

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

ANÁLISE DA EFETIVIDADE DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA POR ELEMENTOS  
FINITOS N O PROCESSO DE ESTAMPAGEM A QUENTE DO AÇO 22MNB5 EM  
GEOMETRIA COMPLEXA

**Christian Henrique Oliveira Maioli**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. - Ing. Lirio Schaeffer

Porto Alegre

2024

## CIP - Catalogação na Publicação

Maioli, Christian  
Análise da Efetividade da Simulação Numérica por  
Elementos Finitos no Processo de Estampagem a Quente  
do Aço 22MnB5 em Geometria Complexa / Christian  
Maioli. -- 2024.  
61 f.  
Orientador: Lirio Schaeffer.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Estampagem a quente. 2. Aço 22MnB5. 3. Simulação  
Numérica. 4. Conformação Mecânica. 5. Metalurgia. I.  
Schaeffer, Lirio, orient. II. Título.

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que foram fundamentais durante a realização deste trabalho e ao longo de toda a graduação. O apoio e estímulo que recebi foram inestimáveis, e não posso deixar de expressar minha sincera gratidão ao final deste percurso.

Aos meus pais, Lúcia e Nilson, meus irmãos Richard e Raulf, e a minha amada, Giovana, quero expressar minha eterna gratidão por seu apoio incondicional. Sem vocês, nada disso teria sido possível.

À minha querida tia Inah, agradeço pela hospitalidade e apoio constantes.

Ao Professor Dr. Ing- Lirio Schaeffer, quero expressar minha profunda gratidão pela orientação valiosa e por disponibilizar o aparato instrumental necessário para a realização deste trabalho.

Ao Me. Eng. André Rosiak, agradeço pela coorientação e amizade durante todo o trabalho e graduação. Sua disponibilidade de tempo e conhecimento foram fundamentais.

Aos laboratórios de pesquisa LAMEF, em especial aos grupos GAF e GEM, e Centro Brasileiro de Inovação em Conformação Mecânica, agradeço por todo o aprendizado proporcionado no dia-a-dia da pesquisa nacional.

À Pró-Reitoria de Assuntos Estudantis, expresse meu reconhecimento pela execução das políticas públicas de permanência estudantil.

Agradeço também ao CNPq e a todos que contribuíram com apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Aos guris de Taquari, Lauro e Romualdo, agradeço por estarem ao meu lado desde o início. Aos amigos que fiz neste curso, agradeço por tornarem a trajetória mais leve e prazerosa.

E, por fim, a todos que compartilharam fins de tarde ao longo dessa trajetória, meu sincero agradecimento.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	v
LISTA DE TABELAS .....	vii
RESUMO .....	ix
ABSTRACT .....	x
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Estampagem a Quente .....	5
2.2 Aços ao Boro .....	9
2.3 Aço 22MnB5 .....	11
2.4 Simulação Numérica .....	16
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
3.1 Caracterização inicial do aço 22MnB5 .....	22
3.2 Geometria da peça em estudo .....	23
3.3 Processo investigado .....	24
3.4 Simulação numérica do processo de estampagem a quente .....	26
3.5 Definição das condições de contorno da simulação numérica .....	28
3.6 Caracterização da peça estampada .....	30
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
4.1 Caracterização inicial .....	32
4.2 Simulação numérica do processo de estampagem a quente .....	33
4.2.1 Deformações .....	33
4.2.2 Temperatura durante a conformação .....	35
4.2.4 Previsão de fratura .....	38
4.2.3 Evolução Microestrutural .....	39
4.3 Estampagem a quente .....	42
4.4 Caracterização da peça estampada a quente .....	43
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>48</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Desenho esquemático do processo convencional de estampagem a quente..	5
Figura 2.2 Evolução da microestrutura e propriedades mecânicas no processo de estampagem a quente.....	6
Figura 2.3 Efeito da temperatura de conformação no retorno elástico.....	7
Figura 2.4 Aplicação de estampagem a quente no Volvo XC90 2014.....	7
Figura 2.5 Influência da taxa de resfriamento na microestrutura final dos aços estampados a quente.....	8
Figura 2.6 Representação esquemática da teoria da temperabilidade do boro.....	10
Figura 2.7 Curvas de escoamento do aço 22MnB5.....	12
Figura 2.8 Diagrama de resfriamento contínuo do aço ao boro 22MnB5.....	14
Figura 2.9 Diagrama de engenharia do aço 22MnB5 com microestrutura ferrítico-perlítica, bainítica e martensítica.....	14
Figura 2.10 Curva Limite de Conformação para o aço 22MnB5 em diferentes temperaturas.....	15
Figura 2.11 Coeficiente de transferência de calor interfacial em função da temperatura no processo de estampagem a quente do aço 22MnB5.....	16
Figura 2.12 Projeto de processos de conformação de chapas assistidos por FEM.....	17
Figura 2.13 Pré-processamento de um modelo de elementos finitos.....	18
Figura 3.1 Fluxograma das etapas percorridas para a realização deste trabalho.....	22
Figura 3.2 Coluna B de um veículo.....	23
Figura 3.3 Protótipo de coluna B.....	24
Figura 3.4 Desenho esquemático do processo de estampagem a quente analisado.....	25
Figura 3.5 Detalhamento do ferramental de estampagem a quente (a) punção, (b) prensa-chapas e (c) matriz.....	25
Figura 3.6 Modelo numérico do processo de estampagem a quente.....	26
Figura 3.7 Planos de simetria do modelo numérico.....	27
Figura 3.8 Malha gerada no blank.....	27
Figura 3.9 Introdução das curvas de escoamento no software QFORM.....	29
Figura 3.10 Regiões da peça analisadas.....	30
Figura 4.1 Micrografia óptica do aço 22MnB5 na condição inicial (500x).....	32
Figura 4.2 Distribuição da deformação equivalente na peça estampada.....	34

Figura 4.3 Avanço da deformação equivalente nos pontos de análise durante a conformação. ....	34
Figura 4.4 Distribuição de temperatura na peça imediatamente antes da conformação. ....	35
Figura 4.5 Distribuição de temperatura na peça imediatamente após a conformação ...	36
Figura 4.6 Taxa de resfriamento média da peça durante a conformação. ....	37
Figura 4.7 Contato entre as ferramentas e a peça durante a conformação. ....	37
Figura 4.8 Fechamento das ferramentas de estampagem a quente. ....	38
Figura 4.9 Resultado numérico referente a previsão de fratura através da CLC do aço 22MnB5 na estampagem a quente. ....	39
Figura 4.10 Previsão da microestrutura do aço 22MnB5 após o final do processamento termomecânico. ....	40
Figura 4.11 Previsão da dureza Vickers da peça após a estampagem. ....	41
Figura 4.12 Protótipo de coluna B de 22MnB5 após a estampagem a quente. ....	42
Figura 4.13 Micrografia óptica do aço 22MnB5 estampado a quente. Pontos 1, 2, 3 e 4 (500x). ....	44
Figura 4.14 Micrografia óptica do aço 22MnB5 estampado a quente. Pontos 5, 6, 7 e 8 (500x). ....	45
Figura 4.15 Micrografia óptica do aço 22MnB5 estampado a quente. Pontos 9, 10, 11 e 12. (500x). ....	46
Figura 4.16 Dureza Vickers da peça estampada. ....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Composição química típica dos aços ao boro para estampagem a quente (% em massa) .....	10
Tabela 2.2 Composição química típica do aço 22MnB5 (% em massa). .....	11
Tabela 2.3 Propriedades mecânicas típicas do aço 22MnB5.....	11
Tabela 2.4 Parâmetros da Equação de Hensel-Spittel para a liga 22MnB5 .....	12
Tabela 2.5 Propriedades térmicas e mecânicas do 22MnB5 .....	13
Tabela 3.1 Parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica do processo de estampagem de precisão a quente. ....	28
Tabela 4.1 Resultado da análise química (% em massa). ....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

$\sigma$  – Tensão Normal [N/mm<sup>2</sup>]

$\varphi_{eq}$  – Deformação equivalente [–]

$\varphi$  – Deformação Verdadeira [–]

$\varepsilon$  – Deformação Relativa [%]

$\mu$  – Coeficiente de Atrito

$\vartheta$  – Temperatura [°C]

$E$  - Módulo de Young [GPa]

$\nu$  - Coeficiente de Poisson [–]

$\kappa$  - Condutividade Térmica [W/(m.K)]

$c$  - Calor Específico [J/(Kg.K)]

AISI - American Iron and Steel Institute

AHSS - Advanced High Strength Steels

LAFUN - Laboratório de Fundição

LdTM – Laboratório de Transformação Mecânica

## RESUMO

Este estudo focaliza a fabricação de peças de ultra-alta resistência por estampagem a quente, centrando-se no aço 22MnB5, relevante na indústria automotiva. O objetivo principal é analisar a estampagem a quente do aço 22MnB5, considerando parâmetros críticos, e empregar simulação numérica para esse fim. A caracterização inicial do aço compreende análises químicas, avaliação da microestrutura e medições de microdureza. O protótipo da peça, uma coluna B, foi modelado, e o processo de estampagem foi realizado com um blank aquecido a 1100°C. A simulação numérica, utilizando o software QFORM, foi essencial para prever a distribuição de deformação, destacando heterogeneidades que influenciam a microestrutura final. A análise da Curva Limite de Conformação (CLC) apontou uma propensão à fratura no rebaixo central da peça, corroborada pela observação da peça estampada. A simulação previu uma microestrutura predominante de bainita, ferrita e martensita. Esses resultados foram validados experimentalmente. A simulação numérica demonstrou ser eficaz na previsão da evolução microestrutural e na identificação de tendências de falhas. Assim, destaca-se seu potencial como ferramenta valiosa na otimização do processo de estampagem a quente de peças de alta complexidade, proporcionando insights fundamentais para aprimorar a qualidade e a eficiência do processo industrial.

## ABSTRACT

This study focuses on the manufacturing of ultra-high-strength parts through hot stamping, with a focus on the 22MnB5 steel, relevant in the automotive industry. The main objective is to analyze the hot stamping of 22MnB5 steel, considering critical parameters, and employ numerical simulation for this purpose. The initial characterization of the steel includes chemical analysis, evaluation of the microstructure, and microhardness measurements. The prototype of the part, a B-pillar, was modeled, and the stamping process was carried out with a blank heated to 1100°C. Numerical simulation, using the QFORM software, was crucial to predict the deformation distribution, highlighting heterogeneities that influence the final microstructure. The analysis of the Forming Limit Curve (FLC) indicated a tendency for fracture in the central groove of the part, corroborated by the observation of the stamped part. The simulation predicted a predominant microstructure of bainite, ferrite, and martensite. These results were experimentally validated. Numerical simulation proved to be effective in predicting the microstructural evolution and identifying failure trends. Thus, its potential as a valuable tool in optimizing the hot stamping process for highly complex parts is emphasized, providing fundamental insights to enhance the quality and efficiency of the industrial process.

## 1 INTRODUÇÃO

Peças de ultra alta resistência fabricadas por estampagem a quente estão sendo cada vez mais utilizadas na indústria automobilística para reduzir o peso da carroceria do automóvel sem comprometer o desempenho de segurança em colisões (OTA et al., 2019). Estes requisitos são atendidos pelo processamento dos aços ao boro, como o 22MnB5. Na estampagem a quente, o material é austenitizado e, em seguida, conformado em peças de formato complexo. A troca térmica entre a peça e as ferramentas frias garante uma troca térmica intensa. O resultado é a transformação da microestrutura austenítica. Atualmente, o 22MnB5 estampado a quente é usado em componentes automotivos, como reforços de colunas A e B, para-choques e vigas de portas, barras dianteiras, traseiras e de teto, além de travessas laterais (RANA & SINGH, 2017). Antes da estampagem a quente, o aço 22MnB5 consiste em uma microestrutura ferrita-perlita com níveis de resistência próximos a 600 MPa. Após a estampagem a quente, a resistência pode atingir valores superiores a 1500 MPa (KARBASIAN & TEKKAYA, 2010).

No projeto do processo de estampagem a quente, diversos aspectos devem ser cuidadosamente controlados para garantir que a peça atinja os requisitos geométricos e as propriedades mecânicas. Parâmetros do processo, como geometria da matriz, troca térmica, espessura da chapa, força de prensa-chapas e atrito, são extremamente críticos. À medida que o número de parâmetros de processo aumenta, torna-se mais difícil encontrar os parâmetros ótimos que satisfaçam as especificações do projeto durante o processo de conformação (HUH & KIM, 2001). Neste contexto, a simulação numérica torna-se uma ferramenta indispensável para controlar e otimizar o processo.

A simulação de estampagem a quente fornece a compreensão do comportamento da deformação durante a etapa de conformação, o que é necessário para esclarecer a distribuição de temperatura localizada. A simulação pode ser usada para calcular a distribuição de temperatura gerada ao entrar em contato com a matriz durante a etapa de conformação e o comportamento de deformação com base nessa distribuição de temperatura (HEIN, 2005). Na conformação de chapas metálicas, a Curva Limite de Conformação (CLC) é frequentemente usada para avaliar a conformabilidade e a área potencial de fratura em uma simulação de conformação. A simulação ainda é usada para avaliar as condições de conformação, prever as propriedades finais e projetar canais de resfriamento na matriz para suprimir o acúmulo de calor (HOFFMANN, et al., 2007).

Destarte, este estudo tem como objetivo geral avaliar a aplicação da simulação numérica para analisar o processo de estampagem a quente do aço 22MnB5 em uma geometria complexa. São objetivos específicos:

- Aprofundar a discussão sobre aspectos críticos do processo de estampagem a quente e da simulação numérica por elementos finitos;
- Investigar a evolução microestrutural do 22MnB5 quando estampado a quente em condições específicas de processamento termomecânico;
- Avaliar a capacidade do modelo numérico para prever a microestrutura e a dureza final da peça estampada a quente;
- Analisar a capacidade do modelo numérico para prever a tendência de fratura do material durante a estampagem a quente;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas próximas seções são apresentados brevemente os temas abordados neste trabalho.

### 2.1 Estampagem a Quente

Nas últimas décadas, a indústria automotiva tem realizado esforços significativos para melhorar a eficiência do combustível dos veículos, ao mesmo tempo que a segurança e a resistência a colisões são ampliadas. Uma das abordagens utilizadas é a construção leve. A redução de peso de 10% pode levar a um aumento de quase 2,5% na eficiência de combustível (KIANI et al., 2014). Isso pode ser alcançado usando materiais mais resistentes, como aços avançados de alta resistência (*advanced high strength steels - AHSS*), na carroceria dos veículos.

Apesar de possuírem propriedades extremamente atrativas, os AHSS apresentam baixa conformabilidade, alto impacto nas ferramentas e elevada tendência ao retorno elástico quando deformados a frio (BERGLUND, 2008). Para superar estes problemas, foi desenvolvida a tecnologia de estampagem a quente. A tecnologia de estampagem a quente é uma combinação de operações de conformação e tratamento térmico, geralmente têmpera (HUANG et al., 2021). O processo é mostrado esquematicamente na Figura 2.1.

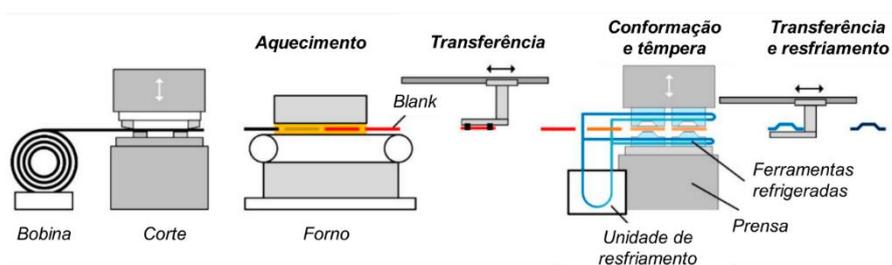


Figura 2.1 Desenho esquemático do processo convencional de estampagem a quente.

Fonte: PENTERA & PIERSCHEL, 2018.

No processo, o aço é cortado em blanks, aquecida até temperaturas entre 900 e 950°C por cerca de 5 a 10 minutos e posteriormente transferido para uma prensa. O material é conformado a cerca de 700°C e então resfriado até a temperatura ambiente. A microestrutura inicial de ferrita e perlita é completamente transformada em austenita

durante o aquecimento e transformada em martensítica após o resfriamento brusco gerado pelo contato do blank com as ferramentas (Figura 2.2). Como resultado, uma resistência à tração de até 1700 MPa pode ser alcançada (CHANG et al., 2015). Por fim, a peça é revenida, desbastada e puncionada, para atender às exigências de projeto (KIANI et al., 2014).

