

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS - PPGE3M

**JULIANA ZOTTIS**

***DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE MÁSCARAS METÁLICAS COMO  
REVESTIMENTO PROTETIVO PARA MATRIZES DE FORJAMENTO***

Porto Alegre  
2019

**JULIANA ZOTTIS**

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE MÁSCARAS METÁLICAS  
COMO REVESTIMENTO PROTETIVO PARA MATRIZES DE  
FORJAMENTO**

Tese submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia – área de Concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha (UFRGS)  
Co-Orientador: Prof. Dr. Ing- Gehard Hirt (RWTH Aachen)

Porto Alegre  
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Pró-Reitor De Pós-Graduação: Celso Giannetti Loureiro Chaves  
Vice Pró-Reitor De Pós-Graduação: Márcia Maria Mattos Langeloh

ESCOLA DE ENGENHARIA  
Diretor: Luiz Carlos Pinto Silva Filho  
Vice-diretora: Carla ten Caten

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS; METALÚRGICA E  
DE MATERIAIS – PPGE3M  
Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

#### CIP - Catalogação na Publicação

Zottis, Juliana  
DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE MÁSCARAS METÁLICAS  
COMO REVESTIMENTO PROTETIVO PARA MATRIZES DE  
FORJAMENTO / Juliana Zottis. -- 2019.  
188 f.  
Orientador: Dr. Alexandre da Silva Rocha (UFRGS).  
  
Coorientador: Dr. Ing-Gehard Hirt (RWTH Aachen).  
  
Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2019.  
  
1. Processos de Fabricação. 2. Forjamento a quente.  
3. Máscaras metálicas como revestimento de matrizes.  
4. Análise através do método dos elementos finitos FEM  
- software Deform<sup>TM</sup>-2D/3D. 5. Projeto de Ferramenta. I.  
da Silva Rocha (UFRGS), Dr. Alexandre, orient. II.  
Hirt (RWTH Aachen), Dr. Ing-Gehard, coorient. III.  
Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**JULIANA ZOTTIS**

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE MÁSCARAS METÁLICAS  
COMO REVESTIMENTO PROTETIVO PARA MATRIZES DE  
FORJAMENTO**

Esta Tese de doutorado foi analisada e julgada adequada para a obtenção do Título de Doutora em Engenharia – área de Concentração: Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, PPGE3M, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Eng. Alexandre da Silva Rocha  
Orientador (UFRGS)

Prof. Dr. Ing- Gehard Hirt  
Co-orientador (RWTH Aachen)

Aprovado com Láurea Acadêmica em: 12/12/2019

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha - da Universidade de São Paulo (USP)

Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer - da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito - da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)



Dedico este trabalho aos meus pais Terezinha e Luiz Carlos, pela compreensão e apoio constante, mesmo nos momentos de ausência e distância.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, Terezinha e Luiz Carlos Zottis, Fernanda e Luís Fabiano Schelp, Julio Luiz e Mariléia Zottis, Carla e Igor Diehl e aos meus amigos de todas as horas Rene Barbosa e Adolfo Reis, pelo apoio incondicional nos momentos mais difíceis, sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Aos professores: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha, pela oportunidade e orientação na pesquisa e no desenvolvimento desta tese de doutorado; Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer pela oportunidade fazer parte do grupo de pesquisas e do projeto Bragecrim; Prof. Dr. Ing. Gehart Hirt da Universidade de Aachen, pela coorientação e apoio.

Aos colegas do laboratório de Transformação Mecânica LdTM, grupo de engenharia de superfícies e forjamento, especialmente Luana de Lucca, Thiago Ivaniski, Rafael Dalcin, Leonardo Oliveira, Cristiano Turra, Rodrigo Hatwig, Hugo Kemmerich, André Rosiak. E aos meus amigos Angela Marques, Mateus Menezes, Vinicius Dias, Joao Bittencourt, Gilceu Cardoso, Rachel Possamai, Guilherme Garcia.

Aos colegas do IBF (*Institute of Metal Forming RWTH Aachen University*), especialmente Joachim Seitz, Martin Wolfgarten, Gideon Schwich, Marco Teller e Manuel Poelmeyer; e colegas do ZMB (*Centre for Metallic Design*), Marvin Laugwitz e Theo Heiligers, que contribuíram com a realização deste trabalho durante o período de doutorado sanduíche. E aos amigos Ann-Katrin Haußmann, Yingyang Yu, Rajeevan Rabindran e Stefanie Riedel pelo apoio durante todos os momentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, pela oportunidade de realização dos trabalhos.

À CAPES e ao CNPQ pelo fomento do programa BRAGECRIM – Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura (CAPES/CNPQ/FINEP/DFG) – Edital nº 002/2014 , AUXPE 2203/2015; e pela provisão da bolsa de doutorado.

*"Tua caminhada ainda não terminou...  
A realidade te acolhe dizendo que pela frente o horizonte da  
vida necessita de tuas palavras e do teu silêncio.  
Se amanhã sentires saudades, lembra-te da fantasia e sonha  
com tua próxima vitória.  
Vitória que todas as armas do mundo jamais conseguirão  
obter, porque é uma vitória que surge da paz e não do  
ressentimento.  
É certo que irás encontrar situações tempestuosas  
novamente, mas haverá de ver sempre o lado bom da chuva  
que cai e não a faceta do raio que destrói.  
[...]  
Não faças do amanhã o sinônimo de nunca, nem o ontem te  
seja o mesmo que nunca mais.  
Teus passos ficaram.  
Olhes para trás...  
mas vá em frente pois há muitos que precisam que chegues  
para poderem seguir-te."*

(Charles Chaplin)

Zottis, J. **Desenvolvimento e Aplicação de Máscaras Metálicas Como Revestimento Protetivo Para Matrizes de Forjamento**. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS. Porto Alegre, 2019.

## RESUMO

Ferramentas de conformação mecânica utilizadas em operações de forjamento a quente estão sujeitas a altas cargas mecânicas e tribológicas devido ao carregamento cíclico do processo. O crescente desenvolvimento industrial aliado à necessidade de redução na perda de matéria-prima e energia, levam à busca de conhecimento e melhoria no controle dos parâmetros envolvidos no processo de forjamento, principalmente no que diz respeito ao aumento da durabilidade das matrizes de conformação. Portanto, o presente trabalho visa desenvolver um método de aplicação de máscaras metálicas e analisar o potencial de diferentes materiais de chapas aplicadas como revestimento protetivo de matrizes de forjamento, a fim de auxiliar na conservação, reduzir os carregamentos termomecânicos gerados a cada peça forjada ou ciclo de forjamento, evitando-se assim deformações excessivas e desgaste da ferramenta. Análises iniciais de dureza, microestrutura e resistência mecânica em temperatura foram realizados para a pré-seleção dos aços com potencial de aplicação como máscaras de revestimento. As chapas de aço DP600, DC04, M2, 22MnB5 e Hardox450 foram avaliadas inicialmente através de experimento de forjamento em matriz aberta e, posteriormente com geometrias axissimétricas simples de forjamento em matriz fechada. A estratégia de fabricação da máscara foi analisada através de simulações numéricas utilizando o software Deform<sup>TM</sup> 2D-3D, e de experimentos de estampagem profunda e incremental. O comportamento do conjunto e os requisitos de projeto foram observados, e com isso foi possível desenvolver um método de aplicação de máscaras metálicas sobre matrizes. O método foi então testado para o forjamento em matriz axissimétrica escalonada. Os aços DP600, M2 e 22MnB5 apresentaram aumento de dureza quando submetidas ao forjamento em matriz aberta. A máscara de aço DP600 com 1,0 mm de espessura apresentou aumento de 24% na dureza após 5 ciclos de forjamento. O comportamento dos aços 22MnB5 (revestido) e DP600 foi similar para as temperaturas analisadas no ensaio de tração, com redução em torno de 10% a 300°C e menor que 30% a 500°C e apresentaram a menor redução a 700°C, dentre os materiais analisados. O desenvolvimento de uma geometria axissimétrica escalonada possibilitou a análise da aplicação de máscara de revestimento na fabricação de blocos de engrenagens. A estampagem incremental com suporte foi escolhida como estratégia de fabricação das máscaras de 1,0 e 1,5 mm de espessura com geometria axissimétrica. O aço 22MnB5 apresentou melhores resultados quanto à resistência e deformações durante os experimentos de forjamento. A aplicação da máscara apresentou uma redução de até 87,6% na amplitude de temperatura da matriz. Como as variações de temperatura influenciam diretamente no desgaste da matriz por fadiga térmica, pode ser evidenciado que o método de aplicação de máscara metálica contribui significativamente para a conservação da matriz de forjamento. Portanto, através deste trabalho foi possível analisar diferentes geometrias, materiais e condições, além do desenvolvimento dos requisitos necessários para a aplicação de máscaras metálicas como revestimentos para matrizes de forjamento.

**Palavras chave:** Processos de Fabricação; Forjamento a Quente; Análise por Elementos Finitos; Projeto de Ferramenta.

Zottis, J. **Development and application of metallic masks as a protective coating of forging dies**. Ph.D. thesis presented to the Post-Graduation Program in Mining, Metallurgical and Materials Engineering – PPGE3M at the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Brazil. Porto Alegre, 2019.

## ABSTRACT

Tools used in metal forming, especially in hot forging operations, are subject to process-related high mechanical, tribological, chemical, and thermal-cyclic loads. Hot forging die works under the condition of high temperature, strong contact pressure, and intense friction, which contributes to the severe wear die. The growing industrial development allied to the necessity of reduction in raw material and energy loss leads to the search for knowledge and improvement in the control of the forging parameters, mainly concerning the increase of the tool durability. Therewith, this study aimed to develop a method of metallic masks (die covers) application and to analyze the potential of different sheet metal materials as a coating for forging dies in order to protect these tools against wear and deformations. Vickers hardness, tensile at elevated temperatures, and metallographic analysis were performed to characterize four metallic materials and pre-select the steels with the potential to be applied as die-forging coatings. The metallic sheets DP600, DC04, M2, 22MnB5 e Hardox450 were used initially as a coating in an open die forging. After that, the analysis was carried out with simple axisymmetric geometry to evaluate the possibility to use them as a coating in a close-die forging. The manufacturing strategy of the die cover was analyzed through numerical simulations using Deform™ 2D-3D software and experiments of deep drawing and incremental forming. Through the initial investigation and requisites of tool project, a new and more complex axisymmetric geometry for gear manufacturing was developed and the method of application of die covers was tested. The initial results have shown that the DP600, M2, and 22MnB5 materials presented hardness increase when subjected to the forging experiments with open die. The mask manufactured from steel DP600 with 1mm of thickness presented an increase of 24 % in the hardness after 5 forging cycles. The tensile test analysis in elevated temperature presented a similar behavior for the 22MnB5 and DP600 steels, with a 10% reduction in 300°C and less than 30% at 500°C. Considering a temperature of 700°C, all tested materials resulted in high resistance reduction, thus this temperature was critical. The development of a stepped axisymmetric geometry has made it possible to analyze the die cover application as coating in the manufacture of gear blocks. Incremental sheet forming was chosen as the die cover manufacturing strategy for both thicknesses (1.0 and 1.5 mm) and with the stepped axisymmetric geometry. The 22MnB5 steel showed better results in strength and deformation during forging experiments. The die cover application resulted in a reduction of up to 87.6% in the temperature range of the forging die. As temperature variations directly influence the wear of the die due to thermal fatigue, it can be evidenced that the method of metal mask application contributes significantly to the preservation of the forging die fatigue. Therefore, through this work, it was possible to analyze different geometries, materials, and conditions, besides the development of the requirements for the application of metallic masks as coatings for forging tools.

**Keywords:** Manufacturing Process; Hot Forging; Finite Element Analysis; Tool Design.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Custos de fabricação no ciclo de vida do produto. Fonte: adaptado de Lukić et al 2016.	1
Figura 1.2 Representação do conceito de forjamento utilizando máscaras como revestimento - die cover. Fonte: adaptada do Projeto Bragecrim.	3
Figura 1.3 Estrutura geral da tese. Fonte: elaborado pela autora.	5
Figura 1.4 Representação das fases de desenvolvimento da tese. Fonte: elaborado pela autora.	5
Figura 2.1 Parâmetros do forjamento a quente em matriz fechada. Fonte: adaptado de Altan et al, 2004.	8
Figura 2.2 Parâmetros do processo de estampagem. Fonte: Schaeffer, 2006.	9
Figura 2.3 Desenho esquemático do processo de estampagem incremental. Fonte: adaptado de Martins et al., 2008.	9
Figura 2.4 Diagramas de seleção de material (a) Módulo de Young x Resistência e (b) temperatura máxima de serviço e preço por kg. Fonte: Ashby, 2011.	12
Figura 2.5 Diagramas de seleção de material (a) Taxa de desgaste x dureza e (b) Resistência por custo relativo. Fonte: Ashby, 2011.	13
Figura 2.6 Mecanismos de falha. Fonte: adaptada de Santaella, 2010.	15
Figura 2.7 Camada transversal nitretada em aço ferramenta H13 e perfil de dureza Vickers. Fonte: Santaella, 2009.	16
Figura 2.8 Análise de dois revestimentos depositados por processo combinado de Nitretação e HVOF: (a) revestimento Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -25NiCr, (b) WC-10Co4Cr e (c) perfil comparativo de dureza Vickers. Fonte: Marques, 2019.	18
Figura 2.9 Aços AHSS utilizados no setor automotivo: (a) Propriedades mecânicas e microestruturais, e (b) Classes de aço com índice ECO e conteúdo de Mn e suas frações de fase de austenita. Fonte: adaptado de Breuer et al. 2017.	19
Figura 3.1 Etapas de avaliação e desenvolvimento do método de aplicação de máscaras metálicas como revestimento de matrizes de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.	23
Figura 3.2 Etapas de avaliação e desenvolvimento do método proposto. Fonte: Elaborado pela autora.	24
Figura 3.3 Seleção do material para aplicação como revestimento de matrizes através do gráfico de ductilidade. Fonte: adaptado de WorldAuto Steel, 2017.	25
Figura 3.4 Geometria de forjamento para análise inicial (a) matriz aberta (plana), (b) geometria simples 1 (matriz cilíndrica) e (c) geometria simples 2 (matriz cônica). Fonte: Elaborado pela autora.	26
Figura 3.5 Desenho esquemático da metodologia inicial de seleção do material da máscara. Fonte: Elaborado pela autora.	27
Figura 3.6 Variáveis do ensaio de forjamento em matriz aberta. Fonte: Elaborado pela autora.	29
Figura 3.7 Experimento com martelo de queda. Fonte: Elaborado pela autora.	30
Figura 3.8 Desenho esquemático do (a) ensaio de forjamento em matriz aberta e (b) parâmetros do experimento. Fonte: Elaborado pela autora.	31
Figura 3.9 Posicionamento (a) do corte da amostra para embutimento e (b) dos pontos para medida de dureza. Fonte: Elaborado pela autora.	31
Figura 3.10 Descrição (a) das etapas de modelagem numérica e(b) do modelo numérico inicial. Fonte: Elaborado pela autora.	32

Figura 3.11 Geometrias iniciais de estudo (a) copo ou matriz cilíndrica e (b) matriz cônica. Fonte: Elaborado pela autora.....	34
Figura 3.12 Modelo numérico para análise da geometria simples I – matriz fechada cilíndrica (copo) (a) representação do conjunto billet / máscara / matriz e (b) máscara e billet em detalhe. Fonte: Elaborado pela autora.....	35
Figura 3.13 Tratamento da curva de escoamento para entrada no software (a) resultado do ensaio de tração (experimental) e (b) curva de escoamento inserida no modelo numérico. Fonte: Elaborado pela autora. ....	36
Figura 3.14 Modelo numérico para análise da geometria simples II – matriz fechada cônica (a) representação do conjunto de forjamento e (b) modelo numérico. Fonte: Elaborado pela autora...36	36
Figura 3.15 Inter-relacionamento dos parâmetros de processamento no forjamento a quente (Button, 1998).....	37
Figura 3.16 Estratégias de fabricação da máscara através da estampagem (a) convencional, (b) incremental, direta no setup de forjamento (c) em matriz cilíndrica e (d) em matriz cônica. Fonte: Elaborado pela autora.....	38
Figura 3.17 Análise do processo de conformação do revestimento com geometria simples (a) parâmetros de análise, (b) dimensões geometria cilíndrica e (c) dimensões geometria cônica. Fonte: Elaborado pela autora.....	39
Figura 3.18 Sequência das etapas para realização do processo de estampagem incremental. Fonte: Elaborado pela autora.....	40
Figura 3.19 Etapas de desenvolvimento da fase de análise do processo de forjamento com geometria axissimétrica. Fonte: Elaborado pela autora. ....	41
Figura 3.20 (a) Etapas que compõem um ciclo de forjamento (Fonte: Elaborado pela autora.) e (b) representação do conceito de forjamento utilizando máscaras como revestimento - die cover (Fonte: adaptada de Yu, 2019).....	42
Figura 3.21 Exemplos de peças industriais fabricadas por processo de forjamento. (Fonte: websites de pesquisa, 2016).....	43
Figura 3.22 Desenho esquemático da geometria (a) proposta no projeto Bragecrim – segunda fase; e (b) simples analisada inicialmente (cônica) e (c) produto final. Fonte: Elaborado pela autora. ...	43
Figura 3.23 Modelo numérico 2D para análise da geometria axissimétrica. Fonte: Elaborado pela autora.....	44
Figura 3.24 Matriz inferior de forjamento e fixação do revestimento: (a) vista em corte 3D e (b) dimensões. Fonte: Elaborado pela autora.....	45
Figura 3.25 Processo de estampagem incremental: estratégia de conformação e parâmetros do processo. Fonte: Elaborado pela autora.....	46
Figura 3.26 (a) Padrão PDA (malha) de acordo com *FMTI Systems Inc. "Forming Measurement Tools Innovations" e (b) dimensões desejadas da máscara de forjamento (Fonte: Elaborado pela autora.).....	47
Figura 3.27 Curvas de tratamentos térmico das máscaras de 22MnB5: Têmpera (a) QI=900°C e (b) QII=800°C. Fonte: Elaborado pela autora. ....	48
Figura 3.28 Modelo numérico de análise e dimensionamento do billet (a) B1=Ø110 x 90 mm sem máscara; (b) B2=Ø155 x 50 mm sem máscara; (c) B3=Ø150 x 50 mm sem máscara; e (d) B3=Ø150 x 50 mm com máscara de revestimento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	48
Figura 3.29 Posicionamento dos termopares para medição de temperatura na matriz inferior de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	49
Figura 3.30 Desenho esquemático da retirada das amostras e regiões para análise da máscara antes e depois do forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.....	50

Figura 3.31 Modelagem numérica utilizando MO – 2D: (a) transferência do billet, (b) posicionamento, (c) processo de forjamento e (d) extração do produto forjado. Fonte: Elaborado pela autora. ....	51
Figura 3.32 Modelo numérico geometria (1/4) axissimétrica 3D. Fonte: Elaborado pela autora. ....	52
Figura 4.1 Perfil de dureza medido nas máscaras de aço DP600 (a) 1,5 mm e (b) 1,0 mm de espessura, após experimento em martelo de queda a diferentes temperaturas. Fonte: Elaborado pela autora. ....	54
Figura 4.2 Experimento com matriz aberta: (a) perfil força e temperatura x tempo sem máscara (Fonte: adaptado de Haußmann, 2015), (b) posicionamento dos termopares e do billet, (c) comparação dos resultados experimento e MEF com máscara e (d) representação do modelo numérico (FEM). Fonte: Elaborado pela autora. ....	55
Figura 4.3 Experimento de forjamento com prensa hidráulica em matriz aberta: (a) etapa de forjamento, (b) perfil geral de força durante um ciclo de forjamento, máxima força para cada billet forjado (c) com e (d) sem lubrificação. Fonte: Elaborado pela autora. ....	56
Figura 4.4 Análise do tempo de contato durante o experimento (a) sem e (b) com lubrificante; e análise visual das máscaras após o experimento de forjamento (c) com e (d) sem lubrificante. Fonte: Elaborado pela autora. ....	57
Figura 4.5 (a) Experimento e áreas com e sem contato e (b) perfil comparativo de dureza das chapas testadas através de forjamento em matriz aberta. Fonte: Elaborado pela autora. ....	58
Figura 4.6 Análise metalográfica do material 22MnB5(laminado) (a) como recebido, (b) com contato e (c) sem contato com a peça forjada (matriz aberta). Fonte: Elaborado pela autora. ....	58
Figura 4.7 Linhas de medição da temperatura superficial (a) antes e (b) durante o posicionamento do billet, e (c) antes e (d) após a extração do forjado em matriz aberta. Fonte: Elaborado pela autora. ....	59
Figura 4.8 Perfil de temperatura superficial: linhas (a) Horizontal, (b) Vertical, (c) Diagonal e (d) Diagonal 2 durante o experimento de forjamento em matriz aberta. Fonte: Elaborado pela autora. ....	60
Figura 4.9 Resultado do ensaio de tração em temperatura (a) chapa DC04, (b) M2; (c) 22MnB5 laminado, (d) 22MnB5 revestido (e) DP600 a temperatura ambiente, (f) DP600 em temperatura. Fonte: Elaborado pela autora. ....	61
Figura 4.10 Resultado do ensaio de tração: (a) temperatura ambiente e (b) a 300, 500°C para o material 22MnB5 (revestido) após têmpera; (c) temperatura ambiente e (d) a 300, 500, 700°C para o material Hardox450®. Fonte: Elaborado pela autora. ....	62
Figura 4.11 Simulação numérica do forjamento de um copo cilíndrico (a) temperatura e (b) força vs. deslocamento da matriz superior na direção Y. Fonte: Elaborado pela autora. ....	63
Figura 4.12 Simulação numérica do forjamento de um copo cilíndrico (a) representação dos pontos medidos, (b) temperatura da máscara e (c) temperatura da matriz inferior. Fonte: Elaborado pela autora. ....	64
Figura 4.13 Ensaio de forjamento em matriz fechada – geometria de um copo cilíndrico. Fonte: Elaborado pela autora. ....	65
Figura 4.14 Análise da seção transversal da máscara após 4 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	65
Figura 4.15 Análise numérica durante o forjamento com geometria experimental. Fonte: Elaborado pela autora. ....	66
Figura 4.16 Simulação numérica do forjamento em matriz fechada cônica: (a) perfil de temperatura e (b) carregamento da matriz superior na direção Y durante um ciclo de forjamento; (c) representação dos pontos medidos na máscara e na matriz inferior e (d) temperatura superficial medida. Fonte: Elaborado pela autora. ....	67



Figura 4.17 Análise do perfil de temperatura para a matriz cilíndrica (copo) após 5 ciclos de forjamento com aplicação de máscara DP600 (1mm): (a) comparativo do perfil geral da temperatura da matriz e da máscara; (b) pontos na superfície da matriz. Fonte: Elaborado pela autora. ....	68
Figura 4.18 Perfil de temperatura da matriz cilíndrica (copo) após 10 ciclos de forjamento sem a aplicação de máscara: (a) perfil geral da matriz e (b) pontos na superfície da matriz sem máscara. Fonte: Elaborado pela autora. ....	69
Figura 4.19 Análise da geometria copo cônico: após (a) 5 ciclos de forjamento; (b) superfície da matriz com máscara DP600 (1mm); (c) 11 ciclos sem máscara e (d) pontos na superfície e 1 mm abaixo da superfície da matriz sem máscara. Fonte: Elaborado pela autora. ....	70
Figura 4.20 Análise da deformação plástica (a) no início do 4º ciclo e (b) após N = 6 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	71
Figura 4.21 Análise da velocidade de escorregamento após N=5 ciclos de forjamento para a matriz cônica (a) com e (b) sem aplicação de máscara. Fonte: Elaborado pela autora. ....	71
Figura 4.22 Requisitos básicos de cada etapa do desenvolvimento do projeto. Fonte: Elaborado pela autora. ....	72
Figura 4.23 Diagrama de inter-relação entre o processo de fabricação do revestimento e a geometria do forjado. ....	76
Figura 4.24 Resultado da estampagem profunda do material bifásico (DP600 – 1mm). ....	76
Figura 4.25 Processo de estampagem incremental: (a) setup, (b) geometria copo cilíndrico e (c) copo cônico. ....	77
Figura 4.26 Resultado da simulação de conformação da máscara de 1 mm na matriz cilíndrica de forjamento. ....	78
Figura 4.27 Modelo numérico com prensa chapas desenho esquemático (a) da estampagem e (b) resultados numéricos de espessura, tensão e deformação efetiva na chapa. ....	78
Figura 4.28 Resultados numéricos do processo de estampagem com geometria cônica. Fonte: Elaborado pela autora. ....	80
Figura 4.29 Resultado numérico da conformação da máscara (22MnB5 – 1,5 mm) diretamente no setup de forjamento de geometria cônica. Fonte: Elaborado pela autora. ....	81
Figura 4.30 Análise da máscara (a) geometria conformada diretamente no setup de forjamento, (b) geometria, (c) deformação total e (d) espessura após uma peça forjada. Fonte: Elaborado pela autora. ....	82
Figura 4.31 Regiões críticas na máscara após forjamento de uma peça: (a) matriz com geometria cilíndrica e (b) geometria cônica após estampagem diretamente no setup seguida de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	83
Figura 4.32 Representação das etapas de análise do método de aplicação de máscaras em uma geometria axissimétrica. Fonte: Elaborado pela autora. ....	84
Figura 4.33 Simulação numérica de análise do tamanho do billet em função do carregamento de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	85
Figura 4.34 Dimensões do billet para análise experimental de forjamento, cálculo de massa e volume. Fonte: Elaborado pela autora. ....	86
Figura 4.35 Simulação do aquecimento do billet 150 x 50 mm (atmosfera de 1200°C). Fonte: Elaborado pela autora. ....	87
Figura 4.36 Simulação da transferência do billet ao ar (atmosfera de 20°C). Fonte: Elaborado pela autora. ....	87
Figura 4.37 Deslocamento e Tensão efetiva da máscara após de um forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	88
Figura 4.38 Resultado numérico após 4 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	88

Figura 4.39 Modelo numérico computacional 2D utilizando anel de fixação e máscara. Fonte: Elaborado pela autora.....	89
Figura 4.40 Resultado numérico da força máxima de forjamento com e sem aplicação de máscara. Fonte: Elaborado pela autora.....	89
Figura 4.41 Resultado numérico da temperatura máxima (a) na máscara e (b) na matriz inferior de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	90
Figura 4.42 Comportamento da máscara (a) durante e (b) ao final do processo de forjamento, (c) regiões de maior temperatura e (d) variações de espessura. Fonte: Elaborado pela autora. ....	91
Figura 4.43 Temperatura da matriz inferior após simulação de N10 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.....	92
Figura 4.44 Análise da espessura da amostra de DP600 (1,0 mm) após ISF. Fonte: Elaborado pela autora. ....	93
Figura 4.45 Representação (a) da análise através do comparativo das medições 3D e CAD, (b) das seções medidas no software GOM <i>Inspect</i> . Fonte: Elaborado pela autora. ....	94
Figura 4.46 Análise através do software GOM <i>Inspect</i> da máscara DP600 (1 mm) conformada. Fonte: Elaborado pela autora.....	95
Figura 4.47 Média das seções para a análise da geometria através do software GOM <i>Inspect</i> para a superfície (a) superior e (b) inferior da máscara DP600 (1mm). Fonte: Elaborado pela autora. ....	95
Figura 4.48 Média das seções para a análise da geometria através do software GOM <i>Inspect</i> para a superfície (a) superior e (b) inferior da máscara DC04 (1mm). Fonte: Elaborado pela autora. ....	95
Figura 4.49 Média das seções para a análise da geometria através do software GOM <i>Inspect</i> para a superfície (a) superior e (b) inferior da máscara 22MnB5 (1,5 mm). Fonte: Elaborado pela autora. ....	96
Figura 4.50 (a) Representação das seções e (b) resultados de espessura da amostra 22MnB5 (1,5mm) depois do processo de estampagem incremental (ISF) – microscópio Keyence 20x. Fonte: Elaborado pela autora. ....	97
Figura 4.51 Análise da espessura da máscara em aço DC04 (1,5 mm) após processo de estampagem nas regiões (a) de fundo e parede – através de micrômetro e (b) de raios e parede críticos através de microscópio. Fonte: Elaborado pela autora.....	97
Figura 4.52 Temperatura durante o processo de têmpera QI a 900°C para as amostras de material 22MnB5 (a) 1,0 mm e (b) 1,5 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora. ....	98
Figura 4.53 Microestrutura do material 22MnB5 (1 mm) como recebido. Fonte: Elaborado pela autora. ....	99
Figura 4.54 Microestrutura do material 22MnB5 (1 mm) após têmpera a (a) QI = 900°C e (b) QII = 800°C, na seção longitudinal (superfície) e transversal (espessura), respectivamente. Fonte: Elaborado pela autora.....	100
Figura 4.55 Análise do comportamento do revestimento Al-Si após a conformação (a) sem tratamento e (b) com tratamento térmico a 900°C. Fonte: Elaborado pela autora.....	100
Figura 4.56 Experimento I de forjamento: (a) etapas do ciclo de forjamento, (b) troca das máscaras e fixação. Fonte: Elaborado pela autora. ....	102
Figura 4.57 (a) Força e (b) deslocamento da matriz superior dos experimentos I e II de forjamento sem máscara. Fonte: Elaborado pela autora.....	103
Figura 4.58 Tempo necessário para cada operação durante os experimentos (a) I e (b) II. Fonte: Elaborado pela autora.....	104
Figura 4.59 Temperatura na matriz inferior para os experimentos I e II por tempo de duração do experimento. Fonte: Elaborado pela autora.....	105

Figura 4.60 Temperatura superficial durante o experimento de forjamento I: (a) antes do posicionamento do billet, (b) antes e (c) depois da extração da peça forjada. Fonte: Elaborado pela autora.....	105
Figura 4.61 Análise da temperatura superficial da matriz para o experimento sem aplicação de máscara durante um ciclo de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	106
Figura 4.62 Perfil da temperatura superficial medida durante o experimento II de forjamento – N5 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	106
Figura 4.63 Experimento I de forjamento com máscara DC04 (1mm) – amostra Nr2: (a) força e (b) tempo. Fonte: Elaborado pela autora.....	107
Figura 4.64 Experimento I utilizando máscara DC04 (1,0 mm): perfil de temperatura geral da posição (a) termopar K e (b) termopar T; temperatura por ciclo (c) termopar K e (d) termopar T. Fonte: Elaborado pela autora.....	108
Figura 4.65 Experimento I de forjamento com máscara DC04 (1,5mm): (a) força e (b) tempo. Fonte: Elaborado pela autora. ....	109
Figura 4.66 Experimento I utilizando máscara DC04 (1,5 mm): perfil de temperatura geral da posição (a) termopar K e (b) termopar T; temperatura por ciclo (c) termopar K e (d) termopar T. Fonte: Elaborado pela autora.....	109
Figura 4.67 Espessura da máscara DC04 após experimento I de forjamento (a) 1,0 mm (b) 1,5 mm. Fonte: Elaborado pela autora.....	110
Figura 4.68 Resultado da força para o experimento (a) I e (b) II utilizando DP600 (1,0 mm) como máscara. Fonte: Elaborado pela autora. ....	111
Figura 4.69 Tempo das operações do experimento I para as amostras (a) Nr1, (b) Nr2 e (c) Nr3; e experimento II amostra (d) Nr1 com máscara DP600 (1,0 mm). Fonte: Elaborado pela autora. ..	111
Figura 4.70 Temperatura medida na matriz inferior com máscara DP600 (1mm): durante o experimento I (N=4) nas posições do termopar (a) K e (b) T, temperatura por ciclo (c) termopar K e (d) termopar T . Fonte: Elaborado pela autora. ....	112
Figura 4.71 Temperatura da matriz inferior durante o experimento II com máscara DP600 (1,0 mm) nas posições (a) termopar K e (b) termopar T. Fonte: Elaborado pela autora. ....	113
Figura 4.72 Temperatura superficial durante o experimento II utilizando máscara DP600 (1,0 mm). Fonte: Elaborado pela autora.....	113
Figura 4.73 Espessura da máscara DP600 após experimento (a) I – perfil medido através de micrômetro e (b) II – perfil medido no microscópio (Keyence). Fonte: Elaborado pela autora....	114
Figura 4.74 Análise das variações na espessura da máscara DP600 após experimento II para as amostras (a) t1 e t2 e (c) amostra t3. Fonte: Elaborado pela autora. ....	115
Figura 4.75 Resultado da força durante experimento I e II utilizando máscara 22MnB5 (revestido) temperado a 900°C (QI) com 1,5 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora.....	116
Figura 4.76 Tempo das etapas do processo com máscara 22MnB5 (1,5 mm) temperado a 900°C para (a) experimento I (N=4) e (b) experimento II (N=18). Fonte: Elaborado pela autora. ....	117
Figura 4.77 Temperatura medida na matriz inferior durante o experimento I com máscara 22MnB5 (1,5mm) QI. Fonte: Elaborado pela autora. ....	117
Figura 4.78 Temperatura medida durante o experimento II com máscara 22MnB5 (1,5mm) QI. Fonte: Elaborado pela autora.....	118
Figura 4.79 Espessura da máscara 22MnB5 (1,5mm_QI) após experimento (a) I – perfil medido através de micrômetro e (b) II – perfil medido no microscópio (Keyence). Fonte: Elaborado pela autora. ....	118
Figura 4.80 Análise das regiões críticas da máscara 22MnB5 (1,5mm) QI após experimento (a) I e (b) II. Fonte: Elaborado pela autora. ....	119

Figura 4.81 Resultado da força durante experimento I e II utilizando máscara 22MnB5 (revestido) temperado a 900°C (QI) com 1 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora.....	120
Figura 4.82 Tempo das etapas do ciclo para o experimento I amostras (a) Nr4, (b) Nr5 e (c) Nr6; e (d) para o experimento II utilizando máscara 22MnB5 (1mm) com têmpera a 900°C. Fonte: Elaborado pela autora.....	121
Figura 4.83 Temperatura interna da matriz durante experimento I com máscara 22MnB5 (1mm) QI. Fonte: Elaborado pela autora.....	122
Figura 4.84 Temperatura medida durante o experimento II com máscara 22MnB5 (1mm) QI para os ciclos (a) N=4+9 e (b) N=4+9+5. Fonte: Elaborado pela autora. ....	123
Figura 4.85 Análise da espessura da máscara 22MnB5 (1mm) QI após experimento (a) I (N4) com microscópio Keyence e (b) II (N18) com micrômetro. Fonte: Elaborado pela autora.....	124
Figura 4.86 Análise das regiões críticas da máscara 22MnB5 (1mm) QI após experimento (a) I e (b) II. Fonte: Elaborado pela autora. ....	124
Figura 4.87 Resultado da força durante experimento I e II utilizando máscara 22MnB5 (revestido) temperado a 800°C (QII) com 1 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora. ....	125
Figura 4.88 Tempo das etapas do ciclo para o experimento I amostras (a) Nr1, (b) Nr2 e (c) Nr3; e (d) para o experimento II utilizando máscara 22MnB5 (1mm) com têmpera a 800°C. Fonte: Elaborado pela autora. ....	126
Figura 4.89 Temperatura interna da matriz durante o experimento I com máscara 22MnB5 (1mm) QII. Fonte: Elaborado pela autora. ....	126
Figura 4.90 Temperatura medida durante o experimento II com máscara 22MnB5 (1mm) QII. Fonte: Elaborado pela autora. ....	127
Figura 4.91 Perfil de temperatura superficial com máscara 22MnB5_1,5mm. Fonte: Elaborado pela autora. ....	128
Figura 4.92 Resultado numérico da temperatura geral da matriz com e sem máscara e da máscara 22MnB5 (1,5mm) durante 5 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.....	129
Figura 4.93 Análise da temperatura em pontos dentro da matriz sem aplicação de máscara. Fonte: Elaborado pela autora. ....	130
Figura 4.94 Temperatura da matriz durante a simulação com aplicação de máscara (22MnB5_1,5mm). Fonte: Elaborado pela autora. ....	130
Figura 4.95 Análise da temperatura da matriz na região central e do raio R6 para a simulação utilizando máscara 22MnB5 (1,5mm). Fonte: Elaborado pela autora. ....	131
Figura 4.96 Análise da ferramenta através de simulação numérica sem a aplicação de máscara: (a) tensão efetiva e (b) previsão de desgaste. Fonte: Elaborado pela autora. ....	131
Figura 4.97 Previsão de desgaste na ferramenta através de simulação numérica (a) tensão efetiva e (b) desgaste com utilização de máscara 22MnB5 (1,5 mm). Fonte: Elaborado pela autora. ....	132
Figura 4.98 Análise das regiões de maior potencial de desgaste para 20 ciclos de forjamento com máscara 22MnB5 (1,5 mm). Fonte: Elaborado pela autora. ....	132
Figura 5.1 Análise do perfil de dureza Vickers depois do ensaio de forjamento (8 ciclos) em matriz aberta com máscara DP600 (a) 1,0 mm e (b) 1,5 mm. Fonte: Elaborado pela autora. ....	134
Figura 5.2 Perfis de temperatura e tensão efetiva da máscara DP600 (1,0 mm) após a simulação de N1 e N8 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	134
Figura 5.3 Análise de dureza Vickers após ensaio de forjamento (4 ciclos) em matriz fechada de geometria simples com máscara DP600 de 1,0 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora. ....	136

Figura 5.4 Influência da direção do fluxo do billet (a) geometria copo máscara DP600 (Fonte: Elaborado pela autora.) e (b) geometria simples máscara DC04 (Fonte: adaptado de Rosenstock et al, 2015 e Yu et al,2016). .....	137
Figura 5.5 Microestrutura do material DP600 (a) como recebido e (b) aquecido a 600°C por 900s; (c) perfil de dureza com e sem lubrificação em diferentes temperaturas e (d) perfil de tensão e alongamento em função da temperatura (adaptado de Ivaniski, 2017). .....	138
Figura 5.6 (a) Máxima tensão limite de escoamento (LE) em função da temperatura e (b) Porcentagem de redução da resistência do material em função dos ensaios em temperatura ambiente (20°C). Fonte: Elaborado pela autora. ....	139
Figura 5.7 Resultado da média das forças do experimento I e II de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora. ....	142
Figura 5.8 Temperatura média do billet antes da operação de forjamento com e sem aplicação de máscara. Fonte: Elaborado pela autora. ....	143
Figura 5.9 Temperatura durante o experimento II de forjamento: (a) média das linhas na superfície do setup de forjamento para o último ciclo e temperatura interna termopar (b) posição K e (c) posição T. Fonte: Elaborado pela autora. ....	144
Figura 5.10 Análise da espessura das máscaras de material (a) 22MnB5_1,5mm; (b) 22MnB5_1,0 mm e (c) DP600; (d) porcentagem de redução da espessura para as máscaras de 22MnB5. Fonte: Elaborado pela autora. ....	145
Figura 5.11 Distribuição de dureza Vickers para máscaras em aço (a) 22MnB5 e (b) DP600. Fonte: Elaborado pela autora. ....	146
Figura 5.12 Análise numérica das regiões críticas do conjunto sem máscara (a) representação das regiões críticas; (b) distribuição da temperatura durante os 28 ciclos. Fonte: Elaborado pela autora. ....	148
Figura 5.13 Análise da matriz sem máscara (a) representação das regiões e pontos medidos, temperatura e pressão medidos em pontos (b) superficiais na seção da matriz; e nas regiões dos raios (c) R6 e (d) R3. Fonte: Elaborado pela autora. ....	149
Figura 5.14 Distribuição da temperatura e pressão (a) geral da máscara (1mm) e (b) do conjunto para a região R3. Fonte: Elaborado pela autora. ....	150

