( $F$ ) em função do deslocamento do punção ( $D_p$ ) via simulação numérica e resultados experimentais para o processo de estampagem a frio.

A partir da análise da figura 57, nota-se que, distinto do processo de estampagem a quente abordado anteriormente, para a estampagem a frio o comportamento do gráfico obtido via simulação numérica e via experimentos foi distinto. A força máxima para o processo via simulação numérica se encontrou próximo dos 20 kN e, para o processo experimental, próximo dos 15 kN.

### 5.3.3 Força de Estampagem Global

A figura 58 exibe um gráfico comparativo entre a força de estampagem experimental x deslocamento do punção de todos os processos analisados neste estudo.

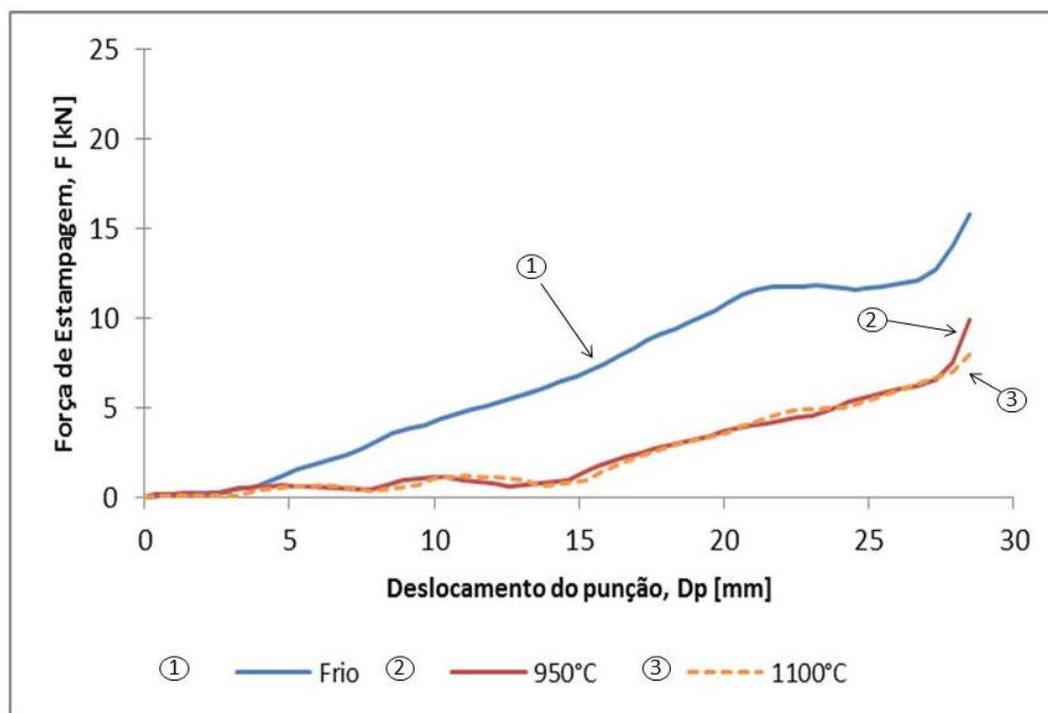


Figura 58 – Comparativo entre a evolução da força de estampagem para o processo de estampagem em relação ao deslocamento do punção para as condições a frio e a quente com austenitização de 950°C e 1100°C.

A partir do estudo da figura 58, é possível constatar a evidente diferença entre a evolução da força de estampagem necessária para o processo a quente comparado ao processo a frio. Para a estampagem a frio, observa-se uma força máxima de estampagem de aproximadamente 15 kN. Para a estampagem a quente, a respeito das diferenças entre as temperaturas de austenitização utilizadas, pode-se confirmar que não houve uma mudança significativa de força com as alterações de temperatura e tempo de austenitização utilizados. Para os processos realizados a quente, a força de estampagem máxima encontrou-se próxima dos 7 kN e 8 kN para austenitização a 950°C e 1100°C respectivamente.

A tabela 24 apresenta um resumo das forças calculadas em todos os processos apresentados neste estudo.

Tabela 24 – Resumo das forças máximas encontradas através dos distintos métodos utilizados neste estudo.

Temperatura, T ( °C)	Método	Força Máxima (kN)
950°C	experimental	10
1100°C	experimental	8
ambiente	experimental	13
950°C	simulação numérica	8
1100°C	simulação numérica	8
ambiente	simulação numérica	20
950°C	teórico – Bueno (2017)	9,9
1100°C	teórico – Bueno (2017)	5,3
ambiente	teórico – Bueno (2017)	73,8
950°C	teórico – Martins (2005)	39
1100°C	teórico – Martins (2005)	34
ambiente	teórico – Martins (2005)	13,5

Com a observação da tabela 24, podemos constatar que a força máxima obtida tanto no processo experimental quanto na simulação numérica para a estampagem a quente e a frio são condizentes.