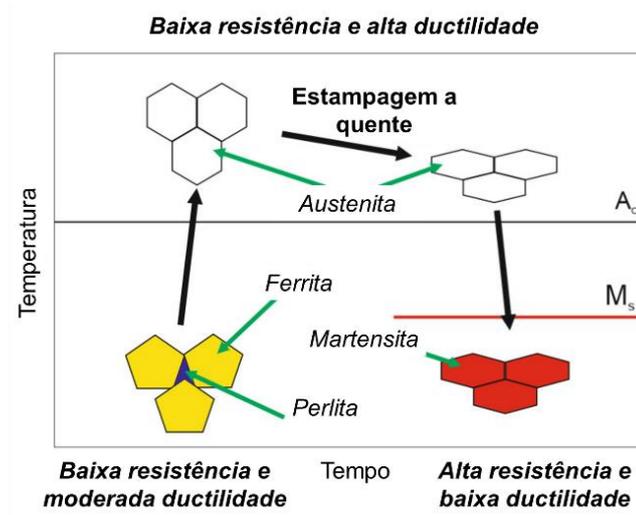


Figura 2.2 Evolução da microestrutura e propriedades mecânicas no processo de estampagem a quente.

Fonte: WRÓBEL et al., 2022.

Uma das grandes vantagens da estampagem a quente consiste na redução do retorno elástico. A Figura 2.3 ilustra o efeito da temperatura de conformação no retorno elástico. Reduções marcantes de retorno elástico são observadas em temperaturas acima de 400 e 600°C (YANAGIMOTO & OYAMADA, 2007).

Um exemplo notável da aplicação da estampagem a quente é o Volvo XC90 2014 (Figura 2.4). No veículo, chapas de aço estampadas a quente foram aplicadas em cerca de 38% da carroceria, incluindo as longarinas longitudinais dianteiras e traseiras, reforços das colunas A, B e C, reforços de trilhos de teto e travessas de piso (VOLVO, 2017).

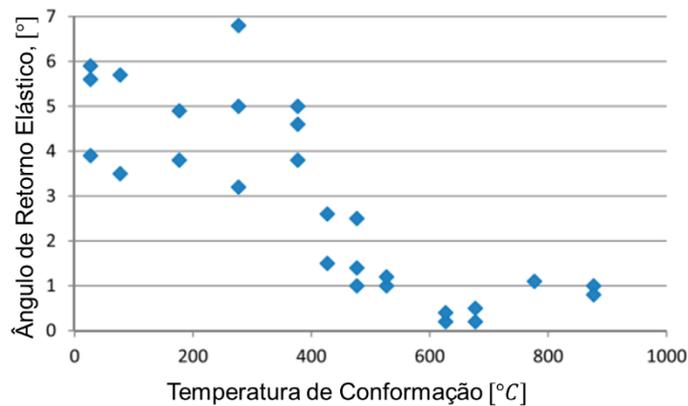


Figura 2.3 Efeito da temperatura de conformação no retorno elástico.

Fonte: YANAGIMOTO & OYAMADA, 2007.

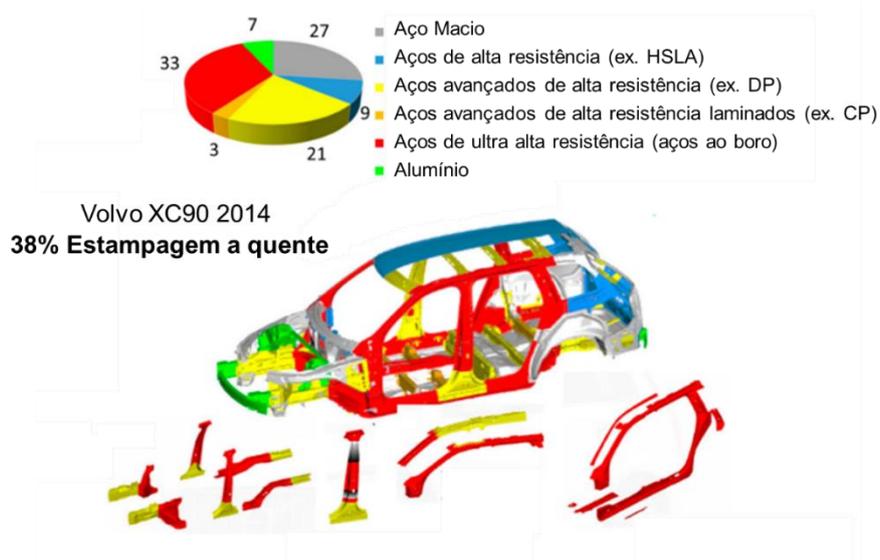


Figura 2.4 Aplicação de estampagem a quente no Volvo XC90 2014.

Fonte: TAYLOR & CLOUGH, 2018.

A tecnologia de estampagem a quente apresenta as seguintes desvantagens (TONG et al., 2020):

- A produtividade é baixa devido a um longo tempo de ciclo, incluindo aquecimento e resfriamento.
- O custo da proteção contra a oxidação e a descarbonetação é elevado.
- Devido à baixa ductilidade, o produto não é adequado para utilização em estruturas que absorvem energia.
- O processo requer um grande investimento em equipamentos de produção.

Os parâmetros tecnológicos do processo de estampagem a quente são críticos para a obtenção das propriedades mecânicas finais desejadas da peça. A temperatura de imersão no forno, o tempo de transporte da peça até a prensa, a taxa de resfriamento na prensa e tempo de têmpera (permanência nas ferramentas após a estampagem) são responsáveis pelo efeito final exigido da estampagem e devem ser cuidadosamente selecionados (COUTO et al., 2021).

Para que uma microestrutura fundamentalmente martensítica seja atingida a taxa de resfriamento deve ser superior a  $27\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  (KARBASIAN & TEKKAYA, 2010). A redução da taxa de resfriamento resulta na formação de bainita ou de uma estrutura perlítico-ferrítica (Figura 2.5). Portanto, devido ao controle da taxa de resfriamento, é possível obter uma ampla gama de efeitos nas propriedades mecânicas da peça estampada (WRÓBEL et al., 2022). Isto é implementado no chamado tratamento térmico sob medida (*tailored heat treatment*) que envolve o uso de uma ferramenta especialmente desenvolvida, que incorpora segmentos aquecidos e segmentos resfriados. Dessa forma, a transformação martensítica não ocorre em toda a peça e zonas com diferentes níveis de resistência podem ser geradas. Isso permite que uma mesma peça atenda a diferentes requisitos de projeto.

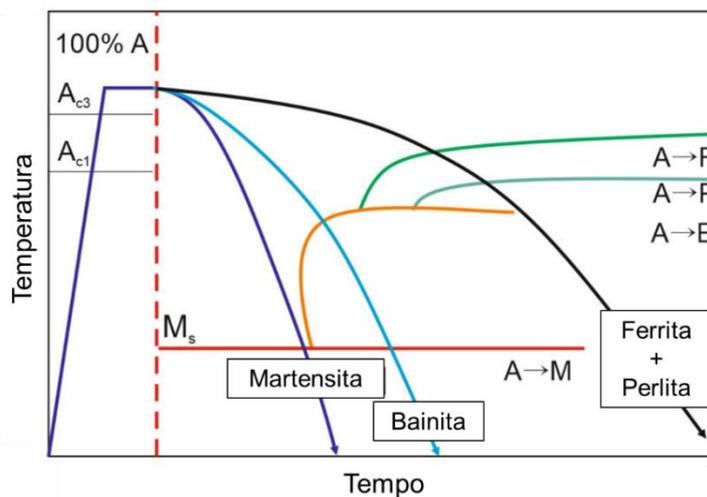


Figura 2.5 Influência da taxa de resfriamento na microestrutura final dos aços estampados a quente.

Fonte: WRÓBEL et al., 2022.

O desempenho final das peças estampadas a quente depende diretamente da transformação de fase que ocorre durante a conformação. Nesse contexto, três aspectos são relevantes:

- i. A pressão de contato;
- ii. A área de transferência de calor;
- iii. O sistema de refrigeração das ferramentas.

Para alcançar uma interação otimizada entre estes aspectos, recentemente, um novo tipo de ferramenta de estampagem a quente foi desenvolvido. A ferramenta utiliza uma almofada hidráulica para aumentar a pressão e, portanto, a superfície de contato entre o blank e a matriz. O coeficiente de transferência de calor é aumentado, resultando em menor tempo de estampagem e maior produtividade (SCHULER GROUP, 2015).

Uma forma de aumentar a área de contato de transferência de calor é por meio da injeção direta de água no vazio inevitável entre o blank e a matriz durante a estampagem. Segundo MAENO et al. (2015) esta abordagem melhora a produtividade e também aprimora a conformabilidade graças à transferência de calor mais uniforme.

O projeto de ferramentas com canais de resfriamento é outra tecnologia amplamente investigada para melhorar a transferência de calor na estampagem a quente. Este projeto é complexo e deve considerar o espaço entre os canais e a profundidade dos canais até a superfície da matriz, a fim de melhorar o desempenho do resfriamento (VALLS et al., 2009).

## 2.2 Aços ao Boro

Os materiais mais utilizados na estampagem a quente são os aços ao boro (Mn-B), como 20MnB5, 22MnB5 e 27MnCrB5. Estes aços devem apresentar temperabilidade suficiente para permitir a transformação martensítica completa durante o processo de estampagem a quente. Para tanto, a composição química dos materiais é ajustada para retardar as transformações ferríticas e perlíticas e evitar as transformações difusionais, além de devem apresentar soldabilidade adequada (WRÓBEL et al., 2022). A Tabela 2.1 apresenta as composições típicas dos aços ao boro para estampagem a quente.

Para atender estes requisitos, o teor de carbono, é mantido em níveis baixos para não deteriorar a soldabilidade (PODANY et al., 2018). A adição de manganês, além de gerar ação desoxidante e reduzir a suscetibilidade à fragilidade a quente, gera a redução da temperatura de austenitização. Isso é importante, pois permite economizar energia e reduzir a emissão de carbono durante o aquecimento da chapa (AYDIN et al., 2013). O boro aumenta significativamente a temperabilidade do aço, promovendo a formação de carbonetos. A adição de boro é fundamental para a obtenção de uma microestrutura totalmente martensítica em um processo típico de estampagem a quente (NADERI et al., 2011). Esta teoria é ilustrada pela representação esquemática da Figura 2.6 (RHEINGANS & MITTEMEIJER, 2015).

Tabela 2.1 Composição química típica dos aços ao boro para estampagem a quente (% em massa).

Classe	C	Mn	B	Cr	Si	Al	Ti	N
20MnB5	0,16	1,05	0,0001	0,23	0,40	0,04	0,034	-
22MnB5	0,23	1,18	0,002	0,16	0,22	0,03	0,040	0,005
37MnB4	0,33	0,81	0,001	0,19	0,31	0,03	0,046	0,006

Fonte: KARBASIAN & TEKKAYA, 2010.

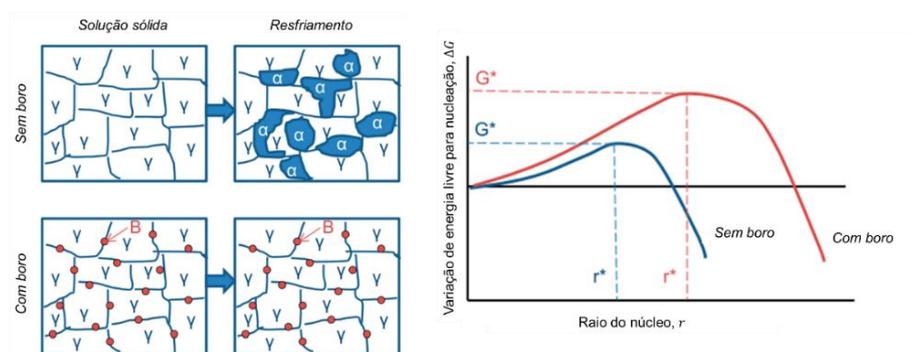


Figura 2.6 Representação esquemática da teoria da temperabilidade do boro.

Fonte: TAYLOR & CLOUGH, 2018.

Devido à adição de boro, essa classe de aços pode apresentar resistência à tração comparável a aços com teores de carbono ou liga muito mais elevados. Com base na termodinâmica clássica, o soluto de boro dissolvido em solução sólida de austenita segrega para os contornos de grão, aumentando a energia superficial do contorno de grão

e, conseqüentemente, aumentando a energia de ativação para uma transformação de fase. Isso retarda a nucleação da ferrita e aumenta a temperabilidade (HWANG et al., 2011).

### 2.3 Aço 22MnB5

A classe normalmente usada para estampagem a quente é o aço 22MnB5 (KARBASIAN & TEKKAYA, 2010). Este aço possui baixo teor de carbono e é ligado ao manganês e ao boro. Na condição como laminado, apresenta microestrutura ferrítico-perlítica. A composição química típica e as propriedades mecânicas são apresentadas nas tabelas 2.2 e 2.3, respectivamente. Após a conformação a quente é possível obter peças com limite de escoamento superior a 1000 MPa e limite de resistência de aproximadamente 1500 MPa (SO et al., 2012).

Tabela 2.2 Composição química típica do aço 22MnB5 (% em massa).

C	Mn	B	Cr	Si	Al	Ti	N
0,19 – 0,22	1,10 – 1,40	0,0008 – 0,0050	0,10 – 0,35	0,00 – 0,40	0,02 – 0,04	0,015 – 0,050	0,00 – 0,01

Fonte: KARBASIAN & TEKKAYA, 2010.

Tabela 2.3 Propriedades mecânicas típicas do aço 22MnB5.

Inicial			Após a estampagem a quente		
Limite de escoamento, $R_{p0,2}$ [MPa]	Resistência à tração, $R_m$ [MPa]	Alongamento Total, $A_t$ [%]	Limite de escoamento, $R_{p0,2}$ [MPa]	Resistência à tração, $R_m$ [MPa]	Alongamento Total, $A_t$ [%]
~ 400	~ 600	~ 22	~ 1000	~ 1500	~ 5

Fonte: KARBASIAN & TEKKAYA, 2010.

O comportamento mecânico do aço boro estampado a quente 22MnB5 é afetado pela deformação, temperatura e velocidade de deformação. A Figura 2.7 apresenta as curvas de escoamento do aço 22MnB5 obtidas experimentalmente por ROSIAK et al. (2019) na faixa de temperaturas em que ocorre a deformação na estampagem a quente. É possível observar a dependência da tensão de escoamento com a temperatura. Conforme

a temperatura de deformação é reduzida, a tensão necessária para gerar a deformação aumenta.

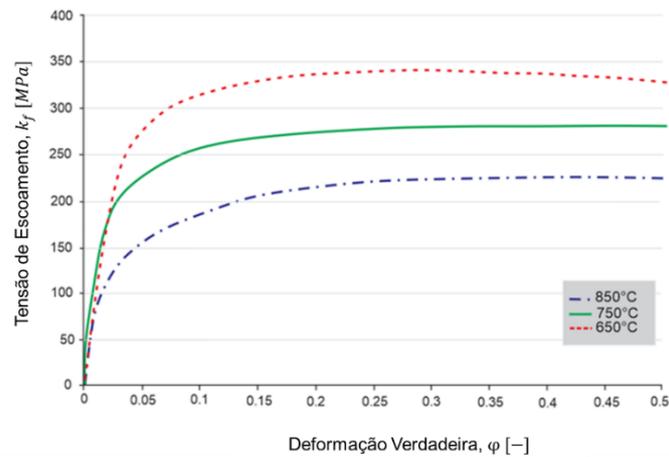


Figura 2.7 Curvas de escoamento do aço 22MnB5.

Fonte: ROSIAK et al. 2019.

Na deformação a quente, o comportamento mecânico dos materiais é comumente descrito matematicamente por meio do modelo de Hansel-Spittel, apresentado pela Equação 1:

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

Onde  $A$ ,  $m_1$  a  $m_9$  são constantes do material. Os parâmetros Hansel-Spittel para o 22MnB5 foram determinados por TANG et al. (2017) por meio de uma análise de regressão não linear das curvas de escoamento obtidas em testes de tração. Os resultados são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 Parâmetros da Equação de Hansel-Spittel para a liga 22MnB5.

A [Mpa]	21266
$m_1$ [-]	-0,00174
$m_2$ [-]	0,34308
$m_3$ [-]	-0,04819
$m_4$ [-]	-0,00054
$m_5$ [-]	0,00069
$m_7$ [-]	-0,89174
$m_8$ [-]	0,00020
$m_9$ [-]	-0,37080

Fonte: TANG et al., 2017.

A Tabela 2.5 lista o Módulo de Young, o Coeficiente de Poisson e as propriedades térmicas (Condutividade Térmica e Calor específico) para o aço 22MnB5 na faixa de temperatura de 20 a 1000°C.

Tabela 2.5 Propriedades térmicas e mecânicas do 22MnB.