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Valores de espessura para cada material do corpo de prova.....	27
Tabela 3.2 Descrição das dimensões das amostras e temperatura de ensaio de tração.....	29
Tabela 3.3 Propriedades do material da Chapa.....	32
Tabela 3.4 Parâmetros do processo, entrada do software.....	33
Tabela 3.5 Propriedades do material da Chapa.....	35
Tabela 3.6 Parâmetros do processo, entrada do software.....	35
Tabela 3.7 Propriedades do material da Chapa.....	39
Tabela 3.8 Parâmetros do processo, entrada do software.....	39
Tabela 3.9 Parâmetros do processo de estampagem incremental do material DP600.....	40
Tabela 3.10 Parâmetros do modelo numérico para simulação de forjamento a quente com geometria axissimétrica.....	44
Tabela 3.11 Número de amostras e espessura dos materiais estampados.....	45
Tabela 3.12 Parâmetros do processo de estampagem incremental.....	46
Tabela 3.13 Parâmetros dos experimentos de forjamento.....	50
Tabela 3.14 Parâmetros do modelo numérico utilizando MO (Multiple operation) e N ciclos de forjamento.....	52
Tabela 4.1 Dureza nominal das chapas – antes dos experimentos em matriz aberta.....	53
Tabela 4.2 Valores de dureza medidos após o ensaio de forjamento com martelo de queda.....	54
Tabela 4.3 Funções, limitações, objetivos e variáveis.....	73
Tabela 4.4 Análise das propriedades dos materiais testados inicialmente.....	74
Tabela 4.5 Propriedades do material.....	79
Tabela 4.6 Parâmetros do processo, entrada do software.....	79
Tabela 4.7 Análise geral das variáveis do processo de conformação das máscaras.....	81
Tabela 4.8 Dados de temperatura e tempo da têmpera realizada para cada amostra de material 22MnB5.....	98
Tabela 4.9 Tempo entre as operações do experimento I de forjamento.....	101
Tabela 4.10 Tempo entre as operações do experimento II de forjamento.....	101
Tabela 4.11 Máscara de revestimento vs. número de ciclos de forjamento durante o experimento II.....	101
Tabela 5.1 Parâmetros de acordo com a geometria analisada.....	140
Tabela 5.2 Lista de requisitos necessários para a utilização do método de máscaras metálicas como revestimento protetivo de matrizes de forjamento.....	152

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\dot{\phi}$  – Velocidade de deformação  
**a, b e c** – Constantes  
**B**<sub>1[...]<sub>n</sub> – Billet 1, [...], n  
**dt** – Incremento de tempo  
**e** – Espessura  
**E** – Módulo de Young  
**h** – Altura  
**H** – Dureza do material  
**HV(n)** – Dureza Vickers medida com carga n (Kgf)  
**K** – Constante  
**L**<sub>1[...]<sub>n</sub> – Linha na posição 1, [...], n  
**m** – Massa  
**N** – Número de ciclos de forjamento  
**Nr**<sub>1[...]<sub>n</sub> – Amostra 1, [...], n (máscara testada)  
**Ø** – Diâmetro  
**p** – Pressão de interface  
**P**<sub>1[...]<sub>n</sub> – Ponto na posição 1, [...], n  
**R** – Raio  
**R1** – Raio na posição 1  
**R2** – Raio na posição 2  
**R3** – Raio na posição 3  
**R4** – Raio na posição 4  
**R5** – Raio na posição 5  
**R6** – Raio na posição 6  
**t** – Tempo  
**t**<sub>1[...]<sub>n</sub> – Seção 1, [...], n retirada da amostra (máscara)  
**T**<sub>amostra</sub> – temperatura da amostra (máscara)  
**T**<sub>forno</sub> – temperatura do forno  
**t**<sub>hold</sub> – tempo de espera  
**T**<sub>ref</sub> – temperatura de referência  
**t**<sub>up</sub> – tempo até atingir a temperatura de ensaio  
**v** – Velocidade de escorregamento  
**V** – Volume  
**w** – Desgaste (equação de Archard)  
**ν** – Coeficiente de Poisson  
**ρ** – Densidade  
**φ** – Deformação  
**σ<sub>z</sub>** – Tensão de tração na região de primeiro contato  
**b** – Largura da matriz  
**s** – Espessura da máscara  
**μ<sub>bc</sub>** – Coef.de atrito entre billet e máscara  
**μ<sub>cd</sub>** – Coef.de atrito entre máscara e matriz  
**σ<sub>n</sub>** – Tensão normal da região de contato  
**l** – Comprimento da região de contato  
**k<sub>fb</sub>** – Tensão de escoamento do billet  
**k<sub>fc</sub>** – Tensão de escoamento da máscara</sub></sub></sub></sub></sub>

## LISTA DE ABREVIACÕES

- 2D** – Bidimensional  
**3D** – Tridimensional  
**AHSS** – *Advanced High Strength Steels* (aços avançados de elevada resistência)  
**Al** – Alumínio  
**B** – Boro  
**BRAGECRIM** – Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology  
**C** – Carbono  
**Cr** – Cromo  
**CVD** – Chemical Vapor Deposition (deposição química em fase de vapor)  
**Die cover** – Máscara protetiva ou de revestimento  
**DIN** – Deutsches Institut für Normung (Instituto Alemão de Normalização)  
**DP** – Dual phase (bifásico)  
**ECO** – índice ECO, coeficiente de eficiência  
**FEM** – *Finite Element Method* (Método dos elementos finitos)  
**FLD** – Diagramas limite de conformação  
**FLD** – *Forming limit diagram* (diagramas limite de conformação)  
**HVOF** – High-Velocity Oxygen Fuel (Aspersão oxi-combustível de alta velocidade)  
**IBF** – Institute für Bildsame Formengung – Instituto de conformação mecânica  
**ISF** – *Incremental sheet forming* (estampagem incremental de chapas)  
**LdTM** – Laboratório de transformação mecânica  
**Mn** – manganês  
**Mo** – molibdênio  
**MO** – *Multiple operation* (Operações Múltiplas)  
**PACVD** – Plasma Aided Chemical Vapor Deposition (deposição química em fase de vapor assistida por plasma)  
**PPGE3M** – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais  
**PVD** – Physical Vapor Deposition (deposição física de vapor)  
**QI** – *Quenching* (têmpera) na condição de 900°C  
**QII** – *Quenching* (têmpera) na condição de 800°C  
**Rpm** – rotação por minuto  
**RWTH** – Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Universidade de Aachen  
**SFTC** – *Scientific Forming Technologies Corporation* (desenvolvedor do software Deform™)  
**Si** – Silício  
**UFRGS** – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
**V** – Vanádio  
**wt%** – weight percentage (porcentagem em peso)



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO .....	3
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	3
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	3
1.2 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA .....	4
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 PROCESSOS DE FORJAMENTO .....	6
2.2 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS .....	8
2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS - FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO .....	10
2.4 DESIGN E SELEÇÃO DE MATERIAIS .....	11
2.5 FERRAMENTAS DE CONFORMAÇÃO.....	14
2.6 POSSIBILIDADES DE MELHORIA DE FERRAMENTA .....	16
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>23</b>
3.1 SELEÇÃO DO MATERIAL DA MÁSCARA .....	26
3.1.1 <i>Caracterização inicial do material</i> .....	27
3.1.2 <i>Ensaio de forjamento em matriz aberta</i> .....	29
3.2 ANÁLISE DO REVESTIMENTO APLICADO A GEOMETRIAS SIMPLES DE FORJAMENTO.....	33
3.3 ESTRATÉGIAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE APLICAÇÃO DE MÁSCARA SOBRE A MATRIZ .....	37
3.4 ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO REVESTIMENTO EM FORJAMENTO COM GEOMETRIA AXISSIMÉTRICA .....	41
3.4.1 <i>Design da geometria axissimétrica escalonada</i> .....	42
3.4.2 <i>Fabricação da máscara de revestimento</i> .....	45
3.4.2.1 <i>Conformação através do processo de estampagem incremental</i> .....	46
3.4.2.2 <i>Análise da geometria estampada</i> .....	46
3.4.2.3 <i>Tratamento térmico do material 22MnB5</i> .....	47
3.4.3 <i>Ensaio de forjamento</i> .....	48
3.4.3.1 <i>Dimensionamento billet</i> .....	48
3.4.3.2 <i>Controle e aquisição da temperatura</i> .....	49
3.4.4 <i>Análise da máscara de revestimento</i> .....	50
3.4.5 <i>Modelagem numérica</i> .....	51
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>53</b>
4.1 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO MATERIAL .....	53
4.2 APLICAÇÃO DO REVESTIMENTO EM GEOMETRIA AXISSIMÉTRICA SIMPLES.....	63
4.3 INVESTIGAÇÃO DOS PARÂMETROS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE APLICAÇÃO DA MÁSCARA SOBRE MATRIZ DE FORJAMENTO .....	72
4.3.1 <i>Seleção do material</i> .....	73
4.3.2 <i>Estratégias de fabricação do revestimento</i> .....	75
4.3.3 <i>Principais parâmetros do processo de forjamento</i> .....	82
4.4 ANÁLISE DE UMA GEOMETRIA AXISSIMÉTRICA ESCALONADA .....	84
4.4.1 <i>Análise numérica inicial do conjunto de forjamento com geometria axissimétrica escalonada</i> ..	85
4.4.2 <i>Análise da máscara fabricada</i> .....	93
4.4.2.1 <i>Análise da geometria das máscaras antes do experimento de forjamento</i> .....	93
4.4.2.2 <i>Análise da máscara de aço 22MnB5 (revestido)</i> .....	98
4.4.3 <i>Experimentos de forjamento a quente</i> .....	101
4.4.3.1 <i>Análise dos experimentos sem aplicação de máscara</i> .....	103

4.4.3.2	Análise do aço DC04 como máscara .....	107
4.4.3.3	Análise do aço DP600 (1,0 mm) como máscara.....	111
4.4.3.4	Análise do aço 22MnB5 (revestido) como máscara .....	116
4.4.3.4.1	Máscara 22MnB5 (1,5 mm).....	116
4.4.3.4.2	Máscara 22MnB5 (1 mm) tratado a 900°C.....	120
4.4.3.4.3	Máscara 22MnB5 (1 mm) tratado a 800°C.....	125
4.4.4	Análise da geometria axissimétrica escalonada via simulação numérica .....	128
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO GERAL .....</b>	<b>133</b>
5.1	COMPORTAMENTO DA MÁSCARA EM AÇO DP600.....	133
5.2	RESISTÊNCIA MECÂNICA DA MÁSCARA VS. PARÂMETROS DO PROCESSO DE FORJAMENTO.....	138
5.3	ESTRATÉGIA DE CONFORMAÇÃO DA MÁSCARA .....	140
5.4	GEOMETRIA AXISSIMÉTRICA ESCALONADA .....	142
5.5	ANÁLISE E PREVISÃO DO DESGASTE .....	147
5.6	RECOMENDAÇÕES PARA UTILIZAÇÃO DAS MÁSCARAS ESTUDADAS .....	151
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>153</b>
	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>155</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>156</b>
	<b>APÊNDICE A – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CHAPAS METÁLICAS .....</b>	<b>162</b>
	<b>APÊNDICE B – ANÁLISE METALOGRÁFICA .....</b>	<b>163</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ferramentas de conformação e corte estão presentes na maioria dos processos industriais, especialmente no setor metalmeccânico. O custo de produção de ferramental envolve fatores como volume e densidade do material fabricado, tempo de processamento e, principalmente, fabricação e manutenção das matrizes utilizadas para conformação. Na indústria de componentes forjados, a ferramenta constitui de 15 a 50% do custo final dos produtos acabados (Brucelle & Bernhart, 2019; Hawryluk, Marek, 2016; Gronostaiski et al, 2019), sendo considerado, portanto, um fator decisivo na otimização de projeto de produto.

Para Lukić et al (2016), os estágios de desenvolvimento do produto influenciam diretamente no custo total, no tempo e na qualidade, além de depender do tipo de produto, forma de produção, ambiente e muitos outros fatores técnico-econômicos. Portanto, é necessário considerar problemas de produção, como o desgaste e troca de matrizes, na fase de design do produto ou o mais cedo possível, ou seja, no desenvolvimento do conceito do produto, evitando assim custos excessivos, como pode ser observado na Figura 1.1.

Da mesma maneira, o crescente desenvolvimento industrial aliado à necessidade de redução na perda de matéria-prima e energia, levam à busca de conhecimento e melhoria no desenvolvimento de produto, bem como no controle dos parâmetros envolvidos nos processos de fabricação como o forjamento, principalmente no que diz respeito ao aumento da durabilidade das matrizes de conformação.

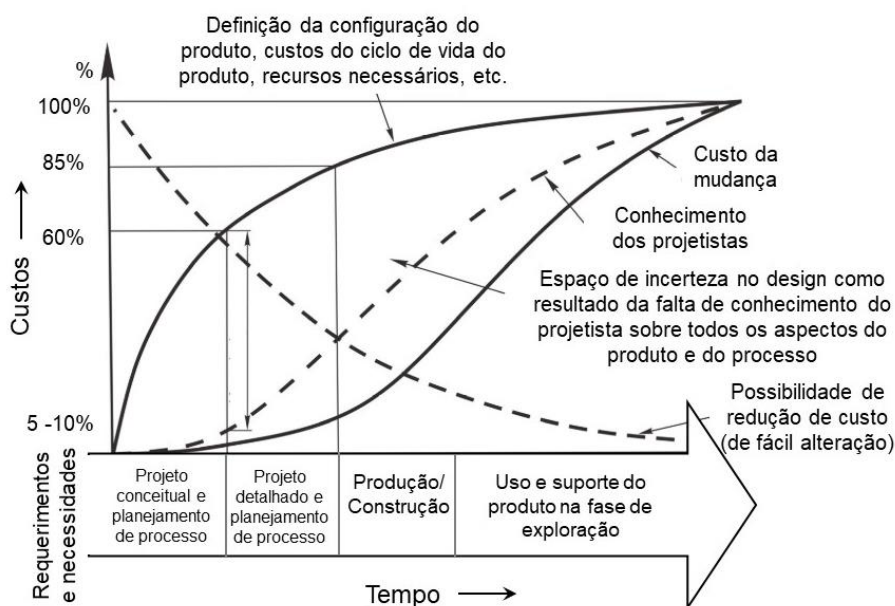


Figura 1.1 Custos de fabricação no ciclo de vida do produto. Fonte: adaptado de Lukić et al 2016.

Nos processos de forjamento a quente, comumente utilizados para fabricação de componentes de elevada resistência (virabrequins, bielas, engrenagens, componentes estruturais para aeronaves, peças para turbinas de motores a jato etc.), as ferramentas estão submetidas a altas temperaturas e solicitações cíclicas. Tais solicitações termomecânicas influenciam significativamente no desgaste e, conseqüentemente, na vida das matrizes, assim como na quantidade de produtos fabricados dentro das tolerâncias admissíveis de projeto.

Segundo Magri (2011), durante o forjamento a quente, especialmente em matriz fechada, as tensões mecânicas e térmicas induzidas pelas operações sucessivas de forjamento, causam danos tanto superficiais quanto nas camadas imediatamente abaixo da superfície das matrizes. Essas tensões estão presentes no processo de preenchimento da matriz, deformação e fluxo do material dentro da cavidade, e ainda na extração do componente forjado, quando a matriz é refrigerada pelo spray lubrificante (TRIPATHY, 2011; BERTI e MONTI, 2005; KIM et al., 2005).

Durante o forjamento, fenômenos tribológicos como desgaste abrasivo, fadiga térmica, fadiga mecânica e deformação plástica ocorrem na superfície da matriz. Tais mecanismos de desgaste devem ser minimizados para melhorar a performance das matrizes, além de garantir a precisão dimensional e o acabamento superficial dos componentes forjados (HANSEN e BAY, 1990 apud KIM et al., 2005).

Portanto, a fim de aumentar a vida de ferramentas de forjamento a quente desenvolveu-se o projeto de pesquisa intitulado “*Evaluation of Sheet Metal Covers to Improve Tool Life in Forging*”, o qual propõe o estudo de insertos produzidos a partir de chapas metálicas para matrizes de forjamento, utilizados para cobrir a superfície da ferramenta durante operações de forjamento em matriz fechada. Este projeto de pesquisa, pertencente ao programa de cooperação internacional Bragecrim (*Brazilian-German Collaborative Research Initiative on Manufacturing Technology*), foi desenvolvido em parceria com o Instituto de Conformação Mecânica IBF (*Institut für Bildsame Formgebung*) – RWTH Aachen University, Alemanha.

A Figura 1.2 apresenta o desenho esquemático do conceito básico de forjamento utilizando máscaras como revestimento - *die cover*, onde (Fig. Figura 1.2a) a fase de produção (N ciclos de forjamentos) é realizada até o (Fig. Figura 1.2b) aparecimento de falhas ou desgaste e, conseqüentemente, a detecção de peças fora das tolerâncias; a máscara é então retirada (Fig. Figura 1.2c) e encaminhada para a reciclagem, enquanto (Fig. Figura 1.2d) mantém-se a matriz de forjamento sendo apenas aplicada uma nova máscara para então (Fig. Figura 1.2e) reiniciar o processo de forjamento.

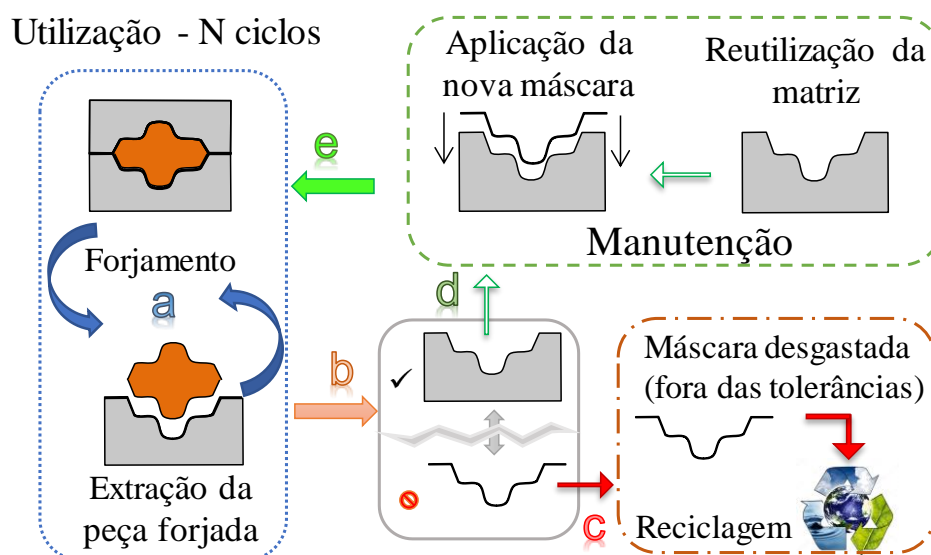


Figura 1.2 Representação do conceito de forjamento utilizando máscaras como revestimento - die cover. Fonte: adaptada do Projeto Bragecim.

Assim, um inserto ou máscara (*die cover*) agiria como revestimento de proteção, absorvendo os esforços que normalmente levam à falha da ferramenta, proporcionando aumento da vida em serviço, impactando na redução dos custos de produção e no aumento da competitividade do produto forjado.

## 1.1 Objetivo

### 1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho visa desenvolver um método de aplicação de máscaras metálicas e analisar o potencial de diferentes materiais de chapas aplicadas como revestimento protetivo de matrizes de forjamento, a fim de auxiliar na conservação, reduzir os carregamentos termomecânicos gerados a cada peça forjada ou ciclo de forjamento, evitando-se assim deformações excessivas e desgaste da ferramenta.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para tanto, foram desenvolvidos os objetivos específicos e metas que são apresentadas a seguir:

- Identificar dentre as chapas analisadas, os materiais com potencial de aplicação como máscara protetiva avaliando as propriedades e parâmetros de maior influência no processo;

- Analisar o comportamento do conjunto matriz / máscara de revestimento / billet e o processo de forjamento através da modelagem numérica, utilizando o método de elementos finitos (FEM).
- Desenvolver uma metodologia de tomada de decisão para a seleção do material da máscara, escolha da estratégia de fabricação e dos principais parâmetros de processo para a aplicação de máscaras metálicas sobre matrizes de forjamento.
- Investigar experimental e numericamente o desempenho do método aplicado a uma geometria industrial básica através do desenvolvimento de projeto e aplicação dos materiais selecionados inicialmente.

## ***1.2 Contribuição científica e tecnológica***

Esta tese busca contribuir científica e tecnologicamente tanto para o aumento de conhecimento no que diz respeito a utilização de um novo conceito para a redução de custos no setor metalmeccânico, quanto sobre os principais parâmetros e o desenvolvimento da metodologia de projeto, de fabricação e de aplicação necessários para sua utilização.

A metodologia de aplicação de uma máscara metálica como revestimento contribui para o aumento da vida útil das ferramentas, impactando diretamente na redução dos custos de produção e no aumento da competitividade do produto forjado. Os parâmetros e geometrias de peça e de matrizes estudados permitem a utilização do conceito em diferentes âmbitos industriais, além de minimizar o desgaste adesivo e abrasivo da ferramenta base, bem como o tempo de troca para reparo e manutenção.

A investigação do processo através da modelagem numérica (2D/3D Deform<sup>TM</sup> software) envolve um modelo complexo – materiais com diferentes propriedades e comportamento mecânico em um ambiente de intensa troca termomecânica; avaliação do comportamento de dois componentes (billet e máscara protetiva) deformáveis entre matrizes elásticas; bem como a simulação completa do ciclo de forjamento (lubrificação, transferência e posicionamento do billet, forjamento e extração da peça) N vezes. Assim, a construção e validação do modelo, aliadas a análise final da previsão de desgaste da matriz de forjamento por simulação numérica computacional contribuem ainda para o ineditismo deste trabalho.

Além disso, este trabalho propõe aliar os avanços tecnológicos de desenvolvimento de aços para a fabricação de chapas com uma nova metodologia para proteção de matrizes de forjamento a quente, possibilitando a redução dos custos com paradas de produção e tratamentos superficiais de ferramenta.

### 1.3 Estrutura do trabalho

Conforme pode ser observado na Figura 1.3, esta tese de doutorado está disposta sequencialmente em 6 capítulos, seguidos das sugestões para trabalhos futuros, da lista de referências citadas e dos apêndices.

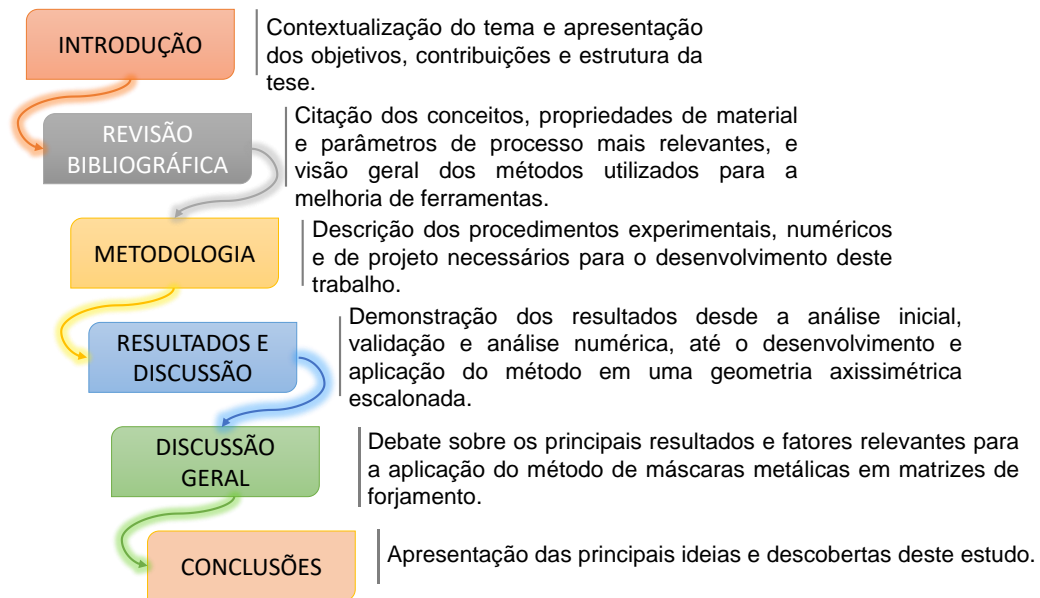


Figura 1.3 Estrutura geral da tese. Fonte: elaborado pela autora.

Além disso, este trabalho de doutorado foi realizado através do desenvolvimento de diferentes fases de análises experimentais, numéricas e de projeto. A Figura 1.4 apresenta uma visão geral e sequencial das etapas desenvolvidas.

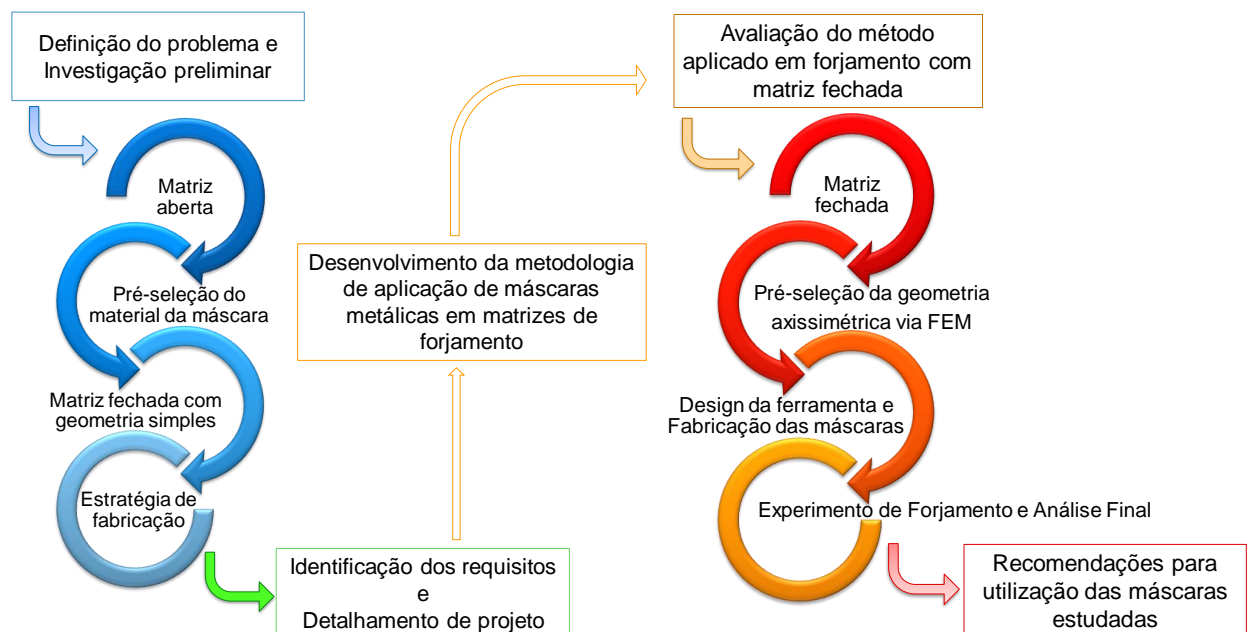


Figura 1.4 Representação das fases de desenvolvimento da tese. Fonte: elaborado pela autora.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Processos de conformação mecânica são utilizados para a fabricação de componentes mecânicos e da indústria em geral. Novas tecnologias de desenvolvimento, focadas em equipamentos e métodos de precisão, têm surgido para garantir a qualidade e durabilidade do produto. Da mesma maneira, há uma busca intensa na redução dos custos de produção, paradas para manutenção de equipamentos e reparos de ferramentas envolvidos no processo.

O desempenho das ferramentas de conformação empregadas principalmente em processos de transformação de materiais a elevadas temperaturas é fator de competitividade para seus fabricantes e usuários, sendo determinada fundamentalmente pelas características metalúrgicas do material que constitui a ferramenta (IPT, 2015; CAO et al, 2019; FOSTER et al, 2019; GRONOSTAJSKI et al, 2019; VALTONEN et al ,2019).

Este capítulo traz o embasamento teórico necessário para entendimento das propriedades e interações do processo de forjamento a quente, características das ferramentas empregadas e suas solicitações, assim como propriedades e características das novas gerações de materiais metálicos.

### 2.1 *Processos de forjamento*

Forjamento é um processo de conformação mecânica, que, mediante aplicação de esforços compressivos, altera plasticamente a forma dos materiais fazendo com que o mesmo assuma o contorno ou a forma da ferramenta conformadora, chamada matriz ou estampo (ALTAN et al 1999; BRESCIANI et al, 1997). A classificação do processo de forjamento vai depender da temperatura em que ocorre, podendo ser a frio, a morno ou a quente.

O trabalho a quente ocorre em temperaturas acima da temperatura de recristalização do material, e por isso não requer apenas menor energia mecânica para deformar o metal, mas também proporciona maior facilidade para o escoamento plástico sem o surgimento de trincas (SANTAELLA, 2009).

Um processo de forjamento a quente envolve um sistema complexo no qual o material a ser conformado (*billet*), normalmente a 1000°C-1200°C, no caso de forjamento de aço, é posicionado entre duas matrizes para a obtenção de uma forma final desejada. O trabalho a quente é definido como a deformação em condições de temperatura e velocidade de deformação tais que processos de recuperação e recristalização ocorrem simultaneamente com a deformação (CHIAVERINI, 1986; BRESCIANI, 1997; MIRANDA, 2012; KALPAKJIAN, 1985).



A fim de reduzir o gradiente térmico e, com isso, minimizar os efeitos da fadiga térmica provenientes do contato entre o *billet* e matriz, as ferramenta para forjamento a quente são pré-aquecidas e mantidas a uma temperatura de 200 ou 300°C durante o processo. Além disso, os aços ferramenta apresentam uma fragilidade relativamente alta em temperatura ambiente, não sendo capazes de resistirem às altas tensões que se desenvolvem durante o processo (CHIAVERINI, 1986; BRESCIANI, 1997; MIRANDA, 2012; KALPAKJIAN, 1985).

Assim, durante um processo de forjamento a quente, especialmente em matriz fechada, existe uma intensa troca térmica entre o *billet* e a ferramenta. Devido à aplicação da força necessária para deformar o metal, altas tensões normais se desenvolvem na interface entre o metal sendo deformado e a ferramenta (LI et al, 1998). No momento em que a deformação é iniciada estabelece-se um movimento relativo entre as superfícies da matriz e do *billet*, gerando atrito e calor na interface mesmo com a utilização de lubrificantes, com o desenvolvimento de tensões tangenciais, no mínimo iguais a metade da tensão de escoamento do material sendo forjado. À medida que a deformação prossegue, vai existindo cada vez mais área de contato entre a superfície do *billet* e a superfície da ferramenta e um maior tensionamento da ferramenta (SCHAEFFER, 2006).

Assim, o preenchimento da cavidade da matriz está diretamente relacionado ao aumento das tensões, podendo atingir valores muito maiores que a tensão de escoamento do material. Sendo que as tensões máximas na ferramenta podem ser percebidas quando o forjamento está quase completo, no início da formação da rebarba (SCHAEFFER, 2006; STARLING & BRANCO, 1997).

De acordo com Altan et al (2004), o processo de forjamento em matriz fechada depende diretamente de fatores e parâmetros relacionados ao produto, aos materiais, à ferramenta, ao equipamento, à deformação e à interface de trabalho. A Figura 2.1 apresenta o diagrama espinha de peixe com os parâmetros para o forjamento a quente em matriz fechada

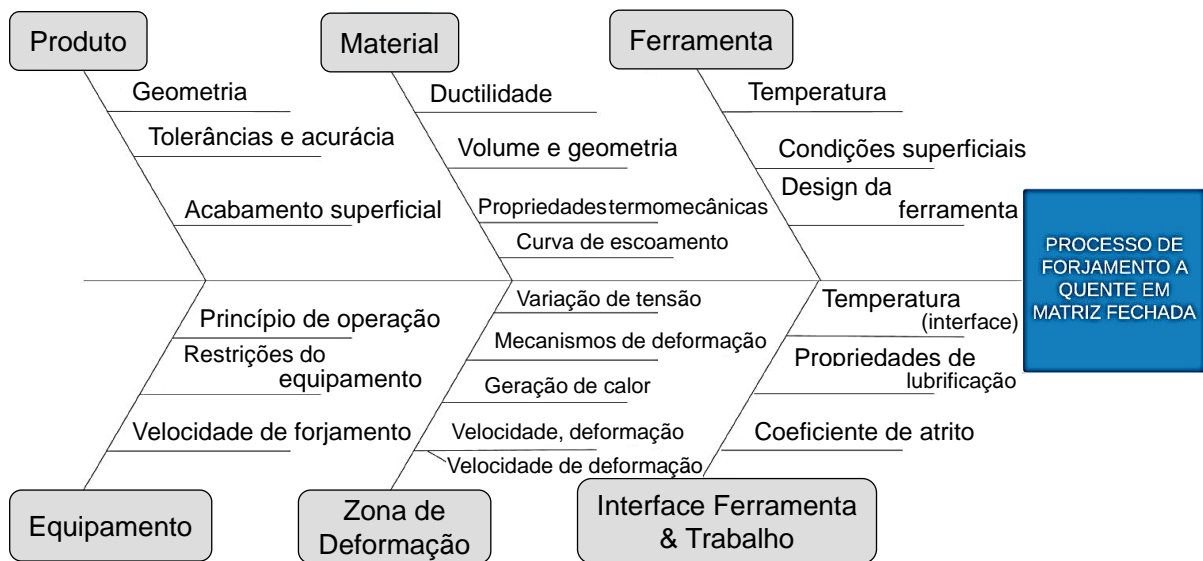


Figura 2.1 Parâmetros do forjamento a quente em matriz fechada. Fonte: adaptado de Altan et al, 2004.

## 2.2 Processos de conformação de chapas metálicas

De acordo com Schaeffer (2006) o processo de estampagem envolve parâmetros tecnológicos, de ferramental, de equipamento, de material, e da geometria do componente, como força, energia, deslocamento e tempo; tensões, deformações, temperatura, espessura, entre outros. Como pode ser observado na Figura 2.2, vários parâmetros estão envolvidos e devem ser cuidadosamente analisados para garantir um produto estampado de qualidade.

Conforme Callister (2013), muitos materiais são submetidos a forças ou cargas de serviço; sendo necessário conhecer as características do material e projetar o elemento estrutural a partir do qual ele é feito de maneira que qualquer deformação resultante não será excessiva evitando a fratura. O comportamento mecânico do material reflete a correlação entre sua resposta ou deformação a uma carga ou força aplicada. Importantes propriedades mecânicas são resistência mecânica, dureza, ductilidade e rigidez.

Tais propriedades possuem influência direta na conformação de materiais metálicos a qual envolve deformações plásticas que podem se tornar críticas quando se trata de componentes fabricados através de chapas finas (< 5,0 mm).

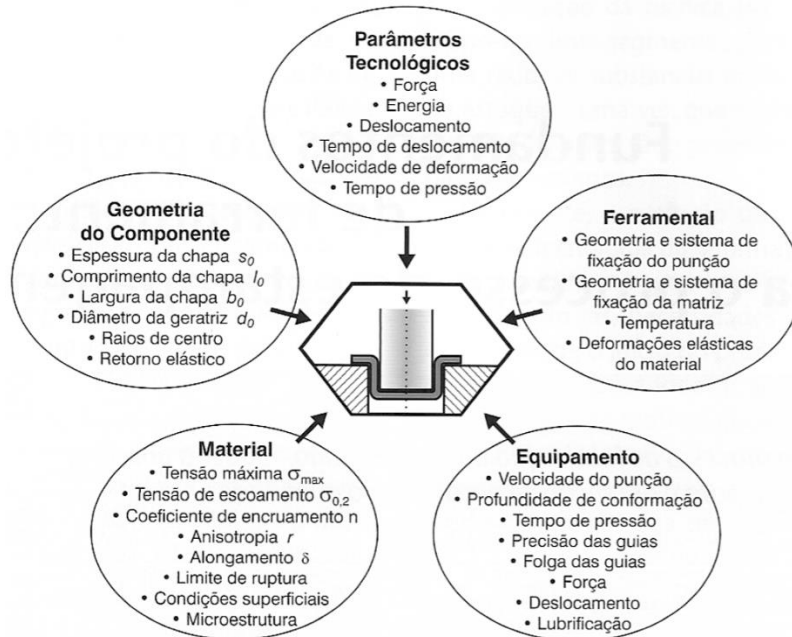


Figura 2.2 Parâmetros do processo de estampagem. Fonte: Schaeffer, 2006.

Os processos de conformação de chapas metálicas podem ser realizados através de estampagem profunda, incremental ou a quente. O processo de estampagem incremental (Figura 2.3) torna-se uma alternativa para o controle dos parâmetros aliado à versatilidade de um processo com baixo custo de ferramental, podendo ser utilizado em equipamentos como tornos e fresadoras que possuam comando numérico computacional.

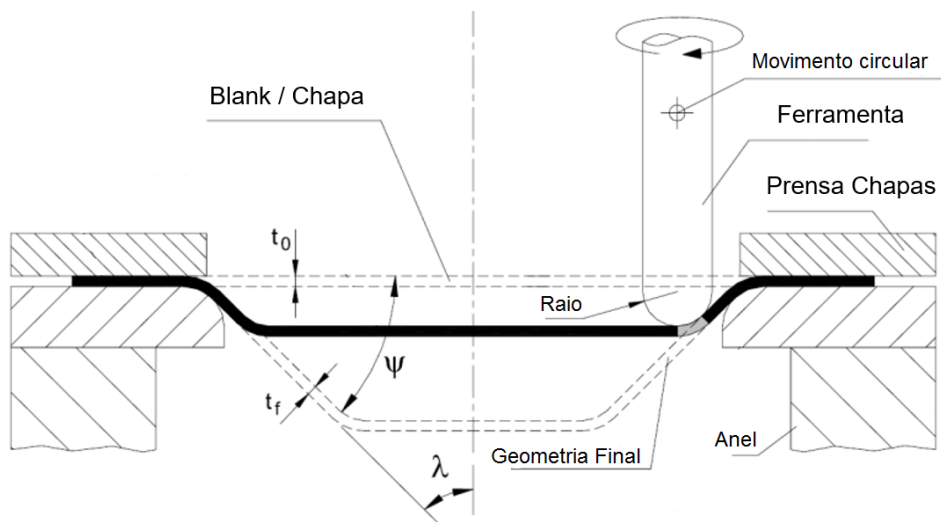


Figura 2.3 Desenho esquemático do processo de estampagem incremental. Fonte: adaptado de Martins et al., 2008.

### 2.3 *Método de elementos finitos - Fundamentos e aplicação*

O método dos elementos finitos é um tratamento numérico importante para a resolução de problemas referentes a modelagem físico-matemática dos processos de conformação plástica dos metais. Apresentando-se como o mais próximo das condições reais de trabalho, o método pode ser aplicado às configurações geométricas complexas, como também pode considerar as condições reais de atrito e das variações de propriedades mecânicas dos materiais sob conformação plástica (BRESCIANI et al, 2011).

Este método provou ser uma ótima ferramenta para análise do processo de conformação mecânica, incluindo análise de tensões residuais (WANG, 2002). Indústrias de conformação têm utilizado tal ferramenta para a otimização de custo e qualidade na execução do produto, para o desenvolvimento de novos produtos em menos tempo, para aumentar o know-how no processo de conformação e compensar a diferença da experiência tecnológica e para auxiliar em treinamentos, aumentando a eficácia de marketing (TEKKAYA, 2000; ARBAK, 2007).

Segundo Palmeira (2005), o uso de análises numéricas através do método de elementos finitos, tem permitido aperfeiçoar o estudo dos diferentes processos de fabricação, de maneira que se evitem erros de projeto que possam acarretar custos elevados, na sua correção, através de longas etapas de *try-out*. Desta forma, simulações computacionais por elementos finitos permitem melhorar o processo antes mesmo da construção de protótipos, evitando, assim, investimentos desnecessários (TEKKAYA, 2000; ALTAN & VELAZQUEZ, 1996).

