

PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA

ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA

**DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO**

**MODELAMENTO POR ELEMENTOS
FINITOS DA ESTAMPAGEM A QUENTE
DE CHAPAS DE AÇO 22MnB5**



**ALUNO: MATHEUS RIBEIRO DAL-CIM
ORIENTADOR: Prof. LUCIANO PESSANHA
MOREIRA, D.Sc.**

**Volta Redonda
2019**

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PÓLO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

Matheus Ribeiro Dal-Cim

**MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS DA ESTAMPAGEM A QUENTE DE
CHAPAS DE AÇO 22MnB5**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em engenharia metalúrgica. Área de concentração: Modelamento e simulação de processos de fenômenos.

ORIENTADOR: Prof. Luciano Pessanha Moreira, D.Sc.

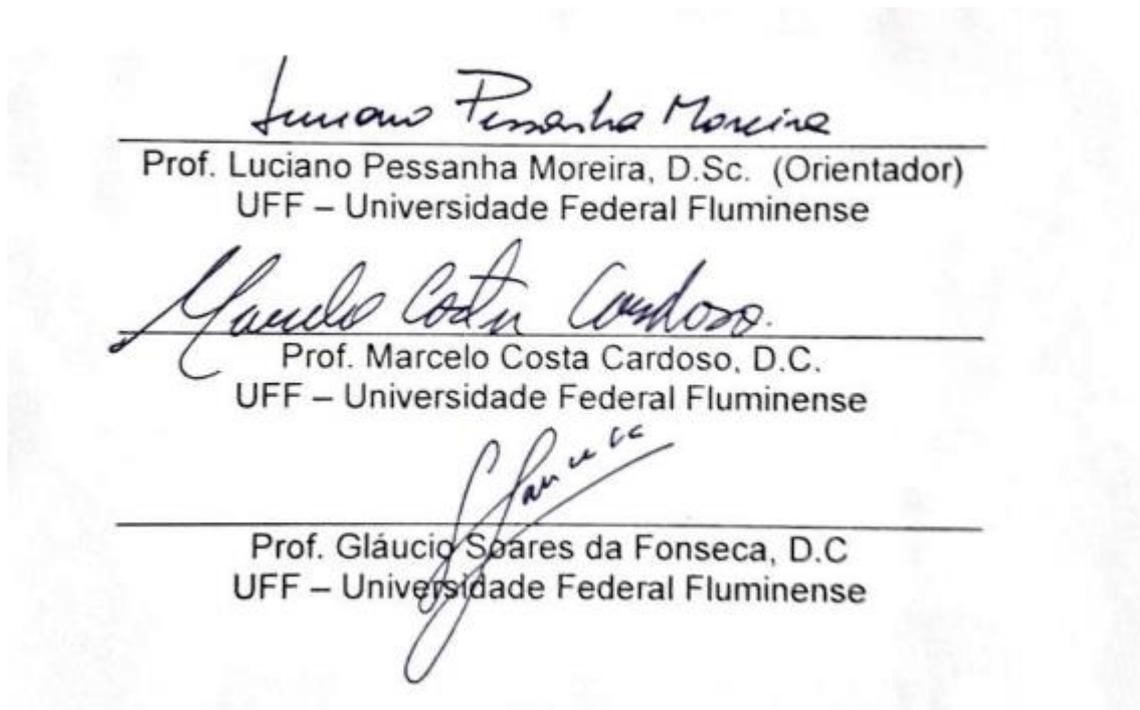
**Volta Redonda
2019**

Matheus Ribeiro Dal-Cim

MODELAMENTO POR ELEMENTOS FINITOS DA ESTAMPAGEM A QUENTE DE CHAPAS DE AÇO 22MnB5

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em engenharia metalúrgica da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em engenharia metalúrgica

Defendido em 11 de Março de 2019.



Volta Redonda
2019

Ele não sabia que era impossível

Foi lá e fez

(Jean Cocteau)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Sebastião e Angela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado durante esse longo caminho;

Ao Prof. Luciano Pessanha Moreira, pela orientação no decorrer dos estudos e realização deste trabalho;

Aos meus pais, pelo apoio, paciência, confiança e, principalmente, pelo amor incondicional;

A minha noiva, Thais, por aguentar as minhas reclamações e o seu apoio incondicional;

As minhas amadas irmãs, pelo apoio e presença constante na minha vida;

As minhas sobrinhas, Pietra, Lis, Lorena e Maria Eduarda, que sempre trouxeram grandes alegrias em minha vida;

À minha família pelo apoio;

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica da UFF, por disponibilizar o Laboratório de Simulação Computacional;

Aos demais Professores da Pós-Graduação, funcionários e amigos da EEIMVR-UFF;

À Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), pela cessão de dados referentes ao aço 22MnB5;

À Capes, pela Bolsa de Mestrado no âmbito do Programa de Demanda Social;

RESUMO

Este estudo tem como objetivo fornecer um procedimento numérico para avaliar os parâmetros do processo de estampagem a quente de aços de alta resistência mecânica, neste caso, o aço ao boro “22MnB5”. Este processo é comumente utilizado na indústria automotiva, conhecido por associar a alta produtividade da estampagem com o tratamento térmico de têmpera durante a conformação mecânica, com isso, reduz-se os efeitos do retorno elástico e permite produzir produtos com limite de resistência superior a 1.500 MPa. Neste contexto, foi proposto um modelo de elementos finitos, considerando-se os efeitos de acoplamentos termomecânicos, adotando-se uma geometria de conformação de peça em formato U sob estado plano de deformação. As propriedades físicas e mecânicas foram consideradas em função da temperatura de acordo com dos dados disponíveis na literatura. O comportamento elasto-plástico do material da chapa de aço, foi definido em função da temperatura. Para garantir-se uma microestrutura final martensítica, os canais de resfriamento no ferramental foram dimensionados a partir do princípio de conservação de energia, considerando-se a água como fluido refrigerante. As previsões numéricas dos históricos de temperaturas em pontos críticos do estampo, em conjunto com um modelo de transformação de fases austenita-martensita, demonstram que os canais de resfriamento garantem uma microestrutura predominantemente martensítica, fornecendo taxas de resfriamento superiores à taxa crítica de 30° C/s de uma chapa de aço 22MnB5. A variação do retorno elástico foi muito pequena com valores de - 0,53° no ângulo de flange e 1,08° no ângulo de parede do estampo. Os maiores valores das tensões residuais, devido ao retorno elástico, foram alcançados nas direções da largura e espessura, sendo 326 MPa de tração e 163 MPa de compressão.

Palavras-chave: Estampagem a Quente, Aços ao Boro, Modelamento, Método de Elementos Finitos.

ABSTRACT

This work aims to provide a numerical procedure to evaluate the parameters of the hot stamping process of steels with high mechanical strength, in this case boron steel "22MnB5". This process is commonly used in the automotive industry, known to associate the high productivity of the stamping with the heat treatment of temper during the mechanical conformation, this reduces the effects of the elastic return and allows to produce products with tensile strength limit of more than 1.500 MPa . In this context, a finite element model was proposed considering the effects of thermomechanical couplings, adopting a U-shaped conformation geometry under a plane deformation state. The physical and mechanical properties were considered as a function of temperature according to the data available in the literature. The elasto-plastic behavior of the sheet material was defined as a function of temperature. To ensure a final martensitic microstructure, the cooling channels in the tooling were dimensioned from the principle of conservation of energy considering water as refrigerant. The numerical predictions of temperature plot point temperatures, together with an austenite-martensite transformation model, show that the cooling channels provide a predominantly martensitic microstructure providing cooling rates above the critical rate of 30 ° C / s of a 22MnB5 steel plate. The variation of the was very small with values of -0,53° in the flange angle and 1,08° in the wall angle of the stamp. The highest values of the residual stresses due to the springback were achieved in the width and thickness directions, being 326 MPa of traction and 163 of compression.

Key words: Hot Stamping; Boron Steels; Modeling; Finite Element Method

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 16 |
| 2 | OBJETIVOS | 18 |
| 2.1 | Objetivo Geral | 18 |
| 2.2 | Objetivos Específicos | 18 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 3.1 | Aços Avançados de Alta Resistência | 19 |
| 3.2 | Aços ao Boro para Estampagem de chapas | 21 |
| 3.3 | Estampagem de chapas | 23 |
| 3.3.1 | Características gerais | 23 |
| 3.3.2 | Estampagem a quente | 26 |
| 3.3.1 | Aquecimento | 30 |
| 3.3.1.1 | Aquecimento por efeito Joule | 30 |
| 3.3.1.2 | Aquecimento por indução | 31 |
| 3.3.1.3 | Aquecimento por Radiação e convecção | 32 |
| 3.3.2 | Transferência para a prensa | 32 |
| 3.3.3 | Conformação | 32 |
| 3.3.4 | Refrigeração da Matriz | 33 |
| 3.4 | Modelamento do comportamento das deformações de chapas metálicas | 34 |
| 3.4.1 | Comportamento mecânico dos materiais | 34 |
| 3.4.2 | Conceitos da teoria das tensões | 34 |
| 3.4.3 | Deformação | 36 |
| 3.4.3.1 | Regime elástico | 36 |
| 3.4.3.2 | Regime Plástico | 37 |
| 3.4.4 | Critério de escoamento | 39 |
| 3.5 | Equações constitutivas de modelos de escoamento | 40 |
| 4 | METODOLOGIA | 42 |
| 4.1 | Considerações Gerais | 42 |
| 4.2 | Material | 42 |
| 4.3 | Comportamento plástico do aço 22MnB5 | 44 |
| 4.4 | Procedimento de simulação | 45 |
| 4.4.1 | Pré-Processamento | 47 |
| 4.4.1.1 | Canais do sistema de resfriamento | 48 |
| 4.4.1.2 | Passos da Simulação e Geometria da Malha | 51 |
| 4.1 | Cinética de transformação de fases | 52 |
| 4.2 | Medição do retorno elástico | 53 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 55 |
| 5.1 | Resfriamento | 55 |
| 5.2 | Retorno elástico | 58 |
| 5.3 | Tensões residuais | 59 |
| 5.4 | Força do Punção | 62 |
| 6 | CONCLUSÕES | 64 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 7 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 66 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |
| 9 | ANEXOS..... | 72 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Peças estampadas a quente de um carro. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010a)..... | 16 |
| Figura 2 - Diagrama Geral de Conformabilidade. Adaptado (WORLD AUTO STEEL., 2017)..... | 20 |
| Figura 3 - Mercado de aços especiais. Adaptado (WORLD AUTO STEEL., 2017) .. | 21 |
| Figura 4 - Propriedades mecânicas do aço 22MnB5 e o diagrama TTT. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b) | 22 |
| Figura 5 - Estado de tensão de uma peça estampada. Adaptado (BATALHA, 2015) | 24 |
| Figura 6 - Relação do modo de deformação com a necessidade de atrito. Adaptado (BATALHA, 2015)..... | 25 |
| Figura 7 - Interação entre os campos relacionados à estampagem a quente. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b)..... | 26 |
| Figura 8 – Métodos de estampagem a quente: a) direto, b) indireto. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b) | 27 |
| Figura 9 – Evolução da microestrutura na estampagem a quente. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b) | 28 |
| Figura 10 – Mudanças na microestrutura e nas propriedades mecânicas durante a estampagem a quente. Adaptado (ALTAN, 2007) | 29 |
| Figura 11 – Ciclo térmico do processo de estampagem a quente com têmpera na matriz. Adaptado (MONTEIRO, 2017)..... | 30 |
| Figura 12 – Representação esquemática de um sistema de aquecimento por Efeito Joule. Adaptado (MORI; MAKI; TANAKA, 2005)..... | 30 |
| Figura 13 – Representação esquema de sistemas de aquecimentos por indução. Adaptado (KOLLECK et al., 2009) | 31 |
| Figura 14 – Representação esquemática de um forno com sistema de aquecimento por convecção e radiação. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010a) | 32 |
| Figura 15 – Esquema do Ferramental para o processo de estampagem a quente. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010a)..... | 33 |
| Figura 16- Forças e momentos aplicados no ponto P na superfície do elemento ΔS *. Adaptado(MASE; MASE, 1999) | 34 |
| Figura 17 – (a) Tensão verdadeira versus deformação plástica verdadeira e (b) Esquema simplificado de ensaio de tração uniaxial. Adaptado (PASSOS, 2016) | 38 |
| Figura 18 - Curva tensão x deformação com dependência da temperatura. Adaptado (MERKLEIN; LECHLER, 2006) | 45 |
| Figura 19 – Etapas para construção e simulação no software ABAQUS..... | 46 |
| Figura 20 – a) Modelo do ferramental da estampagem a quente - b) Modelo para simulação..... | 47 |
| Figura 21 – Modelo do ferramental para simulação da estampagem a quente. | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 22 – Etapas da simulação. | 51 |
| Figura 23 – Detalhes do refinamento da malha adotado no modelo..... | 52 |
| Figura 24 – Variáveis do retorno elástico. Adaptado (LEE et al., 2005)..... | 53 |
| Figura 25 - Superfície da chapa analisada. | 54 |
| Figura 26 - Gráfico da superfície analisada depois da conformação mecânica. | 54 |
| Figura 27 - Distribuição de temperatura (° C) no perfil da chapa conformada. | 55 |
| Figura 28 - Diagrama de transformação sob resfriamento contínuo, com a variação da temperatura nos pontos da camada de topo. Adaptado (XIMENES; LEITE; MOREIRA, 2018)..... | 56 |
| Figura 29 – Variação da fração de martensita durante a etapa de resfriamento do processo de estampagem a quente. | 57 |
| Figura 30 – Perfil da chapa conformada com o ferramenta e sem o ferramental. | 58 |
| Figura 31 - Modelo de estampagem a quente | 59 |
| Figura 32 - Tensão S11, na direção X (comprimento) (a) Topo, (b) Centro, (c) Fundo. | 60 |
| Figura 33 - Tensão S22, na direção Y (espessura) (a) Topo, (b) Centro, (c) Fundo. | 61 |
| Figura 34 - Tensão S33, na direção Z (largura) (a) Topo, (b) Centro, (c) Fundo. | 62 |
| Figura 35 - Força de reação do punção em função do deslocamento na etapa de conformação mecânica | 63 |

LISTA DE TABELA

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Composição química e propriedades mecânicas dos aços ligados ao boro. Adaptado (NADERI et al., 2008) | 22 |
| Tabela 2 - Composição química do aço 22MnB5 em percentual de massa (XIMENES; LEITE; MOREIRA, 2018). | 42 |
| Tabela 3 - Parâmetros de ajuste do aço 22MnB5 a partir de ensaios de tração a quente do material (LI; WU; LI, 2013b). | 43 |
| Tabela 4 - Propriedades termomecânicas do aço 22MnB5. (LIN et al., 2014)..... | 43 |
| Tabela 5 – Coeficiente de expansão térmica em diferentes temperaturas. (LIU et al., 2010b)..... | 44 |
| Tabela 6 – Parâmetros do modelo de estampagem a quente..... | 48 |
| Tabela 7 – Quantidade de elementos definido na malha. | 52 |
| Tabela 8 - Variáveis do retorno elástico para análise..... | 53 |
| Tabela 9- Fração de martensita após o resfriamento da peça. | 58 |
| Tabela 10 - Previsões numéricas das medidas de retorno elástico | 59 |
| Tabela 11 - coeficiente de transferência térmica entre a chapa e o ar..... | 72 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| μ | Coeficiente de atrito |
| $t^{(\hat{n})}$ | Vetor de tensão |
| $[\sigma]$ | Tensor de Cauchy |
| p | Pressão hidrostática |
| δ_{ij} | Delta de Kronecker, |
| E | Módulo de Young |
| ν | Coeficiente de Poisson |
| $[D]$ | Tensor de rigidez |
| $[\varepsilon]$ | Tensor deformação |
| G | Módulo de cisalhamento |
| ε | Deformação verdadeira |
| σ | Tensão verdadeira |
| e | Deformação de engenharia |
| s | Tensão de engenharia |
| F | Força |
| A_0 | Área inicial |
| L_0 | Comprimento útil do corpo de prova |
| ε^p | Deformação plástica |
| ε^e | Deformação elástica |
| σ_e | Tensão de escoamento |
| τ_{xy} | Componente de tensão de cisalhamento |
| ΔL | Incremento de alongamento |
| σ_0 | Limite de escoamento do material |
| τ_{eq} | Tensão de cisalhamento equivalente |

| | |
|---------------------|---|
| P | Pressão de contato |
| ε_0 | Pré-deformação |
| n_0 | Expoente de encruamento |
| m_0 | Expoente de sensibilidade à taxa de deformação. |
| G | Energia de ativação térmica do material |
| K | Coeficiente de resistência |
| $\bar{\varepsilon}$ | Deformações equivalentes |
| $\dot{\varepsilon}$ | Taxa de deformação |
| m | Massa |
| c_s | Calor específico do material |
| t | Tempo |
| Φ | Potência de refrigeração |
| Q | Quantidade de calor |
| n | Eficiência de transferência de calor |
| u | Velocidade da água |
| T_1 | Temperatura de entrada da água |
| T_2 | Temperatura de saída da água |
| D | Diâmetro bruto |
| ΔM_i | Momentos internos |
| Δf_i | Forças internas |
| ΔS^* | Área da secção transversal |
| ε^{th} | Deformação térmica |
| $\alpha(\theta)$ | Coeficiente de expansão térmica |
| θ | Temperatura atual do elemento |
| θ^0 | Temperatura de referência do elemento |

| | |
|------------|----------------------|
| θ_1 | Ângulo de parede |
| θ_2 | Ângulo de flange |
| ρ | Curvamento da parede |

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novos materiais para indústria automotiva que satisfaçam as exigências de mercado para um melhor desempenho de segurança e redução de peso, fez as indústrias metalúrgicas desenvolverem aços adequados para esses novos requisitos a um baixo custo, estes novos materiais são classificados como aços avançados de alta resistência, que apresentam melhores propriedades mecânicas.

Na produção de peças que utilizam a estampagem a frio, os aços avançados apresentam alguns desafios, devido sua baixa conformabilidade, como o aumento do retorno elástico, conhecido como “springback”, e, para minimizar este problema, é necessário buscar processos que permitam o aumento de conformação mecânica do material para peças de grande complexidade geométrica, que minimize o retorno elástico, conforme ilustrado na Figura (1). Este processo é a estampagem a quente, que aumenta a conformabilidade do material.

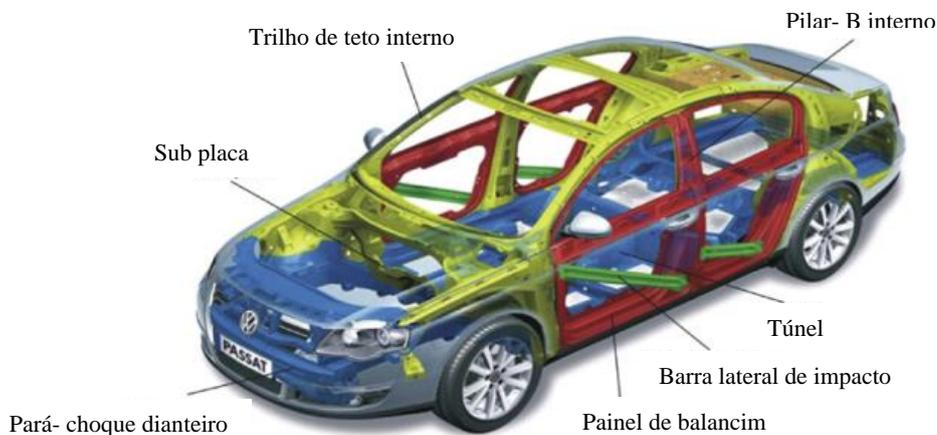


Figura 1 – Peças estampadas a quente de um carro. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010a)

A estampagem a quente é um processo não isotérmico, no qual a conformação ocorre junto a têmpera, em uma única etapa. Essa estampagem aperfeiçoa a capacidade de conformação da chapa de aços avançados e reduz a resistência a deformação, retorno elástico, e aumenta a capacidade de alongamento em temperaturas elevadas (MORI; MAKI; TANAKA, 2005).