Temperatura, $\vartheta$ [°C]	Módulo de Young, $E$ [GPa]	Coeficiente de Poisson, $\nu$ [-]	Condutividade Térmica, $\kappa$ [W/(m.K)]	Calor Específico, $c$ [J/(Kg.K)]
20	212	0,284	30,7	444
100	207	0,286	31,1	487
200	199	0,289	30,0	520
300	193	0,293	27,5	544
400	166	0,298	21,7	561
500	158	0,303	-	573
600	150	0,310	23,6	581
700	142	0,317	-	586
800	134	0,325	25,6	590
900	126	0,334	-	596
1000	118	0,343	27,6	603

Fonte: XIAO & ZAN, 2021

A Figura 2.8 apresenta o diagrama de resfriamento contínuo do aço 22MnB5 e ilustra a taxa crítica de resfriamento para o aço 22MnB5 de 27°C/s (KARBASIAN & TEKKAYA, 2010). Após a conformação, a temperatura inicial da transformação martensítica ( $M_s$ ) deve ser ultrapassada devido ao contato da chapa com as ferramentas de estampagem. A temperatura  $M_s$  varia entre 370 a 420 °C (LECHLER, 2009). Posteriormente, o material deve atingir a temperatura final da transformação martensítica ( $M_f$ ). A temperatura  $M_f$  varia está na faixa entre 200 °C e 280 °C (CHEN et al., 2014).

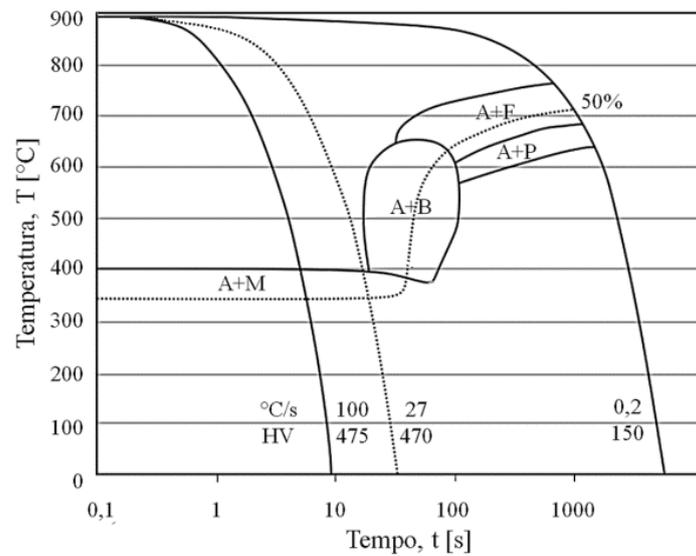


Figura 2.8 Diagrama de resfriamento contínuo do aço ao boro 22MnB5.

Fonte: KARBASIAN & TEKKAYA, 2010.

A importância da taxa crítica de resfriamento e a obtenção de uma microestrutura martensítica são demonstradas pelo diagrama de engenharia da Figura 2.9, que ilustra o comportamento mecânico do aço 22MnB5 com microestruturas ferrítico-perlíticas, bainíticas e martensíticas (TAYLOR et al., 2005).

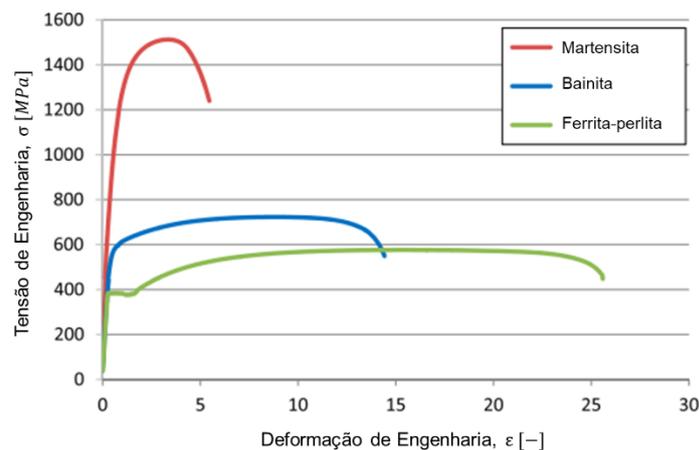


Figura 2.9 Diagrama de engenharia do aço 22MnB5 com microestrutura ferrítico-perlítica, bainítica e martensítica.

Fonte: RHEINGANS & MITTEMEIJER, 2015.

Uma das razões para o 22MnB5 ser comumente conformado em altas temperaturas é o ganho de deformabilidade associado ao trabalho a quente. Na conformação a quente, os fenômenos de recuperação e recristalização ocorrem efetivamente no material. A recristalização dinâmica elimina o encruamento e o nível de deformação que pode ser desenvolvido antes da fratura aumenta. Acima da temperatura  $A_{c3}$ , a microestrutura consiste exclusivamente em austenita de estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC). O deslizamento dos planos é facilitado em comparação com a estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC) da ferrita. Todos esses fatores se combinam para fornecer resistência ao escoamento significativamente menor, maior ductilidade, maior isotropia plástica e, portanto, maior conformabilidade durante a conformação a quente (TAYLOR & CLOUGH, 2018).

LI et al., (2013), investigou a estampabilidade do aço 22MnB5 em função da temperatura e da velocidade de deformação. Os autores construíram a Curva Limite de Conformação do material para diferentes parâmetros de estampagem a quente. As curvas obtidas em diferentes temperaturas são mostradas na Figura 2.10.

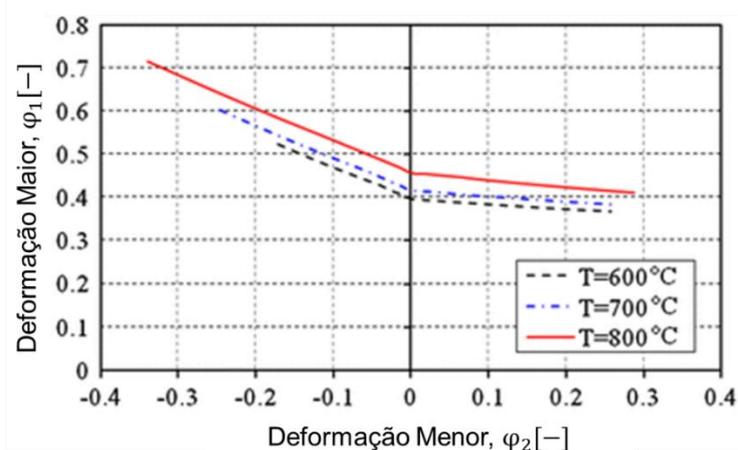


Figura 2.10 Curva Limite de Conformação para o aço 22MnB5 em diferentes temperaturas.

Fonte: LI et al., 2013.

Como já mencionado, a transferência de calor durante a estampagem a quente é um fator crítico. Segundo XIAO e ZAN (2021) o coeficiente de transferência de calor

interfacial no processo de estampagem a quente da chapa 22MnB5 varia de 0 a 920  $W / (m^2 \cdot K)$  (Figura 2.11).

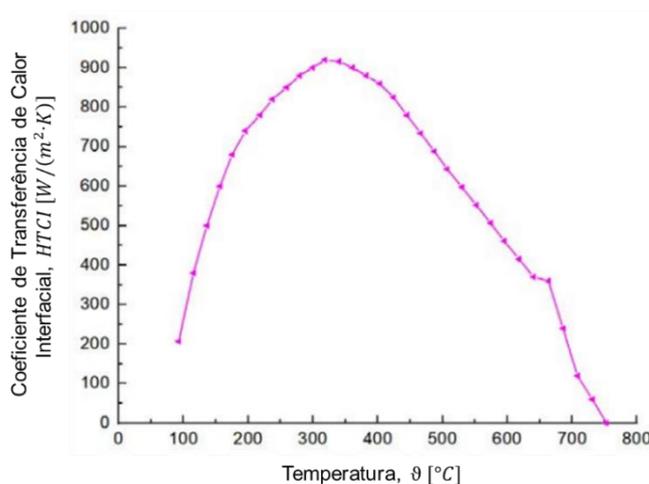


Figura 2.11 Coeficiente de transferência de calor interfacial em função da temperatura no processo de estampagem a quente do aço 22MnB5.

Fonte: XIAO e ZAN, 2021.

## 2.4 Simulação Numérica

A produção de peças estampadas a quente requer esforço considerável no desenvolvimento do projeto do processo. O dimensionamento do blank, o projeto da sequência de etapas de conformação e o cálculo das forças máximas representam grandes desafios. A produção econômica é impensável hoje sem o projeto de processo auxiliado por computador (KLEIN, 2012). A utilização do método dos elementos finitos (Finite Element Method - FEM) estabeleceu-se, portanto, como uma ferramenta adequada para a otimização do processo (BATHE, 202).

A simulação FEM dos processos de conformação não só permite prever o fluxo de material, mas uma análise realista da ferramenta durante a fase de concepção do ferramental. Devido às solicitações térmicas e mecânicas particularmente altas para processos de estampagem a quente, o uso do FEM é particularmente importante. No contexto de tempos de desenvolvimento de produtos cada vez mais curtos, o projeto de processos de conformação (Figura 2.12) assistidos por FEM pode dar uma importante contribuição para o desenvolvimento e otimização de processos eficientes e econômicos. A modelagem numérica da estampagem a quente permite (NEUGEBAUER et al., 2018):

- Verificação do projeto da ferramenta e seus componentes;
- Análise da cinética operacional da matriz de estampagem que envolve a sequência de operações, a velocidade de avanço, o deslocamento da prensa, etc.;
- Previsão do risco de geração de zonas com rugas ou fissuras;
- Previsão da dureza e análise da microestrutura final;
- Análise do sistema de refrigeração da ferramenta
- Previsão da força requerida no processo.

O FEM é um método matemático no qual um problema descrito por um princípio variacional ou por um sistema de equações diferenciais, que não pode ser resolvido analiticamente, é convertido em um problema algébrico. Um modelo de cálculo numericamente solucionável é criado subdividindo o sistema geral em um grande número de pequenas subáreas (elementos finitos). Os elementos finitos são nós conectados entre si e formam uma estrutura geral. Uma descrição do comportamento geral da estrutura é dada por funções de ajuste para os elementos. Com esta abordagem, os parâmetros do sistema (deformações, campos de tensão, campos de temperatura, etc.) podem ser determinados em qualquer instante do processo.

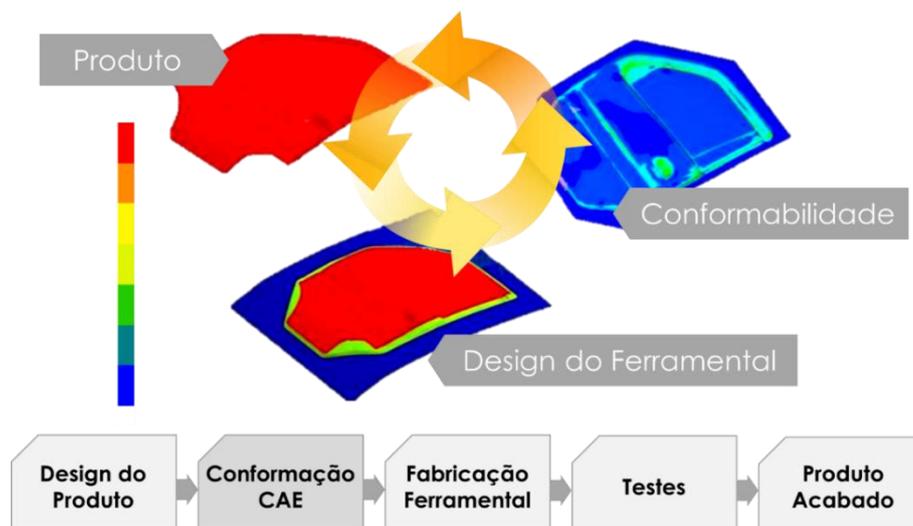


Figura 2.12 Projeto de processos de conformação de chapas assistidos por FEM.

Fonte: TANG, 2006.

Os sistemas FEM convencionalmente disponíveis têm três componentes, o pré-processador, o solucionador e o pós-processador. Vários programas comerciais de FEM

estão disponíveis para o cálculo numérico de processos de conformação de metais. Além dos aplicativos padrão para determinar e exibir as variáveis do processo, é possível integrar sub-rotinas na maioria dos sistemas de programa FEM. Isso oferece ao usuário uma extensão específica do problema do programa de cálculo.

A primeira etapa da simulação numérica é o pré-processamento. Esta etapa consiste em introduzir as informações mínimas (entrada) para gerar todos os parâmetros de problemas necessários (saída) para a análise. O pré-processamento básico (Figura 2.13) envolve as etapas a seguir para executar uma simulação bem-sucedida usando um software FEM comercial:

- Seleção da geometria/seção apropriada para simulação;
- Atribuição das propriedades do material da peça;
- Definir as condições de contorno;
- Criação da malha.

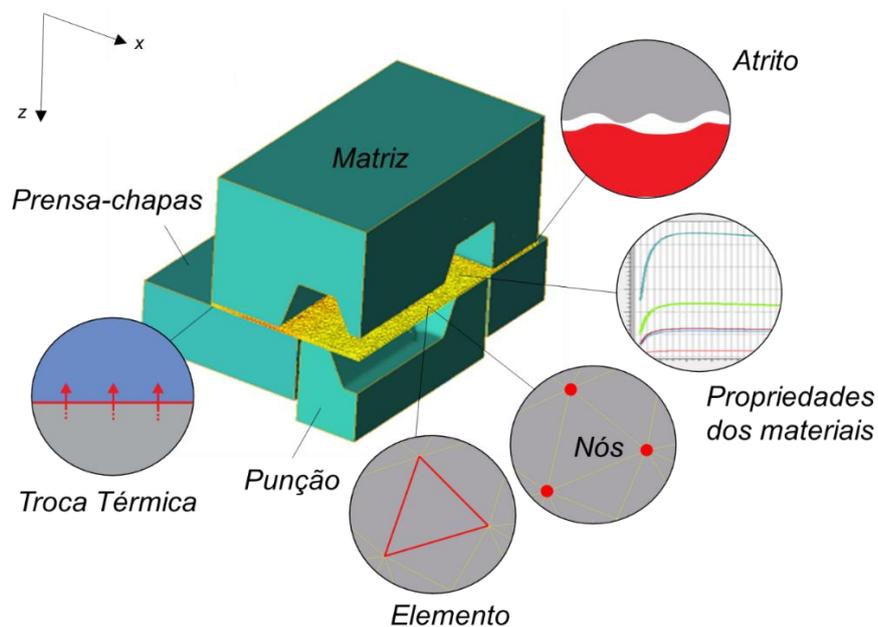


Figura 2.13 Pré-processamento de um modelo de elementos finitos.

Fonte: O autor.

Um aumento na precisão do cálculo da solução exata é possível através de uma discretização mais fina do sistema, ou seja, através de um maior número de elementos. No entanto, à medida que o número de elementos aumenta, a quantidade de computação

necessária para resolver o problema aumenta exponencialmente. Neste contexto, deve sempre ser feito um balanço entre o esforço de cálculo e a precisão dos resultados. Este balanço é ainda mais importante na análise de processo de conformação de chapas metálicas. A pequena espessura e a altíssima relação de área/volume das chapas devem ser consideradas ao criar a malha.

Uma forma de reduzir os tempos de simulação é através de simulações bidimensionais. Nestas, as informações completas sobre o processamento são obtidas através da análise de uma única seção transversal reduzindo consideravelmente o número de cálculos necessários. Contudo, para implementação de simulação 2D é necessário que a peça deformada seja simétrica, como por exemplo na estampagem de copos axissimétricos.

No desenvolvimento de peças com geometrias complexas é necessária uma simulação 3D completa. O cálculo consome muito tempo devido ao fato de que é necessário um número extremamente grande de elementos para preencher o corpo e cada elemento precisa de mais tempo de cálculo do que no método em 2D. Geralmente, em processos 3D, a malha é formada por tetraedros ou hexaedros.

Em peças complexas com algum grau de simetria é possível simular apenas uma porção do volume da peça para economizar tempo de simulação. Neste caso, é preciso identificar os planos de simetria durante o pré-processamento. Esta técnica de simplificação do modelo reduz a quantidade de elementos gerados e o esforço computacional, permitindo melhorar o refino de malha para aprimorar a qualidade de resultados. Para uma representação mais clara, os softwares permitem que os resultados sejam mostrados com a geometria expandida.

Os processos de conformação geralmente envolvem grandes deformações plásticas. Conseqüentemente, à medida que a simulação avança, a malha tende a ficar significativamente distorcida. Isso exige a geração de uma nova malha levando em consideração a geometria atualizada da peça de trabalho. Um problema comum a todas as simulações de conformação de chapas é a degradação da malha com a dificuldade em modelar as distorções, muitas vezes impossibilitando refazer a malha. O principal problema no remalhamento é construir um modelo geométrico com elementos de tamanho e forma corretos distribuídos de forma apropriada para o processo sendo

modelado. Evidentemente, todos os esquemas também dependem da transferência precisa de variáveis de estado entre o existente e o reformado.