Marques et al (2012) apresentaram um estudo sobre a simulação do forjamento de uma peça utilizando o software PEP/Larstran, que é um sistema de simulação numérica de processos termomecânicos baseado no Método de Elementos Finitos (MEF) que permite a criação e simulação de modelos 2D e 3D.

O processo de simulação divide-se em três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento. Este método propicia a inserção de uma variedade de dados para a análise de processos, pode-se variar parâmetros, a fim de encontrar a melhor combinação destes para o resultado que se deseja. Porém, a validação numérica torna-se necessária para garantir que os resultados obtidos sejam úteis e coerentes com a realidade do processo. Os principais cuidados constados na pesquisa são: inserção de dados reais da peça que será forjada, realização de ensaios para obtenção das curvas de escoamento, possuir conhecimento dos recursos disponíveis no sistema, além de compreender e interpretar os resultados obtidos com a simulação.

Conforme Tisza et al (2012), uma série de parâmetros e fatores relevantes devem ser consideradas no decorrer do desenvolvimento da metodologia da simulação numérica. Dentre elas, destacam-se a correta discretização da peça; o método ou solução matemática mais adequada e eficiente; memória e tempo computacional reduzidos.

Após a definição dos parâmetros de cálculo e levando em consideração que a peça é projetada para um processo específico, os seguintes passos levam a uma modelagem ou projeto racional do processo (TISZA et al, 2012):

- Projeto preliminar da matriz e seleção de parâmetros de processo usando o conhecimento baseado na experiência.
- Verificação do design inicial e das condições de processo utilizando modelagem de processos.
- Adaptação do modelo e do desenho da matriz e seleção inicial das variáveis do processo, conforme necessário, com base nos resultados de simulação do processo.
- Conclusão da fase de concepção da geometria ou design do modelo e fabricação das matrizes e
- Realização de *try-outs* de matrizes em equipamentos de produção.

#### **2.4 Design e seleção de materiais**

O planejamento do processo de forjamento a quente envolve uma série de requisitos básicos com relação ao produto, ao material, às matrizes e ao equipamento utilizados, assim como a zonas de deformação e interface de trabalho e ferramenta (ALTAN et al. 2004). A escolha do sobremetal está diretamente relacionada ao equipamento utilizado, ao preenchimento e dimensionamento das matrizes de forjamento. As tolerâncias dimensionais do produto forjado deverão considerar o desgaste das matrizes, assim como, os ângulos de saída, o arredondamento de cantos salientes e reentrantes, e a escolha da linha de rebarbas, que envolvem a facilidade de extração do forjado e preenchimento das cavidades da matriz.

À medida que a cavidade da matriz vai sendo preenchida, ocorrem altas tensões, que podem ser muito maiores que a tensão de escoamento do material. Sendo que as tensões máximas na ferramenta podem ser percebidas quando o forjamento está quase completo, no início da formação da rebarba (SCHAEFFER, 2006; STARLING & BRANCO, 1997).

Segundo Button (1998), os parâmetros de um forjamento convencional a quente estão inter-relacionados, sendo que cada etapa de conformação deve ser definida de maneira que o

processo seja bem dimensionado, para evitar elevada deformação, tensões excessivas e assim, reduzindo o risco de falhas prematuras.

Da mesma maneira, as propriedades do material utilizado devem estar de acordo com os requisitos exigidos de projeto. Segundo Ashby (2011), a estratégia de seleção do material deve inicialmente converter os requisitos de design em restrições e objetivos que podem ser aplicados ao banco de dados de materiais. Assim, tais requisitos podem ser expressos como função, restrições, objetivos e variáveis livres do material, ou seja, em um perfil de propriedades necessárias para a seleção do material mais adequado.

A Figura 2.4 apresenta os diagramas de seleção de material com relação ao módulo de Young vs. resistência, preço por kg e temperatura máxima de serviço para diferentes ligas de aço.

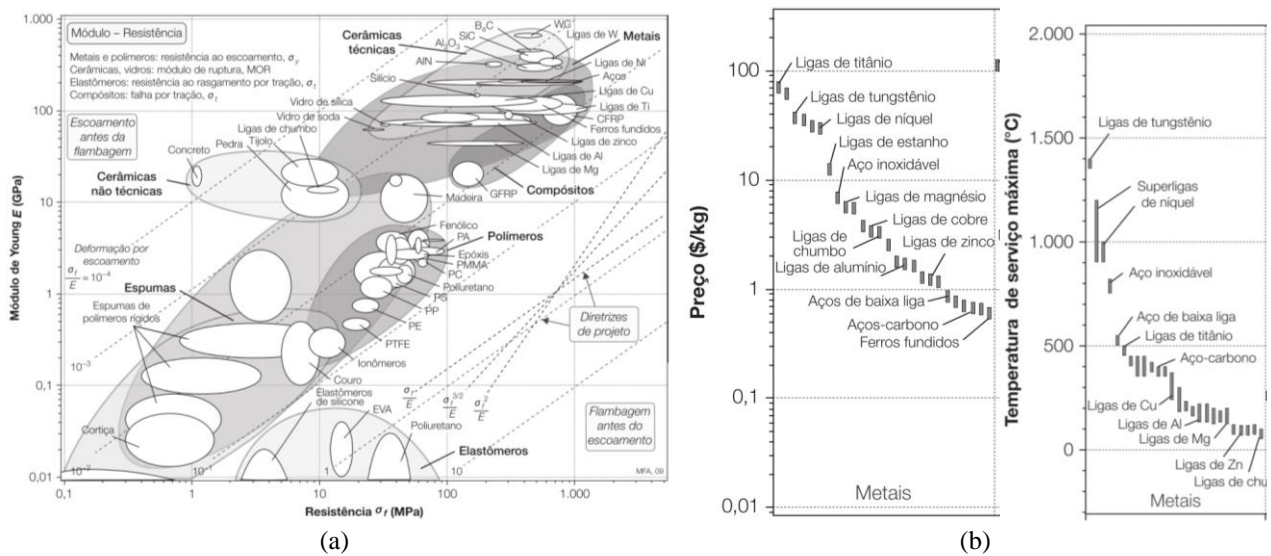


Figura 2.4 Diagramas de seleção de material (a) Módulo de Young x Resistência e (b) temperatura máxima de serviço e preço por kg. Fonte: Ashby, 2011.

Fatores como a taxa de desgaste vs. dureza e a resistência por custo relativo devem ainda ser considerados para a correta seleção do material de trabalho de acordo com o produto a ser fabricado. Conforme pode ser observado na Figura 2.5, materiais cerâmicos são capazes de aliar elevada dureza e menor taxa de desgaste que os metais (Figura 2.5a) porém, ao avaliarmos em termos de resistência (MPa) os materiais metálicos e compósitos superam os materiais cerâmicos (Figura 2.5b).

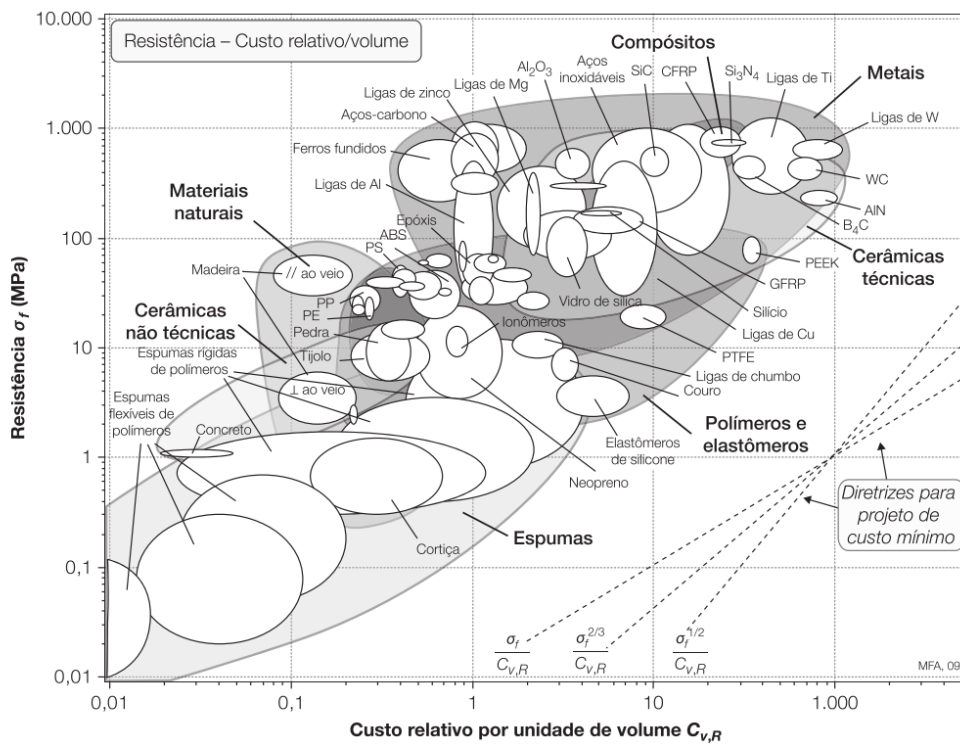
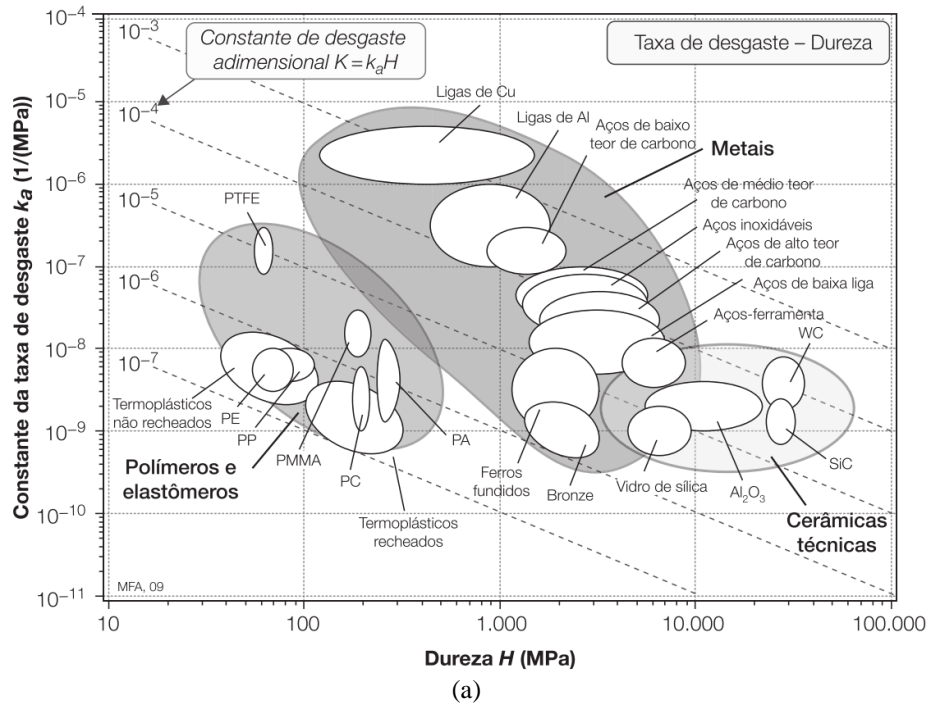


Figura 2.5 Diagramas de seleção de material (a) Taxa de desgaste x dureza e (b) Resistência por custo relativo. Fonte: Ashby, 2011.

## 2.5 Ferramentas de conformação

Tecnologias que visam o aumento da durabilidade de matrizes têm sido desenvolvidas com base na aplicação de tratamento superficial térmico ou termoquímico para aumentar a dureza superficial, o que diminui a ductilidade e a atuação dos mecanismos de abrasão e fadiga térmica e mecânica. Os tratamentos mais comuns são a nitretação ou carbonitretação em banho de sal, o PVD (*Physical Vapor Deposition*), o CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e o PACVD (*Plasma Aided Chemical Vapor Deposition*) (SANTAELLA, 2009).

Esses métodos têm demonstrado viabilidade no aumento da durabilidade de matriz, porém apresentam desvantagens quanto ao custo associado, ao fato de que requerem equipamentos especiais normalmente terceirizados, além de consumirem muito tempo conforme o tamanho da matriz.

Além disso, as camadas superficiais de ferramentas, modificadas por esses tratamentos, falham após certo tempo de produção. Nesse caso, toda a ferramenta deve ser reparada ou substituída o que implica em parada na produção, gerando altos custos e tempo de manutenção do equipamento e processo (ROBERTS, 1988; GABARDO, 2008).

Um dos fatores que afetam consideravelmente a vida útil das matrizes utilizadas em processos de alta temperatura, são mudanças microestruturais na superfície causadas pelo gradiente de temperatura, variando entre o aquecimento próximo à austenitização e o resfriamento abaixo ou perto da temperatura martensítica. Em casos em que a matriz sofre tal processo superficial de têmpera, forma-se uma camada branca muito resistente de martensita não temperada. Este fenômeno é especialmente ocasionado quando o lubrificante utilizado é a base de carbono. Esta camada pode ocasionar falhas e trincas na superfície, ocorrendo normalmente durante os dez primeiros ciclos de forjamento (SANTAELLA, 2009).

A vida em serviço das ferramentas é afetada por diversas variáveis e diferem de um caso para outro, sendo equivalente aos principais fatores que influenciam de forma significativa o processo como um todo do forjamento a quente (CALLISTER, 2013; DIETER, 1981; SCHAEFFER, 2006; STARLING & BRANCO, 1997; LU et al, 1998): Lubrificação; Temperatura da matriz; Temperatura da geratriz, ou de trabalho; Velocidade de forjamento.

Os aços ferramenta são ligas de aço que possuem em sua composição elementos como cromo, molibdênio e vanádio utilizados para fornecer propriedades mecânicas adequadas para as condições em que o forjamento ocorre (SERIACOPI, 2013).



Geralmente se aplica para trabalho a quente aços de média e alta liga, com baixos teores de carbono. As principais propriedades requeridas são resistência à deformação em temperaturas elevadas e no tratamento térmico, boa usinabilidade, resistência a trincas a quente e resistência ao impacto. Os tipos mais usuais dessa série são H11, H12 e H13, tendo suas principais aplicações na fabricação de moldes para fundição sob pressão de alumínio, ferramentas para extrusão a quente, matrizes de forjamento entre outras (GABARDO, 2008).

O desgaste de matrizes é um fenômeno tribológico que pode ser definido como a perda ou remoção progressiva de material da superfície atuante (gravura) da ferramenta. Pela mudança na topografia da matriz, o desgaste pode causar danos severos que levam a defeitos nos produtos e acabam provocando a falha da matriz (KCHAOU et al., 2010). Logo, desgaste e falhas de matrizes de forjamento não apenas reduzem a vida útil das ferramentas, como também podem resultar em produtos com condições superficiais intoleráveis. A crescente demanda da indústria por menores custos, maior produtividade e melhor qualidade estão entre as justificativas para que se busquem maneiras de incrementar a performance de matrizes (LESKOVSEK et al., 2009; BEHRENS et al, 2005; BEHRENS, 2008).

Conforme Cser et al (apud SANTAELLA, 2009), os principais mecanismos que reduzem a vida útil das matrizes, levando-as a sua substituição por degradação e baixas qualidades das peças finais forjadas a quente são principalmente: desgaste abrasivo e adesivo; fadiga térmica; fadiga mecânica e deformação plástica.

A Figura 2.6 apresenta um desenho esquemático apontando os principais mecanismos de falha que podem ocorrer nas matrizes de forjamento a quente.

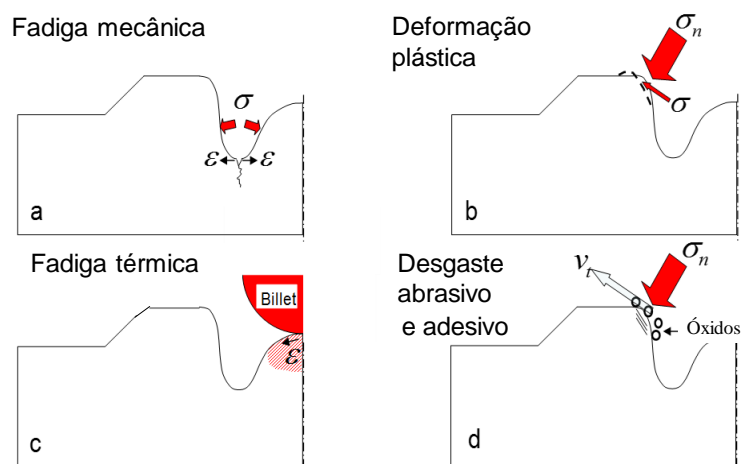


Figura 2.6 Mecanismos de falha. Fonte: adaptada de Santaella, 2010.

## 2.6 Possibilidades de melhoria de ferramenta

O setor metal mecânico busca cada vez mais produzir peças de boa qualidade, aliando acabamento superficial e resistência mecânica com custo reduzido. Para isso, as tecnologias emergentes são usualmente métodos de alto custo que depositam na superfície do aço uma camada de revestimento com materiais de elevada resistência termomecânica. Tais técnicas de revestimentos de superfície servem para aumentar a resistência ao desgaste e à corrosão, dependendo do material depositado e do controle dos parâmetros envolvidos.

A maior parte das tecnologias para o aumento da vida de matrizes, desenvolvidas através de tratamento superficial térmico ou termoquímico, visam aumentar a dureza superficial (Figura 2.7), o que diminui a ductilidade superficial e a atuação dos mecanismos de abrasão e fadiga térmica e mecânica. Os tratamentos mais comuns são a nitretação ou carbonitretação em banho de sal, o PVD (*Physical Vapor Deposition*), o CVD (*Chemical Vapor Deposition*) e o PACVD (*Plasma Aided Chemical Vapor Deposition*) (SANTAELLA, 2009).

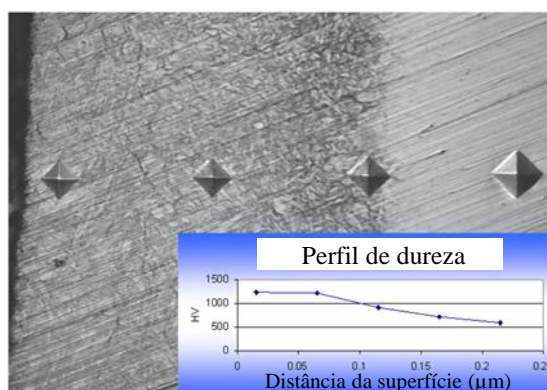


Figura 2.7 Camada transversal nitretada em aço ferramenta H13 e perfil de dureza Vickers. Fonte: Oerlikon Balzers Coating apud Santaella, 2009.

Tais métodos têm demonstrado a sua viabilidade e levado a um aumento significativo na vida útil de matriz em vários anos de pesquisa e/ou aplicação industrial. No entanto, suas desvantagens estão associadas ao custo relativamente alto, ao fato de que requerem equipamentos especiais normalmente não disponíveis em forjarias e consumirem tempo, dependendo do tamanho da matriz. Além disso, todas as camadas superficiais de ferramentas, modificadas por esses tratamentos, falham após certo tempo de produção, ou seja, o desgaste é inevitável e ocorre em diferentes locais da matriz. Nesse caso, toda a ferramenta deve ser reparada ou substituída o que implica em parada na produção, gerando altos custos e tempo de manutenção do equipamento e processo (GABARDO, 2008).

Ferramentas utilizadas em processos a altas temperaturas sofrem mudanças microestruturais devido ao aquecimento superficial e sub superficial, que atingem temperaturas

maiores do que a temperatura de austenitização ou próximas, e resfriadas abaixo ou perto da temperatura martensítica. Nestes casos, forma-se uma camada branca muito resistente de martensita não temperada. Este fenômeno é especialmente ocasionado quando um lubrificante a base de carbono é utilizado. Esta camada pode, por fim, ocasionar falhas e trincas na superfície, ocorrendo normalmente durante os dez primeiros ciclos de forjamento (SANTAELLA, 2009).

Conforme Pye (2015), as indústrias de forjamento têm procurado e testado diversas técnicas metalúrgicas para a melhoria de superfícies tanto para o aumento da longevidade das matrizes quanto para o aumento da produtividade das prensas. A técnica metalúrgica mais comumente utilizada para o processamento de superfícies é a nitretação, aplicada em suas diferentes formas. Este processo tem se mostrado o mais viável e tem sido o mais aceito comercialmente devido à baixa temperatura de processamento e de não haver a necessidade de tempera o que reduz o risco de distorção em peças com formas e seções complexas. Porém, os equipamentos necessários ao processo de nitretação das camadas superficiais dependem da geometria das matrizes, podendo resultar em alto custo e defeitos de raio. Além disso, os parâmetros necessários para um bom resultado devem ser controlados de maneira que seja evitada a formação de camada branca, garantida uma profundidade de camada suficiente e equilibre as tensões residuais evitando a distorção.

Pye (2015) afirma ainda que há um grande esforço de pesquisa no desenvolvimento de materiais de base, os quais o custo é o fator majoritário. Mas não importando o quão bom seja o material de base, ele inevitavelmente irá falhar seja pela longevidade, trincamento ou fadiga térmica. A fadiga térmica está relacionada com o tempo de contato entre a peça de trabalho quente e a matriz de forjamento. Repetidos contatos causam gradientes térmicos entre o centro e a superfície da matriz, resultando em tensões térmicas que causam microtrincamento da matriz, os quais podem levar a oxidação e eventualmente resultar em falhas catastróficas.

Para Shirgaokar (2008), os custos para fabricação de matrizes também contribuem significativamente para o custo da peça final e rentabilidade através de efeitos diretos e indiretos. Metodologias convencionais empregados pela indústria de forjamento para melhorar a vida de matrizes geralmente envolvem endurecimento superficial à base de difusão e tratamentos como a nitretação, boretação, difusão termo-reativa etc. sobre o aço ferramenta selecionado. Além disso, a utilização de revestimentos física e quimicamente depositados e ainda as sobreposições soldadas de superligas são também exploradas. Estas técnicas, embora

benéficas em reduzir o desgaste da ferramenta com materiais convencionais, ainda não fornecem resultados satisfatórios de vida útil na atual economia competitiva.

De acordo com Müller e Schruff (2016), a resistência ao desgaste abrasivo pode ser obtida principalmente pelos carbonetos, como cromo (Cr), vanádio (V), molibdênio (Mo) e carbono (C), presentes na composição química do material da matriz. Por isso, desenvolveram o aço especial para trabalho a quente CR7V-L, contendo 6,5 wt% de Cr e 0,42 wt% de C, a fim de aumentar sua resistência ao desgaste e dureza. Tal composição resultou em um material com uma microestrutura martensítica refinada e carbonetos dispersos, atingindo uma dureza de até 56,5 HRC. Testes mostram que a resistência do material CR7V-L é aproximadamente 60% maior quando comparado às matrizes de aço H13.

Marques (2019) avaliou o desgaste em forjamento a quente através da aplicação de dois revestimentos (carbonetos de cromo  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$  e de tungstênio  $\text{WC-10Co4Cr}$ ) por processo combinado de Nitretação e Aspersão oxi-combustível de alta velocidade (HVOF). Através deste método foi possível aumentar a dureza superficial consideravelmente (Figura 2.8), apresentando valores entre 900 e 1200 HV0,1. Os modos de desgaste abrasivo e fadiga térmica foram identificados como predominantes, assim como as diferenças entre coeficientes de expansão térmica do substrato e do revestimento geraram tensões e, conseqüentemente, falha no revestimento. Para esta análise, o revestimento de carbeto de tungstênio foi considerado mais resistente em função do desgaste e deformação plástica.

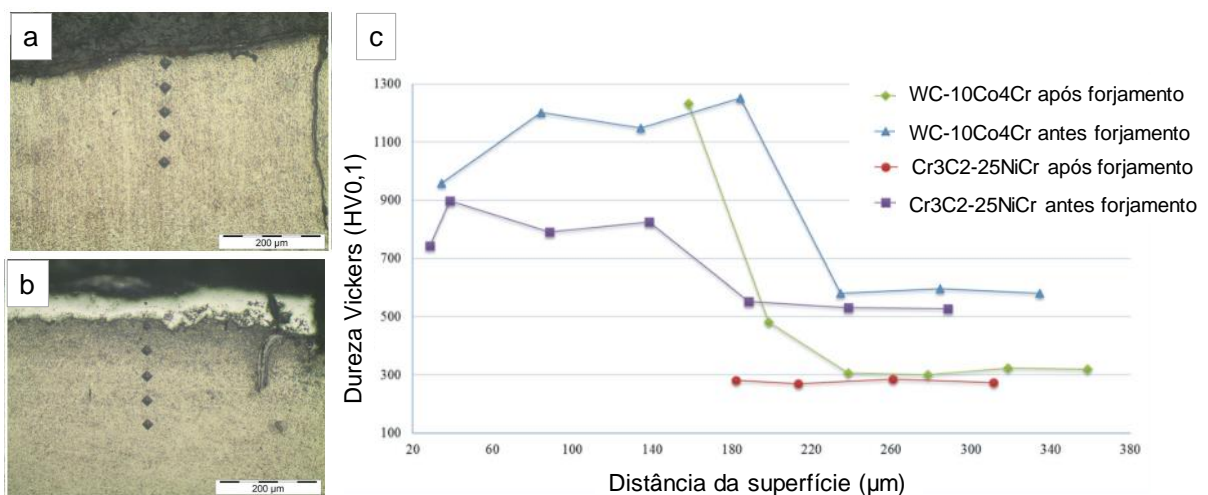


Figura 2.8 Análise de dois revestimentos depositados por processo combinado de Nitretação e HVOF: (a) revestimento  $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ , (b)  $\text{WC-10Co4Cr}$  e (c) perfil comparativo de dureza Vickers. Fonte: Marques, 2019.

Os métodos de tratamento superficial de ferramentas têm demonstrado a sua viabilidade e levado a um aumento significativo na vida útil de matriz (50 a 200%) em muitos anos de pesquisa e/ou aplicação industrial. Porém, desvantagens estão associadas ao custo

relativamente alto, a necessidade de equipamentos especiais normalmente não disponíveis em forjarias e consumirem muito tempo, dependendo do tamanho da matriz. Além disso, todas as camadas superficiais de ferramentas, modificadas por esses tratamentos, falham após certo tempo de produção. Nesse caso, toda a ferramenta deve ser reparada ou substituída o que implica em parada na produção para troca de setup, o que pode ser caro e demorado.

Assim, o projeto BRAGECRIM intitulado “*Evaluation of Sheet Metal Covers to Improve Tool Life in Forging*” surge como uma alternativa para proteger a ferramenta do desgaste bem como da fadiga termomecânica, pode ser uma simples “máscara” metálica, barata e fácil de trocar, adaptada à gravura da matriz base. A ideia básica é que a “máscara” protetora reduza o choque e as trocas térmicas, bem como o atrito, entre o material sendo forjado e a matriz. Portanto, as chapas metálicas passam a ser um fator importante para a viabilidade do projeto proposto. Avaliando as ligas de aço é possível perceber alto desenvolvimento tecnológico em função das demandas de eficiência energética e redução na emissão de gases, principalmente no setor automotivo.

De acordo com WorldAutoSteel (2017), aços avançados de alta resistência (*Advanced High Strength Steels – AHSS*) são caracterizados por microestrutura e propriedades metalúrgicas desenvolvidas especialmente para satisfazer os requisitos funcionais, por exemplo, de baixo peso (chapas finas), de elevada absorção de energia e, ao mesmo tempo, capazes de serem conformadas.

A Figura 2.9 apresenta uma visão geral dos aços AHSS utilizados no setor automotivo.

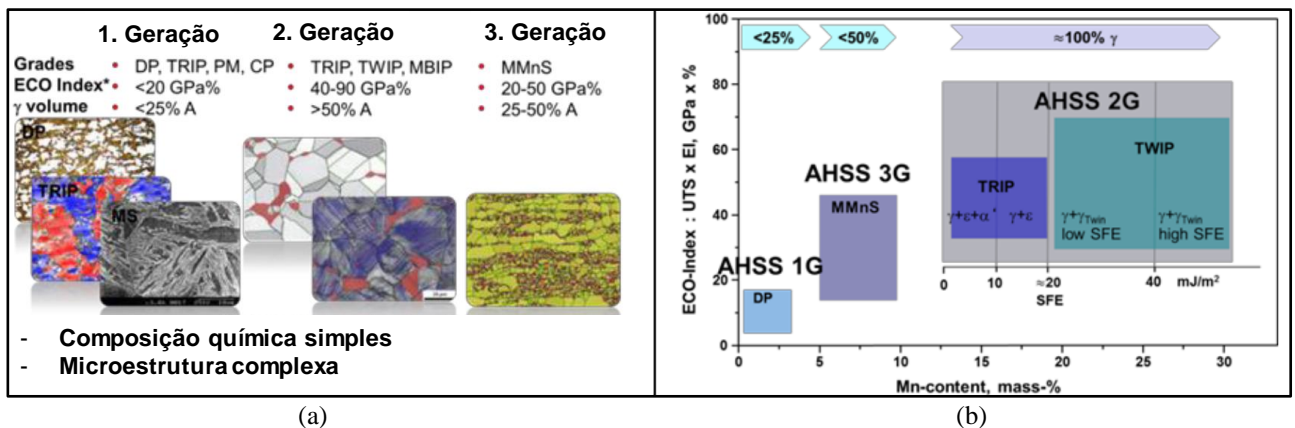


Figura 2.9 Aços AHSS utilizados no setor automotivo: (a) Propriedades mecânicas e microestruturais, e (b) Classes de aço com índice ECO e conteúdo de Mn e suas frações de fase de austenita. Fonte: adaptado de Breuer et al. 2017.

Conforme Breuer et al (2017), tais aços são classificados como de 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> gerações apresentando propriedades mecânicas e microestruturas distintas, conforme pode ser observado na Figura 2.9(a), assim, é possível definir uma microestrutura multifásica compreendendo

ferrita, martensítica e austenita com as propriedades mecânicas e tecnológicas desejadas. Algumas ligas AHSS de 3ª geração, juntamente com o fator de classificação ou índice ECO correspondente (coeficiente de eficiência), ou seja, o produto do valor resistência à tração e do alongamento total, são mostrados na Figura 2.9(b).

Por ser um projeto desenvolvido em cooperação, foram desenvolvidos diferentes pacotes de trabalho, tanto no LdTM (UFRGS, Porto Alegre) quanto no IBF (RWTH, Aachen).

Inicialmente K. Bobzin et.al realizaram experimentos de forjamento em matriz fechada sem a conformação prévia da máscara, sendo avaliada a possibilidade de aplicação direta no setup de forjamento. Chapas de material Ck55 (DIN 1.1203) com 1 mm de espessura foram fixadas nas extremidades das matrizes superior e inferior antes do processo de forjamento. O experimento foi realizado a uma velocidade de 50 mm/s, sendo possível observar uma redução de 40°C na temperatura das matrizes e tolerâncias geométricas admissíveis. Apesar disso, a máscara apresentou falha precoce, além da dificuldade de extração da peça forjada.

Segebade (2014) analisou experimental e numericamente a aplicação de três materiais – DC04 (1.0338), HC380LA (1.0550) e HCT690T (1.0947), conformados através do processo de dobramento de chapas. Experimentos foram realizados em uma matriz com duas cavidades de 35,70 mm de profundidade e dois ângulos distintos (6° e 15°), coberta pela máscara. Os resultados mostraram uma redução da amplitude de temperatura de 90°C, aumentando a vida da ferramenta em torno de 200%. Por outro lado, foram identificados fatores importantes como o movimento relativo da máscara, que pode causar dobras e falhas geométricas, assim como a impossibilidade de extração do produto forjado.

Rosenstock (2015) analisou, numérica e experimentalmente, a aplicação do conceito *die cover* utilizando o material DC04 (1 mm) como máscara em uma matriz com duas cavidades de diferentes ângulos de face (6° e 15°). A temperatura da matriz inferior foi reduzida de 610 para 470°C na região de maior sollicitação, o que representou 37,5% de redução na amplitude de carregamento térmico. O estudo mostrou que, mesmo utilizando um material de baixa resistência mecânica, foi possível reduzir o carregamento termomecânico da matriz de forjamento, aumentando sua vida útil. De acordo com o autor, a geometria da matriz e o material da máscara são parâmetros importantes do processo e, por isso, devem ser melhor analisados.

Wolfgarten et al (2015) determinaram a influência da geometria na aplicação de máscaras metálicas com revestimento de proteção em matriz fechada de forjamento a quente. A análise do estado de tensão mostrou que a profundidade e o ângulo das matrizes são os parâmetros principais, cuja variação leva a uma melhor aplicabilidade do conceito de cobertura

da matriz. Um ângulo de face maior previne a formação de rugas no fundo da matriz, enquanto uma menor profundidade reduz as tensões de tração na matriz e, portanto, também evita os fenômenos de desgaste e enrugando.

Yu et al (2016) investigaram as condições necessárias para evitar o enrugamento e redução de espessura da máscara durante o processo de forjamento. Três geometrias foram analisadas com diferentes profundidades e ângulos de parede, assim como três materiais para fabricação das máscaras: DC04, HS6-5-2 e 22MnB5. Os resultados mostram que, quanto menor a profundidade da matriz e maior o ângulo, menores são as tensões de tração na máscara durante o processo de forjamento, o que reduz o aparecimento de dobras e variações na espessura da máscara. Dentre os materiais analisados, as chapas de 22MnB5 apresentaram resultados promissores, resistindo a 7 ciclos de forjamento mantendo a geometria e tolerâncias aceitáveis.

Seeliger (2016) analisou através de simulação numérica computacional a aplicação de máscaras metálicas como proteção de matrizes para o forjamento de blocos de engrenagens. Os aços DC04, HS6-5-2 e 22MnB5 foram avaliados com diferentes três espessuras: 1,0; 1,5 e 2,0 mm. Após a realização de simulações 2D, o autor afirma que os aços 22MnB5 e HS6-5-2 com espessura de 2,0mm são indicados para utilização, pois, não apresentaram distorções durante o forjamento.

Ivaniski (2017) avaliou as propriedades mecânicas e metalúrgicas dos aços de alta resistência DP600 e Hardox450®, visando a aplicação em máscaras de forjamento a quente. Ensaaios evidenciaram que o aumento da temperatura reduz o coeficiente de encruamento e a espessura das chapas, tanto em estiramento uniaxial quanto biaxial, evidenciando os efeitos de envelhecimento por deformação dinâmica. As propriedades mecânicas do aço bifásico (DP600) como dureza e limite de resistência, só diminuíram após ciclos de aquecimento a 500°C, apresentando aumento na ductilidade. Por outro lado, o Hardox450 possui uma faixa de fragilização da martensita entre 300 e 400°C, apresentando elevada dureza e alta tensão de escoamento em torno de 780 MPa a 500°C. Em contrapartida, este aço apresenta baixa ductilidade com 10% de alongamento quando comparado ao DP600 que possui menor quantidade de martensita na microestrutura e grãos de ferrita com 20% de alongamento. O autor afirma ainda que o material Hardox450 pode ser conformado a temperatura de 700°C, podendo assim ser utilizado como máscara de proteção para matrizes de forjamento a quente.

Estudos realizados por Azevedo et al. (2018) mostraram o desgaste em função da rugosidade em máscaras de material 22MnB5 (1,3 mm) sem tratamento prévio aplicadas ao forjamento a quente em matriz aberta. Neste trabalho foi possível forjar 200 peças sobre a

máscara e os autores apontam o posicionamento manual do billet, a oxidação e aderência como fatores de influência no desgaste. Porém, os detalhes de temperatura da matriz inferior e solicitações termomecânica e impacto não foram mencionados.

Yu et al (2019a) avaliaram o conceito de máscara metálicas aplicadas a uma geometria pré-existente de chapas fabricada através de estampagem profunda – cruzeta ou junta universal, com 30 mm de profundidade e 3° de ângulo de parede. Foram realizadas análises experimentais e numérico computacionais utilizando o material 22MnB5 (DIN 1.5528) com 1 mm de espessura. A máscara de proteção foi submetida a 40 ciclos de forjamento, sendo que a espessura final medida foi de 0,22 mm. A aplicação desta máscara reduziu em 40°C a amplitude térmica na matriz inferior, sendo que os resultados da simulação numérica mostraram uma redução nas tensões de von Mises em torno de 944 MPa na superfície da matriz de forjamento.

Rosiak et al. (2019) investigaram o comportamento do material 22MnB5 com 1,3 mm de espessura através do método de empilhamento de chapas para a determinação das curvas de escoamento nas temperaturas 650, 750 e 850°C. Utilizando uma velocidade de deformação de  $1 \text{ s}^{-1}$ , as curvas apresentaram comportamento similar aos resultados de tração e as tensões variaram de 350 MPa a 225MPa para as temperaturas de 650°C e 850°C, respectivamente.

Yu et al (2019b) avaliaram experimentalmente a capacidade de proteção da máscara em aço 22MnB5 em função do desgaste da matriz. Os autores realizaram experimentos de forjamento com e sem a aplicação de máscara de 1,5 mm de espessura, sendo que as matrizes foram projetadas para manter as dimensões do produto forjado. A máscara apresentou falha após 80 ciclos de forjamento com redução significativa de espessura. O desgaste foi medido através das coordenadas superficiais antes e depois da realização dos experimentos, com variações na ordem de 0,0029mm com a aplicação de máscara e 0,022mm sem a aplicação da máscara. Assim, os autores apontam uma redução de 98% no desgaste da ferramenta com a aplicação de máscara metálica.

Estudo realizado por Costa et al (2019) avaliou o material 22MnB5 (1,3mm) tratado termicamente em condições similares ao processo de estampagem a quente, seguido da aplicação como máscara no forjamento a quente. Segundo os autores, o tratamento do material ocorreu dentro do campo A+B (austenita e bainita), sendo que o resfriamento a partir deste ponto acontece ao ar e resulta em uma microestrutura composta por bainita superior e perlita. Os principais tipos de desgaste superficiais verificados foram o abrasivo e o por deformação plástica. Entretanto, as máscaras demonstraram alta resistência ao desgaste, sem a presença de falhas que inviabilizassem seu uso até a condição estudada, ciclo de 100 forjamentos.



### 3 METODOLOGIA

---

A fim de avaliar a utilização de chapas metálicas como revestimento (máscara) para matrizes de forjamento a quente, o presente estudo está dividido em três principais fases, conforme apresentado na Figura 3.1: (I) análise e seleção do material da chapa; (II) identificação dos fatores de influência do processo e regiões críticas na máscara e na matriz; (III) estratégia de conformação das máscaras de revestimento e determinação dos parâmetros de influência no comportamento do conjunto *billet*/máscara/matriz. Além disso, através da metodologia de design e projeto de produto e seleção de material, serão analisados os requisitos básicos para o desenvolvimento de um método de aplicação de máscaras metálicas como revestimento de ferramentas de forjamento.

Foram utilizadas simplificações iniciais em termos de geometria para a identificação dos parâmetros do processo, comportamento entre o conjunto *billet*-máscara-matriz, validação numérica e seleção de materiais com potencial para aplicação como máscara de revestimento. Após isso, os resultados obtidos através das análises experimentais e numéricas fornecem os dados necessários para a análise do comportamento do forjamento e aplicação de máscara em uma geometria mais complexa.

