MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE

FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL Escola de

Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO DIN 27MnCrB5 PARA O PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE

Juliano de Sousa Bueno

Dissertação para obtenção do título de mestre em engenharia

Porto Alegre

2017

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE

FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL Escola de

Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO DIN 27MnCrB5 PARA O PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE

Juliano de Sousa Bueno

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processo de Fabricação

Porto Alegre

2017

Esta Dissertação foi 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 do Curso de Pós-Graduação.

Orientador Prof. Dr.- ng. Lírio Schaeffer

Banca Examinadora

Prof. Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito (UFRGS)

Prof. Dr. Eng. Paulo Victor Prestes Marcondes (UFPR)

Prof. Dr. Eng. Rafael Menezes Nunes (UFRGS)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta e indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

Ao professor Dr.-Ing. Lírio Schaeffer pelo estímulo, dedicação e esforço pessoal proporcionado.

Aos colegas MSc. Eng. Uilian Boff e Msc. Eng. Luciano Kempski pelas sugestões e observações valiosas ao longo de todo o trabalho.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) pela oportunidade de realização deste trabalho.

A empresa Brasmetal Waelzholz por disponibilizar o material DIN 27MnCrB5 para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS III

SUMÁRIO IV

LISTA DE FIGURAS VI

LISTA DE TABELAS XI

LISTA DE ABREVIATURAS XII

LISTA DE SÍMBOLOS XIII

RESUMO..... XVI

ABSTRACT.....XVII

1 INTRODUÇÃO 15

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.....16

1.2 JUSTIFICATIVA.....16

1.3 OBJETIVO 17

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....17

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO 17

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 19

2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA.....19

2.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE.....22

2.2.1 Características do processo direto e indireto 24

2.3 MATERIAIS UTILIZADOS PARA A ESTAMPAGEM A QUENTE 26

2.3.1 Considerações gerais.....26

2.3.2 Aço 0/N 27MnCrB5.....26

2.4 CICLO TÉRMICO 29

2.4.1 Métodos de cálculo da variação de temperatura.....33

2.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS 36

2.5.1 Curva de Engenharia 36

2.5.2 Curva de Escoamento.....38

2.6 ALTERAÇÃO MICROESTRUTURAL 43
2.7 CÁLCULO DA FORÇA NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM 49
3 MATERIAIS E MÉTODOS 52
3.1 CONCEITO EXPERIMENTAL 52
3.2 ENSAIO DE ESTAMPAGEM A QUENTE 55
3.3 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA 58
3.3.1 Composição química 58
3.3.2 Microestrutura 59
3.3.3 0ureza da matéria prima 60
3.3.4 Ensaio de tração a frio 60
3.4 MEDIÇÃO DA FORÇA DE ESTAMPAGEM 62
3.5 MEDIÇÕES DE MICRODUREZA 64
3.6 IMAGENS METALOGRÁFICAS 64
4 ANÁLISE EXPERIMENTAL 66
4.1 PROCESSO USADO: RESULTADOS 66
4.2 FORÇA DE ESTAMPAGEM MEDIDA 67
4.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS APÓS A ESTAMPAGEM A QUENTE 74
4.3.1 0ureza: resultados 74
4.2 ALTERAÇÃO MICROESTRUTURAL: RESULTADOS 75
4.5 FORÇA DE ESTAMPAGEM CALCULADA 78
5 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS 84
6 CONCLUSÕES 87
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 88
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Etapas empregadas no desenvolvimento do trabalho.....18
Figura 2: (a) Microestrutura esquemática dos aços bifásicos. (b) Metalografia mostrando a matriz de ferrita com ilhas de martensita. Fonte: WORLD AUTO STEEL, (2014).....20
Figura 3: (a) Microestrutura esquemática dos aços de plasticidade induzida por transformação. (b) Metalografia do aço TRIP 690. Fonte: WORLD AUTO STEEL, (2014).....20
Figura 4: Microestrutura do aço martensítico MS 950/1200. Fonte: (WORLD AUTO STEEL, 2014).....21
Figura 5: Relação entre tensão limite de resistência (Rm) e alongamento (o) para vários tipos de aços de alta resistência. Fonte: (WORLD AUTO STEEL, 2014).....22
Figura 6: Exemplos de peças fabricadas por estampagem a quente em um automóvel. Fonte: KAR8ASIAN e TEKKAYA, (2010). 23
Figura 7: Processo de estampagem a quente direta. Fonte: GORNI, (2010).....25
Figura 8: Processo de estampagem a quente indireto Fonte: GORNI, (2010).....25
Figura 9: Microestrutura do aço DIN 27MnCr85 como recebido na direção de laminação. Fonte: NADERI, (2007). 27
Figura 10: Diagrama CCT para o aço DIN 27MnCr85 austenitizado a 880°C por oito minutos. Fonte: NADERI, (2007).....27
Figura 11: Contorno de grão da austenita do aço DIN 27MnCr85 após austenitização a 900°C. Fonte: NADERI, (2007). 28
Figura 12: Diagrama esquemático da temperatura x tempo durante o processo de estampagem a quente de aços de alta resistência. Fonte: 8ARIANI, et al, (2008)...30
Figura 13: Diagrama esquemático do ciclo térmico do processo de estampagem a quente. Fonte: GORNI, (2010). 30
Figura 14: Transferência de calor na interface matriz-geratriz durante o processo de estampagem a quente. Fonte: CHANG, et al., (2016).....32

Figura 15: Influência da pressão de contato na transferência de calor para o processo de estampagem a quente: a) baixa pressão de contato; b) alta pressão de contato. Fonte: CHANG, et al., (2016). 32
Figura 16: Relação entre a pressão de contato, a transferência de calor e os mecanismos de transferência de calor envolvidos. Fonte: MERKLEIN, et al., (2016). 33
Figura 17: Influência da pressão de contato na interface ferramenta/geratriz e temperatura da água de refrigeração na velocidade de resfriamento da chapa para o processo de estampagem a quente. Fonte: TOLOTTI, et al., (2016). 33
Figura 18: Diagrama convencional tensão versus deformação. Fonte: SCHAEFFER, (2004). 37
Figura 19: Diagrama tensão x deformação com a curva verdadeira e a curva convencional. Fonte: SCHAEFFER, (2004). 38
Figura 20: Curva de escoamento do aço DIN 27MnCrB5, calculada através da equação de Hensel-Spittel considerando-se uma velocidade de deformação (lfJ) de 0,1. 40
Figura 21: Curvas de escoamento para o aço DIN 22MnB5 para diferentes temperaturas. Fonte: MERKLEIN e LECHLER, (2006). 40
Figura 22: Curva de escoamento do aço DIN 22MnB5, calculada através da equação de Hensel-Spittel considerando-se uma velocidade de deformação (lfJ) de 0,1. 41
Figura 23: Curva de escoamento para o aço DIN 27MnCrB5 para quatro diferentes condições de processamento. Fonte: NADERI, (2007). 42
Figura 24: Propriedades mecânicas do aço DIN 22MnB5 durante o processo de estampagem a quente. Fonte: MERKLEIN e LECHLER, (2006).....43
Figura 25: Alteração da microestrutura do material da chapa. Fonte: KARBASIAN e TEKKAYA, (2010). 44
Figura 26: Alteração das propriedades mecânicas pelo processo de estampagem a quente: 1) aço como fornecido, 2) austenitização, 3) aço estampado a quente. WORLD AUTO STEEL, (2014). 46
Figura 27: Microestrutura obtida pela estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5: (a) temperatura de austenitização de 870°C e (b) temperatura de austenitização de 900°C. Fonte: NADERI, (2007). 47

Figura 28: Ferramenta para estampagem a quente composto por punção refrigerado e matriz sem refrigeração. Fonte: NADERI, (2007). 48
Figura 29: Evolução da força de estampagem (F) e da temperatura (8) durante a estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5. Fonte: NADERI, (2007). 48
Figura 30: Geometria e dimensões da chapa e da peça estampada. 49
Figura 31: Ferramenta usada nos ensaios de estampagem a quente. Conjunto composto por matriz (em corte parcial), prensa chapa (em corte parcial) e punção. 52
Figura 32: Ferramenta de estampagem a quente usada nos ensaios. Composta por matriz, punção e prensa-chapa. 53
Figura 33: Desenho do punção usado na ferramenta para o ensaio de estampagem a quente. 54
Figura 34: Desenho da matriz usada na ferramenta para o ensaio de estampagem a quente. 54
Figura 35: Desenho do prensa chapa usado na ferramenta para o ensaio de estampagem a quente. 55
Figura 36: Esquema do ensaio de estampagem a quente tipo direto. 56
Figura 37: Forno elétrico utilizado para o aquecimento das chapas, modelo Sanchis do LdTM. 57
Figura 38: Ensaio de estampagem a quente: (a) posicionamento da chapa no interior da ferramenta; (b) início do processo de estampagem; (c) final do processo de estampagem. Matriz e prensa chapas representados em corte parcial para melhor visualização. 57
Figura 39: Ferramenta em final de curso durante o processo de estampagem. A matriz e o prensa chapa estão representados em corte parcial para melhor visualização. 58
Figura 40: Metalografia do aço DIN 27MnCrB5. Ataque com nital 2%. 60
Figura 41: Corpo de prova em formato de tira usado nos ensaios de tração. 61
Figura 42: Máquina de ensaios universal modelo Emic 100, com capacidade de 100kN. 61
Figura 43: Curva obtida a partir do ensaio de tração para o aço DIN 27MnCrB5. 62
Figura 44: Prensa hidráulica de dupla ação Dan-Presse do LdTM. 63
Figura 45: Sistema de aquisição de dados Spider do LdTM. 63
Figura 46: Micrometro utilizado para as medições de dureza. Fonte: LdTM. 64

Figura 47: Regiões de análise na peça estampada a quente: (a) região do prensa chapa; (b) região da parede lateral; (c) região do punção.....65
Figura 48: Microscópio óptico utilizado para obter as imagens metalográficas.....65
Figura 49: Procedimento experimental do ensaio de estampagem a quente.....66
Figura 50: Variação da força de estampagem medida (Fpe) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 750°C.....67
Figura 51: Variação da força do prensa chapa medida (Fpc) e da pressão do prensa chapa medida (Ppc) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 750°C. 68
Figura 52: Variação abrupta da força de estampagem medida (Fpe) e da força do prensa chapa medida (Fpc) no final do curso da ferramenta, para o ensaio de estampagem realizado a 750°C. 69
Figura 53: Variação da força de estampagem medida (Fpe) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 850°C.....70
Figura 54: Variação da força do prensa chapa medida (Fpc) e da pressão do prensa chapa medida (Ppc) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 850°C. 70
Figura 55: Variação abrupta da força de estampagem medida (Fpe) e da força do prensa chapa medida (Fpc) no final do curso da ferramenta, para o ensaio de estampagem realizado a 850°C. 71
Figura 56: Variação da força de estampagem medida (Fpe) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 950°C.....72
Figura 57: Variação da força do prensa chapa medida (Fpc) e da pressão do prensa chapa medida (Ppc) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 950°C. 72
Figura 58: Variação abrupta da força de estampagem medida (Fpe) e da força do prensa chapa medida (Fpc) no final do curso da ferramenta, para o ensaio de estampagem realizado a 950°C. 73
Figura 59: Variação da força de estampagem medida (Fpe) x profundidade de estampagem (h1) para as três temperaturas dos ensaios de estampagem a quente. 73
Figura 60: Configuração da ferramenta de estampagem em seu fim de curso.....74

Figura 61: Durezas das peças estampadas a quente para as três temperaturas de análise para: região do prensa chapa; região da parede lateral; região do punção. . 75
Figura 62: Microestruturas obtidas no ensaio de estampagem a quente a 750°C: (a) região do prensa chapa; (b) região da parede lateral; (c) região do punção. 76
Figura 63: Microestruturas obtidas no ensaio de estampagem a quente a 850°C: (a) região do prensa chapa; (b) região da parede lateral; (c) região do punção. 77
Figura 64: Microestruturas obtidas no ensaio de estampagem a quente a 950°C: (a) região do prensa chapa; (b) região da parede lateral; (c) região do punção. 78
Figura 65: Variação da força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 750°C..... 81
Figura 66: Variação da força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 850°C..... 81
Figura 67: Variação da força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 950°C..... 82
Figura 68: Variação da força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para as três temperaturas dos ensaios de estampagem a quente. 82
Figura 69: Comparação da variação da força de estampagem medida (Fpe) e força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para as três temperaturas dos ensaios de estampagem a quente..... 83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química dos aços usados para estampagem a quente. Fonte: KARBASIAN e TEKKAYA, (2010). 26
Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço DIN 27MnCrB5. Fonte: KARBASIAN e TEKKAYA, (2010). 28
Tabela 3: Coeficientes da equação de Hensel-Spittel para a curva de escoamento do aço DIN 27MnCrB5. Fonte: BATALHA e BUTTON, (2016). 39
Tabela 4: Coeficientes da equação de Hensel-Spittel para a curva de escoamento do aço DIN 22MnB5. Fonte: TURETTA, (2008). 41
Tabela 5: Propriedades mecânicas dos aços usados no processo de estampagem a quente. Fonte: KARBASIAN e TEKKAYA, (2010). 46
Tabela 6: Composição química do aço DIN 27MnCrB5 usado nos ensaios. Fonte: BRASMETAL, (2016). 59
Tabela 7: Tensão de escoamento (kf) para o aço DIN 27MnCrB5 para as três temperaturas (8) de ensaio, calculada conforme equação de Hensel-Spittel.....79
Tabela 8: Equações e variáveis utilizadas no cálculo da força de estampagem (Fpt). 79
Tabela 9: Cálculo da força de estampagem ideal (Fid), força de atrito no prensa chapa (Fapc) e força de estampagem (Fp) para as três temperaturas de ensaio.....80

LISTA DE ABREVIATURAS

A Fase Austenita (y-Fe) no diagrama CCT

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

AHSS Aços avançados de alta resistência "Advanced High Strength Steel"

B Fase Bainita

BH Aço endurecido por precipitação "Bake Hardening"

CCT Curva de resfriamento contínuo

CP Aço de fase complexa "Complex Phase"

DIN /nstituto alemão para Normatização "Oeutsches /nstitut für Normung"

DP Aço bifásico "0ual Phase"

F Fase Ferrita (a-Fe) no diagrama CCT

HSLA Alta resistência e baixa liga "High Strength LoW Alloy"

HSS Aços de alta resistência "High Strength Steel"

IF Aço livre de intersticiais "/nterstitial Free"

IF-HS Aço livre de intersticiais e alta resistência "/nterstitial Free and High Strength"

IS Aço inox "/nox Steel"

LdTM Laboratório de Transformação Mecânica

M Fase Martensita

MILD Aço baixo carbono laminado (não acabado) "Mild Steel"

MS Aço martensítico "Martensitic Steel"

P Microconstituinte Perlita (Fe-Fe_3C) no diagrama CCT

TRIP Plasticidade induzida por transformação "Transformation /nduced Plasticity"

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c Superfície de contato.....[m^2]

A_i Área instantânea..... [mm2]

A_{ir} Superfície de irradiação.....[m2]

A_0 Área inicial..... [mm2]

Ac_3 Linha representativa da temperatura de austenitização no gráfico CCT..... [0C]

Apc Área do prensa chapa.....[mm2]

b_0 Largura inicial da chapa.....[mm]

C_s Constante de radiação.....[kJ/(m^2hK^4)]

c_p Calor específico.....[J/(kgK)]

dtJ/dt_{ar} Queda de temperatura da chapa com o ar..... [0C/s] E

Módulo de Young.....[GPa] F

Força..... [N] Fapc

Força de atrito no prensa chapa.....[kN] Fpc

Força de do prensa chapa.....[kN] Fpe

Força de estampagem medida.....[kN] Fpt

Força de estampagem calculada.....[kN] Fid

Força de estampagem ideal.....[kN] h

Coeficiente de transferência de calor.....[W/m^2K] h1

Profundidade de estampagem.....[mm] kf

Tensão de escoamento..... [MPa]

l Comprimento instantâneo..... [mm]

L Comprimento da peça estampada.....[mm]

l_0 Comprimento inicial..... [mm]

L_0 Comprimento da chapa antes da estampagem.....[mm]

M_f Temperatura do final da transformação martensítica.....[0C]

M_s Temperatura de início da transformação martensítica.....[0C]

Ppc Pressão do prensa chapa.....[N/mm2]

Q_g Perda térmica da geratriz.....[kJ]

Q_s Calor absorvido pela matriz.....[kJ]

Rm Tensão limite de resistência.....[MPa]

s_0 Espessura inicial da chapa.....[mm]

t Tempo.....[s]

T_{abs} Temperatura absoluta.....[K] v Velocidade de deslocamento do punção.....[mm/s] V Volume da geratriz.....[dm^3]

SÍMBOLOS GREGOS

	Alongamento	[%]
rupt	Alongamento de ruptura após o ensaio	[%]
LJI	Variação absoluta do comprimento	[mm]
LJ9	Retorno elástico	[0]
LJtJ	Perda de temperatura	[0C]
	Deformação relativa ou de engenharia	[-], [%]
J.	Coeficiente de atrito	[-]
	Deformação verdadeira	[-]
q	Velocidade de deformação	[s^{-1}]
a	Tensão normal	[MPa]
a_e	Limite de escoamento	[MPa]
p	Densidade	[kg/dm3]
tJ	Temperatura da geratriz	[0C]
tJ_{mg}	Temperatura média da geratriz	[0C]
tJ_{00}	Temperatura da matriz de estampagem considerada invariável	[0C]

RESUMO

Este trabalho avalia as propriedades mecânicas, microestrutura resultante e força de estampagem da liga DIN 27MnCrB5 para o processo de estampagem a quente nas temperaturas de aquecimento de 750°C, 850°C e 950°C. Para isso foram realizados ensaios nas três temperaturas e medidos os valores da força necessária para a estampagem da chapa, que foi aplicada em uma área de 30mm x 1,50mm. A partir da peça estampada foram realizadas análises metalográficas da microestrutura resultante e medições de dureza para a correlação com as propriedades mecânicas. Para as temperaturas de aquecimento de 750°C e 850°C não foi verificada microestrutura martensítica nas peças estampadas. Para o ensaio realizado com uma temperatura de aquecimento de 950°C ocorreu transformação martensítica na peça na região que esteve em contato com o prensa chapa e a matriz. Esta transformação metalúrgica resultou em valores de dureza de 715±17$HV_{0,2}$ em comparação com a condição inicial da chapa, cuja dureza era de 187±5$HV_{0,2}$. As medições de força de estampagem para as três temperaturas de ensaio indicam uma redução da força com o aumento da temperatura de aquecimento da chapa. Para a temperatura de aquecimento da chapa de 750°C o valor médio da força de estampagem foi de 14kN, para a temperatura de 850°C o valor médio da força de estampagem foi de 9kN, enquanto para a temperatura de 950°C foi encontrado o valor médio de 5kN.

Palavras chaves: estampagem a quente, temperatura de aquecimento, microestrutura, dureza

ABSTRACT

This work evaluates the mechanical properties, resulting microstructure and stamping force of the DIN 27MnCrB5 alloy for the hot stamping process at the heating temperatures of 750°C, 850°C and 950°C. For this, tests were carried out at the three temperatures and the values of the force required for the stamping of the sheet were measured, which was applied in an area of 30mm x 1,50mm. From the stamped part metallographic analyzes of the resulting microstructure and hardness measurements were performed for the correlation with the mechanical properties. For the heating temperatures of 750°C and 850°C, no martensitic microstructure was observed in the stamped parts. For the test performed with a heating temperature of 950°C martensitic transformation occurred in the part in the region that was in contact with the blank holder and the die. This metallurgical transformation resulted in hardness values of 715±17$HV_{0,2}$ compared to the initial condition of the sheet, whose hardness was 187±5$HV_{0,2}$. Stamping force measurements for the three test temperatures indicate a reduction in force with the increase of the sheet heating temperature. For the sheet heating temperature of 750°C the average value of the stamping force was 14kN, at the temperature of 850°C the average value of the stamping force was 9kN, while at the temperature of 950°C it was found The average value of 5kN.

Key words: hot stamping, heating temperature, microstructure, hardness

1 INTRODUÇÃO

Atualmente grandes desafios estão sendo enfrentados pela indústria para a produção de produtos mais leves e com maior resistência mecânica. No caso específico da indústria automobilística, estes desafios estão sendo motivados pelas exigências em relação à redução da emissão de poluentes na atmosfera e pelo aumento da segurança dos veículos.

Para atingir esses novos padrões, a indústria tem feito uso de novos materiais, que apresentam melhores propriedades mecânicas. Estes materiais são chamados de aços avançados de alta resistência (AHSS) (NADERI, 2011). Ainda neste contexto as chapas apresentam grande uso, principalmente pela sua aplicação quase universal. Novamente no caso específico da indústria automobilística as chapas são muito empregadas, incluindo em aplicações estruturais.

Os aços avançados de alta resistência trazem grandes vantagens pelo seu emprego, possibilitando a fabricação de peças de menor espessura, muitas vezes com ganhos em resistência mecânica. Porém esses novos materiais não podem simplesmente substituir os aços tradicionais que já estão em uso. Para a sua utilização é necessário desenvolver novos parâmetros técnicos para a sua estampagem.

Em função da alta resistência mecânica, o retorno elástico que é um fenômeno indesejável presente nos processos de estampagem, torna-se mais acentuado (GORNI, 2010). Outras consequências da utilização de chapas de maior resistência mecânica são os maiores esforços necessários para a sua conformação e a redução da sua conformabilidade, devido a menor ductilidade destas ligas em temperatura ambiente.

Dentre os materiais que são classificados como aços avançados de alta resistência estão os aços martensíticos (MS), que são processados pelo processo de estampagem a quente. Estes aços apresentam alta resistência mecânica após

serem estampados a quente, o que os tornam apropriados para utilizações estruturais.

BATALHA e BUTTON, (2016) em sua pesquisa estudaram a curva de escoamento do aço DIN 27MnCrB5 utilizada no estudo do processo de estampagem a quente.

1.1 Formulação do problema

O processo de estampagem a quente é uma tecnologia promissora, entretanto diferente dos processos de estampagem convencionais. Por este motivo necessita de novas pesquisas, para o conhecimento dos parâmetros técnicos necessários para a produção de peças com elevados níveis de resistência mecânica (KARBASIAN e TEKKAYA, 2010).

NADERI, (2007) em sua pesquisa avaliou a aplicação de diferentes aços no processo de estampagem a quente, avaliando propriedades mecânicas e microestrutura obtidas. Para o caso específico do aço DIN 27MnCrB5 avaliou a influência da temperatura de austenitização nas propriedades da peça estampada e também na microestrutura, obtendo para as temperaturas de austenitização 870°C e 900°C a formação de martensita.

Na investigação de HENRIQUES e BUTTON, (2012) também foi avaliado o processo de estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5 para as temperaturas de austenitização de 850°C e 950°C.

1.2 Justificativa

A pesquisa sobre o processo de estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5 pode fornecer subsídios para a conhecimento da influência dos parâmetros empregados no processo sobre a peça obtida. A temperatura de austenitização da chapa tem influência sobre a microestrutura final assim como as propriedades

mecânicas, o que por sua vez tem grande importância no projeto de determinado componente e também na especificação de seu processo de fabricação.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o processo de estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5, mais especificamente com relação a microestrutura final obtida, dureza da peça estampada e também a força necessária para a sua conformação.

1.4 Objetivos específicos

- Determinar a tensão de escoamento do aço DIN 27MnCrB5 na temperatura de estampagem a quente.
- Medir a força necessária para o processo de estampagem a quente.
- Calcular a força de estampagem.
- Avaliar as microestruturas obtidas pelo processo de estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5.
- Medir a dureza das peças estampadas a quente.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho inicia com uma revisão bibliográfica acerca dos principais conceitos relacionados ao processo de estampagem a quente, seguido da metodologia utilizada, procedimento experimental e resultados obtidos.

A Figura 1 ilustra as etapas empregadas no desenvolvimento experimental deste trabalho.

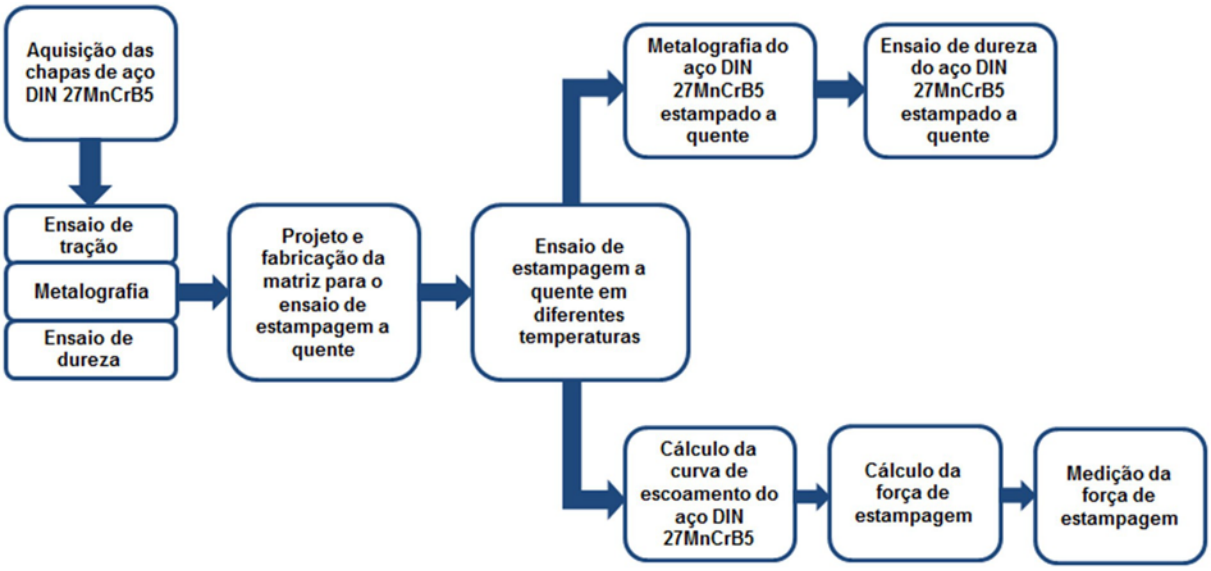

Figura 1: Etapas empregadas no desenvolvimento do trabalho.

Para a execução deste trabalho inicialmente foram realizados ensaios de tração a frio, dureza e metalografia para a caracterização da matéria prima utilizada nos ensaios. Após a realização dos ensaios experimentais, foram realizadas análises da microestrutura das peças obtidas além dos ensaios de dureza.