Atualmente, existem abordagens de remalhamento que buscam evitar estes problemas. Um exemplo, é o remalhamento por adaptação que concentra os esforços computacionais em pontos críticos. Na malha autoadaptativa, conforme o processo avança, o tamanho dos elementos que estão sofrendo pouca deformação é bastante grande, reduzindo o tempo computacional. Já os pontos onde o material apresenta maior deformação, a malha é formada por elementos refinados. Dessa forma, resultados satisfatórios podem ser obtidos em tempos reduzidos.

No pré-processamento, as propriedades dos materiais podem ser definidas pelo usuário ou selecionados no banco de dados fornecido no software de simulação. Atualmente, as bibliotecas dos softwares são munidas das informações das principais ligas metálicas de engenharia. Contudo, é importante definir experimentalmente as propriedades dos materiais, visto que estas podem variar significativamente dependendo do fabricante. As informações básicas referentes aos materiais incluem: (i) densidade; (ii) calor específico; (iii) condutibilidade térmica; (iv) módulo de elasticidade; (v) coeficiente de Poisson e (vi) curvas de escoamento.

Nesta etapa também é preciso definir as características do equipamento de conformação, como velocidade, pressão, capacidade, etc., e as especificações referentes aos movimentos, como curso e direção. Por fim, são selecionadas as condições de atrito e de troca térmica.

Após a etapa de processamento, o usuário pode navegar pelo processo analisando, em cada instante, os resultados da simulação. O cálculo do fluxo de material, a distribuição de temperatura, o grau de deformação na peça e a força de conformação são chamados de aplicações padrão ao usar o FEM para o projeto de processos de conformação (DOEGE & BEHRENS, 2010). As ferramentas de avaliação para calcular essas variáveis de processo estão disponíveis em todos os programas FEM disponíveis comercialmente.

Diversos outros resultados podem ser extraídos das simulações, como a previsão da ocorrência de fratura ou transformação de fases. Nas últimas décadas, muitos critérios de fratura dúctil foram propostos e utilizados na previsão de fratura dúctil nos processos de

conformação mecânica por FEM. Estes critérios foram implementados nos programas de elementos finitos para impedir a nucleação de trincas em processos de conformação. Nos processos de conformação de chapas metálicas, o critério de fratura mais comumente utilizado é a Curva Limite de Conformação (CLC).

A modelagem em um nível microscópico de mecanismos como recristalização, precipitação e transformação microestrutural têm crescido para prever as propriedades mecânicas finais das peças conformadas. Para prever a microestrutura final das peças é preciso ter acesso a dados confiáveis sobre as propriedades termofísicas do material e de diagramas de transformação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem como objetivo geral utilizar a simulação numérica para analisar o comportamento termomecânico do aço 22MnB5 estampado a quente em uma geometria complexa. A Figura 3.1 apresenta as etapas realizadas para atingir este objetivo.

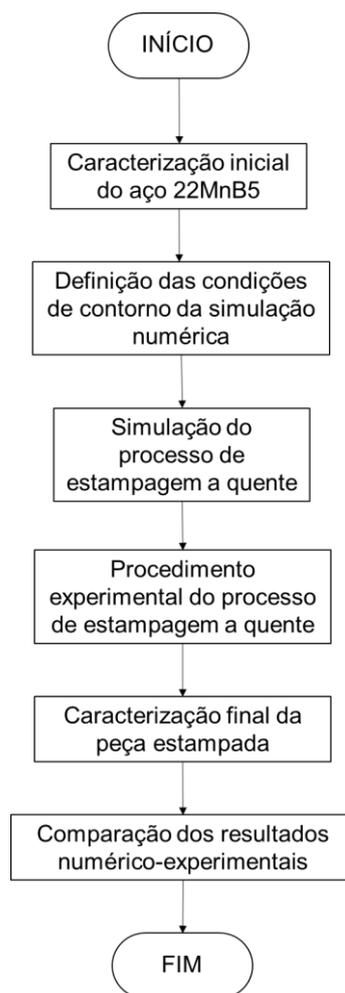


Figura 3.1 Fluxograma das etapas percorridas para a realização deste trabalho.

Fonte: O autor.

#### 3.1 Caracterização inicial do aço 22MnB5

A chapa de aço 22MnB5 utilizada neste trabalho possui 1,35mm de espessura e não possui revestimento. O material foi submetido à análise química utilizando um

espectrômetro Q2ION, marca BRUKER, disponível no Laboratório de Fundição (LAFUN - UFRGS).

A análise da microestrutura na condição inicial foi conduzida por meio de micrografias ópticas das seções transversais dos materiais, após a aplicação de técnicas convencionais de preparação metalográfica na superfície de avaliação. O reagente químico empregado para revelar a microestrutura foi o Nital 2%. A captura das imagens foi realizada utilizando um microscópio óptico invertido da marca OLYMPUS, modelo GX-51, disponível no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM – UFRGS).

Ensaio de microdureza foram conduzidos em um Microdurômetro, modelo Hardness Tester ISH-TDV 1000, fabricado pela INSIDE, disponível no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM – UFRGS). Três amostras foram submetidas aos testes, e a média de 10 valores medidos em cada amostra foi estabelecida como a dureza Vickers na condição inicial.

### 3.2 Geometria da peça em estudo

A peça analisada neste trabalho é um protótipo de coluna B de um automóvel. A coluna B (Figura 3.2) é um componente típico da estrutura de segurança de veículos que requer excelente resistência ao choque e alta resistência mecânica (PARK et al., 2010).



Figura 3.2 Coluna B de um veículo.

Fonte: KIRCHHOFF AUTOMOTIVE, 2023.

A modelagem em 3D da peça foi desenvolvida no software SolidWorks 2017. A Figura 3.3 mostra o detalhamento do protótipo investigado neste trabalho. A geometria da coluna B pode ser simplificada como uma peça estampada em forma de U. O protótipo possui esta característica em dimensões reduzidas.

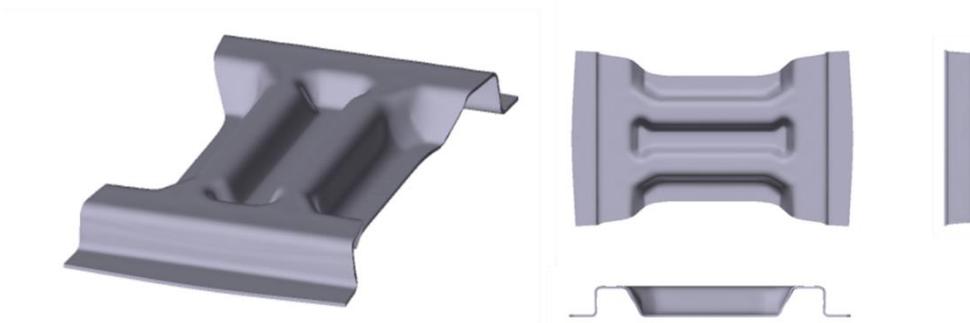


Figura 3.3 Protótipo de coluna B.

Fonte: O autor.

### 3.3 Processo investigado

No processo de estampagem a quente proposto é utilizado com blank retangular, com 175 mm de comprimento e 100 mm de largura. O desenho esquemático da configuração experimental para os processos de estampagem a quente proposto é mostrado na Figura 3.4. No processo, a chapa é aquecida em forno resistivo e é rapidamente transferida para uma prensa de duplo efeito marca Danpresse, disponível no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM – UFRGS), onde o conjunto de ferramentas está montado. A prensa, com velocidade nominal de 15mm/s e capacidade de 20t, é acionada até o fechamento das ferramentas. A temperatura e o tempo de aquecimento da chapa foram definidos em 1100°C e 7 minutos de acordo com COSTA et al., (2019).

Durante a estampagem, dados de força e deslocamento foram adquiridos. O deslocamento da prensa foi monitorado por um transdutor de deslocamento variável linear (*Linear Variable Differential Transformer - LVDT*) e a força por uma célula de carga montada no punção da prensa. Os sinais foram adquiridos pelo aparelho Spider 8 da marca HBM e tratados pelo software Catman Express.

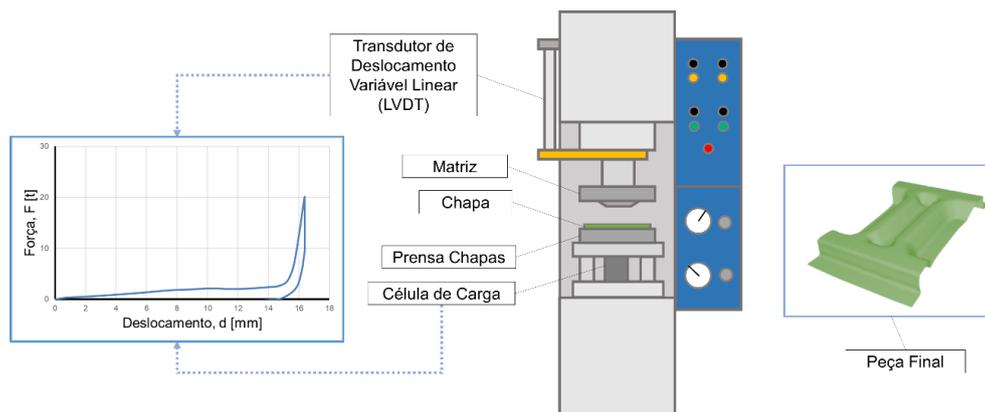


Figura 3.4 Desenho esquemático do processo de estampagem a quente analisado.

Fonte: O autor.

O ferramental utilizado consiste em três componentes: (i) matriz, (ii) punção e (iii) prensa-chapas. A deformação ocorre através da ação do punção que penetra a matriz. Não há aplicação de carga no prensa-chapas. A Figura 3.5 mostra o detalhamento do ferramental. As ferramentas foram produzidas a partir de placas de aço ferramenta para trabalho a quente AISI H13. Após a usinagem, as ferramentas foram temperadas e revenidas para ser capaz de suportar as tensões induzidas no processo de conformação.

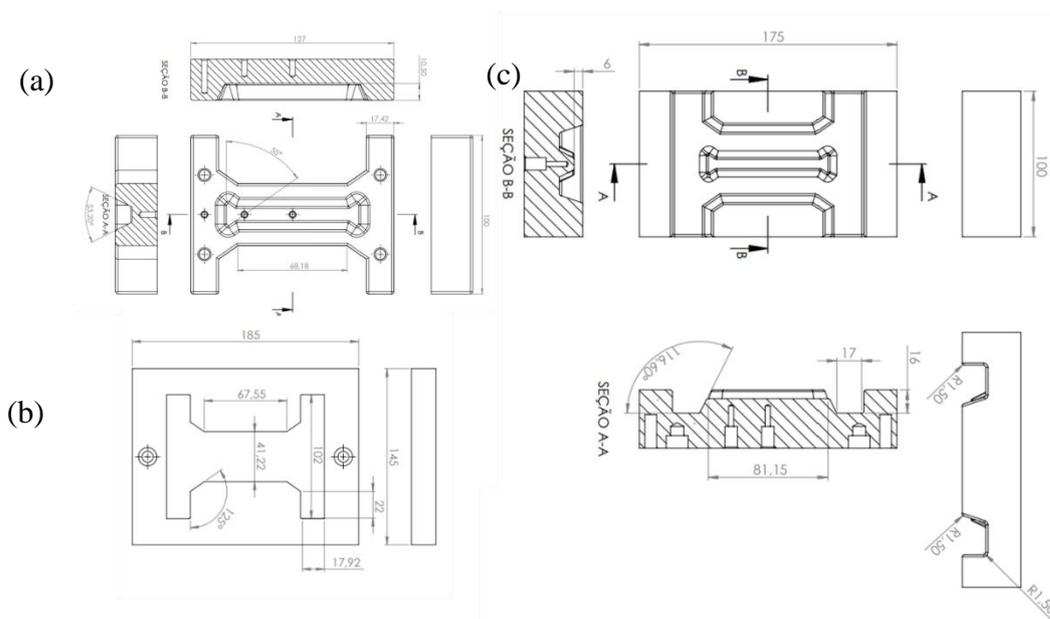


Figura 3.5 Detalhamento do ferramental de estampagem a quente (a) punção, (b) prensa-chapas e (c) matriz.

Fonte: O autor.

### 3.4 Simulação numérica do processo de estampagem a quente

O software QFORM foi utilizado na análise por elementos finitos do processo de estampagem a quente. Devido à complexidade da peça, optou-se por um modelo em 3D. A Figura 3.6 mostra o modelo tridimensional. Considerando a simetria dos componentes do processo, apenas uma porção do volume das geometrias (90° de ângulo) foi utilizada na modelagem (Figura 3.7). Esta técnica de simplificação do modelo reduz a quantidade de elementos gerados e o esforço computacional, permitindo melhorar o refino de malha para aprimorar a qualidade de resultados. Para uma representação mais clara, os resultados são mostrados com a geometria expandida em 360°.

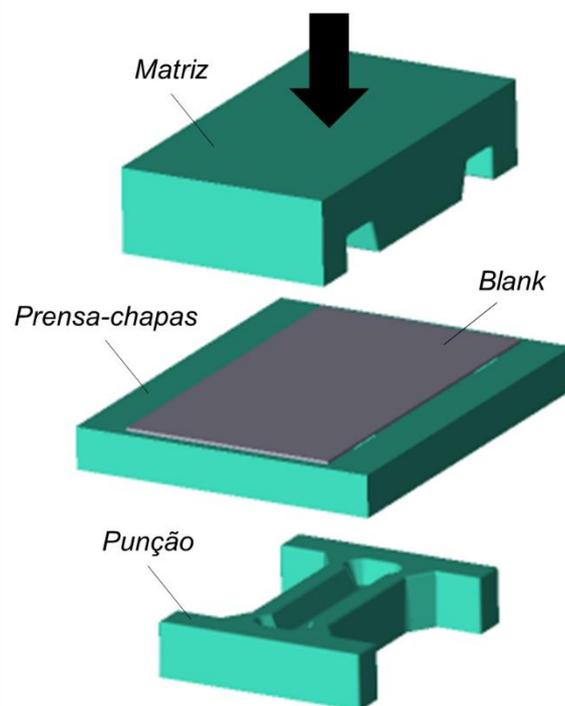


Figura 3.6 Modelo numérico do processo de estampagem a quente.

Fonte: O autor.

Para a análise FEM, os modelos CAD das geometrias das ferramentas e do blank foram importados do software SolidWorks 2017 para o QFORM. Os elementos da ferramenta foram posicionados de forma apropriada para reproduzir a ferramenta real. Na simulação, assim como acontece na máquina, a matriz superior é a que se movimenta no sentido vertical para realizar a conformação da peça.

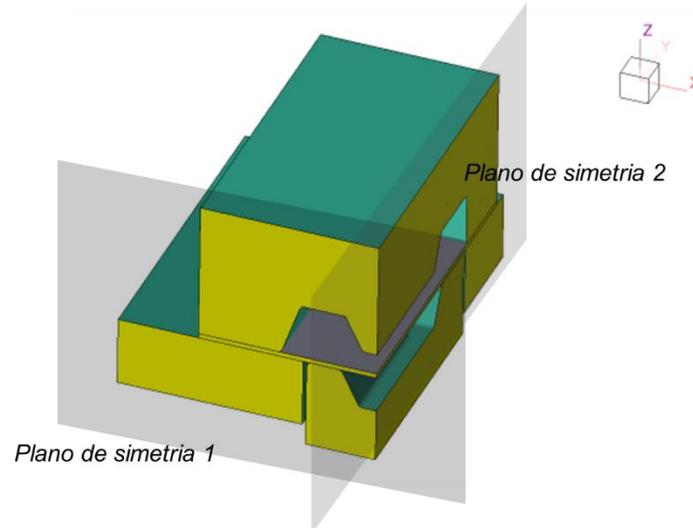


Figura 3.7 Planos de simetria do modelo numérico.

Fonte: O autor.

O blank foi discretizado em elementos hexaédricos de 1 mm de aresta e 0,27 mm de espessura. Esta configuração garante 5 elementos na espessura da chapa. O número de elementos gerados foi de 21875. Na Figura 3.8 é possível identificar a malha gerada.