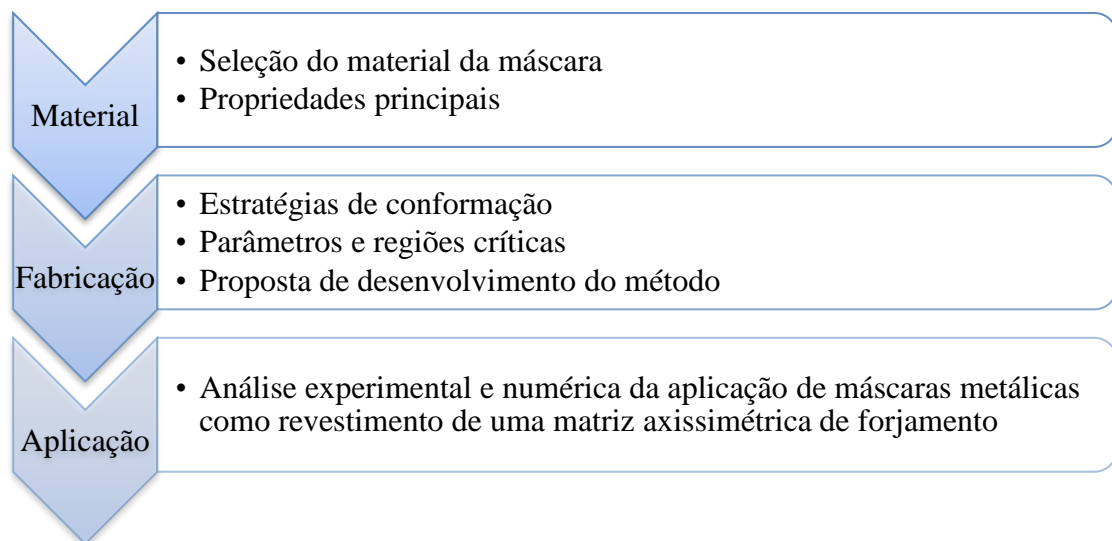


Figura 3.1 Etapas de avaliação e desenvolvimento do método de aplicação de máscaras metálicas como revestimento de matrizes de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

Cada uma das fases de avaliação e desenvolvimento do método proposto foram subdivididas em etapas, conforme apresentado na Figura 3.2, sendo estas compostas por análises experimentais e numéricas (FEM).

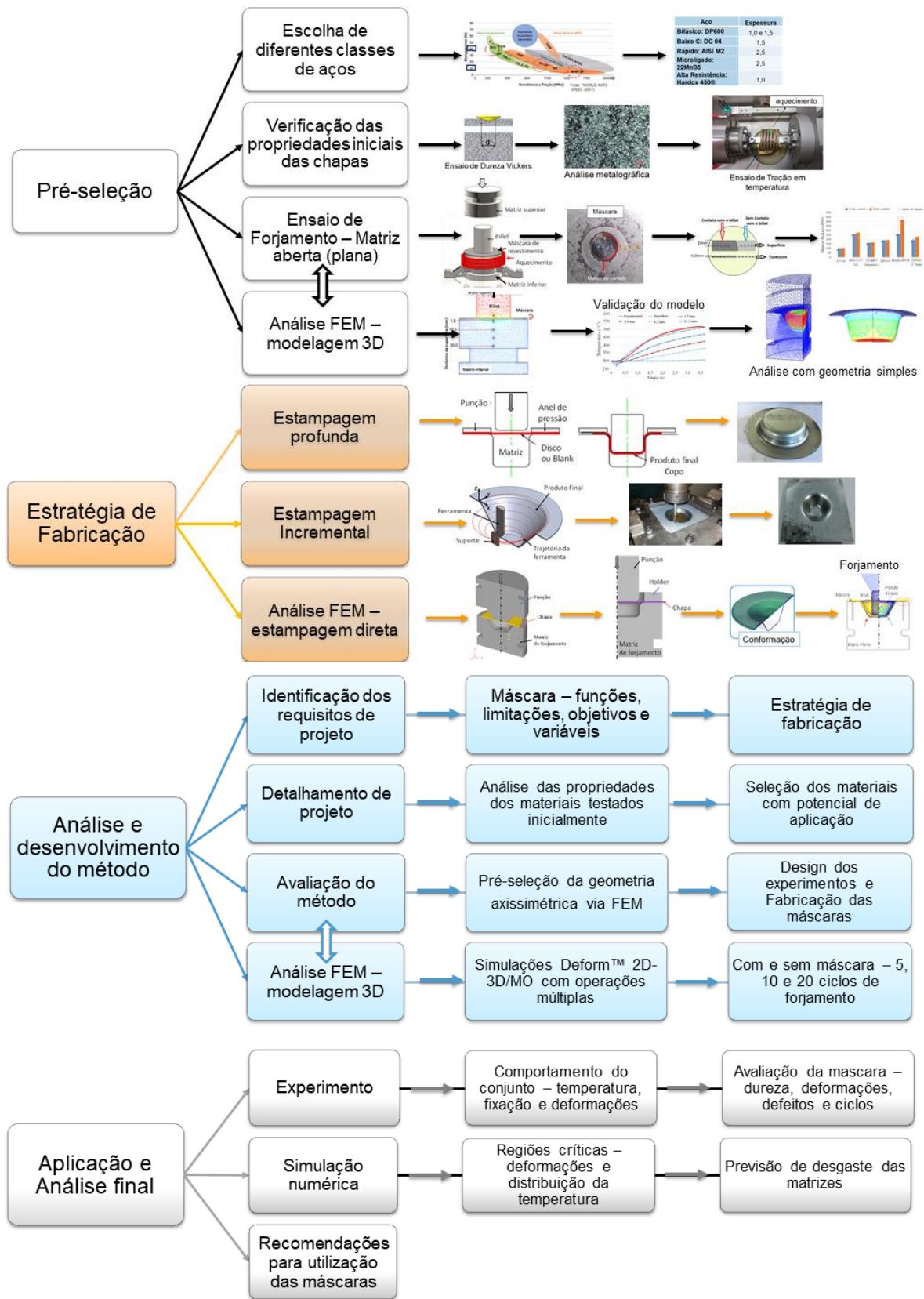


Figura 3.2 Etapas de avaliação e desenvolvimento do método proposto. Fonte: Elaborado pela autora.

Por se tratar de um método incomum, a análise do material mais adequado inicialmente irá considerar cinco classes de aço disponíveis para chapas. Conforme pode ser observado na Figura 3.3, o aço convencional (*Mild* - grau DC04) foi escolhido por apresentar elevado alongamento, além de ser considerado de baixo custo. Enquanto o aço bifásico (DP) e os aços de elevada resistência (AHSS) apresentam menor alongamento, porém com maior resistência mecânica, sendo considerados promissores para a análise inicial de seleção do material. Para tanto, as propriedades mecânicas e térmicas destes materiais pré-selecionados foram avaliadas através da caracterização do material e do ensaio de forjamento em matriz aberta.

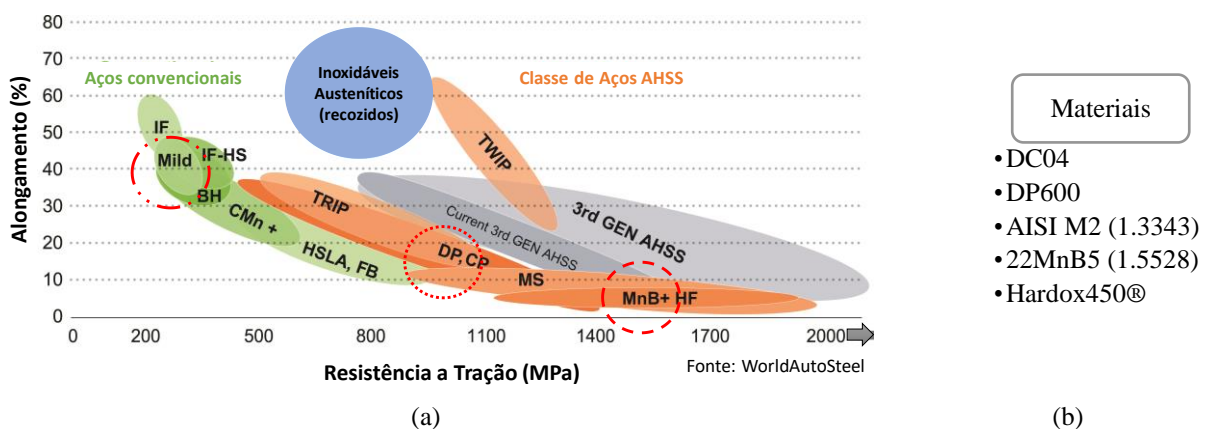


Figura 3.3 Seleção do material para aplicação como revestimento de matrizes através do gráfico de ductilidade. Fonte: adaptado de WorldAuto Steel, 2017.

Além de mudanças conhecidas para o aumento da vida útil das matrizes como, por exemplo, temperatura e velocidade de forjamento, lubrificação e alterações metalúrgicas superficiais nas matrizes, é possível aumentar a vida útil das matrizes com mudanças geométricas do desenho do forjado (Santaella 2009), ou seja, através da modificação do projeto de matrizes. Portanto, após a seleção da chapa, a próxima etapa constitui a análise da aplicabilidade dos materiais pré-selecionados sobre matrizes de forjamento com geometria simples.

A Figura 3.4 apresenta o desenho esquemático das matrizes utilizadas para a análise do comportamento dos materiais pré-selecionados quando aplicados como revestimento de proteção em processos de forjamento a quente.

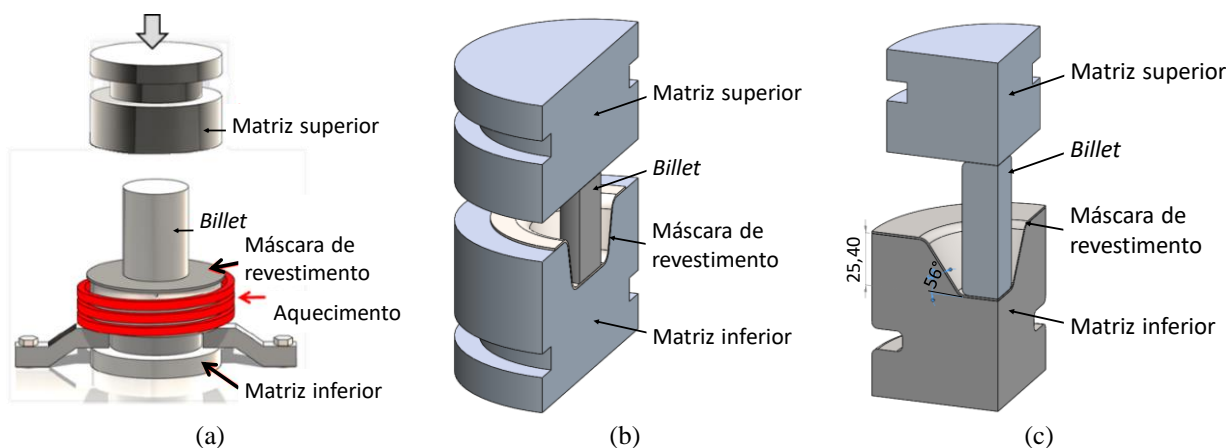


Figura 3.4 Geometria de forjamento para análise inicial (a) matriz aberta (plana), (b) geometria simples 1 (matriz cilíndrica) e (c) geometria simples 2 (matriz cônica). Fonte: Elaborado pela autora.

Três estratégias de conformação da chapa foram consideradas: (I) a estampagem profunda e (II) incremental, além de analisar a possibilidade de conformação da chapa (III) diretamente no setup de forjamento, ou seja, utilizando as próprias matrizes de forjamento, como alternativa para a redução de custos do processo.

Finalizadas as etapas de análise do material pré-selecionado, análise do comportamento do conjunto com geometria simples e estratégia de fabricação da máscara; foi possível realizar uma avaliação aprofundada das propriedades, parâmetros e requisitos de projeto, para então desenvolver uma proposta metodológica de aplicação deste método de revestimento através de máscaras metálicas.

Por fim, a investigação da aplicabilidade de máscaras metálicas como proteção de ferramentas foi realizada em uma geometria mais complexa, para o forjamento de blocos de engrenagens. Para este caso, uma matriz axissimétrica foi desenvolvida e analisada experimental e numericamente.

Uma descrição mais detalhada da metodologia utilizada em cada fase de análise está apresentada nos próximos subcapítulos.

### 3.1 Seleção do material da máscara

Inicialmente chapas de aço foram testadas quanto as suas propriedades termomecânicas, conforme as etapas apresentadas na Figura 3.5. Na primeira etapa foi realizada a caracterização da matéria-prima das chapas (como recebidas) e, posteriormente, realizou-se ensaios de forjamento em matriz aberta (geometria plana) para avaliar as diferentes condições do processo e validar o modelo numérico. Os resultados foram comparados para analisar o comportamento de cada material após o processo de forjamento com geometria plana, avaliando a sua

performance quanto à resistência, variações de microestrutura e dureza. Após esta análise inicial, os materiais foram pré-selecionados e testados em matrizes de forjamento com uma geometria simples, passando então para a análise do processo de conformação mais adequado ao desenvolvimento e aplicação das máscaras como revestimento.

Além da realização das etapas experimentais, o método de elementos finitos (FEM) foi utilizado tanto para a análise do comportamento do conjunto (máscara/matriz/billet), quanto para a avaliação de diferentes geometrias de forjamento. O modelo construído e validado através dos resultados experimentais, foi então utilizado para avaliações posteriores mais complexas, com diferentes geometrias e profundidades, interações de material, condições de contorno (temperatura e atrito), análise de tensões e comportamento do conjunto máscara/matriz em diferentes condições.

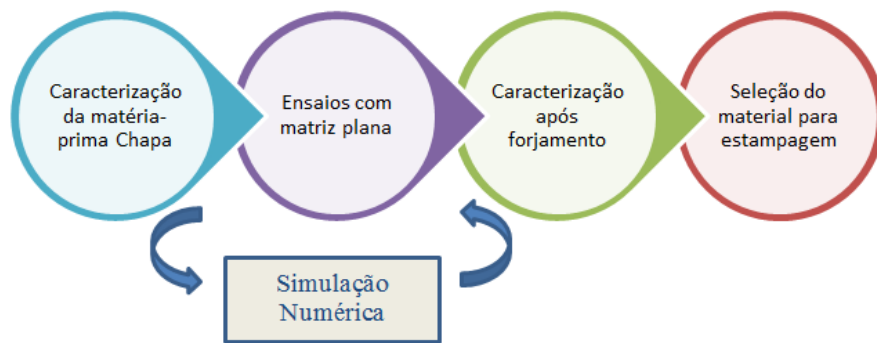


Figura 3.5 Desenho esquemático da metodologia inicial de seleção do material da máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.1.1 Caracterização inicial do material

Na Tabela 3.1 estão apresentadas as classes dos materiais analisados experimentalmente com as respectivas espessuras iniciais.

Tabela 3.1 - Valores de espessura para cada material do corpo de prova.

Material	Espessura (mm)
Aço bifásico: DP600 / DIN EN 10346	1,0 e 1,5
Aço de baixo carbono: DC 04/DIN 1.0338	1,5
Aço rápido: M2 ou HS6-5-2C/ DIN 1.3343	2,5
Aço microligado ao Boro: 22MnB5/DIN 1.5528	2,5
Aço de alta resistência: Hardox 450®	1,0

Fonte: Elaborado pela autora.

A caracterização básica do material das chapas como recebido foi realizada através de análises em laboratório e pesquisas bibliográficas. Propriedades químicas, mecânicas (curva de escoamento e dureza) e metalográficas foram analisadas antes dos ensaios de forjamento, para avaliar as influências do processo nas propriedades e resistência do material quando utilizado como revestimento de matrizes de forjamento.

A análise da composição química foi realizada através de um espectrômetro de emissão ótica *Spectrolab* - LAVMB08B, para análise química de ligas metálicas, a uma temperatura de 28,3°C em um ambiente controlado com umidade igual a 38%.

A análise metalográfica foi realizada em diferentes fases do estudo: inicialmente (material como recebido); após ensaios de forjamento (matriz aberta, geometria simples e axissimétrica) e de tração. As amostras foram retiradas, embutidas e preparadas através de processo padrão de lixamento, polimento e ataque químico (reagente: NITAL 2% e %5) para posterior análise em microscópio ótico.

A fim de obter-se o perfil de dureza, as amostras foram submetidas ao ensaio de dureza Vickers (HV1 – carga de 1 Kgf) através da Norma ASTM E384 – 17 (*Standard Test Method for Micro indentation Hardness of Materials*). Após o experimento de forjamento, os perfis foram comparados para identificação de modificações na estrutura cristalina da chapa aplicada como máscara de revestimento.

Ensaio de tração foram utilizados para analisar as propriedades mecânicas das chapas em diferentes condições. Inicialmente, para determinação das curvas tensão vs. deformação e índices de anisotropia das chapas de aço DP600 foram realizados ensaios de tração em temperatura ambiente, conforme as normas DIN EN 10002-1 (DIN, 2001) e ASTM E517-00 (ASM, 2000). O equipamento para ensaios mecânicos destrutivos utilizado foi o modelo EMIC 23-600kN (INSTRON/EMIC®) disponível no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS. Para a determinação dos índices de anisotropia, os corpos de prova foram cortados em guilhotina, obedecendo às direções de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa e tracionados até um alongamento máximo de 10%.

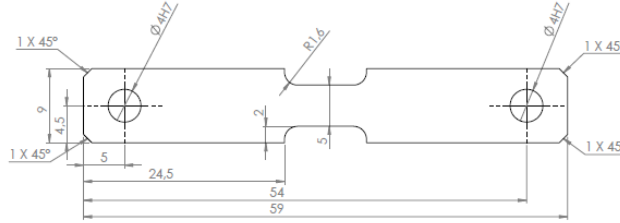
Posteriormente, ensaios de tração foram realizados com diferentes temperaturas utilizando a Norma ASTM E8 / E8M-16ae1 (*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*) e a ASTM E21-09 (*Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials*) a fim de analisar o comportamento das curvas de escoamento do material e inserção das propriedades mecânicas no modelo numérico para análise do processo de forjamento. Tais ensaios de tração em temperatura utilizaram os equipamentos disponíveis no *Institute of Metal Forming* (IBF – *Institute Fur Bildsame Formengung*) da RWTH Aachen University, na Alemanha, como o dilatômetro - TA Instruments, modelo DIL 805T com 20kN de capacidade e atmosfera controlada.

Para cada material em análise foram cortadas três amostras, nas dimensões conforme Tabela 3.2, a fim de garantir a acurácia dos resultados. Os corpos de prova, aquecidos até a

temperatura de ensaio (300, 500, 700°C) a uma taxa de aquecimento de 20°C/s, mantidos 20 s para homogeneização da temperatura, foram ensaiados a uma velocidade de deformação constante (0,1 s<sup>-1</sup>) até sua ruptura – em torno de 6 s.

Tabela 3.2 Descrição das dimensões das amostras e temperatura de ensaio de tração.

Dimensões	
<b>Amostras por teste</b>	3
	~25
<b>Temperatura (°C)</b>	300
	500
	700



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.1.2 Ensaios de forjamento em matriz aberta

O forjamento a quente é um processo que envolve diferentes mecanismos de troca de calor, tensões e deformações, atuação de mecanismos de abrasão, fadiga térmica e mecânica. A Figura 3.6 apresenta esquematicamente as principais variáveis do experimento em matriz aberta, onde foram avaliados: equipamento (martelo de queda livre e prensa hidráulica), temperatura (da matriz, da máscara e do billet a ser forjado), tempo de contato entre billet e máscara, e material da máscara.

Esta etapa de análise com geometria simples foi utilizada para validar o modelo numérico computacional, além de avaliar o comportamento dos diferentes materiais da máscara em termos de dureza e deformação plástica durante o experimento.

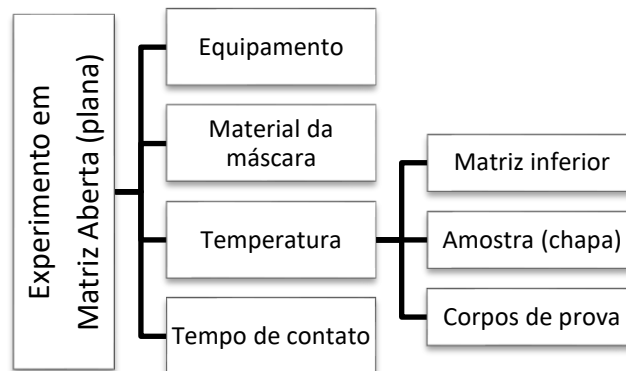


Figura 3.6 Variáveis do ensaio de forjamento em matriz aberta. Fonte: Elaborado pela autora.



O forjamento em matriz aberta foi realizado com dois equipamentos: martelo de forjamento queda livre e prensa hidráulica, a fim de identificar os efeitos do processo de forjamento nos diferentes materiais metálicos analisados. O material da matriz base utilizado para este estudo foi o aço AISI H-13 (DIN 1.2367), tipicamente utilizado em processos de forjamento a quente. Os aços ABNT 1045 (DIN 1.0503) e ABNT 8620 ( $\varnothing 25,4 \times 35$  mm) foram escolhidos para serem forjados. Além disso, os aços DC04 (DIN 1.0338); M2 (HSLA); 22MnB5; DP600 e Hardox450® foram inicialmente avaliados como máscara.

Para os experimentos realizados com martelo de queda, a temperatura da matriz inferior foi variada de 100 a 200°C através de aquecimento por um anel de resistência elétrica, a fim de analisar os efeitos da temperatura no comportamento e dureza da chapa. O material da máscara foi posicionado sobre a matriz aquecida por 10 minutos antes do início do ensaio, assim como os *billets* foram aquecidos em forno resistivo até aproximadamente 1150°C. A utilização da lubrificação também foi analisada, conforme apresenta a Figura 3.7.

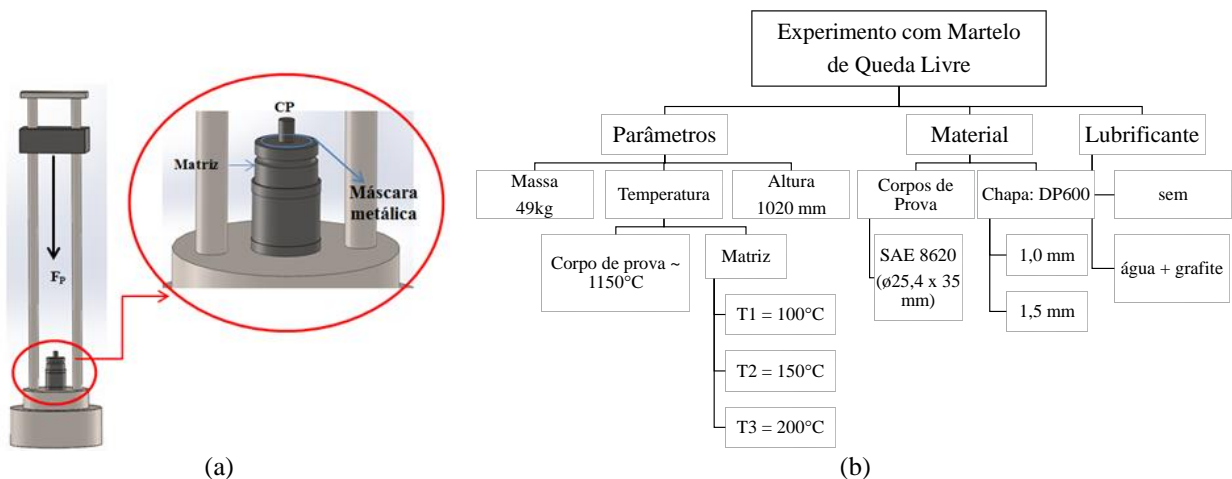


Figura 3.7 Experimento com martelo de queda: (a) desenho esquemático e (b) parâmetros. Fonte: Elaborado pela autora.

Os ensaios de forjamento em matriz aberta em prensa hidráulica foram realizados com matriz aquecida a 300°C, conforme desenho esquemático na Figura 3.8(a). A matriz superior foi mantida em temperatura ambiente e o material da máscara posicionado sobre a matriz aquecida por 10 minutos antes do início do ensaio, assim como os *billets* foram aquecidos em forno resistivo por 1 hora a uma temperatura de 1200°C. A Figura 3.8(b) apresenta as temperaturas utilizadas no ensaio e os materiais das máscaras testadas. Os experimentos foram realizados com 60% de deformação do corpo de prova e, simulando uma condição extrema de tempo de contato, ou seja, mantendo a força máxima por mais 5 segundos após a deformação.



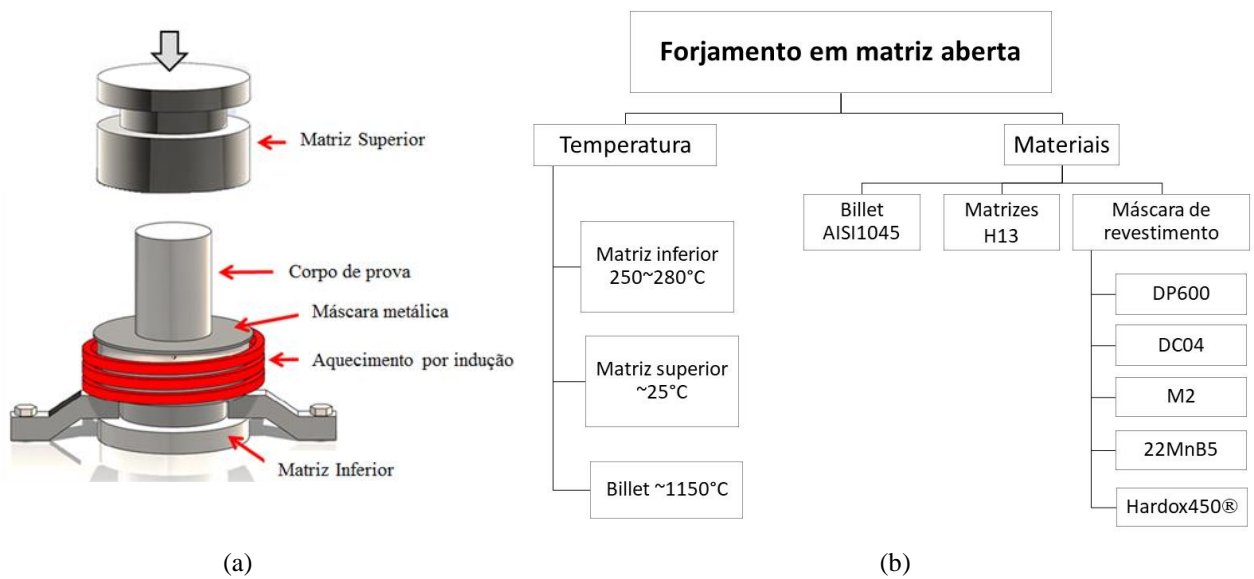


Figura 3.8 Desenho esquemático do (a) ensaio de forjamento em matriz aberta e (b) parâmetros do experimento.  
Fonte: Elaborado pela autora.

Após os ensaios, as amostras (máscara / chapa metálica) foram analisadas quanto às marcas de desgaste na superfície, dureza superficial através de perfis Vickers (Figura 3.9) e análises metalográficas da superfície com e sem contato com o corpo de prova ou peça forjada. Além disso, foram realizadas simulações numéricas computacionais para identificar os parâmetros, as regiões críticas e as influências no comportamento do material utilizado como revestimento.

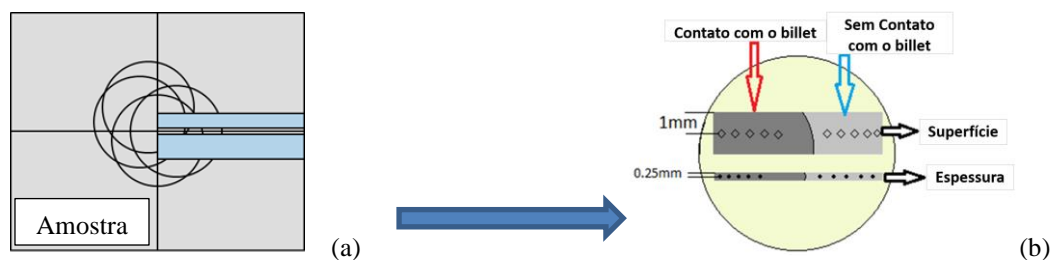


Figura 3.9 Posicionamento (a) do corte da amostra para embutimento e (b) dos pontos para medida de dureza.  
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 3.10(a) apresenta as etapas para a construção do modelo numérico que deve considerar as propriedades relativas ao modelo, como número de elementos da malha, tipo de *solver* matemático, condições de contorno essenciais e propriedades do material; assim como as propriedades do processo, como geometria, distribuição de temperaturas, velocidade ou força do processo, atrito e comportamento entre as partes (matriz/corpo de prova/chapa/matriz). O modelo numérico foi construído com malha tetraédrica, conforme representado na Figura

3.10(b), dimensões e parâmetros do experimento de forjamento, e os resultados de temperatura retirados em posições idênticas ao posicionamento dos termopares, ou seja, a 1,5 mm; 10 mm e 30 mm abaixo da superfície da matriz inferior.

A construção do modelo numérico computacional, utilizando o software Deform™ v.11.0 2D/3D, desenvolvido por *Scientific Forming Technologies Corporation* (SFTC), foi baseada inicialmente na geometria e parâmetros utilizados no experimento de forjamento com matriz aberta (plana) realizados com prensa hidráulica. Tal experimento de forjamento com geometria simples foi utilizado para validar o modelo, avaliando as tensões e deformações do forjamento, força, velocidade, distribuição de temperatura e propriedades termomecânicas, com e sem a máscara metálica. As propriedades do material e os parâmetros utilizados na modelagem numérica inicial podem ser observados na Tabela 3.3 e Tabela 3.4.

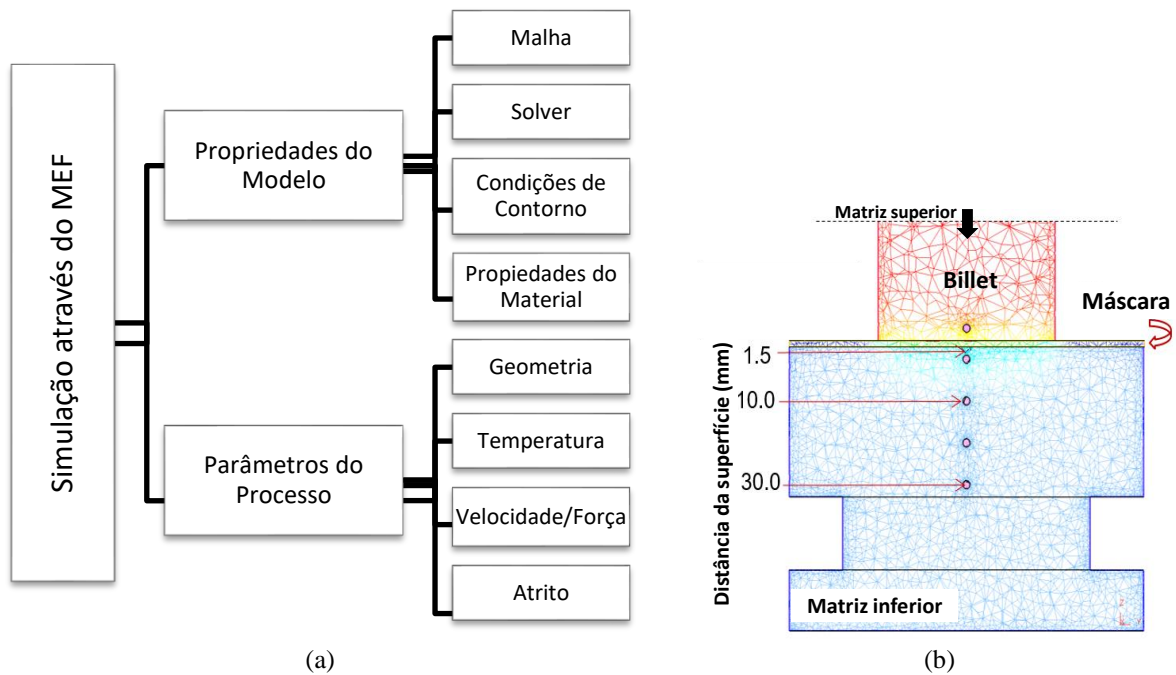


Figura 3.10 Descrição (a) das etapas de modelagem numérica e (b) do modelo numérico inicial. Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3.3 Propriedades do material da Chapa.

Propriedade	Descrição
Material	Database Deform™
Módulo de Young	f(T)
Elementos	30500
Emissividade	0,7
Espessura	1 e 2 mm
Temperatura	300°C

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3.4 Parâmetros do processo, entrada do software.

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
Temperatura da matriz	150°C
Velocidade (matriz superior)	76mm/s
Atrito	0,3
Troca de calor	Sim
Temperatura do ambiente	24,8°C
Coefficiente de convecção	0,02 N/s/mm/C

Fonte: Elaborado pela autora.

### ***3.2 Análise do revestimento aplicado a geometrias simples de forjamento***

Como base nas investigações preliminares, os materiais pré-selecionados foram testados como máscara de revestimento em condições de forjamento a quente e matriz fechada de geometria simples, conforme apresentado na Figura 3.11. Avaliou-se as deformações do revestimento e seu movimento relativo em função da matriz e do billet, assim como a distribuição de atrito e de temperatura, a fim de verificar se o processo ocorre de maneira apropriada. Desta forma, e com base nos resultados iniciais, foram propostas modificações necessárias para uma possível adequação do processo.

Assim, esta etapa compreende a análise das influências da geometria de ferramenta no comportamento do conjunto matriz/material de revestimento e billet durante o forjamento a quente. Ao mesmo tempo, o comportamento do conjunto quanto ao desgaste e à fadiga térmica foi observado a fim de garantir a validade do modelo para simulações numéricas e definir as condições de contorno do processo, isto é, os coeficientes de transferência de calor e os coeficientes de atrito entre a peça a ser forjada e a máscara e entre a máscara e a matriz base.

Portanto, duas geometrias de ferramenta foram projetadas, conforme dimensões apresentadas na Figura 3.11, sendo a primeira denominada copo cilíndrico ou de matriz cilíndrica (Figura 3.11a), e a segunda cônica ou de matriz cônica (Figura 3.11b). A ferramenta inicial (cilíndrica) foi adaptada de uma geometria pré-existente de conformação (processo de estampagem profunda de chapas) sendo analisada experimental e numericamente, e a segunda (cônica), uma melhoria da primeira com ângulos de saída mais abertos (com base no processo de estampagem incremental simples), sendo analisada apenas numericamente.

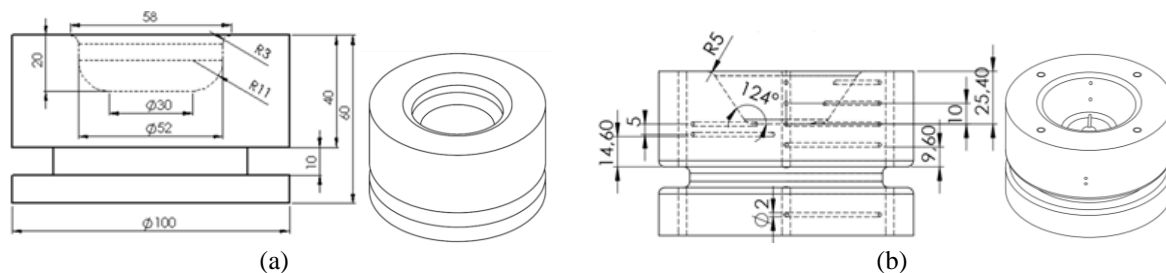


Figura 3.11 Geometrias iniciais de estudo (a) copo ou matriz cilíndrica e (b) matriz cônica. Fonte: Elaborado pela autora.

Durante o experimento de forjamento com matriz cilíndrica, corpos de prova (billets) de aço (ABNT 1045 e ABNT 8620) foram posicionados sobre a máscara e forjados, repetindo o processo inicialmente em um número mínimo de (4) peças ou até o aparecimento de falhas. O processo foi analisado através do método de elementos finitos, variando o número de ciclos de forjamento, avaliando a máscara de revestimento e o comportamento do conjunto com relação a deformações, tensões e temperatura.

Com base no modelo validado inicialmente através do forjamento em matriz aberta, e nas geometrias de forjamento simples (cilíndrica e cônica) projetadas, desenvolveu-se novos modelos numéricos (Figuras Figura 3.12 e 3.14) para avaliar o comportamento do conjunto de forjamento matriz/máscara/billet e a possibilidade de aplicação de chapas como máscara de revestimento. As simulações consideram as trocas de calor durante o processo, força e deslocamento da matriz superior, temperatura do billet a ser forjado e comportamento da matriz inferior com e sem a utilização da máscara de revestimento.

Para a realização desta análise, as simulações numéricas foram realizadas em duas etapas quanto à máscara:

- i. Inicialmente foram desconsideradas as tensões e deformações resultantes do processo de conformação do material da máscara – geometria e tolerâncias perfeitas (desenhos importados através de CAD);
- ii. Posteriormente, foram realizadas simulações do processo de conformação da máscara seguido do forjamento.

A Figura 3.12(a) apresenta o modelo numérico utilizado, conjunto matriz, máscara e billet com as dimensões e parâmetros, assim como a Figura 3.12(b) apresenta os detalhes da máscara e billet antes e depois do processo de forjamento. Construiu-se um modelo numérico tridimensional (3D) com simetria dos componentes (um quarto da geometria original) a fim de otimizar o tempo computacional.

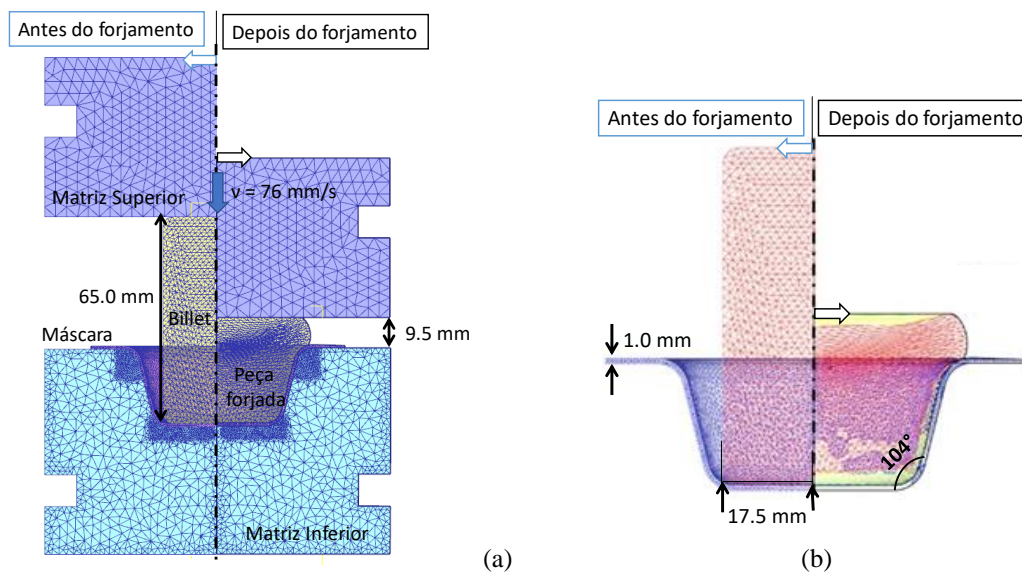


Figura 3.12 Modelo numérico para análise da geometria simples I – matriz fechada cilíndrica (copo) (a) representação do conjunto bilhet / máscara / matriz e (b) máscara e bilhet em detalhe. Fonte: Elaborado pela autora.

As propriedades do material (Tabela 3.5) e parâmetros do modelo (Tabela 3.6) basearam-se nos resultados experimentais e banco de dados do software. A fim de simplificar tanto o modelo quanto o experimento, a matriz superior utilizada possui geometria plana, sendo responsável pela aplicação da força de forjamento e deslocamento até total preenchimento da matriz inferior.

Tabela 3.5 Propriedades do material da Chapa.

Propriedade	Descrição
Material	Curva experimental
Módulo de Young	$f(T)$
Elementos	30500
Emissividade	0,7
Espessura	1,0 mm
Temperatura	300°C

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3.6 Parâmetros do processo, entrada do software.