A curva de escoamento do aço DIN 27MnCrB5 foi obtida para a determinação da força de estampagem calculada, que foi comparada com a força de estampagem medida durante os ensaios experimentais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aços avançados de alta resistência

Para a indústria automobilística há uma tendência cada vez maior pela redução do consumo de combustível e emissões de poluentes lançados na atmosfera. Para atender a essas solicitações a indústria tem respondido com a redução do peso de seus veículos, utilizando chapas de aço com maior resistência mecânica e menor espessura (CHANG, et al., 2016).

Novos materiais, chamados aços avançados de alta resistência, conhecidos como, Advanced High Strength Steel - AHSS estão em continua evolução. Esses aços apresentam melhores propriedades mecânicas, como por exemplo, maior tensão de escoamento, sendo desenvolvidos para atender solicitações cada vez mais exigentes em relação à redução de peso e da matéria-prima utilizada.

A família de aços avançados de alta resistência AHSS, incluem os aços bifásicos (DP), aços de plasticidade induzida por transformação (TRIP), aços de fase complexa (CP), aços martensíticos (MS), entre outros (WORLD AUTO STEEL, 2014).

Os aços bifásicos (DP) possuem uma microestrutura composta por uma matriz ferrítica e ilhas de martensita como uma segunda fase. O nível de resistência mecânica dos aços bifásicos é influenciado pela fração de martensita presente na sua microestrutura (WORLD AUTO STEEL, 2014). De acordo com TIGRINHO et al., (2011) a configuração de ilhas duras em uma matriz macia apresenta propriedades mecânicas que garantem boa conformabilidade ao aço. A Figura 2 mostra de forma genérica a microestrutura dos aços bifásicos.

Os aços de plasticidade induzida por transformação (TRIP) possuem uma microestrutura composta por uma matriz de ferrita com austenita retida em fração volumétrica de pelo menos 5%. Martensita e bainita também fazem parte da microestrutura. Essa configuração permite que durante a conformação este aço

apresente altos valores de alongamento uniforme. Durante a sua deformação plástica a austenita retida pode transforma-se progressivamente em martensita (WORLD AUTO STEEL, 2014). A Figura 3 (a) mostra de forma esquemática a microestrutura dos aços de plasticidade induzida por transformação e a Figura 3 (b) mostra a microestrutura do aço TRIP 690.

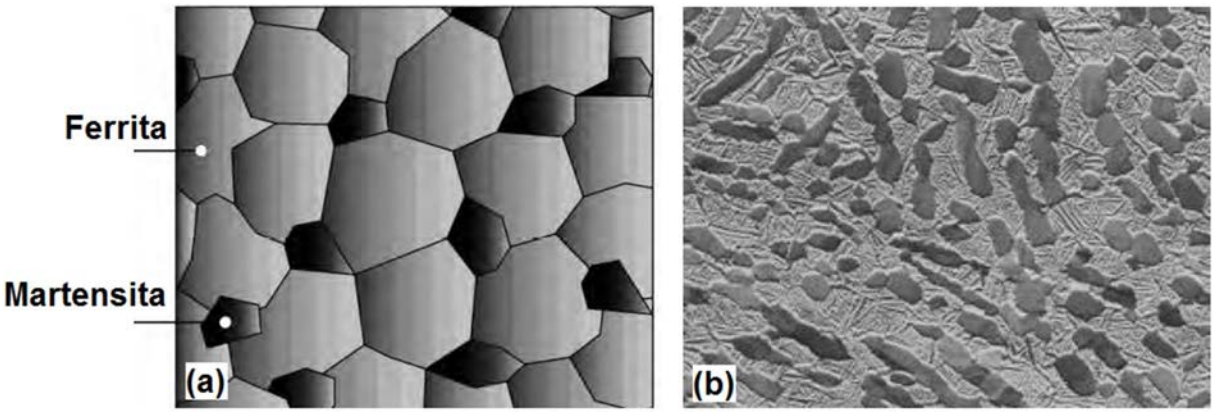

Figura 2: (a) Microestrutura esquemática dos aços bifásicos. (b) Metalografia mostrando a matriz de ferrita com ilhas de martensita. Fonte: WORLD AUTO STEEL, (2014).

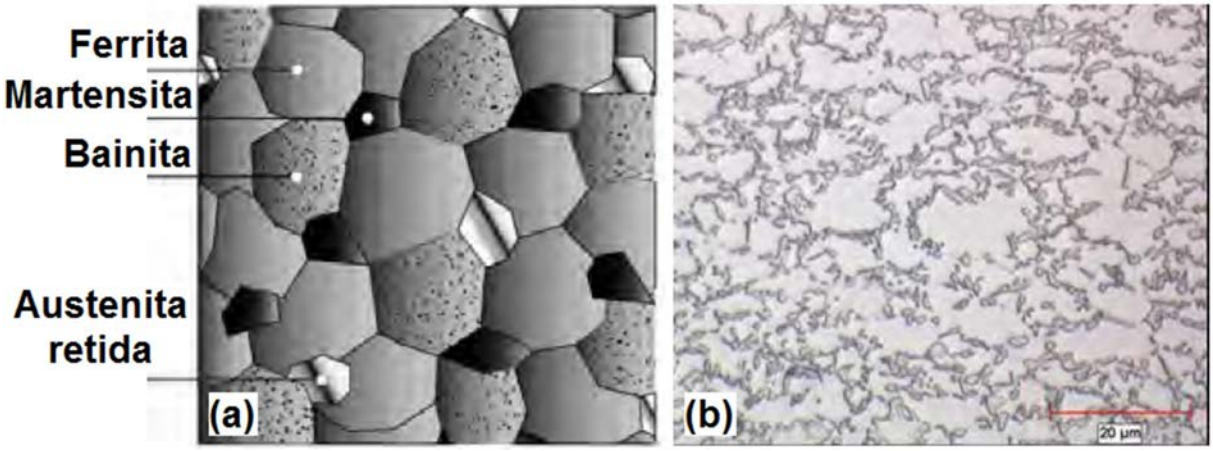

Figura 3: (a) Microestrutura esquemática dos aços de plasticidade induzida por transformação. (b) Metalografia do aço TRIP 690. Fonte: WORLD AUTO STEEL, (2014).

Os aços de fase complexa apresentam microestrutura composta por pequenas quantidades de martensita, austenita retida, perlita em uma matriz de ferrita e bainita (WORLD AUTO STEEL, 2014).

Os aços martensíticos possuem microestrutura martensítica e elevados valores de resistência mecânica. Sua microestrutura martensítica é oriunda do rápido resfriamento da microestrutura austenítica das chapas laminadas a quente. Sua microestrutura pode conter também pequenas quantidades de bainita e ferrita, além da martensita (WORLD AUTO STEEL, 2014). A Figura 4 apresenta a microestrutura martensítica do aço MS 950/1200.

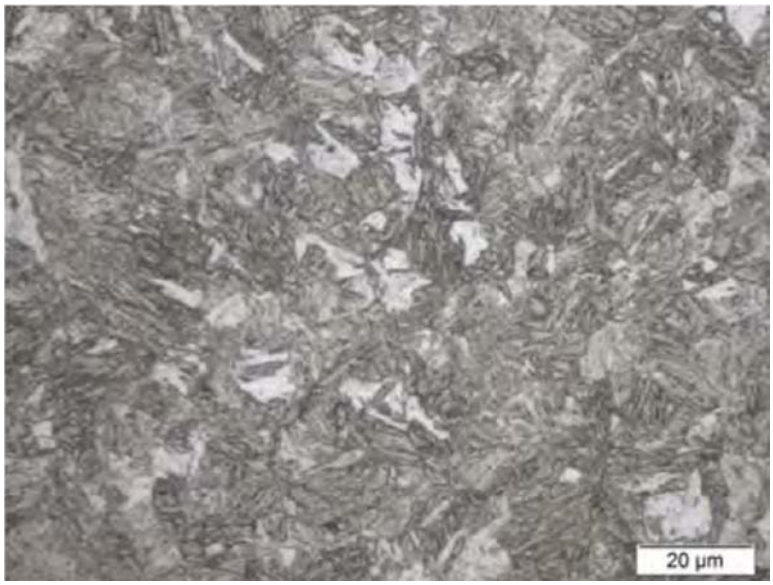

Figura 4: Microestrutura do aço martensítico MS 950/1200. Fonte: (WORLD AUTO STEEL, 2014).

De acordo com GORNI, (2008) a microestrutura martensítica também pode ser obtida pelo processo de estampagem a quente, onde o rápido resfriamento, necessário para a transformação martensítica da microestrutura do aço, acontece dentro da matriz de estampagem. Para isso são usados aços ligados ao boro.

A Figura 5 apresenta a relação existente entre a tensão limite de resistência (Rm) e o alongamento (ó) para vários aços de alta resistência.

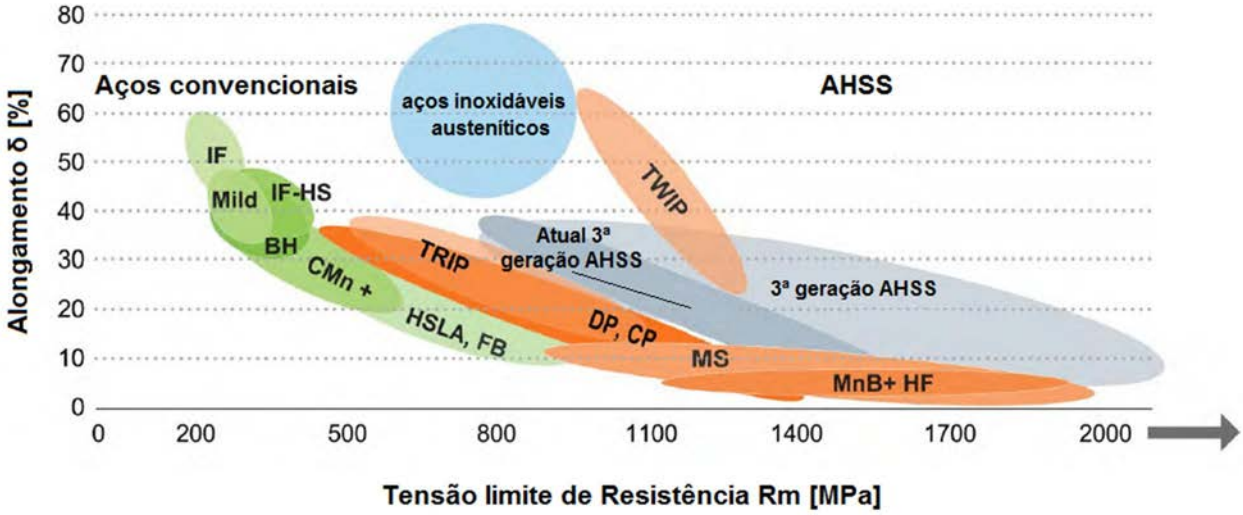

Figura 5: Relação entre tensão limite de resistência (Rm) e alongamento (ó) para vários tipos de aços de alta resistência. Fonte: (WORLD AUTO STEEL, 2014).

2.2 Processo de estampagem a quente

Chapas de aço com maior tensão de escoamento possuem em geral uma menor conformabilidade. Como alternativa para aumentar a deformação desses aços tem-se a estampagem a quente, que ocorre em temperaturas que permitam a recristalização dinâmica da microestrutura do material (GORNI, 2010).

Através do processo de estampagem a quente podem ser obtidas peças com elevadas propriedades mecânicas e baixo peso (LI, et al., 2016). Na Figura 6 são apresentados exemplos de componentes estruturais de um automóvel fabricados por estampagem a quente, tais como: para-choque frontal, reforço do painel, barra de impacto lateral, túnel, pilar B interior, barra do teto e parede frontal (KARBASIAN e TEKKAYA, 2010).

O processo de estampagem a quente une duas características desejáveis ao processo de conformação de chapas, maiores deformações do material e elevada resistência mecânica para a peça final. Isto se torna possível, pois o processo de estampagem a quente ocorre a elevadas temperaturas, onde tem-se um aumento da conformabilidade do material.

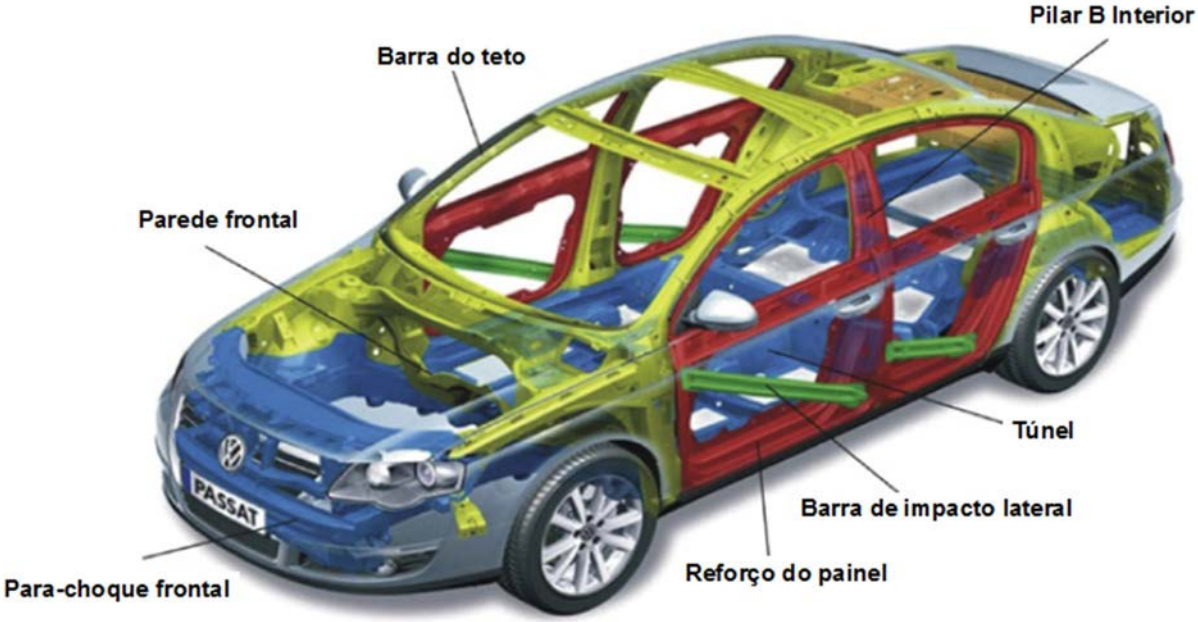

Figura 6: Exemplos de peças fabricadas por estampagem a quente em um automóvel. Fonte: KARBASIAN e TEKKAYA, (2010).

No processo de estampagem a quente a conformação e o tratamento térmico acontecem simultaneamente no interior da ferramenta. Para isso a geratriz é previamente aquecida acima da sua temperatura de austenitização e resfriada até a temperatura ambiente no interior da matriz de estampagem (MAENO, et al., 2015).

Esse tratamento térmico consiste na têmpera da chapa, como consequência do rápido resfriamento da peça estampada em contato com as matrizes refrigeradas. A partir deste rápido resfriamento tem-se uma transformação metalúrgica de uma microestrutura austenítica para uma microestrutura predominantemente martensítica, que lhe confere elevado grau de resistência mecânica (ZHENG, et al., 2015).

As ligas de aço DIN 22MnB5, DIN 27MnCrB5 e DIN 37MnB4 destacam-se na literatura como opções para o processo de estampagem a quente. Ainda estes três aços apresentam capacidade para a transformação completa de sua microestrutura

em martensita durante o processo de estampagem a quente (PELLEGRINI, 2010) e (NADERI, 2007).

Ainda conforme KANG et al., (2015), o processo de estampagem a quente é uma das mais promissoras tecnologias de conformação, por conseguir componentes conformados de alta resistência mecânica.

Uma das principais aplicações da estampagem a quente é a indústria automobilística, onde com o aumento da resistência mecânica conseguem-se reduções de espessura da chapa e com isso redução de peso. Atualmente a estampagem a quente é usada para a fabricação de componentes estruturais de formas complexas e grande tamanho, onde a estampagem a frio de aços avançados de alta resistência AHSS encontra limitações devido à sua conformabilidade reduzida e também ao retorno elástico.

De acordo com TURETTA, (2008) o processo de estampagem a quente atualmente está sendo largamente utilizado pela indústria automotiva. Isto devido à possibilidade de produção de peças estampadas com elevada resistência mecânica, o que possibilita uma redução da relação resistência/peso, além da viabilidade de obtenção de peças com precisão geométrica, devido à redução do retorno elástico.

2.2.1 Características do processo direto e indireto

Com relação ao processo, existem duas variantes para a estampagem a quente: processo de estampagem a quente direto e processo de estampagem a quente indireto (KARBASIA e TEKKAYA, 2010).

No processo de estampagem a quente direto, que é apresentado na Figura 7, a geratriz é aquecida até a sua temperatura de austenitização e após estampada na matriz refrigerada. O processo direto aplica-se a peças de geometria mais simples (GORNI, 2010).

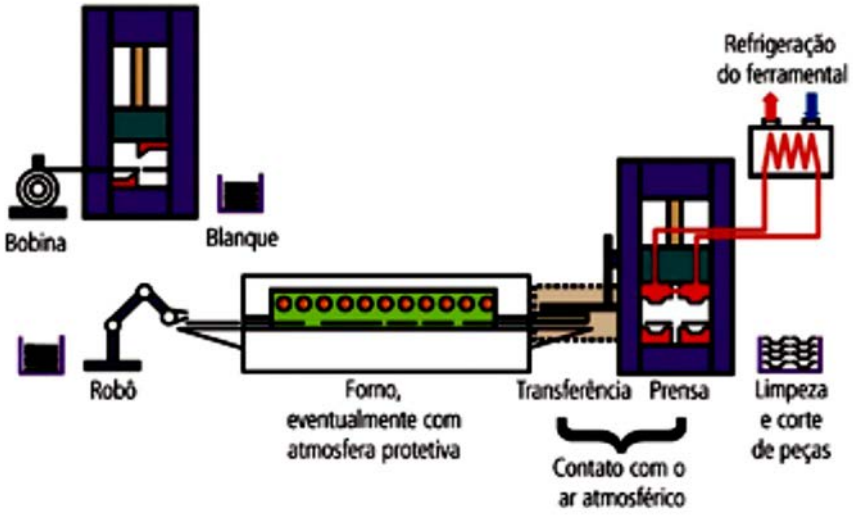

Figura 7: Processo de estampagem a quente direta. Fonte: GORNI, (2010).

Para o processo de estampagem a quente indireto, que é apresentado na Figura 8, a geratriz é estampada a frio até aproximadamente 90% da sua deformação em relação a sua geometria final, após a peça é aquecida até sua temperatura de austenitização e estampada na matriz refrigerada, onde é temperada (GORNI, 2010). O processo de estampagem a quente indireto pode ser empregado para a produção de peças que necessitam de grandes deformações na sua fabricação (SCHAEFFER, 2004).

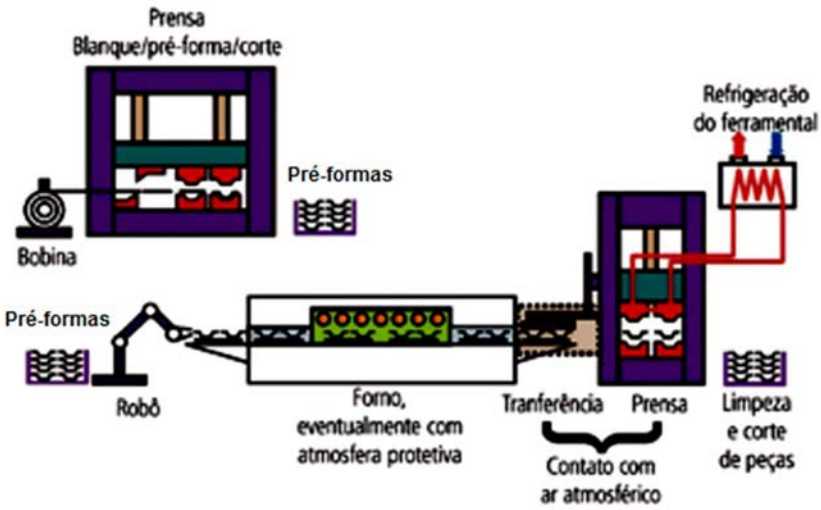

Figura 8: Processo de estampagem a quente indireto Fonte: GORNI, (2010).

Ainda segundo SCHAEFFER, (2004), após a retirada da peça estampada do interior das matrizes é comum a utilização de um processo de jateamento para remover eventuais camadas de óxido que se formaram na sua superfície.

2.3 Materiais utilizados para a estampagem a quente

2.3.1 Considerações gerais

Para o processo de estampagem a quente tem-se usado aços com uma pequena quantidade de boro. Essas chapas são conformadas e após temperadas no interior das matrizes refrigeradas, obtendo-se elevados valores para o limite de escoamento, sem retorno elástico (GORNI, 2010).

Na Tabela 1 são apresentados os principais aços AHSS utilizados para o processo de estampagem a quente com as suas respectivas composições químicas (KARBASIAN e TEKKAYA, 2010).

Tabela 1: Composição química dos aços usados para estampagem a quente. Fonte: KARBASIAN e TEKKAYA, (2010).

Aço (DIN)	Al	B	C	Cr	Mn	N	Ni	Si	Ti
20MnB5	0,04	0,001	0,16	0,23	1,05		0,01	0,4	0,034
22MnB5	0,033	0,002	0,23	0,16	1,18	0,005	0,12	0,22	0,040
8MnCrB3	0,05	0,002	0,07	0,37	0,75	0,006	0,01	0,21	0,048
27MnCrB5	0,03	0,002	0,25	0,34	1,24	0,004	0,01	0,21	0,042
37MnB4	0,03	0,001	0,33	0,19	0,81	0,006	0,02	0,31	0,046

2.3.2 Aço DIN 27MnCr85

A microestrutura do aço DIN 27MnCrB5 antes do processo de estampagem a quente é composta por 30 por cento de perlita e 70 por cento de ferrita, conforme apresentado na Figura 9 (NADERI, 2007).

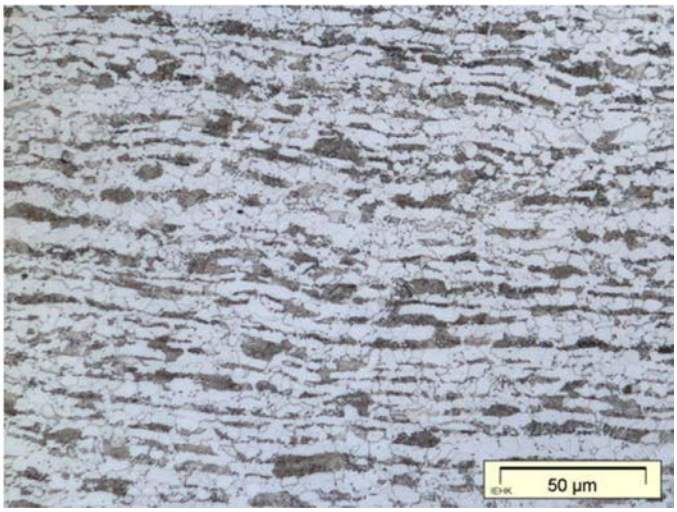

Figura 9: Microestrutura do aço DIN 27MnCrB5 como recebido na direção de laminação. Fonte: NADERI, (2007).

Para o aço DIN 27MnCrB5, a temperatura de austenitização recomendada é 880°C, conforme informação obtida na Figura 10. Também para que a peça final, após ser estampada, apresente uma microestrutura totalmente martensítica a velocidade crítica para o resfriamento no interior da matriz é de 37°C/s (NADERI, 2007).

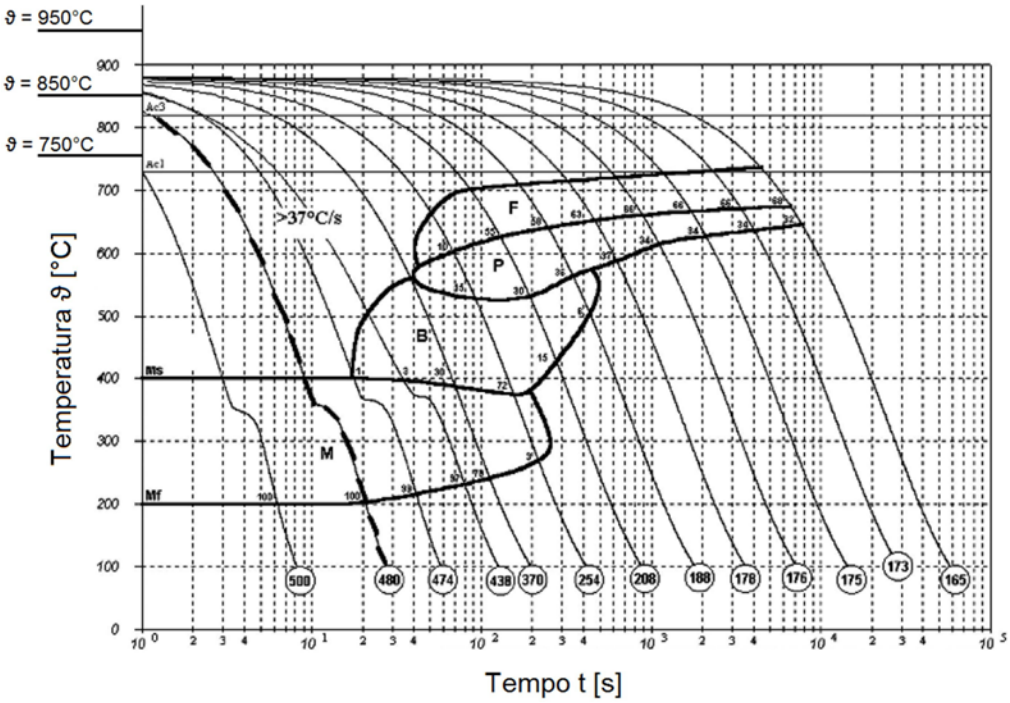

Figura 10: Diagrama CCT para o aço DIN 27MnCrB5 austenitizado a 880°C por oito minutos. Fonte: NADERI, (2007).

Segundo NADERI, (2007), com velocidades de resfriamento abaixo da velocidade crítica a microestrutura obtida será composta por ferrita e perlita.

A Tabela 2 apresenta os valores de tensão de escoamento (ae) e tensão máxima (Rm) para o aço DIN 27MnCr85.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço DIN 27MnCr85. Fonte: KAR8ASIAN e TEKKAYA, (2010).

Aço	Temperatura de início da transformação martensítica [°C]	Velocidade de resfriamento critica [°C/s]	Tensão de escoamento σe [MPa]		Tensão máxima Rm [MPa]	
			Como fornecido	Estampado a quente	Como fornecido	Estampado a quente
DIN 27MnCrB5	400	37	478	1097	638	1611

A Figura 11 apresenta uma micrografia que revela o contorno de grão da austenita para o aço DIN 27MnCr85, que foi austenitizado a uma temperatura de 00 C.