Para o cálculo teórico da força de estampagem foram utilizadas as equações propostas por Bueno (2017) e Martins (2005). A partir dos resultados encontrados, podemos observar que a equação analítica proposta por Bueno (2017) encontrou-se de acordo com os resultados experimentais para a força máxima de estampagem para as duas temperaturas de austenitização utilizadas. Já a equação proposta por Martins (2005) obteve valores de força máxima distintos tanto do processo experimental, quanto da simulação numérica realizada.

Nos resultados encontrados para o cálculo analítico da força de estampagem a frio proposta por Bueno (2017) houve certa divergência comparado aos resultados experimentais. Os resultados de força calculados para a força de dobramento em “U” estão mais próximos dos resultados alcançados experimentalmente. Tal resultado pode ter sido devido à equação proposta por Rodrigues e Martins (2005) considerar a tensão máxima de ruptura do material e ser utilizada para o trabalho a frio, enquanto a equação sugerida por Bueno (2017) considerar a tensão de escoamento do material.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo principal estabelecer a influência do processo de estampagem a frio (com posterior austenitização e têmpera) e estampagem a quente (nas temperaturas estudadas) na força de estampagem e propriedades microestruturais do aço 22MnB5 com revestimento de Alumínio-Silício.

A respeito do gráfico de força x deslocamento do punção nos casos estudados de estampagem a quente, não se observou diferença entre as temperaturas de austenitização empregadas neste estudo nos resultados de força máxima. Os resultados foram análogos.

Os resultados da simulação numérica para a força de estampagem a quente nas temperaturas analisadas de 950°C e 1100°C foram iguais aos resultados encontrados pelo processo experimental. Já para a simulação a frio, a força máxima encontrada via simulação numérica superior em 33% da força encontrada experimentalmente. A curva de resfriamento do material obtida via software Simufact mostrou-se coerente com a microestrutura encontrada no final do ensaio.

Para o cálculo analítico da força, a equação proposta por Bueno (2017) foi extremamente coerente com os resultados experimentais e com a simulação realizados. Para a estampagem a frio, a equação analítica que mais se aproximou dos resultados experimentais foi a equação de dobramento em “U”.

A microestrutura desejada para o 22MnB5 após o processo segundo a literatura era completamente martensítica. No entanto, a microestrutura encontrada experimentalmente possivelmente foi de martensita, bainita e austenita retida. Não foi possível obter a microestrutura desejada por conta do aumento da temperatura das ferramentas no momento da estampagem.

Os resultados de dureza para a estampagem a quente foram coerentes com a literatura pesquisada. Não foi possível observar que a diferença entre as temperaturas de encharque foram suficientes para alcançar mudança nos valores de dureza. Já para a estampagem a frio com posterior têmpera, houve uma pequena divergência entre os valores encontrados e os valores da literatura. Uma maior dureza foi encontrada nos ensaios de estampagem a frio com posterior têmpera.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, as seguintes análises podem ser realizadas:

- a) captar os dados da evolução da temperatura no blank ao longo do processo de estampagem;
- b) alterar a temperatura e tempo de austenitização;
- c) utilizar a refrigeração na matriz a fim modificar a taxa de resfriamento no material e tentar obter uma microestrutura final 100% martensítica;
- d) realizar o ensaio de tração no material após a estampagem a quente com objetivo de verificar as propriedades mecânicas do material após o processo de estampagem;
- e) analisar o revestimento do material após os ensaios;
- f) realizar a análise via Microscopia Eletrônica de Varredura para avaliar com maior riqueza de detalhes as microestruturas formadas no processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKERSTRÖM, Paul. **Modelling and Simulation of Hot Stamping**. 2006. 130 p. Tese Doutorado (Doutorado em Mecânica dos Sólidos) - Lulea University of Technology, Lulea, 2006.

ARCELORMITTAL. **Catálogo de Produtos Laminados**. [S. l.: s. n.], 2015. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/catalogos>. Acesso em: 11 nov. 2020.

AZUSHIMA, A.; UDA, K.; YANAGIDA, A. **Friction behavior of aluminum-coated 22MnB5 in hot stamping under dry and lubricated conditions**. Journal of Materials Processing Technology, v. 212, n. 5, p. 1014-1021, 2012.

BACHMAN, Kate. How will the electric vehicle evolution affect stamping manufacture?: Shift from ICE to ACES vehicles opens market opportunities, requires modernizing, agility. **Stamping Journal**, [S. l.], p. 1-7, 22 abr. 2020.