Parâmetro	Descrição
Temperatura da matriz	300°C
Velocidade (matriz superior)	76mm/s
Atrito	0,3
Troca de calor	Sim
Temperatura do ambiente	24,8°C
Coefficiente de convecção	0,02 N/s/mm/C

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 3.13 representa as curvas de escoamento resultantes dos ensaios experimentais de tração em diferentes temperatura (Figura 3.13a) e as curvas inseridas no modelo numérico

(Figura 3.13b). Com o intuito de remover o ruído proveniente dos experimentos, uma etapa de *fitting* foi realizada através de programação desenvolvida no MATLAB. Este tratamento de dados do material é essencial para correta execução do *solver* e realização da simulação computacional, sendo realizado para todos os materiais de máscara em análise.

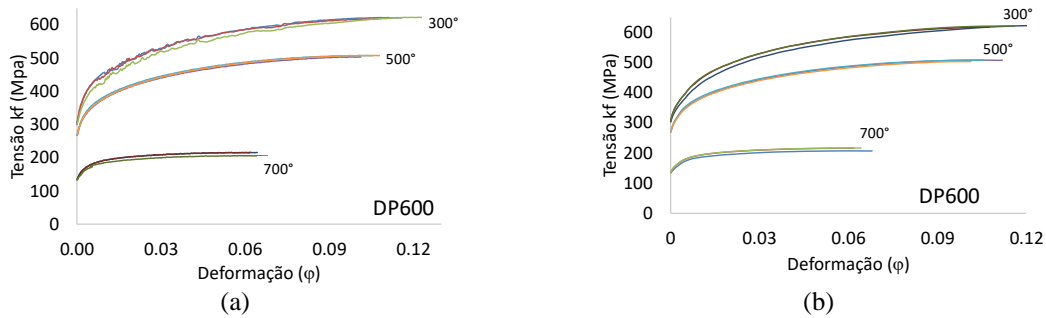


Figura 3.13 Tratamento da curva de escoamento para entrada no software (a) resultado do ensaio de tração (experimental) e (b) curva de escoamento inserida no modelo numérico. Fonte: Elaborado pela autora.

A matriz superior (plana) utilizada possui o mesmo diâmetro e especificações da inferior, e o material do billet forjado foi o aço C45 com 35 mm de diâmetro e 65 mm de altura. A interação matriz / máscara de revestimento / peça forjada foi observada para a matriz inferior, levando em consideração as variações de temperatura, atrito e condição de lubrificação.

A Figura 3.14 apresenta o modelo numérico para avaliação da geometria simples chamada matriz cônica ou copo cônico (*conic*) com ângulos maiores de saída. Analisou-se o escoamento do material, tensões, deformações e temperatura da matriz inferior e da máscara de revestimento. Para este modelo, avaliou-se ainda as possíveis influências das tensões, deformações prévias e variações de espessura do revestimento.

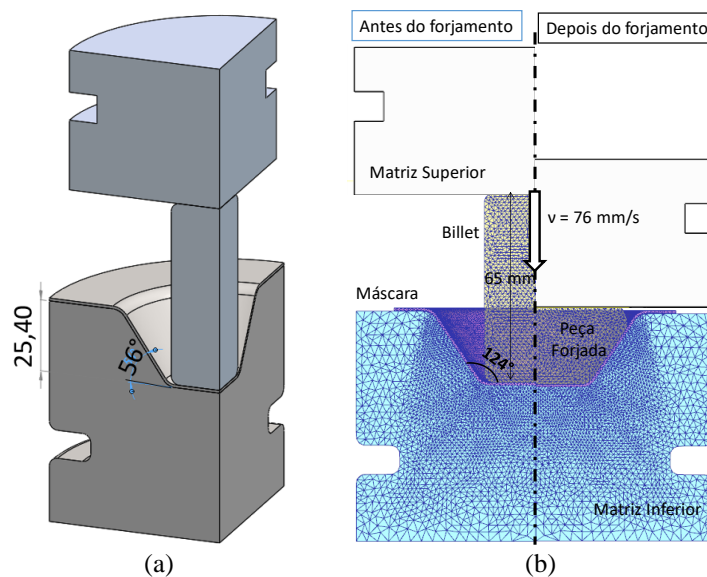


Figura 3.14 Modelo numérico para análise da geometria simples II – matriz fechada cônica (a) representação do conjunto de forjamento e (b) modelo numérico. Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.3 Estratégias para o desenvolvimento do método de aplicação de máscara sobre a matriz

Após as análises iniciais de forjamento, verificou-se a necessidade de investigação da melhor estratégia de fabricação da máscara, portanto, foram avaliados diferentes processos de conformação com base nos parâmetros e regiões críticas estudados previamente. Além disso, utilizando as ferramentas de design de projeto e seleção de material, foi desenvolvida uma proposta de análise da aplicabilidade do método de utilização de chapas metálicas como revestimento para matrizes de forjamento a quente. O desenvolvimento deste método deve considerar os requisitos básicos de projeto de matrizes, além de facilidade de aplicação e troca, a conservação da geometria e tolerâncias exigidas para a peça forjada, assim como um custo razoavelmente baixo. Para isso, foram consideradas as estratégias de conformação descritas a seguir, além da etapa de seleção do material e dos parâmetros do processo de forjamento a quente.

A Figura 3.15 apresenta os requisitos básicos necessários para a análise e desenvolvimento de cada etapa de projeto, as quais serviram de base para a análise e seleção do material, da estratégia de conformação e da geometria mais adequados.

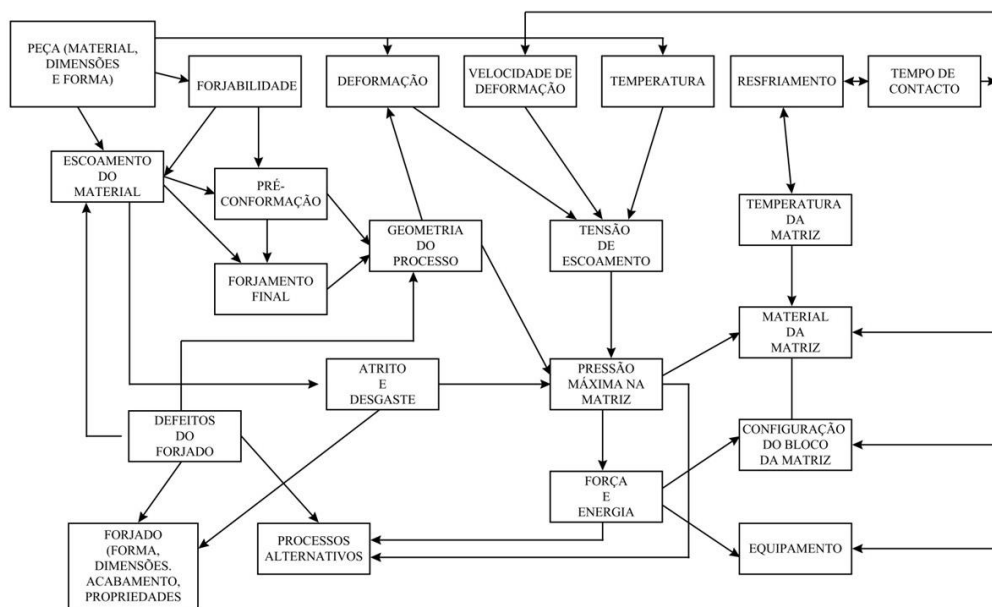


Figura 3.15 Inter-relacionamento dos parâmetros de processamento no forjamento a quente (Button, 1998).

Na Figura 3.16 podem ser observados os desenhos esquemáticos para a escolha da melhor estratégia de fabricação da máscara de revestimento. Esta consistiu em três etapas de investigação: inicialmente um processo convencional de estampagem profunda (Figura 3.16a)

com parâmetros conhecidos (utilizada no experimento de forjamento com geometria simples, descrito anteriormente); após isso, um processo de estampagem incremental (Figura 3.16b); e por fim, a análise numérica da conformação direta da chapa na cavidade da matriz (Figura 3.16c e Figura 3.16d) para comparação dos resultados de tensão e deformação.

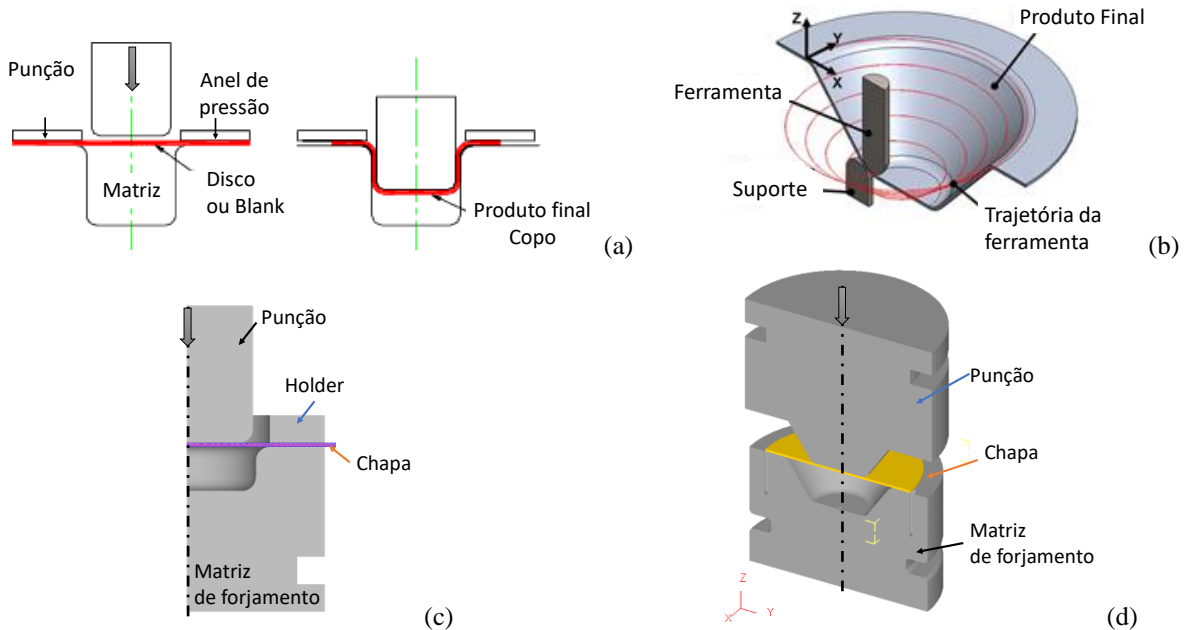


Figura 3.16 Estratégias de fabricação da máscara através da estampagem (a) convencional, (b) incremental, direta no setup de forjamento (c) em matriz cilíndrica e (d) em matriz cônica. Fonte: Elaborado pela autora.

A conformação da máscara deve considerar a geometria da ferramenta de forjamento, ou seja, a peça a ser forjada, portanto, foram analisados os parâmetros do processo de estampagem de geometrias simples com matriz cilíndrica e cônica (Figura 3.17). Foram avaliadas as dimensões da amostra estampada, as variações da espessura ( $t$ ), tensões e regiões críticas. A chapa conformada foi então posicionada na cavidade da matriz e o processo de forjamento realizado variando o número de peças forjadas a fim de avaliar a necessidade da utilização de um mecanismo de fixação.

Além dos métodos tradicionais de estampagem, foram construídos modelos numéricos utilizando o *setup* de forjamento para estampagem direta da chapa na cavidade da matriz. Esta análise verificou a possibilidade de reduzir os custos da etapa de conformação da máscara de revestimento.

Portanto, foram realizadas simulações numéricas computacionais nesta etapa a fim de analisar o comportamento da chapa metálica durante a conformação diretamente na cavidade da matriz de forjamento, sem passar por um processo prévio.



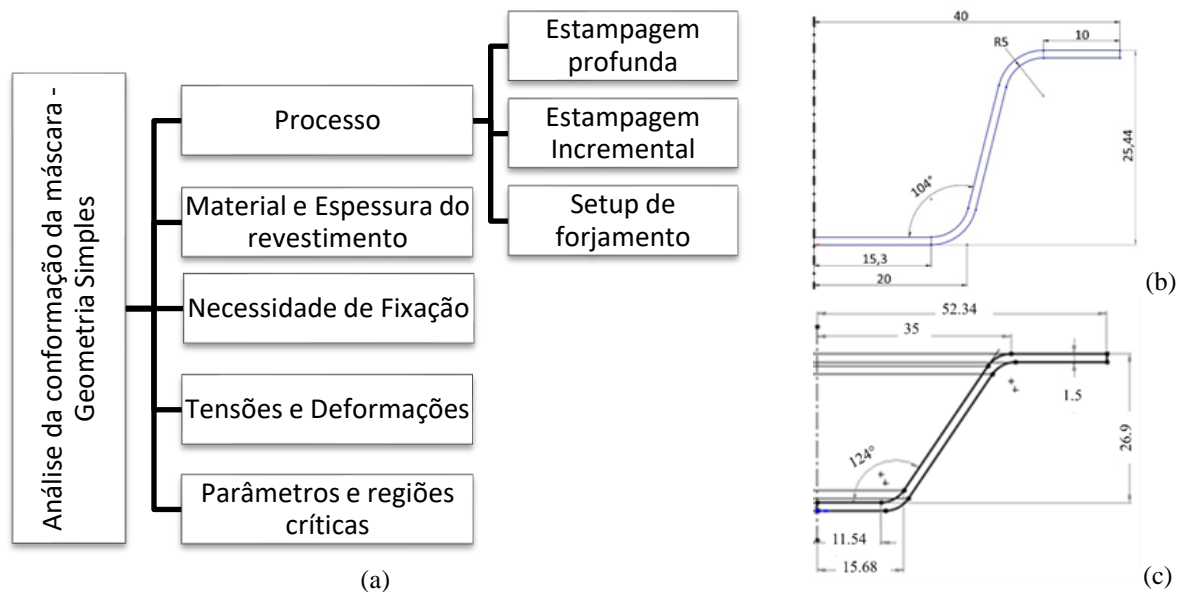


Figura 3.17 Análise do processo de conformação do revestimento com geometria simples (a) parâmetros de análise, (b) dimensões geometria cilíndrica e (c) dimensões geometria cônica. Fonte: Elaborado pela autora.

As simulações levaram em consideração diferentes espessuras e propriedades do material da chapa, a utilização de punção, a temperatura do processo, assim como a necessidade de fixação ou prensa chapas. A modelagem do processo de conformação da chapa na cavidade da matriz será realizada com as propriedades do material da chapa apresentadas na Tabela 3.7 e parâmetros de processo mostrados na

Tabela 3.8.

Tabela 3.7 Propriedades do material da Chapa.

Propriedade	Descrição
Material	DP600 e 22MnB5
Módulo de Young	f(T)
Elementos	Tetraédricos ~30500
Emissividade	0,7
Espessura	1 e 2 mm
Temperatura	300°C

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3.8 Parâmetros do processo, entrada do software.

Parâmetro	Descrição
Temperatura da matriz	20°C
Velocidade (punção)	5 mm/s
Atrito	0,08
Troca de calor	sim
Temperatura do ambiente	25°C
Coefficiente de convecção	0,02 N/s/mm/C

Fonte: Elaborado pela autora.

O processo de estampagem profunda foi realizado em chapas com 1mm de espessura e diâmetro de 100mm, em uma prensa Danpresse, com capacidade de 200 kN e velocidade de prensagem de 5,0 mm/s, a partir de um punção cilíndrico de 50 mm de diâmetro até a

profundidade de 20 mm. As matrizes foram fabricadas nas mesmas dimensões da matriz inferior de forjamento apresentadas na Figura 3.11. O aço ferramenta H13 foi usinado, temperado e revenido, sendo utilizado posteriormente como matriz inferior para os experimentos de forjamento.

Para a estampagem incremental foi utilizado um torno CNC (ROMI Discovery 760), sendo que a sequência das etapas do processo apresentada na Figura 3.18. Inicialmente o modelo/desenho *CAD* é projetado e inserido no sistema *CAM* (software Edgecam 2012 R2) do equipamento *CNC* a ser utilizado, criando assim a trajetória da ferramenta de conformação da chapa. A partir da estratégia de usinagem determinada no *software* de *CAM*, minimizam-se os parâmetros de usinagem, como avanço em *XY* e *Z*, rotação da ferramenta, e deslocamento em *Z*; ocorrendo assim o processo de estampagem incremental.



Figura 3.18 Sequência das etapas para realização do processo de estampagem incremental. Fonte: Elaborado pela autora.

A ferramenta esférica (*ball nose*) foi projetada com  $\varnothing 10,5$  mm e com o corpo inteiriço nas dimensões de  $\varnothing 10$  mm x 130 mm, de aço SAE 4340, sendo que a ponta foi temperada por indução e sua dureza final ficou em 63HRC. A fixação desta ferramenta na máquina centro de usinagem CNC será através de um porta-ferramenta de pinça  $\varnothing 10-11$  mm. A chapa de aço bifásico DP600 então fixada na mesa de estampagem, sendo conformada com parâmetros de processo na máquina CNC apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 Parâmetros do processo de estampagem incremental do material DP600.

Parâmetros	Teste 1	Teste 2
Avanço (mm/min) em XY	400	100
Avanço (mm/min) em Z	150	50
Rotação (rpm)	25	25
Deslocamento em Z	0,2	0,02
Off set (mm)	1,0	0,5
Espessura da chapa (mm)	1,0	1,0 e 1,5

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4 Análise da utilização do revestimento em forjamento com geometria axissimétrica

Para avaliar a aplicabilidade do método de utilização de máscaras metálicas como revestimento de matrizes serão desenvolvidas as etapas conforme apresenta a Figura 3.19.

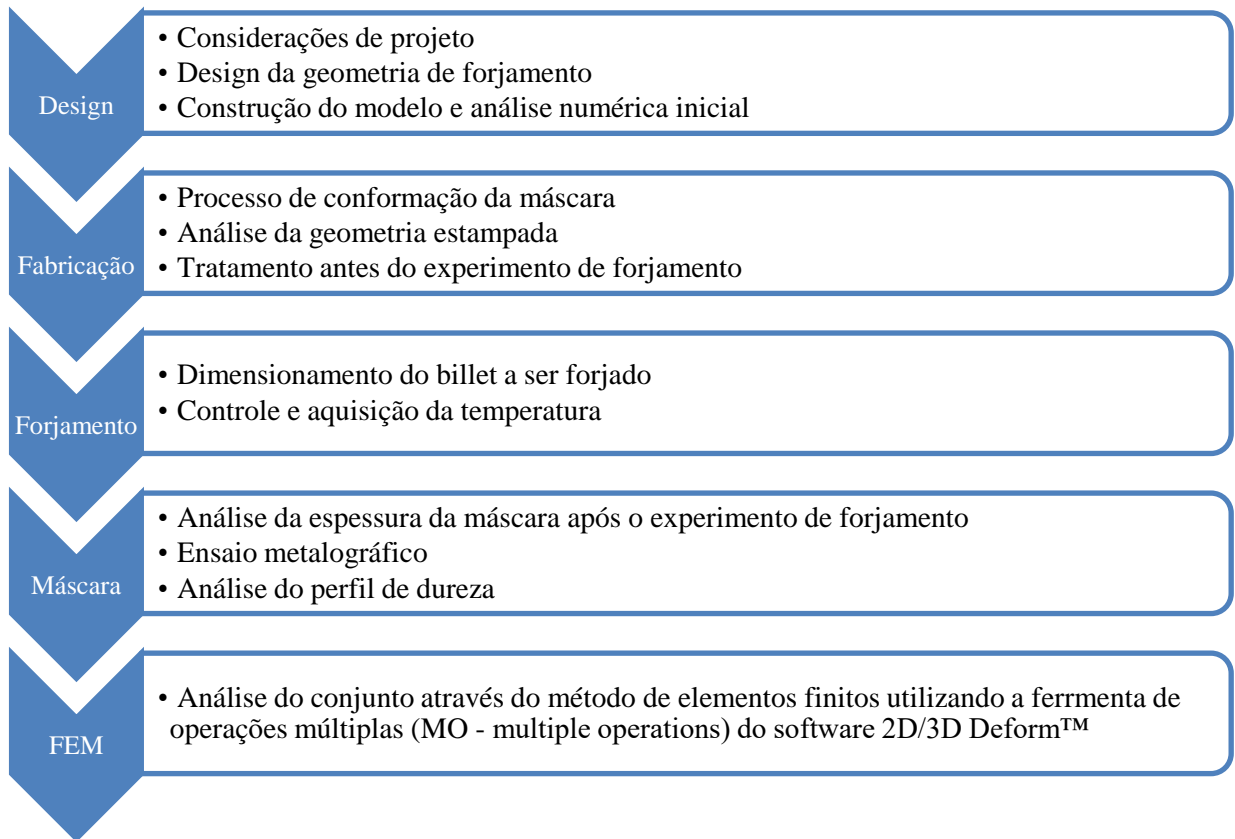


Figura 3.19 Etapas de desenvolvimento da fase de análise do processo de forjamento com geometria axissimétrica. Fonte: Elaborado pela autora.

O ciclo de forjamento consiste no aquecimento dos *billets* (aproximadamente 1200°C) e matrizes até as temperaturas desejadas (usualmente de 150°C a 300°C), posterior transferência do billet até o setup, seu posicionamento na superfície (lubrificada) da matriz, forjamento e extração da peça, seguido da lubrificação das superfícies para iniciar o próximo ciclo, conforme apresentado na Figura 3.20(a).

Para a análise da aplicabilidade de diferentes chapas de aço, o conceito da utilização de máscaras metálicas como revestimento protetivo, representado na Figura 3.20(b), foi utilizado em uma geometria axissimétrica escalonada. Esta geometria foi desenvolvida com base nos resultados preliminares de propriedades dos materiais pré-selecionados, como ductilidade e resistência, e análise de geometrias simples de forjamento, com ângulo, profundidade e áreas de contato críticos.

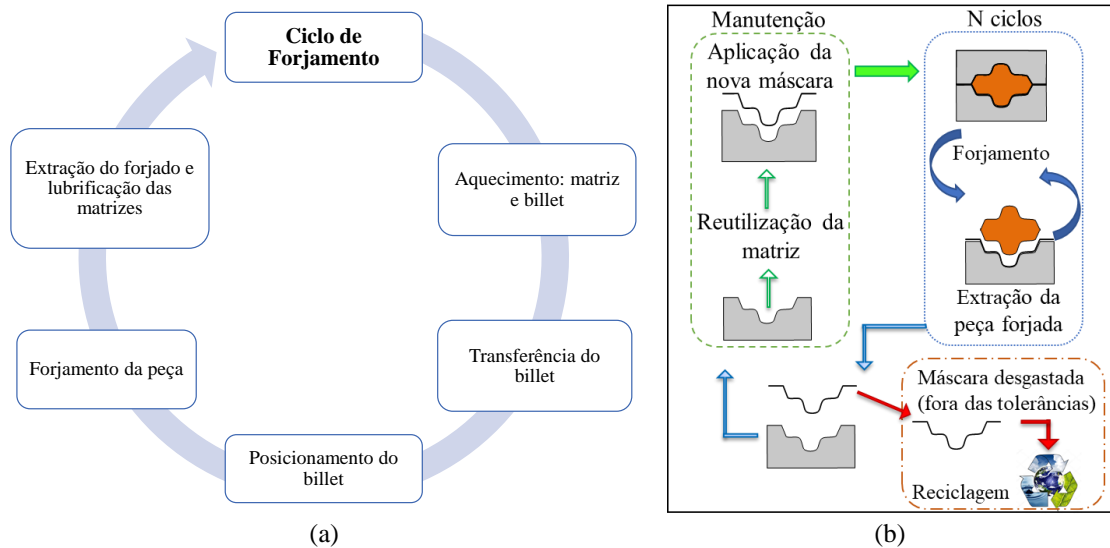


Figura 3.20 (a) Etapas que compõem um ciclo de forjamento (Fonte: Elaborado pela autora.) e (b) representação do conceito de forjamento utilizando máscaras como revestimento - die cover (Fonte: adaptada de Yu, 2019).

Os experimentos foram realizados utilizando chapas de diferentes materiais com duas espessuras – 1,0 e 1,5 mm, a fim de analisar o comportamento matriz/máscara/billet no forjamento com uma geometria axissimétrica. O primeiro conjunto de experimentos foi realizado com apenas quatro ciclos de forjamento, a fim de identificar as regiões críticas através de medições de temperatura, bem como parâmetros de influência durante o processo. Para este caso, os materiais da máscara DC04, DP600 e 22MnB5 em diferentes condições foram analisados.

Em seguida, os materiais 22MnB5 e DP600 foram avaliados aplicando 10 ou mais ciclos de forjamento ou até o aparecimento de falha. Durante os experimentos a temperatura foi medida através de termopares posicionados dentro da matriz inferior, bem como uma termo câmara para medir a temperatura da superfície durante o forjamento. Os resultados foram então comparados com o modelo numérico construído no software Deform<sup>TM</sup> - 2D/3D.

### 3.4.1 Design da geometria axissimétrica escalonada

O projeto de ferramentas para processos de forjamento a quente deve levar em consideração, principalmente, a capacidade do equipamento a ser utilizado e as dimensões e tolerâncias do material a ser forjado. A Figura 3.21 apresenta geometrias industriais comumente fabricadas através do processo forjamento, podendo ser simples como engrenagens e juntas, ou complexas, como bielas e virabrequins.

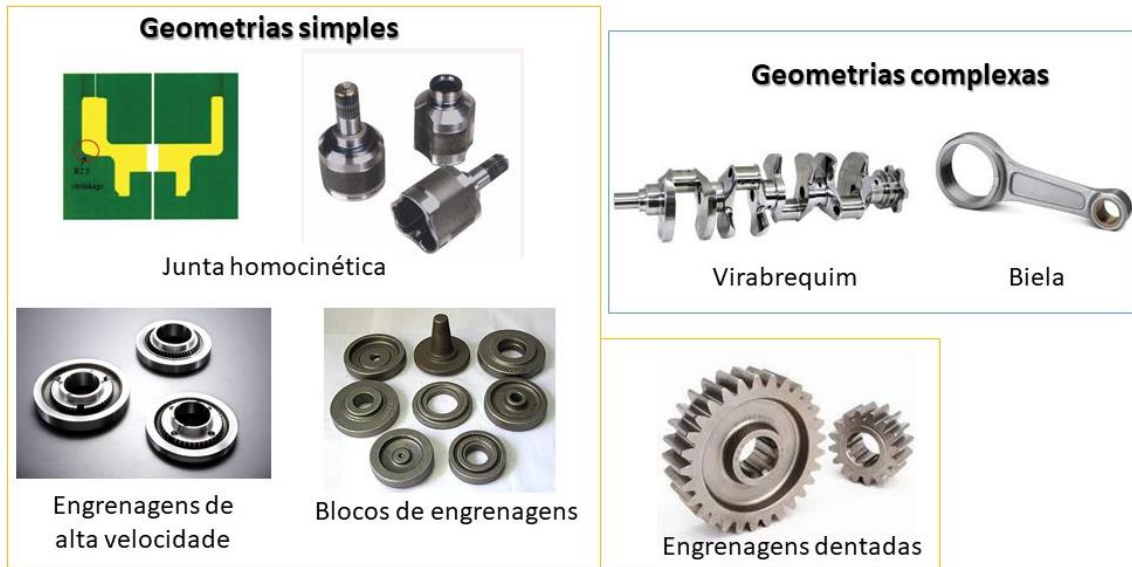


Figura 3.21 Exemplos de peças industriais fabricadas por processo de forjamento. (Fonte: websites de pesquisa, 2016).

Assim, para analisar a aplicabilidade do conceito de máscaras como revestimento de matrizes, o design da ferramenta considerou a geometria de uma engrenagem axissimétrica, conforme apresentado na Figura 3.22a, bem como, as análises iniciais de ângulo e profundidade da geometria inicial simples (Figura 3.22b).

O projeto deve considerar ainda o tempo de troca e de processo, a energia necessária e a perda de material. Portanto, a geometria proposta para o experimento de forjamento foi estudada através de MEF e desenvolvida o mais próximo possível (*near net shape*) das dimensões do produto final (Figura 3.22c).

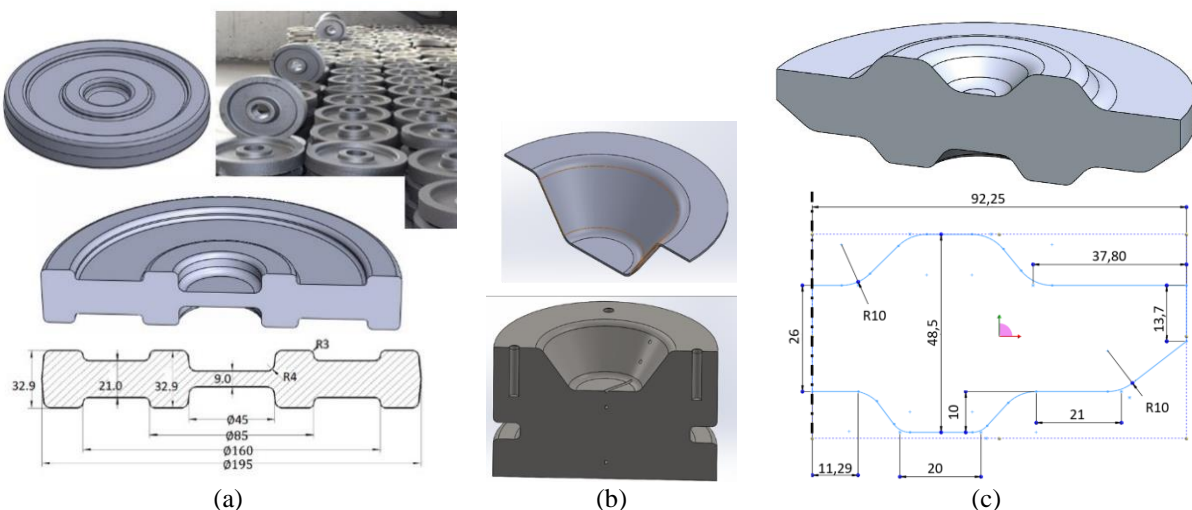


Figura 3.22 Desenho esquemático da geometria (a) proposta no projeto Bragecrim – segunda fase; e (b) simples analisada inicialmente (cônica) e (c) produto final. Fonte: Elaborado pela autora.

Para simplificar a avaliação inicial, a matriz superior foi considerada plana, conforme mostrado no modelo numérico da Figura 3.23, sendo possível reduzir o tempo computacional

consideravelmente. O modelo foi criado utilizando o software Deform<sup>TM</sup>-2D/3D, sendo que os parâmetros utilizados estão descritos na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 Parâmetros do modelo numérico para simulação de forjamento a quente com geometria axissimétrica.

Parâmetro	Descrição
<b>Temperatura inicial</b>	
- Matriz superior	300°C
- Matriz inferior	300°C
- Billet	1200°C
<b>Máscara de revestimento</b>	com e sem a utilização de máscara
<b>Velocidade</b>	76 mm/s
<b>Atrito</b>	
- Billet/Matriz superior	0,3
- Billet/máscara	0,3 – 0,08
- Máscara/Matriz inferior	0,7 – 0,08
<b>Materiais</b>	
- Matrizes	H13
- Billet	AISI 1045
- Máscara de revestimento	DC04; DP600; 22MnB5

Fonte: Elaborado pela autora.

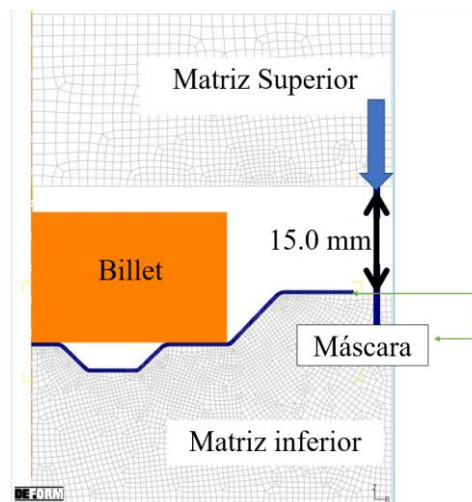


Figura 3.23 Modelo numérico 2D para análise da geometria axissimétrica. Fonte: Elaborado pela autora.

O modelo numérico foi utilizado para analisar as forças de forjamento, bem como determinar parâmetros adequados como profundidade, ângulos e necessidade de fixação da máscara de revestimento durante o processo.

Inicialmente realizou-se análises sem a máscara de revestimento, a fim de verificar o preenchimento da matriz, força e deslocamento necessários. Posteriormente, a máscara de revestimento foi inserida no modelo a fim de avaliar o comportamento do conjunto, além de dimensionar corretamente o billete a ser forjado.

Através da análise inicial, verificou-se a necessidade de fixação do revestimento sobre a matriz durante os ciclos de forjamento para evitar o risco de escorregamento e enrugamento, o que poderia comprometer a geometria do produto forjado e causar falha prematura da máscara. Portanto, um anel de fixação foi projetado com base no prensa chapas (*holder*) utilizado nos processos de conformação de chapas metálicas, conforme apresentado na Figura 3.24. Este dispositivo serviu ainda como um delimitador do processo, auxiliando na forma do forjado e na sua retirada após forjamento.

A matriz inferior (aço H13) foi fabricada através do processo de usinagem com as dimensões de projeto apresentadas na Figura 3.24(a) e posteriormente submetida ao processo de tratamento térmico, comumente aplicado em ferramentas de conformação a quente. A dureza média após têmpera ficou em 53 HRC.

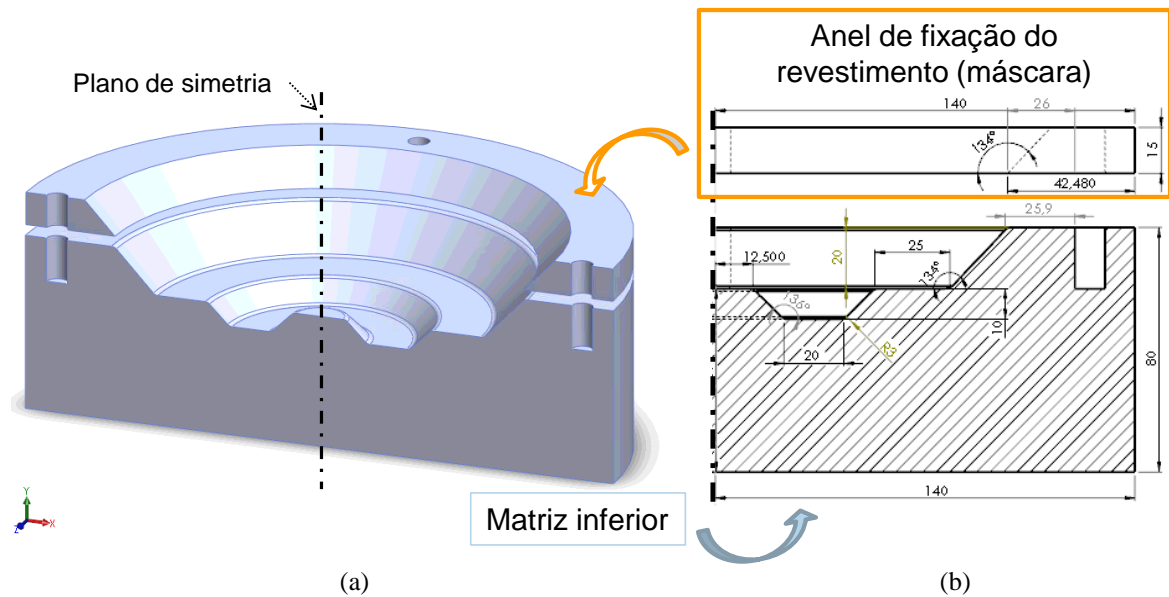


Figura 3.24 Matriz inferior de forjamento e fixação do revestimento: (a) vista em corte 3D e (b) dimensões.  
Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4.2 Fabricação da máscara de revestimento

As máscaras foram fabricadas através do processo de estampagem incremental utilizando os materiais DC04, DP600 e 22MnB5 com espessuras entre 1,0 e 1,5 mm, conforme apresentado na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 Número de amostras e espessura dos materiais estampados.

Material	Espessura (mm)	Amostras
DC04	1.0	3
	1.5	3
DP600	1.0	3
	1.5	3
22MnB5-revestido (como recebido)	1.0	6
	1.5	3

Fonte: Elaborado pela autora.

Todas as máscaras fabricadas foram posteriormente aplicadas como revestimento protetivo de matrizes de forjamento a quente. As máscaras de aço DC04 e DP600 estampadas foram aplicadas diretamente no processo, enquanto as de material 22MnB5 (revestido com Al-Si) passaram por tratamento térmico. Realizou-se o tratamento de têmpera em água, onde dois lotes de amostras (máscaras já conformadas na geometria final) com duas temperaturas, a fim de analisar a influência da microestrutura e dureza na aplicação do material como máscara de revestimento.



### 3.4.2.1 Conformação através do processo de estampagem incremental

A fim de garantir a geometria da máscara, a matriz inferior de forjamento foi utilizada como suporte do processo de estampagem incremental. Da mesma maneira, para diminuir os efeitos do retorno elástico ao máximo e garantir as tolerâncias geométricas, o processo ocorreu em duas etapas, utilizando para o primeiro passe uma ferramenta de 20 mm e, para o segundo, 10 mm de diâmetro. Os parâmetros utilizados no processo estão apresentados na Tabela 3.12 e a estratégia de movimentação da ferramenta, na Figura 3.25.

A trajetória de conformação é fator importante para evitar defeitos no material estampado, por isso, a estampagem iniciou na extremidade “a” até atingir a primeira profundidade “b” da chapa com trajetória circular e 0,5mm de offset em Z, como apresentada na Figura 3.25a. Após esta etapa, a ferramenta se deslocou até o centro da chapa “c” até atingir a segunda profundidade “d” (Figura 3.25b), finalizando assim o primeiro passe de conformação. Esta trajetória foi repetida com a ferramenta de 10 mm de diâmetro (Figura 3.25c), a fim de conformar os raios e reduzir os efeitos do retorno elástico do material, aumentando a quantidade de deformações locais.

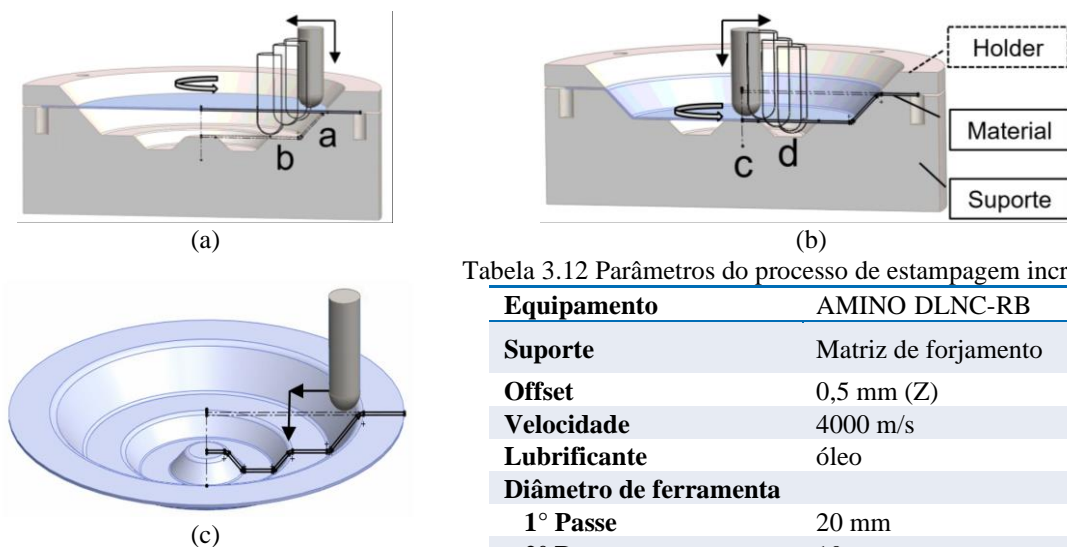


Tabela 3.12 Parâmetros do processo de estampagem incremental.