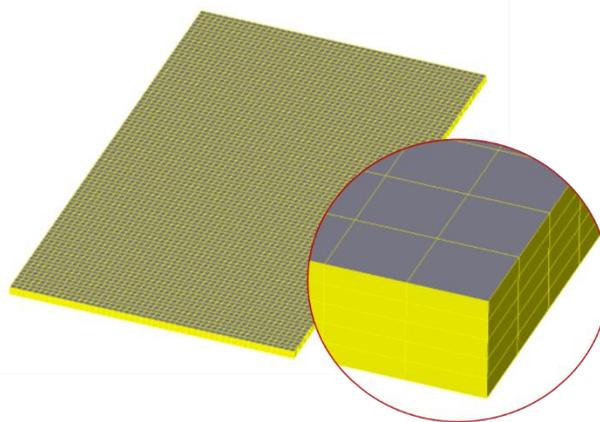


Figura 3.8 Malha gerada no blank.

Fonte: O autor.

O software QFORM possibilita que sejam definidos o tempo de transferência da chapa do forno para a prensa e o tempo de permanência da chapa na matriz até o início da conformação. Dessa forma, o modelo considera o histórico de resfriamento do material

antes da deformação plástica. Nesse modelo, o tempo de transferência foi definido como 4 segundo e o tempo de permanência da chapa na matriz foi determinado em 3 segundos, com base em experiências anteriores.

### 3.5 Definição das condições de contorno da simulação numérica

Para garantir que a simulação por elementos finitos representasse fielmente o processo real de estampagem a quente, uma extensa pesquisa foi realizada para selecionar as condições de contorno inseridas na configuração do modelo numérico. A Tabela 3.1 lista os parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica do processo de estampagem a quente

Tabela 3.1 Parâmetros térmicos, mecânicos e operacionais utilizados na simulação numérica do processo de estampagem de precisão a quente.

Temperatura inicial do blank	1100°C
Temperatura inicial das ferramentas	20°C
Coefficiente de atrito	0,3
Velocidade da ferramenta	15mm/s
Coefficiente de Transferência de Calor (blank-ambiente)	50 W/m <sup>2</sup> .K

Fonte: O autor.

Como o sucesso da estampagem a quente está diretamente ligado a troca térmica que ocorre durante a operação, a transferência de calor deve ser considerada no modelo numérico. O coeficiente de transferência de calor desenvolvido entre as ferramentas e a peça é determinado pela condutividade térmica dos materiais. O software QFORM possui em sua biblioteca diversas opções de aços ferramentas. Informações referentes as propriedades térmicas dos materiais (condutividade térmica, calor específico e expansão térmica) em função da temperatura estão disponíveis na biblioteca do software. O aço AISI H13 foi atribuído as matrizes de estampagem a quente para a simulação da coluna B. As ferramentas foram consideradas rígidas, uma vez que o interesse está focado no componente estampado e o que acontece com as matrizes é desprezado.

O software QFORM oferece diversos tipos de prensas que podem ser atribuídas a simulações de acordo com seu objetivo. Neste trabalho, foi selecionada uma prensa hidráulica por ser a mais utilizada na conformação de chapas (LIMA et al., 2023). Definiu-se como sistema hidráulico com velocidade constante de 15 mm/s.

O modelo de Coulomb foi usado para representar o atrito desenvolvido no processo. Foi adotado um coeficiente de atrito constante de 0,3, baseado no trabalho de CUI et al., (2015). O coeficiente de transferência de calor para o ambiente foi definido como  $50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , conforme HU et al., (2013).

O histórico térmico do material após a conformação também é um ponto crítico na simulação da estampagem a quente. Por esta razão, também foi realizada uma segunda simulação, que corresponde à extração de calor da chapa com matrizes fechadas. No software QFORM, esta etapa corresponde a uma simulação denominada “resfriamento”, para a qual foram importados os resultados da etapa de deformação anterior. Todos os outros parâmetros previamente determinados foram mantidos constantes.

Os parâmetros da Equação de Hensel-Spittel para a liga 22MnB5 (Tabela 2.4) definidos por TANG et al. (2017) foram inseridos no banco de dados do software QFORM (Figura 3.9). Após a inserção dos dados, o software permite que as curvas de escoamento sejam observadas em diferentes temperaturas e velocidades de deformação. Após o cadastramento, o material é salvo na biblioteca e pode ser utilizado sempre que necessário.

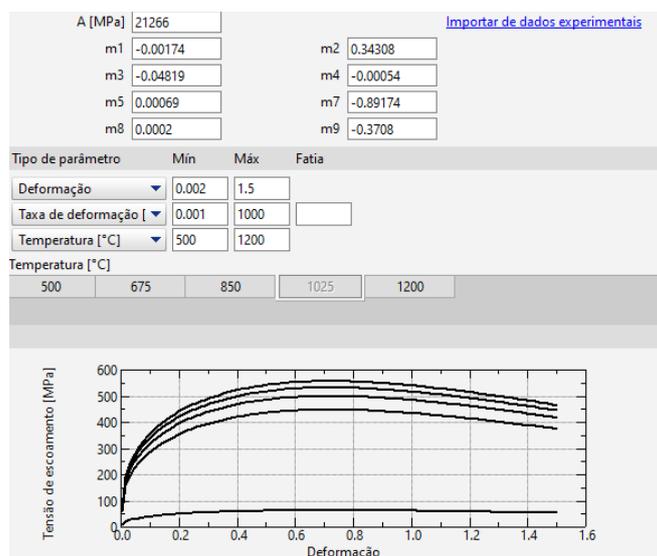


Figura 3.9 Introdução das curvas de escoamento no software QFORM.

Fonte: O autor.

Para analisar a transformação de fase durante a estampagem a quente é preciso introduzir no modelo informações referentes a cinética de transformação do material. O diagrama de resfriamento contínuo do aço 22MnB5 mostrado na Figura 2.8 foi inserido no software QFORM. Para avaliar a possibilidade de fratura durante a conformação, as curvas CLC mostradas na Figura 2.10 também foram inseridas no software.

Na simulação, a dureza Vickers da microestrutura final foi estimada a partir de expressões matemáticas. Para o cálculo da dureza da bainita, Equação 2, foi utilizada a expressão baseada nos dados fornecidos em BHADESHIA (1992). Para a dureza da martensita, Equação 3, foi utilizada uma expressão baseada nos dados fornecidos por HONEYCOMBE (1981):

$$HV_b = 259,4 - 254,7C + 4834,1C^2 \quad (\text{Equação 2})$$

$$HV_m = 181,1 + 2031,9C - 1940,1C^2 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde os subscritos b e m representam bainita e martensita, respectivamente, e C é o teor de carbono.

### 3.6 Caracterização da peça estampada

Após a estampagem a quente, foi realizada a caracterização da peça estampada. Foram selecionados 12 pontos para serem analisados, conforma a Figura 3.10.

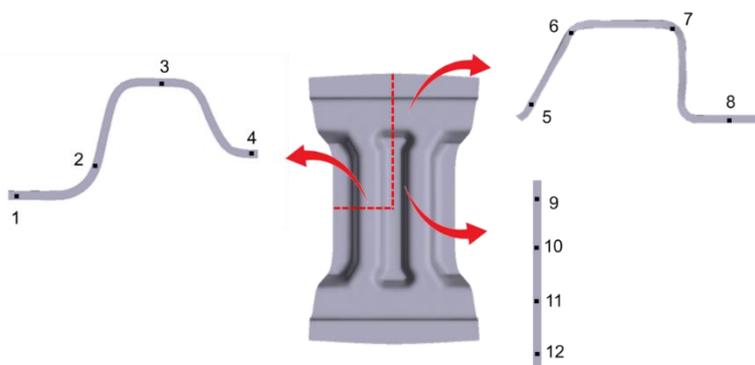


Figura 3.10 Regiões da peça analisados.

Fonte: O autor.

A metodologia apresentada na seção 3.1 foi empregada para a investigação microestrutural dos pontos de análise. A dureza da peça foi avaliada a partir de perfiz ao longo das seções destacadas na Figura 3.10.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização inicial

O resultado referente a composição química do aço 22MnB5 é listado na Tabela 4.1. Os percentuais em massa foram obtidos por espectrometria de emissão óptica por centelha. A composição do aço está dentro da margem especificada na literatura, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Resultado da análise química (% em massa).

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	V	B
0,23	1,24	0,021	0,002	0,21	0,19	-	0,004	0,002

Fonte: O autor.

A microestrutura do aço 22MnB5 na condição recebida é mostrada na Figura 4.1. Nesta condição, o material apresenta uma microestrutura composta por uma matriz ferrítica com distribuição homogênea de partículas de perlita. A dureza do material varia entre 167 HV e 209 HV, com valor médio de 186 HV. A microestrutura e a dureza são características dos aços baixo carbono e condizem com a literatura (COSTA, 2020).

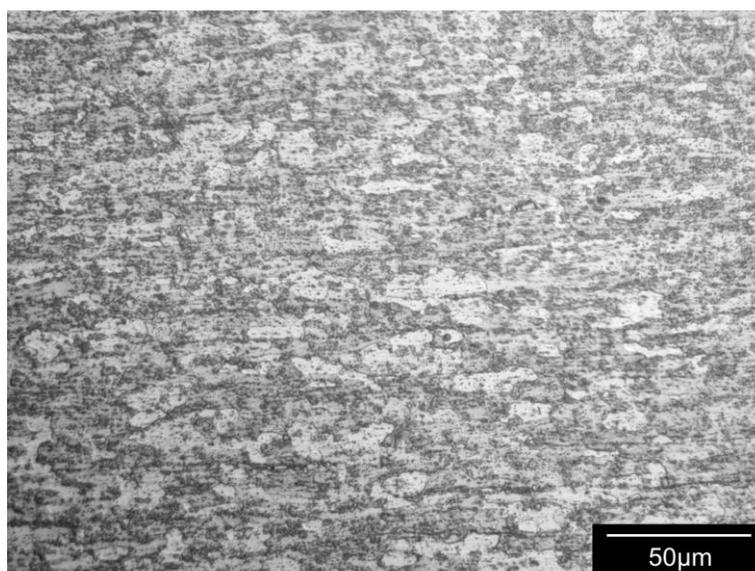


Figura 4.1 Micrografia óptica do aço 22MnB5 na condição inicial (500x).

Fonte: O autor.

## 4.2 Simulação numérica do processo de estampagem a quente

A distribuição de temperatura, o grau de deformação e tensão na peça e a força de conformação são chamados de aplicações padrão de simulações por elementos finitos em projetos de processos de conformação (DOEGE & BEHRENS, 2010). A seguir estes aspectos são discutidos a partir dos resultados da simulação numérica do processo de estampagem a quente.

Também serão analisados os resultados mais importantes de uma análise de elementos finitos para processos de estampagem a quente, isto é (WANG & MA, 2015):

- Visualização das etapas de conformação em função da distância entre a matriz e o punção;
- Previsão da fratura através da CLC;
- Distribuição da redução de espessura da chapa;
- Distribuição da dureza e microestrutura da peça.

### 4.2.1 Deformações

A distribuição de deformação equivalente do processo indica a intensidade da deformação das áreas individuais da peça estampada. A deformação equivalente ( $\varphi_{eq}$ ) corresponde a combinação das três deformações verdadeiras principais e é comumente utilizada na análise das deformações desenvolvidas nos processos de conformação mecânica.

A Figura 4.2 mostra a distribuição da deformação equivalente na peça estampada após a conformação. O valor máximo de deformação observado é de 0,9, localizado no rebaixo central da peça. A distribuição da deformação é heterogênea. Deformações inferiores a 0,4 são observadas em 95% do volume da peça. Deformações mais severas se concentram em apenas 5% da geometria. Um maior grau de deformação leva ao refinamento do grão e, portanto, a um aumento na resistência (BAUDELET et al., 1994). Isso deve ser levado em consideração ao definir áreas de componentes de alta resistência (WIENSTRÖER, 2004).

### Deformação Equivalente, $\varphi_{eq}$ [-]

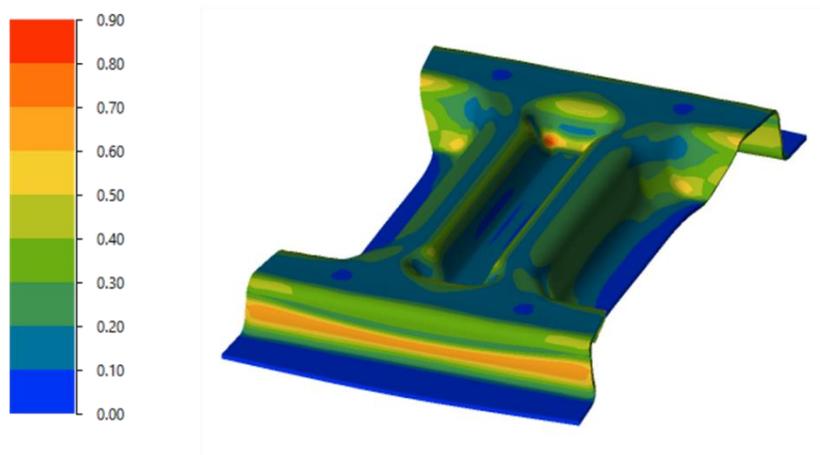


Figura 4.2 Distribuição da deformação equivalente na peça estampada.

Fonte: O autor.

A Figura 4.3 mostra o avanço da deformação equivalente nos pontos de análise durante a conformação. Os pontos com maior deformação foram, respectivamente, 6, 5 e 7. Estas regiões são submetidas a uma etapa de dobramento durante a estampagem, resultando em uma deformação mais intensa.

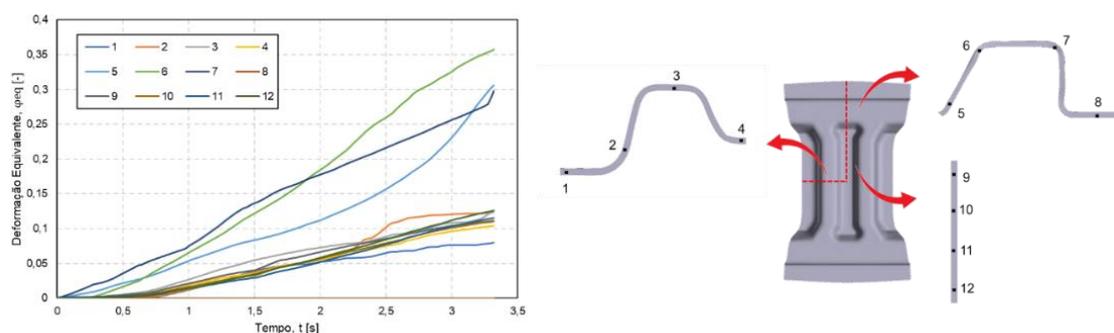


Figura 4.3 Avanço da deformação equivalente nos pontos de análise durante a conformação.

Fonte: O autor.

#### 4.2.2 Temperatura durante a conformação

O cálculo da distribuição de temperatura da peça é fundamental para o planejamento ideal do processo de estampagem a quente. Como resultado, a temperatura mínima necessária do blank pode ser determinada na fase de projeto em função do transporte e dos tempos ociosos, bem como da força de conformação máxima disponível (BACH & KERBER, 2014).

Uma das questões críticas durante a estampagem a quente é a temperatura inicial de deformação. Os blanks quentes são transferidos do forno para as matrizes e durante esta transferência, a temperatura do blank quente diminui. Como resultado, a deformação não é realizada à temperatura de austenitização, mas sim a temperaturas mais baixas. A Figura 4.4 mostra a temperatura da peça imediatamente antes do início da conformação.

Devido a perda térmica resultante da transferência do forno para a prensa e ao contato da chapa com a ferramenta inferior a temperatura da chapa antes da conformação varia entre 890 e 955 °C. A temperatura elevada garante que nenhuma transformação de fase ocorreu antes da etapa de deformação plástica. Segundo NADERI et al., (2008) uma maior temperatura de deformação da austenita reduz o efeito da deformação plástica no aço 22MnB5. Além disso, gera menor estabilização mecânica e, portanto, tende a resultar em maior fração volumétrica de martensita após a estampagem a quente.

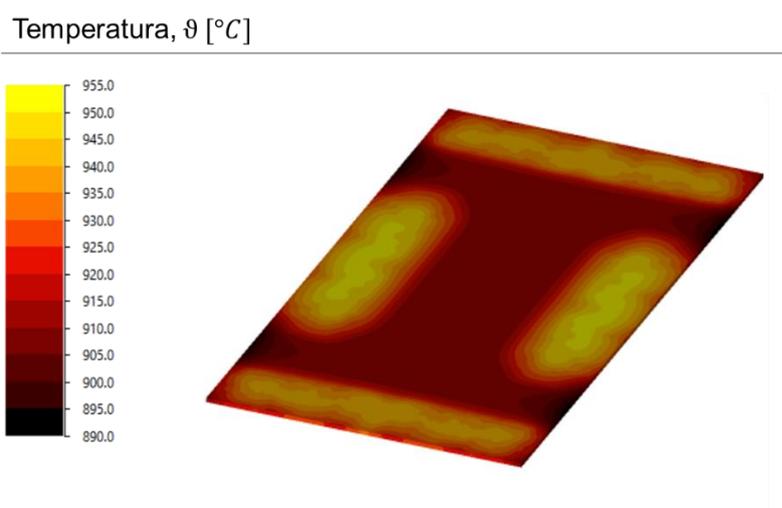


Figura 4.4 Distribuição de temperatura na peça imediatamente antes do início da conformação.