BATALHA, M. E. **Estudo da estampabilidade a quente de aço ao boro em conformação com redução comparada**. 2015. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

BAÚ, A. R. **Estudo do processo de estampagem para materiais alternativos na fabricação de um componente para a indústria de máquinas agrícolas**. 2015. 83 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

BILLUR, E. **Hot Stamping of Ultra High-Strength Steels: From a Technological and Business Perspective**. 1ª. ed. Suíça: Springer, 2019. ISBN 978-3-319-98870-2.

BUENO, J. **Avaliação das propriedades mecânicas do aço DIN 27MnCrB5 para o processo de estampagem a quente**. 99 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

CABALLERO, F. G.; MILLER, M. K.; GARCIA-MATEO, C. **Carbon supersaturation of ferrite in a nanocrystalline bainitic steel**. Acta Materialia, [S. l.], v. 58, n. 7, p. 2338-2343, 2010.

CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª. ed. [S. l.]: LTC, 2008. 845 p. ISBN 978-0-470-41997-7.

CARON, Etienne J.F.R; DAUN, Kyle J.; WELLS, Mary A: **Experimental heat transfer coefficient measurements during hot forming die quenching of boron steel at high temperatures**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 71, [s.n], p. 396-404, 2014.

ÇAVUŞOĞLU, Onur *et al.* **Microstructural features and mechanical properties of 22MnB5 hot stamping steel in different heat treatment conditions**. Journal of Materials Research and Technology, v. 9, n. 5, p. 10901-10908, 2020.

CORDEIRO, B. C.; ROSIAK, A.; MORATO, T.; SCHAEFFER, L. **Estudo da Estampagem a Quente do Aço 22MnB5 com Revestimento Al-Si**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, Porto Alegre, v. 18, n. 2255, p. 1-7, 2020.

COUTO, Camila Pucci *et al.* **Electrochemical behaviour of 22MnB5 steel coated with hot-dip Al-Si before and after hot-stamping process investigated by means of scanning Kelvin probe microscopy**. Corrosion Science, v. 174, [s.n.], p. 108811, 2020.

COUTO, Camila Pucci *et al.* **Influence of austenitisation temperatures during hot stamping on the local electrochemical behaviour of 22MnB5 steel coated with hot-dip Al-Si**. Corrosion Science, v. 190, p. 109673, 2021.

DE ANDRES, C. Garcia *et al.* **Application of dilatometric analysis to the study of solid–solid phase transformations in steels**. Materials Characterization, v. 48, [s.n.], p. 101-111, 2002.

DE CASTRO, Marcos Roberto. **O efeito bake hardening na estampagem a quente e a estrutura veicular**. 2017. 98 p. Tese Doutorado (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2017.

DE COSTA, Luana de Lucca. **Estudo da Aplicabilidade e Desempenho de Chapas Metálicas de 22MnB5 como Máscaras de Proteção em Matrizes de Forjamento a Quente**. 2020. 128 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

DE SOUZA, F. B. P. **Simulação Numérica do Processo de Estampagem a Quente do Aço USIBOR 1500P**. 131 p. Dissertação (Mestrado em Metalurgia de Transformação) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

DIAS, A. N. O. *et al.* **Caracterização microestrutural e avaliação das propriedades mecânicas de um aço com diferentes microestruturas bifásicas obtidas a partir do aço LNE 500**. In: SEXTA CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE TEMAS DE TRATAMENTO TÉRMICO–TTT2012. Atibaia–SP, p. 337-341, 2012.

DIAS, A. N. O. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de um Aço Bifásico com Diferentes Microestruturas**. 2013. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª Ed. Editora Guanabara, 335 p., 1981.

GEIGER, M.; MERKLEIN, M.; LECHLER, J. **Determination of tribological conditions within hot stamping**. Production Engineering, v. 2, n. 3, p. 269, 2008.

GEORGE, R.; BARDELCHIK, A.; WORSWICK, M. J. **Hot forming of boron steels using heated and cooled tooling for tailored properties**. Journal of Materials Processing Technology, v. 212, n. 11, p. 2386-2399, 2012.

GORNI A. A. **Novas tendências para o processo de estampagem a quente**. Corte & Conformação de Metais, [s.v.], [s.n.], p. 62-77, 2010.

GÜLER, H.; ÖZCAN, R. **Comparison of hot and cold stamping simulation of Usibor 1500 prototype model.** Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, v. 21, [s.n], p 387-396, 2014.

GÜLER, H: **Investigation of Usibor 1500 Formability in a Hot Forming Operation.** Materials Science, v. 19, n. 2, p. 144-146, 2013.

HOLT, Nick. Hot on the press. **AMS - Automotive Manufacturing Solutions**, [S. l.], p. 1-2, 19 nov. 2019

KARBASIAN, H.; TEKKAYA, A. **A review on hot stamping.** Journal of Materials Processing Technology, v. 210, n.15, p. 2103-2118, 2010.