<b>Equipamento</b>	AMINO DLNC-RB
<b>Suporte</b>	Matriz de forjamento
<b>Offset</b>	0,5 mm (Z)
<b>Velocidade</b>	4000 m/s
<b>Lubrificante</b>	óleo
<b>Diâmetro de ferramenta</b>	
1° Passe	20 mm
2° Passe	10 mm

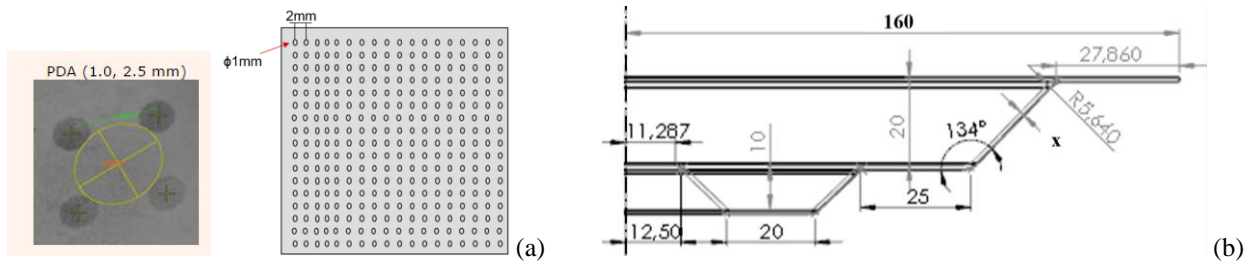
Figura 3.25 Processo de estampagem incremental: estratégia de conformação e parâmetros do processo. Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4.2.2 Análise da geometria estampada

Antes do processo de estampagem, a superfície inferior das chapas metálicas foi marcada a laser, conforme desenho esquemático apresentado na Figura 3.26, a fim de realizar medições da deformação e da geometria após a conformação. Para as medições, utilizou-se o



equipamento ótico 3D ARGUS -5M (GOM mbH) disponível no IBF – *Institute of Metal Forming* da RWTH Aachen, na Alemanha.



Fonte: FMTI Systems Inc., the PDA grid

Fonte: a Autora.

Figura 3.26 (a) Padrão PDA (malha) de acordo com \*FMTI Systems Inc. "Forming Measurement Tools Innovations" e (b) dimensões desejadas da máscara de forjamento (Fonte: Elaborado pela autora.).

Conforme descreve o FMTI, além das coordenadas 3D da superfície dos componentes, a malha ou grid fornece a distribuição de área da deformação maior, menor e espessura da chapa após a conformação. As deformações medidas podem ser comparadas com as características do material usando diagramas de limite de conformação (FLD). Os resultados podem ser utilizados ainda para validar a análise numérica (FEM) ou adaptar os processos de conformação.

### 3.4.2.3 Tratamento térmico do material 22MnB5

As máscaras de revestimento fabricadas com o material 22MnB5 foram conformadas em seu estado inicial de recebimento, antes do tratamento térmico em função de sua ductilidade. Após a estampagem sobre o suporte, as amostras passaram por tratamento de têmpera em água nas temperaturas de QI = 900°C e QII = 800°C, para aumento de dureza. Com isso, foi possível analisar a influência da porcentagem de martensita na resistência do material durante o processo de forjamento. Ambas as amostras foram ser mantidas por 5 minutos na temperatura de tratamento antes da têmpera, para garantir homogeneização da microestrutura.

As curvas do tratamento térmico realizado nas máscaras de material 22MnB5 estão demonstradas na Figura 3.27. Foram retiradas amostras após o tratamento térmico para realização do ensaio de tração e análise do comportamento da curva de escoamento em alta temperatura para o tratamento realizado a 900°C.

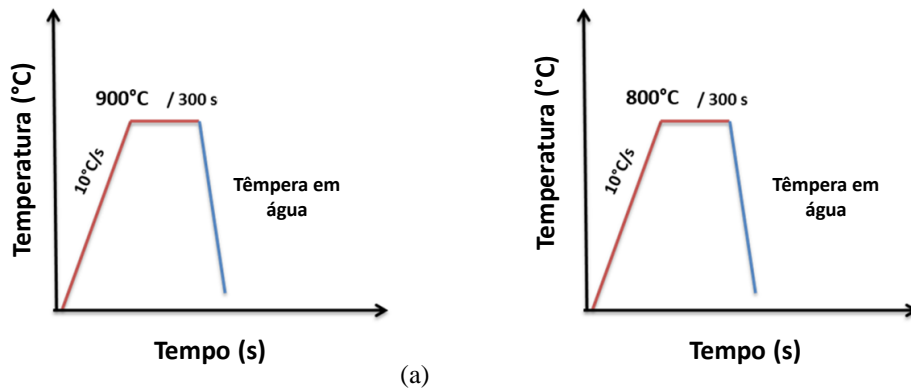


Figura 3.27 Curvas de tratamentos térmico das máscaras de 22MnB5: Têmpera (a) QI=900°C e (b) QII=800°C. Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4.3 Ensaio de forjamento

#### 3.4.3.1 Dimensionamento billet

O modelo numérico utilizado para analisar a influência do tamanho do billet no forjamento com geometria axissimétrica e identificar as dimensões mais adequadas para o processo, está descrito em detalhes no subcapítulo 3.4.5. O billet deve atender aos requisitos de capacidade do equipamento de forjamento (força máxima permitida), preenchimento total da matriz, além da centralização com menor tempo (facilidade de posicionamento).

O dimensionamento do billet levou em consideração a força do processo de forjamento em uma prensa hidráulica com capacidade de 6MN, sem a necessidade de formação de rebarba nem pré-forma, assim como o posicionamento para a realização da análise experimental.

Conforme apresentado na Figura 3.28, inicialmente foram analisadas três dimensões sem a utilização da máscara de revestimento, considerando a força de forjamento, a facilidade de centralização com posicionamento manual em menor tempo possível, o preenchimento da matriz sem o aparecimento de rebarba. Após isso, o processo foi avaliado considerando o melhor dimensionamento e a aplicação de máscara metálica sobre a matriz inferior de forjamento, além do tempo necessário para o aquecimento do billet e análise numérica da distribuição da temperatura.

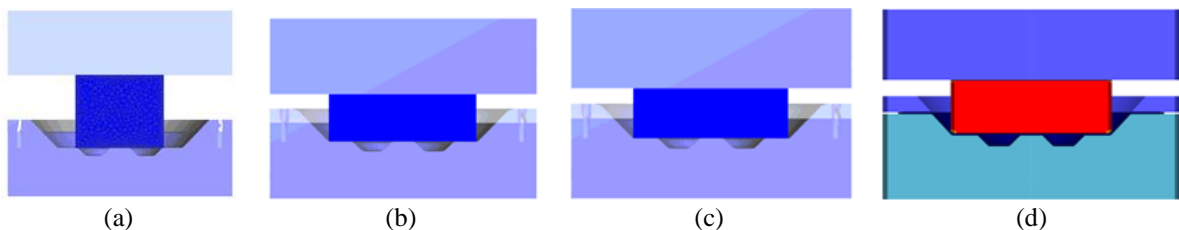


Figura 3.28 Modelo numérico de análise e dimensionamento do billet (a) B1=Ø110 x 90 mm sem máscara; (b) B2=Ø155 x 50 mm sem máscara; (c) B3=Ø150 x 50 mm sem máscara; e (d) B3=Ø150 x 50 mm com máscara de revestimento. Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4.3.2 Controle e aquisição da temperatura

Termopares (tipo K) foram utilizados para controle da temperatura, sendo posicionados dentro da matriz inferior de forjamento através da usinagem de um canal para passagem e fixação em diferentes posições, como pode ser observado na Figura 3.29(a) e (b). O termopar “K” será posicionado a 19 mm da superfície da matriz e o termopar “T” a uma distância de 4 mm da superfície (Figura 3.29c).

Além disso, uma termo câmera registrou a temperatura superficial, tanto da matriz quanto do produto forjado e da máscara de revestimento a cada etapa do ciclo de forjamento.

A matriz inferior foi acoplada à prensa hidráulica com isolamento no setup de forjamento para manter a temperatura o mais próximo possível de 300°C, e assim, diminuir as cargas térmicas e diferenças de temperatura durante o processo. Termopares posicionados nas extremidades identificaram a curva de aquecimento inicial e homogeneização da temperatura (1h 30min) antes da realização dos experimentos.

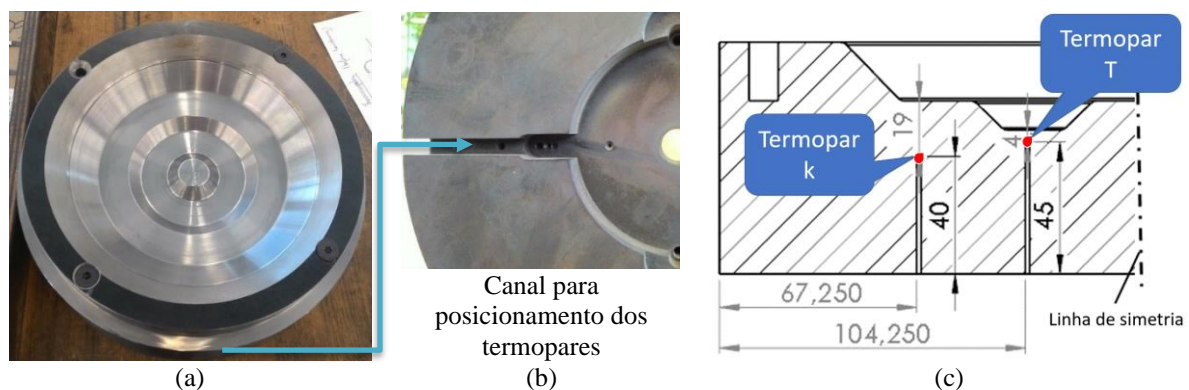


Figura 3.29 Posicionamento dos termopares para medição de temperatura na matriz inferior de forjamento.  
Fonte: Elaborado pela autora.

A fim de analisar o comportamento do material da máscara de revestimento durante o processo de forjamento, os experimentos foram realizados em duas etapas. Na primeira, todos os materiais pré-selecionados para atuar como máscaras foram submetidos a 4 ciclos de forjamento – experimento I, cortados e analisados quanto à redução de espessura, microestrutura e dureza. Além disso, nesta etapa foram fabricadas e testadas três amostras (máscaras) de cada material para garantir a confiabilidade dos resultados.

Na segunda etapa, experimento II, as máscaras foram submetidas ao mesmo ciclo de forjamento, até o aparecimento de falhas ou até um número máximo de 18 ciclos em função do tamanho da peça forjada.

A Tabela 3.13 apresenta os parâmetros do experimento de forjamento. O equipamento utilizado foi uma prensa hidráulica (*SMS GmbH*) com capacidade máxima de 630 toneladas. O

billet ( $\varnothing 150 \times 50$  mm) foi aquecido em forno resistivo a  $1200^{\circ}\text{C}$  e posteriormente, posicionado sobre a máscara de revestimento manualmente, assim como a troca das amostras (máscaras) após 4 ciclos completos de forjamento.

Tabela 3.13 Parâmetros dos experimentos de forjamento

Forjamento a quente	Parâmetros
Velocidade da prensa hidráulica	75.0 mm/s
Material do billet	DIN C45
Deslocamento matriz superior	15,0 mm
Lubrificação	Grafite para forjamento a quente
Material de revestimento	DC04 (1,0 e 1,5 mm); 22MnB5 QI (1,0 e 1,5 mm); 22MnB5 QII (1,0 mm); DP600 (1,0 mm)

Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4.4 Análise da máscara de revestimento

A análise das máscaras após a aplicação no experimento de forjamento foi realizada a fim de avaliar espessura, dureza e microestrutura das máscaras e comparar com os resultados antes do experimento. A máscara foi cortada conforme desenho esquemático da Figura 3.30, sendo utilizado equipamento de jato d'água para minimizar os efeitos de corte na espessura do material. As amostras foram divididas em três seções  $t1$ ,  $t2$  e  $t3$ , com aproximadamente 12 mm de largura e 100 mm de comprimento, para análise das variações na espessura antes e após o forjamento. Ambas as amostras foram embutidas em resina (Epoclear 1000 [1:0.6]) e preparadas através de preparação metalográfica padrão de lixamento, polimento e ataque químico adequado para análise em microscópio óptico digital.

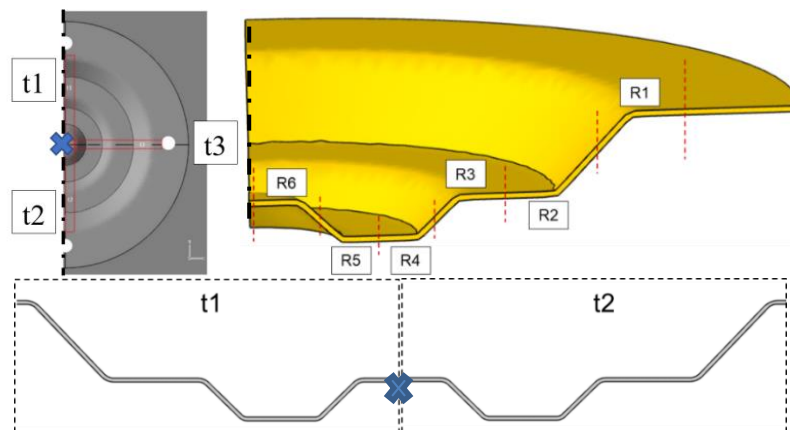


Figura 3.30 Desenho esquemático da retirada das amostras e regiões para análise da máscara antes e depois do forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.4.5 Modelagem numérica

As curvas de escoamento obtidas experimentalmente foram tratadas e inseridas no software Deform<sup>TM</sup> 2D/3D para avaliação do comportamento como máscara de revestimento utilizando uma geometria axissimétrica de forjamento.

O modelo numérico considerou as simulações prévias do processo e os resultados experimentais como curva de escoamento do material em diferentes temperaturas, dureza e comportamento durante o experimento de forjamento a quente.

Para a análise das etapas do ciclo de forjamento, a modelagem numérica utilizou a opção de múltiplas operações disponível no software Deform<sup>TM</sup>-2D/3D (MO), incluindo todas as etapas do ciclo de forjamento, conforme apresentado na Figura 3.31. As simulações foram utilizadas para identificação das regiões críticas do processo, assim como para comparação do comportamento do material em função da espessura e material.

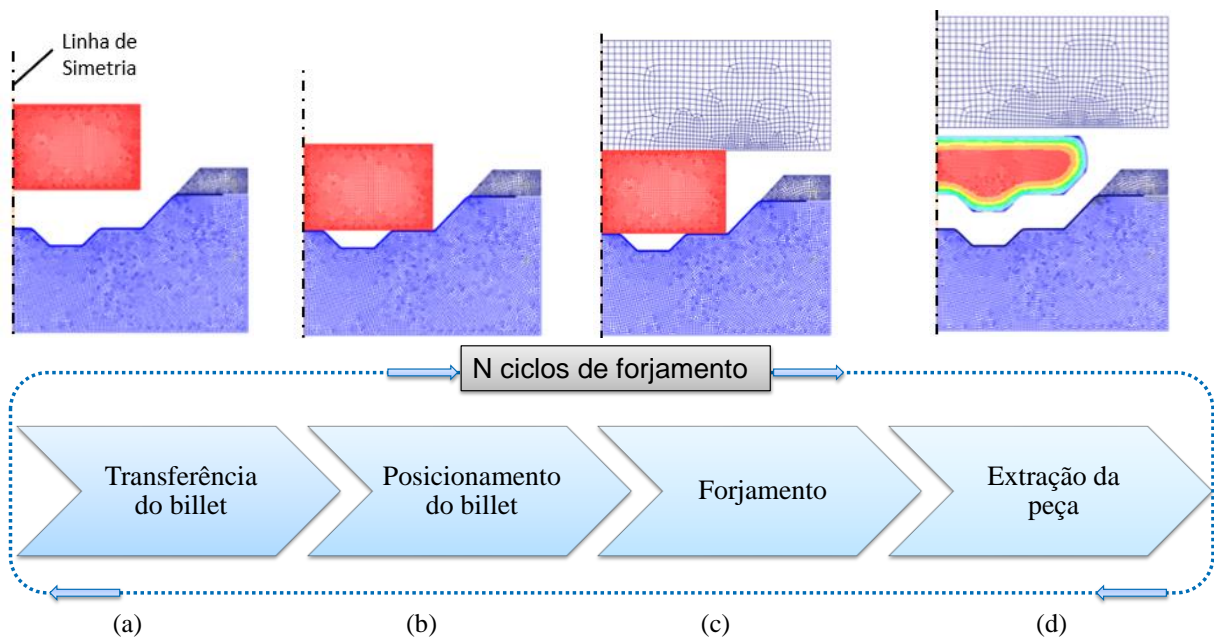


Figura 3.31 Modelagem numérica utilizando MO – 2D: (a) transferência do billet, (b) posicionamento, (c) processo de forjamento e (d) extração do produto forjado. Fonte: Elaborado pela autora.

Ainda utilizando a modelagem com operações múltiplas (MO), processos de forjamento com  $N_1 = 5$  e  $N_2=10$  e condição de desgaste da matriz inferior foram avaliados através da utilização do modelo de desgaste inserindo a equação de Archard. O modelo foi construído com e sem máscara de revestimento para fins de comparação.

A Tabela 3.14 apresenta os parâmetros utilizados para a análise numérica tridimensional, simulação dos ciclos de forjamento com múltiplas operações. Para reduzir o

tempo computacional foi utilizado o recurso de simetria, sendo projetada um quarto (1/4) da geometria original, conforme pode ser observado na Figura 3.32.

Tabela 3.14 Parâmetros do modelo numérico utilizando MO (*Multiple operation*) e N ciclos de forjamento.

Parâmetro	Descrição
Transferência do Billet	6 s
- ambiente	20°C
Posicionamento do Billet	3s
- ambiente	5°C
Forjamento	~15mm
- Velocidade	75 mm/s
Extração	3 s
- coef. Transferência de calor	15 N/s/mm/C
Temperatura inicial	
- Matriz superior	300°C
- Matriz inferior	300°C
- Billet	1200°C
- Máscara de revestimento	20°C
Atrito	Shear – Coulomb
- Billet/Matriz superior	0,3
- Billet/revestimento	0,3 – 0,08
- Revestimento/Matriz inferior	0,7 – 0,08

Fonte: Elaborado pela autora.

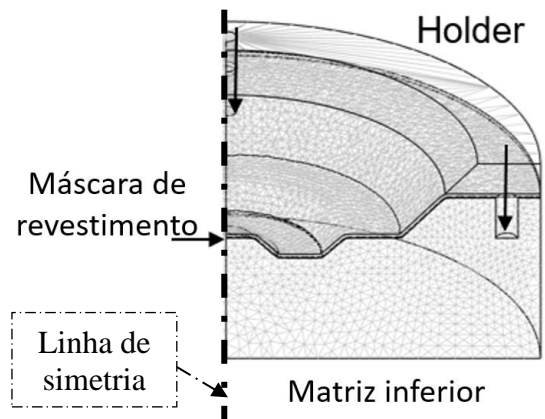


Figura 3.32 Modelo numérico geometria (1/4) axissimétrica 3D. Fonte: Elaborado pela autora.

Para cada uma das etapas do ciclo de forjamento foram utilizados parâmetros específicos de acordo com o tipo de contato e operação realizada. O modelo de atrito inicial foi baseado em experimentos prévios e indicação disponível no manual do software Deform™ (SFTC, 2014) considerando uma operação de forjamento com lubrificação – coeficiente de atrito homogêneo  $Shear = 0,3$ .

Posteriormente, considerando a máscara como corpo deformável foi possível verificar a complexidade do modelo (matriz com comportamento elástico, máscara e billet deformáveis plasticamente) e a necessidade de adequação do modelo de atrito utilizado. Após a realização de testes e validação através dos experimentos iniciais, foi então escolhido o modelo de atrito *hybird* como o mais adequado. Este modelo híbrido considera simultaneamente comportamento de atrito *Shear* – indicado para forjamento e *Coulumb* – indicado para conformação de chapas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise do comportamento do material

Para a seleção do material mais adequado para aplicação como revestimento de matrizes de forjamento, foram realizados ensaios de caracterização das propriedades das chapas antes e depois dos experimentos de forjamento com martelo de queda e prensa hidráulica.

Os resultados das análises química e metalográfica para cada material estão dispostos no Apêndice A e Apêndice B, respectivamente. Por se tratar de classes de aços distintas, observam-se composições químicas e microestruturas variadas que poderão influenciar no comportamento do material quando utilizado como máscaras de matrizes.

A média dos valores obtidos através do ensaio de dureza Vickers das chapas antes dos experimentos de forjamento pode ser observada na Tabela 4.1. Os resultados variaram de 106HV1 para o aço de menor resistência (DC04) a 455HV1 para o aço de elevada resistência (Hardox). Além disso, o aço bifásico DP600 apresentou uma variação de 104HV1 quando comparadas as espessuras de 1,0 e 1,5 mm.

Tabela 4.1 Dureza nominal das chapas – antes dos experimentos em matriz aberta.

MATERIAL DA CHAPA	DUREZA NOMINAL HV1 (média)
DP600 (1,0 mm)	112 <sup>±9</sup>
DP600 (1,5 mm)	216 <sup>±7</sup>
M2 ou HS6-5-2C (2,5mm)	186 <sup>±31</sup>
22MnB5 (laminado) (2,5mm)	156 <sup>±6</sup>
DC04 (1,5mm)	106 <sup>±9</sup>
Hardox450® (1,0mm)	455 <sup>±6</sup>

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.1 apresenta os perfis de dureza para a máscara em aço DP600 (1,0 e 1,5 mm) aplicada no experimento de forjamento com martelo de queda e matriz aberta. Inicialmente, a análise visual das impressões ou marcas resultantes do forjamento evidenciou a influência da temperatura no material DP600, com maior dissipação de calor na máscara de 1,0 mm. Os resultados apresentam uma variação percentual entre 24,3% e 34,4% para a chapa de 1,5 mm e, entre 40,5% e 57,5% para a de 1,0 mm.

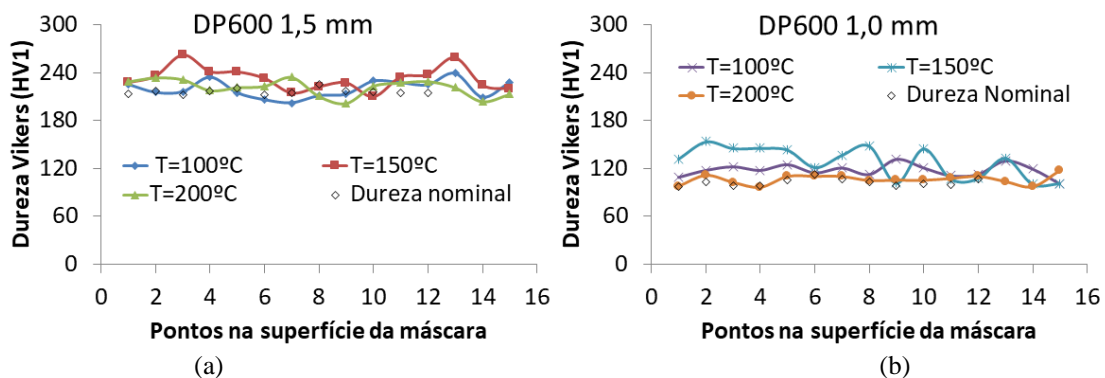


Figura 4.1 Perfil de dureza medido nas máscaras de aço DP600 (a) 1,5 mm e (b) 1,0 mm de espessura, após experimento em martelo de queda a diferentes temperaturas. Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 4.2 apresenta a média das durezas medidas após o experimento, onde verifica-se que a dureza varia de forma crescente com a variação da temperatura da matriz. A maior diferença entre os valores de dureza da chapa antes (valor nominal) e depois do ensaio de forjamento foi observada com a matriz a 150°C, sendo que para a chapa de 1,5 mm o aumento foi de 17HV e, para a chapa de 1,0 mm, 25HV.

Tabela 4.2 Valores de dureza medidos após o ensaio de forjamento com martelo de queda.

Temperatura da Matriz \ Espessura	Média Geral de dureza (HV1)	
	1,5 mm	1,0 mm
<b>Inicial</b>	<b>216±7</b>	<b>112±9</b>
100°C	220±14	118±12
<b>150°C</b>	<b>233±19</b>	<b>127±22</b>
200°C	223±15	106±10

Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.2 mostra os resultados dos experimentos com matriz aberta e prensa hidráulica durante o processo de forjamento sem máscara e a validação do modelo numérico através dos resultados experimentais com máscara. Para ambos os casos, a matriz inferior foi aquecida a aproximadamente 300°C, temperatura utilizada a fim de minimizar os danos causados pelo gradiente térmico do processo.

Inicialmente o experimento foi realizado sem a utilização de máscara a fim de identificar o comportamento do processo em termos de temperatura e força (Figura 4.2a), sendo que os termopares foram posicionados dentro da matriz inferior de forjamento (Figura 4.2b). Posteriormente, foram realizados ensaios com máscara sobre a matriz e os dados de temperatura comparados com os resultados da simulação numérica (Figura 4.2c e Figura 4.2d). Para este experimento, o corpo de prova cilíndrico ( $\varnothing 50 \times 70$  mm) de material AISI 1045 foi submetido



a baixa deformação, em torno de 2 mm, com uma velocidade de 2 mm/s de deslocamento da prensa (Haußmann, 2015).

Os valores de temperatura atingiram 500°C próximo a superfície da matriz (em torno de 1,5 mm abaixo da superfície) com a aplicação de máscara. Através dos resultados numéricos, foi observado um comportamento semelhante da temperatura durante o processo, sendo possível validar o modelo numérico, conforme mostram as Figuras Figura 4.2(b) e 4.2(c).

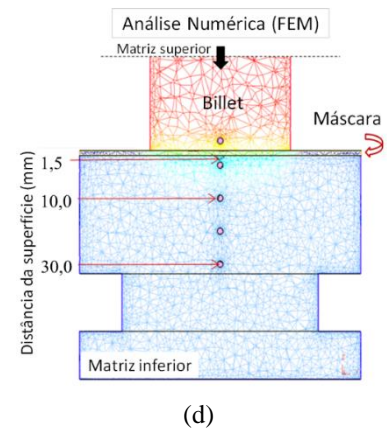
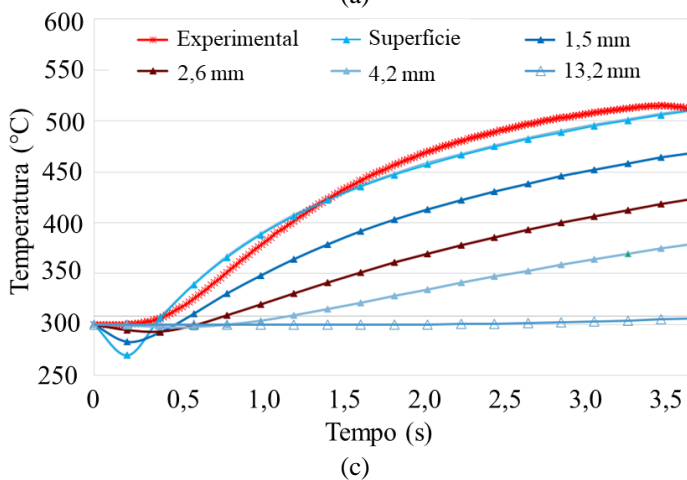
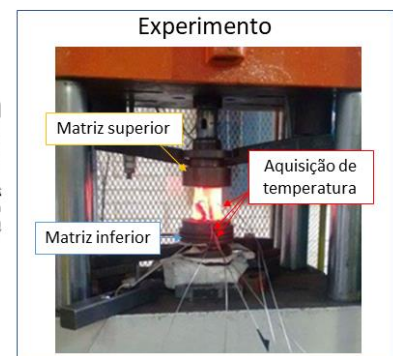
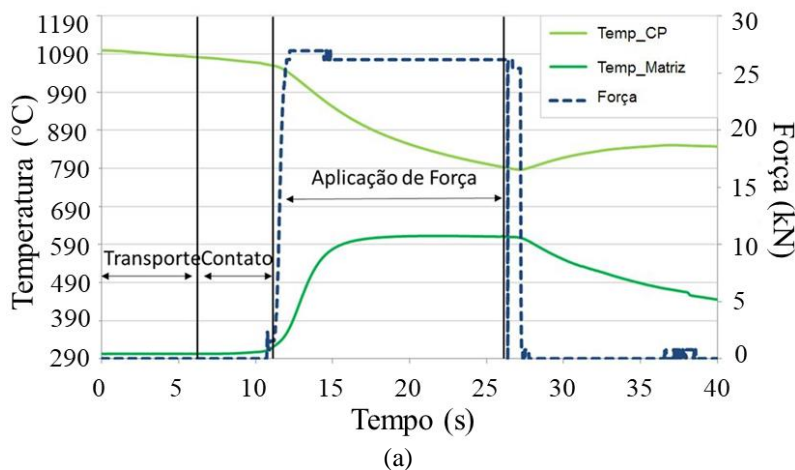


Figura 4.2 Experimento com matriz aberta: (a) perfil força e temperatura x tempo sem máscara (Fonte: adaptado de Haußmann, 2015), (b) posicionamento dos termopares e do bilhet, (c) comparação dos resultados experimentais e MEF com máscara e (d) representação do modelo numérico (FEM). Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.3 apresenta a etapa de forjamento e a análise das forças com e sem lubrificação para os diferentes materiais de máscara testados. Após a validação numérica, as máscaras foram testadas para o forjamento de corpos de prova (*billets*) cilíndricos ( $\varnothing 25,4 \times 35$  mm) com deformação em torno de 60% (Figura 4.3a), e tempo de contato de 5 segundos na máxima deformação. Na Figura 4.3(b) está apresentado o perfil geral da força durante um ciclo de forjamento, onde pode ser observada uma redução de 26% da força com a aplicação do

lubrificante (solução de água e grafite). As Figuras Figura 4.3(c) e Figura 4.3(d) apresentam as forças máximas para cada billet forjado sobre os diferentes materiais de chapas (máscaras) com e sem lubrificação, respectivamente.

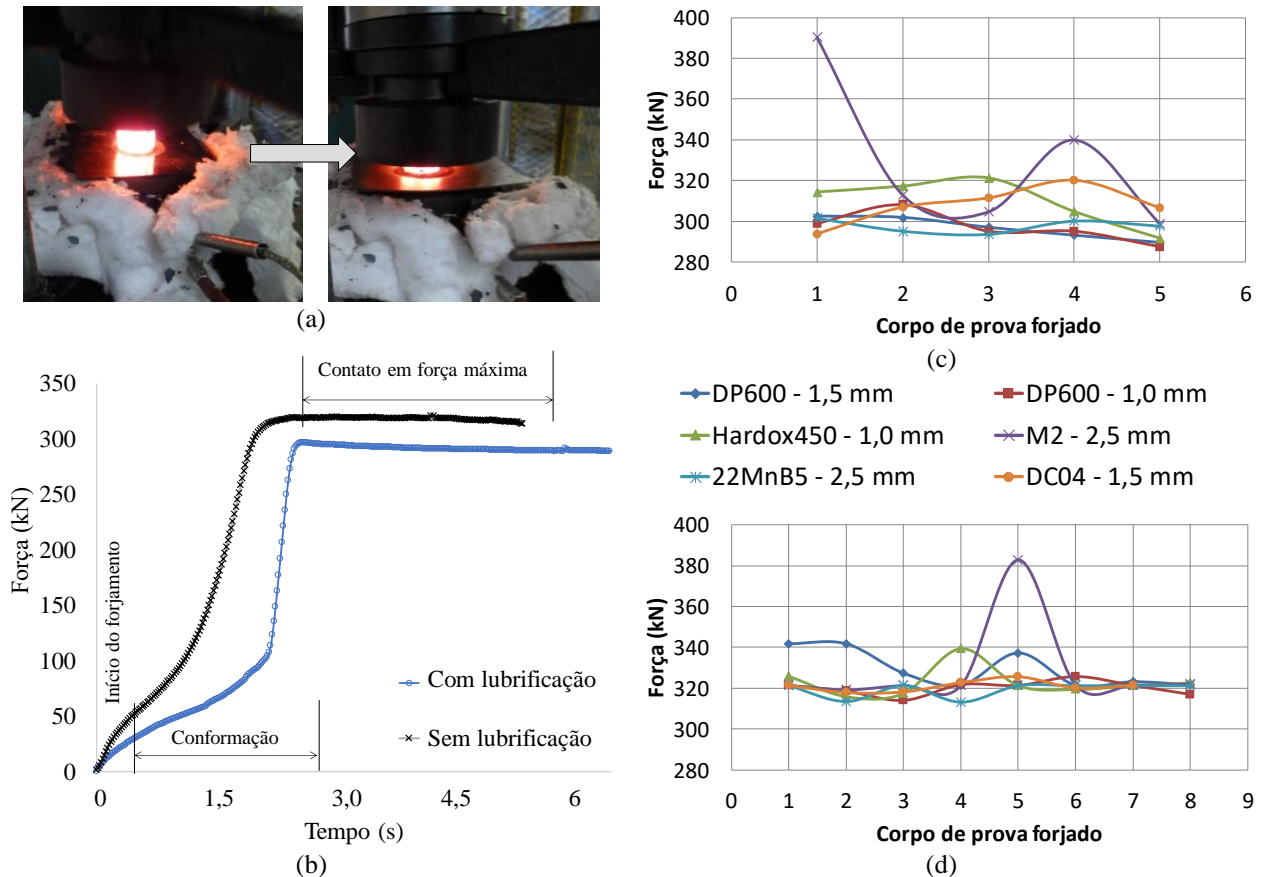


Figura 4.3 Experimento de forjamento com prensa hidráulica em matriz aberta: (a) etapa de forjamento, (b) perfil geral de força durante um ciclo de forjamento, máxima força para cada billet forjado (c) com e (d) sem lubrificação. Fonte: Elaborado pela autora.

A média do experimento com aplicação de lubrificante apresentou valores mínimos de força igual a  $296,8 (\pm 5,5)$  kN com a máscara em aço DP600 (1,5 mm) e valores máximos para o material M2 (2,5 mm), com força média de  $329,4 (\pm 37,5)$  kN. Enquanto o experimento sem aplicação de lubrificante apresentou valores médios entre  $319,3 (\pm 3,7)$  kN para a máscara 22MnB5 e  $329,3 (\pm 9,2)$  kN para a máscara DP600 (1,5 mm).

O tempo máximo de contato entre o corpo de prova (billet) e a máscara para cada ciclo de forjamento ou peça forjada, pode ser observado na Figura 4.4, assim como a análise visual da superfície da máscara após o experimento. O tempo de contato é um fator importante no processo, pois, influencia principalmente nas trocas térmicas entre o forjado e as matrizes de forjamento, assim como na performance da máscara.

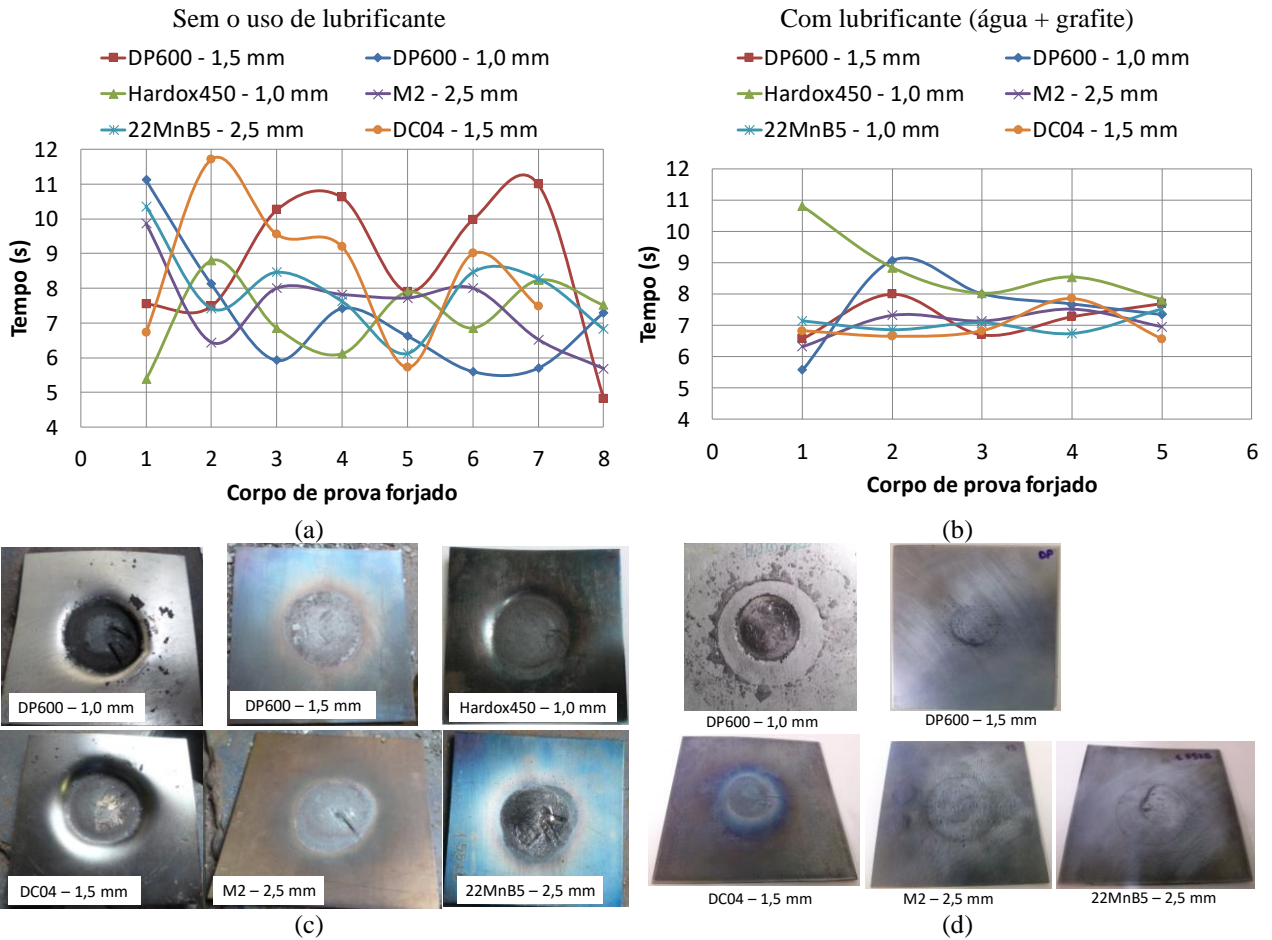


Figura 4.4 Análise do tempo de contato durante o experimento (a) sem e (b) com lubrificante; e análise visual das máscaras após o experimento de forjamento (c) com e (d) sem lubrificação. Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme verifica-se na Figura 4.4(a), o tempo máximo de contato varia de 5 a 12 segundos, isso se deve ao posicionamento manual do billet, além da dificuldade de extração após o forjamento e limpeza da superfície devido à presença de óxidos. Para o experimento com aplicação de spray lubrificante, conforme perfil da Figura 4.4(b), foi possível reduzir o tempo máximo de contato, o qual variou entre 6 a 9 segundos. Nas Figuras Figura 4.4(c) e 4.4(d) a superfície da máscara pode ser avaliada após os experimentos com e sem lubrificação, onde observam-se marcas de contato e distorções geométricas. A diferença entre o desempenho das máscaras com e sem lubrificação é evidente, principalmente em função do atrito e das transformações microestruturais impostas pela elevada temperatura e troca térmica.

A Figura 4.5 apresenta o perfil de dureza das máscaras com e sem contato com o corpo forjado, além dos valores nominais medidos antes do experimento de forjamento. Como pode ser observado, as análises do perfil de dureza antes e depois do ensaio mostram que a dureza reduz para os materiais DC04 e Hardox450®, enquanto aumenta para os materiais M2, DP600

(1,0 mm) e 22MnB5. Ao analisar os resultados da chapa de aço bifásico DP600, verifica-se que a espessura influencia nos resultados de dureza, sendo que o material com 1,0 mm apresentou um aumento de aproximadamente 80HV em relação a dureza nominal.