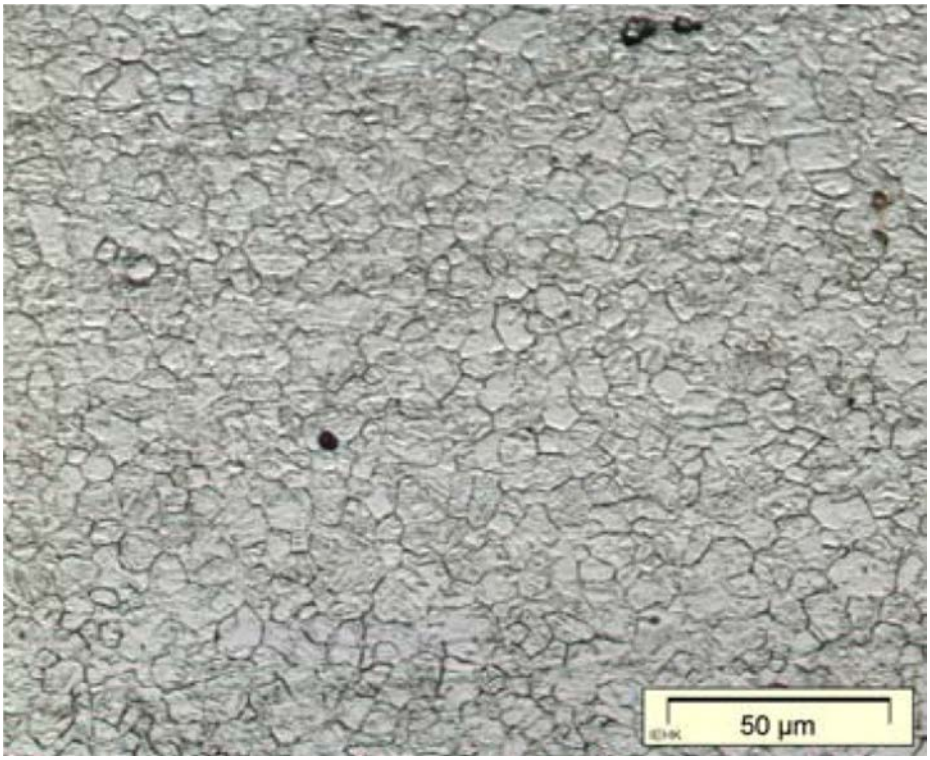

Figura 11: Contorno de grão da austenita do aço DIN 27MnCr85 após austenitização a 00°C. Fonte: NADERI, (2007).

2.4 Ciclo térmico

O processo de estampagem a quente inicia-se com o aquecimento da chapa até a sua temperatura de austenitização, em seguida a chapa é transferida para o interior das matrizes, onde é estampada. Na sequência a chapa é mantida no interior das matrizes para seu resfriamento e têmpera até uma temperatura de aproximadamente 150°C (NEUGE8AUUER, et al., 2011).

Nos processos de estampagem a quente a chapa é previamente aquecida até uma temperatura acima da sua temperatura de austenitização. Isto para garantir a transformação metalúrgica, como consequência do rápido resfriamento.

A Figura 12 apresenta um diagrama esquemático da variação da temperatura da chapa em função do tempo para um processo de estampagem a quente de aços de alta resistência. A microestrutura inicial é composta por ferrita e perlita, com baixa resistência mecânica na temperatura ambiente. A microestrutura final, resultante da estampagem a quente, é composta por martensita e apresenta alta resistência mecânica. De acordo com TURRETA, (2008) a temperatura de início da conformação mecânica fica entre 850°C e 50°C, onde após a estampagem a chapa é mantida no interior da ferramenta de estampagem a quente até uma temperatura de 150°C.

O tempo de transferência da chapa do forno de aquecimento para a ferramenta de estampagem deve ser o menor possível, isto para reduzir a perda térmica nesta etapa do processo. De acordo com MERKLEIN, et al., (2006) nas aplicações industriais que fazem uso de robôs para a transferência da chapa do forno de aquecimento até a ferramenta de estampagem a quente, o tempo para a transferência é inferior a 3 segundos.

Segundo A8DULHAY, et al., (2011), durante a transferência do forno até a ferramenta de estampagem, a chapa aquecida perde calor por convecção e radiação com o ar ambiente.

Para o caso específico do aço DIN 27MnCr85 a velocidade mínima de resfriamento para que a microestrutura resultante seja completamente martensítica

deve ser de 37°C/s (NADERI, 2007). Este valor de velocidade de resfriamento refere-se ao instante em que a chapa aquecida encontra-se no interior da ferramenta de estampagem a quente.

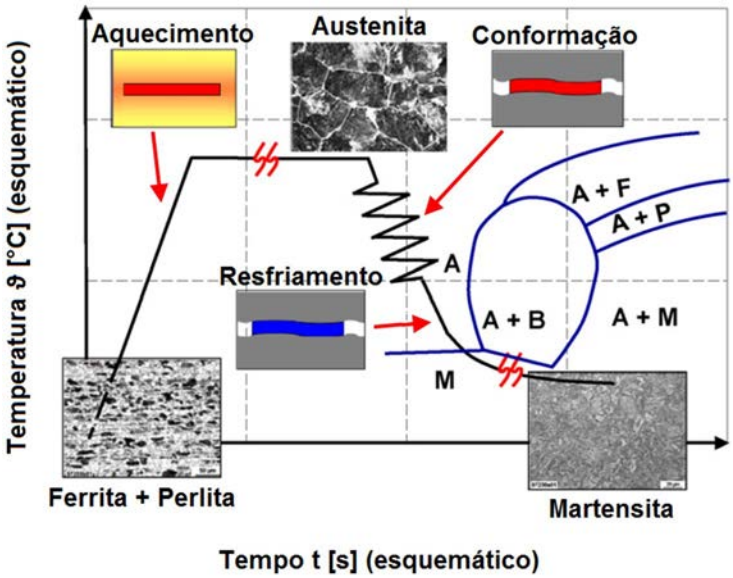

Figura 12: Diagrama esquemático da temperatura x tempo durante o processo de estampagem a quente de aços de alta resistência. Fonte: 8ARIANI, et al, (2008).

A Figura 13 apresenta um diagrama esquemático do ciclo térmico para o processo de estampagem a quente. São apresentadas informações da variação da temperatura ao longo do tempo o processo.

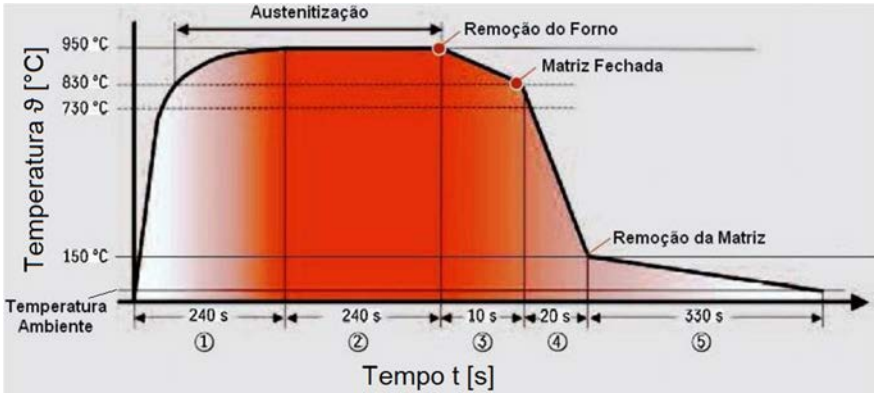

Figura 13: Diagrama esquemático do ciclo térmico do processo de estampagem a quente. Fonte: GORNI, (2010).

Nos processos de estampagem a quente as quedas térmicas que acontecem a partir da transferência da chapa do forno para o interior da matriz de estampagem exercem grande influência sobre as propriedades finais da peça estampada. De acordo com MORI, et al., (2005), o decréscimo na temperatura durante a transferência da chapa do forno até a conformação é um problema, principalmente na estampagem a quente de aços. Durante a transferência deve-se evitar uma redução de temperatura abaixo da temperatura de austenitização do material.

A primeira queda térmica acontece durante a transferência da chapa do forno de aquecimento até a matriz, conforme mostrado na Figura 13. Esta redução da temperatura da chapa é função da perda térmica por radiação e por convecção com o ar. A segunda queda brusca de temperatura, que está representada na Figura 13, acontece quando a chapa é posicionada no interior da ferramenta e tem início o processo de estampagem.

Segundo CARON, et al., (2014), o rápido resfriamento é conseguido pelo contato da peça com as superfícies da matriz de estampagem.

A transformação da microestrutura do aço da geratriz, como consequência do rápido resfriamento, é a responsável pelo aumento de resistência mecânica da chapa.

Na pesquisa de CHANG, et al., (2016) foi estudado o efeito da pressão de contato entre a matriz de estampagem e geratriz sobre o coeficiente de transferência de calor, conforme apresentado na Figura 14. Onde para valores mais altos de pressão na interface de contato foram observados valores mais elevados para o coeficiente de transferência de calor. Sendo que o coeficiente de transferência de calor no processo de estampagem a quente exerce influência sobre a transformação martensítica.

Com maiores pressões na interface entre a matriz de estampagem e geratriz a área onde ocorre a transferência de calor torna-se maior, aumentando desta forma o coeficiente de transferência de calor, conforme mostrado na Figura 15, (CHANG, et al., 2016).

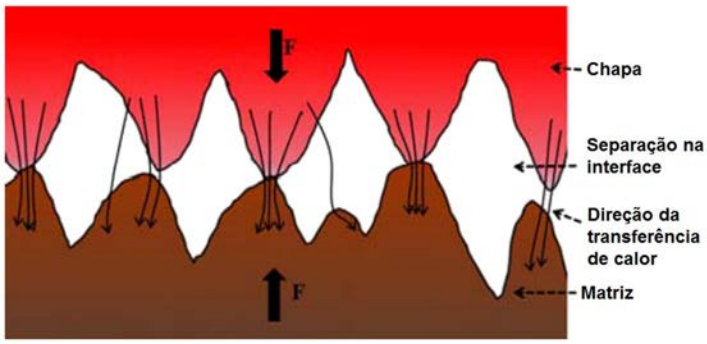

Figura 14: Transferência de calor na interface matriz-geratriz durante o processo de estampagem a quente. Fonte: CHANG, et al., (2016).

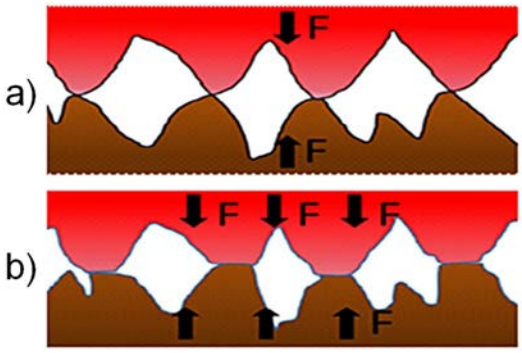

Figura 15: Influência da pressão de contato na transferência de calor para o processo de estampagem a quente: a) baixa pressão de contato; b) alta pressão de contato. Fonte: CHANG, et al., (2016).

De acordo com MERKLEIN e LECHLER, (2016) e HUIPING, et al., (2015) nos processos de estampagem a quente a transferência de calor da geratriz aquecida para a ferramenta de estampagem tem influência direta nas propriedades mecânicas da peça final obtida. O coeficiente de transferência de calor, que descreve a interação térmica entre a geratriz e a ferramenta é dependente das características da interface, como por exemplo, acabamento e rugosidade superficial, pressão de contato, revestimentos protetores contra oxidação aplicados sobre a chapa e a sua temperatura. A Figura 16 exemplifica de forma esquemática a relação entre a pressão de contato, a transferência de calor e os mecanismos de transferência de calor envolvidos. Com a redução da pressão de contato diminui o contato na interface devido às imperfeições superficiais.

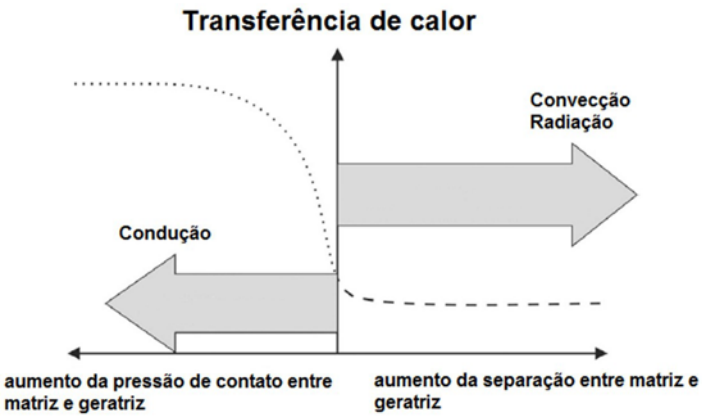

Figura 16: Relação entre a pressão de contato, a transferência de calor e os mecanismos de transferência de calor envolvidos. Fonte: MERKLEIN, et al., (2016).

Na pesquisa realizada por TOLOTTI, et al., (2016) foi investigada a influência da pressão de contato e da temperatura da água de resfriamento na transferência de calor para o processo de estampagem a quente em uma matriz dotada de canais de refrigeração com água, onde para valores mais elevados da pressão de contato a velocidade de resfriamento da chapa foi maior, conforme apresentado na Figura 17.

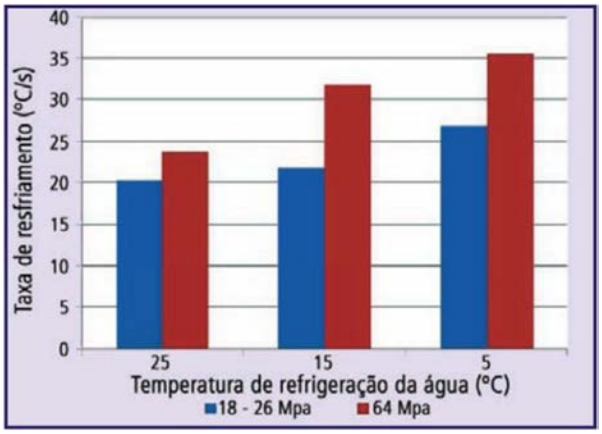

Figura 17: Influência da pressão de contato na interface ferramenta/geratriz e temperatura da água de refrigeração na velocidade de resfriamento da chapa para o processo de estampagem a quente. Fonte: TOLOTTI, et al., (2016).

2.4.1 Métodos de cálculo da variação de temperatura

De acordo com TOLOTTI, et al., (2016) o cálculo da redução de temperatura 11-& da geratriz, que acontece durante a sua transferência do forno de aquecimento até a ferramenta de estampagem, em função da tranferência de calor por radiação pode ser efetuado por:

$$L h9 ::: \frac{Q_g}{} \qquad \text{(eq.1)}$$

Onde Q_g é a perda térmica da geratriz, V é o volume da chapa, p é a densidade do material da chapa e c_p é o calor específico do material da chapa.

Ainda segundo TOLOTTI, et al., (2016) a perda térmica da geratriz durante a transferência do forno de aquecimento até a matriz pode ser calculado por:

$$Q_g ::: c \quad A \quad c_{rac}) \; 110^4 \qquad \text{(eq.2)}$$

Onde C_s é a constante de radiação, A_{ir} é a superfície de irradiação, T_{abs} é a temperatura absoluta da chapa e t é o tempo de transferência entre o forno de aquecimento e a matriz de estampagem.

Para o processo de estampagem a quente é muito importante que a perda de calor da chapa durante a transferência do forno até o interior da matriz não provoque a queda de sua temperatura abaixo da temperatura de austenitização.

O rápido resfriamento que acontece no interior da matriz de estampagem é o responsável pela tempera do material.

Segundo TOLOTTI, et al., (2016) e ZHAO, et al., (2015) em um processo de estampagem a quente pode-se considerar que o calor que é dissipado pela geratriz, quando esta é conformada no interior da ferramenta de estampagem, é igual ao calor que é absorvido pelo conjunto da matriz. Ao se desconsiderar os efeitos oriundos da perda térmica por radiação e por convecção, pode-se escrever a

seguinte relação entre o calor dissipado pela geratriz Qg e o calor absorvido pela matriz Qm:

$$dQ \quad d11 \qquad \text{(eq.)}$$

Ainda de acordo com TOLOTTJ, et al., (2016), conhecendo-se as propriedades físicas do material da matriz, pode-se expressar o fluxo de calor da geratriz Qg por:

$$dQ \quad c \qquad fJ \qquad \text{(eq.4)}$$

Segundo TOLOTTJ, et al., (2016), o fluxo de calor que é absorvido pela matriz de estampagem Qm pode ser expresso por:

$$d11 \quad -h \quad A \quad (fJ - fJ_{00}) \quad t \qquad \text{(eq.5)}$$

Onde {] é a temperatura da geratriz, $\{]_{00}$ é a temperatura da matriz de estampagem considerada invariável, h é o coeficiente de transferência de calor e A_c é a superfície de contato.

Conforme TOLOTTJ, et al., (2016) e HUNG, et al., (2014), ao igualar e integrar as equações 4 e 5, pode-se obter o coeficiente de transferência de calor (h), conforme a equação:

$$h \quad \frac{c}{A \quad !::t} x \ln \frac{fJ \quad - \quad - fJ_{00}}{fJ \quad - fJ_{00}} \qquad \text{(eq.6)}$$

Onde Lt é o intervalo de tempo entre os instantes t_i e t_{i-1}, onde foram realizadas as aquisições de temperatura da geratriz $\{]_{i-1}$ e $\{]_i$, durante o processo de estampagem a quente.

De acordo com TOLOTTJ, et al., (2016), durante o processo de estampagem a quente, a temperatura da matriz $\{]_{00}$ não pode ser considerada constante, isso mesmo no caso da matriz de estampagem ser dotada de canais de refrigeração. Para contornar este problema, pode-se considerar que a variação da temperatura da matriz varia linearmente, e deste modo o coeficiente de transferência de calor h pode ser expresso conforme:

$$h = \frac{\quad i - 1 - \quad i}{A \quad /).t \quad [\quad i - \quad 00,i + \quad i - 1 - \quad 00,i - 1\ ]} \qquad \text{(eq.7)}$$

Sendo que $\{]_{00,i}$ é a temperatura da matriz de estampagem no instante de tempo t_i e $\{]_{00,i-1}$ e a temperatura da matriz de estampagem no instante de tempo t_{i-1}.

Conforme apresentado por TOLOTTJ, et al., (2016) e MERKLEJN, et al., (2016), a temperatura média da geratriz, durante o processo de estampagem a quente, pode ser expressa por:

$$= \quad i - \quad 00 \qquad A \qquad + \quad 00 \qquad \text{(eq.)}$$

2.5 Propriedades mecânicas

2.5.1 Curva de Engenharia

O teste mais utilizado para a determinação das propriedades mecânicas de interesse para a conformação de chapas é o ensaio de tração. A partir do ensaio de

tração é possível obter informação como: módulo de elasticidade ou módulo de Young (E); tensão de escoamento (σ_e); tensão máxima ou limite de resistência (R_m).

Para os processos de conformação mecânica, a região de maior importância está delimitada pelo limite de escoamento ou tensão de escoamento (σ_e) e pelo limite máximo ou limite de resistência (R_m), quando observado o diagrama convencional da tensão versus deformação, conforme mostrado na Figura 1 . Isso porque no limite de escoamento tem inicio a deformação plástica do material e no limite máximo a deformação deixa de ser generalizada e passa a se concentrar na região da estricção e o material se aproxima da ruptura.

O ensaio de tração consiste na fixação do corpo de prova nas garras da máquina de ensaios de tração, para que ele possa ser tracionado até a sua ruptura. A força (F) e a variação do comprimento do corpo de prova (Ll) são registrados.

Para a realização dos ensaios de tração os corpos de prova precisam ter geometrias e dimensões padronizadas por normas técnicas.

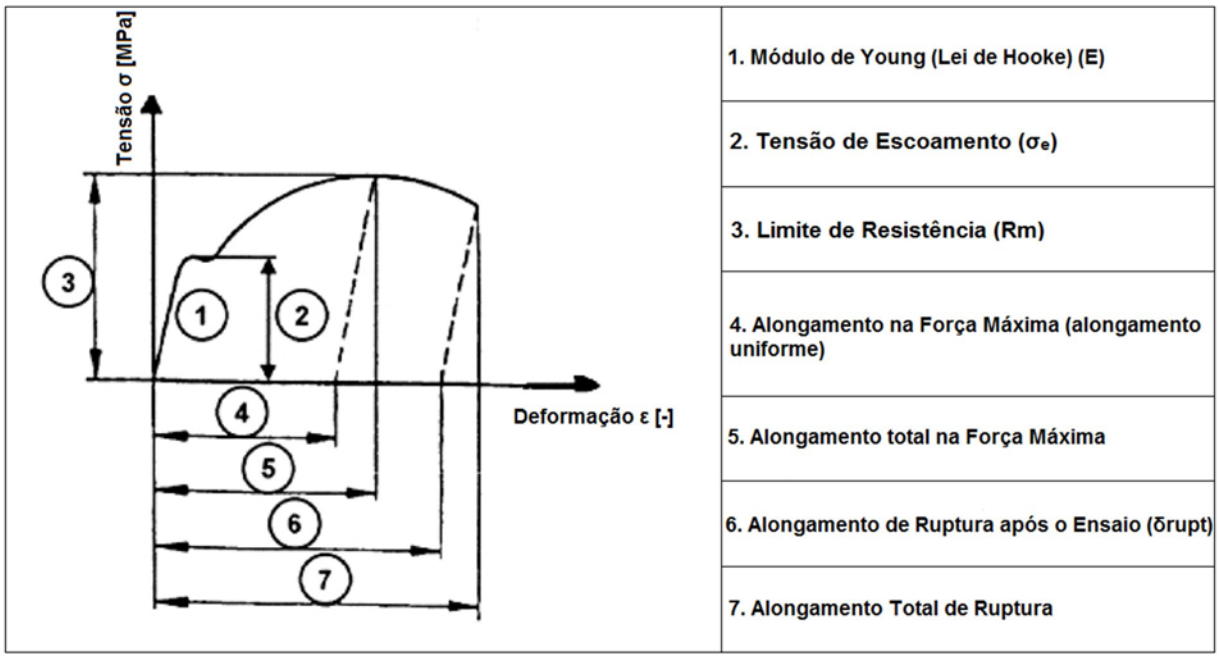

Figura 1 : Diagrama convencional tensão versus deformação. Fonte: SCHAEFFER, (2004).

2.5.2 Curva de Escoamento

Para a análise dos processos de conformação mecânica utiliza-se a curva verdadeira, conforme Figura 19, que é obtida considerando-se a força atuando na área instantânea durante a deformação do material. A área instantânea da seção transversal do corpo de prova pode ser mais facilmente determinada pela lei da constância de volume.

A parte da curva verdadeira que se encontra acima do limite de escoamento recebe o nome de curva de escoamento do material, e representa a tensão de escoamento do material para diferentes valores de deformação verdadeira (SCHAEFFER, 2004). A tensão de escoamento de determinado material é influenciada pela sua microestrutura, temperatura (θ), deformação verdadeira (φ) e velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) (SCHAEFFER, 2016).

Figura 19: Diagrama tensão x deformação com a curva verdadeira e a curva convencional. Fonte: SCHAEFFER, (2004).

Ainda, os aços que são usados nos processos de estampagem a quente são deformados sob condições em que a influência da temperatura (-&) e da velocidade de deformação (i) devam ser consideradas (TURRETA, 2008).

Na pesquisa realizada por BATALHA e BUTTON, (2016), foi estudado o comportamento do aço DIN 27MnCrB5 para o processo de estampagem a quente. Em seu estudo é apresentado a equação constitutiva de Hensel-Spittel para a curva de escoamento.

4 i (eq.9)

A equação constitutiva de Hensel-Spittel para a curva de escoamento do aço DIN 27MnCrB5 tem como variáveis a temperatura da chapa (-&), a deformação verdadeira (<p) e a velocidade de deformação (i). Na equação 9: A, m1, m2, m3, m4, m5, m7, m8 e m9 são constantes, cujos valores foram determinados experimentalmente por BATALHA e BUTTON, (2016) e são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Coeficientes da equação de Hensel-Spittel para a curva de escoamento do aço DIN 27MnCrB5. Fonte: BATALHA e BUTTON, (2016).

Coeficientes Equação de Hensel-Spittel para o aço DIN 27MnCrB5								
A	m1	m2	m3	m4	m5	m7	m8	m9
2033,17	-0,00216	0,2493	-0,10679	0,00166	-4,08E-04	-0,03034	3,29E-04	0,0414

A equação de Hensel-Spittel pode ser aplicada, para o caso do aço DIN 27MnCrB5, com as constantes determinadas por BATALHA e BUTTON, (2016). Para isso foram consideradas três temperaturas (-&): 750°C; 850°C e 950°C, além de uma velocidade de deformação (i) de 0,1. As três curvas de escoamento calculadas são apresentadas na Figura 20.

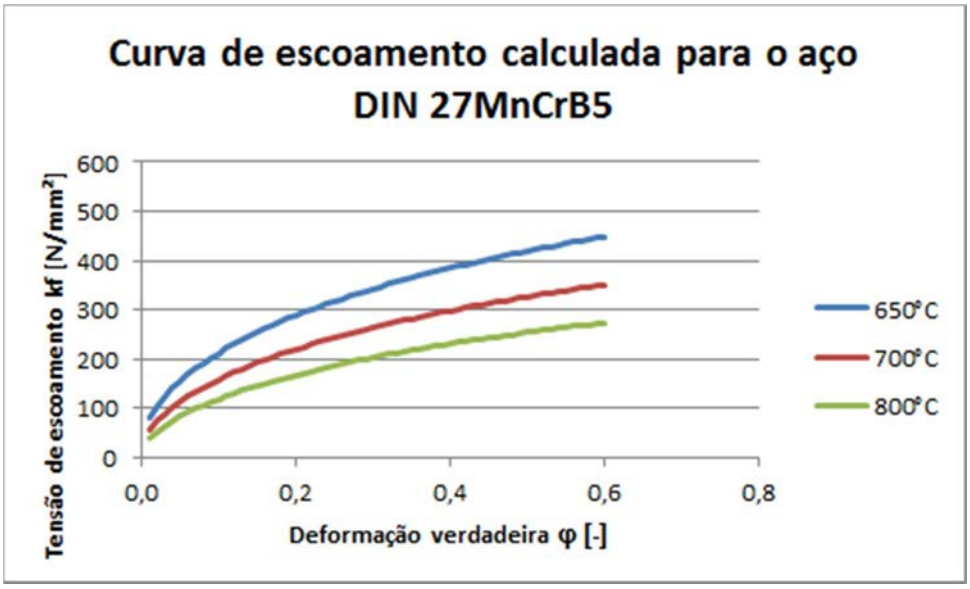

Figura 20: Curva de escoamento do aço DIN 27MnCrB5, calculada através da equação de Hensel-Spittel considerando-se uma velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$) de 0,1.