O conhecimento do comportamento dos parâmetros de processo de estampagem a quente é de suma importância para uma maior produtividade e, com isso, algumas pesquisas foram desenvolvidas como a influência da força do prensa chapa no retorno elástico, como comprovam os estudos de (LIU et al., 2010a), as diferentes temperaturas iniciais de conformação mecânica a quente na pesquisa de Liu(2011) e muitos outros.

O modelamento de fenômenos físicos é uma poderosa ferramenta para engenheiros e cientistas, praticamente todo fenômeno físico pode ser descrito por equações com auxílio das leis da física em termos de equações, criando-se modelos matemáticos baseados no comportamento do sistema. As vantagens da utilização do modelo em relação ao método experimental são os resultados rápidos quando a necessidade de fazer uma avaliação a baixo custo.

Neste estudo, um modelo termomecânico computacional foi construído, utilizando o código comercial de elementos finitos ABAQUS/Standard, no qual foi simulado processo de estampagem a quente, que permite avaliações do retorno elástico, variação da temperatura, tensões residuais e a força do punção. Para isso, foi empregado o modelo de encruamento de Norton-Hoff modificado, que determina o efeito do encruamento a altas temperaturas. O material comumente empregado neste processo é o aço 22MnB5, que possui algumas características necessárias para o processo de conformação a quente.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O principal objetivo desta dissertação de mestrado é desenvolver um modelo de elementos finitos da estampagem a quente de chapas de aço ao boro “22MnB5”.

2.2 Objetivos Específicos

1. Desenvolver um modelo de elementos finitos com acoplamento termomecânico para simular o processo direto de estampagem a quente de uma chapa de aço 22MnB5
2. Projetar canais de resfriamentos no ferramental a partir do princípio de conservação de energia, que garantam uma taxa de resfriamento crítica para obtenção de uma microestrutura martensítica na chapa.
3. Realizar análise da distribuição da temperatura após o resfriamento para previsão da microestrutura.
4. Quantificar a variação do retorno elástico após a retirada do ferramental.
5. Analisar as tensões residuais nas direções do comprimento, espessura e largura.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aços Avançados de Alta Resistência

Nas últimas décadas, a regulamentação no setor automotivo por órgãos governamentais, a fim de aumentar a segurança em colisões, conservação de combustível e demandas ambientais, levaram os fabricantes automotivos a desenvolverem soluções inovadoras como carros mais leves, o que leva a redução do consumo de combustível e uma estrutura veicular mais segura para o seus ocupantes (ANAND et al., 2006).

Com a entrada de novos materiais no mercado, tais como ligas de alumínio, magnésio e compósitos e a demanda de algumas características específicas do material, fizeram as indústrias produtoras de aço a criarem um consórcio com 35 empresas, com isso, deu início ao programa ULSAB (UltraLight Steel Auto Body), a fim de criar estruturas de carrocerias automotivas mais leves e que satisfizessem as condições de segurança e desempenho. Os aços avançados de alta resistência (AHSS - Advanced High Strength Steel) são os principais contribuintes para o sucesso do programa ULSAB (WORLDAUTO STEEL., 2017).

Os aços bifásicos (DP), dupla fase (CP), Ferrítico-bainíticos (FB), Martensíticos (MS), multifásicos de plasticidade induzida pela transformação (TRIP), HotFormed (HF), plasticidade induzida por maclação (TWIP) são da família dos aços avançados de alta resistência e possuem propriedades mecânicas que atendem às demandas de desempenho de determinadas peças veiculares, por exemplo, os aços DP e TRIP tem uma alta capacidade de absorção de energia, os quais são utilizados nas zonas de colisão do automóvel. Os aços MS são endurecidos ao boro e são mais comumente utilizados em elementos estruturais do veículo, pois apresentam um bom desempenho de segurança (WORLD AUTO STEEL., 2017).

A relação entre o percentual de alongamento pelo limite de resistência à tração para diversos tipos de aços pode ser visto na Figura (2).

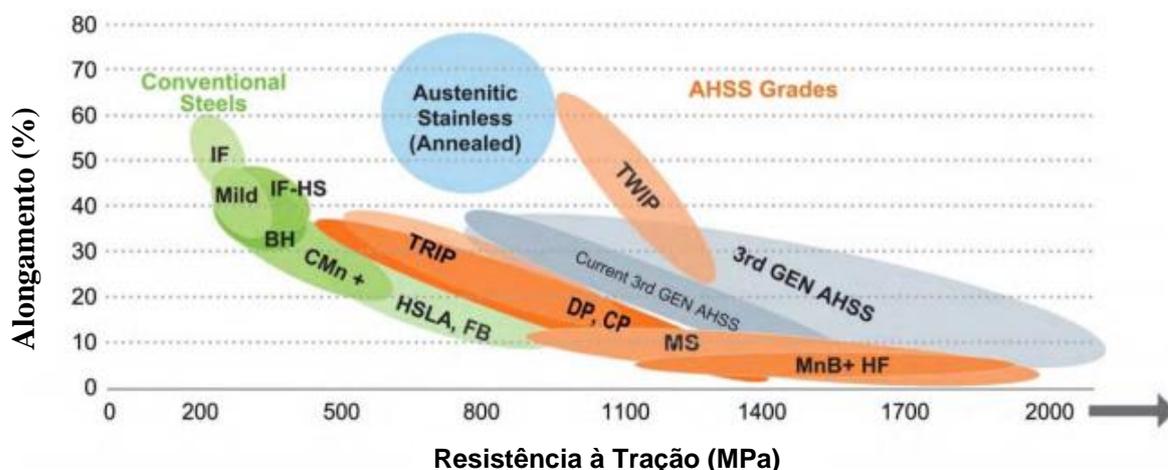


Figura 2 - Diagrama Geral de Conformabilidade. Adaptado (WORLD AUTO STEEL., 2017)

A classificação dos aços se faz pelo seu limite de resistência à tração. Quando o limite de resistência à tração está entre um intervalo de 500 a 780 MPa, o material é denominado como aço avançado de alta resistência (AHSS), acima de 780 MPa são classificados como aço de ultra-alta resistência. O aço inoxidável austenítico que está representado na Figura (2) junto com os demais citados, tem uma combinação de excelente resistência mecânica com uma ótima ductilidade, sendo assim, atende a muitas exigências funcionais dos veículos. Contudo, o seu elevado valor comercial, devido aos seus elementos de liga e a dificuldade de união das peças, dificultou a aplicação deste material na indústria automotiva. A terceira geração “Figura (2)” dos AHSS, procura proporcionar capacidades análogas ou melhores a um custo significativamente mais baixo (WORLD AUTO STEEL., 2017).

Em seu estudo, ROSADO (2011) assegura que a diminuição do peso do veículo pela utilização de chapas mais finas quando empregado os aços de alta resistência, leva a um menor consumo de combustível e segurança veicular.

Os aços avançados de alta resistência são capazes de assegurar condições exigidas pelo mercado, tais como eficiência, emissões, fabricação, durabilidade e custo. As indústrias siderúrgicas vislumbram um crescimento no setor sem precedentes dos aços de alta resistência em aplicações automotivas para os próximos anos, como pode ser visto na Figura (3) (WORLD AUTO STEEL., 2017).

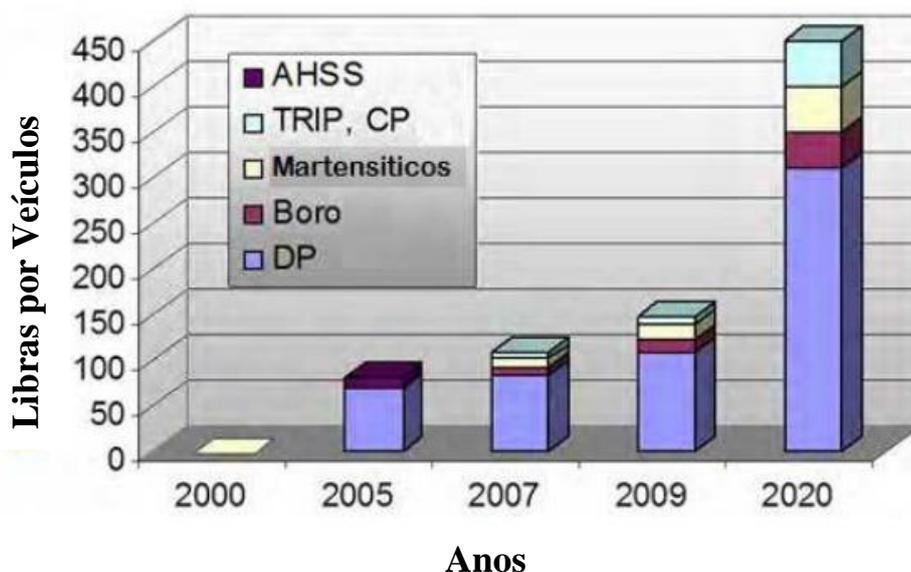


Figura 3 - Mercado de aços especiais. Adaptado (WORLD AUTO STEEL., 2017)

3.2 Aços ao Boro para Estampagem de chapas

As ligas de aço ao boro de alta resistência são as únicas classes de aço que produzem uma microestrutura predominantemente martensítica, após a estampagem a quente, quando o material é resfriado dentro da matriz (NADERI et al., 2008).

O aço 22MnB5 é o mais utilizado no processo de estampagem a quente. Antes de ser aquecido, o material apresenta uma microestrutura ferrítica-perlítica com uma resistência a tração em torno de 600 MPa. Simultaneamente à estampagem a quente, o material é resfriado a uma determinada taxa que garanta uma microestrutura predominantemente martensítica, podendo atingir uma resistência à tração de até 1500 MPa nestas condições (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b).

A chapa é aquecida em um forno a uma temperatura aproximada de 950° C durante 5 minutos, o que garante uma microestrutura austenítica homogênea, em seguida a chapa é conformada e temperada dentro da matriz fechada, que possui um sistema de resfriamento interno. O resfriamento ocorre devido ao contato entre a chapa e o ferramental, durante um intervalo de tempo de 5 a 20s. Quando a velocidade de resfriamento for superior à velocidade mínima de resfriamento, em torno de 27° K/s como pode ser visto na Figura (4) e a temperatura estiver há cerca de 400°C, então sua microestrutura transforma-se em martensita, com isso obtém-se uma peça de elevada resistência mecânica (MERKLEIN; LECHLER; STOEHR, 2008).

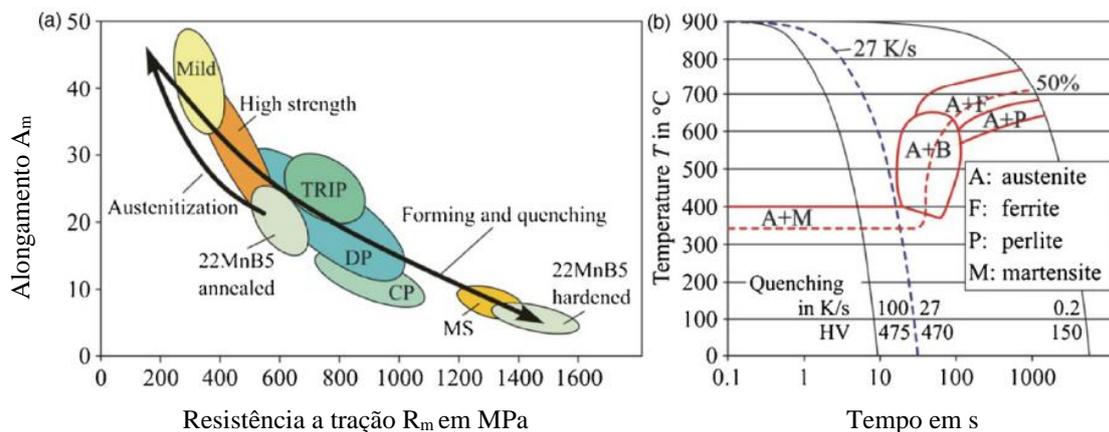


Figura 4 - Propriedades mecânicas do aço 22MnB5 e o diagrama TTT. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b)

A formação de martensita na microestrutura do aço 22MnB5 começa em torno de 410° C (martensite start point - M_s) e termina a 240° C (martensite finish point - M_f) (SOMANI et al., 2001). A Tabela (1) ilustra a composição química de diversos aços ao boro com suas temperaturas de M_s e taxa crítica de resfriamento.

Tabela 1- Composição química e propriedades mecânicas dos aços ligados ao boro. Adaptado (NADERI et al., 2008)

| Aço | 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 | 0,03 | 0,002 | 0,23 | 0,16 | 1,18 | 0,005 | 0,12 | 0,22 | 0,04 |
| 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 |

| Aço | M_s (°C) | Taxa crítica de resfriamento (K/s) | Limite de escoamento (MPa) | |
|----------|------------|------------------------------------|----------------------------|-------------|
| | | | Sem Têmpera | Com Têmpera |
| 20MnB5 | 450 | 30 | 505 | 967 |
| 22MnB5 | 410 | 27 | 457 | 1010 |
| 8MnCrB3 | -- | -- | 447 | 751 |
| 27MnCrB5 | 400 | 20 | 478 | 1097 |
| 37MnB4 | 350 | 14 | 580 | 1378 |

O teor de carbono influencia na mudança das propriedades mecânicas do aço após a têmpera, com isso a resistência do material pode ser controlada por ajuste apropriado do teor de carbono. Os elementos de ligas como o Mn e Cr tem uma pequena influência na resistência mecânica após a têmpera. Contudo, estes elementos que influenciam o endurecimento são fundamentais para os descolamentos

dos campos existentes, de modo que a transformação de fase almejada e a temperabilidade são alcançadas por taxas de resfriamentos viáveis. O boro é o elemento que influencia a temperabilidade do material, atrasando a conversão em uma microestrutura mais suave e conduzindo a uma microestrutura martensítica (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b).

A adição do elemento boro é muito eficaz para retardar a transformação ferrítica. O elemento, quando presente em solução sólida, segrega para os contornos de grão austeníticos e evita a nucleação da ferrita, entretanto, como a utilização é usual deste elemento, o teor utilizado deve ser da ordem de alguns milésimos de unidades percentuais. Teores superiores desse elemento conduzem à formação de boretos nos contornos de grão austeníticos, levando a reverter o seu efeito sobre a temperabilidade. O boro possui afinidade com o oxigênio e nitrogênio e, com isso, a necessidade de adição de elementos de ligas suplementares para evitar sua reação com esses elementos. Portanto, é requerida a presença de alumínio e titânio nos aços ao boro (GORNI, 2011).

3.3 Estampagem de chapas

3.3.1 Características gerais

O processo de estampagem mecânica, segundo (CRIVELLARO, 2003) é definido por meio de operações de conformação mecânicas de chapas que produzem produtos acabados ou semiacabados por meio de deformação plástica, que distribui o material pela matriz sem que ocorra nenhum tipo de falha, porém, há fatores que poderão influenciar na qualidade do produto conformado como o retorno elástico conhecido como “springback”, a falta de rigidez, rugosidade da superfície e outros.

O estado de tensão e deformação aplicado em cada momento define o comportamento da peça ao longo do processo em suas diferentes regiões. O comportamento do estado é influenciado por vários fatores de processo como: geometria das ferramentas, condições de atrito, tamanho da peça, que produz um estado de tensão e deformação multiaxial. Para um entendimento mais amplo as solicitações mecânicas que ocorrem na peça estampada será analisada em regiões

diferentes como: flange, parede e fundo do copo, como é mostrado na Figura (5) (BRESCIANI, 2011)

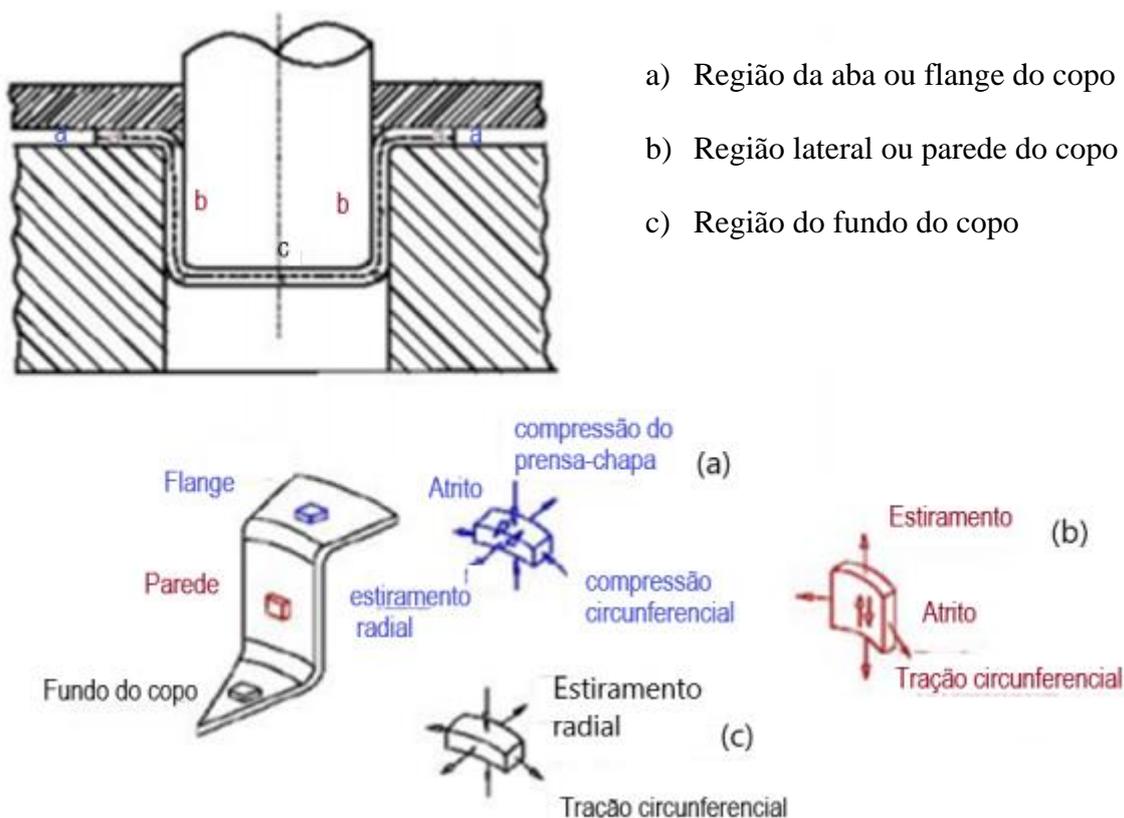


Figura 5 - Estado de tensão de uma peça estampada. Adaptado (BATALHA, 2015)

Dentro do processo de conformação, nota-se duas condições de deformação características, como o embutimento e o estiramento.