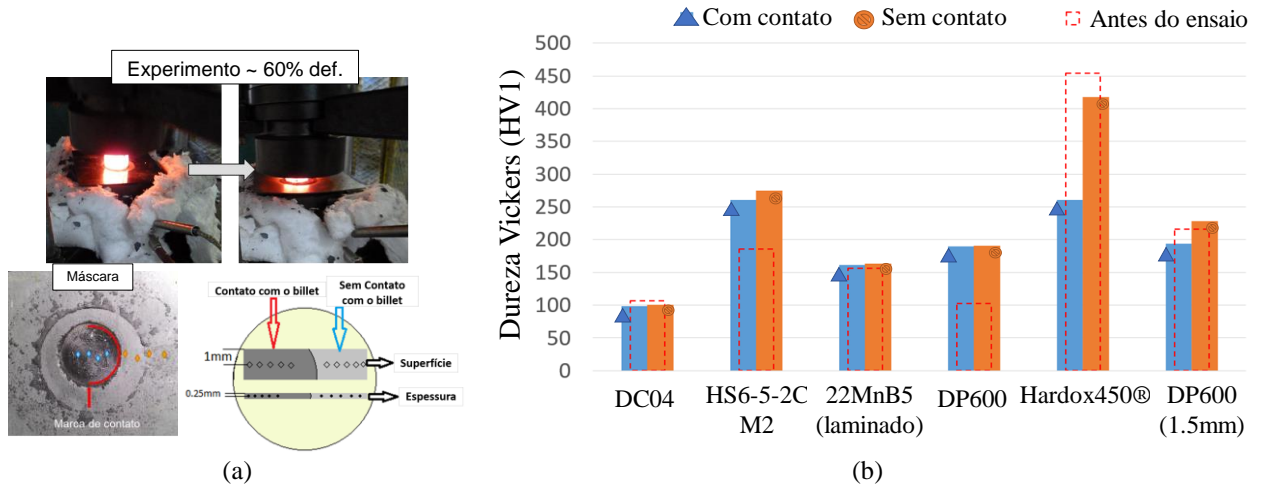


Figura 4.5 (a) Experimento e áreas com e sem contato e (b) perfil comparativo de dureza das chapas testadas através de forjamento em matriz aberta. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.6 apresenta a microestrutura do material 22MnB5 (laminado) antes e após o experimento, sendo possível observar uma variação do tamanho de grão entre as áreas com e sem contato com o billet. O comportamento para os demais materiais analisados pode ser observado no APÊNDICE B – Análise metalográfica.

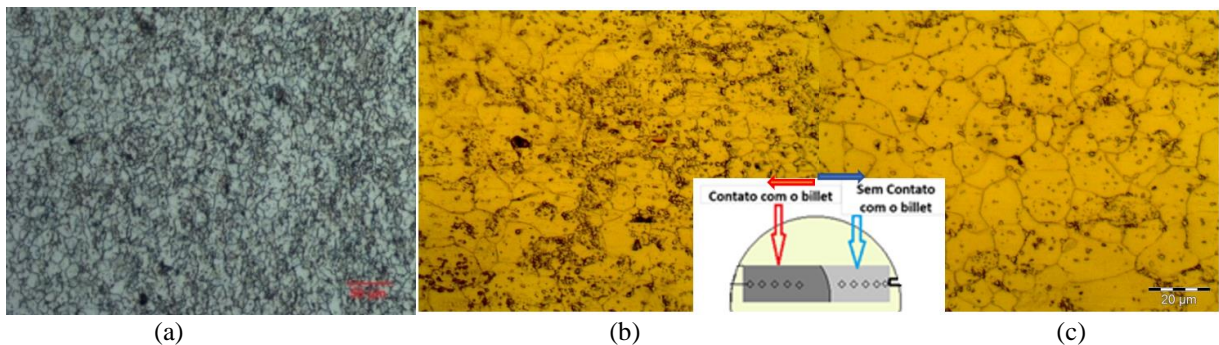


Figura 4.6 Análise metalográfica do material 22MnB5(laminado) (a) como recebido, (b) com contato e (c) sem contato com a peça forjada (matriz aberta). Fonte: Elaborado pela autora.

A análise metalográfica demonstra que há uma variação na microestrutura do material na região de contato com o billet causada pelo tempo de contato em elevada temperatura de forjamento, como era esperado. Pode ser dito que houve uma dissolução da martensita durante o processo de aquecimento e resfriamento entre ciclos de forjamento.

A Figura 4.7 apresenta as etapas de análise da temperatura superficial durante o experimento de forjamento, onde foram consideradas quatro linhas: vertical, horizontal e duas diagonais. Os resultados de temperatura superficial foram considerados para as etapas de



(Figura 4.7a) lubrificação (antes do forjamento), (Figura 4.7b) posicionamento do billet, (Figura 4.7c) forjamento, (Figura 4.7d) após a extração do forjado.

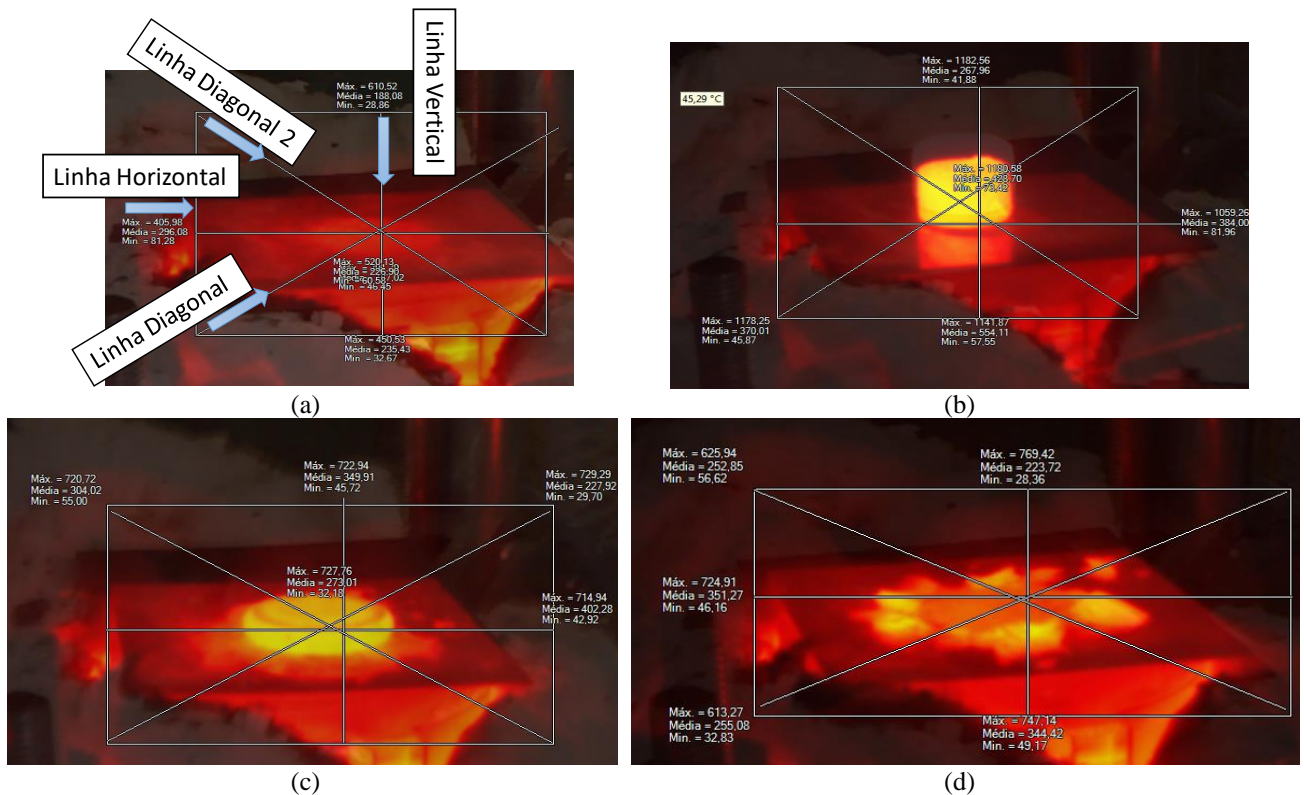


Figura 4.7 Linhas de medição da temperatura superficial (a) antes e (b) durante o posicionamento do billet, e (c) antes e (d) após a extração do forjado em matriz aberta. Fonte: Elaborado pela autora.

Os perfis de temperatura superficial podem ser observados na Figura 4.8 para cada etapa do processo, onde a temperatura superficial máxima da máscara se encontra em torno de 450°C antes do início do experimento. O billet foi posicionado no setup com aproximadamente 1140°C, sendo forjado (~60% de deformação), e extraído com aproximadamente 720°C. Após a retirada da peça (antes da lubrificação) pode ser verificada a presença de óxidos mantendo a temperatura superficial da máscara em torno de 740°C.

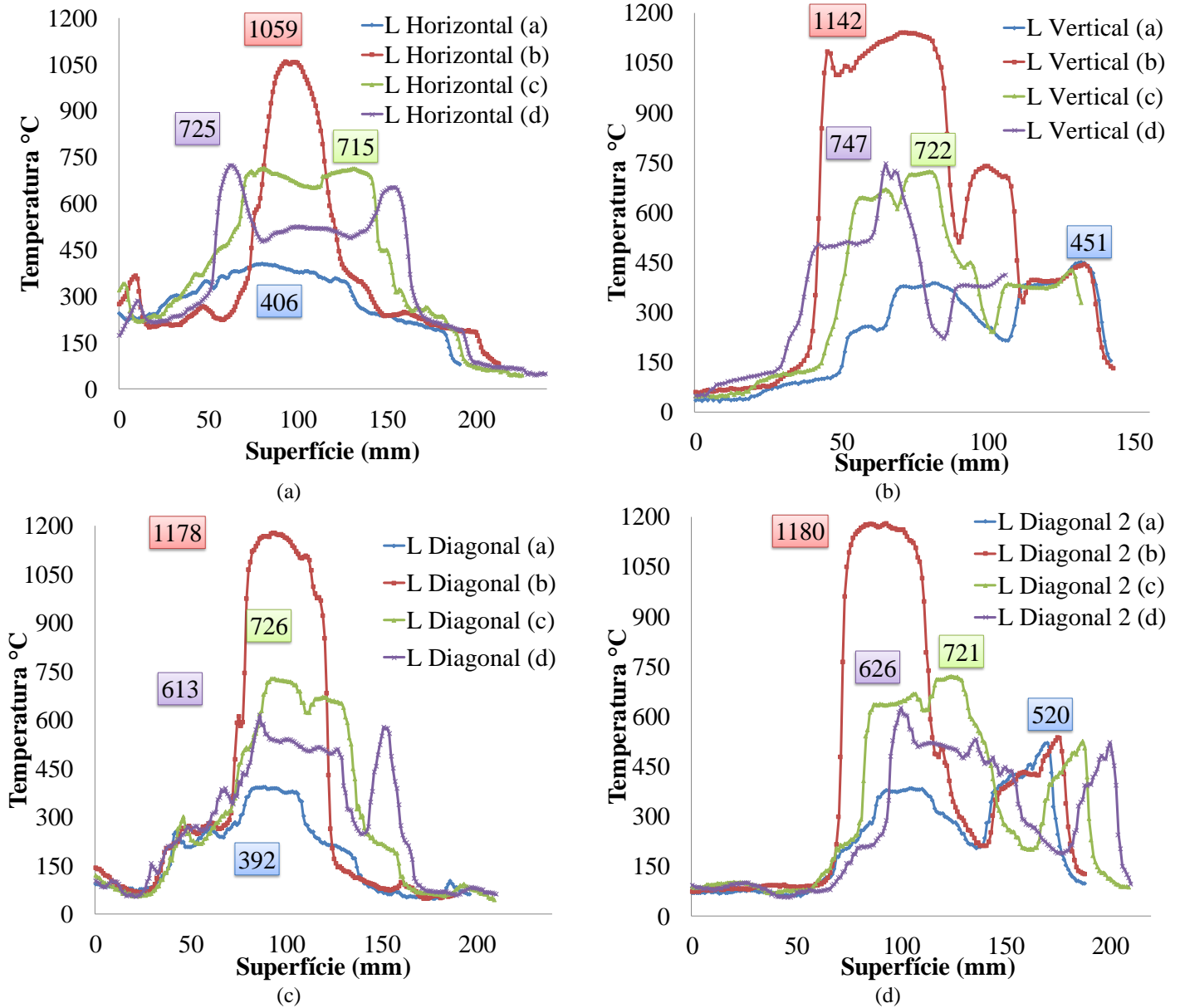


Figura 4.8 Perfil de temperatura superficial: linhas (a) Horizontal, (b) Vertical, (c) Diagonal e (d) Diagonal 2 durante o experimento de forjamento em matriz aberta. Fonte: Elaborado pela autora.

A resistência mecânica das máscaras foi analisada para diferentes temperaturas através do ensaios de tração e os resultados estão apresentados na Figura 4.9. As curvas obtidas em temperatura ambiente são importantes para a etapa de seleção da estratégia de conformação da máscara, que irá depender da geometria de forjamento e do material a ser conformado. Em contrapartida, as curvas de escoamento em temperaturas são necessárias para a análise do comportamento e resistência do material quando aplicado sobre as matrizes de forjamento.

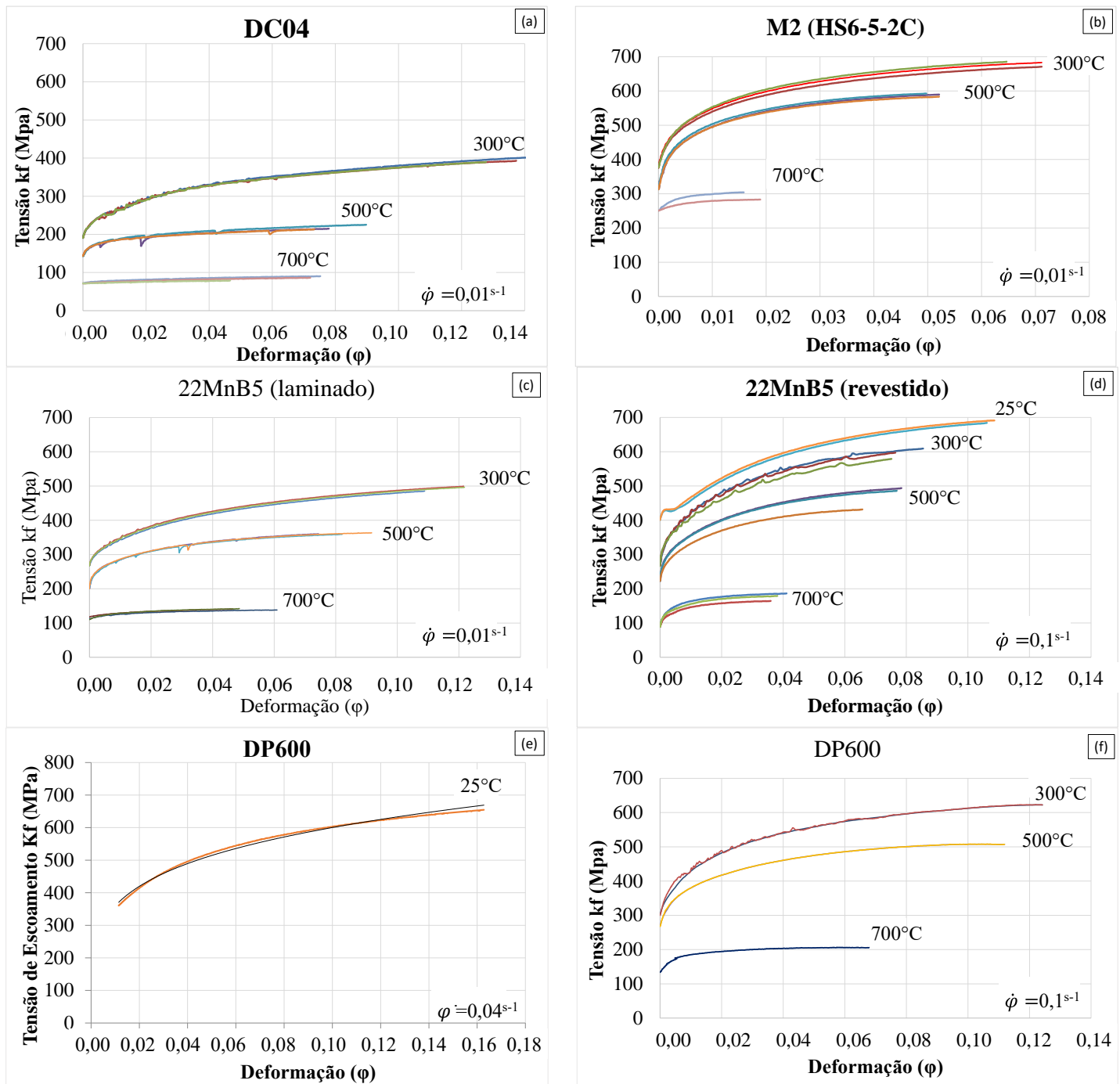


Figura 4.9 Resultado do ensaio de tração em temperatura (a) chapa DC04, (b) M2; (c) 22MnB5 laminado, (d) 22MnB5 revestido (e) DP600 a temperatura ambiente, (f) DP600 em temperatura. Fonte: Elaborado pela autora.

Para o aço DC04 (Figura 4.9a), o resultado de tensão máxima na temperatura de ensaio de 300°C foi de 400Mpa e de 100MPa a uma temperatura de 700°C, enquanto o aço M2 resultou em tensões de 700 e 300MPa (Figura 4.9b). Conforme apresentado nas Figuras Figura 4.9(c) e Figura 4.9(d), a tensão do aço microligado 22MnB5(laminado) varia de 500 a 120MPa nas temperaturas de 300°C e 700°C, respectivamente; em contrapartida, a tensão para o 22MnB5 (revestido) e sem tratamento aumentou cerca de 20% e 58% para as mesmas temperaturas. A

curva de escoamento obtida para o aço bifásico a temperatura ambiente apresentou valor máximo de tensão igual a 650MPa, conforme pode ser observado na Figura 4.9(e), assim como os valores entre 620 a 200MPa para os ensaios em temperatura como mostra a Figura 4.9(f).

A Figura 4.10 apresenta os resultados dos ensaios de tração para o material 22MnB5 (revestido) após têmpera em água, assim com os resultados para o material Hardox450®. Como pode ser observado, ambos os materiais apresentam alta resistência mecânica em temperatura ambiente – 1600 a 1800 MPa, sendo que a 500°C a tensão reduz aproximadamente 750 MPa.

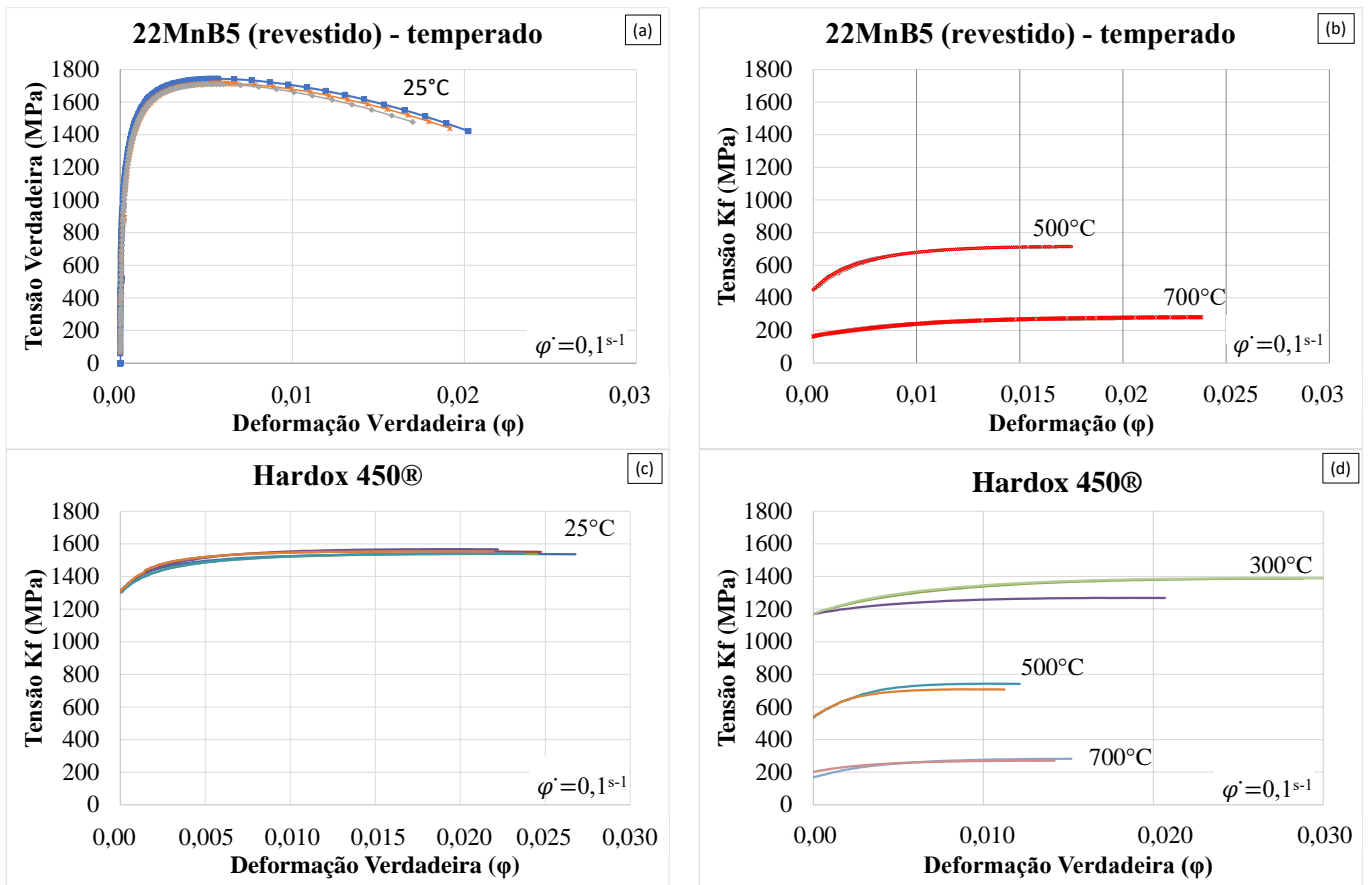


Figura 4.10 Resultado do ensaio de tração: (a) temperatura ambiente e (b) a 300, 500°C para o material 22MnB5 (revestido) após têmpera; (c) temperatura ambiente e (d) a 300, 500, 700°C para o material Hardox450®. Fonte: Elaborado pela autora.



## 4.2 Aplicação do revestimento em geometria axissimétrica simples

A fim de verificar o comportamento do conjunto máscara, matriz e peça forjada, foram analisadas duas geometrias axissimétrica simples de forjamento em matriz fechada: cilíndrica e cônica.

A Figura 4.11 apresenta os resultados numéricos de análise da temperatura e do carregamento de um forjamento com matriz cilíndrica (copo) com e sem aplicação de máscara. A matriz inferior foi mantida aquecida a 300°C, a máscara DP600 (1 mm) foi inicialmente posicionada sobre a matriz a 100°C e o billet a 1200°C, conforme Figura 4.11(a). Os processos de forjamento com e sem máscara apresentaram valores semelhantes de carregamento na direção em Y, entre 200 e 250 kN, como pode ser observado na Figura 4.11(b).

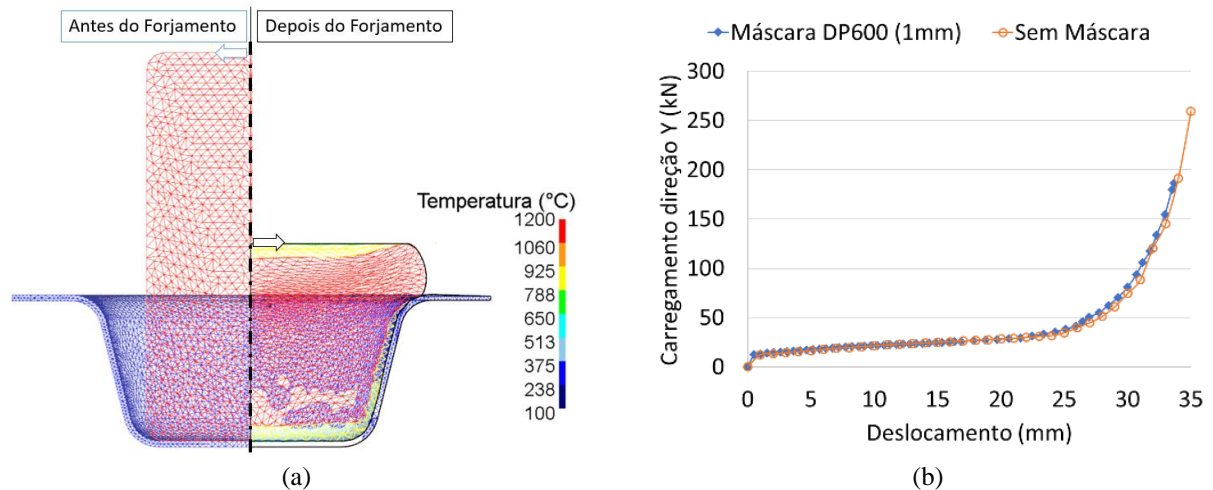


Figura 4.11 Simulação numérica do forjamento de um copo cilíndrico (a) temperatura e (b) força vs. deslocamento da matriz superior na direção Y. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.12 apresenta o perfil de temperatura da máscara e da matriz inferior após a simulação de um ciclo de forjamento com geometria cilíndrica. A temperatura da máscara ao final de um ciclo de forjamento, atinge um valor máximo de 610°C na superfície (superior) em contato com o billet, e um valor máximo de 537°C na superfície (inferior) em contato com a matriz de forjamento (Figura 4.12a). Para a matriz de forjamento, o perfil de temperatura varia significativamente com a aplicação da máscara, conforme apresentado na Figura 4.12b. A superfície da matriz atinge em torno de 620°C ao final de uma peça forjada sem aplicação de máscara e, 390°C quando utilizada uma chapa de material DP600 com 1,0 mm de espessura.

Os resultados numéricos mostram que a máscara (DP600) com 1,0 mm de espessura reduz em torno de 60% a temperatura nos pontos centrais da superfície da matriz, onde as

temperaturas são mais altas. Assim, uma máscara de 1 mm de espessura reduziu a carga térmica na ferramenta de forjamento.

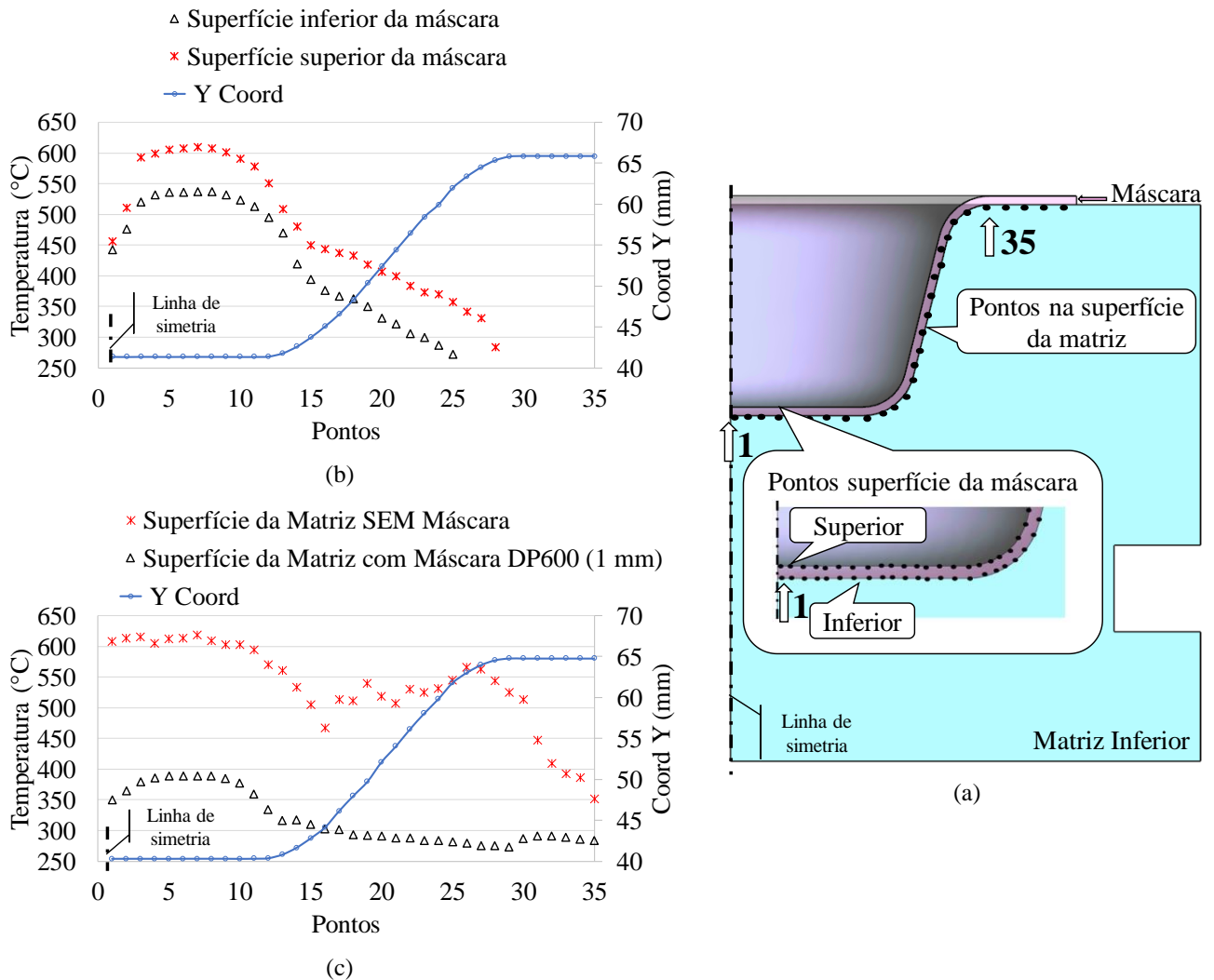


Figura 4.12 Simulação numérica do forjamento de um copo cilíndrico (a) representação dos pontos medidos, (b) temperatura da máscara e (c) temperatura da matriz inferior. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.13 apresenta os resultados do experimento de forjamento realizado com matriz cilíndrica e máscara em aço DP600 (1,0 mm) – conformada previamente na matriz inferior através de estampagem profunda (Figura 4.13a). Foi possível realizar 4 ciclos de forjamento – lubrificação, posicionamento, forjamento e extração da peça forjada; em uma amostra de chapa (Figura 4.13b). O número de ciclos foi limitado devido à dificuldade de extração da peça forjada e fratura próxima à extremidade superior da máscara, conforme pode ser observado na Figura 4.13c.

Após o experimento, foram realizadas medições de dureza Vickers (HV1) para analisar a influência do processo na microestrutura da máscara. A Figura 4.13d apresenta o perfil e o

posicionamento das medições, sendo possível observar um aumento de 40 HV1 na região de maior tempo de contato (parte inferior ou fundo do copo) e carregamento térmico.

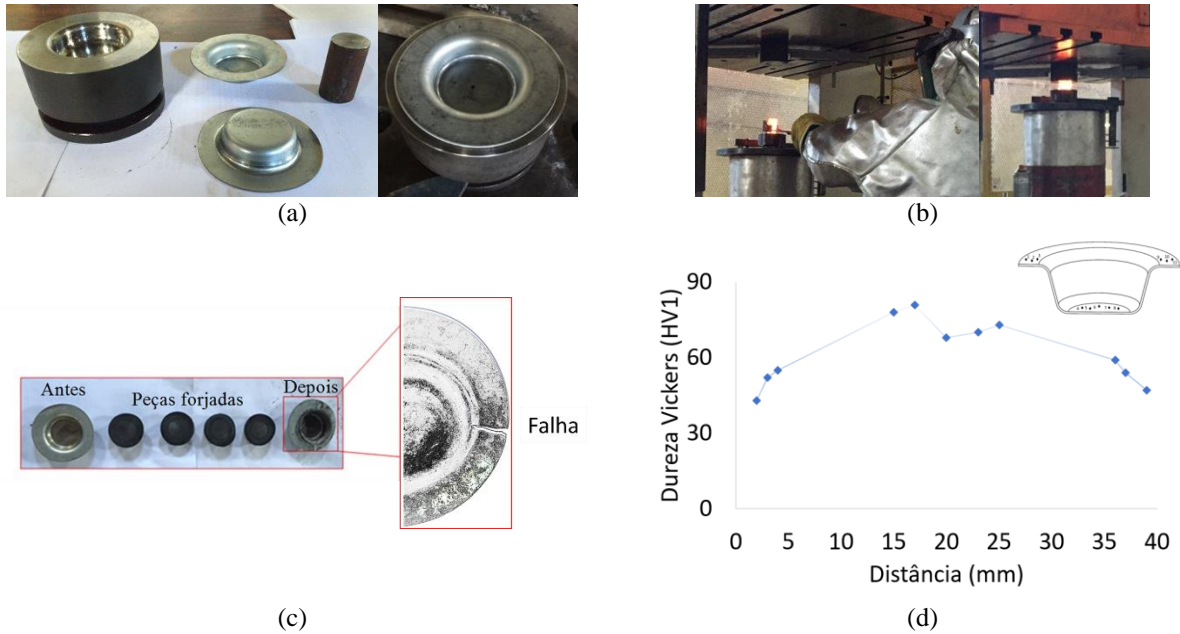


Figura 4.13 Ensaio de forjamento em matriz fechada – geometria de um copo cilíndrico. Fonte: Elaborado pela autora.

A análise da seção transversal da máscara pode ser observada na Figura 4.14, onde verifica-se leve redução de espessura na região de maior contato com o billet – fundo do copo. Em contrapartida, os raios e extremidades apresentam dobras e redução de espessura. Tais deformações levaram o aparecimento da falha (Figura 4.13c) e podem ser explicadas pelo movimento da máscara durante o processo de forjamento devido à falta de fixação e posicionamento manual do billet, incerteza de centralização.

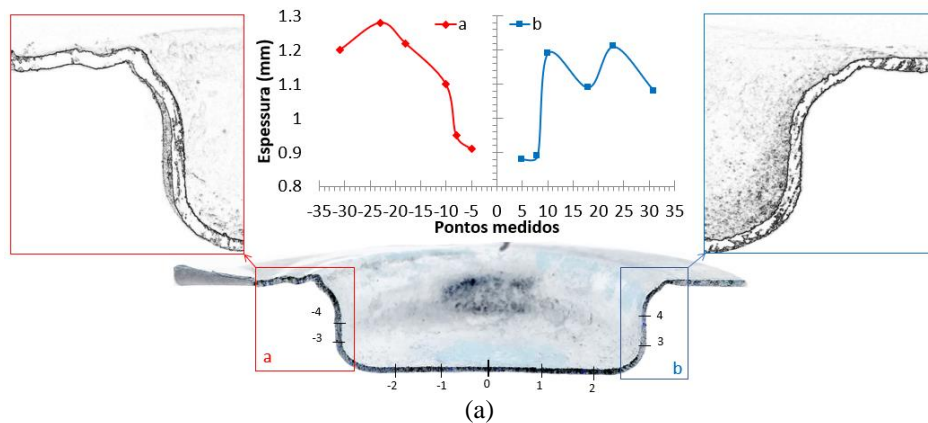


Figura 4.14 Análise da seção transversal da máscara após 4 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados da simulação utilizando a geometria experimental estão apresentados na Figura 4.15 e auxiliam na visualização do comportamento da máscara durante o processo de forjamento. Antes do preenchimento total da matriz inferior, foi possível observar que o fluxo do billet tende a forçar o deslocamento da máscara na direção Z, bem como a aumentar as tensões próximas aos raios. Assim, o fluxo do material, juntamente com as solicitações termomecânicas podem causar dobramento da máscara na região do raio superior e redução na espessura na região inferior, conforme evidenciado nos experimentos.

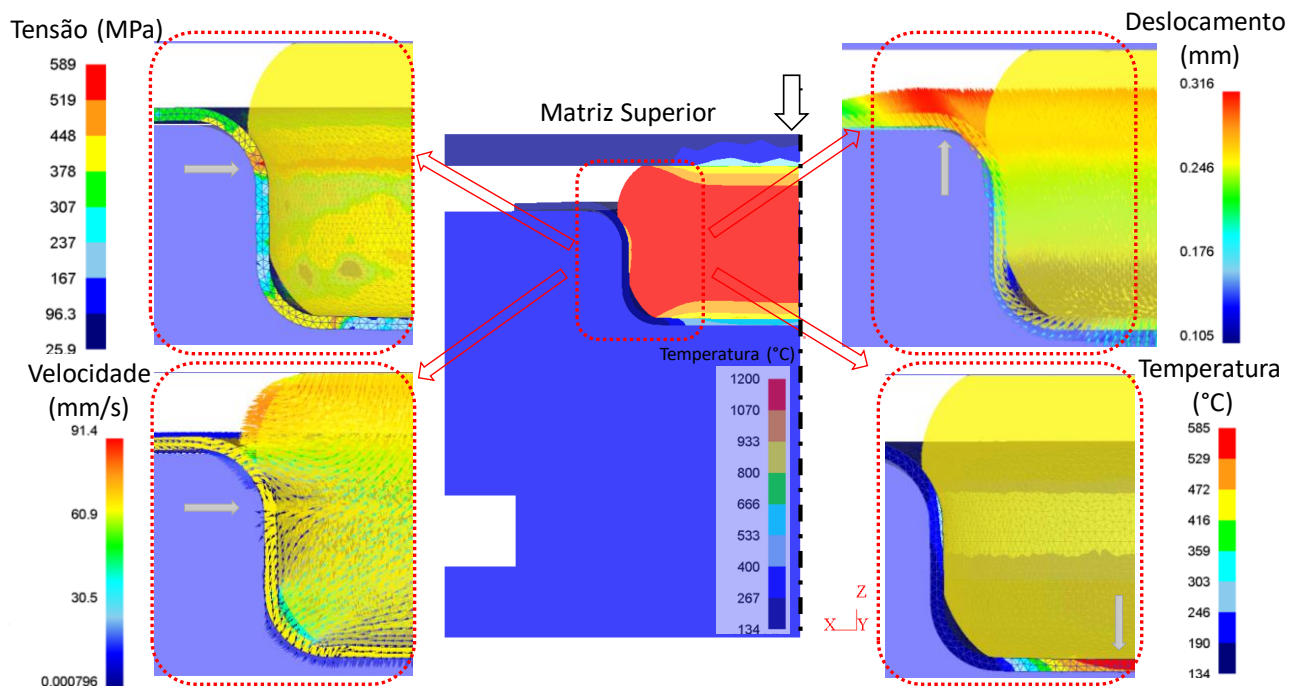


Figura 4.15 Análise numérica durante o forjamento com geometria experimental. Fonte: Elaborado pela autora.

Como o experimento foi realizado com uma geometria de ferramenta pré-existente, foram identificados fatores de influência do processo, como profundidade e ângulos de saída, assim como a necessidade da utilização de um equipamento de fixação da chapa. Tais parâmetros foram analisados e uma nova geometria chamada cônica, foi desenvolvida e testada através da simulação numérica computacional.

A Figura 4.16 apresenta os resultados da simulação numérica com geometria cônica para um ciclo de forjamento. Foram analisados os perfis de temperatura (Figura 4.16a) e carregamento (Figura 4.16b) durante um ciclo de forjamento, além de pontos superficiais na matriz e na máscara após um ciclo completo (Figura 4.16c e d).