No processo de estampagem a quente, devido à elevada temperatura, o material da chapa apresenta uma maior conformabilidade e redução da sua tensão de escoamento, onde o processo realiza-se com menores esforços da prensa. Na Figura 21 são apresentadas as curvas de escoamento para o aço DIN 22MnB5 para diferentes temperaturas, onde pode ser observado uma redução dos valores da tensão de escoamento com o aumento da temperatura (MERKLEIN e LECHLER, 2006).

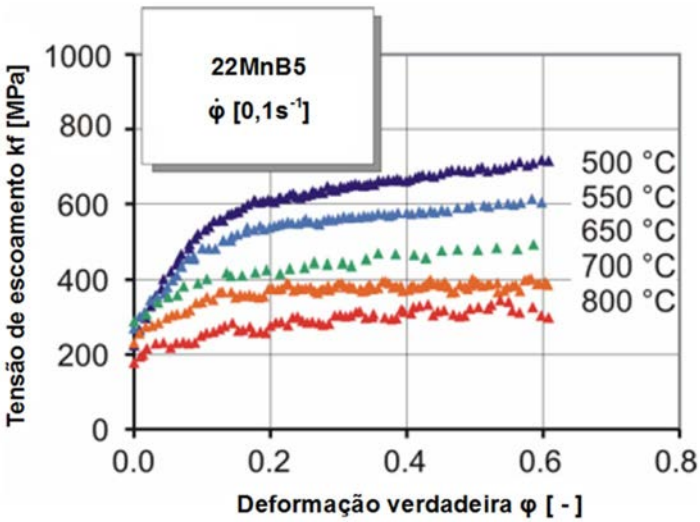

Figura 21: Curvas de escoamento para o aço DIN 22MnB5 para diferentes temperaturas. Fonte: MERKLEIN e LECHLER, (2006).

Ainda (TURETTA, 2008) em seu trabalho indica os coeficientes da equação de Hensel-Spittel para o aço DIN 22MnB5, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes da equação de Hensel-Spittel para a curva de escoamento do aço DIN 22MnB5. Fonte: TURETTA, (2008).

Coeficientes Equação de Hensel-Spittel para o aço DIN 22MnB5								
A	m1	m2	m3	m4	m5	m7	m8	m9
0,18151	-0,00465	0,35149	-0,02881	0,00281	-1,79E-03	0,13348	2,00E-05	1,7299

Pode-se aplicar a equação de Hensel-Spittel para o aço DIN 22MnB5, com os coeficientes mostrados na Tabela 4, considerando três temperaturas (-&): 650°C; 700°C e 800°C, além de uma velocidade de deformação (i) de 0,1. Na Figura 22 são mostradas as curvas de escoamento obtidas.

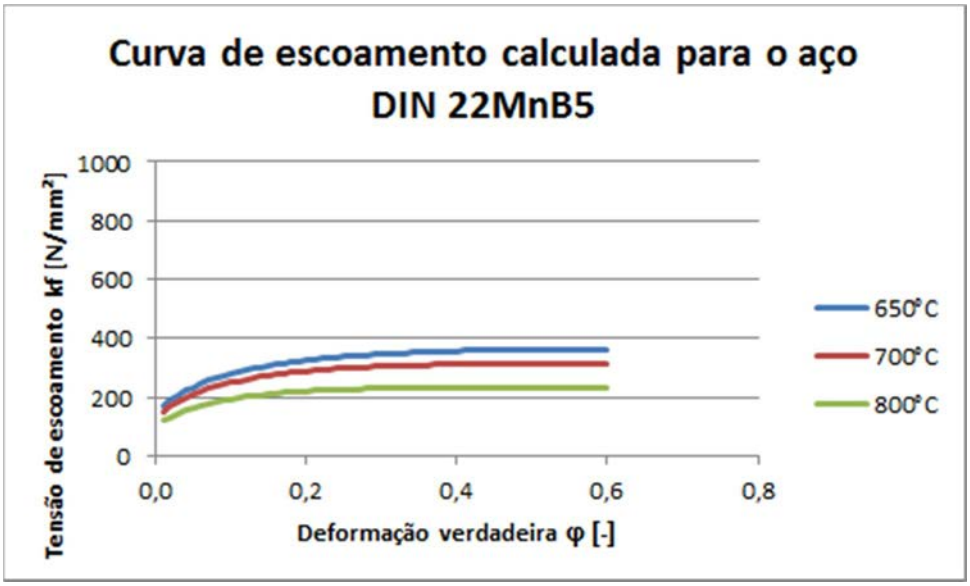

Figura 22: Curva de escoamento do aço DIN 22MnB5, calculada através da equação de Hensel-Spittel considerando-se uma velocidade de deformação (cj) de 0,1.

Ao observar as curvas de escoamento do aço DIN 27MnCrB5 calculadas segundo a equação de Hensel-Spittel, apresentadas na Figura 20, com as curvas de escoamento do aço DIN 22MnB5 determinadas experimentalmente, apresentadas

na Figura 21, verifica-se que apesar de serem materiais diferentes apresentam comportamento semelhante.

Ainda considerando-se o caso do aço DIN 22MnB5, pode-se fazer a comparação das curvas de escoamento obtidas experimentalmente com as calculadas através da equação de Hensel-Spittel, apresentadas respectivamente nas Figura 21 e Figura 22. Os resultados obtidos através da equação constitutiva de Hensel-Spittel se aproximam dos resultados experimentais, o que valida o uso da equação.

Na pesquisa realizada por NADERI, (2007), foi determinada a curva de escoamento para o aço DIN 27MnCrB5 conforme Figura 23. Foram realizados ensaios de tração no aço DIN 27MnCrB5 para quatro diferentes condições de processamento: A) Estampado a frio, após austenitizado à 900°C e temperado em água; B) Austenitizado à 900°C e após estampado a quente em matriz refrigerada com nitrogênio; C) Austenitizado à 900°C e após estampado a quente em matriz refrigerada com água; D) Como recebido.

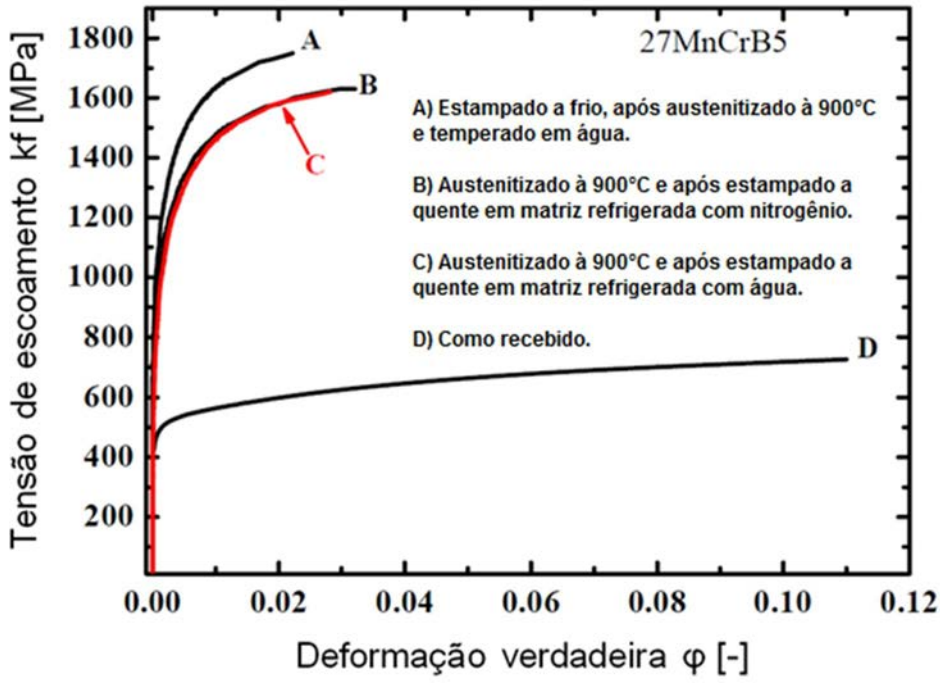

Figura 23: Curva de escoamento para o aço DIN 27MnCrB5 para quatro diferentes condições de processamento. Fonte: NADERI, (2007).

2.6 Alteração microestrutural

Outro aspecto que deve ser considerado sobre o processo de estampagem a quente é o tratamento térmico que é realizado no interior das matrizes refrigeradas. O tempo de permanência, a velocidade de resfriamento e a disposição dos canais de refrigeração devem ser estudados para cada caso específico. A disposição dos canais de refrigeração na matriz pode levar a gradientes de temperatura e taxas de resfriamento mais elevadas em determinadas regiões da matriz, o que afeta a têmpera da chapa e sua resistência mecânica (NADERI, et al., 2011).

A Figura 24 mostra a variação das propriedades mecânicas do aço DIN 22MnB5 durante as etapas do processo de estampagem a quente. A geratriz recortada de uma bobina é aquecida até a temperatura que provoca sua completa austenitização, sendo posteriormente transferida para o interior da matriz onde é conformada e também rapidamente resfriada. Pode-se observar que com o aumento da temperatura o material apresenta uma menor tensão de escoamento e uma maior deformação, o que aumenta a sua ductilidade permitindo deformações mais severas e também reduz o esforço para sua conformação. Após o resfriamento no interior da matriz completa-se o processo de têmpera e a peça apresenta suas propriedades finais, requeridas para sua aplicação estrutural (MERKLEIN e LECHLER, 2006).

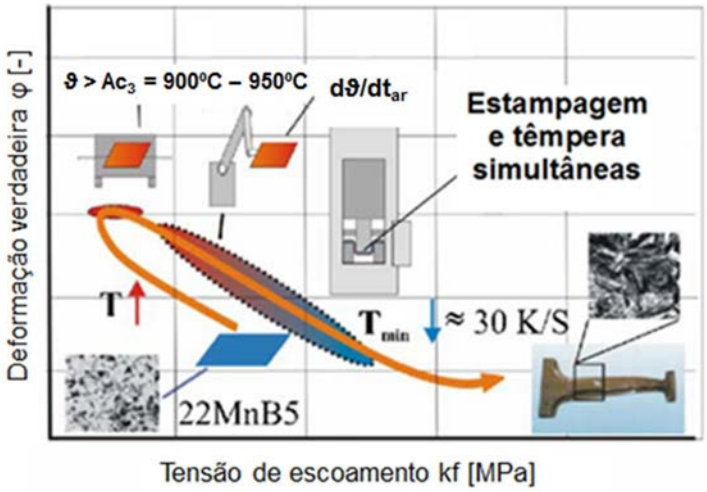

Figura 24: Propriedades mecânicas do aço DIN 22MnB5 durante o processo de estampagem a quente. Fonte: MERKLEIN e LECHLER, (2006).

Como o processo é realizado em elevadas temperaturas, o acréscimo conseguido na sua conformabilidade permite que peças mais complexas sejam produzidas. Outra característica muito favorável é a uniformidade das propriedades mecânicas conseguidas através da têmpera em relação a peças estampadas a frio. Além da possibilidade de estampar peças com maiores dimensões para uma mesma prensa se comparada com peças estampadas à temperatura ambiente. Isso é consequência da redução da tensão de escoamento com o aumento da temperatura (KARBASIAN e TEKKAYA, 2010).

Devido à necessidade de aquecimento das chapas até sua temperatura de austenitização, entre 850°C e 950°C, existe um grande consumo de energia, se comparado a peças obtidas pela estampagem a frio (GORNI, 2010).

Além disso, na estampagem a quente, é possível alterar a resistência mecânica do material alterando sua estrutura através da têmpera que ocorre quando as matrizes são mantidas fechadas e em contato com a chapa. Com esse contato o material da chapa experimenta uma queda de temperatura que dependendo da velocidade aumenta suas propriedades mecânicas. O aumento das propriedades mecânicas, como por exemplo, tensão limite de escoamento, ocorre devido à alteração da microestrutura do material da chapa após a estampagem a quente, conforme pode ser observado na Figura 25 (KARBASIAN e TEKKAYA, 2010).

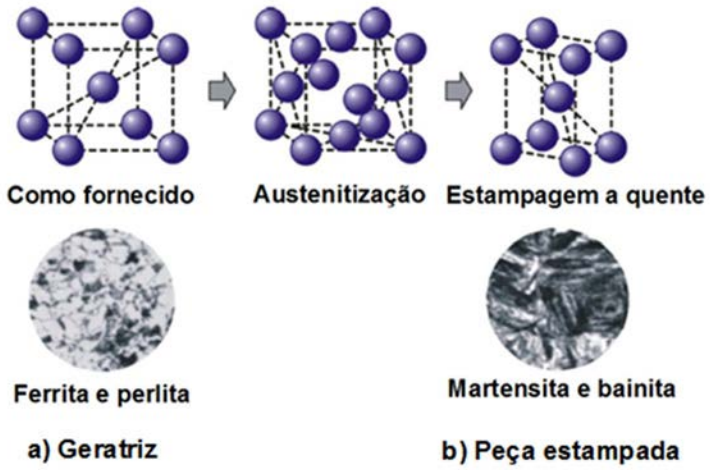

Figura 25: Alteração da microestrutura do material da chapa. Fonte: KARBASIAN e TEKKAYA, (2010).

Para o processo de estampagem a quente, a maior influência para as propriedades mecânicas finais da peça é o processo de têmpera que ocorre no interior da matriz. A têmpera do material por sua vez tem grande dependência da sua composição química assim como da sua velocidade de resfriamento. As melhores propriedades mecânicas no processo de estampagem a quente são obtidas com ligas contendo teores de carbono de 0,20% e teores de manganês a partir de 1,20%, que retarda a transformação da austenita melhorando a temperabilidade do material. Também é adicionado boro à liga, que tem a função de retardar a formação ferrítica, pois em solução sólida segrega para os contornos de grão austenítico e impede a nucleação da ferrita (GORNI, 2010).

Quanto maior o teor de liga presente no aço, menor será a velocidade de resfriamento mínima do material necessária para a completa transformação da microestrutura austenítica em microestrutura martensítica. O que é muito interessante, pois simplifica o projeto da ferramenta em relação aos canais de resfriamento necessários para obter a velocidade de resfriamento necessária. Porém um material com maiores teores de liga tem a desvantagem de tornar-se mais dispendioso (GORNI, 2010).

Após o processo de estampagem a quente, a chapa de aço apresenta um aumento na sua tensão de escoamento se comparado ao seu estado inicial, antes da estampagem. Também ocorre uma redução do seu alongamento, que caracteriza uma redução na sua ductilidade (KARBASIAN e TEKKAYA, 2010). A Figura 26 apresenta a alteração das propriedades mecânica pelo processo de estampagem a quente.

Na Tabela 5 são apresentados os valores das propriedades mecânicas tensão de escoamento (ae) e tensão máxima (R_m) para algumas ligas de aço usadas em processos de estampagem a quente. É possível visualizar o ganho de resistência mecânica decorrente da alteração microestrutural, que acontece quando a velocidade de resfriamento crítica é alcança durante o processo (KARBASIAN, 2010).

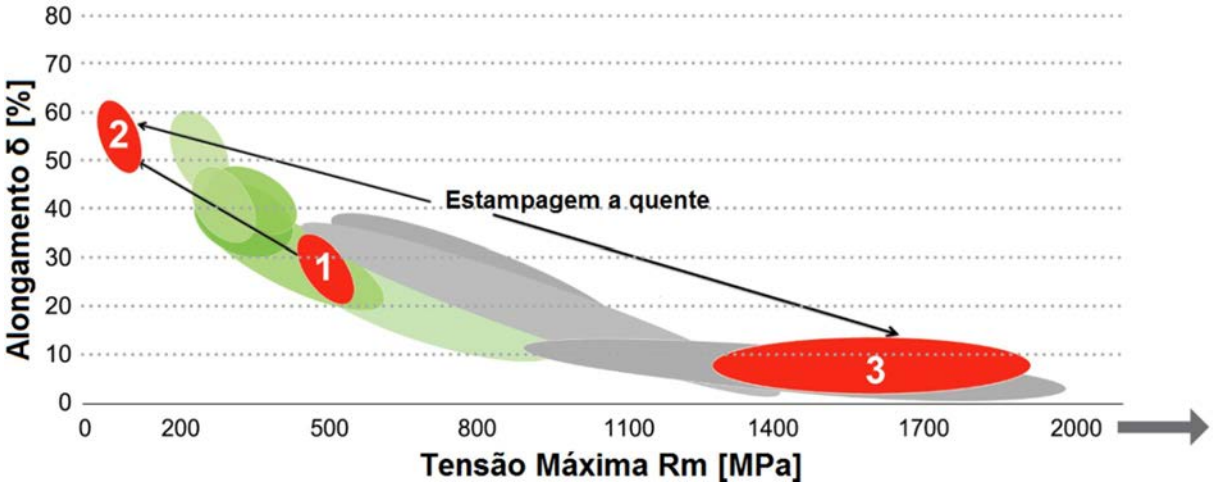

Figura 26: Alteração das propriedades mecânicas pelo processo de estampagem a quente: 1) aço como fornecido, 2) austenitização, 3) aço estampado a quente. WORLD AUTO STEEL, (2014).

Tabela 5: Propriedades mecânicas dos aços usados no processo de estampagem a quente. Fonte: KARBASIAN e TEKKAYA, (2010).

Aço	Temperatura de início da transformação martensítica [°C]	Velocidade de resfriamento critica [°C/s]	Tensão de escoamento σe [MPa]		Tensão máxima Rm [MPa]	
			Como fornecido	Estampado a quente	Como fornecido	Estampado a quente
DIN 20MnB5	450	30	505	967	637	1354
DIN 22MnB5	410	27	457	1010	608	1478
DIN 8MnCrB3	-	-	447	751	520	882
DIN 37MnB4	350	14	580	1378	810	2040

No trabalho de NADERI, (2007) foi investigada a microestrutura final obtida pela estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5 para duas temperaturas de austenitização diferentes, 870°C e 900°C. Para estas duas temperaturas de austenitização a microestrutura resultante do processo de estampagem a quente é completamente martensítica, estando apresentadas na Figura 27. Para a temperatura de austenitização de 870°C a dureza média encontrada foi de $536HV_{10}$, enquanto que para a temperatura de austenitização de 900°C a dureza média encontrada foi de $538HV_{10}$.

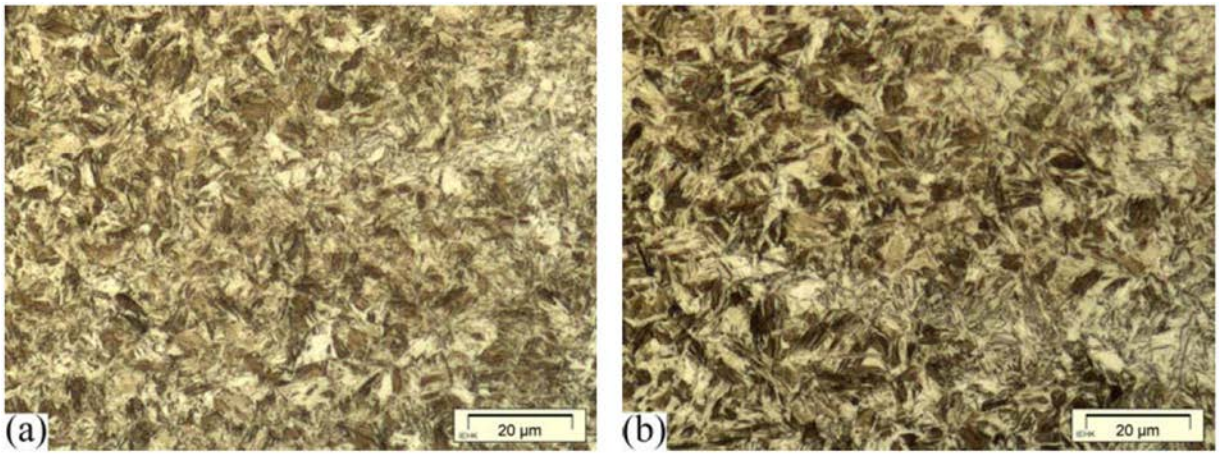

Figura 27: Microestrutura obtida pela estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5: (a) temperatura de austenitização de 870°C e (b) temperatura de austenitização de 900°C. Fonte: NADERI, (2007).

No ensaio de estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5 realizado por NADERI, (2007), na temperatura de austenitização de 900°C, foram encontrados valores de 1117MPa para a tensão de escoamento (a_e) e 1620MPa para a tensão limite de resistência (R_m).

No estudo realizado por LONGHI e BUTTON, (2013) foi avaliado o processo de estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5 para as temperaturas de austenitização de 880°C e 950°C. Para a temperatura de austenitização de 880°C a microestrutura final obtida é composta por bainita, com valores médios de dureza de 288HV. Para a temperatura de austenitização de 950°C a microestrutura final obtida é composta predominantemente por martensita, com valores médios de dureza de 472HV.

Na pesquisa realizada por NADERI, (2007), foram realizados ensaios de estampagem a quente no aço DIN 27MnCrB5. A Figura 28 mostra a ferramenta utilizada, composto por punção refrigerado e matriz sem refrigeração, para a estampagem da peça com geometria de "U". Para a realização da estampagem a quente as amostras de aço DIN 27MnCrB5 foram aquecidas até a temperatura de 900°C para a completa austenitização da sua microestrutura.

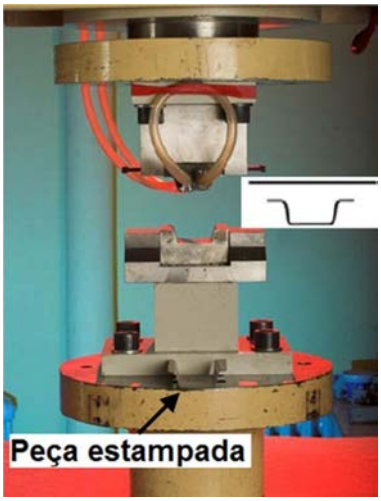

Figura 28: Ferramenta para estampagem a quente composto por punção refrigerado e matriz sem refrigeração. Fonte: NADERI, (2007).

Com a utilização de termopares a evolução das temperaturas da matriz, punção e chapa foram registradas para o processo de estampagem a quente. Também foi medida a força necessária para a estampagem. A Figura 29 apresenta os resultados obtidos por (NADERI, 2007).

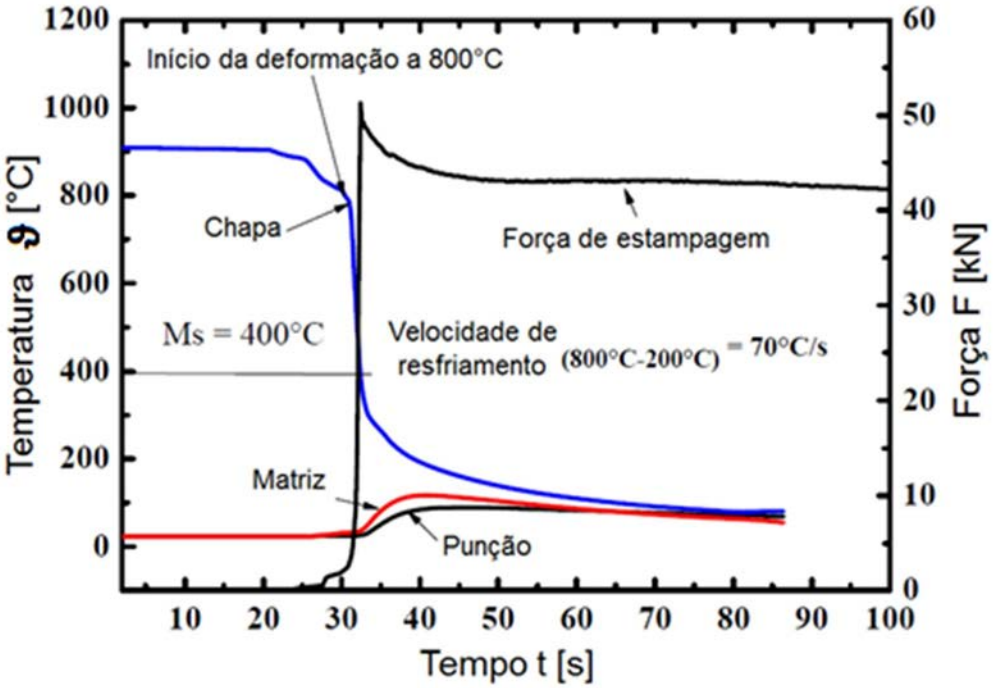

Figura 29: Evolução da força de estampagem (F) e da temperatura (ϑ) durante a estampagem a quente do aço DIN 27MnCrB5. Fonte: NADERI, (2007).

2.7 Cálculo da força no processo de estampagem

A partir das informações do comportamento do material durante a sua conformação, dadas pela sua tensão de escoamento (kf), e também da sua geometria e dimensões, apresentadas na Figura 30, é possível realizar o cálculo teórico da força necessária para a sua estampagem.