Define-se o embutimento de forma simples, como um processo de conformação que modela chapas planas sem grandes mudanças na sua espessura. As peças embutidas têm o formato semelhante a um copo, como as cápsulas, cartuchos e partes de automóveis como para-lamas, capô e porta (BATALHA, 2015).

O estiramento tem características semelhantes ao embutimento, contudo com uma maior variação na espessura da peça. A operação de estiramento corresponde a um estado de tensão biaxial de esforços de tração. O encruamento na chapa ocorre na região perto do punção durante o processo de conformação mecânica, o que aumenta sua resistência e ajuda o material a transmitir os esforços produzidos pelo punção para o restante da chapa, que está se deformando para o interior da matriz durante a conformação. Sendo assim, o estiramento deve suceder de modo controlado, provocando a redução da espessura, podendo conduzir a um escoamento

instável do material, causando a estricção (afinamento local) ou até mesmo a falha por fratura (BATALHA, 2015).

Como discutido, as tensões distribuídas na chapa são influenciadas pelo encruamento. O coeficiente de encruamento se relaciona com a distribuição da carga, quanto maior, melhor é a distribuição, logo, a chapa suporta níveis de deformações superiores, antes de iniciar a estricção. Para as operações que carecem de alto nível de estiramento, é recomendável que o material tenha um maior nível de encruamento (BATALHA, 2015).

O modo de comparação entre o processo de estiramento e embutimento na estampagem e a exigência de atrito nas regiões entre o punção, matriz e o material. O valor do coeficiente de atrito (μ) indica as diferenças no processo de estiramento e embutimento, como visto na Figura (6) (TIGRINHO, 2017).

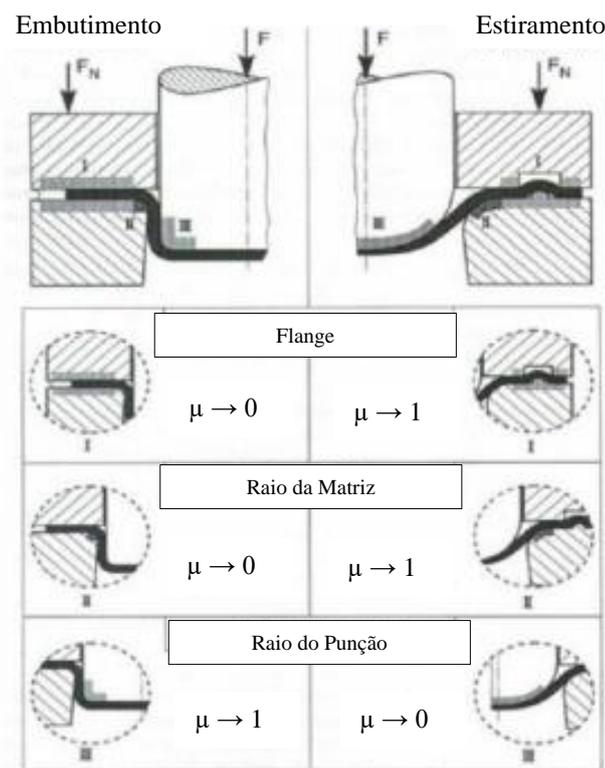


Figura 6 - Relação do modo de deformação com a necessidade de atrito. Adaptado (BATALHA, 2015)

Como visto na Figura (6), depende-se da forma de conformação mecânica e da região do material o atrito tem suas peculiaridades. O exemplo disso é a região do flange no caso de estiramento, que deve oferecer maior atrito possível para não provocar o deslizamento da chapa para dentro da matriz. No processo de estiramento

utiliza-se o “draw bead” que é uma saliência na matriz para ajudar na fixação da chapa (BATALHA, 2015).

3.3.2 Estampagem a quente.

A companhia Sueca Plannjade, desenvolveu o processo de estampagem a quente para confecção de lâminas para cortadores de grama e patenteou o processo. A empresa Saab, em 1984, empregou o aço microligado ao boro para carroceira do modelo 9000 pela primeira vez. O ano de 1987 inaugurou o crescimento de forma exponencial da utilização dos aços para estampagem a quente, alcançando a marca de 107 milhões de peças ao ano, no final de 2007 (MONTEIRO, 2017).

O processo de estampagem a quente é uma complexa operação por combinar diferentes fenômenos mecânicos, metalúrgicos e térmicos. As relações entre os parâmetros são apresentado no diagrama da Figura (7), que facilita a compreensão para construção de modelos de simulação numérica (BATALHA, 2015).

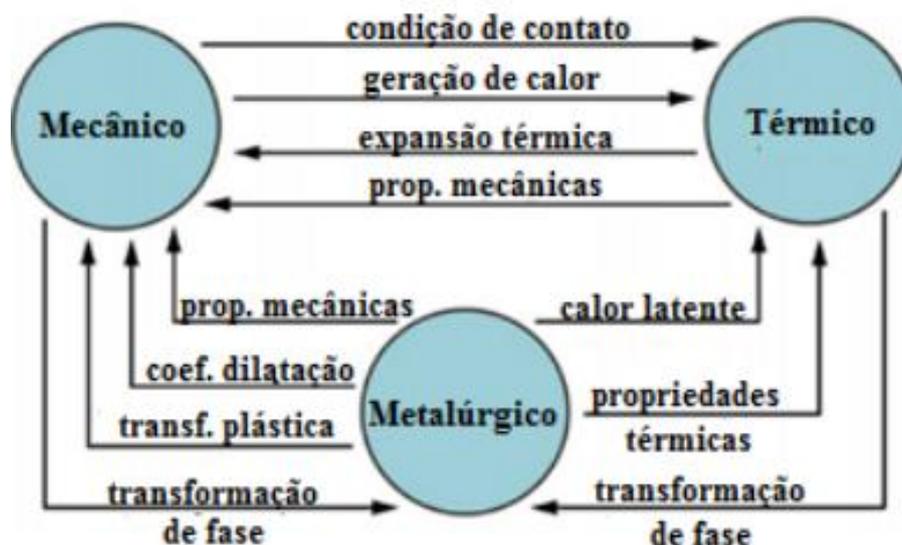


Figura 7 - Interação entre os campos relacionados à estampagem a quente. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b)

A influência mútua entre as diferentes variáveis na estampagem a quente geram resultados que segundo Hein(2005) podem ser divididos em três grupos elementares:

1. Viabilidade da estampagem: qualidade superficial e dimensional do produto sem apresentar problemas como rugas ou outros tipos de defeitos superficiais, nem variação das dimensões além das tolerâncias requeridas.
2. Microestrutura controlada, posteriormente a conformação mecânica com têmpera.
3. Variáveis de processo: tempo de ciclo, carga efetiva aplicada, variação térmica da peça e das matrizes.

O processo de conformação a quente inicia-se com o recebimento das chapas, com uma microestrutura formada por ferrita e perlita. A chapa, depois de cortada para dimensões de trabalho, pode ser conformada de duas maneiras distintas, direta ou indireta, como visto na Figura (8).

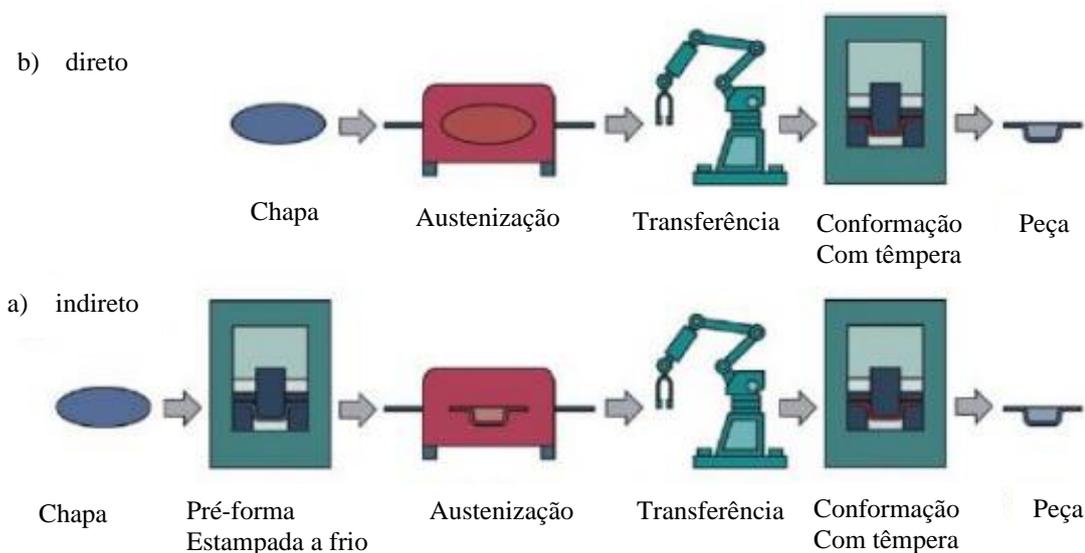


Figura 8 – Métodos de estampagem a quente: a) direto, b) indireto. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b)

A diferença entre os dois métodos, segundo (NAGANATHAN, 2012): no indireto, a chapa é inicialmente estampada a frio em um ferramental convencional para obter sua pré-forma e, posteriormente, a peça é austenitizada e estampada a quente, enquanto no método direto, após o corte é transferido para o forno e aquecido até atingir a austenitização homogênea e, em seguida, estampado. A razão de se utilizar a pré-forma antes da estampagem à quente é aumentar os limites de conformação, para geometrias de peças mais complexas.

A chapa é aquecida em temperatura entre 900 a 950°C, para obter uma microestrutura austenítica, e mantida durante 5 a 10 minutos para alcançar uma microestrutura homogênea. A temperatura e o tempo devem ser controlados com muito cuidado, pois interferem no crescimento de grão da austenita. O descontrole da temperatura e tempo podem provocar o aumento do grão austenítico, prejudicando a temperabilidade do material e suas propriedades mecânicas, como a tenacidade no caso de aços de alto carbono (BATALHA, 2015).

Segundo (ALTAN, 2007), depois da etapa de austenitização, a chapa é transferida para prensa em menos de 10 segundos. O material com a temperatura entre 900°C a 650°C proporciona uma maior conformabilidade e menores tensões de escoamento. É provável estampar a peça em um único passo, mesmo com formas complexas. A têmpera ocorre dentro do ferramental, simultaneamente ou após a conformação, levando a transformação de uma estrutura austenítica para martensítica, devido as altas taxas de resfriamento. A evolução da microestrutura durante todo o processo de estampagem a quente pode ser visto na Figura (9).

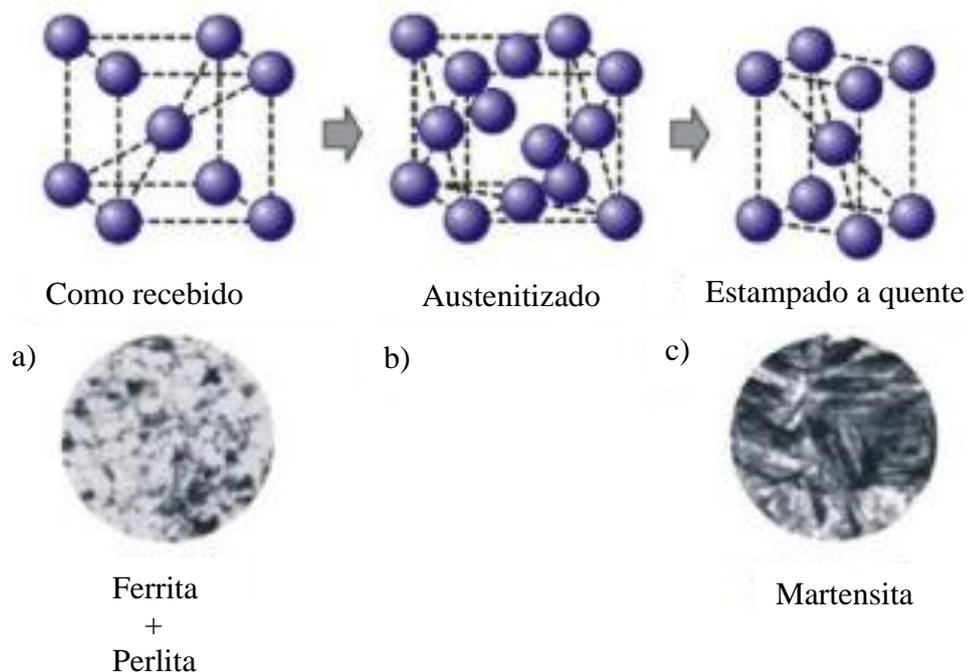


Figura 9 – Evolução da microestrutura na estampagem a quente. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010b)

A peça estampada a quente alcança limites de resistência igual ou superior a 1500 MPa devido a mudança de microestrutura. Os diferentes estágios do processo e microestrutura presente ao longo da estampagem a quente são apresentados na Figura (10) e especifica a transformação de comportamento mecânico e da temperatura do material estampado.

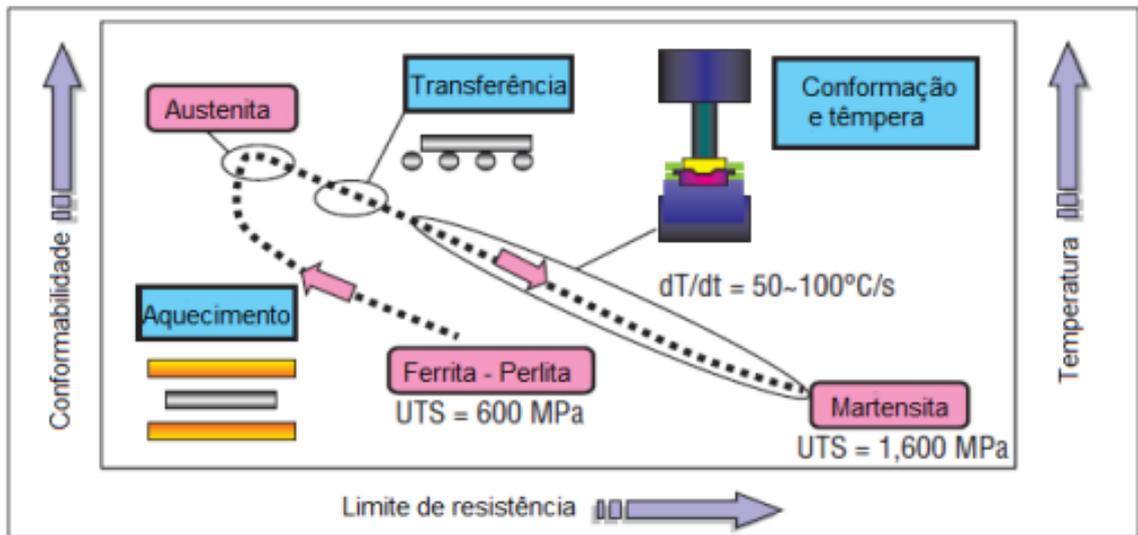


Figura 10 – Mudanças na microestrutura e nas propriedades mecânicas durante a estampagem a quente. Adaptado (ALTAN, 2007)

A Figura (11) apresenta o ciclo térmico durante toda a estampagem a quente, o processo pode ser resumido pelas seguintes etapas:

1. Entrada da chapa no forno e início do aquecimento
2. Austenitização a temperatura controlada.
3. Transferência para a prensa
4. Conformação da peça e têmpera.
5. Abertura da prensa, a peça é retirada
6. Resfriamento fora da ferramenta

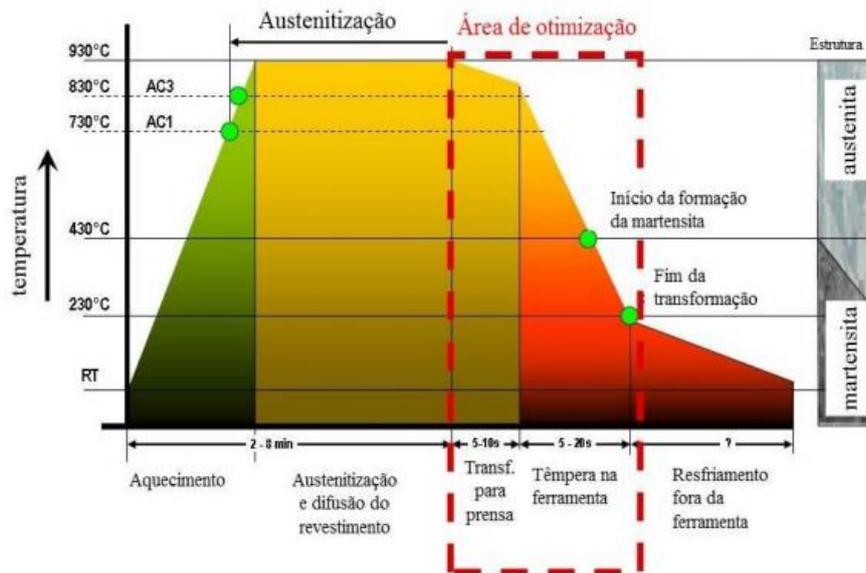


Figura 11 – Ciclo térmico do processo de estampagem a quente com têmpera na matriz. Adaptado (MONTEIRO, 2017)

3.3.1 Aquecimento

3.3.1.1 Aquecimento por efeito Joule

O aquecimento da chapa por efeito joule é uma técnica alternativa e empregada no processo de estampagem a quente. O esquema de aquecimento é apresentado na Figura (12). A peça fica presa entre dois eletrodos por onde atravessa uma corrente elétrica que gera calor. As principais dificuldades desse sistema de aquecimento são a distribuição não homogênea de temperatura ao longo do comprimento da chapa e, também, a limitação desse método para aquecer peças com geometrias complexas (MORI; MAKI; TANAKA, 2005).

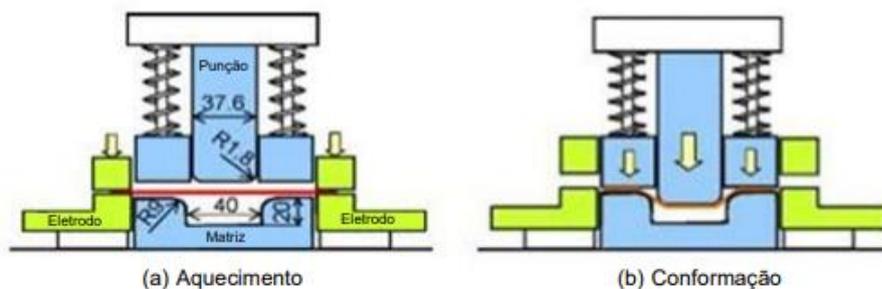


Figura 12 – Representação esquemática de um sistema de aquecimento por Efeito Joule. Adaptado (MORI; MAKI; TANAKA, 2005)

A influência da taxa de aquecimento foi avaliada na capacidade de conformação a quente e no retorno elástico, empregando sistema de aquecimento no qual a chapa é eletrificada por meio de eletrodos posicionados fora da matriz. Ao alcançar a temperatura e o tempo de encharque almejado, a chapa é conformada com perdas mínimas de calor e, em seguida, resfriada na matriz. A construção desse sistema proporciona que o tempo entre as etapas final de aquecimento e conformação seja de 0,2 segundos. O tempo de conformação é uma das vantagens desse sistema de aquecimento (MORI; MAKI; TANAKA, 2005).