Fonte: O autor.

A distribuição de temperatura na peça imediatamente após a conformação (Figura 4.5) mostra uma temperatura máxima de 860°C na parte superior da geometria e um forte resfriamento nas extremidades até 580°C. A razão para a redução de temperatura é a transferência de calor da peça para a ferramenta durante a conformação. As extremidades experimentaram uma redução mais severa de temperatura devido ao tempo de contato com as ferramentas. Estas regiões mantêm contato com a matriz e o prensa-chapas durante todo o processo, favorecendo a troca de calor.

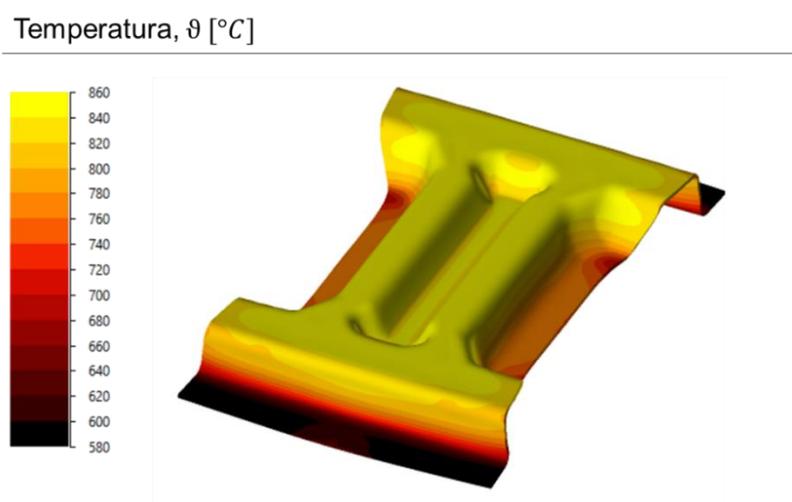


Figura 4.5 Distribuição de temperatura na peça imediatamente após a conformação.

Fonte: O autor.

As propriedades finais de uma peça estampada a quente dependem fortemente da taxa de resfriamento durante o processo. A Figura 4.6 mostra a taxa de resfriamento média na peça durante a conformação. O resfriamento é relativamente uniforme, com uma taxa de resfriamento média de 23°C/s. O resfriamento é mais acentuado apenas nas extremidades. Nestas regiões a taxa de resfriamento supera 70°C/s.

Apesar da pequena espessura da chapa e da grande relação entre a superfície e o volume da peça, a queda de temperatura induzida durante a conformação não é intensa o suficiente para gerar a têmpera da peça. Isso pode ser explicado pelo contato entre as ferramentas e a peça. A Figura 4.7 apresenta o resultado numérico do critério "distância até a ferramenta". Este critério é utilizado para avaliar o contato entre as ferramentas e a

peça conformada, no qual a distância entre a superfície da peça e o contorno da matriz é visualizada. É possível observar que o contato (região em azul) é extremamente localizado e a região sem contato (em vermelho) predomina ao final do fechamento das ferramentas.

Taxa de resfriamento média,  $\Delta\theta$  [ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ]

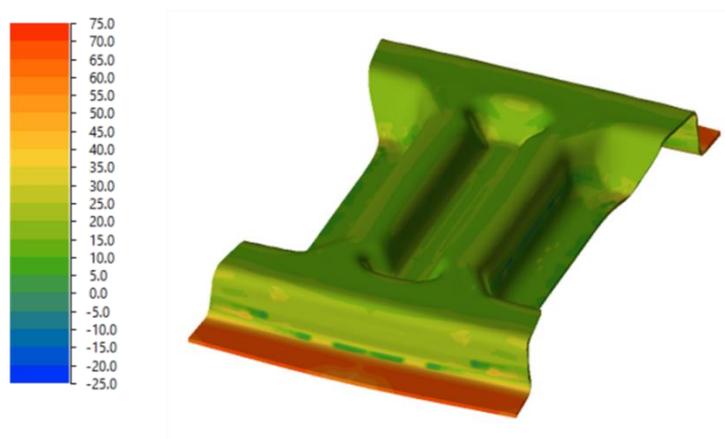


Figura 4.6 Taxa de resfriamento média da peça durante a conformação.

Fonte: O autor.

Contato,  $c$  [-]

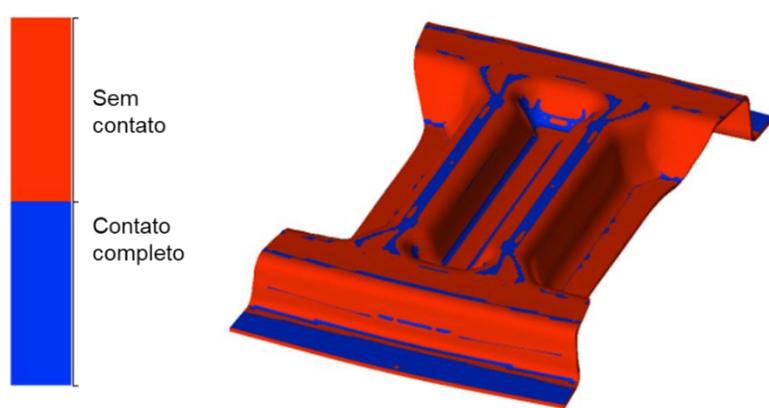


Figura 4.7 Contato entre as ferramentas e a peça durante a conformação.

Fonte: O autor.

As nuances do contato entre a peça estampada e as ferramentas podem ser melhores compreendidas com a presença da matriz e da punção, como ilustra a Figura 4.8. O contato é limitado e realizado em pontos, o que limita a troca térmica. Isso gera uma distribuição local de temperatura não uniforme o que pode ser crítica do ponto de vista da conformabilidade. MAENO et al. (2014) revelaram que a conformabilidade na estampagem a quente se deve principalmente à distribuição de temperatura gerada pelo contato da chapa com a matriz durante a etapa de conformação.

Como já mencionado, a extremidade da peça mantém contato com as ferramentas e perde calor mais rapidamente. A tensão de escoamento do aço ao longo depende da temperatura (MERKLEIN & LECHLER, 2006). Logo, as extremidades são endurecidas pela diminuição da temperatura devido ao contato com a matriz. Em contraste, a parede não entra em contato com a matriz até que a prensa atinja o fundo. Assim, permanece em alta temperatura e é mais macia que as demais áreas. Isto causa deformação local da parede, resultando em fissuras em baixa profundidade de formação (MAENO et al., 2014).

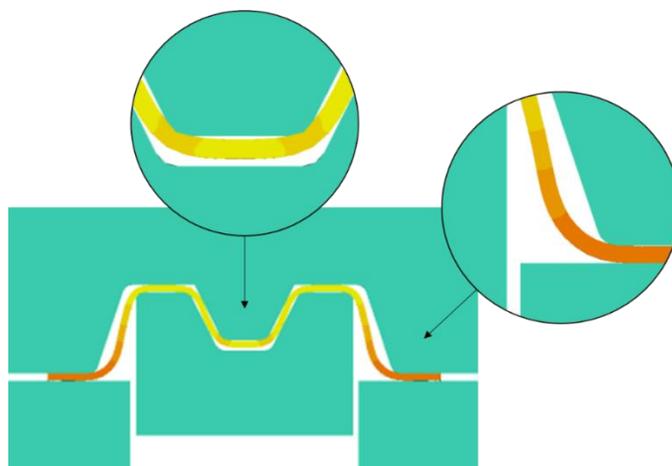


Figura 4.8 Fechamento das ferramentas de estampagem a quente.

Fonte: O autor.

#### 4.2.4 Previsão de fratura

A curva limite de conformação (CLC) é uma ferramenta fundamental na análise do processo de conformação de chapas metálicas, pois define critérios de falha. As CLCs

são representações gráficas dos limites da conformação, representados pelas deformações maiores e menores atuantes no material. Atualmente, os gráficos são inseridos nos softwares de simulação permitindo a previsão de defeitos (CUI et al., 2015).

A Figura 4.9 mostra o resultado numérico referente a previsão de fratura através da CLC do aço 22MnB5 na estampagem a quente. O critério de falha indica que o estado de deformação gerado no rebaixo central do protótipo de coluna B gera a tendência a fratura da chapa neste local. Esse comportamento está de acordo com outros estudos, como o de OTA et al., (2019), no qual o formato da peça foi semelhante ao estudado neste trabalho.

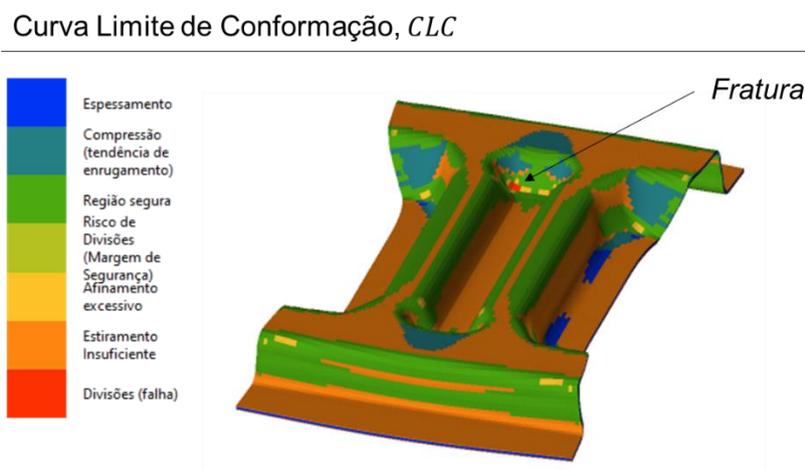


Figura 4.9 Resultado numérico referente a previsão de fratura através da CLC do aço 22MnB5 na estampagem a quente.

Fonte: O autor.

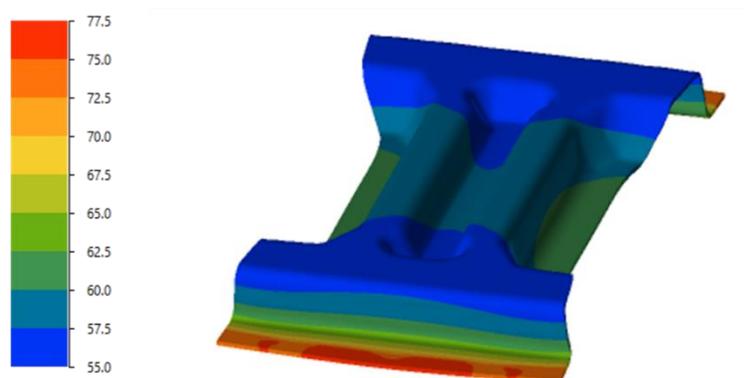
### 4.2.3 Evolução Microestrutural

Após a conformação mecânica, a peça estampada foi imediatamente removida das ferramentas e submetida a um resfriamento ao ar até atingir a temperatura ambiente. A Figura 4.10 mostra a previsão da microestrutura do aço 22MnB5 após o final do processamento termomecânico.

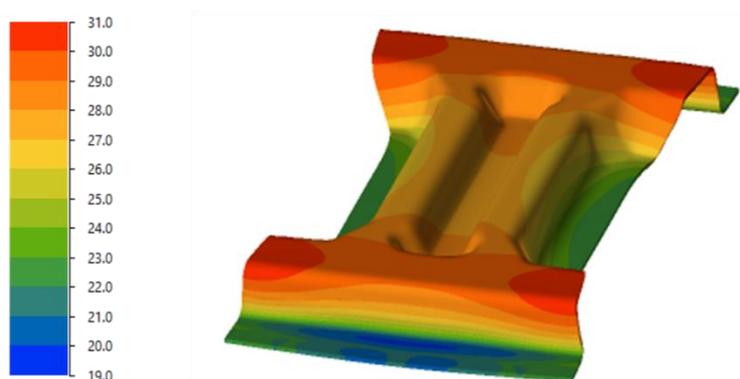
A simulação numérica indica que a bainita é o microconstituente predominante após a estampagem a quente. A peça ainda apresenta temperatura relativamente alta e é resfriada a uma taxa de resfriamento branda após a conformação. Isso resulta na formação

de ferrita, além da bainita, porque as regiões de formação desses microconstituintes no diagrama CCT são atravessadas. Durante o resfriamento, o restante da austenita é transformada em martensita.

Fração volumétrica de bainita,  $V_b$  [%]



Fração volumétrica de martensita,  $V_m$  [%]



Fração volumétrica de ferrita,  $V_f$  [%]

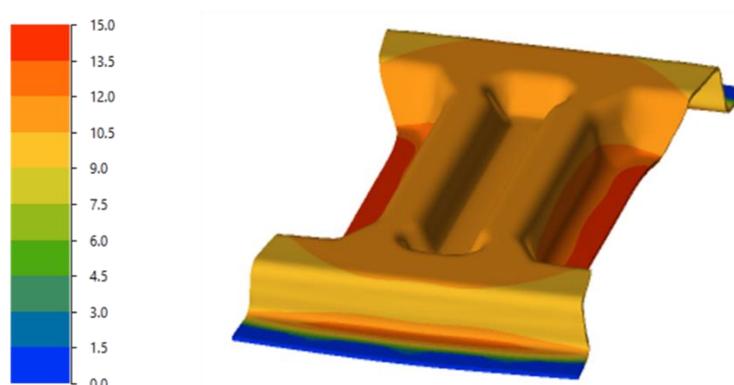


Figura 4.10 Previsão da microestrutura do aço 22MnB5 após o final do processamento termomecânico.

Fonte: O autor.

A partir da simulação da evolução microestrutural, o modelo numérico permite que a dureza final da peça seja estimada. A previsão da dureza Vickers da peça após a estampagem a quente é mostrada na Figura 4.11.

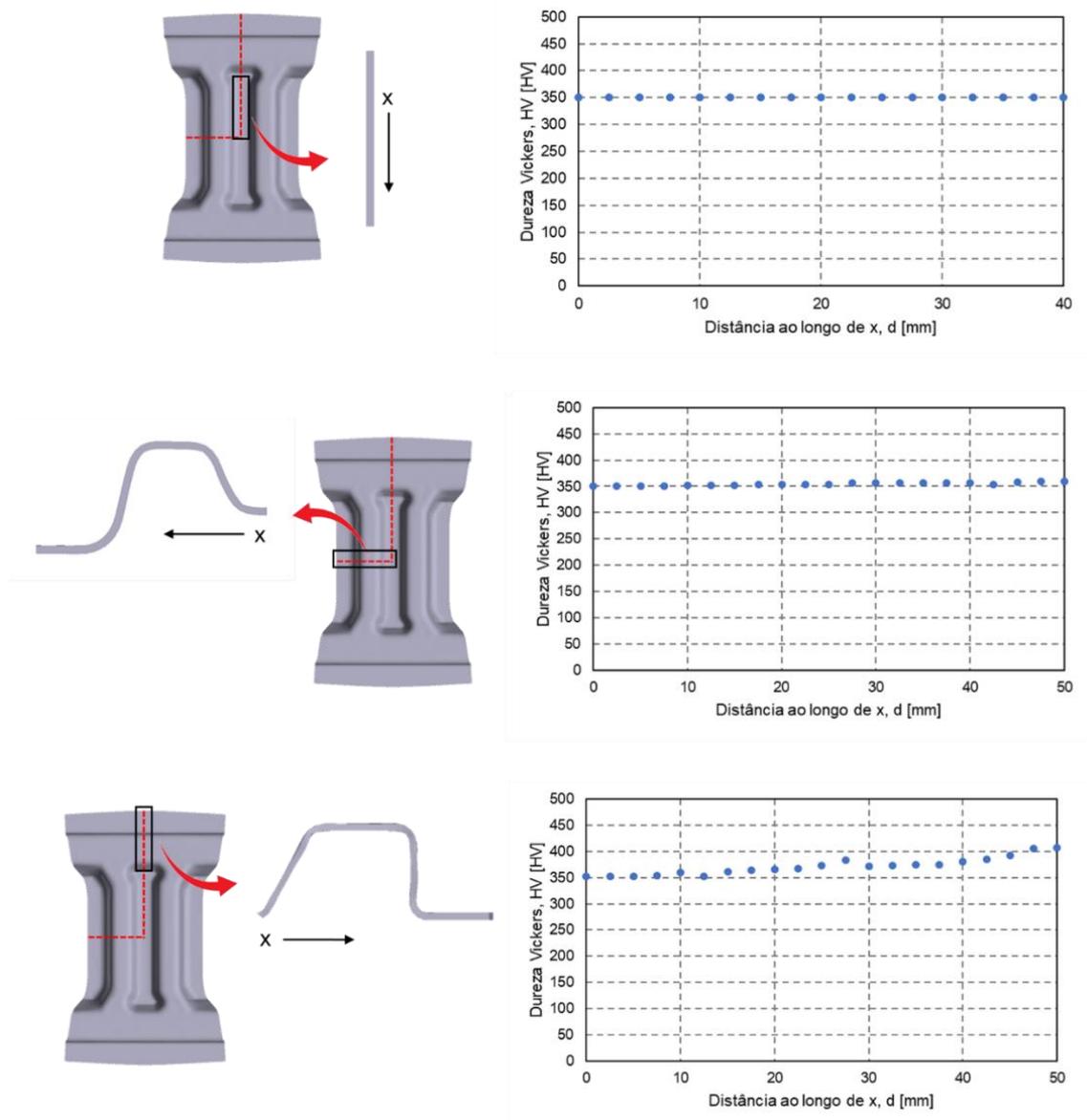


Figura 4.11 Previsão da dureza Vickers da peça após a estampagem.