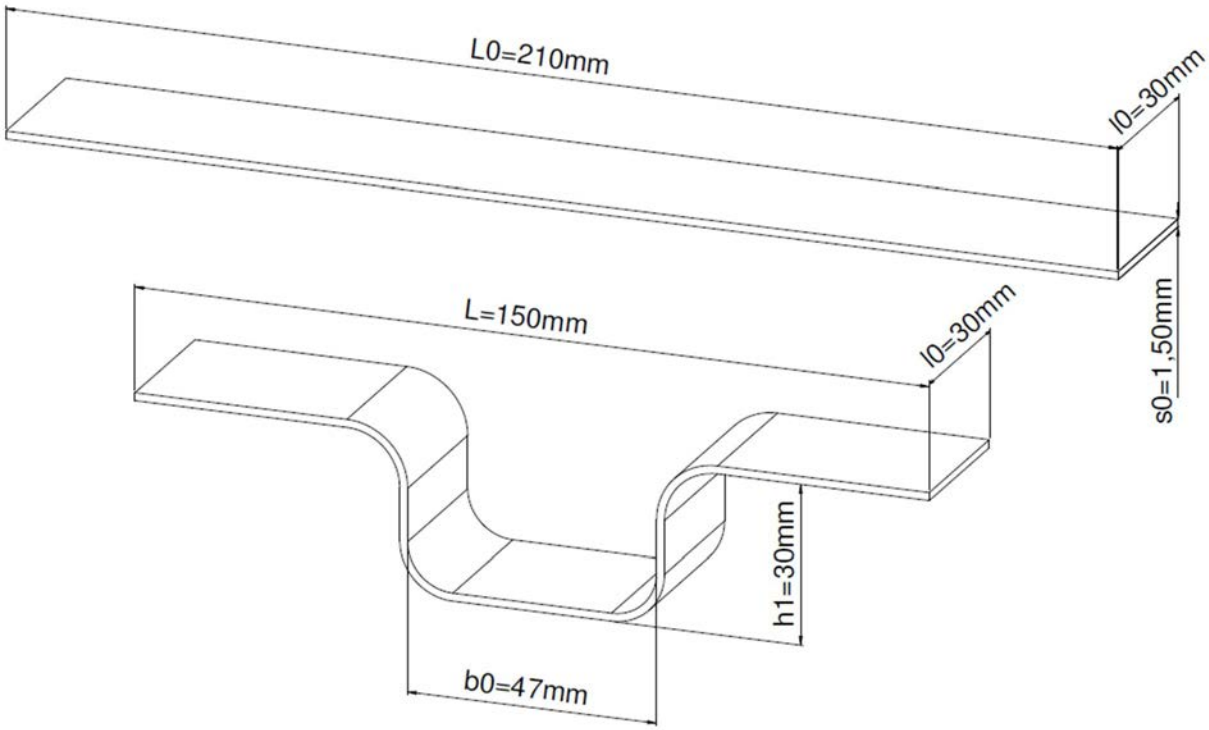

Figura 30: Geometria e dimensões da chapa e da peça estampada.

De acordo com SCHAEFFER, (2004) é possível calcular a força de estampagem teórica (Fpt) para o ensaio através das contribuições da força de estampagem ideal (Fid), da força de atrito no prensa chapa (Fapc), da força de atrito na passagem da chapa através do raio da matriz (Far) e também da força de retorno elástico (Fre). Para o cálculo da força de estampagem do aço DIN 27MnCrB5 a força de atrito na passagem da chapa pelo raio da matriz e a força devido ao retorno elástico da chapa foram desprezados:

$$p \quad F_i \quad F \qquad \text{(eq.10)}$$

SCHAEFFER, (2004) apresenta a equação para o cálculo da força ideal de estampagem para peças com geometria de copo. Através desta equação foi possível fazer adaptações para o seu uso no caso da estampagem da tira apresentada na Figura 30:

$$F_i \quad A_0 \times k_f \times \ln \frac{L}{b_0} \qquad \text{(eq.11)}$$

Onde a área da seção transversal A0 pode ser calculada pelas informações de geometria e dimensões apresentadas na Figura 30:

$$A_0 \quad l_0 \times s_0 \qquad \text{(eq.12)}$$

SCHAEFFER, (2004) também apresenta a equação para o cálculo da força de atrito no prensa chapa (Fapc) para peças com geometria de copo. Também foi possível fazer adaptações nesta equação para a sua utilização no caso da peça apresentada na Figura 30. Assim a força de atrito no prensa chapa pode ser calculada conhecendo-se as dimensões tanto da chapa como da peça estampada, o coeficiente de atrito (1-) e também a força do prensa chapa (Fpc), que foi medida durante a realização dos ensaios experimentais:

$$F \quad \times \quad \times \quad \times \frac{b_0}{L} \qquad \text{(eq.13)}$$

No cálculo da força de estampagem ideal (Fid) é utilizada a tensão de escoamento (kf) do aço D N 27MnCr85 para cada uma das temperaturas de aquecimento utilizadas nos ensaios. Para isto a tensão de escoamento foi

determinada através da equação constitutiva de Hensel-Spittel para a curva de escoamento. Nesta equação é preciso informar a temperatura, a deformação verdadeira (φ) e a velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$).

O cálculo da deformação verdadeira é feito por semelhança com a equação apresentada por SCHAEFFER, (2004) para peças com geometria de copo, adaptando-a para o caso da estampagem da tira, conforme apresentado na Figura 30:

$$q = \ln \frac{\sqrt{L0^2 + b0^2 - L^2}}{b0} \qquad \text{(eq.14)}$$

A velocidade de deformação durante o processo de estampagem pode ser calculada em função da velocidade de deslocamento do punção (v) e da profundidade de estampagem (h1) (SCHAEFFER, 2004):

$$\dot{q} = \frac{v}{h1} \qquad \text{(eq.15)}$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Conceito experimental

Para a realização dos ensaios de estampagem a quente foi proposto um conceito experimental, que consistia na estampagem de uma chapa em uma peça com a geometria apresentada na Figura 30.

Para a realização deste experimento foi desenvolvida uma ferramenta de estampagem composta por matriz, prensa chapa e punção. O material usado na sua confecção foi o aço A8NT 1045, que foi temperado e revenido para aumentar a resistência ao desgaste. Optou-se pela não utilização de canais internos de refrigeração para simplificar o projeto da ferramenta, pois sua utilização seria em nível de ensaios intermitentes, diferentemente da alta frequência de utilização na indústria.

O conjunto da ferramenta de estampagem é apresentado na Figura 31, onde a matriz e o prensa chapa estão representados em corte parcial para visualização de sua geometria interna.

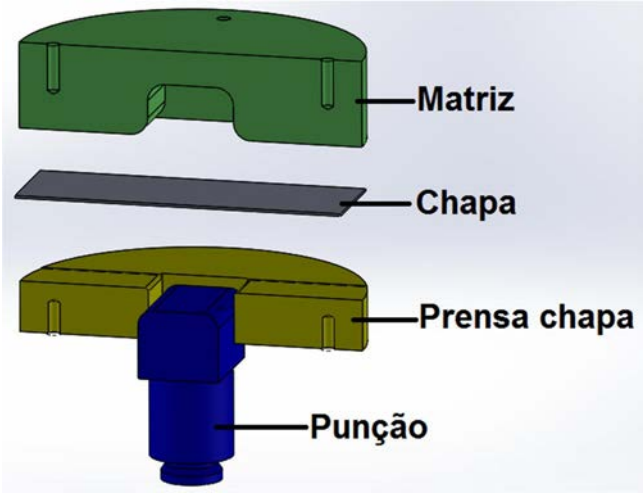

Figura 31: Ferramenta usada nos ensaios de estampagem a quente. Conjunto composto por matriz (em corte parcial), prensa chapa (em corte parcial) e punção.

A ferramenta de estampagem é montada invertida na prensa hidráulica, onde o punção fixo é montado abaixo do conjunto e a matriz movimenta-se de cima para baixo durante o processo de estampagem.

A ferramenta para a estampagem a quente, composta por matriz, prensa chapa e punção está mostrada na Figura 32, já instalada na prensa hidráulica de dupla ação Dan-Presse.

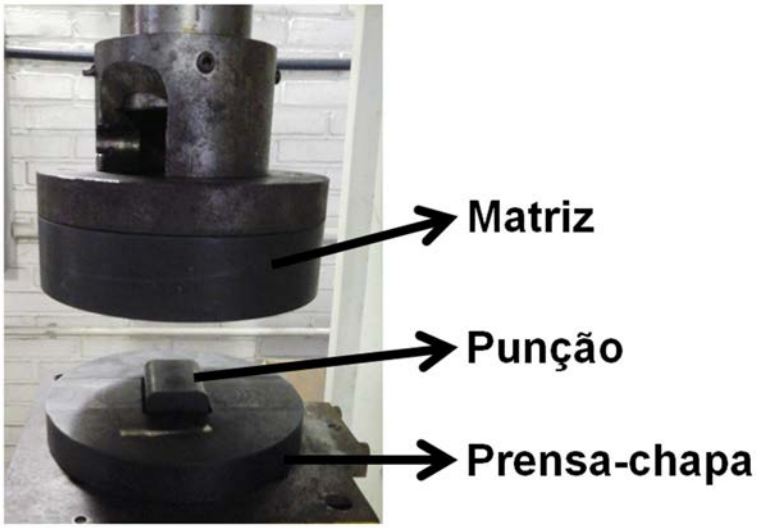

Figura 32: Ferramenta de estampagem a quente usada nos ensaios. Composta por matriz, punção e prensa-chapa.

A Figura 33 mostra o desenho com as medidas usadas na confecção do punção da ferramenta para o ensaio de estampagem a quente.

A Figura 34 mostra o desenho com as medidas usadas na confecção da matriz para os ensaios de estampagem a quente. A matriz não é vazada para permitir o contato da chapa com o fundo da cavidade. Este contato, que ocorre no momento em que a ferramenta atinge o seu fim de curso, é utilizado para possibilitar uma maior transferência de calor com o acréscimo da pressão de contato.

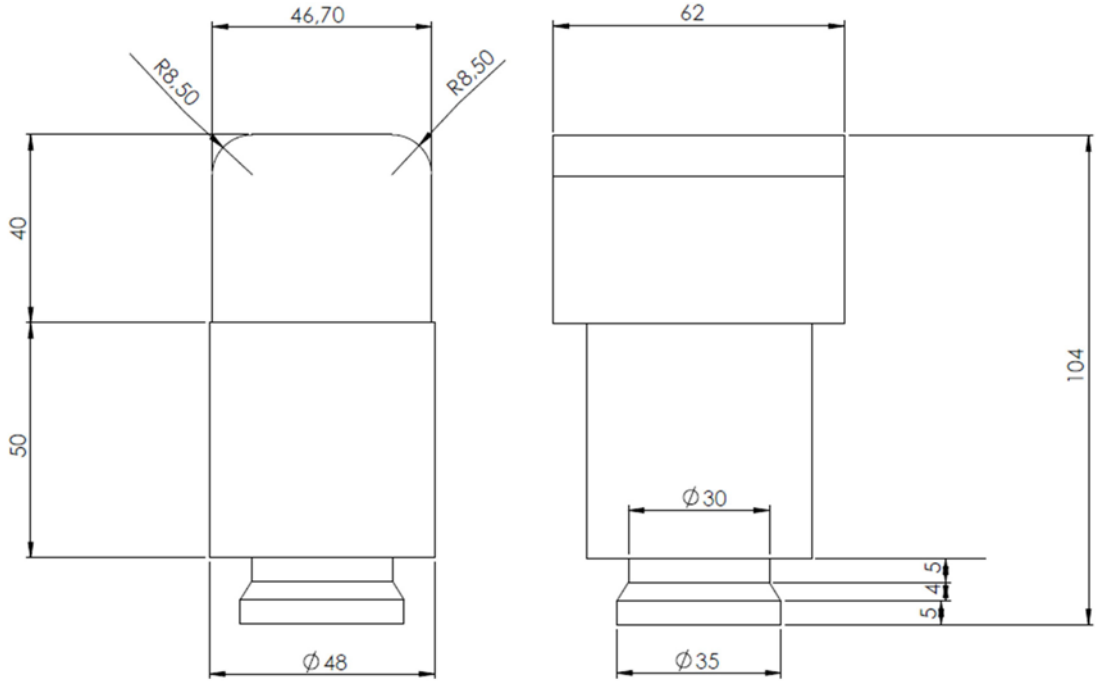

Figura 33: Desenho do punção usado na ferramenta para o ensaio de estampagem a quente.

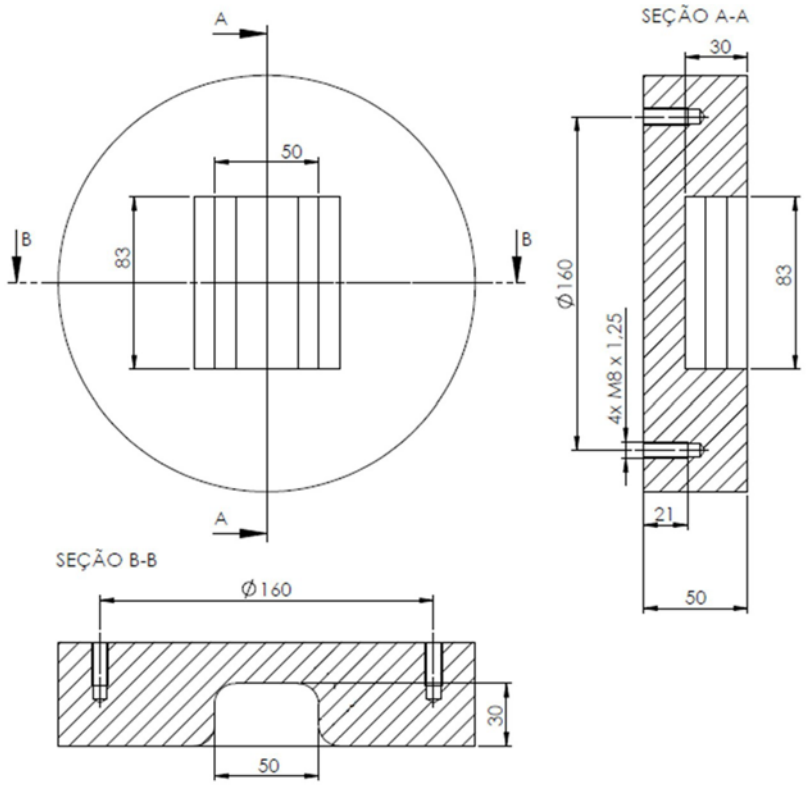

Figura 34: Desenho da matriz usada na ferramenta para o ensaio de estampagem a quente.

A Figura 35 mostra o desenho com as medidas usadas na confecção do prensa chapa, componente da ferramenta utilizada no ensaio de estampagem a quente.

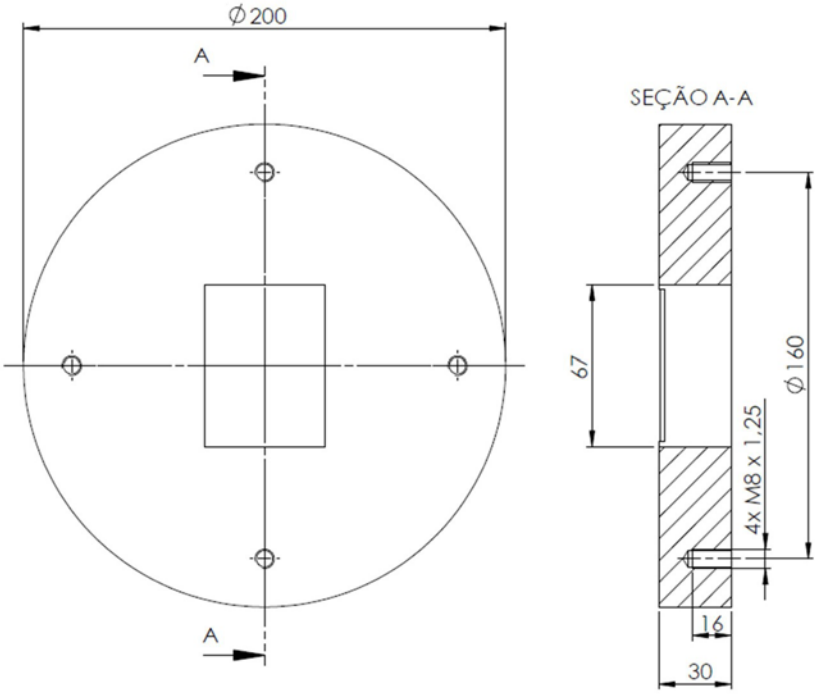

Figura 35: Desenho do prensa chapa usado na ferramenta para o ensaio de estampagem a quente.

3.2 Ensaio de estampagem a quente

O ensaio experimental de estampagem a quente consistiu no aquecimento das chapas em um forno elétrico, onde após foram transferidas para o interior da ferramenta de estampagem. A ferramenta utilizada no ensaio foi instalada em uma prensa hidráulica instrumentada para a medição da força de estampagem em função do deslocamento da matriz. O esquema utilizado no ensaio de estampagem a quente é apresentado na Figura 36.

Os ensaios de estampagem a quente foram realizados em três diferentes temperaturas (&): 750°C, 850°C e 950°C. Sendo que para cada temperatura foram realizadas 4 amostras.

As amostras possuíam as dimensões de 210mm x 30mm, com uma espessura de 1,5mm e foram preparadas por corte por cisalhamento em uma guilhotina.

Figura 36: Esquema do ensaio de estampagem a quente tipo direto.

nicialmente as amostras foram aquecidas até a temperatura de ensaio em um forno elétrico da marca Sanchis, conforme apresentado na Figura 37, sendo que o tempo de aquecimento foi fixado em 5 minutos para garantir a uniformidade no aquecimento das chapas e a sua completa austenitização.

Figura 37: Forno elétrico utilizado para o aquecimento das chapas, modelo Sanchis do LdTM.

As chapas foram transferidas para o interior da matriz manualmente com a utilização de um tenaz rapidamente para minimizar a perda térmica. O tempo de transferência foi inferior a 6s.

O ensaio de estampagem teve início com o posicionamento da chapa no interior da ferramenta, conforme Figura 38 (a). Após esta etapa foi realizada a estampagem até uma profundidade de 30mm: Figura 38 (b) início do ensaio de estampagem a quente; Figura 38 (c) final do curso do punção e realização da estampagem. Ao completar a estampagem a ferramenta foi mantida fechada por 90 segundos para garantir o resfriamento da chapa.

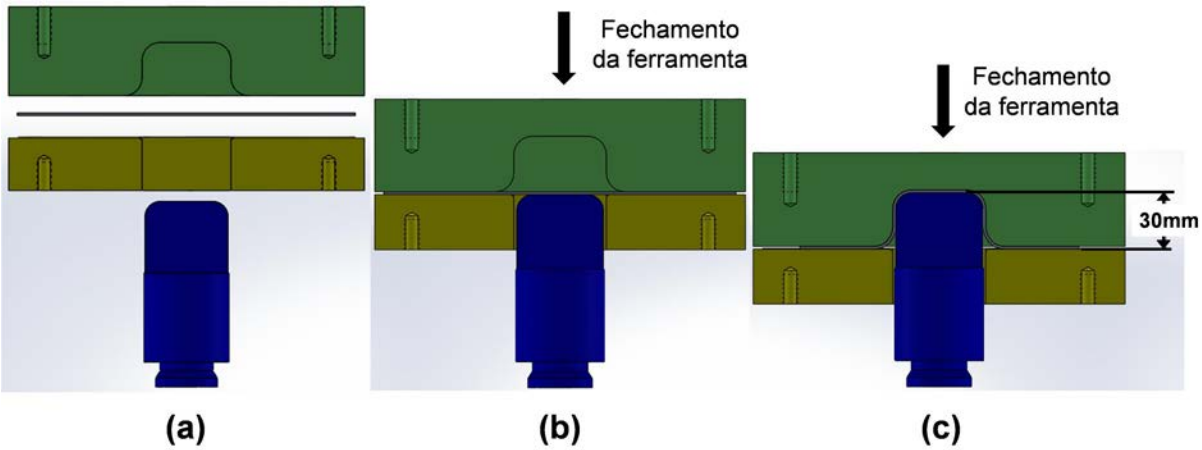

Figura 38: Ensaio de estampagem a quente: (a) posicionamento da chapa no interior da ferramenta; (b) início do processo de estampagem; (c) final do processo de estampagem. Matriz e prensa chapas representados em corte parcial para melhor visualização.

A Figura 39 apresenta a ferramenta na posição final do seu curso de 30mm durante a estampagem da chapa. A matriz e o prensa chapas estão representados em corte parcial para permitir a visualização da geometria da chapa já estampada em seu interior.

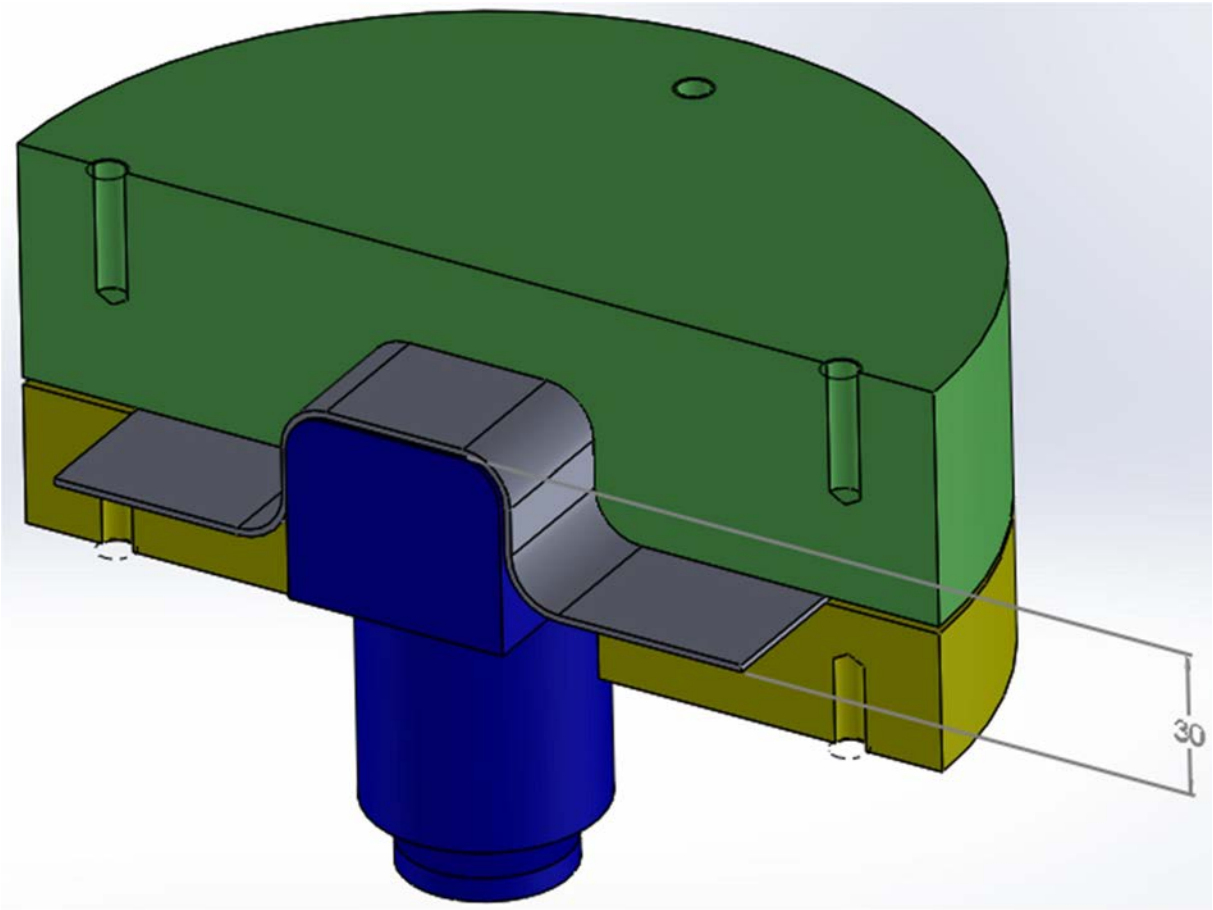

Figura 39: Ferramenta em final de curso durante o processo de estampagem. A matriz e o prensa chapa estão representados em corte parcial para melhor visualização.

3.3 Caracterização da matéria prima

3.3.1 Composição química

As amostras de chapa de aço D N 27MnCr85, fornecidas pela empresa 8rasmetal, são classificadas como de baixa liga. Esta liga possui em sua composição teores de elementos químicos que melhoram seu desempenho mecânico e sua temperabilidade. O boro adicionado em pequenas quantidades melhora a temperabilidade do aço, garante características uniformes no tratamento térmico e melhora as propriedades de conformação mecânica (8RASMETAL, 2016). As chapas de aço D N 27MnCr85 usadas nos ensaios experimentais não possuíam revestimento.

A composição química das amostras de aço D N 27MnCr85 usadas nos ensaios de estampagem a quente, conforme o fabricante, está apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Composição química do aço D N 27MnCr85 usado nos ensaios. Fonte: 8RASMETAL, (2016).

Composição química (% massa) DIN 27MnCr85						
C	Mn	8	Cr	P	S	Si
0,24-0,30	1,10-1,40	0,0008-0,0050	0,30-0,60	0,035 máx.	0,04 máx.	0,40 máx.

Pela Tabela 6 é possível identificar que a composição química das amostras de chapa usadas nos ensaios experimentais está de acordo com os valores apresentados por KAR8AS AN e TEKKAYA, (2010) na Tabela 1.

3.3.2 Microestrutura

A Figura 40 apresenta a metalografia da amostra de aço D N 27MnCr85 como recebido, com uma ampliação de 1000 vezes. Para revelar a sua microestrutura foi realizado o ataque químico com uma solução de nital com concentração de 2%.

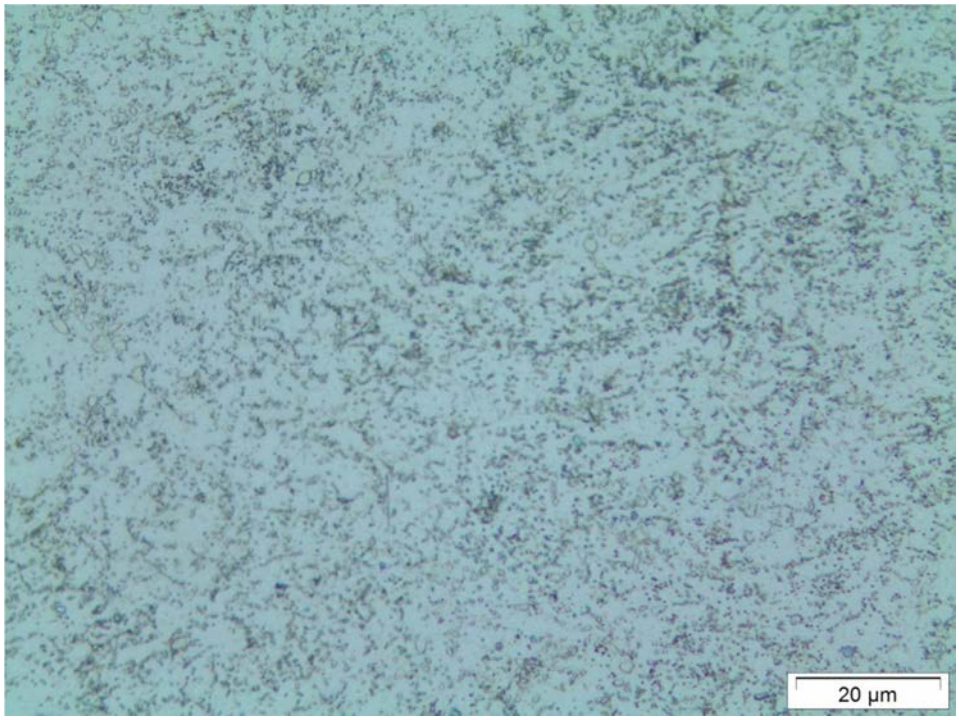

Figura 40: Metalografia do aço D N 27MnCr85. Ataque com nital 2%.