3.3.1.2 Aquecimento por indução

O sistema de aquecimento de chapas por indução é composto por uma bobina de indução e um gerador de alta frequência. O processo de aquecimento é apresentado na Figura (13), no qual a chapa passa pela bobina que é alimentada por uma corrente alternada, formando-se um campo eletro-magnético, que gera o aquecimento da mesma (KOLLECK et al., 2009)

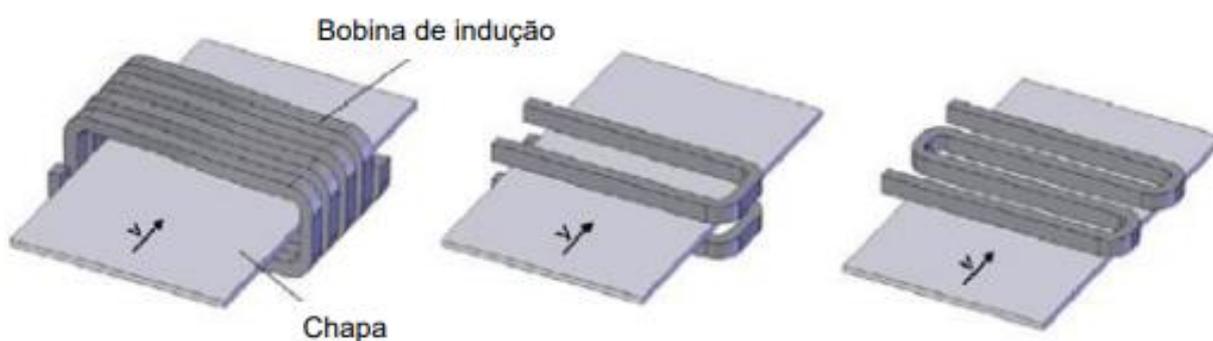


Figura 13 – Representação esquema de sistemas de aquecimentos por indução. Adaptado (KOLLECK et al., 2009)

A geometria da bobina de indução estabelece a posição do campo magnético em relação à chapa que está sendo aquecida e influenciando diretamente a eficiência do sistema. O sistema de aquecimento que utiliza indutor de campo longitudinal, é distinguido por possuir uma elevada eficiência térmica (Lehman 2010).

3.3.1.3 Aquecimento por Radiação e convecção.

Os sistema de aquecimento em fornos mediante a radiação e convecção são os mais comumente utilizados no processo de estampagem a quente. Normalmente, o aquecimento é originado pela queima de gás combustível por meio de tubos radiantes ou com a utilização de resistência elétrica no forno. A Figura (14) ilustra o esquema de um forno com sistema de aquecimento por radiação e convecção (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010a).

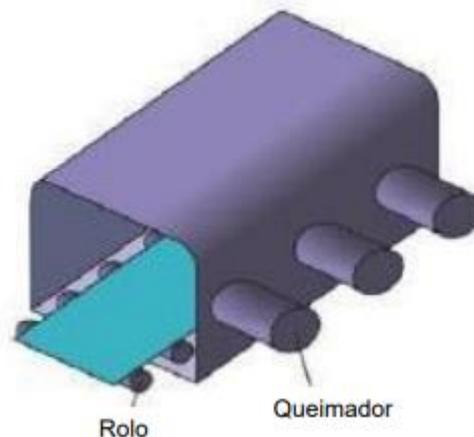


Figura 14 – Representação esquemática de um forno com sistema de aquecimento por convecção e radiação. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010a)

3.3.2 Transferência para a prensa.

A transferência deve ocorrer o mais rápido possível, para garantir as propriedades mecânicas desejadas da peça após a estampagem a quente. A temperatura da chapa deverá ficar acima de 780° C, senão a microestrutura final poderá exibir alguma bainita e/ ou ferrita (WANG, 2009). A transferência da peça austenitizada para matriz ocorre de modo mecanizado por intermédio de braços robóticos. Este processo tem uma alta produtividade.

3.3.3 Conformação

A conformação da peça deve ocorrer antes da temperatura de início de transformação martensítica. Conseqüentemente, o ferramental precisa possuir um sistema rápido de fechamento, com a condição para o sucesso no controle do

processo. Para evitar a ocorrência de têmpera da peça entre o prensa-chapas e a matriz ao decorrer do processo de conformação, as ferramentas trabalham com uma folga no prensa chapas, como ilustrado na Figura (15) (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010a).

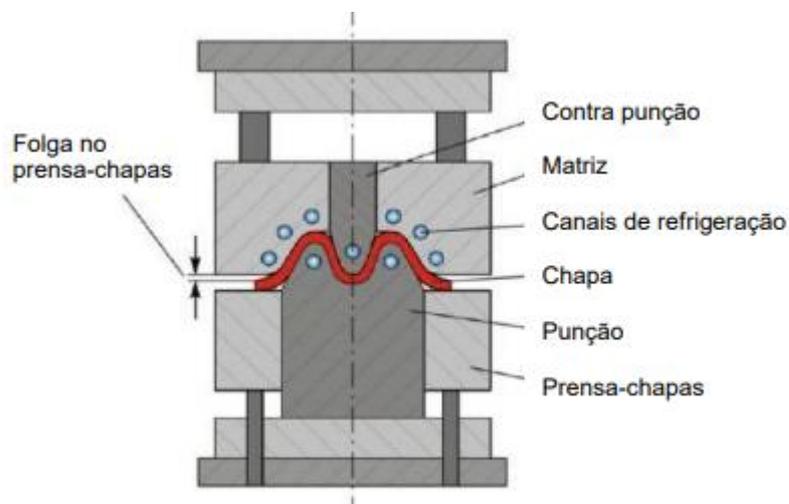


Figura 15 – Esquema do Ferramental para o processo de estampagem a quente. Adaptado (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010a)

3.3.4 Refrigeração da Matriz

O ferramental deverá ser projetado com um sistema de refrigeração que proporcione uma eficiência satisfatória, com isso é necessário uma alta taxa de resfriamento e distribuição homogênea de temperatura na peça conformada. O fluxo de calor no ferramental depende de algumas variáveis, como a condutividade térmica da ferramenta e a transferência de calor do ferramental para o fluido refrigerante. Para uma transferência de calor eficiente entre a peça e o ferramental, é necessário uma superfície de contato que não apresente oxidações ou folga. A condutividade térmica é largamente influenciada pelo tipo de material da ferramenta. Outra condição importante é o projeto dos canais de refrigeração, que inclui a localização, distribuição e tamanho (HOFFMANN; SO; STEINBEISS, 2007).

O principal objetivo dos canais de refrigeração é possibilitar uma breve extração de calor da matriz e, conseqüentemente, atingir altas taxas de resfriamentos para alcançar a têmpera completa da peça. O fluido de trabalho do sistema de refrigeração da matriz é normalmente a água, porém outros podem ser usados como gases etc (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010a).

3.4 Modelamento do comportamento das deformações de chapas metálicas

3.4.1 Comportamento mecânico dos materiais

O comportamento mecânico dos materiais no processo de conformação mecânica exige algumas definições pontuais de conceitos básicos de mecânica aplicada, dos quais destaca-se a teoria da mecânica do contínuo.

A teoria do contínuo considera que a matéria é composta de maneira uniforme por elementos que podem ser divididos continuamente, contudo, essa hipótese não é válida para escalas suficientemente pequenas como dos gases. No estudo das variáveis de interesse do sistema é levado em conta uma parte suficientemente pequena, cujo comportamento seja representativo, mas dentro de pressuposição do meio contínuo para não invalidar o modelo.

3.4.2 Conceitos da teoria das tensões

Considerando um corpo de material isotrópico e homogêneo sujeito a força de superfície e de corpo, no qual está localizado pelos eixos cartesianos x_1 , x_2 e x_3 com a origem no ponto (0). Ao realizar o plano de corte, o ponto P está sujeito a resultante de momentos internos ΔM_i e resultante de forças internas Δf_i atuantes na área da secção transversal ΔS^* , como visto na Figura (16) (MASE; MASE, 1999).

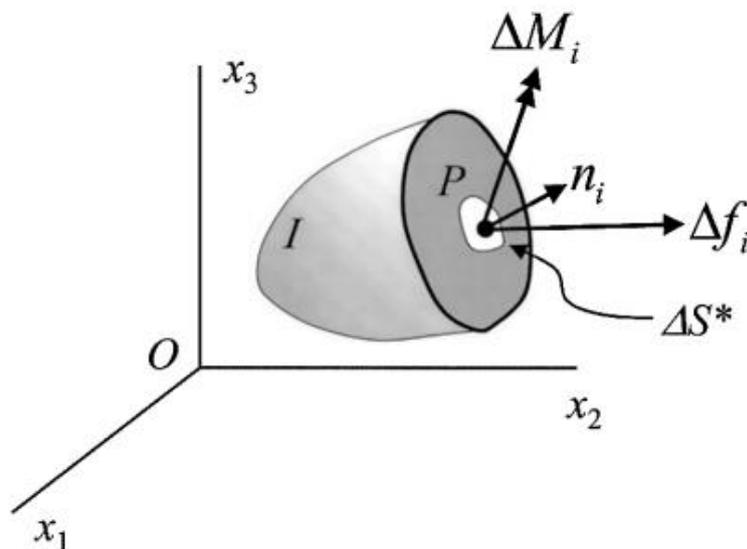


Figura 16- Forças e momentos aplicados no ponto P na superfície do elemento ΔS^* . Adaptado(MASE; MASE, 1999)

O conceito inicial de tensões de Cauchy determina que à medida de intensidade de força na direção n_i no ponto P é denominada vetor de tensão $t^{(\hat{n})}$, e pode ser determinada utilizando a Eq. (4.1) (MASE, 1999).

$$t_i^{(\hat{n})} = \lim_{\Delta S^* \rightarrow 0} \frac{\Delta f_i}{\Delta S^*} \quad (4.1)$$

Admite-se que no limite, os momentos aplicados no ponto P são suprimidos. É favorável para mecânica empregar a consideração de três vetores de tensão para o mesmo ponto, porém em direções mutuamente ortogonais que podem ser arranjadas nas colunas da matriz que representa o tensor de tensões de Cauchy $[\sigma]$:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{12} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & \sigma_{33} \end{bmatrix} = \left[t_1^{(\hat{n})} t_2^{(\hat{n})} t_3^{(\hat{n})} \right] \quad (4.2)$$

Observa-se que a matriz do tensor de tensão, nas condições situadas, é sempre simétrica e real, assegurando um conjunto de três autovalores e autovetores que representam as tensões principais e suas respectivas direções (MASE, 1999).

As tensões principais são definidas com índice que varia de 1 a 3 e de uma forma geral, é proveitoso defini-las de acordo com a convenção, como visto na Eq (4.3) (MASE, 1999).

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (4.3)$$

É importante definir alguns conceitos como de pressão hidrostática (p), que é a média das tensões normais, como visto na Equação (4.4), que são os termos da diagonal principal da matriz do tensor de tensões (MASE, 1999).

$$p = \frac{1}{3} \sigma_{ii} \quad (4.4)$$

A pressão hidrostática é um conceito importante para aplicações na mecânica dos sólidos, principalmente na definição de tensor de tensão desviado e (S_{ij}) como visto na Eq. (4.5) (MASE, 1999).

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}p \quad (4.5)$$

Observa-se que, o tensor desviador é o tensor subtraído da média das componentes nas direções principais, não empregado somente ao tensor de tensões. É conveniente ressaltar que a pressão hidrostática tende a mudar o volume do corpo, enquanto a porção desviador tende a distorcer o corpo (MARCINIAK; DUNCAN; HU, 2002).

3.4.3 Deformação

A deformação é a mudança das dimensões do corpo submetido à ação de forças externas a estrutura, de forma temporária ou permanente. A deformação depende, essencialmente, das forças aplicadas e das propriedades físicas do corpo.

3.4.3.1 Regime elástico

As propriedades elásticas do material da chapa podem ser totalmente definidas pelo módulo de Young $[E]$ e o coeficiente de Poisson $[\nu]$ segundo a teoria de elasticidade linear isotrópica. A lei de Hooke generalizada relaciona as componentes de tensão com as componentes de deformação, no qual é representada na forma matricial compacta por:

$$[\sigma] = [D][\varepsilon] \quad (4.6)$$

As componentes $[\sigma]$ e $[\varepsilon]$ representam os tensores de segunda ordem de tensão e deformação, e o $[D]$ representa o tensor de rigidez elástica de 4º ordem, onde seus coeficientes são determinados em função dos valores de E e ν , sendo assim a lei de Hooke pode ser expressa matricialmente por:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad (4.7)$$

Na Eq. (4.7), G é definido como módulo de cisalhamento ou módulo de elasticidade transversal .

A Hipótese de estado plano de deformação é geralmente empregada em alguns estudos de estampagem de chapas, no qual uma das dimensões, por exemplo, a direção z, é muito grande em relação às outras, e o sólido é carregado somente no plano normal a direção z, por isso, assume que o deslocamento na direção z é nulo, com isso a lei de Hooke para o estado plano de deformações fica definida na forma matricial por:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ \nu & \nu & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (4.8)$$

3.4.3.2 Regime Plástico

O regime plástico é a deformação permanente, quando um corpo sujeito a esforços sofre um descarregamento das forças e as deformações provocadas permanecem inalteradas, então são classificadas como plástica.

A tensão de escoamento pode ser determinada ao modelo por uma função tabulada da deformação plástica verdadeira. O material tem um comportamento plástico descrito pela interpolação dos seus valores tabulados, como visto na Figura (17.a). A deformação plástica com valores superiores aos especificados pela tabela, o material admite um comportamento perfeitamente plástico, ou seja, sem encruamento (ABAQUS, 2011).

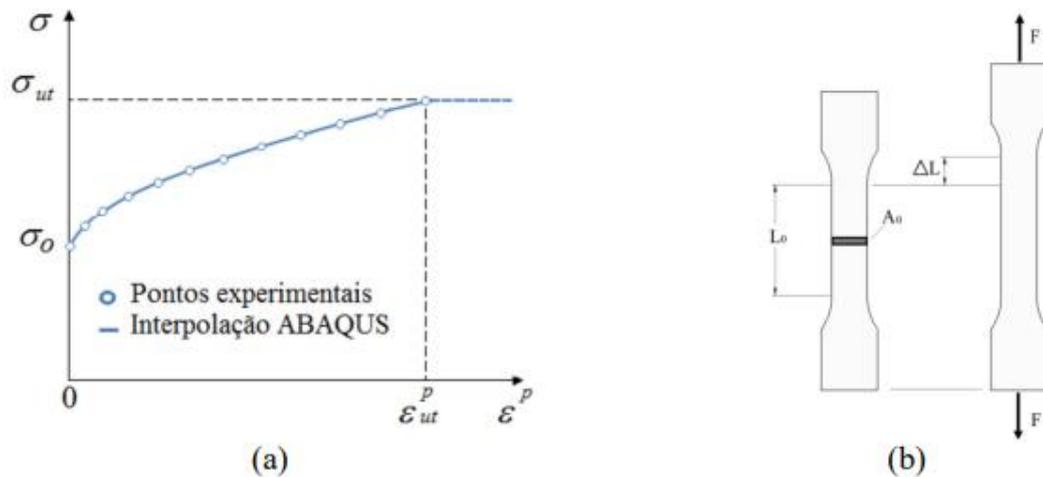


Figura 17 – (a) Tensão verdadeira versus deformação plástica verdadeira e (b) Esquema simplificado de ensaio de tração uniaxial. Adaptado (PASSOS, 2016)

O comportamento da deformação plástica é adquirido por meio de técnicas experimentais, como o ensaio de tração uniaxial para obtenção do comportamento mecânico do material. A Figura (17.b) apresenta um esboço simplificado do ensaio de tração uniaxial, na qual F corresponde à força que traciona o corpo de prova, A_0 representa a área inicial da seção transversal do corpo de prova, L_0 é o comprimento útil e o ΔL o incremento de alongamento do corpo de prova após um determinado instante de tempo. A deformação verdadeira e a tensão verdadeira são representadas pelas Eq (4.9) e (4.10):

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (4.9)$$

$$\sigma = s(1 + e) \quad (4.10)$$

Como,

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (4.11)$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4.12)$$

Assumindo a hipótese de pequenas deformações, pode-se decompor de forma aditiva a deformação total em uma parcela plástica ε^p , elástica ε^e e térmica ε^{th} :

$$\varepsilon = \varepsilon^p + \varepsilon^e + \varepsilon^{th} \quad (4.13)$$

A deformação térmica é obtida por meio da Equação (4.14), visto que $\alpha(\theta)$ é o coeficiente de expansão térmica, θ é a temperatura atual do elemento e θ^0 é a temperatura de referência:

$$\varepsilon^{th} = \alpha(\theta)(\theta - \theta^0) \quad (4.14)$$

Pode-se determinar a deformação plástica verdadeira pela subtração da deformação total pela parcela elástica e térmica como pode ser visto na Equação (4.15), em que a parcela elástica foi definida como a tensão limite de escoamento σ_0 dividida pelo módulo de elasticidade E do material:

$$\varepsilon^p = \varepsilon - \varepsilon^{th} - \frac{\sigma_0}{E} \quad (4.15)$$

3.4.4 Critério de escoamento

Os critérios de escoamento são uma importante ferramenta para prever o ponto no qual o corpo sujeito a forças excederá o limite da deformação elástica. A previsão do comportamento plástico do material é indispensável para o estudo de processos de conformação mecânica, já que o critério de escoamento necessita ser incorporado a uma equação constitutiva do material para simular o comportamento. Alguns critérios de escoamento como de von Mises considera os efeitos independente da direção, são classificados como isotrópicos. O limite de escoamento é usado como limite de tensão:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2) \right] \quad (4.16)$$

Reescrevendo a Equação (4.17) em função do estado plano:

$$\sqrt{\sigma_{XX}^2 + \sigma_{YY}^2 - \sigma_{XX}\sigma_{YY} + 3\tau_{XY}^2} < \sigma_e \quad (4.17)$$

3.5 Equações constitutivas de modelos de escoamento.

Há um grande interesse no desenvolvimento de equações constitutivas que possibilitam descrever a curva tensão -deformações verdadeira com intuito de analisar o comportamento de ligas sujeitas a deformações a fim de gerar parâmetros para simulação por elementos finitos. (TESI__DOTTORATO_ALBERTO_TURETTA.PDF, [s.d.]) descreveu que, entre os métodos desenvolvidos, o modelo matemático mais utilizado para descrever o regime de deformações plástica e a Equação de Hollomon, empregado tanto em trabalhos a frio como a quente, Eq. (4.18)

$$\sigma = kr\varepsilon^n \quad (4.18)$$

No qual kr e n representam o coeficiente de resistência mecânica e coeficiente de encruamento. Contudo, este modelo é restrito por não representar parâmetros importantes na conformação a quente, como a taxa de deformação e a temperatura. Desta maneira, outros modelos foram desenvolvidos, como da Equação (4.19), em que kr é o coeficiente de resistência, n é o expoente de encruamento e m é o expoente de sensibilidade à taxa de deformação, e que representa uma variante da Equação de Hollomon para o trabalho a quente.

$$\sigma = kr\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (4.19)$$

A Equação (4.20) descreve o modelo de Norton-Hoff, que considera os efeitos da temperatura, sendo T a temperatura absoluta e βt o coeficiente de influência da temperatura.

$$\sigma = kr\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m e^{\beta t/T} \quad (4.20)$$

O modelo de Hensel-Spittel representar o comportamento da deformação plástica a quente. O modelo considera os três fatores mais contundentes: temperatura, deformação e a taxa de deformação:

$$\sigma = A \cdot e^{m_1 T} \cdot \varepsilon^{m_2} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_3} \cdot e^{m_4/\varepsilon} \cdot (1 + \varepsilon)^{m_5 T} \cdot e^{m_7 \varepsilon} \cdot \dot{\varepsilon}^{m_8 T} \cdot T^{m_9} \quad (4.21)$$

No qual A é uma constante do material, m_1 , m_3 e m_9 são constantes de sensibilidade à temperatura, deformação e taxa de deformação, respectivamente e m_4 , m_5 , m_6 , m_7 , m_8 e m_9 são constantes de ajustes. Este modelo é geralmente mais próximo dos experimentais, no qual os coeficientes de um dado material são obtidos por meio de regressão de dados experimentais, normalmente obtidos através de ensaios de tração ou torção a quente.