Fonte: O autor.

### 4.3 Estampagem a quente

A Figura 4.12 mostra o protótipo de coluna B de aço 22MnB5 estampado a quente. É possível observar que o aquecimento a altas temperaturas favoreceu a formação de óxidos na superfície da peça. A chapa utilizada não possui revestimentos protetivos contra a exposição a atmosfera oxidante. Os óxidos superficiais normalmente exibem uma espessura de 2 a 5  $\mu\text{m}$  e aumentam o desgaste da ferramenta devido ao atrito excessivo. Além disso, os óxidos reduzem a eficiência de têmpera da matriz. O óxido apresenta menor coeficiente de transferência de calor em relação ao substrato de aço e aumenta a rugosidade, gerando contato heterogêneo entre a ferramenta e peça (TAYLOR & CLOUGH, 2018).

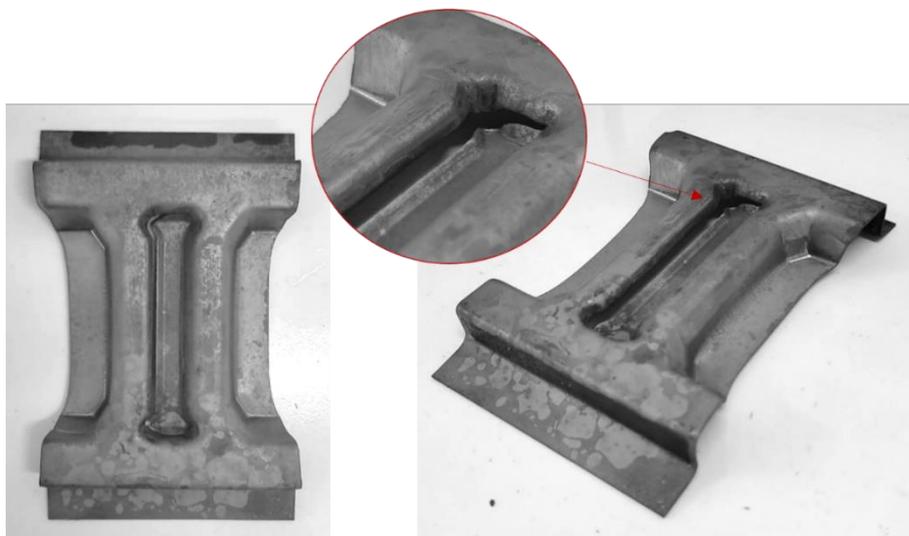


Figura 4.12 Protótipo de coluna B de 22MnB5 após a estampagem a quente.

Fonte: O autor.

O aquecimento em forno também favorece a descarbonetação da superfície. Consequentemente, a temperabilidade da superfície é deteriorada. Normalmente, a descarbonetação resulta na formação de ferrita na superfície. Este aspecto não foi investigado neste trabalho.

Assim como previsto pela análise numérica, foram observadas trincas na peça estampada a quente. A fratura ocorreu no rebaixo central da peça, isto é, no local em que o modelo de elementos finitos indicou que a fratura ocorreria. Esse resultado demonstra

o potencial da simulação numérica para prever defeitos em processos de estampagem a quente.

#### 4.4 Caracterização da peça estampada a quente

As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 ilustram as micrografias ópticas do material após a estampagem a quente. A dureza correspondente é mostrada na Figura 4.16. Devido à variação das condições de deformação e extração de calor ao longo da intrincada geometria da peça, uma microestrutura complexa é observada. A microestrutura é composta por bainita, ferrita e martensita.

É observada a formação de bainita com uma estrutura caracterizada por um constituinte relativamente grosseiro. Este aspecto da microestrutura está relacionado a temperatura de aquecimento do material. O tamanho da estrutura bainítica aumenta com a temperatura de austenitização (YANG et al., 2015). Dessa forma, o aquecimento a 1100°C, resultou em pacotes de bainita mais grosseiros.

O tamanho dos pacotes de bainita tem influência sobre a resistência do material. Os limites entre as ripas ou placas de ferrita dentro de um pacote de bainita restringem o movimento de discordâncias. Conseqüentemente, pacotes menores resultam em um número maior de barreiras ao deslocamento de discordâncias e maior endurecimento do material (KRAPF et al., 2022).

A estrutura bainítica é caracterizada por agregados de martensita/austenita retida dispersas entre as ripas ferríticas. Esse microconstituente também é denominado como ferrita acicular. BARDELICK et al. (2014), BARCELLONA & PALMERI (2009) e MIN et al., (2012) também observaram bainita granular na microestrutura do aço ao boro 22MnB5. Com base na micrografia óptica parece que em alguns pontos a ferrita (branca) é o constituinte dominante. Porém, o volume real de ferrita não inclui a fração dentro da estrutura de bainita granular.

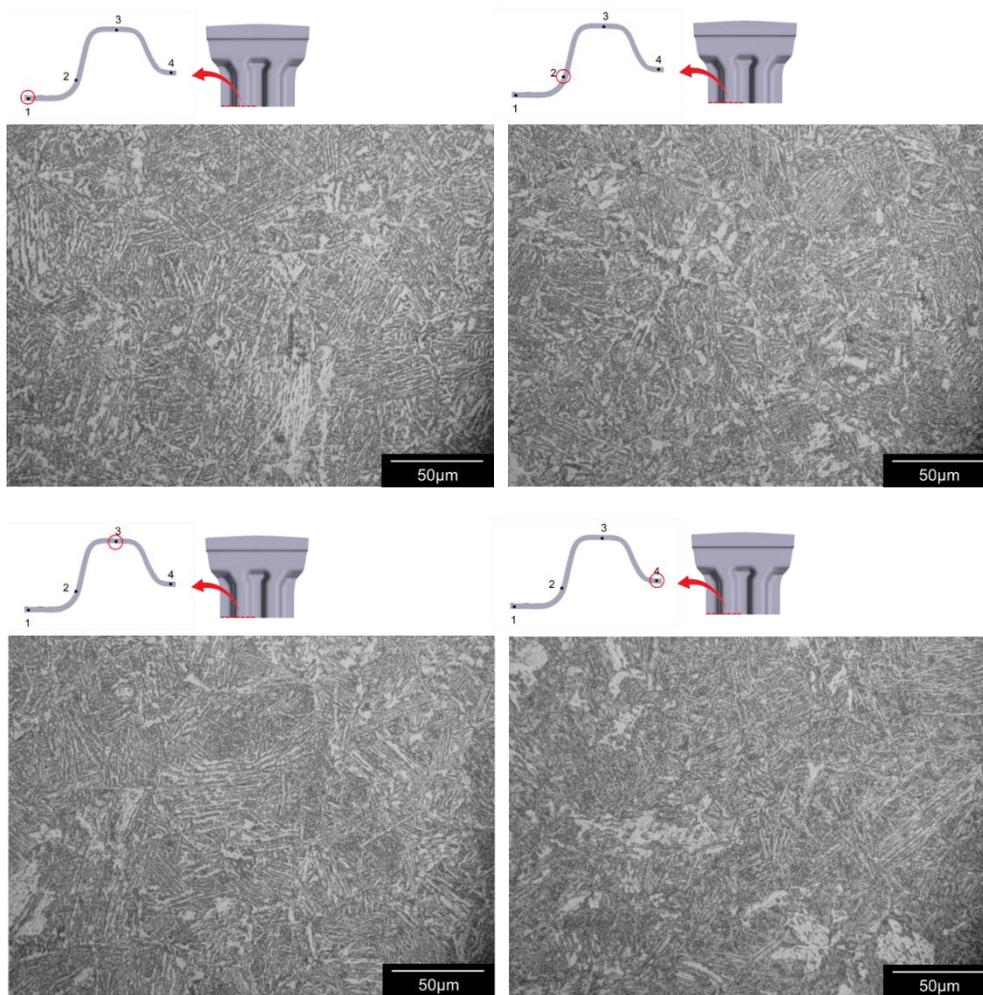


Figura 4.13 Micrografia óptica do aço 22MnB5 estampado a quente. Pontos 1, 2, 3 e 4 (500x).

Fonte: O autor.

A ferrita também está presente nas micrografias e é caracterizada por uma estrutura plana e uniforme que também foi relatada por MERKLEIN & SVEC (2010), FAN et al. (2009) para a deformação isotérmica do 22MnB5 durante a têmpera. Algumas investigações mostraram que, no aço boro 22MnB5 estampado a quente, a formação de ferrita e bainita e o retardo da transformação martensítica são favorecidos pela deformação plástica (NADERI et al., 2008).

A microestrutura da peça após a estampagem a quente é similar a observada por GEORGE et al., (2012). Os pesquisadores desenvolveram uma coluna B de 22MnB5 estampada a quente em escala de laboratório usando uma matriz segmentada com zonas locais de aquecimento e resfriamento. A microestrutura semelhante das Figuras 4.13, 4.14

e 4.15 foram observadas na região da peça que teve contato com a zona de aquecimento da matriz.

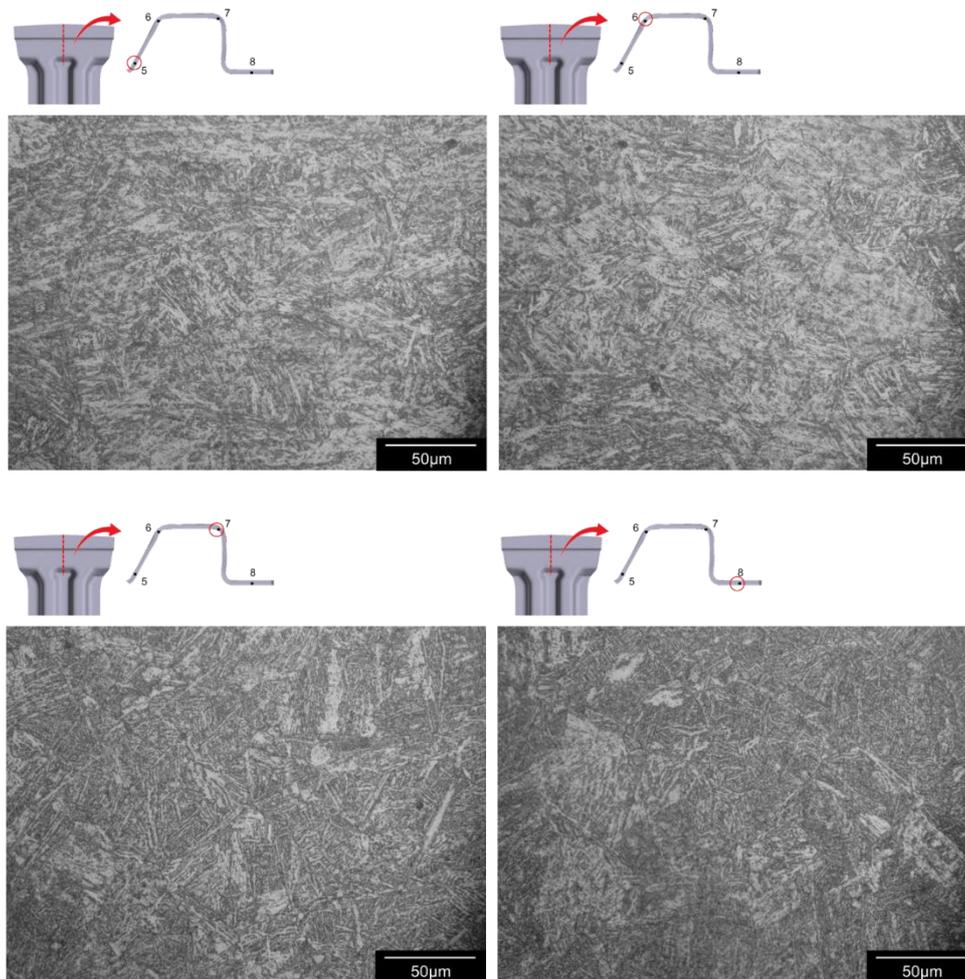


Figura 4.14 Micrografia óptica do aço 22MnB5 estampado a quente. Pontos 5, 6, 7 e 8 (500x).

Fonte: O autor.

Não é possível quantificar a fração volumétrica dos microconstituintes por microscopia óptica. Além disso, o aspecto da microestrutura complexa gerada dificulta que diferenças significativas sejam identificadas nas regiões analisadas. Para esse fim, é fundamental analisar os perfis de dureza da peça.

A maior dureza das extremidades planas da peça (não deformadas) indicam uma maior fração volumétrica de martensita. Nestas regiões, os valores de dureza estão próximos a 450HV. Como demonstrado pela simulação numérica, nestas regiões foi

estabelecido alto contato térmico (condutivo) entre a peça e a matriz. Em contraste, uma fração volumétrica significativa de bainita foi encontrada em regiões deformadas, onde ocorreu contato térmico limitado. Nestas regiões a dureza varia entre aproximadamente 300 e 350 HV.

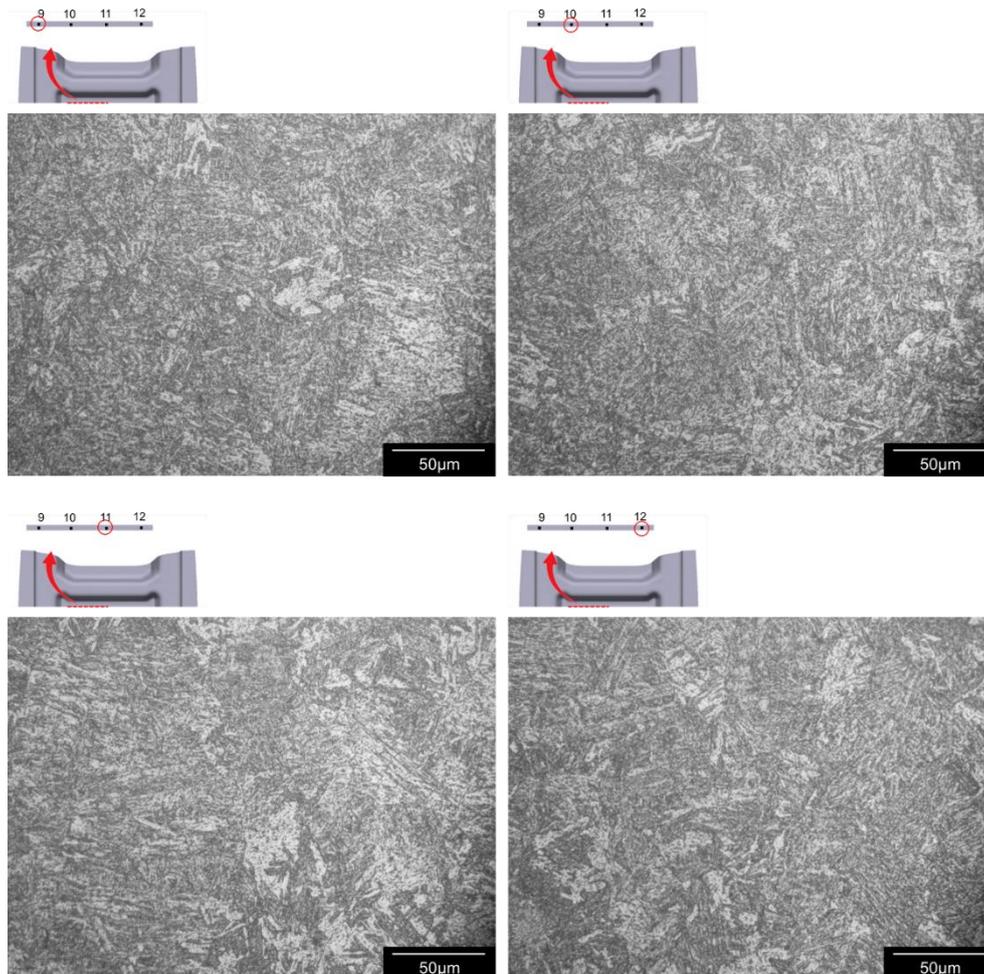


Figura 4.15 Micrografia óptica do aço 22MnB5 estampado a quente. Pontos 9, 10, 11 e 12. (500x).