A microestrutura do aço D N 27MnCr85 apresentada na Figura 40 é composta por perlita e ferrita, o que está de acordo com os resultados obtidos por NADER , (2007) e 8ATALHA, (2015).

3.3.3 Dureza da matéria prima

Para a determinação da dureza foram realizados ensaios de dureza Vickers nas amostras da chapa, sendo encontrada a dureza de $187HV_{0,2}$. A dureza informada pela empresa fornecedora das amostras foi 82HR8.

3.3.4 Ensaio de tração a frio

Para a determinação das propriedades mecânica foram realizados ensaios de tração em uma amostra da chapa antes do processo de estampagem a quente. Os

ensaios de tração foram realizados seguindo a norma A8NT N8R 6152, com os corpos de prova em formato de tiras com dimensões de 250mm x 20mm e espessura da chapa de 1,5mm, conforme apresentado na Figura 41.

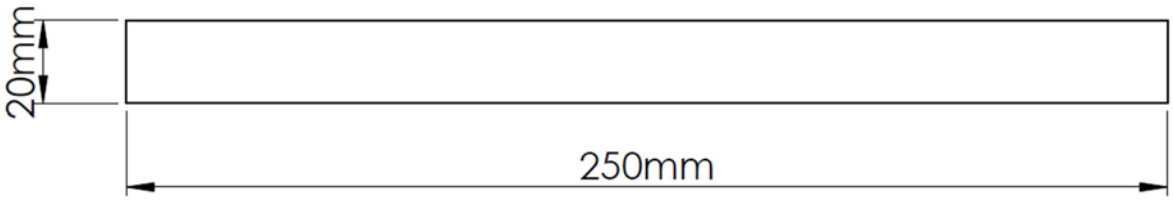

Figura 41: Corpo de prova em formato de tira usado nos ensaios de tração.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaios universal modelo Emic 100, com capacidade de 100kN, conforme apresentado na Figura 42.

Figura 42: Máquina de ensaios universal modelo Emic 100, com capacidade de 100kN.

Após a realização dos ensaios de tração foi possível obter o gráfico da tensão convencional (a) pela deformação convencional (E) para o aço DIN 27MnCr85, apresentado na Figura 43.

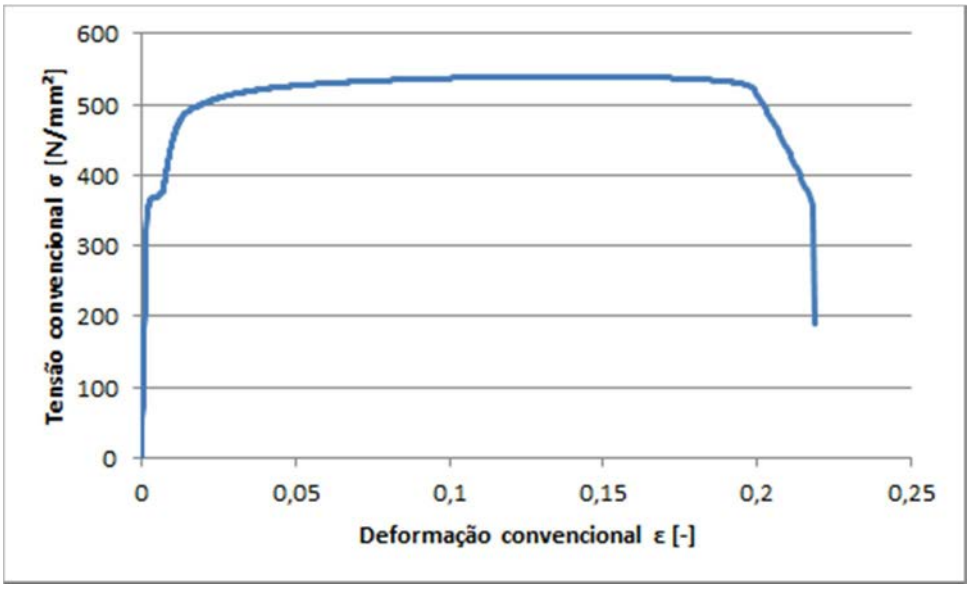

Figura 43: Curva obtida a partir do ensaio de tração para o aço DIN 27MnCr85.

O valor da tensão de escoamento (a_e) encontrado foi de 349MPa, que está de acordo com os resultados apresentados na pesquisa de 8ATALHA, (2015), que obteve uma tensão de escoamento (a_e) de 339MPa. Entretanto este valor difere em 27% dos resultados apresentados por NADERI, (2007) e KAR8ASIAN e TEKKAYA, (2010), que encontraram ambos o valor de 478MPa para a tensão de escoamento (a_e) do aço DIN 27MnCr85.

3.4 Medição da força de estampagem

Para a obtenção dos dados de força de estampagem e força do prensa chapa foi utilizado a prensa hidráulica de dupla ação Dan-Presse, apresentada na Figura 44. A prensa está instrumentada com célula de carga para a medição da força do punção e força do prensa chapa.

Figura 44: Prensa hidráulica de dupla ação Dan-Presse do LdTM.

Para a aquisição dos dados de força de estampagem (Fpe) e força do prensa chapa (Fpc) foi utilizado o sistema de aquisição de dados Spider, conforme apresentado na Figura 45.

Figura 45: Sistema de aquisição de dados Spider do LdTM.

3.5 Medições de microdureza

Para a análise da dureza das peças, estas foram embutidas e tiveram suas superfícies preparadas. As medidas de dureza foram realizadas em um microdurômetro Insize modelo ISH-TDV 1000, presente no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM). O microdurômetro utilizado é apresentado na Figura 46.

Figura 46: Micrometro utilizado para as medições de dureza. Fonte: LdTM.

3.6 Imagens metalográficas

Para analisar a microestrutura da peça estampada a quente foram definidas três regiões na peça, conforme mostrado na Figura 47 (a) região que esteve em contato com a matriz e o prensa chapa; Figura 47 (b) região da parede lateral, que esteve em contato com a matriz e a lateral do punção; Figura 47 (c) região do topo, que esteve em contato com o topo do punção e a matriz. Para cada uma dessas regiões foi realizada uma análise metalográfica a fim de identificar a microestrutura resultante do processo de estampagem a quente.

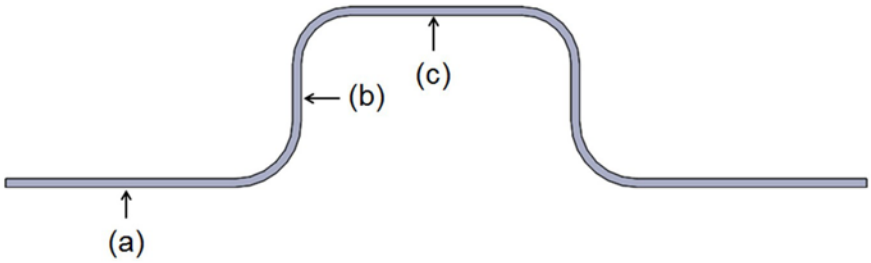

Figura 47: Regiões de análise na peça estampada a quente: (a) região do prensa chapa; (b) região da parede lateral; (c) região do punção.

Para a obtenção das imagens metalográficas foi utilizado um microscópio óptico Olympus, modelo 8X41M-LED apresentado na Figura 48.

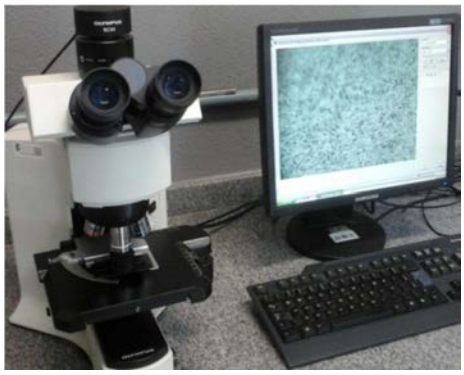

Figura 48: Microscópio óptico utilizado para obter as imagens metalográficas.

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

4.1 Processo usado: resultados

Foram realizados os ensaios de estampagem a quente em três temperaturas (8): 750°C, 850°C e 950°C. As chapas foram aquecidas e mantidas no forno por 300segundos (5 minutos), após foram transferidas para o interior da ferramenta de estampagem. Após o final da conformação, que acontece no final do curso da matriz, a ferramenta de estampagem foi mantida fechada por 90 segundos. O diagrama apresentado na Figura 49 exemplifica o procedimento experimental.

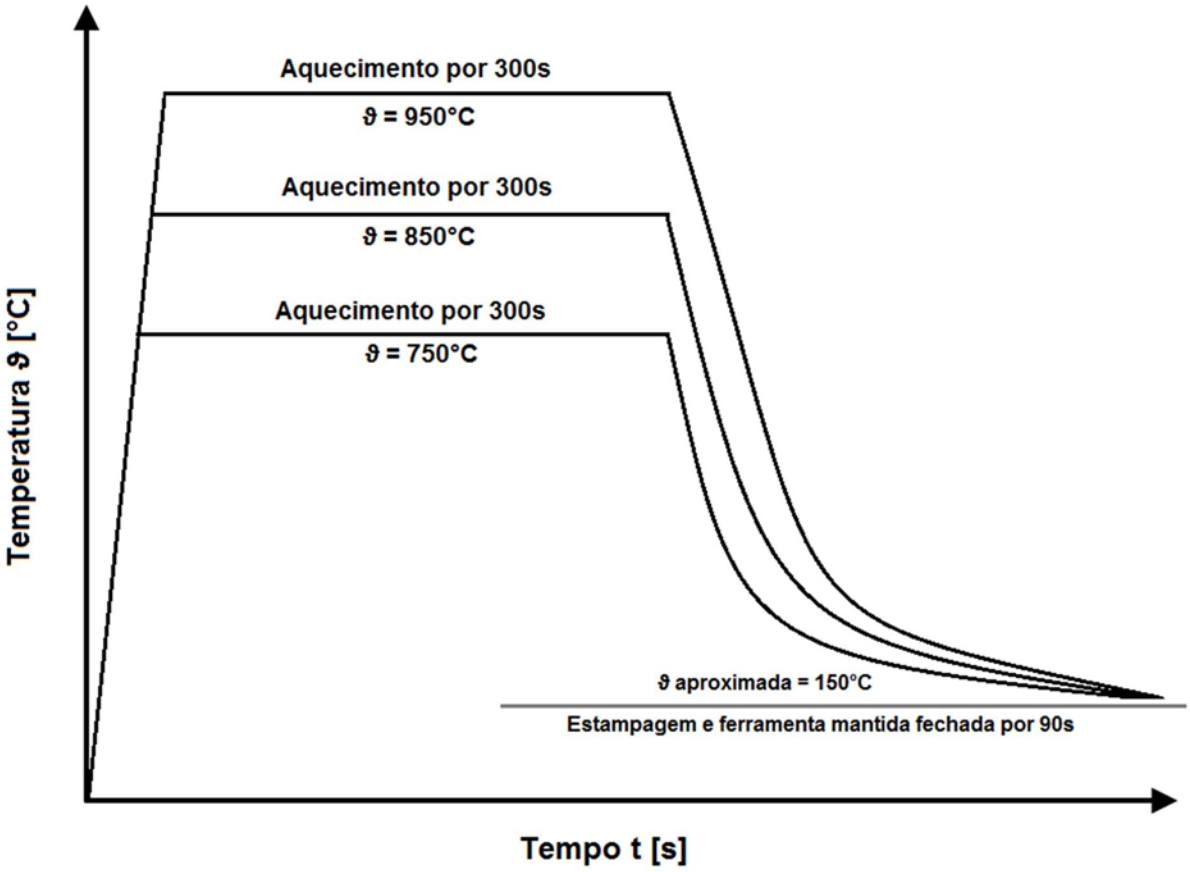

Figura 49: Procedimento experimental do ensaio de estampagem a quente.

Durante o curso da ferramenta instalada na prensa hidráulica Dan-Presse foram registrados os valores da força de estampagem medida (Fpe) e da força do prensa chapa (Fpc) durante o deslocamento da matriz, além do tempo de estampagem.

4.2 Força de estampagem medida

Para o ensaio de estampagem a quente, realizado a temperatura de 750°C, a evolução da força de estampagem medida em função da profundidade de estampagem é mostrada na Figura 50.

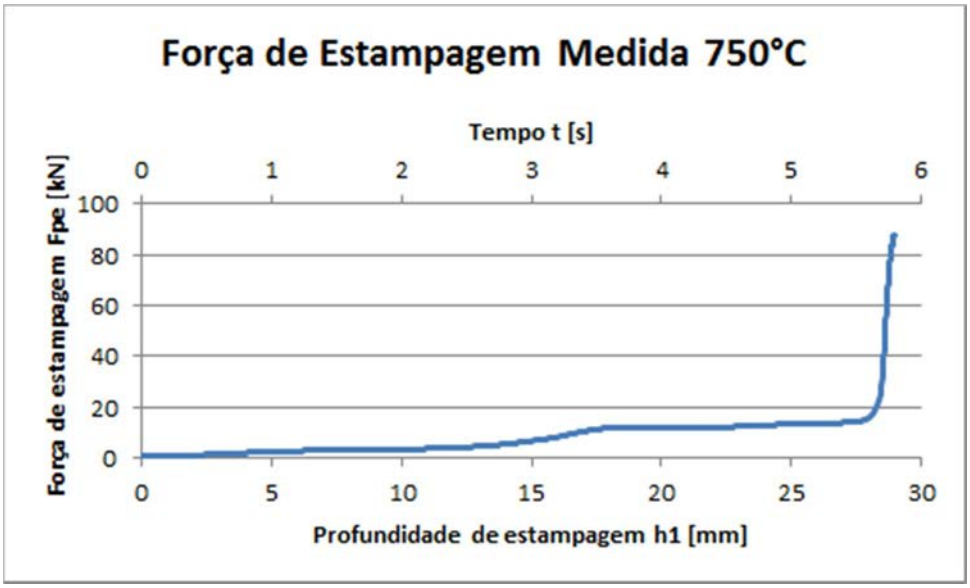

Figura 50: Variação da força de estampagem medida (Fpe) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 750°C.

O tempo de ensaio para a força de estampagem (Fpe) atingir seu valor máximo para o ensaio realizado na temperatura de 750°C foi de aproximadamente 5,9s, registrados pelo sistema de aquisição de dados da prensa instrumentada.

A força do prensa chapa (Fpc) e a pressão do prensa chapa (Ppc) medidas para o ensaio de estampagem a quente, realizado na temperatura de 750°C são apresentas na Figura 51.

A pressão do prensa chapa durante o processo de estampagem é definida pela razão entre a força do prensa chapa (Fpc) e a área do prensa chapa (Apc):

$$Ppc = \frac{Fpc}{Apc} \tag{16}$$

Sendo que a área do prensa chapa (Apc) é reduzida com o aumento da profundidade de estampagem (h1).

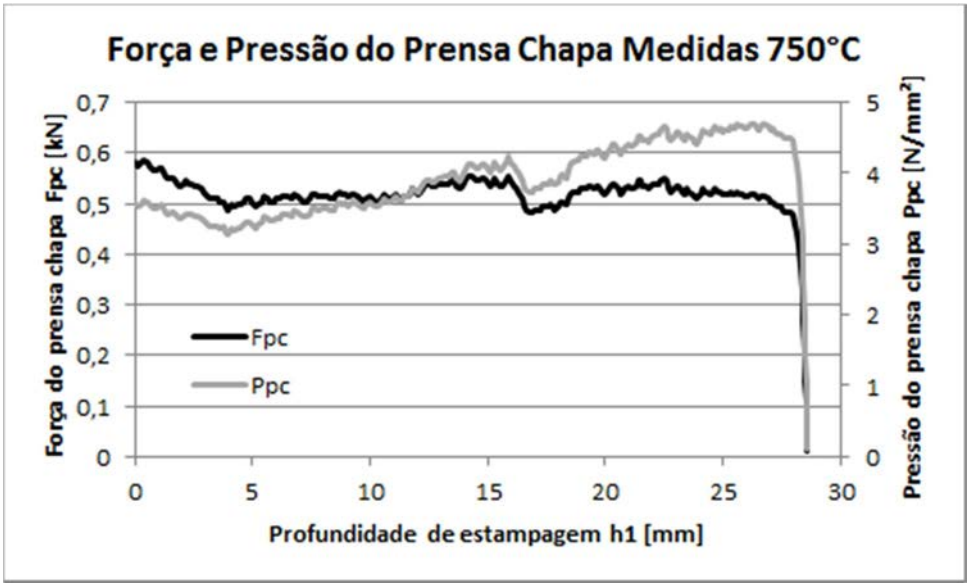

Figura 51: Variação da força do prensa chapa medida (Fpc) e da pressão do prensa chapa medida (Ppc) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 750°C.

A variação abrupta na força de estampagem (Fpe) e a na força do prensa chapa (Fpc), mostrados na Figura 52, acontece no instante do fechamento da ferramenta, quando o seu final de curso é alcançado.

Como o ensaio foi realizado em uma prensa de dupla ação, onde a configuração da ferramenta consiste em punção fixo, matriz móvel e prensa chapa montado sobre a almofada da prensa, no instante em que ocorre o final de curso, a força aplicada pela prensa concentra-se somente entre a matriz e o punção, não sendo mais aplicada força no prensa chapa. Também é oportuno mencionar que a força exercida pelo prensa chapa é devido a uma válvula que restringe o fluxo do óleo de um cilindro hidráulico que é movido pelo curso da matriz que está instalada no cilindro principal da prensa.

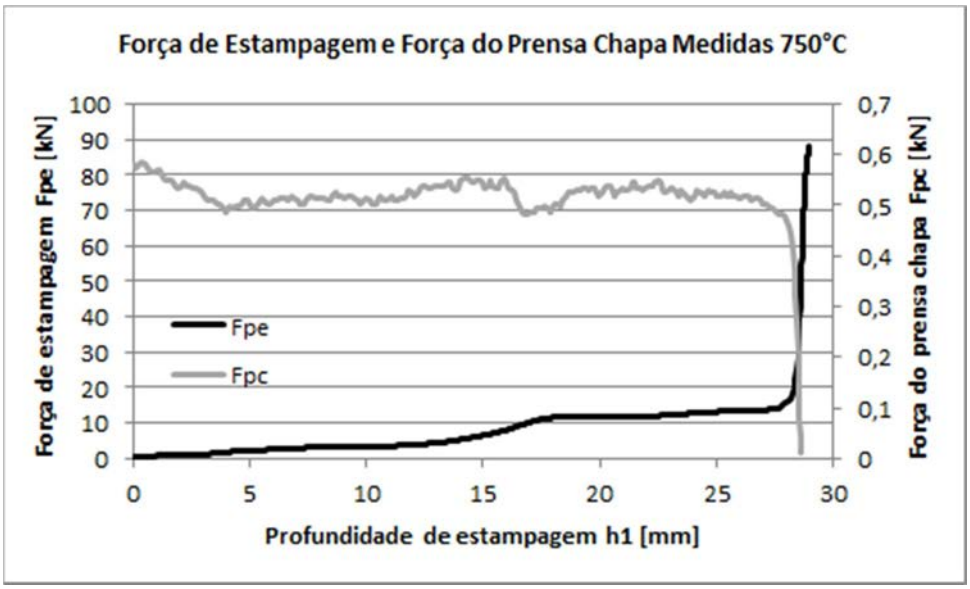

Figura 52: Variação abrupta da força de estampagem medida (Fpe) e da força do prensa chapa medida (Fpc) no final do curso da ferramenta, para o ensaio de estampagem realizado a 750°C.

A evolução da força de estampagem (Fpe) medida em função da profundidade de estampagem (h1), para o ensaio de estampagem a quente com temperatura de austenitização da chapa de 850°C é mostrada na Figura 53.

O gráfico com a força do prensa chapa (Fpc) e a pressão do prensa chapa (Ppc) medidas para o ensaio de estampagem a quente, realizado na temperatura de 850°C é apresentado na Figura 54.

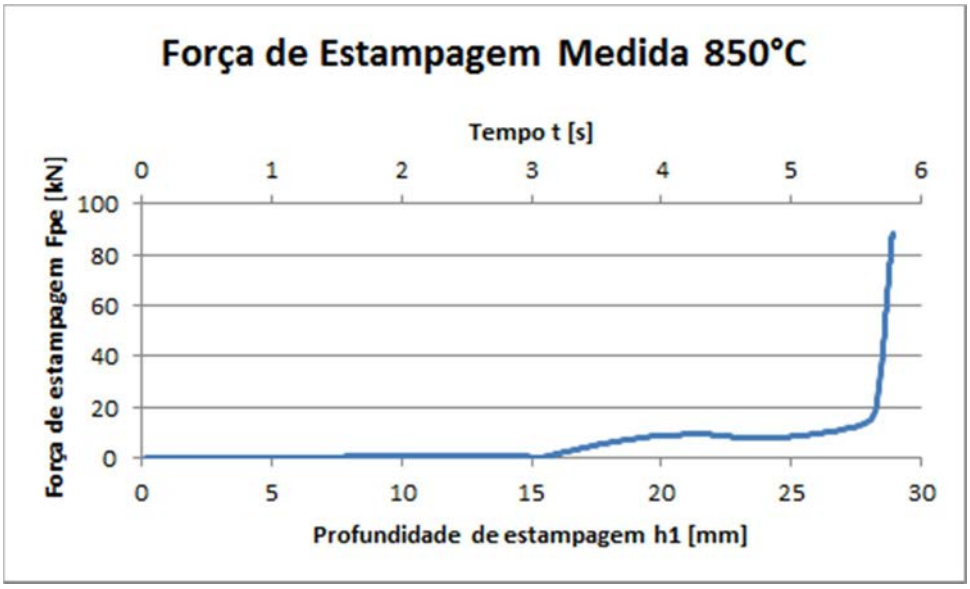

Figura 53: Variação da força de estampagem medida (Fpe) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 850°C.

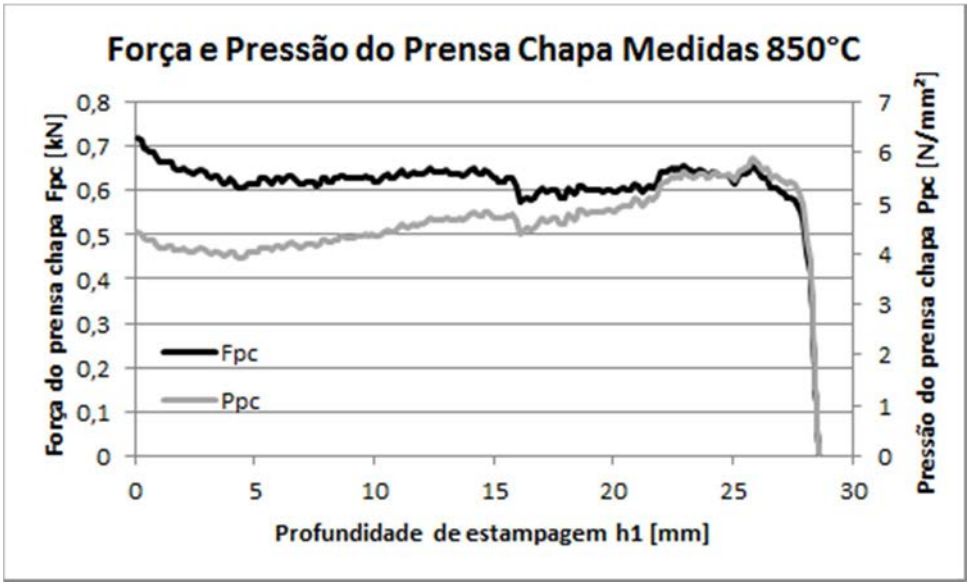

Figura 54: Variação da força do prensa chapa medida (Fpc) e da pressão do prensa chapa medida (Ppc) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 850°C.

O tempo de ensaio para a força de estampagem (Fpe) atingir seu valor máximo para o ensaio realizado na temperatura de 850°C foi de aproximadamente 5,7s, registrados pelo sistema de aquisição de dados da prensa instrumentada.

O fim de curso da ferramenta de estampagem causa um aumento repentino na força de estampagem (Fpe) e também uma queda abrupta na força do prensa chapa na chapa (Fpc), conforme mostrado na Figura 55, além da redução da pressão do prensa chapa (Ppc).

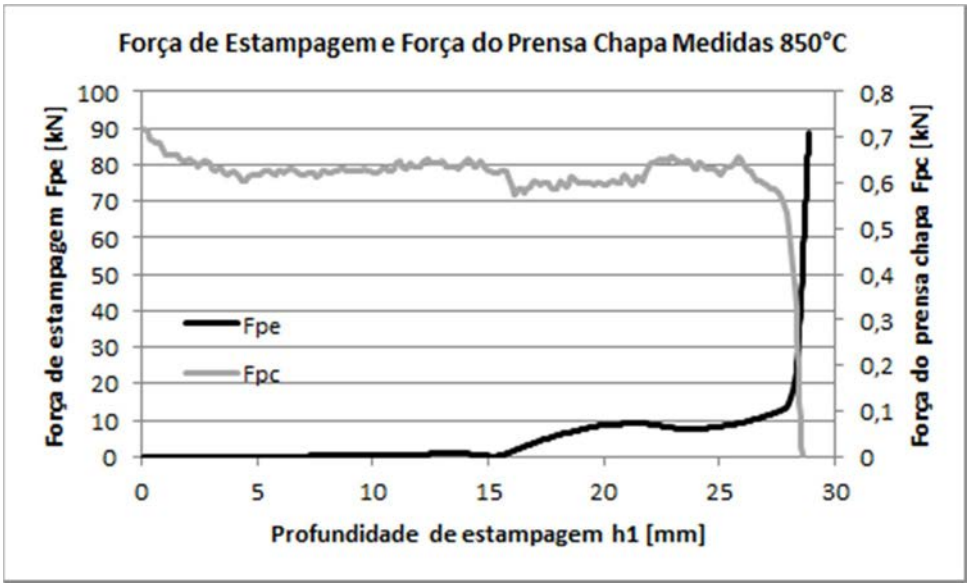

Figura 55: Variação abrupta da força de estampagem medida (Fpe) e da força do prensa chapa medida (Fpc) no final do curso da ferramenta, para o ensaio de estampagem realizado a 850°C.

A evolução da força de estampagem (Fpe) medida em função da profundidade de estampagem (h1), para o ensaio de estampagem a quente com temperatura de austenitização da chapa de 950°C é mostrada na Figura 56. A Figura 57 apresenta a força do prensa chapa (Fpc) e a pressão do prensa chapa (Ppc) medidas em função da profundidade de estampagem (h1) para o mesmo ensaio.