4 METODOLOGIA

4.1 Considerações Gerais

A metodologia deste trabalho é composta pela construção de um modelo de elementos finitos em 2D no software ABAQUS/Standard para simulação numérica do processo de estampagem a quente do aço 22MnB5, a fim de analisar o comportamento dos parâmetros de processo. O modelamento proposto parte de um caso termomecânico sob as hipóteses de estado plano de deformações, elasticidade linear isotrópico e encruamento isotrópico de von Mises. O comportamento plástico do aço 22MnB5 é modelado pela equação modificada de N-H (Norton-Hoff) que descreve os efeitos de temperatura, deformação e taxa de deformação.

4.2 Material

O aço boro “22MnB5” que pertence à classe dos aços avançados é o material mais comumente utilizado no processo de estampagem a quente, no qual os elementos da sua composição química visto na Tabela (2), permitem algumas vantagens em relação aos seus concorrentes, como o elemento boro que retarda a transformação da microestrutura austenítica para a martensítica, influenciando na temperabilidade do material.

Tabela 2 - Composição química do aço 22MnB5 em percentual de massa (XIMENES; LEITE; MOREIRA, 2018).

| C | | Mn | | Si | | Cr | | Al | | Ti | | B | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|---------|---------|
| Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max | Min | Max |
| 0,22 | 0,28 | 1,05 | 1,37 | 0,14 | 0,32 | 0,10 | 0,21 | 0,019 | 0,063 | 0,029 | 0,063 | 0,00019 | 0,00042 |

Os parâmetros utilizados na lei de encruamento de Norton-Hoff modificada foram obtidos através de ensaios termomecânicos do material empregado, os dados foram levantados por Li(2013), onde K coeficiente de resistência, G parâmetro relacionado a energia de ativação térmica do material, ε_0 corresponde a pré-deformação, n_0 expoente de encruamento e m_0 expoente de sensibilidade à taxa de deformação.

Tabela 3 - Parâmetros de ajuste do aço 22MnB5 a partir de ensaios de tração a quente do material (LI; WU; LI, 2013b).

| K (MPa) | $G(K)$ | ε_0 | n_0 | c_n | m_0 | c_m |
|-----------|--------|-----------------|--------|--------|--------|---------|
| 34,38 | 2186 | 0,0025 | 0,2034 | 0,0024 | 0,0792 | -0,0019 |

As propriedades termomecânicas utilizadas no modelo, tais como módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), calor específico (C_P) e condutividade térmica (K) são listadas na Tabela (4), o coeficiente de expansão térmica na Tabela (5), a densidade do aço 22MnB5 é 7830 Kg/m^3 .

Tabela 4 - Propriedades termomecânicas do aço 22MnB5. (LIN et al., 2014)

| 22MnB5 | | | | |
|--------|---------|-------|------------|--------------|
| T (°C) | E (GPa) | ν | K (W/m.°c) | C_P (J/Kg) |
| 20 | 212 | 0,284 | 30,7 | 444 |
| 100 | 207 | 0,286 | 31,1 | 487 |
| 200 | 199 | 0,289 | 30 | 520 |
| 300 | 193 | 0,293 | 27,5 | 544 |
| 400 | 166 | 0,298 | 21,7 | 563 |
| 500 | 158 | 0,303 | ----- | 573 |
| 600 | 150 | 0,31 | 23,6 | 581 |
| 700 | 142 | 0,317 | ----- | 586 |
| 800 | 134 | 0,325 | 25,6 | 590 |
| 800 | 126 | 0,334 | ----- | 596 |
| 1000 | 118 | 0,343 | 27,6 | 603 |

Tabela 5 – Coeficiente de expansão térmica em diferentes temperaturas. (LIU et al., 2010b)

| T (° C) | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 850 | 900 | 950 |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $\alpha, \times 10^{-5}, ^\circ\text{C}$ | 1,89 | 1,93 | 1,97 | 2,12 | 2,17 | 2,62 | 2,78 | 3,08 |

4.3 Comportamento plástico do aço 22MnB5

A lei de encruamento de N-H (Norton-Hoff) modificado, relaciona a tensão com a deformação na parte de deformação plástica do material, em que os efeitos do encruamento em altas temperaturas podem ser determinados com a Eq. (5.1).

$$\sigma(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}, T) = K \exp\left(\frac{G}{T}\right) (\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^{n(T)} \dot{\epsilon}^{m(T)} \quad (5.1)$$

Os parâmetros da Equação (5.1) representados por $\bar{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}$, K, G, T, ϵ_0 , $n(T)$, $m(T)$ são deformações equivalentes, taxa de deformação, coeficiente de resistência, energia de ativação térmica, deformação inicial, expoente de encruamento e sensibilidade a taxa de deformação.

Estes parâmetros foram determinados pelo ajuste na curva tensão-deformação obtidas através de ensaios de tração uniaxial realizado em altas temperaturas por (MERKLEIN; LECHLER, 2006). Os parâmetros como expoente de encruamento e sensibilidade a taxa de deformação são determinados por meio das Eq. (5.2) e (5.3).

$$n(T) = n_0 \exp[-c_n(T - T_0)] \quad (5.2)$$

e

$$m(T) = m_0 \exp[-c_m(T - T_0)] \quad (5.3)$$

A previsão dos resultados do modelo de encruamento de N-H foram comparadas com os dados experimentais obtidos no trabalho do (LI; WU; LI, 2013c) com diferentes temperaturas (550, 650, 800°C) empregado no modelo a uma taxa de

deformação constante de $0,1 \text{ s}^{-1}$ é mostrada na Figura (19). Os ensaios uniaxiais foram realizados por (MERKLEIN; LECHLER, 2006). A comparação entre os resultados do modelo de N-H com o experimental mostra que a modelagem está dentro de um comportamento realista nas temperaturas de 550°C e 800°C , enquanto a temperatura de 650°C não fornecer uma boa descrição. A Figura (18) ilustra a influência das diferentes temperaturas no comportamento do encruamento durante o processo de deformação.

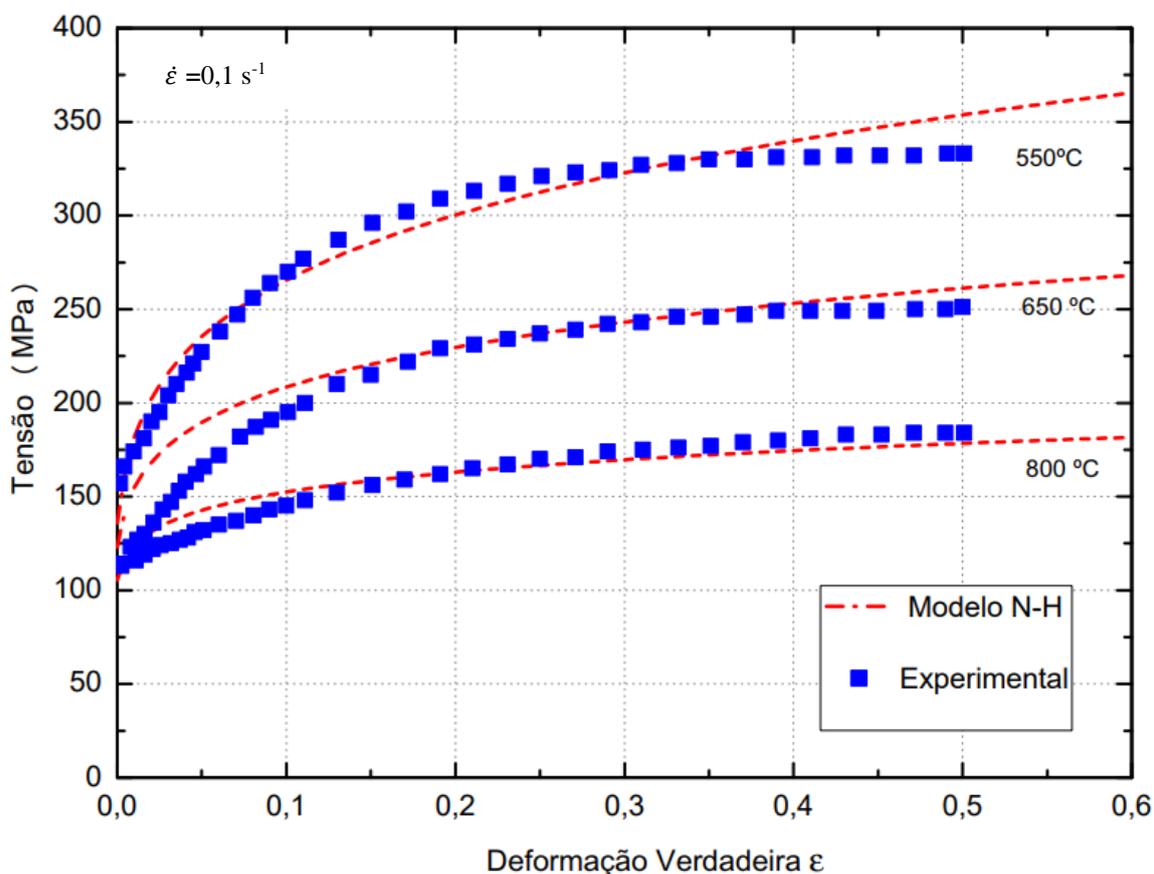


Figura 18 - Curva tensão x deformação com dependência da temperatura. Adaptado (MERKLEIN; LECHLER, 2006)

O modelo N-H foi escolhido por possuir uma boa concordância com o experimental, satisfazendo as condições para a entrada de dados no programa ABAQUS em forma de Tabelas.

4.4 Procedimento de simulação

A simulação numérica foi realizada no programa comercial de elementos finitos ABAQUS, que consiste em uma poderosa ferramenta para simulação de

diversas aplicações na área de engenharia. O software obedece a algumas etapas a serem seguidas, como pode ser visto na Figura (19). O pré-processamento consiste em definir a geometria do modelo físico, propriedade do material, condição de contorno, carregamento e a malha, que é definida para o tipo de simulação. O software permite que o arquivo de entrada de dados possa ser alterado manualmente pelo usuário. No processamento, a simulação é executada normalmente, como um processo em segundo plano. A forma ABAQUS/Standard emprega técnicas implícita de integração de tempo. O pós-processamento possibilita a visualização e extração dos resultados almejados.

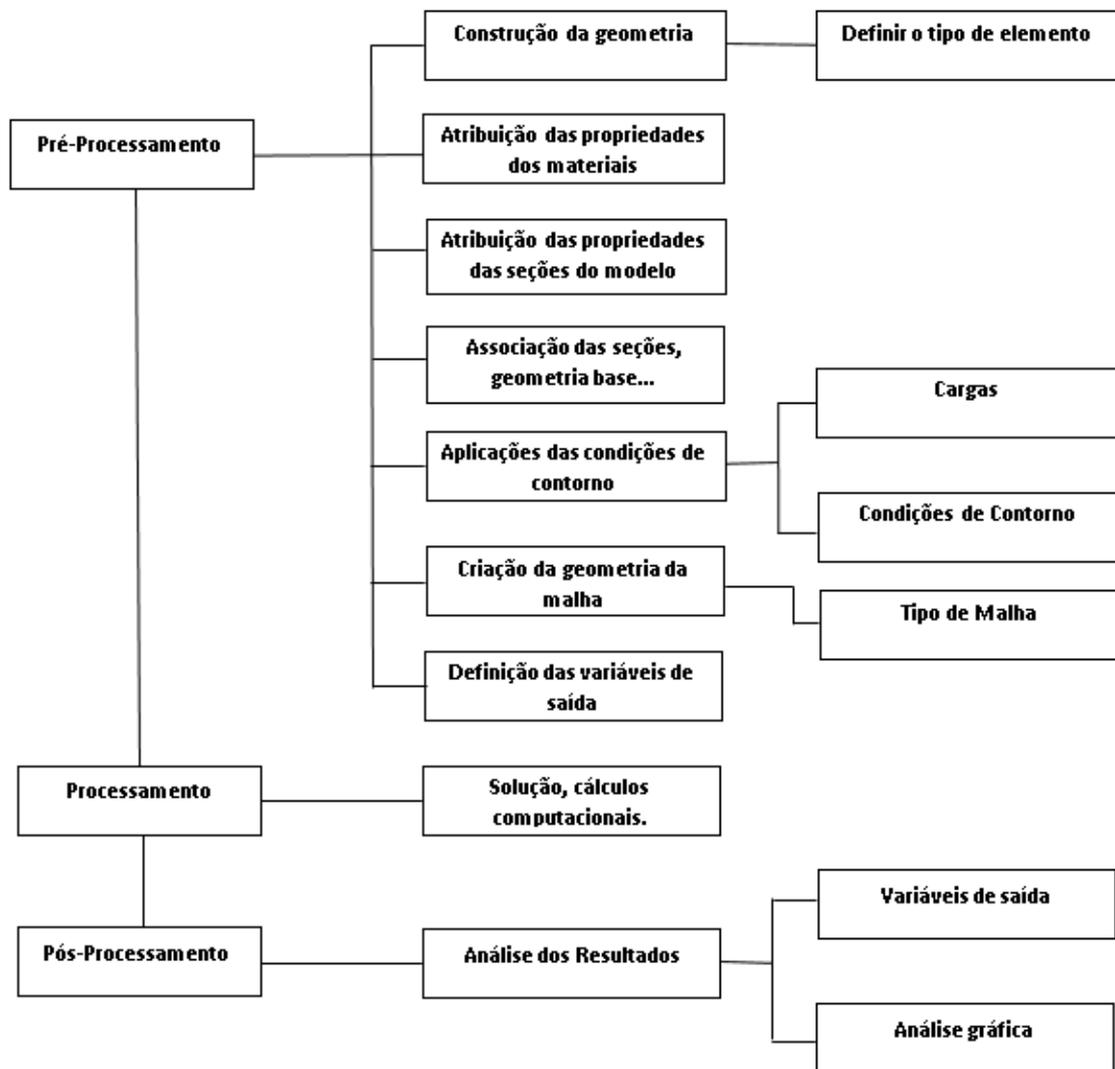


Figura 19 – Etapas para construção e simulação no software ABAQUS.

4.4.1 Pré-Processamento

Para simulação numérica do processo de estampagem a quente, foi construído um modelo de perfil U com um esboço retangular e flange em duas dimensões (2D) no software ABAQUS/Standard. O modelo é constituído de um punção, matriz, prensa-chapas como pode ser visto na Figura (20.a). O tipo de elemento foi definido como sólido em estado plano de deformações. A condição de simetria do modelo permitiu a construção da metade do modelo a fim de economizar tempo de computação Fig. (20.b).

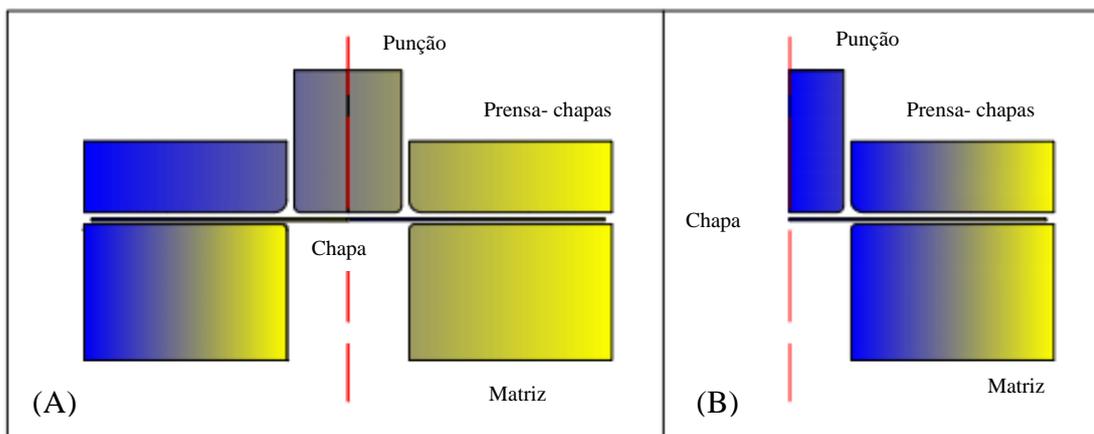


Figura 20 – a) Modelo do ferramental da estampagem a quente - b) Modelo para simulação.

O material atribuído para a chapa é o aço 22MnB5, enquanto do ferramental (punção, prensa-chapas e matriz) é o aço H13. Assumiu-se a condição de estado plano de deformações em conjunto com as hipóteses de elasticidade linear isotrópico e encruamento isotrópico de von Mises. O comportamento elástico foi definido pela lei generalizada de Hooke com o módulo de elasticidade (E), e o coeficiente de Poisson (ν). A parte plástica é determinada pela lei de encruamento de Norton-Hoff modificada, introduzindo o comportamento plástico em temperaturas de 600, 650, 700, 800 e 900° C em forma de tabela no ABAQUS. Os tópicos 5.2 e 5.3 discutido, definiu as propriedades mecânicas e o comportamento plástica necessária para introdução do material no programa de elementos finitos ABAQUS.

As superfícies de contato do ferramental e da chapa devem ser definidas para simulação da estampagem a quente. Em comparação com a estampagem convencional, além do contato mecânico, as superfícies de contato envolvidas na estampagem a quente incluem também o contato térmico. Há três superfícies de contato mecânico no processo de estampagem a quente: (1) chapa com punção, (2) chapa com a matriz e (3) chapa com prensa-chapas. O atrito entre o ferramental e a chapa foi definido pela lei de Coulomb. O contato térmico com o ar é definido em todas as superfícies do modelo (ferramental e chapa) a temperatura ambiente, no qual os coeficientes de transferência térmica entre a chapa e o ar está definido no Anexo I. Os parâmetros descrito no texto estão inseridos na Tabela (6).