Fonte: O autor.

Os resultados indicam que a simulação numérica é capaz de prever com precisão satisfatória a evolução microestrutural e a dureza final de pelas estampadas a quente. Destaca-se que a precisão dos resultados depende diretamente da capacidade das condições de contorno inseridas no modelo de reproduzirem as condições reais do processamento termomecânico. A convergência entre os resultados experimentais e

numéricos indicam que as informações inseridas no modelo numérico foram selecionadas corretamente e retrataram fielmente o processo real.

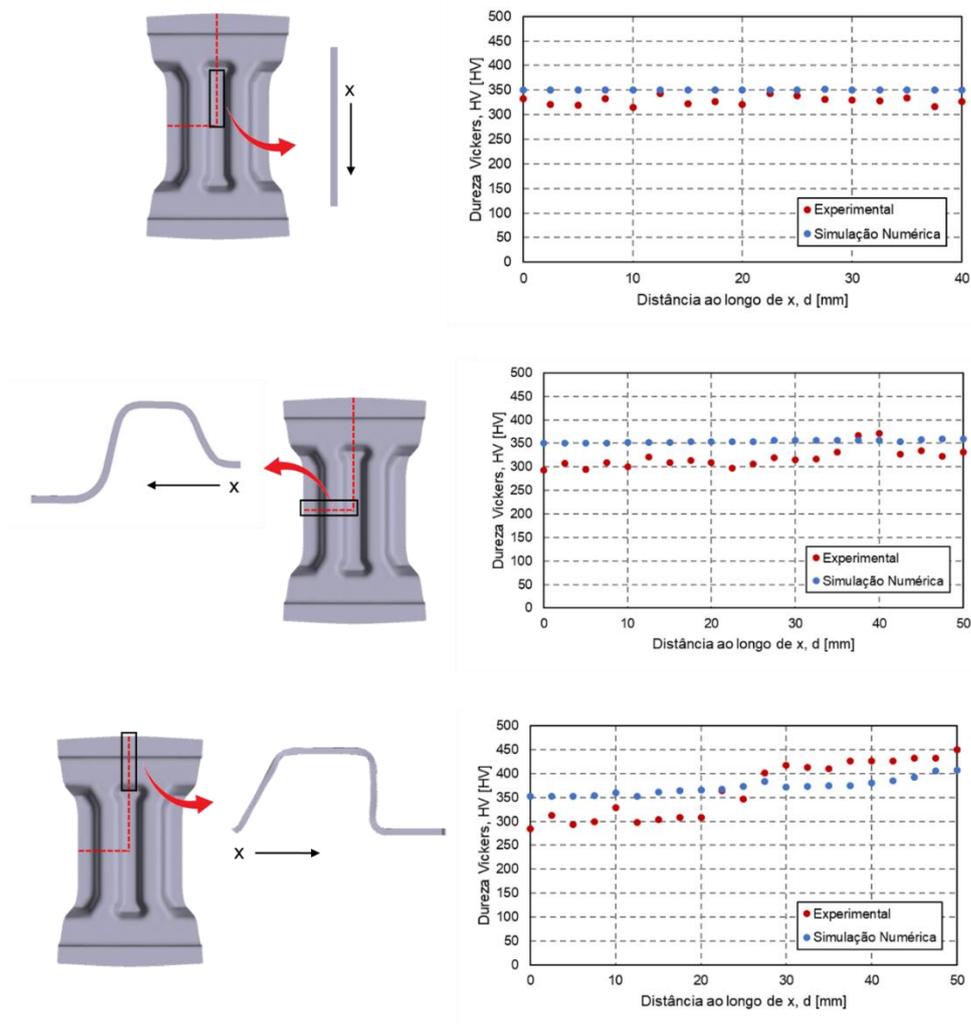


Figura 4.16 Dureza Vickers da peça estampada.

Fonte: O autor.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizado um estudo abrangente sobre a estampagem a quente de peças de aço 22MnB5, com ênfase na aplicação da simulação numérica por elementos finitos para analisar o comportamento termomecânico do material em uma geometria complexa, representada por um protótipo de coluna B de automóvel. As principais conclusões e considerações finais são apresentadas a seguir:

- A simulação numérica por elementos finitos mostrou-se uma ferramenta indispensável para compreender o comportamento termomecânico do aço 22MnB5 durante o processo de estampagem a quente. A análise detalhada das deformações, distribuição de temperatura e previsão de fratura permitiu uma avaliação abrangente das condições do processo.
- A simulação numérica permitiu prever a evolução microestrutural do aço 22MnB5 durante a estampagem a quente. A presença de bainita, ferrita e martensita foi observada nas micrografias ópticas da peça estampada, sendo consistente com as previsões do modelo numérico.
- A análise da Curva Limite de Conformação (CLC) por meio da simulação numérica permitiu prever a tendência de fratura da chapa durante a estampagem a quente. As trincas observadas na peça estampada foram consistentes com as regiões indicadas pelo modelo como propensas à fratura.
- A comparação entre os resultados da simulação numérica e a caracterização experimental da peça estampada mostrou uma concordância satisfatória. Isso valida a eficácia da simulação numérica como uma ferramenta de predição no contexto da estampagem a quente do aço 22MnB5.
- A capacidade da simulação numérica em avaliar diferentes cenários e condições do processo fornece uma base para a otimização do processo de estampagem a quente, visando obter peças com propriedades mecânicas e geométricas ideais.

Em suma, este estudo contribui para o avanço do conhecimento sobre a estampagem a quente de aços de ultra alta resistência, destacando a importância da simulação numérica na análise e otimização desse processo. A integração efetiva entre a modelagem numérica e experimentos práticos oferece uma abordagem abrangente para o desenvolvimento de processos de fabricação na indústria automotiva, contribuindo para a produção de componentes mais leves e resistentes.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AYDIN, H. et al. Development of 3rd Generation AHSS with Medium Mn Content Alloying Compositions. **Materials Science Engineering**, v. 564, p. 501-508, 2013.
- BAUDELET B.; LANGUILLAUME J.; KAPELSKI G. **Microstructure and mechanical properties of ultrafine-grained materials**. Key Engineering Materials, Jan., p. 97–98:125–140, 1994.
- BATHE, K. J. **Finite Element Methoden**. 1. Ed. Berlin: Springer, p. 298, 2002.
- BACH, F.; KERBER, K. **Prozesskette Präzisionsschmieden**. 1. Ed. Berlin: Springer, p. 479, 2014.
- BERGLUND, G. **The history of hardening of boron steel in northern Sweden**. In: Proceedings of the 1st International Conference on Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Kassel, 2008.
- BHADESHIA, H. K. D. H. **Bainite in Steels**. 1. Ed. London: The Institute of Materials, p. 478, 1992.
- B Pillar**. KIRCHHOFF Automotive. <<https://www.kirchhoff-automotive.com/huEN/products/cars/b-pillar>> Acesso em 20 Dez. 2023
- CHANG, Y. et al. **Effect of quenching and partitioning with hot stamping on martensite transformation and mechanical properties of AHSS**. J. Mater. Eng. Perform. 24, 3194–3200, 2015.
- Chen J, Li, X, Han X. **Hot Stamping**. Comprehensive Materials Processing, v. 5; p. 351–370, 2014
- COSTA, L. L. **Estudo da Aplicabilidade e Desempenho de Chapas Metálicas de 22MnB5 como Máscaras de Proteção em Matrizes de Forjamento a Quente**. Tese. PPGE3M: UFRGS, 2020.
- COSTA, L.L.; BRITO, A. M. G.; ROSIAK, A; SCHAEFFER, L. **Caracterização Experimental do Aço 22MnB5 na Estampagem a Quente de Peças Axiais**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, v. 16, n. 3, p. 348-357. 2019.
- COUTO, C.P. et al. **Influence of Austenitisation Temperatures during Hot Stamping on the Local Electrochemical Behaviour of 22MnB5 Steel Coated with Hot-Dip Al-Si**. Corrosion Science, v. 190, p. 1-12, 2021.
- CUI, J. et al. **A method to evaluate the formability of high-strength steel in hot stamping**. Materials & Design, v. 77, p. 95-109, 2015.
- DOEGE, E.; BEHRENS, B-A. **Handbuch Umformtechnik**. 2. Ed. Berlin: Springer, p. 912, 2010.

FAN, D. W.; KIM, H. S.; DE COOMAN, B. C. **A review of the physical metallurgy related to the hot press forming of advanced high strength steel**. Steel Research International, v. 80, p. 241-249, 2010.

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

HEIN, P. **A global approach of the finite element simulation of hot stamping**. Advanced Materials Research, p. 6-8:763-770, 2005.

HOFFMANN, H.; SO, H.; STEINBEISS, H. **Design of hot stamping tools with cooling system**. CIRP Annals, v. 56, p. 269-272, 2007.

HONEYCOMBE, R.W.K. **Steels: Microstructure and Properties**. 1. Ed. London: Edward Arnold, p. 260, 1981.

**Hot Stamping Presses with PCH Flex Technology**. Schuler Group. <<https://www.schulergroup.com/major/us/technologien/produkte/formhaerteanlagen/index.html>> Acesso em 6 Jan. 2024

HU, P. et al. **Effect of oxide scale on temperature-dependent interfacial heat transfer in hot stamping process**. Journal of Materials Processing Technology, v. 213, p. 1475-1483, 2013.

HUH, H.; KIM, S. **Optimum Process Design in Sheet-Metal Forming With Finite Element Analysis**, Journal of Engineering Materials and Technology, v. 123, p. 476-481, 2001.

HUANG, F. et al. **Automotive Steel with a High Product of Strength and Elongation Used for Cold and Hot Forming Simultaneously**. Materials, v.14, p.1121, 2021.

HWANG, B.; SUH, D-W.; KIM, S-J. **Austenitizing temperature and hardenability of low-carbon boron steels**. Scripta Materialia, v. 64, p. 1118-1120, 2011.

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

KIANI, M.; GANDIKOTA, I.; RAIS-ROHANI, M.; MOTOYAMA, K. **Design of lightweight magnesium car body structure under crash and vibration constraints**. Journal of Magnesium and Alloys, v. 2, p. 99–108, 2014.

KLEIN, B. **FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau**. 9. Ed. Wiesbaden: Springer, p. 413, 2012.

KRAPF, R. S.; ROSIAK, A.; SCHAEFFER, L. **Aspectos metalúrgicos e mecânicos do forjamento de aços microligados bainíticos**. In: 41° SENAFOR, 2022.

LECHLER, J. **Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen**. Dissertação, Universität Erlangen-Nürnberg, 2008. In: Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie; ed. 200; Bamberg Meisenbach, 2009.

- LI, H.; WU, X.; LI, G. **Prediction of Forming Limit Diagrams for 22MnB5 in Hot Stamping Process**. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 22, p. 2131–2140, 2013.
- LIMA, T. N. et al. **Microstructural Evolution of a Hot-Stamped Boron Steel Automotive Part and Its Influence on Corrosion Properties and Tempering Behavior**. *Materials Research*, v. 26, p. 16, 2023.
- LINDBERG, H. **Advanced High Strength Steel Technologies in the 2016 Volvo XC90**. *In: GREAT DESIGNS IN STEEL 2016*. Novi, 2016.
- MAENO, T.; MORI, K. I.; FUJIMOTO, M. **Improvements in productivity and formability by water and die quenching in hot stamping of ultra-high strength steel parts**. *CIRP Ann.*, v. 64, p. 281–284, 2015.
- 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.
- MERKLEIN, M.; SVEC, T. **Transformation kinetics of the hot stamping steel 22MnB5 in dependency of the applied deformation on the austenitic microstructure**. *In: IDDRG 2010 International Conference*, Graz, p. 71–80, 2010.
- NADERI, M.; SAEED-AKBARI, A.; BLECK, W. **The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel**. *Materials Science and Engineering*, v. 487, p. 445–455, 2008.
- NADERI, M.; KETABCHI, M.; ABBASI, M.; BLECK, W. **Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Different Boron and Non-Boron Alloyed Steels after Being Hot Stamped**. *Procedia Engineering*, v. 10, p. 460–465, 2011.
- NEUGEBAUER, R. et al. **Press Hardening—An Innovative and Challenging Technology**. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, v. 12, p. 113–118, 2012.
- OTA, E.; YOGO, Y.; IWATA, N.; NISHIGAKI, H. **CAE-based process design for improving formability in hot stamping with partial cooling**. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 263, p. 198–206, 2019.
- PARK, M. K.; SON, H. S.; KIM, T. H.; CHOI, B. K. **Formability, flow and heat transfer simulation of hot press forming B-pillar part and tools**. *In: 10th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes Dedicated to Professor O. C. Zienkiewicz (1921–2009)*, 2010.
- PENTERA, L.; PIERSCHEL, N. **Thermo-mechanical interactions in hot stamping**. *In Proceedings of the CIRP sponsored Conference on Thermal Issues in Machine Tools*, 2018.
- PODANY, P. et al. **Microstructure, Mechanical Properties and Welding of Low Carbon, Medium Manganese TWIP/TRIP Steel**. *Metals*, v. 8, p. 263, 2018.
- RANA, R.; SINGH, S. B. (Eds.). **Automotive steels: design, metallurgy, processing and applications**. Duxford: Woodhead Publishing, p. 469, 2017.

- RHEINGANS, B.; MITTEMEIJER, E. J. **Modelling precipitation kinetics: evaluation of the thermodynamics of nucleation and growth**. *Calphad*, v. 50, p. 49–58, 2015.
- ROSIK, A.; COSTA, L. L.; BRITO, A. M. G.; SCHAEFFER, L. **Determination of Flow Curves by Stack Compression Tests of 22MnB5 Sheets**. *American Journal of Materials Science*, v. 9, p. 29-35, 2019.
- SO, H. et al. **An Investigation of the Blanking Process of the Quenchable Boron Alloyed Steel 22MnB5 before and after Hot Stamping Process**. *Materials and Processing Technology*, v. 212, p. 437–449, 2012.
- TANG, B. et al. **Numerical modeling and experimental verification of ductile damage in boron steel hot stamping process**. *Procedia Engineering*, v. 207, p. 675–680, 2017.
- TANG, A. et al. **The Evolution of Sheet Metal Forming Simulation in Stamping Industry**. *In: 9th International LS-DYNA Users Conference*, 2006.
- TAYLOR, T.; FOURLARIS, G.; EVANS, P. **New generation ultrahigh strength steels for automotive hot stamping technologies**. *In: Asia Steel International Conference 2015*, 2015.
- TAYLOR, T.; CLOUGH, A. **Critical review of automotive hot-stamped sheet steel from an industrial perspective**. *Materials Science and Technology*, v. 34, p. 809-861, 2018
- TONG, C. et al. **New Developments and Future Trends in Low-Temperature Hot Stamping Technologies: A Review**. *Metals*, v. 10, p. 1652, 2020.
- VALLS, I. et al. **Benefits from using high thermal conductivity tool steels in the hot forming of steels**. *In: Proceedings of the International Conference Hot Forming of Steels and Products Properties*, 2009.
- WANG, W.; MA, J. L. **Hot stamping simulation with PAMSTAMP of the B-pillar of a well-known SUV**. *Advances in Materials Research*, v. 1063, p. 268-71, 2015.
- WIENSTRÖER, M. **Prozesssimulation der Stadienfolge beim Schmieden mittels Rückwärtssimulation**. *Dissertação, Universidade de Hannover*, 2004.
- WRÓBEL, I.; SKOWRONEK, A.; GRAJCAR, A. **A Review on Hot Stamping of Advanced High-Strength Steels: Technological-Metallurgical Aspects and Numerical Simulation**. *Symmetry*, v. 14, p. 969, 2022.
- XIAO, G.; ZAN, Z. **Hot Stamping Process Simulation of 22MnB5 Steel Based on Identified Heat Boundary Condition**. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021.
- YANG, Z.; ZHANG, F.; ZHENG, C.; ZHANG, M.; LV, B.; QU, L. **Study on hot deformation behaviour and processing maps of low carbon bainitic steel**. *Materials & Design*, v. 66, p. 258-266, 2015.
- YANAGIMOTO, J.; OYAMADA, K. **Mechanism of springback-free bending of high-strength steel sheets under warm forming conditions**. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 56, p. 265–268, 2007.

ZHOU, J. et al. **Numerical Simulation and Experimental Investigation of Tailored Hot Stamping of Boron Steel by Partial Heating**. *Materials Research and Technology*, v. 14, p. 1347–1365, 2021.