KEELER, S.; KIMCHI, M. **Advanced High-Strength Steels Application Guidelines V5.** WorldAutoSteel, 2014.

KRAUSS, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance.** 2<sup>a</sup>. ed. Ohio, ASM International, 2015. 705 p. ISBN 978-1-62708-083-5.

LI, N. *et al.* **Experimental characterisation of the effects of thermal conditions on austenite formation for hot stamping of boron steel.** Journal of Materials Processing Technology, v. 231, p. 254-264, 2016.

LISBOA, C.P. **Avaliação da estampagem a quente do aço USIBOR® 1500 utilizando estratégia de refrigeração diferencial para obtenção de peças com propriedades tailored.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Porto Alegre, 2019.

LISBOA, C.P. **Avaliação da estampagem a quente do aço USIBOR® 1500 utilizando estratégia de refrigeração diferencial para obtenção de peças com propriedades tailored.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020. Porto Alegre, 2019.

MELCONIAN, M. V. **Modelagem numérica e computacional com similitude e elementos finitos: Desenvolvimento de Equação Preditiva para o Cálculo da Força de Retenção em Freios de Estampagem.** 1<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Blucher, 2014. 120 p. ISBN 978-85-8039-090-2.

MERKLEIN, M.; LECHLER, J.; STOEHR, T. **Investigations on the thermal behavior of ultra high strength boron manganese steels within hot stamping.** International Journal of Material Forming, v. 2, n. 1, p. 259-262, 2009.

MORI, Ken-ichiro *et al.* **Hot stamping of ultra-high strength steel parts.** CIRP Annals, v. 66, n. 2, p. 755-777, 2017.

MU, Yanhong *et al.* **Numerical simulation of hot stamping by partition heating based on advanced constitutive modelling of 22MnB5 behaviour.** Finite Elements in Analysis and Design, v. 147, p. 34-44, 2018.

NADERI, Malek. **Hot stamping of ultra high strength steels.** 2007. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 2007.

RAMALHO, R. S. **Análise numérica e experimental de estampagem a quente do aço 22MnB5 em matriz não refrigerada**. 2021. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

RAMALHO, R., LISBOA C., DE COSTA, L.L. SCHAEFFER, L. **Análise de microestrutura e microdureza do aço 22MnB5 estampado a quente**. In: 37<sup>th</sup> SENAFOR, Porto Alegre, p. 1-9, 2017.

RODRIGUES, J.; MARTINS, P. **Tecnologia mecânica**. Lisboa: Escolar, 2005. V. 2.

ROSA, J. H. A. **Estampagem a quente em escala piloto**. 2015. 79 p. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Física) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SCHAEFFER, L. **Conformação de Chapas Metálicas**. 1<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SCHAEFFER, L. **Manufatura por Conformação Mecânica: Projetar - Fabricar - Utilizar**. 1<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2016. 218 p. ISBN 978-85-7697-435-2.

SCHAEFFER, L.; NUNES, R. M.; BRITO, A. M. G. **Tecnologia da Estampagem de Chapas Metálicas**. 1<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Gráfica da UFRGS, 2017. 126 p. ISBN 978-85-923549-0-9.

SCHAEFFER, L.; ROCHA, A. S. **Conformação Mecânica: Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação**. 2<sup>a</sup>. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007. 200 p. ISBN 978-85-7697-073-6.

SHI, C.; DAUN, K. J.; WELLS, M. A. **Evolution of the spectral emissivity and phase transformations of the Al-Si coating on Usibor® 1500P steel during austenitization**. Metallurgical and Materials Transactions B, v. 47, n. 6, p. 3301-3309, 2016.

THIBAU, P.; MÉTENIER, A.; XHOFFER, C. **Carbon diffusion measurement in austenite in the temperature range 500 C to 900 C**. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 38, n. 6, p. 1169-1176, 2007.

TURETTA, A. **Investigation of Thermal, Mechanical and Microstructural Properties of Quenchenable High Strength Steels in Hot Stamping Operations**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Università degli Studi di Padova, 2008.

VENTURATO, Giulia *et al.* **Effects of phase transformation in hot stamping of 22MnB5 high strength steel**. Procedia Engineering, v. 183, p. 316-321, 2017.

WINDMANN M., RÖTTGER A., THEISEN W., **Formation of intermetallic phases in Al-coated hot-stamped 22MnB5 sheets in terms of coating thickness and Si content**, Surface Coatings Technol. v. 246, p. 17–25, 2014.

WROBEL, Irineusz; SIDZINA, Marcin. Design Study for Automatic Production Line of a Sub-Assemblies of New Generation Car Body Structures Compliant with the “Industry 4.0” Concept. **Sensors**, [S. l.], ano 2021, v. 21, p. 1-8, 1 abr. 2021.