Tabela 6 – Parâmetros do modelo de estampagem a quente.

| Geometria da Chapa | |
|----------------------------|----------|
| Comprimento | 215 mm |
| Espessura | 2 mm |
| Largura | 107,5 mm |
| Deslocamento do Punção | 88 mm |
| Coeficiente de atrito | 0,2 |
| Temperatura do Ar | 25° C |
| Temperatura da chapa | 950° C |
| Temperatura do Ferramental | 25° C |

4.4.1.1 Canais do sistema de resfriamento

Os canais de resfriamento do modelo aplicado no terceiro passo da simulação foram dimensionados para garantir uma temperatura abaixo do $T_f = 240^\circ \text{C}$ da chapa, sendo que a temperatura inicial no processo de conformação do mesmo foi de $T_0 = 950^\circ \text{C}$. A quantidade de calor neste intervalo de temperatura a ser transferida é quantificada pela Equação (5.4), em que m é a massa e c_s o calor específico do material (YING; ZHONG-DE, 2014).

$$Q = mc_s(T_0 - T_f) \quad (5.4)$$

O processo de resfriamento requer um tempo necessário para garantir uma transformação de fase predominantemente martensítica, este tempo (t) é de 20 segundos. A potência de refrigeração (Φ) é obtida pela Eq. (5.5)

$$\Phi = Q/t \quad (5.5)$$

O calor transferido da chapa é utilizado para o cálculo dos parâmetros das estruturas internas de resfriamento. A quantidade de calor retirada pela água por unidade de tempo (Φ_0) levou em conta a eficiência de transferência (n) de calor de 85%.

$$\Phi_0 = \Phi/2n \quad (5.6)$$

A quantidade de calor absorvida pela água é quantificada pela Equação (5.7), em que a temperatura de entrada ($T_1 = 20^\circ \text{ C}$) e saída ($T_2 = 23^\circ \text{ C}$) da água são determinadas com sua respectiva velocidade ($u = 0,13 \text{ m/s}$).

$$Q' = c_0\rho_0\pi D^2u(T_2 - T_1) \quad (5.7)$$

A partir do princípio de conservação de energia no qual a quantidade de calor absorvida pela água é igual o calor liberado pela chapa.

$$Q' = \Phi_0 \quad (5.8)$$

O diâmetro bruto da seção transversal do canal de resfriamento é obtido por meio da Eq. (5.9).

$$D = \sqrt{4\Phi_0/c_0\rho_0\pi u(T_2 - T_1)} \quad (5.9)$$

A quantidade de canais de resfriamento é determinada pelo melhor arranjo do sistema, quando o diâmetro de n tubos é encontrado pela Eq. (5.10)

$$d = D/\sqrt{n} \quad (5.10)$$

A quantidade de canais utilizados no modelo foram de dezesseis e são divididos no ferramental com quatro no prensa-chapas, seis na matriz e seis no punção. O diâmetro dos respectivos canais de resfriamento é de 12 mm, a distância entre os canais e a superfície de contato pode ser visualizada na Figura (21). A condição de contorno nos canais foi especificado no modelo como 51756,89 W/m²

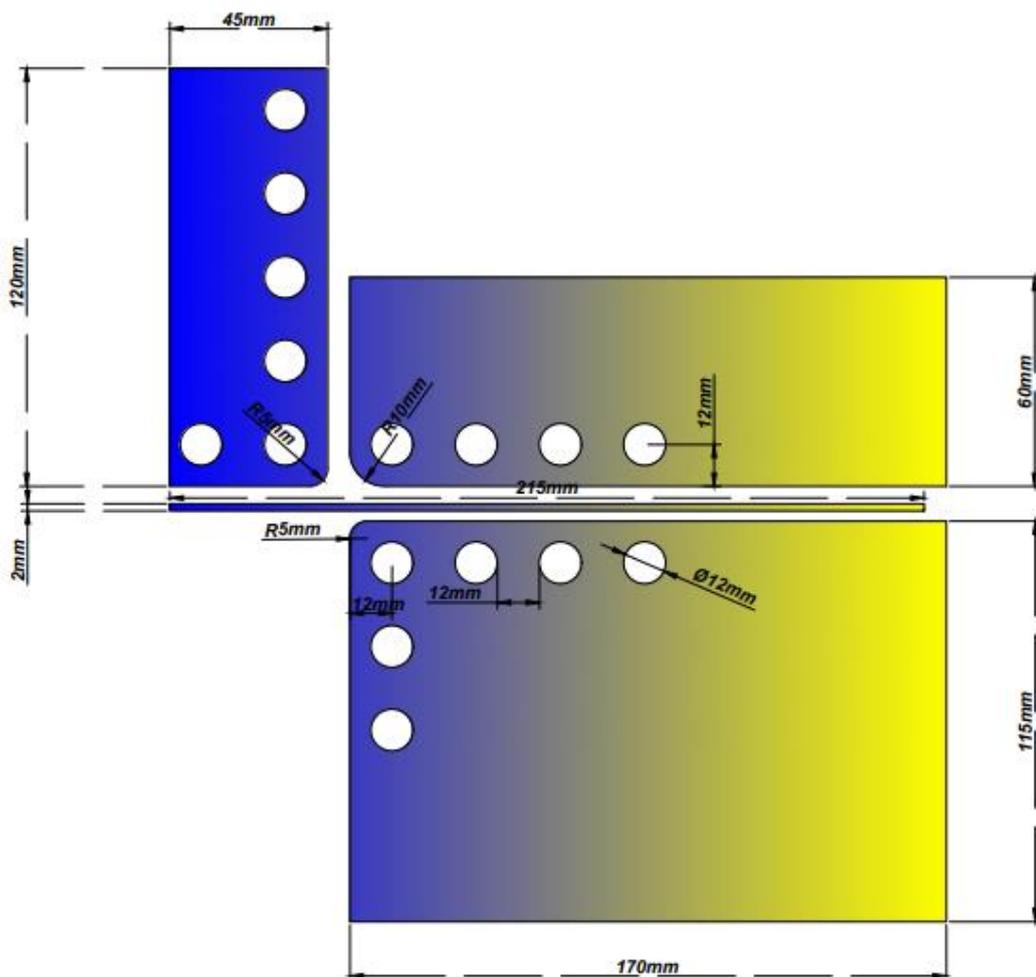


Figura 21 – Modelo do ferramental para simulação da estampagem a quente.

4.4.1.2 Passos da Simulação e Geometria da Malha

A simulação é dividida em quatro passos, no primeiro passo o prensa-chapas é movido para baixo e exerce uma pressão de 1 MPa a fim de apertar junto a matriz em um intervalo de tempo 0,0001 segundos, no segundo passo o punção é movido para baixo com um deslocamento de 88 mm, quando ocorre a conformação da chapa em um intervalo de 0,01 segundos, já no terceiro passo ocorre o processo de resfriamento do material em um intervalo de 20 segundos e no quarto passo o ferramental é retirado em 1 segundo (contato é removido por completo entre a chapa e o ferramental, para análise do retorno elástico). As etapas de simulação descrita no texto podem ser vistas na Fig. (22).

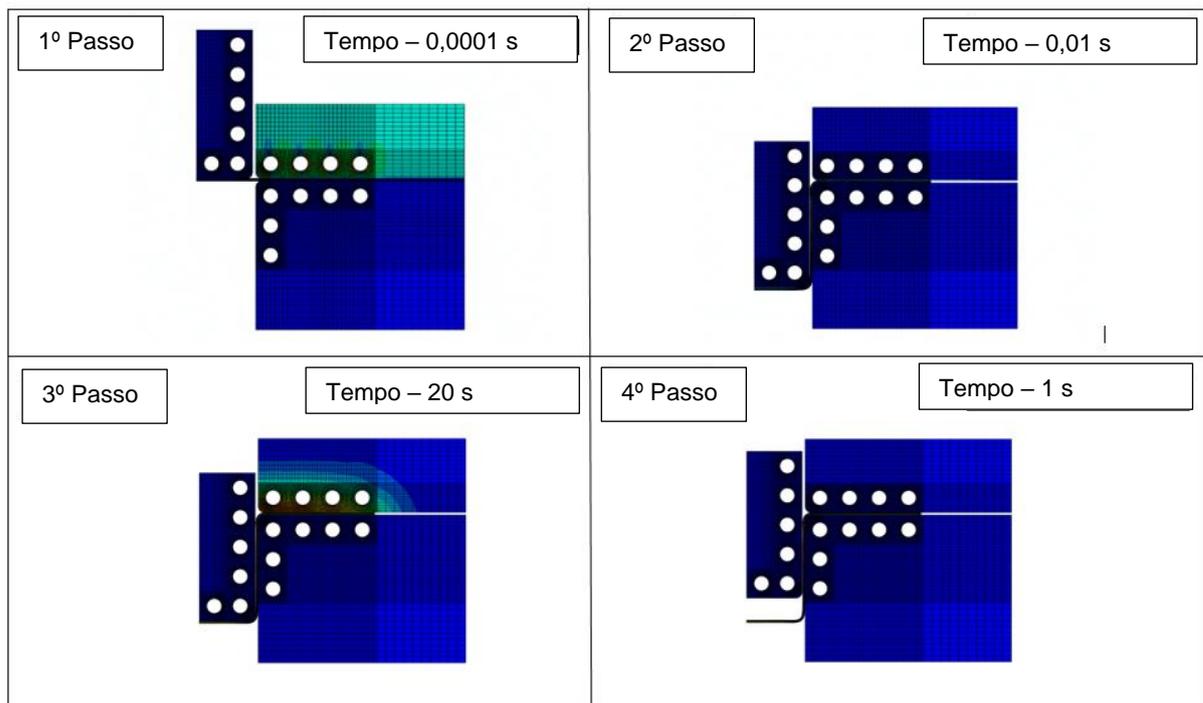


Figura 22 – Etapas da simulação.

A malha foi definida como CPE4RT, usado para estado plano de deformações, no qual esses elementos permitem o acoplamento termomecânico durante o processo de conformação mecânica a quente. Há um refinamento da malha nas extremidades, como pode ser visto na Figura (23), próximo onde ocorre o contato

entre as partes envolvidas e entorno dos canais de resfriamentos. A quantidade de elementos do punção, prensa-chapa, matriz e chapa são definidos na Tabela (7).

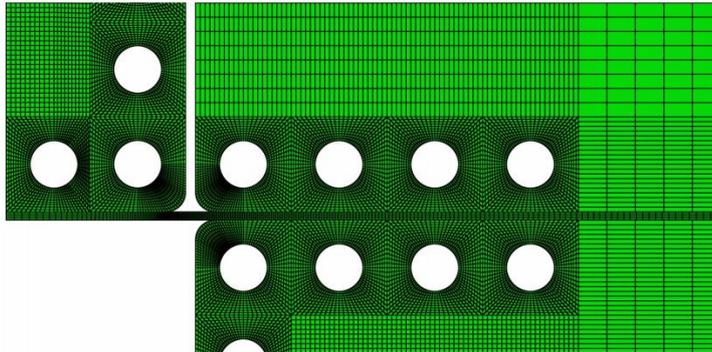


Figura 23 – Detalhes do refinamento da malha adotado no modelo.

Tabela 7 – Quantidade de elementos definido na malha.

| | Elementos |
|--------------|------------------|
| Punção | 6480 |
| Matriz | 8820 |
| Prensa-chapa | 4420 |
| Chapa | 1884 |

4.1 Cinética de transformação de fases.

Os canais de resfriamento foram elaborados para garantir uma microestrutura predominantemente martensítica e para verificar a quantidade de fase presente, foi utilizado o modelo de Koistinen-Marburger descrito na Equação (5.11). Este modelo descreve apenas a transformação da austenita para martensita.

$$z = 1 - e^{-c(M_s - T)} \quad (5.11)$$

Desta forma, z é a fração de martensita na temperatura atual; T ($^{\circ}C$) é a temperatura atual durante o resfriamento; M_s ($^{\circ}C$) é a temperatura de início de transformação martensítica. Para aços ao carbono, o valor da constante c é de 0,011 e a temperatura inicial da transformação em martensita (M_s) pode ser obtido pela da Eq. (5.12) (DENG, 2009):

$$M_s(^{\circ}C) = 561 - 474C - 33Mn - 17Ni - 17Cr \quad (5.12)$$

4.2 Medição do retorno elástico.

O retorno elástico é verificado pela quantificação de determinados ângulos da peça após a retirada do ferramental, como visto na Figura (24): o ângulo entre fundo e a parede (θ_1), o ângulo entre o flange e a parede (θ_2) e o raio de curvamento da parede (ρ).

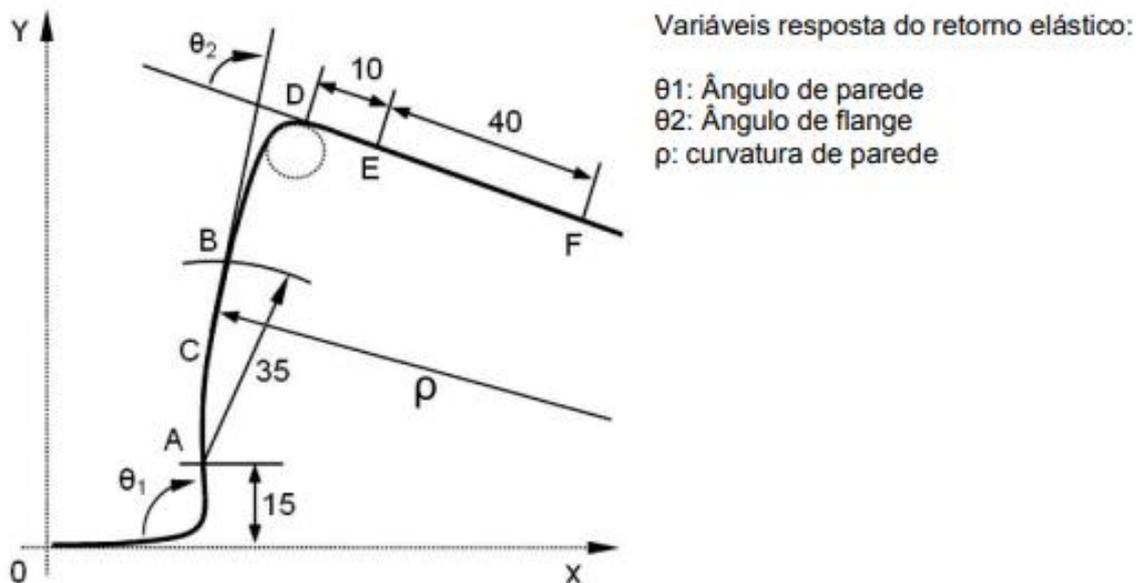


Figura 24 – Variáveis do retorno elástico. Adaptado (LEE et al., 2005)

Tabela 8 - Variáveis do retorno elástico para análise.

| Fator | Descrição |
|------------|------------------------------|
| θ_1 | Ângulo de parede |
| θ_2 | Ângulo de flange |
| ρ | Raio de curvamento de parede |

A variação dos ângulos listados na Tabela (8) e o raio de curvamento de parede possibilita a caracterização do retorno elástico obtido na previsão numérica

deste trabalho. A forma de medir o retorno elástico da Figura (24) é conhecido como *benchmark problem* e foi proposto na conferência Numisheet (1993).

Para medir o retorno elástico foi retirado do ABAQUS as coordenadas da chapa que permite descrever a geometria do corpo. A análise foi realizada em três regiões diferentes de espessura da peça como pode ser visto na Figura (25): primeira região que é denominada de “topo”, fica na superfície de contato da chapa com o punção, segunda região que é denominada “centro” e a terceira região é denominada de “fundo”.



Figura 25 - Superfície da chapa analisada.

As coordenadas de cada região são plotadas na forma de gráfico no programa Origin®, como visto na Figura (26), e logo em seguida é importado para o Autocad® para medir a variação do ângulo de parede ($\Delta\theta_1$), ângulo de flange ($\Delta\theta_2$) e o raio de curvamento de parede (ρ).

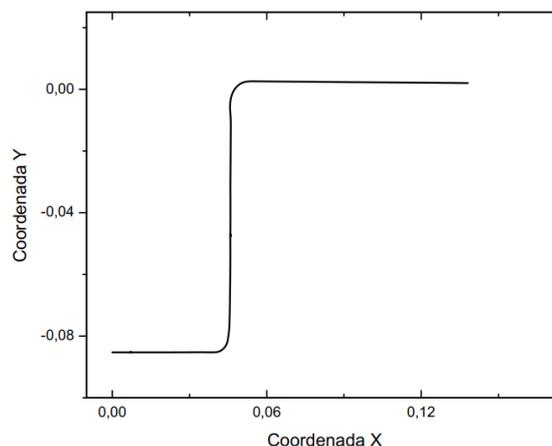


Figura 26 - Gráfico da superfície analisada depois da conformação mecânica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resfriamento

Os canais distribuídos no ferramental conforme o desenho proposto na Figura (21), garantiram uma distribuição de temperatura abaixo de 240°C na chapa, após o terceiro passo da simulação. E para verificar o resfriamento da chapa, alguns pontos nas regiões de fundo, parede e flange foram analisados, como ilustrado na Figura (27).

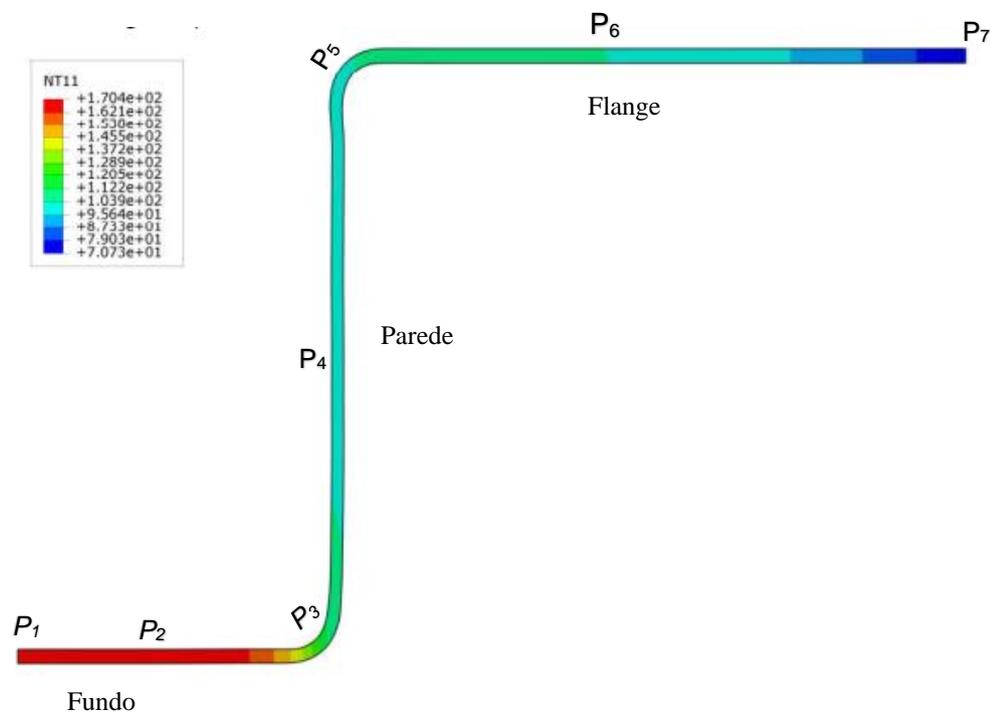


Figura 27 - Distribuição de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) no perfil da chapa conformada.

Na primeira análise, foi feita a média das temperaturas das três camadas (topo, centro e fundo) nos pontos descrito na Figura (27) a fim de verificar junto ao diagrama de transformação sob resfriamento contínuo (CCT) a ocorrência de transformação de fase martensítica

A transformação martensítica do aço 22MnB5 segundo Ximenes(2018), ocorre quando há uma taxa de resfriamento igual ou acima de 30° C/s. O resfriamento dos pontos da chapa indicados nas regiões da Figura (27) foram adicionados a CCT, conforme a Figura (28). Nota-se na CCT que a taxa de resfriamento nos pontos variam de 175 até 260° C/s, alcançando um valor médio de 228° C/s. A taxa de resfriamento média ocorre acima do esperado, garantindo uma transformação martensítica.