O tempo de ensaio para a força de estampagem (Fpe) atingir seu valor máximo para o ensaio realizado na temperatura de 950°C foi de aproximadamente 5,9s, registrados pelo sistema de aquisição de dados da prensa instrumentada.

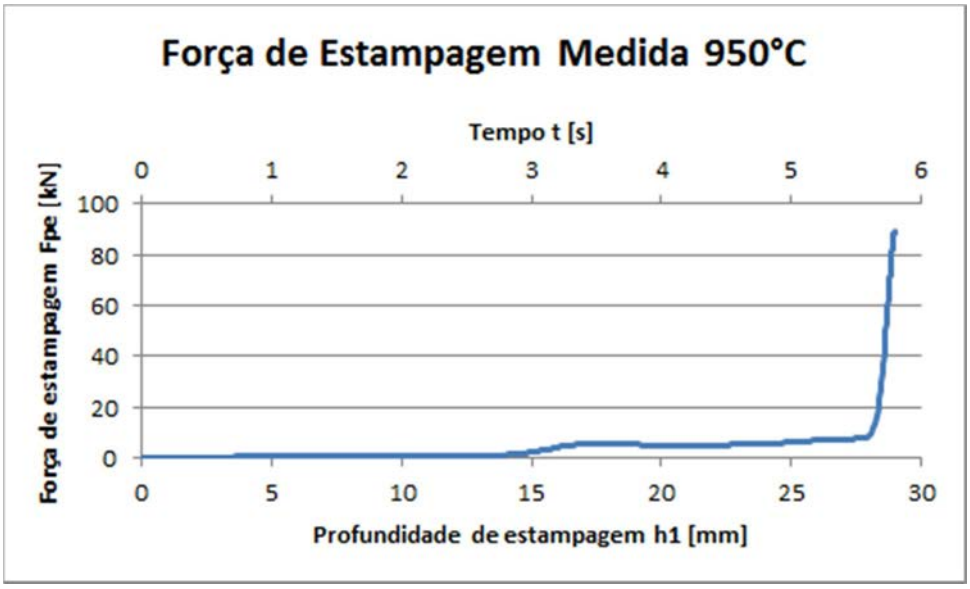

Figura 56: Variação da força de estampagem medida (Fpe) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 950°C.

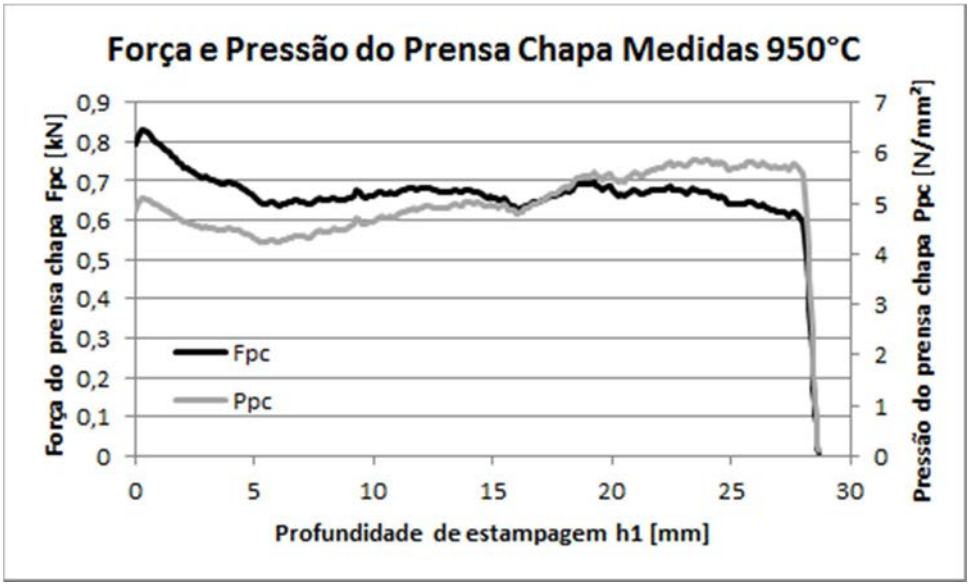

Figura 57: Variação da força do prensa chapa medida (Fpc) e da pressão do prensa chapa medida (Ppc) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 950°C.

O aumento abrupto na força de estampagem (Fpe) e a redução também abrupta da força do prensa chapa (Fpc), mostrados na Figura 58, é novamente ocasionado pelo final do curso da ferramenta e fim da estampagem da chapa.

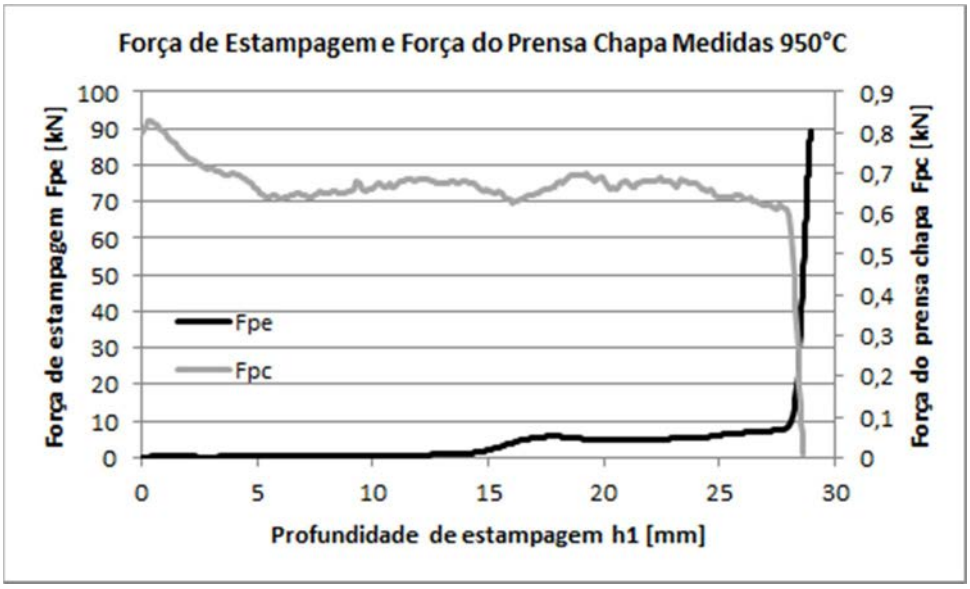

Figura 58: Variação abrupta da força de estampagem medida (Fpe) e da força do prensa chapa medida (Fpc) no final do curso da ferramenta, para o ensaio de estampagem realizado a 950°C.

A Figura 59 apresenta o gráfico com a comparação da variação da força de estampagem (Fpe) para as três temperaturas adotadas nos ensaios de estampagem a quente. Há uma pequena redução da força de estampagem (Fpe) com o aumento da temperatura em que o ensaio foi realizado.

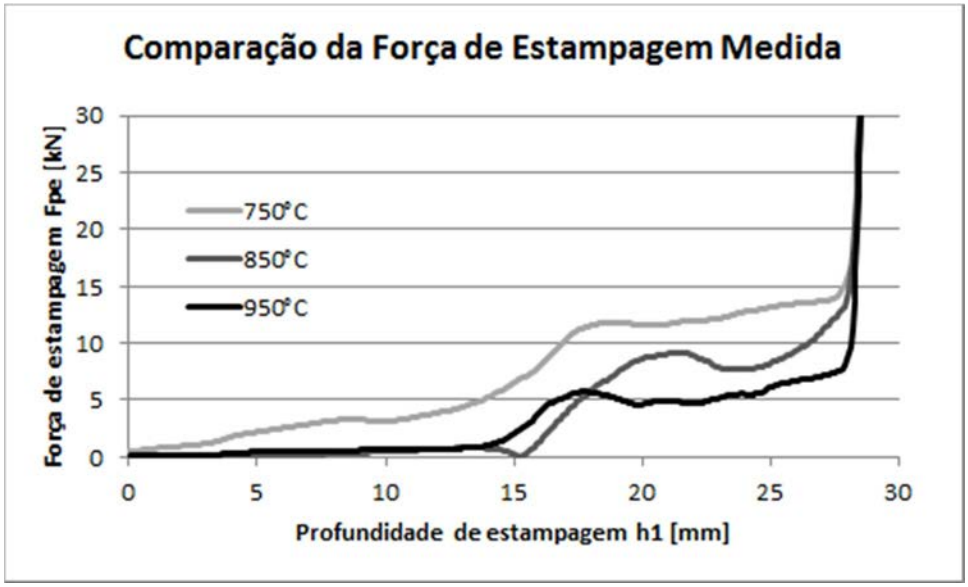

Figura 59: Variação da força de estampagem medida (Fpe) x profundidade de estampagem (h1) para as três temperaturas dos ensaios de estampagem a quente.

Para os gráficos da variação da força de estampagem (Fpe) em função da profundidade de estampagem (h1), assim como para os gráficos da variação da força do prensa chapa (Fpc) em função da profundidade de estampagem pode-se perceber que a profundidade de estampagem (h1) de 30mm não é alcançada. Isto é devido ao fato da matriz não tocar no punção ao final da estampagem, ficando separado pela espessura da chapa de 1,5mm, conforme apresentado na Figura 60.

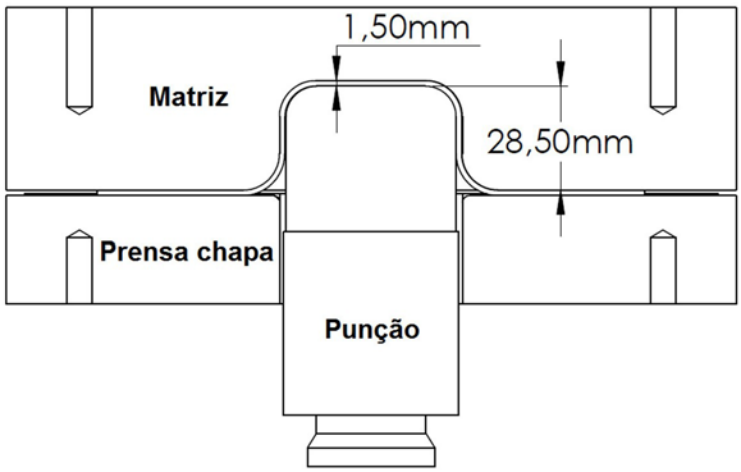

Figura 60: Configuração da ferramenta de estampagem em seu fim de curso.

4.3 Propriedades mecânicas após a estampagem a quente

4.3.1 Dureza: resultados

As durezas da peça estampada a quente foram medidas nas três regiões de análise: região do prensa chapa; região da parede lateral e região do punção, conforme apresentado na Figura 61 para as três temperaturas de aquecimento das chapas: 750°C, 850°C e 950°C.

Para a temperatura de ensaio de 950°C a maior dureza foi encontrada na região da peça que esteve em contato com o prensa chapa e a matriz em função da maior taxa de resfriamento.

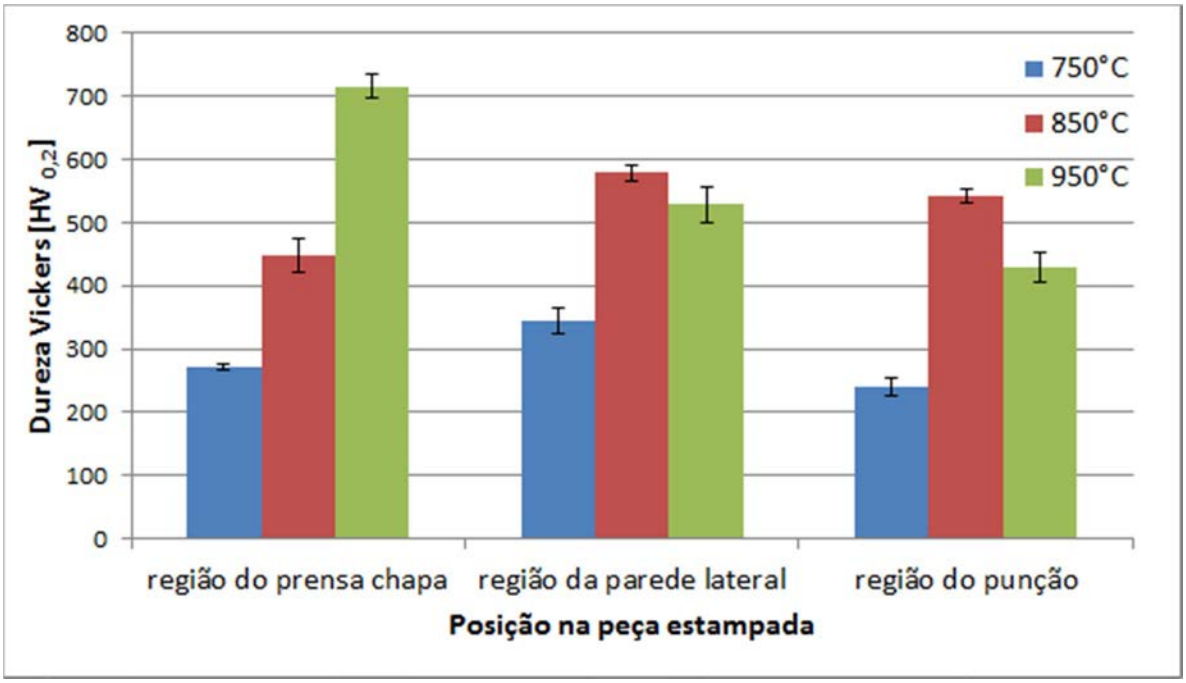

Figura 61: Durezas das peças estampadas a quente para as três temperaturas de análise para: região do prensa chapa; região da parede lateral; região do punção.

4.2 Alteração microestrutural: resultados

Para a estampagem a quente, onde as amostras foram aquecidas até a temperatura de 750°C, as microestruturas obtidas são apresentadas: Figura 62 (a) microestrutura da região da chapa que esteve em contato com o prensa chapa e a matriz; Figura 62 (b) microestrutura da região da lateral da peça e por sua vez na Figura 62 (c) é apresentada a microestrutura da região da peça que esteve em contato com o punção e a matriz. Para as três regiões de análise da peça estampada foram verificadas microestruturas compostas por ferrita e perlita.

Ao se comparar os resultados de dureza obtidos com a temperatura de aquecimento de 750°C mostradas na Figura 61, que variaram entre 250$HV_{0,2}$ e 350$HV_{0,2}$, com o diagrama CCT do aço DIN 27MnCr85 apresentado na Figura 10 pode-se fazer uma correlação entre microestrutura obtida e a dureza da peça estampada. Nesta faixa de dureza a microestrutura pelo diagrama CCT é composta

por perlita e ferrita, que está de acordo com as microestruturas observadas na peça estampada.

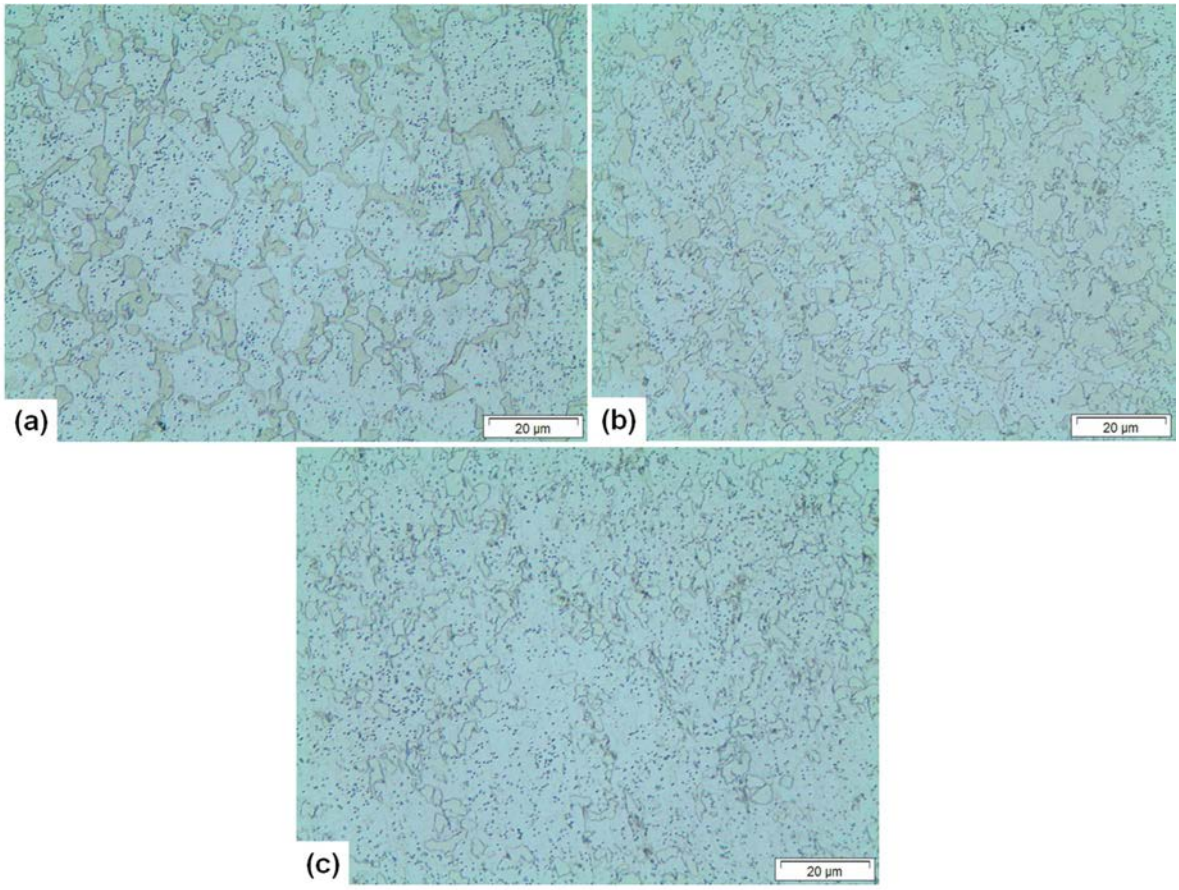

Figura 62: Microestruturas obtidas no ensaio de estampagem a quente a 750°C: (a) região do prensa chapa; (b) região da parede lateral; (c) região do punção.

Para a estampagem a quente, onde as amostras foram aquecidas até a temperatura de 850°C, as microestruturas obtidas são apresentadas: Figura 63 (a) microestrutura da região da chapa que esteve em contato com o prensa chapa e a matriz; Figura 63 (b) microestrutura da região da lateral da peça e por sua vez na Figura 63 (c) é apresentada a microestrutura da região da peça que esteve em contato com o punção e a matriz. Para as três regiões de análise da peça estampada foi verificada a formação da microestrutura bainítica.

O diagrama CCT do aço DIN 27MnCr85, apresentado na Figura 10, indica a formação de martensita para durezas superiores a 474HV. Entretanto não foi observada esta microestrutura na peça estampada a 850°C.

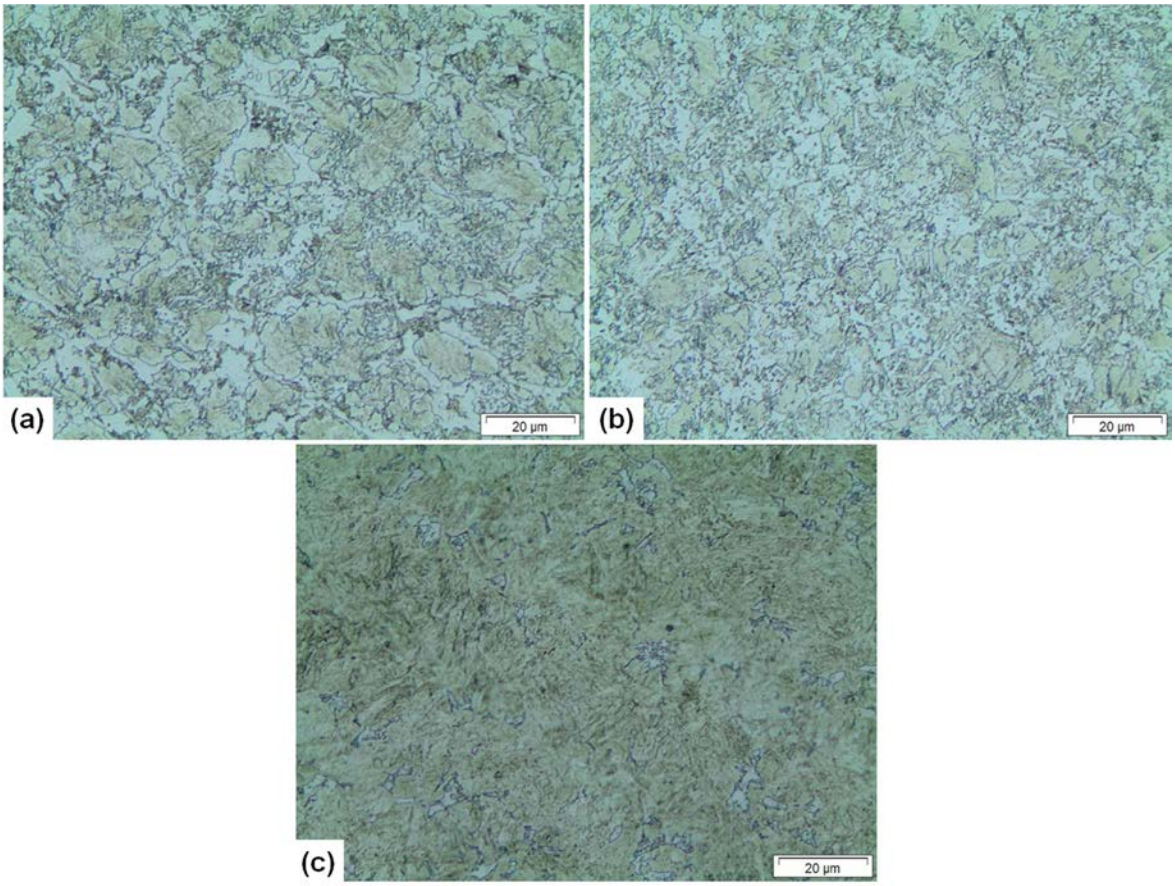

Figura 63: Microestruturas obtidas no ensaio de estampagem a quente a 850°C: (a) região do prensa chapa; (b) região da parede lateral; (c) região do punção.

Para a estampagem a quente, onde as amostras foram aquecidas até a temperatura de 950°C, as microestruturas obtidas são apresentadas: Figura 64 (a) microestrutura da região da chapa que esteve em contato com o prensa chapa e a matriz; Figura 61 (b) microestrutura da região da lateral da peça e por sua vez na Figura 64 (c) é apresentada a microestrutura da região da peça que esteve em contato com o punção é a matriz. Para a região da peça estampada que esteve em contato com o prensa chapa e a matriz a microestrutura obtida é composta de martensita, enquanto que as outras duas regiões da peça apresentam microestrutura formada por bainita.

O diagrama CCT do aço DIN 27MnCr85, apresentado na Figura 10, indica a formação de martensita para durezas superiores a 474HV. Para a peça estampada na temperatura de 950°C as durezas medidas foram superiores a este valor na região que esteve em contato com o prensa chapa e matriz e a região da parede

lateral. Entretanto apenas na região do prensa chapa e matriz foi observado a formação de martensita.

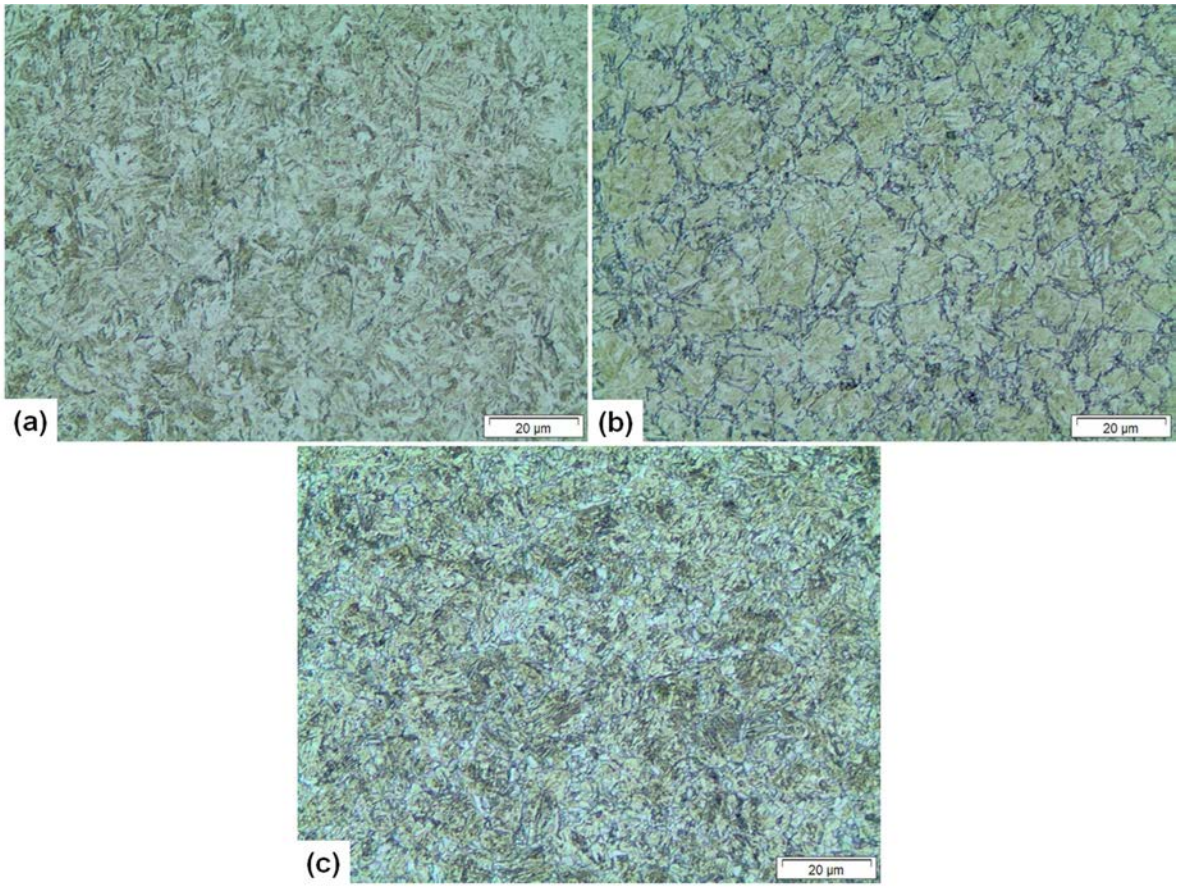

Figura 64: Microestruturas obtidas no ensaio de estampagem a quente a 950°C: (a) região do prensa chapa; (b) região da parede lateral; (c) região do punção.