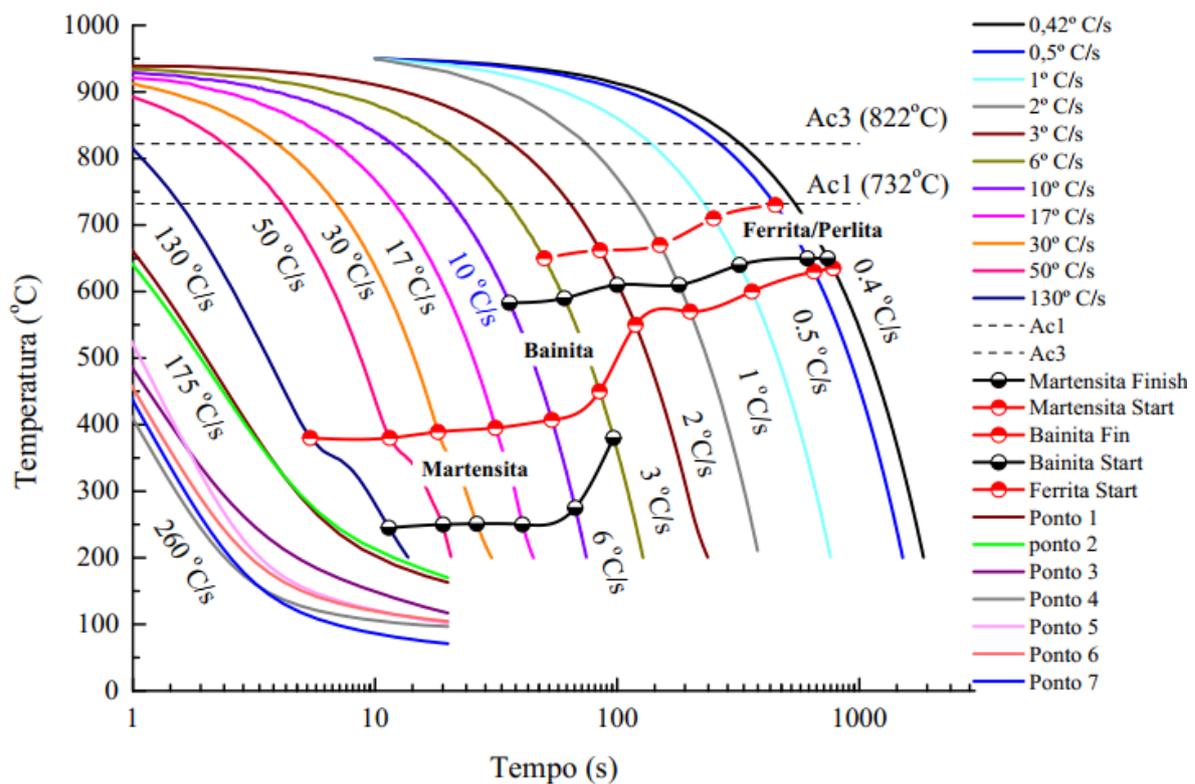


Figura 28 - Diagrama de transformação sob resfriamento contínuo, com a variação da temperatura nos pontos da camada de topo. Adaptado (XIMENES; LEITE; MOREIRA, 2018)

O elevado valor da taxa de resfriamento deste trabalho, foi comparado com o modelo do (LIN et al., 2014) que alcançou um valor de 217° C/s, enquanto o trabalho de (HOFFMANN; SO; STEINBEISS, 2007) e (LEE et al., 2009) atingiram

respectivamente 92° C/s e 100° C/s. A comparação foi feita a fim de apurar a ocorrência de altas taxas de resfriamentos em diversos modelos de resfriamento da estampagem a quente.

Na segunda análise, a média das temperaturas das camadas (topo, centro e fundo) dos pontos indicados na Figura (27) , foram inseridos no modelo de Koistinen-Marburger, a partir da temperatura inicial da Martensita start (409° C), no qual foi possível determinar a fração de martensita. A Figura (29) ilustra o aumento da fração de martensita ao decorrer da etapa de resfriamento da estampagem a quente.

A fração de martensita alcançou valores acima de 92% no final da etapa de resfriamento, como pode ser observado na Figura (29), garantindo uma microestrutura predominantemente martensítica.

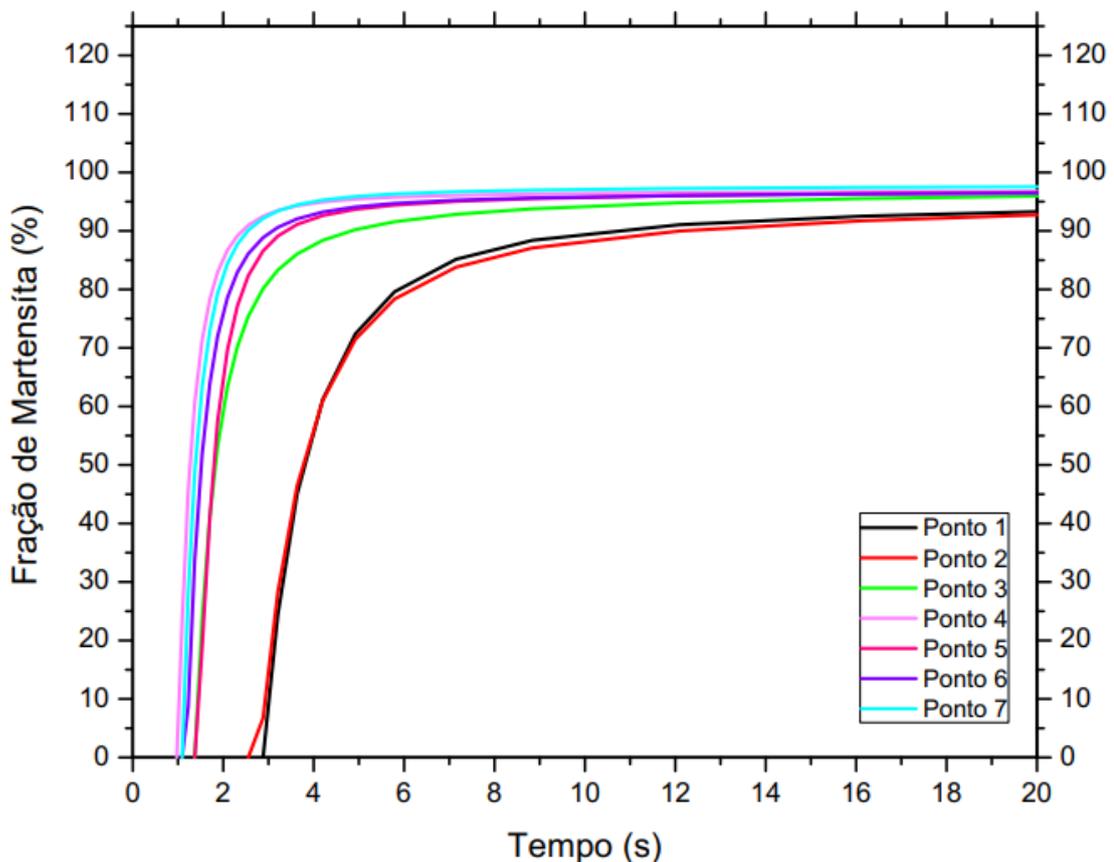


Figura 29 – Variação da fração de martensita durante a etapa de resfriamento do processo de estampagem a quente.

Os valores finais da fração de martensita média e as respectivas temperaturas médias após o resfriamento estão inseridos na Tabela (9), na qual é possível verificar a temperatura final nos pontos indicados junto a fração de martensita.

Tabela 9- Fração de martensita após o resfriamento da peça.

| Ponto | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| Temp. média (°C) | 162,8 | 170,1 | 116,8 | 96,7 | 101,9 | 104,4 | 70,9 |
| Fração de martensita (%) | 93,2 | 92,6 | 95,9 | 96,7 | 96,5 | 96,4 | 97,5 |

As duas análises garantiram a confiabilidade dos canais de resfriamento com o intuito de obter uma microestrutura majoritariamente martensítica da peça estampada.

5.2 Retorno elástico

A previsão numérica do retorno elástico do ângulo de parede ($\Delta\theta_1$), ângulo de flange ($\Delta\theta_2$) na parte de topo, centro e fundo são resumidas na Tabela (10). O raio de curvamento de parede (ρ) não teve uma mudança capaz de ser quantificada, como pode ser observado na Figura (30).

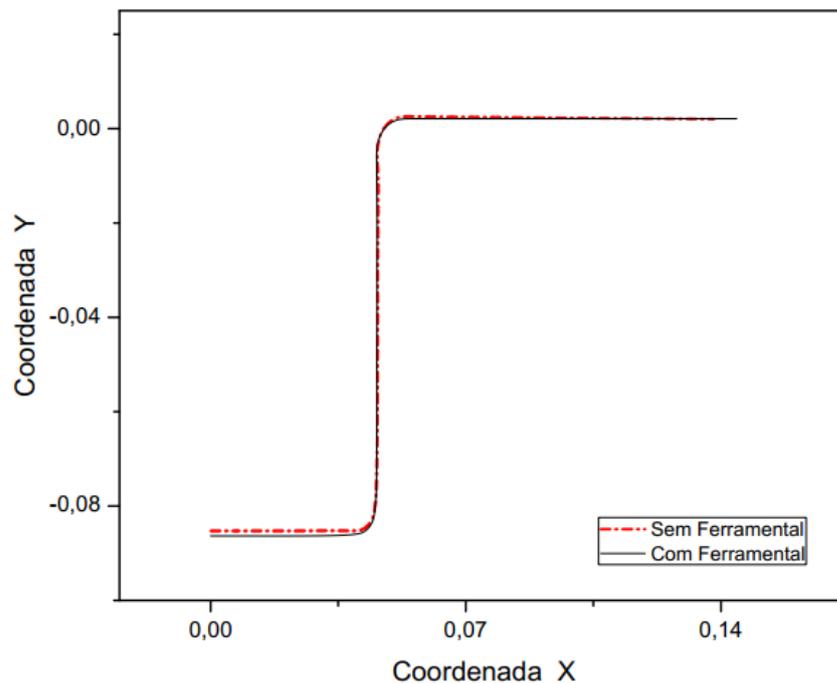


Figura 30 – Perfil da chapa conformada com o ferramental e sem o ferramental.

Tabela 10 - Previsões numéricas das medidas de retorno elástico

| | Topo | Meio | Fundo |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|
| Ângulo de parede ($\Delta\theta_1$) | 1,08° | 1,07° | 1,07° |
| Ângulo de flange ($\Delta\theta_2$) | -0,4752° | -0,5365° | -0,5051° |

O retorno elástico mostrou-se mínimo a partir da temperatura de 950° C de conformação mecânica, sendo assim, garantindo uma boa precisão dimensional.

5.3 Tensões residuais

Para investigar a distribuição residual da tensão, que são decorrentes do retorno elástico, foram determinadas as tensões nas três camadas: topo, centro e fundo. A tensão foi quantificada sob estado de carregamento (com ferramental) e descarregamento (sem o ferramental). A distribuição das componentes da tensões (S11, S22 e S33) é definida nas direções do sistema de coordenadas do modelo, S11 na direção X (comprimento), S22 em Y (espessura) e S33 em Z (largura), como ilustrado na Figura (31).

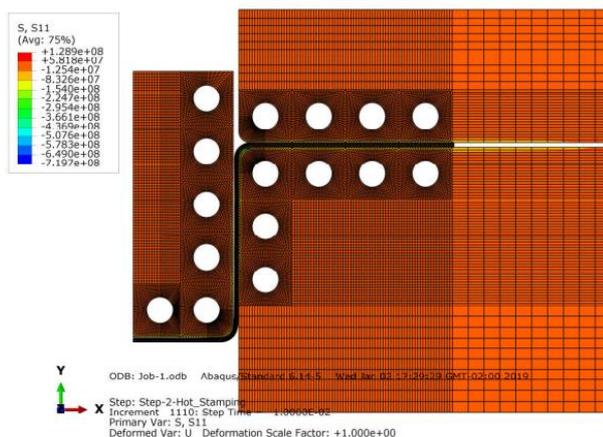


Figura 31 - Modelo de estampagem a quente

As análises das tensões residuais serão nas regiões em que ocorreu dobramento na chapa conformada. O primeiro dobramento está situado no eixo da

abscissa no intervalo de 0,1 a 0,3 na região do ângulo de parede (θ_1), segundo dobramento está localizado entre 0,5 a 0,7 na região do ângulo de flange (θ_2).

A Figura (32) mostra a variação da tensão (S11) na direção X (comprimento), em que é possível verificar o estado das tensões com o carregamento e descarregamento. As tensões residuais provocadas pelo retorno elástico acontecem após o descarregamento, aqui, a tensão na camada de topo está sujeita a tensões compressivas, alcançando o valor de 60 MPa na região do ângulo de parede e 80 MPa no ângulo de flange, como ilustrado na Figura (32.a). A camada de centro tem uma tensão residual de tração no valor de 52 MPa na localidade do ângulo de parede e uma de tração de 70 MPa na região do ângulo de flange, como pode ser visto na Figura (32.b), enquanto a camada de fundo as tensões residuais tem um comportamento majoritariamente compressiva, atingindo um valor de 60 MPa na região do ângulo de parede e uma tensão trativa de 37 MPa no ângulo de flange, como pode ser visto na Figura (32.c).

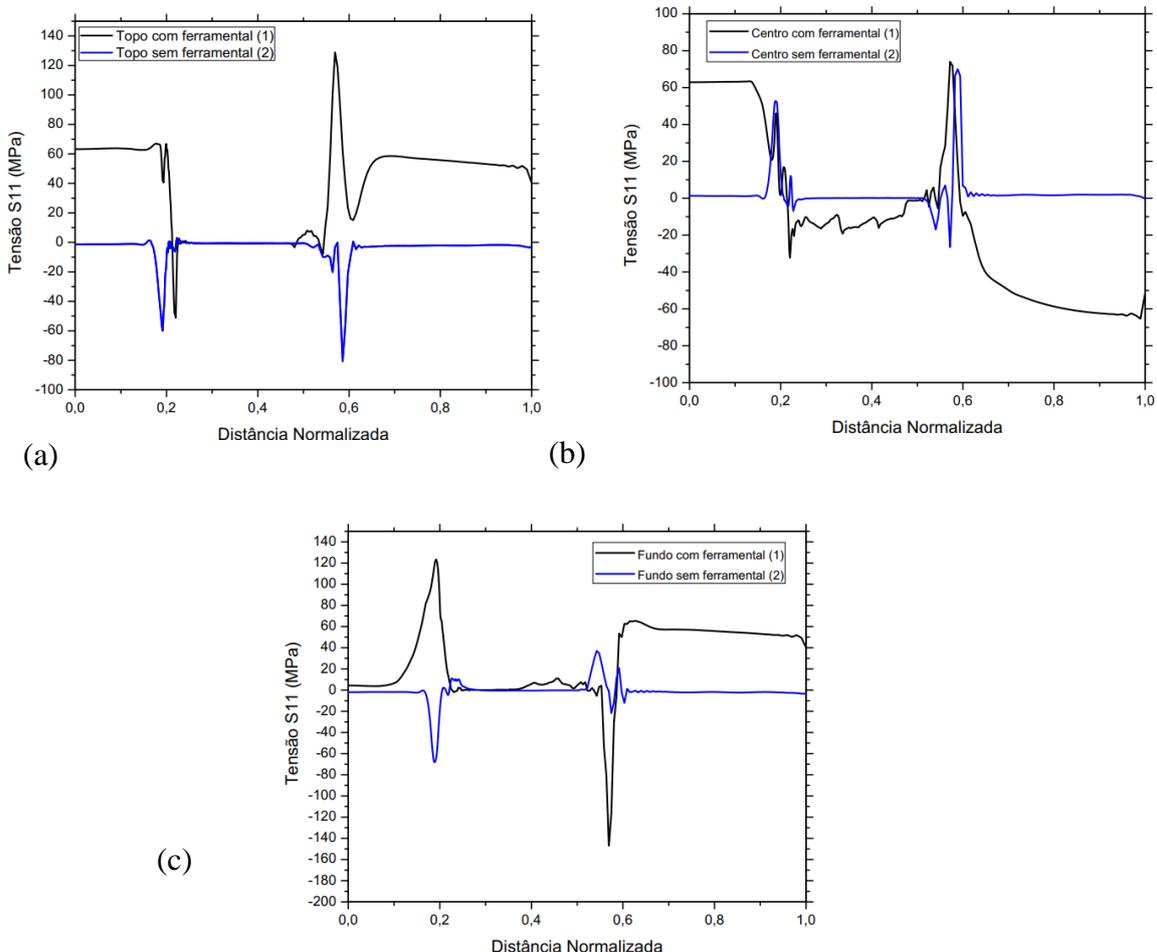


Figura 32 - Tensão S11, na direção X (comprimento) (a) Topo, (b) Centro, (c) Fundo.

A Figura (33) representa a variação da tensão (S22) na direção Y (espessura), local em que pode-se observar a tensão residual. Na camada de topo, a tensão residual tem um comportamento compressivo nos valores de 45 MPa e 53 MPa na região do ângulo de parede e flange, como ilustrado na Figura (33.a). A camada de centro, como pode ser observada na Figura (33.b), tem uma tensão residual predominantemente trativa alcançando valores de 43 MPa e 150 MPa entre a região do ângulo de parede e flange, enquanto a camada de fundo tem uma tensão residual compressiva de 57 MPa e 163 MPa, como pode ser observado na Figura (33.c)

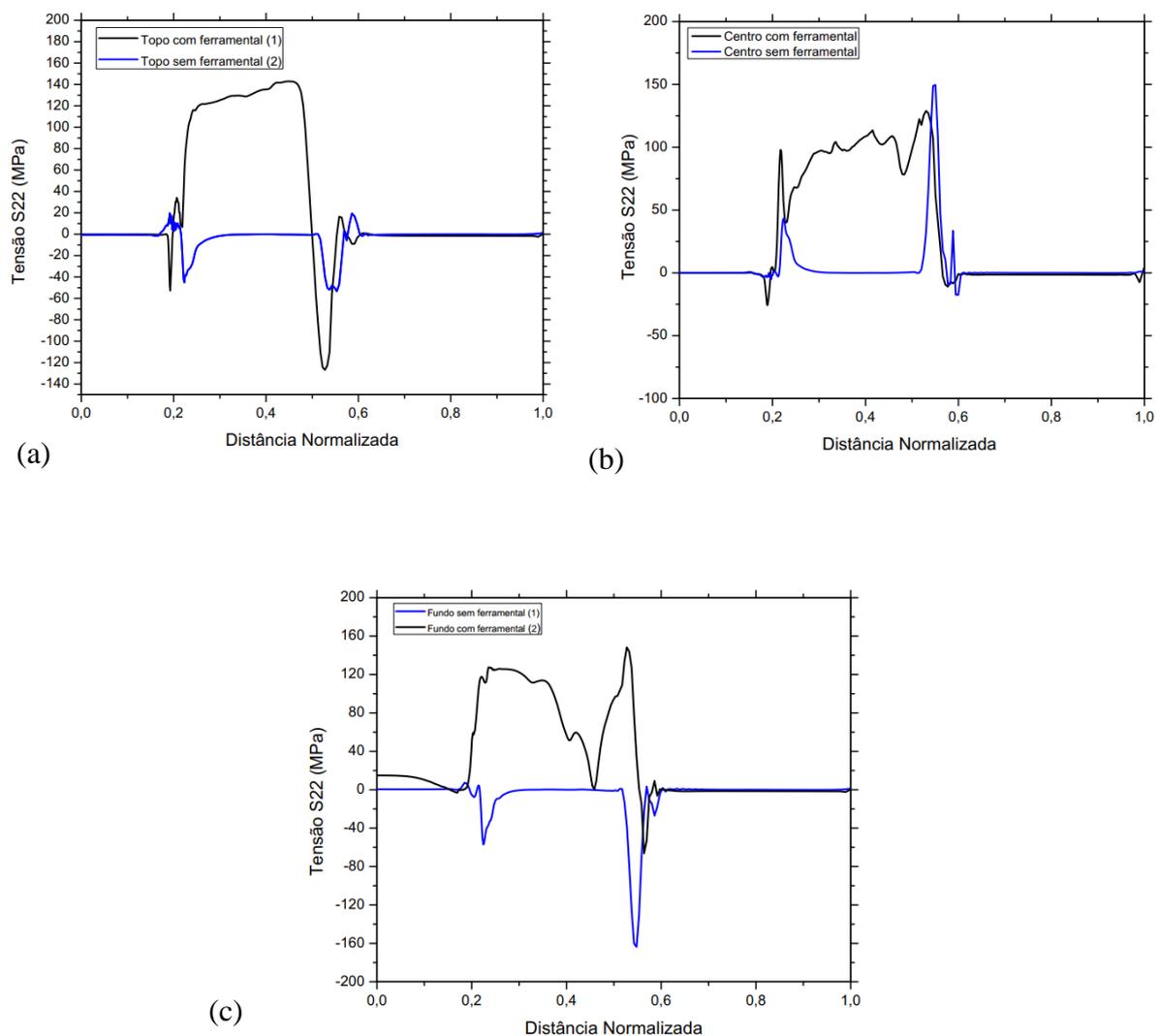


Figura 33 - Tensão S22, na direção Y (espessura) (a) Topo, (b) Centro, (c) Fundo.

A Figura (34) traduz a distribuição da tensão (S33) na direção Z (largura), e pode ser notar uma tensão residual de valor trativo, nas duas regiões (ângulo de parede e flange) das três camadas discutidas neste trabalho. A camada de topo,

centro e fundo alcançaram valores na região do ângulo de parede respectivamente de 326, 322 e 321 MPa enquanto na região do ângulo de flange obteve valores de 318, 324 e 322 MPa.

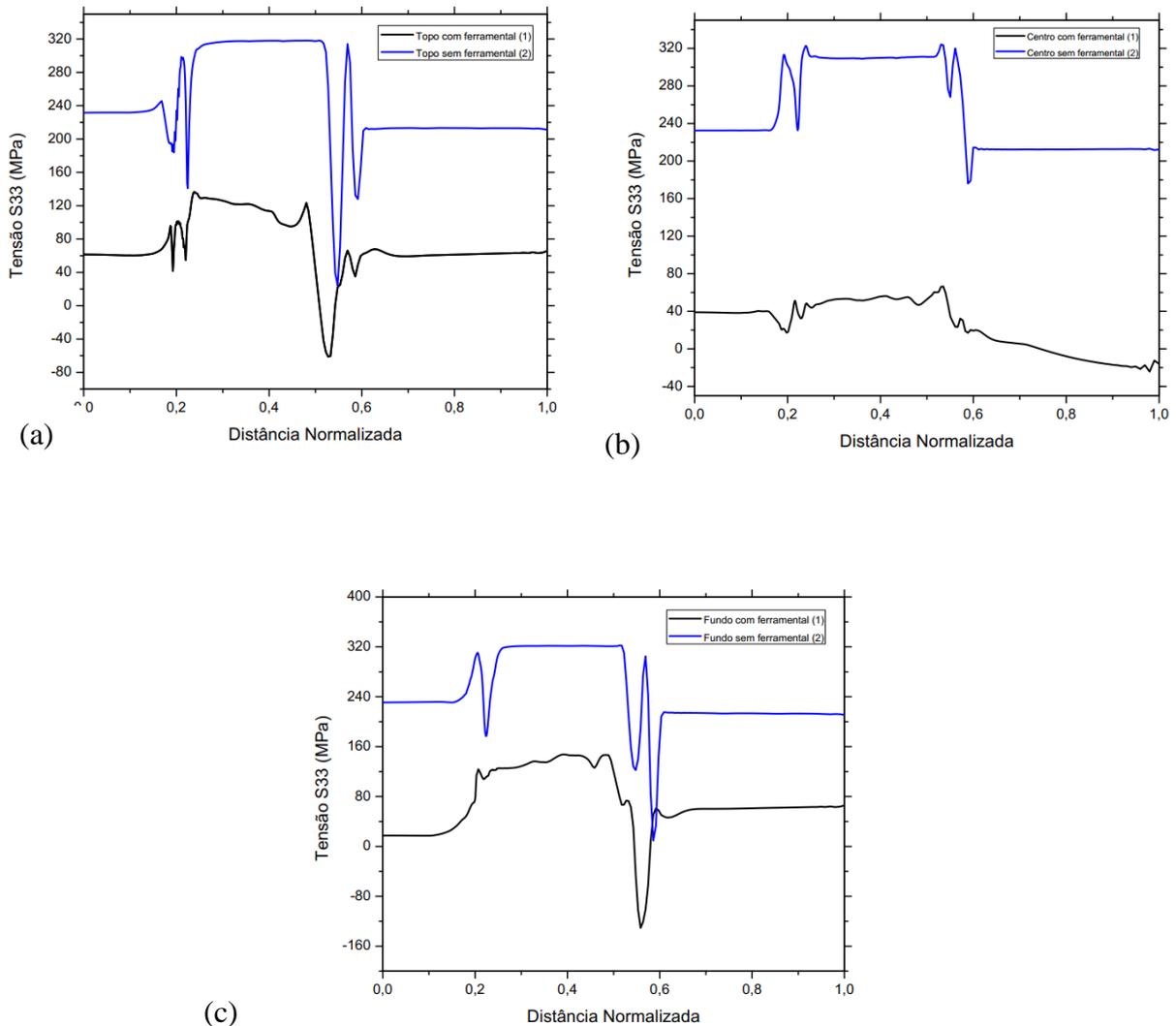


Figura 34 - Tensão S33, na direção Z (largura) (a) Topo, (b) Centro, (c) Fundo.

5.4 Força do Punção

A força do punção necessária a estampagem da chapa é um importante parâmetro do processo. A partir do valor máximo da força de reação do punção é possível dimensionar a prensa necessária ao processo de conformação mecânica. A força máxima alcançada neste trabalho foi de 994,84 N/mm. A Figura (35) apresenta a variação da força do punção na etapa de conformação mecânica.

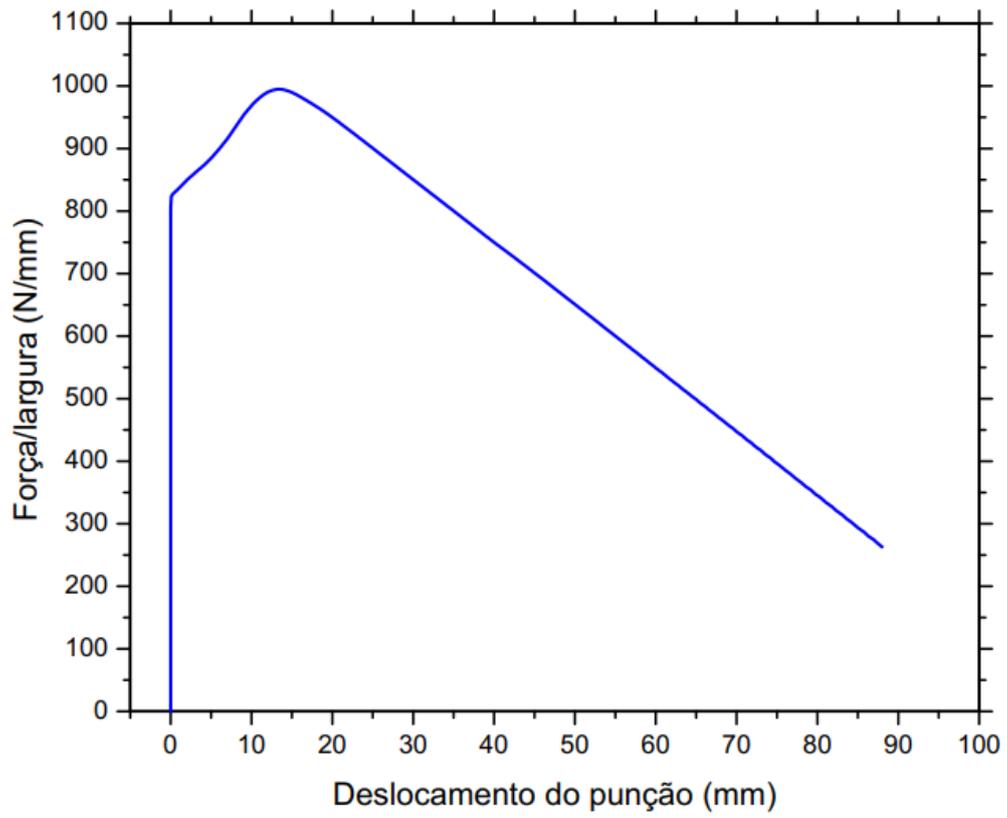


Figura 35 - Força de reação do punção em função do deslocamento na etapa de conformação mecânica

6 CONCLUSÕES

Nesta dissertação de mestrado foram avaliadas as distribuições das temperaturas no esboço, medidas de retorno elástico, tensões residuais e força de reação do punção no processo de estampagem a quente de uma chapa de aço 22MnB5, empregando-se um modelo termomecânico por meio do método de elementos finitos, no qual foram dimensionados os canais de resfriamento que garantiram uma taxa de resfriamento superior a 30° C/s, a fim de obter uma microestrutura final predominantemente martensítica. Com os resultados deste trabalho, foi possível estabelecer as seguintes conclusões:

Os canais de resfriamento garantiram uma transformação de fase majoritariamente martensítica, que foi analisada de duas maneiras distintas. A primeira análise verificou o resfriamento da chapa em diferentes regiões junto a CCT e concluiu que o sistema de refrigeração garantiu uma taxa de resfriamento média de 228° C/s, o que possibilitou uma microestrutura martensítica. A segunda análise utilizou o modelo de cinética de Koistinen-Marburger, e verificou-se a ocorrência da transformação de fase, que alcançou valores acima de 92% de fração de martensita. As altas taxas de resfriamento são necessárias pela dificuldade de obter um resfriamento homogêneo ao longo da chapa, isso é devido ao gradiente de temperatura.

O retorno elástico, após o processo de conformação mecânica, foi quantificado em três regiões distintas (raio de curvamento, ângulo de parede e flange). O raio de curvamento não mostrou uma mudança significativa, enquanto as regiões do ângulo de parede e flange obtiveram uma pequena mudança e capaz de ser quantificada. Os valores alcançados são de $0,53^{\circ}$ no ângulo de flange e $-1,08^{\circ}$ no

ângulo de parede do estampo. A análise do retorno elástico é um motivo relevante no processo de conformação mecânica, pois tem grande influência nas tolerâncias dimensionais e geométricas do produto final.

A tensão residual, devido ao retorno elástico, é um importante fator, pois influencia consideravelmente nas características de resistência mecânica. Podendo gerar uma gama de efeitos vantajosos ou prejudiciais. A tensão residual de tração máxima foi encontrada na camada de topo, na direção S33, alcançando um valor de 326 Mpa, enquanto de compressão atingiu o valor máximo de 163 MPa na camada de fundo, na direção S22.

A partir da simulação numérica, foi possível prever a variação da força do punção por unidade de largura durante o processo de conformação mecânica e, com isso, foi possível determinar o valor máximo de 994,84 N/mm.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Adicionar uma sub-rotina de cinética de transformação de fase no modelo para calcular as deformações provocada pela mudança de microestrutura.
2. validar o modelo proposto por meio de ensaios experimentais.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. Abaqus 6.11 Documentation. 2011. Disponível em: <<http://130.149.89.49:2080/v6.11/index.html>>. Acesso em: 26 dez. 2018.

ALTAN, T. Hot-stamping boron-alloyed steels for automotive parts Part II: Microstructure, material strength changes during hot stamping. Stamping Journal, Rockford, p. 14–15, 10 jan. 2007.

ANAND, D. et al. Fatigue behavior of tailor (laser)-welded blanks for automotive applications. Materials Science and Engineering: A, v. 420, n. 1–2, p. 199–207, 2006.

BATALHA, M. H. F. Estudo da Estampabilidade a Quente de Aço ao Boro em Conformação com Redução de Espessura Controlada. Dissertação de mestrado - Curso de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas 2015.

BRESCIANI, E. et al. Conformação plástica dos metais. 6. ed. São Paulo. 2011. p.61–76

CRIVELLARO, R. S. Estudo da Estampabilidade de Tailored Blanks soldadas a laser. 2003. 89 f. Dissertação de Mestrado - Curso de Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre, 2003

DENG, D. FEM prediction of welding residual stress and distortion in carbon steel considering phase transformation effects. Materials & Design, v. 30, n. 2, p. 359–366, 2009.

GORNI, A. A. Novas tendências no processo de estampagem a quente. *Revista Corte e Conformação de Metais*, p. 19, 2011.

HEIN, P. A Global Approach of the Finite Element Simulation of Hot Stamping. *Advanced Materials Research*, v. 6–8, p. 763–770, 2005.

HOFFMANN, H.; SO, H.; STEINBEISS, H. Design of Hot Stamping Tools with Cooling System. *CIRP Annals*, v. 56, n. 1, p. 269–272, 2007.

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

KOLLECK, R. et al. Investigation on induction heating for hot stamping of boron alloyed steels. *CIRP Annals*, v. 58, n. 1, p. 275–278, 2009.

LEE, M.-G. et al. Spring-back evaluation of automotive sheets based on isotropic–kinematic hardening laws and non-quadratic anisotropic yield functions, part III: applications. *International Journal of Plasticity*, v. 21, n. 5, p. 915–953, 2005.

LEE, M.-G. et al. Application of hot press forming process to manufacture an automotive part and its finite element analysis considering phase transformation plasticity. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 51, n. 11–12, p. 888–898, 2009.

LI, H.; WU, X.; LI, G. Prediction of Forming Limit Diagrams for 22MnB5 in Hot Stamping Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013. c. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11665-013-0491-5>>. Acesso em: 18 ago. 2018.

LIN, T. et al. Cooling Systems Design in Hot Stamping Tools by a Thermal-Fluid-Mechanical Coupled Approach. *Advances in Mechanical Engineering*, v. 6, p. 545727, 2014.

LIU, H. et al. Numerical and Experimental Investigation into Hot Forming of Ultra High Strength Steel Sheet. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 20, n. 1, p. 1–10, 2011.

LIU, H. S. et al. Investigation of the Hot-Stamping Process for Advanced High-Strength Steel Sheet by Numerical Simulation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 19, n. 3, p. 325–334, 2010. a.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J. L.; HU, S. J. *Mechanics of sheet metal forming*. 2. ed ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

MASE, G. T.; MASE, G. E. *Continuum mechanics for engineers*. 2nd ed ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1999.

MERKLEIN, M.; LECHLER, J. Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels. *Journal of Materials Processing Technology, Proceedings of the 11th International Conference on Metal Forming 2006*. v. 177, n. 1 , p. 452–455, 2006.

MERKLEIN, M.; LECHLER, J.; STOEHR, T. Characterization Of Tribological And Thermal Properties Of Metallic Coatings For Hot Stamping Boron-Manganese Steels. *Proceedings Of The 7th International Conference Coatings In Manufacturing Engineering, Erlangen*, p.219-228, out. 2008

MONTEIRO, D. W. A. O EFEITO BAKE HARDENING NA ESTAMPAGEM A QUENTE E A ESTRUTURA VEICULAR. Tese de doutorado- IPEN- São Paulo, 2017.

MORI, K.; MAKI, S.; TANAKA, Y. Warm and Hot Stamping of Ultra High Tensile Strength Steel Sheets Using Resistance Heating. *CIRP Annals*, v. 54, n. 1, p. 209–212, 2005.

NADERI, M. et al. A Numerical and Experimental Investigation into Hot Stamping of Boron Alloyed Heat Treated Steels. *steel research international*, v. 79, n. 2, p. 77–84, 2008.

NAGANATHAN, A. *Sheet Metal Forming—Processes and Applications*. ASM International, 2012.

PASSOS, A. do processo de dobramento em v de molas de I. 718 do bocal superior do elemento combustível nuclear 16 N. Análise do processo de dobramento em v de molas de Inconel 718 do bocal superior do elemento combustível nuclear 16 NGF. Dissertação de mestrado - Engenharia Metalúrgica, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE, Volta Redonda - RJ, 2016.

ROSADO, D. B. COMPARAÇÃO DO EFEITO DA FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO EM AÇOS COM RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ACIMA DE 1000 MPa. [s. l.], p. 92, 2011.

SOMANI, M. C. et al. Dimensional Changes and Microstructural Evolution in a B-bearing Steel in the Simulated Forming and Quenching Process. ISIJ International, v. 41, n. 4, p. 361–367, 2001.

TURETTA, A. Investigation of thermal, mechanical and microstructural properties of quenchenable high strength steels in hot stamping operations, Dissertação de Doutorado, pp.31 a 39, 97 a 99 e 108 a 117, Dipartimento di Innovazione Meccanica e Gestionale, Università degli Studi di Padova, Padova, Itália, 2008

TIGRINHO, L. M. V. PERFIL DE REDUÇÃO NA ESPESSURA DE CHAPAS DE AÇO DE ALTA ESTAMPABILIDADE PARA DIFERENTES LUBRIFICANTES. Centro Politécnico . p. 10, 2017.

WANG, B. Modelling of Melt Flow and Solidification in the Twin-Roll Strip Casting Process. Steel Research International, 2009. Disponível em: <<http://www.stahleisen.de/html/zeitschriften/files/sri08sp131.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

WORLD AUTO STEEL. Advanced High-Strength Steels – Application Guidelines., 2017.

XIMENES, D. A. da C.; LEITE, D. N. F.; MOREIRA, L. P. DETERMINAÇÃO DO DIAGRAMA DE TRANSFORMAÇÃO SOB RESFRIAMENTO CONTÍNUO DE UM AÇO AO BORO. In: ABM PROCEEDINGS 2018, São Paulo. Anais. In: 55º SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO E CONFORMAÇÃO. São Paulo: Editora Blucher, 2018. Disponível em: <<http://abmproceedings.com.br/ptbr/article/determinao-do-diagrama-de-transformao-sob-resfriamento-contnuo-de-um-ao-ao-boro>>. Acesso em: 19 jan. 2019.

YING, X.; ZHONG-DE, S. Design parameter investigation of cooling systems for UHSS hot stamping dies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, , v. 70, n. 1–4, p. 257–262, 2014.

9 ANEXOS

Tabela 11 - coeficiente de transferência térmica entre a chapa e o ar.

| Coeficiente do filme - W/(m²K) | Temperatura - °C |
|--|-------------------------|
| 10,88 | 100 |
| 9,97 | 200 |
| 9,49 | 300 |
| 8,58 | 400 |
| 7,91 | 450 |
| 5,32 | 650 |
| 5,53 | 800 |
| 5,43 | 900 |