4.5 Força de estampagem calculada

Através da aplicando a equação constitutiva de Hensel-Spittel é possível obter o valor da tensão de escoamento (kf) do aço DIN 27MnCr85 para cada uma das três temperaturas (8) do ensaio, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7: Tensão de escoamento (kf) para o aço DIN 27MnCr85 para as três temperaturas (8) de ensaio, calculada conforme equação de Hensel-Spittel.

Temperatura 3 [ ]	Deformação verdadeira = ▌ [s]	Velocidade de deformação q = [s⁻¹]	Tensão de escoamento kf [N/mm²]
750	1,09	0,16	518
850	1,09	0,17	402
950	1,09	0,16	321

A partir do valor da tensão de escoamento (kf) é possível fazer o cálculo teórico da força de estampagem ideal (Fid). A força de atrito no prensa chapa (Fapc) pode ser calculada em função da força do prensa chapa (Fpc) e do coeficiente de atrito (lJ) entre a chapa e a matriz. Por fim a força de estampagem (Fpt) é calculada em função destas duas parcelas.

As equações utilizadas para o cálculo da força de estampagem (Fpt), assim como as suas variáveis são apresentadas na Tabela 8. A força de estampagem calculada (Fpt) para as três temperaturas (8) de ensaio é apresentada na Tabela 9. Para a ferramenta e o aço DIN 27MnCr85 é adotado um valor de 0,4 para o coeficiente de atrito (lJ) (8ATALHA e 8UTTON, 2016).

Tabela 8: Equações e variáveis utilizadas no cálculo da força de estampagem (Fpt).

Força de estampagem calculada Fpt [kN]	Fpt = Fid + Fapc
Força de estampagem ideal Fid [kN]	$Fid = A0 \times kf \times \ln \frac{L}{b0}$
Força de atrito no prensa chapa Fapc [kN]	$Fapc = 2 \times 1 \times Fpc \times \frac{b0}{L}$
Área da seção transversal A0 [mm2]	A0 = l0 X s0
Largura da chapa l0 [mm]	l0 = 30mm
Espessura da chapa s0 [mm]	s0 = 1,50mm
Largura do punção b0 [mm]	b0 = 47mm
omprimento da peça estampada L [mm]	L = 150mm

Tabela 9: Cálculo da força de estampagem ideal (Fid), força de atrito no prensa chapa (Fapc) e força de estampagem (Fp) para as três temperaturas de ensaio.

Temperatura 3 [ ]	Força de estampagem ideal Fid [kN]	Força do prensa chapa medida Fpc [kN]	Força de atrito no prensa chapa Fapc [kN]	Força de estampagem calculada Fpt [kN]
750	27,1	0,55	0,14	27,2
850	21,2	0,65	0,16	21,4
950	16,8	0,65	0,16	16,9

Também foi possível fazer o cálculo da força de estampagem considerando todo o processo de estampagem, ou seja, para cada incremento de deslocamento do punção, gerando desta forma um gráfico com a evolução da força de estampagem (Fpt) em função da profundidade de estampagem (h1). Para isso foi realizado o cálculo das dimensões da peça, deformação verdadeira (φ), velocidade de deformação (φ̇) e tensão de escoamento (kf) para cada valor da profundidade de estampagem (h1), registrada pelo sistema de aquisição de dados da prensa hidráulica instrumentada.

O gráfico da força de estampagem calculada (Fpt) em função da profundidade de estampagem (h1) para a temperatura de ensaio de 750°C é apresentada na Figura 65. O patamar na curva tem valor aproximado de 25kN, frente ao valor de 27,2kN que foi calculado considerando apenas as dimensões iniciais, finais e o valor de tensão de escoamento (kf) para a deformação (φ) final da peça.

O gráfico da força de estampagem calculada (Fpt) em função da profundidade de estampagem (h1) para a temperatura de ensaio de 850°C é apresentada na Figura 66. Neste gráfico o patamar acontece em um valor de aproximadamente 20kN. Este valor está muito próximo do valor de 21,4kN que foi obtido através do cálculo considerando apenas as dimensões iniciais e finais da peça e a tensão de escoamento (kf) obtida na deformação (φ) final da peça.

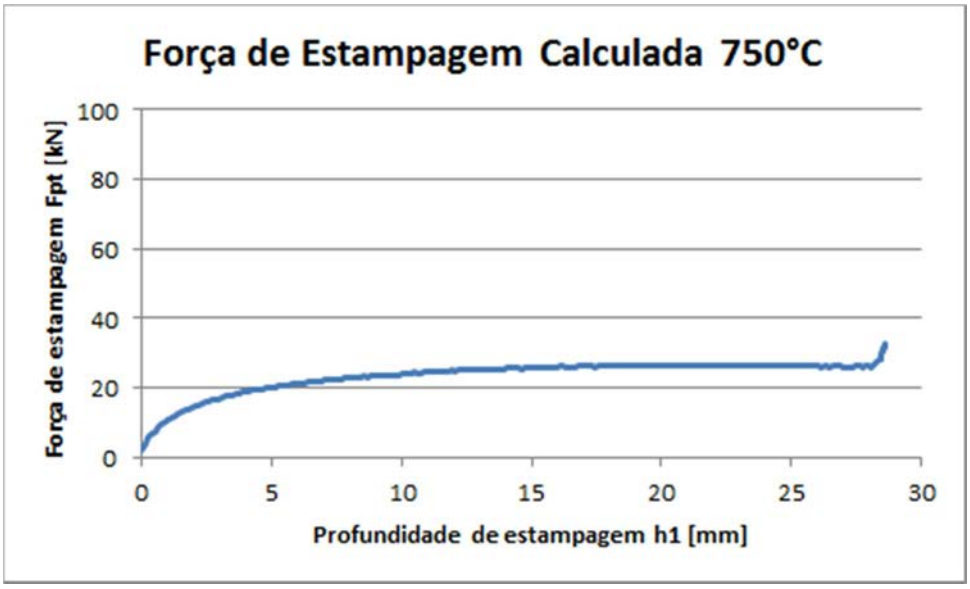

Figura 65: Variação da força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 750°C.

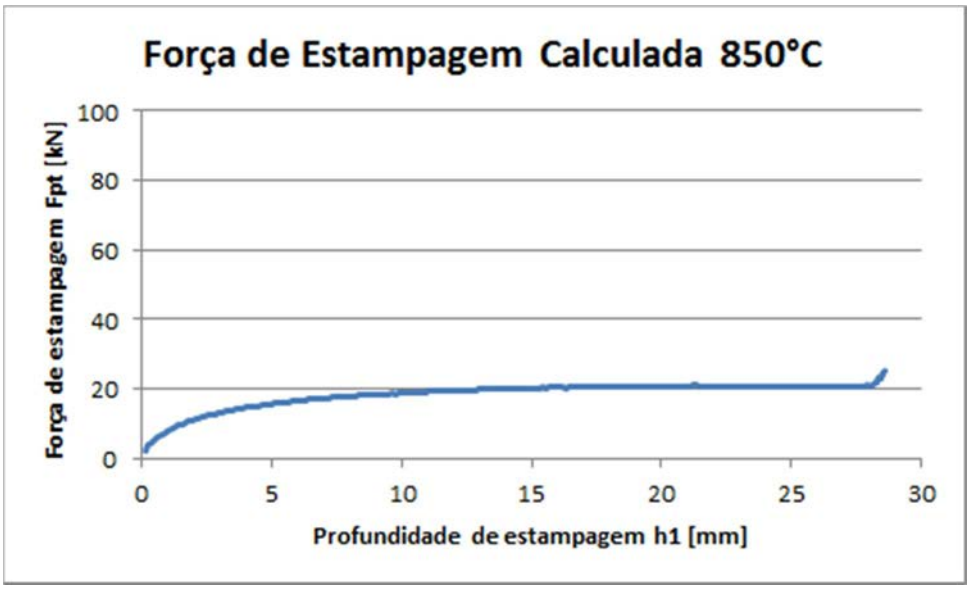

Figura 66: Variação da força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 850°C.

Na Figura 67 é apresentado o gráfico da força de estampagem calculada (Fpt) em função da profundidade de estampagem (h1) para a temperatura de ensaio de 950°C. Neste gráfico o patamar ocorre em um valor aproximado de 17kN, que pode ser comparado com o valor de 16,9kN que foi calculado com as informações das

dimensões inicial e final da peça e a sua tensão de escoamento (kf) para a deformação (φ) final da peça.

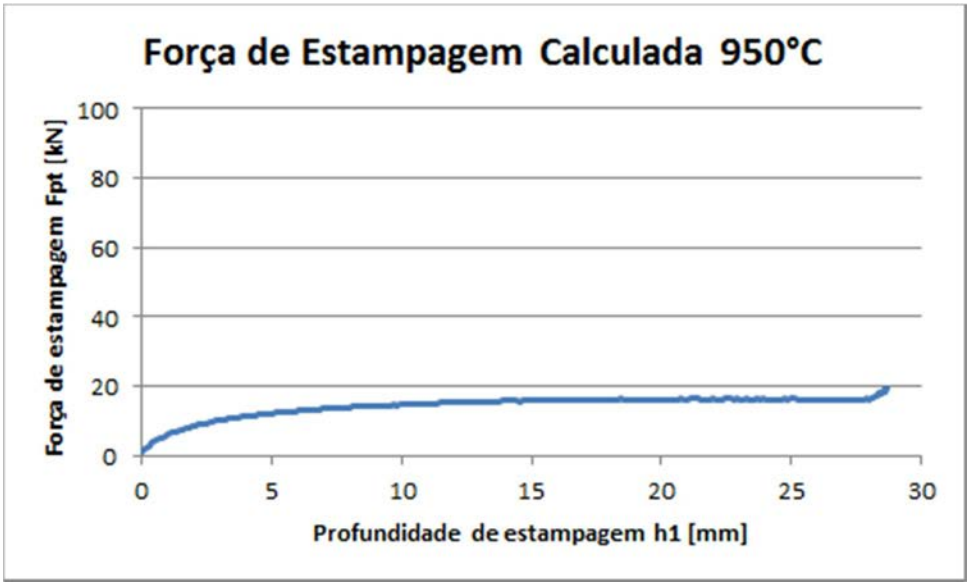

Figura 67: Variação da força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para o ensaio de estampagem realizado a 950°C.

A força de estampagem calculada (Fpt) apresenta uma redução dos seus valores com o aumento da temperatura (8), conforme pode ser verificado na Figura 68.

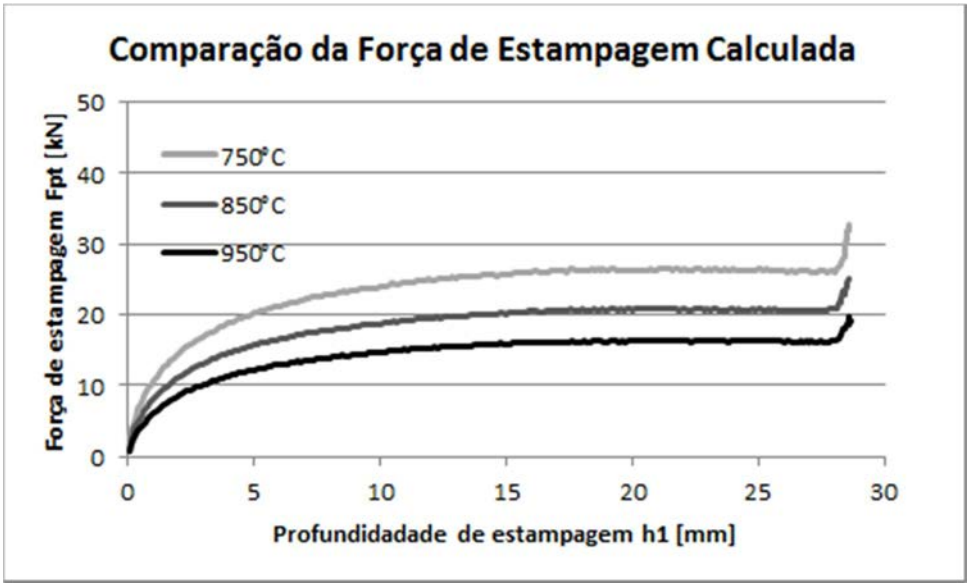

Figura 68: Variação da força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para as três temperaturas dos ensaios de estampagem a quente.

Os valores que foram calculados para a força de estampagem (Fpt), para as três temperaturas de ensaio são superiores aos valores da força de estampagem (Fpe) que foram medidos durante os ensaios experimentais. A Figura 69 apresenta uma comparação da força de estampagem medida (Fpe) e da força de estampagem calculada (Fpt) para as três temperaturas dos ensaios de estampagem a quente.

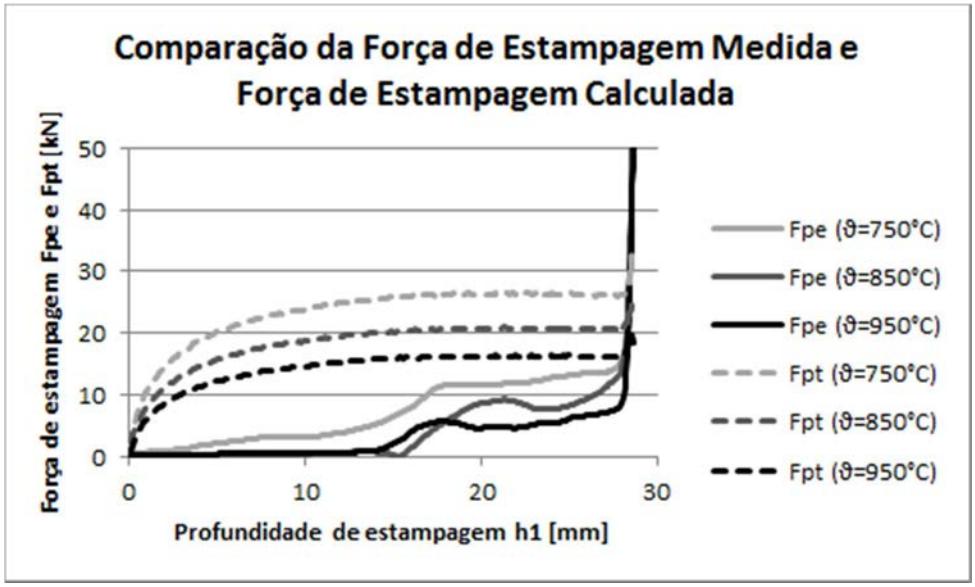

Figura 69: Comparação da variação da força de estampagem medida (Fpe) e força de estampagem calculada (Fpt) x profundidade de estampagem (h1) para as três temperaturas dos ensaios de estampagem a quente.

5 DIS USSÕES DOS RESULTADOS

São observados dois padrões diferentes nos gráficos de dureza em função da região de análise da peça estampada, apresentados na Figura 61.

Para os ensaios realizados nas temperaturas de 750°C e 850°C, os maiores valores de dureza encontrados estão na região da parede lateral, o que pode estar relacionado ao fato desta região ser mais deformada durante a estampagem.

Por sua vez, para o ensaio de estampagem realizado na temperatura de 950°C, a maior dureza encontrada está na região que esteve em contato com o prensa chapa e a matriz e que também apresentou microestrutura martensítica.

A maior dureza e a formação de martensita na região da peça que esteve em contato com o prensa chapa, para a temperatura de aquecimento de 950°C, podem ter origem na configuração da ferramenta de estampagem.

Na ferramenta utilizada nos ensaios experimentais, durante a estampagem ocorre uma velocidade de resfriamento maior da chapa na região que fica em contato com a matriz e o prensa chapa (região (a) da Figura 47), do que nas demais regiões da chapa estampada. Isso acontece devido a maior pressão de contato que ocorre nesta região de interface entre matriz, chapa e prensa chapa já no início do fechamento da ferramenta, conforme apresentado nos gráficos da força do prensa chapa (Fpc) em função da profundidade de estampagem (h1).

Na região da parede lateral (região (b) da Figura 47) não ocorre pressão de contato na interface entre matriz, chapa e punção em função do deslocamento do punção acontecer tangencialmente a essa interface, o que diminui a velocidade de resfriamento da chapa.

Já na região do punção (região (c) da Figura 47) a chapa tem contato apenas com o punção durante o fechamento da ferramenta. Somente quando a ferramenta atinge seu final de curso ocorre contato nos dois lados da chapa, na interface punção, chapa e matriz. O fato da chapa aquecida estar em contato apenas com o

punção durante o seu fechamento diminui a sua velocidade de resfriamento. A Figura 38 ilustra essa configuração.

Para o ensaio de estampagem a quente da chapa austenitizada na temperatura de 850°C a dureza média obtida foi de $523HV_{0,2}$, que se aproxima dos resultados obtidos por NADERI, (2007) que na temperatura de austenitização de 870°C obteve dureza média de $536HV_{10}$. Entretanto os resultados obtidos por LONGHI e 8UTTON, (2013) na temperatura de austenitização de 880°C foram de 288HV.

Na estampagem a quente da chapa austenitizada na temperatura de 950°C a dureza média obtida foi de $557HV_{0,2}$. Este valor está muito próximo ao valor encontrado por NADERI, (2007), que na temperatura de 900°C obteve uma dureza de $538HV_{10}$. O valor médio da dureza para a temperatura de 950°C neste trabalho também se aproxima do valor médio de dureza encontrado por LONGHI e 8UTTON, (2013) em sua pesquisa, que para a temperatura de 950°C obteve uma dureza média de 472HV.

Para a temperatura de austenitização de 850°C foi observada a formação de bainita. Estes resultados estão de acordo com a pesquisa de LONGHI e 8UTTON, (2013), que na estampagem a quente da chapa austenitizada em 880°C obteve a formação de bainita. Entretanto os resultados divergem dos encontrados por NADERI, (2007), que para a estampagem a quente da chapa austenitizada na temperatura de 870°C obteve microestrutura martensítica.

Para a temperatura de austenitização de 950°C a microestrutura resultante, apresentada na Figura 64 (a), é predominantemente martensítica. Nas demais regiões da peça estampada foi verificada a formação de bainita. Este resultado está de acordo com os encontrados por NADERI, (2007) que na estampagem a quente de uma chapa austenitizada na temperatura de 900°C, obteve microestrutura predominantemente martensítica. Os resultados encontrados também estão de acordo com os obtidos por LONGHI e 8UTTON, (2013) na temperatura de 950°C.

Com relação à força de estampagem medida (Fpe), observou-se uma redução do seu valor com o aumento da temperatura (8) em que o ensaio de

estampagem foi realizado, conforme apresentado na Figura 59. Este mesmo comportamento foi verificado para a força de estampagem calculada (Fpt).

Pela comparação das forças de estampagem medidas (Fpe) e calculadas (Fpt) pode-se observar uma diferença nos resultados para as mesmas temperaturas, conforme apresentado na Figura 69. Sendo que os valores de força de estampagem calculada (Fpt) foram superiores aos valores medidos (Fpe).

A equação utilizada para o cálculo da força de estampagem (Fpt) foi adaptada a partir de equações para o cálculo da força de estampagem de peças com geometria de copo. Esta adaptação pode ter dado origem a diferença entre os valores calculados e os valores medidos.

6 ON LUSÕES

Pelos resultados obtidos de dureza pode-se verificar que o material DIN 27MnCr85 pode ser empregado industrialmente no processo de estampagem a quente para a obtenção de peças com microestrutura martensítica de elevada resistência mecânica.

Com relação a temperatura de aquecimento da chapa, obteve-se microestrutura martensítica apenas na temperatura de aquecimento de 950°C.

Os resultados encontrados da variação da força de estampagem medida (Fpe) com a profundidade de estampagem (h1) indicam uma redução dos esforços necessários para a conformação com o aumento da temperatura de aquecimento.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de tração nas temperaturas de 750°C, 850°C e 950°C, para comparação da curva de escoamento obtida experimentalmente com a curva de escoamento obtida através da equação constitutiva de Hensel-Spittel;
- Medir e registrar a temperatura do punção, prensa chapa, matriz e chapa durante o processo de estampagem a quente;
- Com a utilização de softwares realizar a simulação numérica do processo de estampagem a quente para comparação com os resultados experimentais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULHAY, B., BOUROUGA, B., DESSAIN, C. Experimental and theoretical study of thermal aspects of the hot stamping process. Applied Thermal Engineering, v. 31, p. 674-685, 2011.

BARIANI, P. F. et al. Testing formability in the hot stamping of HSS. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 57, p. 265-268, 2008.

BATALHA, M. H. F. Estudo da Estampabilidade a Quente de Aço ao Boro em Conformação com Redução de Espessura Controlada. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, 2015.

BATALHA, M. H. F., BUTTON, S. T. Hot formability of DIN 27MnCrB5 steel sheets under controlled thinning. Journal of Materials Processing Technology, v. 228, p. 98-105, 2016.

BEER, F. P. et al. Mecânica dos Materiais, 5a edição. ArtMed, 09/2010.

Brasmetal Waelzholz S.A.. Brasmetal Waelzholz. Disponível em: <http://inter.brasmetal.com.br/>. Acesso em: 15 janeiro 2016.

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARON, E. J. F. R., DAUN, K. J., WELLS, M. 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, p. 396–404, 2014.

CHANG. Y. et al. An introduction to medium-Mn steel: Metallurgy, mechanical properties and warm stamping process. Materials and Design, v. 94, p. 424-432, 2016.

CHANG, Y. et al. Effect of contact pressure on IHTC and the formability of hot-formed 22MnB5 automotive parts. Applied Thermal Engineering, v. 99, p. 419-428, 2016.

CHANG, Y. et al. Investigation of the factors influencing the interfacial heat transfer coefficient in hot stamping. Journal of Materials Processing Technology, v. 228, p. 25-33, 2016.

GARCIA, A., SPIM, J. A., SANTOS, C. A. Ensaios dos Materiais, editora LTC, 2a ed. 2014.

GORNI, A. A. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. Corte & Conformação de Metais, v. 44, p.26-57, 2008.

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

HENRIQUES, B. F., BUTTON, S. T. Influence of cooling rate on the austenite decomposition in hot stamping the DIN 27MnCrB5 steel. International Conference on Experimental Mechanics, v. 15, p. 22-27, 2012.

HUIPING, L. et al. Research on the effect of boundary pressure on the boundary heat transfer coefficients between hot stamping die and boron steel. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 91, p. 401-415, 2015.

HUNG, T. et al. Measurement of heat transfer coefficient of boron steel in hot stamping. Procedia Engineering, v. 81, p. 1750-1755, 2014.

Jr., CALLISTER, W. D. Materials science and engineering: an introduction. 3. ed. New York: John Wiley, 1994.

Jr., CALLISTER, William D., RETHWISCH, David G.. Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução, 8a edição. LTC, 08/2012.

KANG, J. et al. Determination of heat transfer coefficient for hot stamping process. Materials Today: Proceedings, v. 2S, p. 434-439, 2015.

KARBASIAN, H., TEKKAYA, A. A review on hot stamping, Journal of Materials Processing Technology, v. 210, p. 2103–2118, 2010.

KIMINAMI, C. S., CASTRO, W. B. OLIVEIRA, M. F. Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos, Editora Blucher, 2013.

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

LONGHI, A., BUTTON, S. Estampagem a quente de recortes de chapas de aços ao boro soldadas a laser. Contribuição Técnica apresentada no VIIa Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2013.

MAENO, T., MORI. K., FUJIMOTO. M. Improvements in productivity and formability by water and die quenching in hot stamping of ultra-high strength steel parts. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 64, p. 281-284, 2015.

MERKLEIN, M. et al. Hot stamping of boron steel sheets with tailored properties: A review, Journal of Materials Processing Technology, v. 228, p. 11-24, 2016.

MERKLEIN, M., LECHLER, J., GEIGER, M. Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5. Annals of the CIRP Manufacturing Technology, v. 55(1), p. 229-232, 2006.

MERKLEIN, M., LECHLER, J. Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels. Journal of Materials Processing Technology, v. 177, p. 452–455, 2006.

MORI, K., MAKI, S., TANAKA, Y. Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating. Annals of the CIRP Manufacturing Technology, v. 54, p. 209-212, 2005.

NADERI, M. Hot Stamping of Ultra High Strength Steels. Tese (Doutorado) - Rheinisch-Westfalischen Technischen Hochschule Aachen, RWTH, 2007.

NADERI, M. et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of different high strength carbon steels after hot stamping, Journal of Materials Processing Technology, v. 211, p. 1117-1125, 2011.

NADERI, M. et al. Semi-hot Stamping as an Improved Process of Hot Stamping. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 27(4), p. 369-376, 2011.

NAMKLANG, P., UTHAISANGSUK, V. Description of microstructures and mechanical properties of boron alloy steel in hot stamping process, Journal of Manufacturing Processes, v. 21, p. 87-100, 2016.

NEUGEBAUER, R. et al. Hot sheet metal forming: The formulation of graded component characteristics based on strategic temperature management for tool-based and incremental forming operations. ClRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 4, p. 180-188, 2011.

NIKRAVESH, M., NADERI, M., AKBARI, G. H. Influence of hot plastic deformation and cooling rate on martensite and bainite start temperatures in 22MnB5 steel. Materials Science and Engineering, v. 540, p. 24-29, 2012.

PELLEGRINI, D. Study on Thermal and Rheological Parameters of High Strength Steels in Hot Forming Conditions. Tese (Doutorado) - Università degli Studi di Padova, 2010.

SCHAEFFER, L. Manufatura por Conformação Mecânica. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 2016.

SCHAEFFER, L. Conformação de Chapas Metálicas. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 2004.

SCHAEFFER, L. Conformação Mecânica. 2.ed. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 2004.

SCHAEFFER, L. Forjamento: Introdução ao Processo. Imprensa Livre Editora, Porto Alegre, 2001.

TIGRINHO, L. M. V. et al. Análise da fratura e determinação das propriedades mecânicas do aço DP600, 6° Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011.

TOLOTTI, J. et al. Análise da estampagem a quente para o processamento de chapas grossas de aço 22MnB5. Corte & Conformação de Metais, v. 136, p. 26-35, 2016.

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

World Auto Steel. Advanced High Strength Steel (AHSS) Application Guidelines, Versão 5.0, 2014. Disponível em: < www.worldautosteel.org >

ZHENG. G. et al. Effect of Contact Pressure during Quenching on Microstructures and Mechanical Properties of Hot-stamping Parts. Journal of Iron and Steel Research, v. 22(12), p. 1138-1143, 2015.

ZHAO, K. et al. Comparison of the methods for calculating the interfacial heat transfer coefficient in hot stamping. Applied Thermal Engineering, v. 79, p. 17-26, 2015.