Pode ser observado que o carregamento do processo reduz de 200 para 80 kN (Figura 4.16b), quando comparado ao forjamento em matriz de geometria copo cilíndrico, ao mesmo

tempo que as temperaturas da matriz inferior mantêm-se com diferenças de aproximadamente 200°C. Para esta geometria, a região de maior sollicitação termomecânica ficou concentrada na base de contato inicial do billet, apresentando maior dissipação de calor nas extremidades. Além disso, a Figura 4.16d apresenta o perfil de temperatura na superfície da matriz inferior de forjamento, sendo possível observar uma redução em torno de 36% quando aplicada uma máscara de 1 mm de espessura.

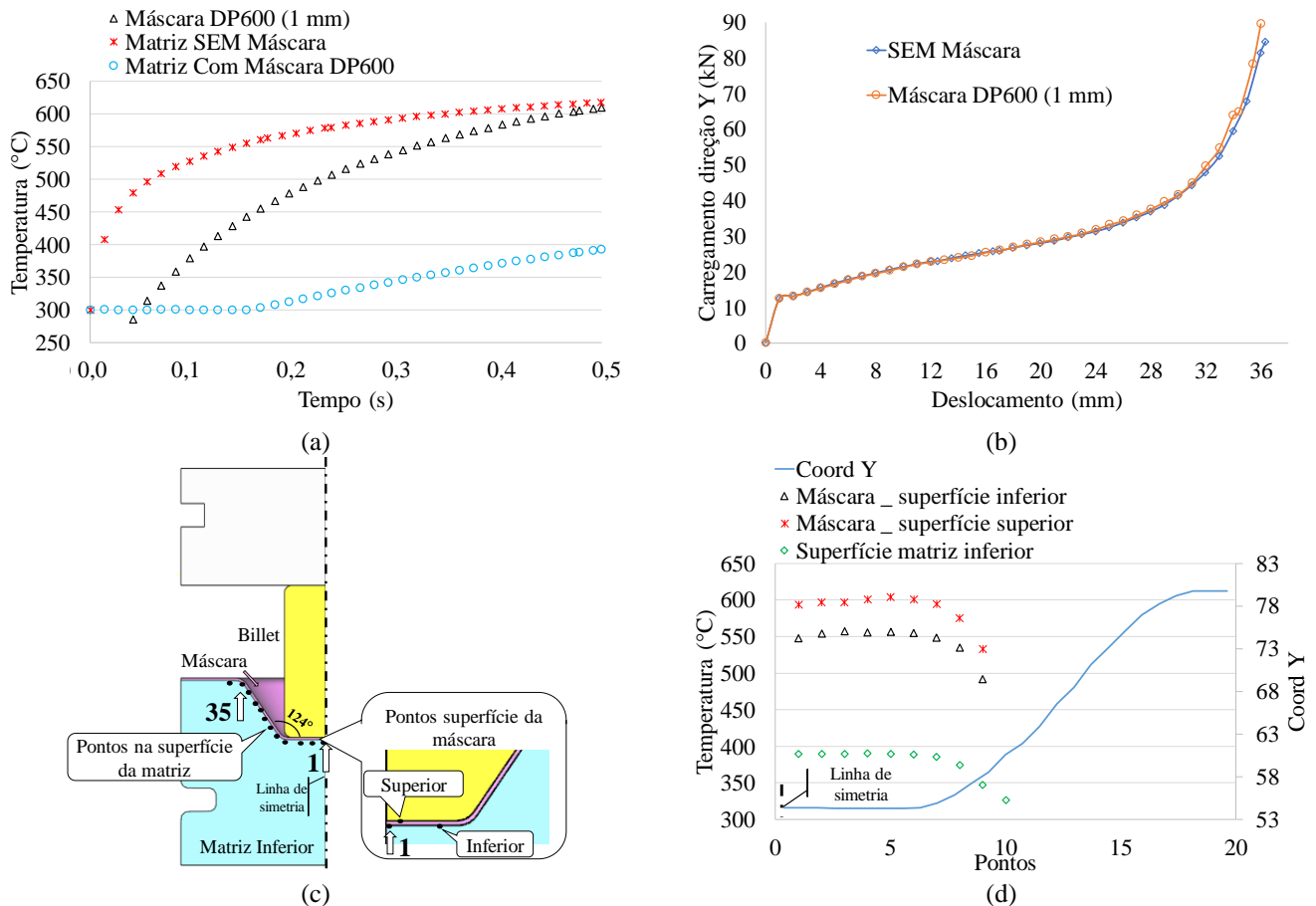


Figura 4.16 Simulação numérica do forjamento em matriz fechada cônica: (a) perfil de temperatura e (b) carregamento da matriz superior na direção Y durante um ciclo de forjamento; (c) representação dos pontos medidos na máscara e na matriz inferior e (d) temperatura superficial medida. Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com Shirgaokar (2008), um projeto preciso de matriz (análise de tensão) e sua previsão de vida útil requerem a investigação do processo de produção sob condições de estado estacionário. Tanto no forjamento a morno quanto no processo a quente, as matrizes apresentam um período transitório antes de atingirem sua distribuição de temperatura operacional constante ou estacionária. O autor afirma ainda que, para analisar o desgaste da matriz ou a resistência à fadiga térmica, é necessário prever a distribuição da temperatura sob a produção em estado estacionário.

Portanto, foram realizadas análises numéricas do ciclo de forjamento através da utilização da ferramenta de operações múltiplas (MO - *multiple operation*) disponível no software Deform<sup>TM</sup>-3D. O ciclo de forjamento foi composto por transferência do billet durante 10 segundos, seguida do processo de forjamento por 36 mm de deslocamento da matriz superior. O número de ciclos analisados variou de acordo com a simulação realizada, para ambas as geometrias (cilíndrica e cônica) com aplicação de máscara foram avaliados cinco (N5) ciclos de forjamento, e dez (N10) para a análise sem a utilização de máscara. Para ambas os casos, foi possível perceber uma redução de 200°C na temperatura da matriz inferior com a aplicação de máscara de revestimento, além da redução da amplitude de temperatura entre um ciclo e outro, o que, conseqüentemente, reduz a sollicitação térmica e, conseqüentemente o desgaste da ferramenta.

A Figura 4.17 apresenta o comportamento da temperatura durante a simulação do processo de forjamento (N5) com aplicação de máscara sobre a matriz cilíndrica, e os resultados da análise sem máscara (N10) podem ser observados na Figura 4.18.

Comparando os perfis da matriz de forjamento (copo cilíndrico) com e sem máscara pode ser observado que os valores de temperatura passam de 630 para 450 °C quando aplicada uma máscara de DP600 com 1 mm de espessura (Figura 4.17a). Verifica-se ainda que, a partir do 3º-4º ciclo de forjamento a distribuição de temperatura atinge o que podemos chamar de estado estacionário, sendo que os valores máximos de temperatura ocorrem no fundo do copo, ou seja na região de maior contato com o billet (Figura 4.17b).

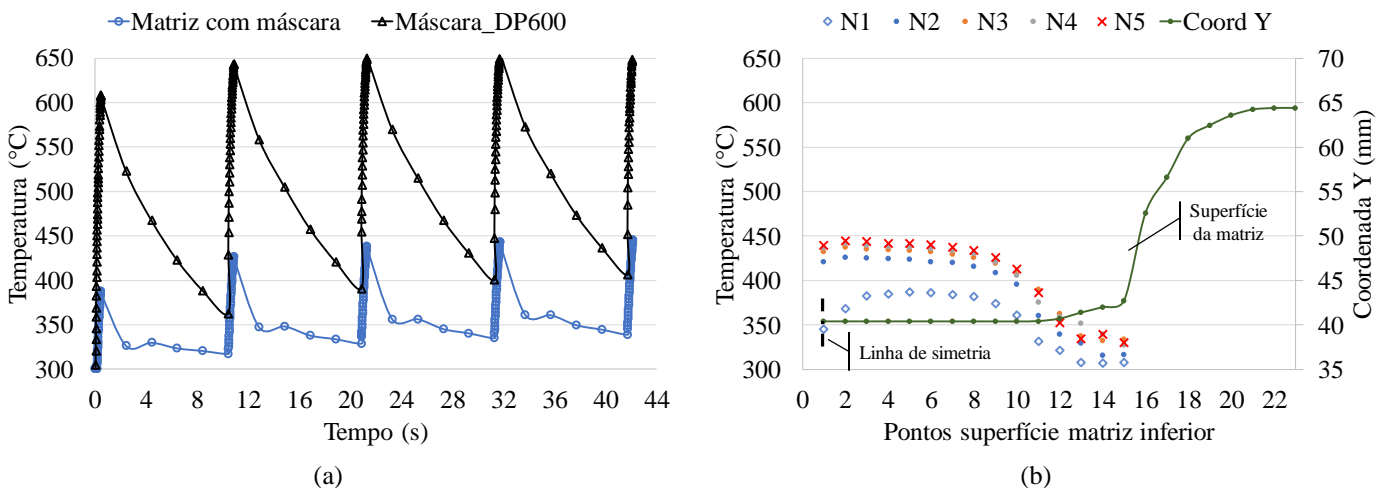


Figura 4.17 Análise do perfil de temperatura para a matriz cilíndrica (copo) após 5 ciclos de forjamento com aplicação de máscara DP600 (1mm): (a) comparativo do perfil geral da temperatura da matriz e da máscara; (b) pontos na superfície da matriz. Fonte: Elaborado pela autora.



Por outro lado, o perfil resultante da análise numérica sem a aplicação de máscara, apresentado na Figura 4.18(a), mostra que a matriz atinge o estado estacionário entre o 6° e 7° ciclo de forjamento com temperaturas superficiais de até 650°C no fundo do copo, sendo possível verificar ainda temperaturas em torno de 525°C na parede do copo (Figura 4.18b).

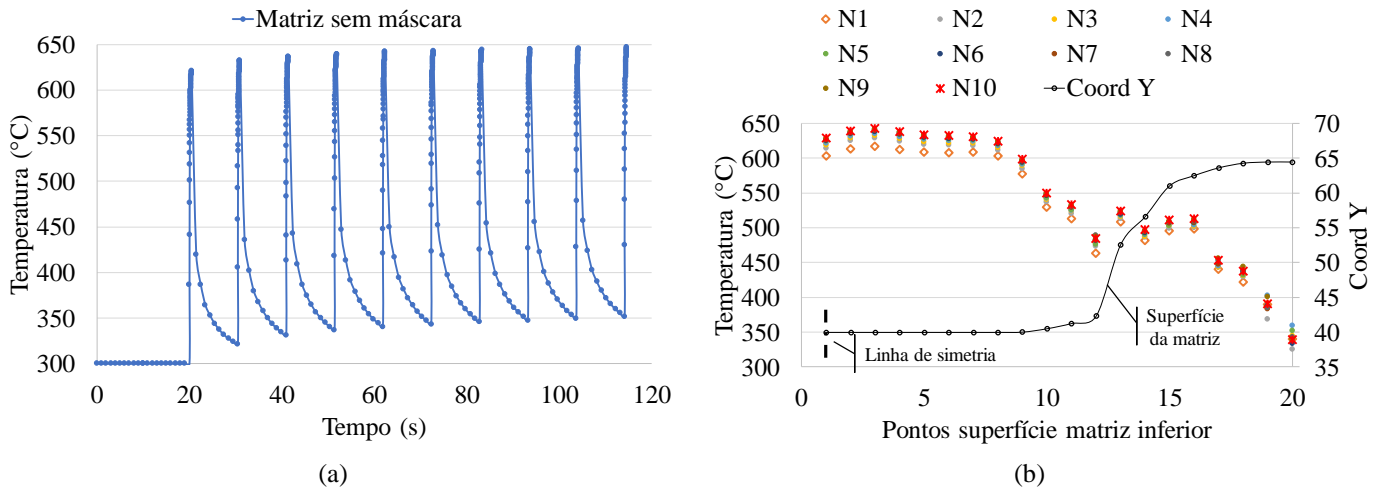
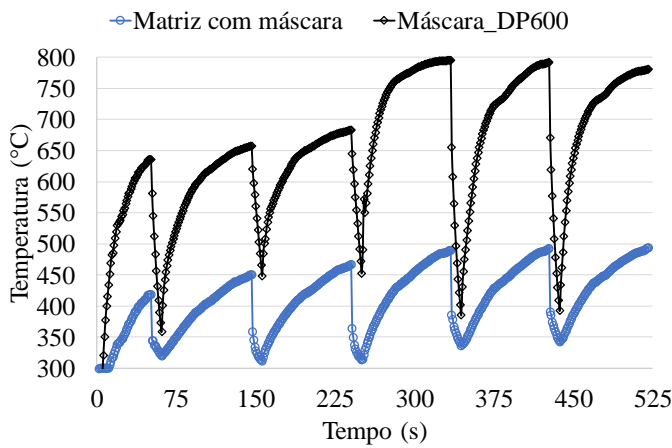


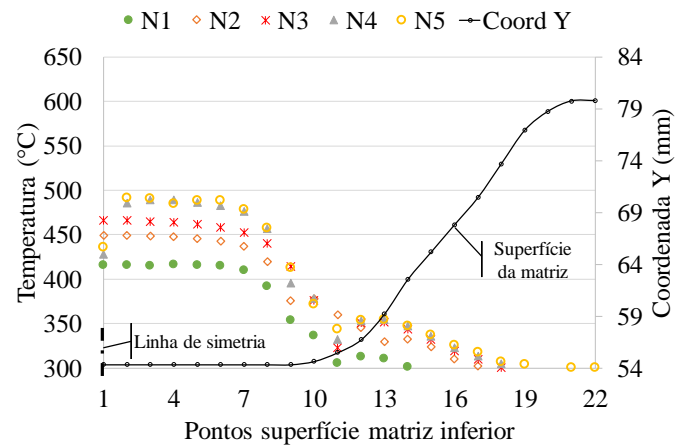
Figura 4.18 Perfil de temperatura da matriz cilíndrica (copo) após 10 ciclos de forjamento sem a aplicação de máscara: (a) perfil geral da matriz e (b) pontos na superfície da matriz sem máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados da simulação com matriz cônica podem ser observados na Figura 4.19. Para este caso, a distribuição de temperatura na máscara variou entre 630°C para o primeiro ciclo e 790°C a partir do 4° ciclo de forjamento (Figura 4.19a). Foi possível observar que a temperatura superficial da matriz com a aplicação da máscara variou de 416° a 490°C para a região crítica, ou seja, na região central – fundo do copo (Figura 4.19b).

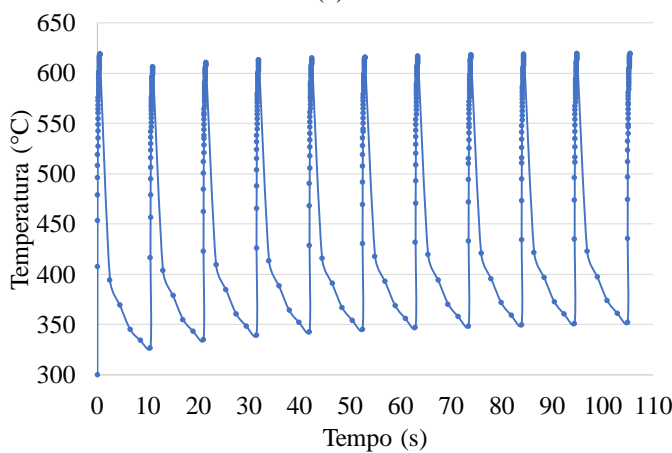
A Figura 4.19(c) apresenta o perfil de temperatura na matriz inferior resultante da simulação do forjamento com matriz cônica sem a aplicação da máscara. Percebe-se uma pequena diferença (13,4°C) na amplitude de temperatura entre os ciclos, atingindo o estado estacionário no 11° ciclo. Para a temperatura superficial da matriz sem a utilização de máscara, conforme apresentado na Figura 4.19(d), observa-se que a temperatura varia de 601°C para o 1° ciclo a 615°C para o 11° no ponto mais crítico. Para os pontos medidos a 1 mm abaixo da superfície da matriz observam-se valores de 503°C e 519°C, sendo em torno de 30°C maior que o valor da temperatura na superfície da matriz quando aplicada uma máscara de 1 mm de espessura.



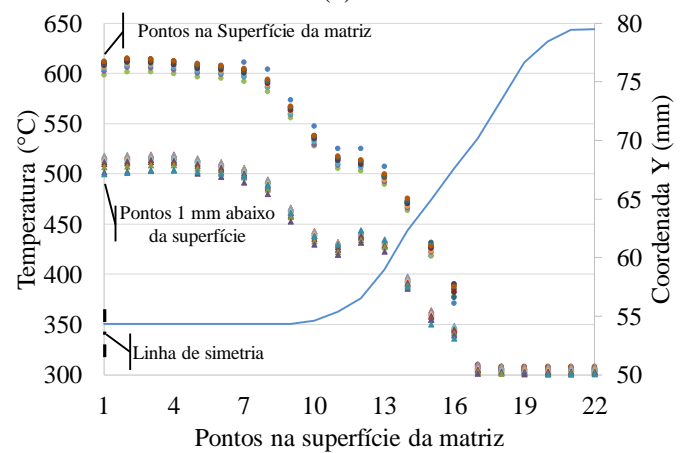
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.19 Análise da geometria copo cônico: após (a) 5 ciclos de forjamento; (b) superfície da matriz com máscara DP600 (1mm); (c) 11 ciclos sem máscara e (d) pontos na superfície e 1 mm abaixo da superfície da matriz sem máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

As análises numéricas evidenciam a influência da geometria na força do processo, assim como na distribuição de temperatura e início do estado estacionário – quantidade de ciclos necessária para que a amplitude de temperatura de um ciclo para outro seja mínima.

A deformação plástica da máscara aplicada sobre a matriz cônica pode ser observada na Figura 4.20. No início do 4º ciclo de forjamento já é possível observar variação da espessura da máscara no fundo e na parede da máscara, apresentando uma deformação plástica máxima de 0,068 (mm/mm). Ao final do 6º ciclo de forjamento, a variação da espessura aumenta e a deformação plástica nas regiões críticas dobra em relação ao 4º ciclo, como apresentado na Figura 4.20b.

A análise realizada através da equação de Archard leva em consideração os parâmetros principais do desgaste abrasivo como a pressão na interface de contato, a velocidade de escorregamento e a dureza do material pelo incremento de tempo do processo. Sabe-se que o



processo tribológico de desgaste em ferramentas de conformação a quente é muito mais complexo. Portanto, os resultados foram avaliados apenas como valores qualitativos, ou seja, uma previsão das regiões críticas e do possível desgaste das máscaras.

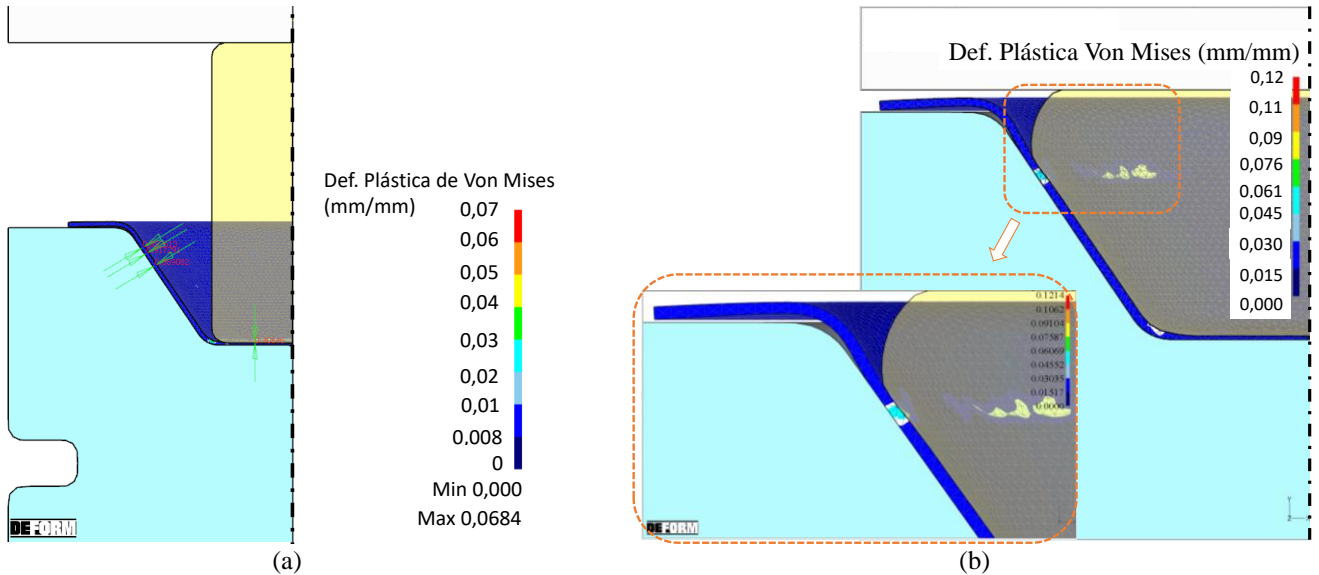


Figura 4.20 Análise da deformação plástica (a) no início do 4º ciclo e (b) após N = 6 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.21 apresenta a velocidade de escorregamento para a máscara e para a matriz após a simulação de 5 ciclos de forjamento. Verificam-se valores elevados na região de parede, tanto com quanto sem a utilização de máscara, o que pode ser explicado devido ao fluxo de conformação do billet.

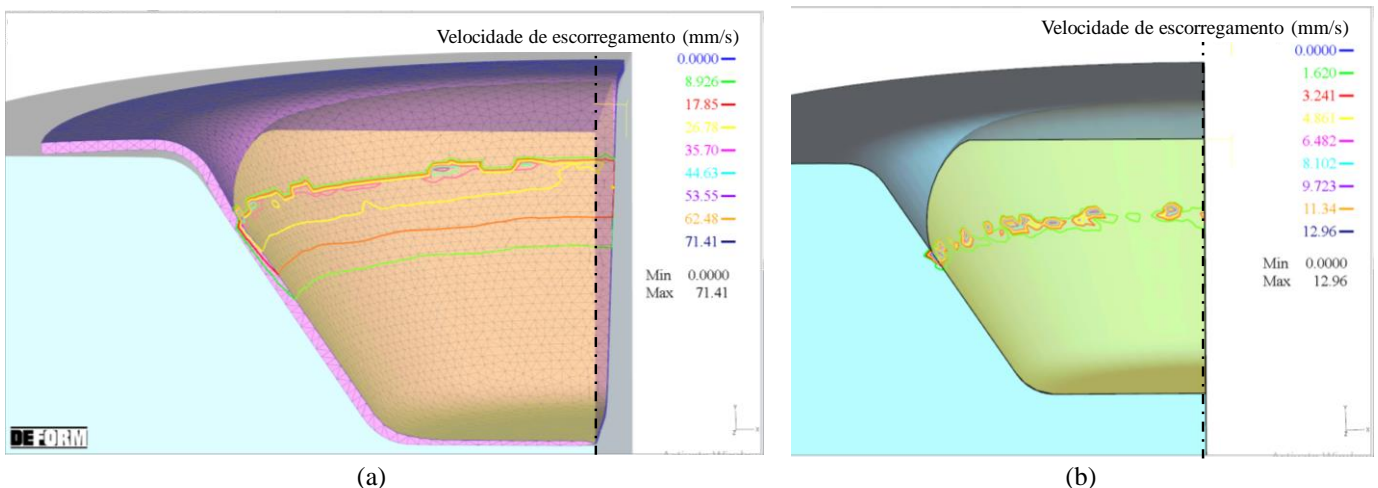


Figura 4.21 Análise da velocidade de escorregamento após N=5 ciclos de forjamento para a matriz cônica (a) com e (b) sem aplicação de máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

### 4.3 Investigação dos parâmetros para o desenvolvimento do método de aplicação da máscara sobre matriz de forjamento

Nesta seção estão descritos os resultados da investigação dos principais parâmetros necessários para o desenvolvimento do método de aplicação da máscara sobre matriz de forjamento. Assim, os requisitos básicos desenvolvidos para cada etapa estão apresentados na Figura 4.22.

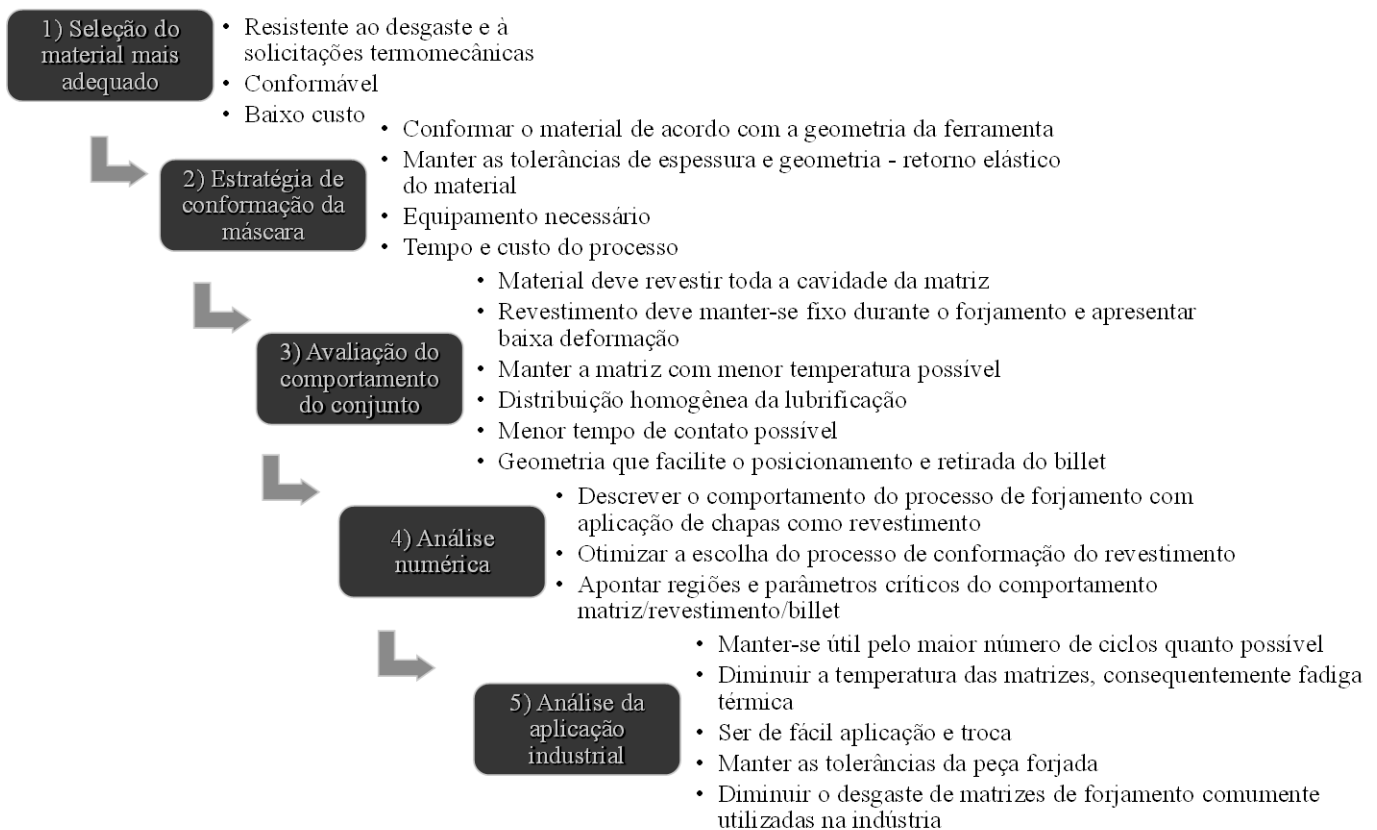


Figura 4.22 Requisitos básicos de cada etapa do desenvolvimento do projeto. Fonte: Elaborado pela autora.

O desenvolvimento destes requisitos considerou os parâmetros principais de projeto de matrizes e de seleção de materiais, assim como a facilidade de aplicação e troca da máscara, a conservação da geometria e tolerâncias exigidas para a peça forjada a custo razoavelmente baixo.

### 4.3.1 Seleção do material

Segundo Ashby (2011), a estratégia de seleção do material deve inicialmente converter os requisitos de design em restrições e objetivos que podem ser aplicados ao banco de dados de materiais. Assim, tais requisitos podem ser expressos como função, restrições, objetivos e variáveis livres do material, ou seja, em um perfil de propriedades necessárias para a seleção do material mais adequado.

Com isso, foi possível identificar as principais funções, restrições, objetivos e variáveis livres, conforme apresentados na Tabela 4.3, para a seleção e aplicação de chapas metálicas como máscara de revestimento de matrizes de forjamento.

Tabela 4.3 Funções, limitações, objetivos e variáveis

<b>Funções</b>	Suportar as cargas térmicas e mecânicas do processo de forjamento Revestir toda a cavidade das matrizes de forjamento Proteger a matriz, reduzindo a transmissão das cargas termomecânicas para as matrizes
<b>Limitações</b>	Suportar o maior número possível de ciclos sem falhar Manter as dimensões e tolerâncias da peça forjada - geometria da ferramenta, quantidade de deformação (limitação / tolerância geométrica do forjado) Resistir faixas de temperatura e diferentes ambientes de trabalho - resistência termomecânica e troca de calor com a matriz (limitação funcional) Manter-se posicionado durante o processo de forjamento – estar fixado a matriz
<b>Objetivos</b>	Minimizar os custos com retrabalho de ferramental de forjamento a quente Resistir ao maior número de ciclos de forjamento quanto possível com máxima proteção da matriz contra elevadas solicitações termomecânicas
<b>Variáveis livres</b>	Espessura da chapa Material da chapa Processo de conformação da chapa

Fonte: Elaborado pela autora.

Portanto, deseja-se um material que possua resistência ao desgaste, ductilidade suficiente para ser conformado e preencher as cavidades da matriz de forma adequada, resistência a fadiga térmica e mecânica para suportar as solicitações a que a matriz fica sujeita durante o forjamento, assim como elevado coeficiente de transferência de calor.

Dentre as características das classes de aços disponíveis para a fabricação de chapas metálicas, foram considerados o alongamento, a resistência mecânica, o limite de resistência à tração e a máxima temperatura de serviço, conforme os diagramas propostos por Ashby (2011) apresentados na seção 2.5 da revisão bibliográfica.

O custo do processo também é um fator relevante de projeto e deve ser considerado para a escolha do material de revestimento. Para chapas de aço, quanto maior a complexidade da liga, maior sua resistência e conseqüentemente seu custo por quilograma. Os aços de baixo

carbono apesar da baixa resistência mecânica, possuem menor custo de produção e, por isso, também foram analisados como máscaras.

Através das análises iniciais do forjamento com matriz aberta e dos diagramas de seleção de material, juntamente com as funções e requisitos necessários para a aplicação em matrizes de forjamento a quente, foi possível avaliar as propriedades dos materiais, conforme apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Análise das propriedades dos materiais testados inicialmente.

<i>Propriedade /Material</i>	<i>DC04</i>	<i>M2</i>	<i>22MnB5 (laminado)</i>	<i>DP600</i>	<i>22MnB5 (revestido)</i>	<i>Hardox 450®</i>	<i>22MnB5 (tratado)</i>
Ductilidade	alta	baixa	média	média	alta	baixa	baixa
Resistência em temperatura	baixa	média	baixa	média	média	média / alta	média / alta
Dureza após ensaio	reduz	aumenta	mantém	aumenta	-	reduz	-
Custos iniciais	baixo	alto	médio	médio/ alto	médio	alto	médio / alto

Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que o material de elevada resistência (Hardox450) possui baixo potencial para aplicação sobre matrizes de forjamento, pois apresentou uma redução de dureza após o ensaio em matriz aberta. Apesar de apresentar resistência mecânica nos ensaios de tração em temperatura, esta chapa possui baixa ductilidade e elevado custo, fatores que dificultam o desenvolvimento do processo. O mesmo ocorre para o material de aço rápido (M2) que, apesar de apresentar um aumento da dureza após o ensaio de forjamento em matriz aberta, não apresenta características de ductilidade e custo suficientes para ser aplicado como máscara de matrizes neste estudo.

O aço bifásico (DP600) apresentou resistência mecânica aceitável para a faixa de temperatura analisada (300 a 700°C), aumento da dureza após o ensaio em matriz aberta de forjamento (5 ciclos), além de apresentar ductilidade média.

Para a chapa de aço microligado ao Boro (22MnB5), as análises iniciais foram realizadas com chapa de material laminado, o qual apresenta resistência e ductilidade médias. Posteriormente, o mesmo material foi analisado antes de qualquer tratamento, sendo apenas revestido com uma camada de Al-Si. Como este material é comumente utilizado em processos de estampagem a quente, foram observadas melhores respostas em resistência mecânica em temperatura, assim como excelente ductilidade inicial.

Portanto, os materiais DP600 e 22MnB5 (revestido com Al-Si) apresentam potencial para aplicação como máscaras de revestimento de matrizes de forjamento a quente. O aço de baixo carbono (grau DC04) apresentou baixa resistência mecânica em temperatura, porém é um

material dúctil e de custo relativamente inferior quando comparado aos demais materiais analisados. Conforme os resultados do ensaio de forjamento em matriz aberta, este material apresentou leve redução (7,5%) na dureza após cinco ciclos e, por isso, pode apresentar potencial para aplicação como máscara.

#### **4.3.2 Estratégias de fabricação do revestimento**

Após a pré-seleção dos materiais com potencial de aplicação como máscara de matrizes, tornou-se necessária a investigação da melhor estratégia de fabricação de acordo com o material da chapa e a geometria da matriz.

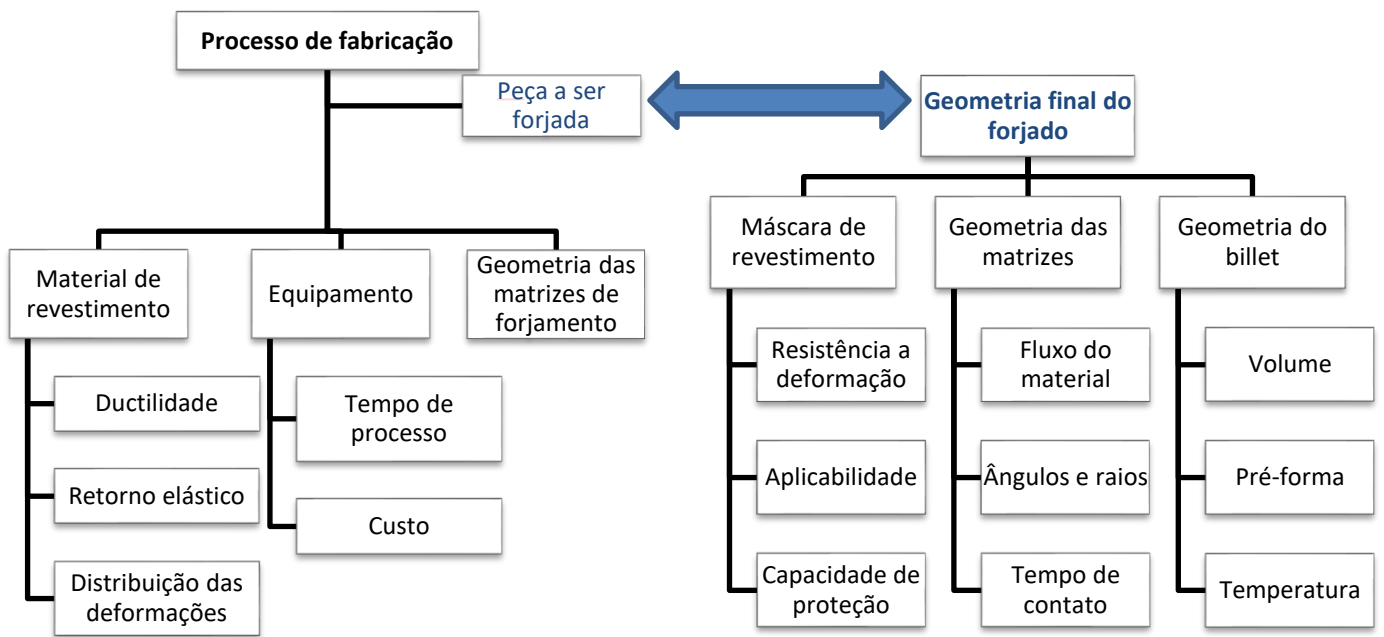
Sabe-se que os processos de conformação mecânica são constituídos por deformações plásticas, onde as tensões aplicadas são geralmente inferiores ao limite de resistência à ruptura do material. Por isso, o comportamento do material durante o processo irá depender de suas propriedades, além do controle dos parâmetros de conformação.

O processo de fabricação da máscara de revestimento a partir de chapas metálicas, está diretamente relacionado à geometria e as tolerâncias finais do produto ou peça a ser forjado, assim como as propriedades do material a ser conformado e parâmetros de processo.

A Figura 4.23 apresenta os fatores que devem ser considerados quando da escolha da estratégia mais adequada para a fabricação do revestimento e suas inter-relações.

Portanto, estratégia de fabricação do revestimento deve estar de acordo com a geometria e as tolerâncias do produto a ser forjado, a facilidade de realização do processo, além dos custos operacionais de processo.

Em função disso, foram analisados três processos de conformação considerando a facilidade de realização do processo e a geometria final da máscara. Foram realizados experimentos de estampagem profunda e incremental, e, para a avaliação do processo de estampagem direta no setup de forjamento, análises numéricas através do método de elementos finitos e do software Deform<sup>TM</sup> 2D-3D com diferentes materiais.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 4.23 Diagrama de inter-relação entre o processo de fabricação do revestimento e a geometria do forjado.

A Figura 4.24 apresenta a máscara em aço DP600 (1mm) conformada através de um processo pré-existente de estampagem profunda, com punção cilíndrico e matriz inferior de geometria cilíndrica (copo). Através deste processo foi possível realizar a conformação da máscara na geometria desejada e sem a presença de falhas visíveis (Figura 4.24).



Figura 4.24 Resultado da estampagem profunda do material bifásico (DP600 – 1mm).

O processo de conformação por estampagem incremental foi avaliado como alternativa de simplificação da fabricação da máscara, conforme pode ser observado na Figura 4.25. Para a aplicação de uma máscara em aço com maior resistência mecânica, a conformação por estampagem ou embutimento profundo torna-se mais complexa em função da baixa ductilidade e do retorno elástico do material, elevando o custo de processo.

A conformação de diferentes geometrias torna-se viável através da utilização de um torno ou equipamento com CNC (comando numérico computacional) e ferramenta de ponta

esférica. Com isso, elimina-se a necessidade de fabricação de ferramentas complexas como no processo de estampagem profunda, o que pode ser considerado como uma vantagem do processo por estampagem incremental.

Como pode ser observado na Figura 4.25(a), o setup utilizado para as geometrias cilíndrica e cônica foi o mesmo, sendo modificada apenas a trajetória da ferramenta no CNC/CAM. O material bifásico DP600 (Figura 4.25b) apresentou falhas quando conformada na geometria cilíndrica, impossibilitando a conformação da geometria desejada em função dos ângulos, das restrições de movimento da ferramenta e da resistência do material. Em contrapartida, a geometria cônica foi conformada sem falhas visíveis (Figura 4.25c), para ambas as espessuras (1,0 e 1,5 mm).



Figura 4.25 Processo de estampagem incremental: (a) setup, (b) geometria copo cilíndrico e (c) copo cônico.

Após as análises experimentais foram realizadas simulações numéricas a fim de avaliar a possibilidade de conformação da máscara no *setup* de forjamento a fim de reduzir o custo e o tempo de fabricação das máscaras. As simulações foram realizadas com ambas as geometrias, avaliando a espessura final da máscara, o preenchimento da cavidade da matriz e a localização das principais deformações, a fim de avaliar parâmetros e regiões críticas ou de influência no processo posterior de forjamento.

A Figura 4.26 apresenta os resultados para a conformação da máscara na matriz de geometria cilíndrica (copo) com material semelhante ao DP600 e espessura inicial de 1,0 mm.

A matriz inferior foi projetada a fim de restringir o movimento da chapa lateralmente, atuando como prensa chapas, assim como utilizar o setup de forjamento para a conformação da máscara. Através dos resultados da simulação verifica-se que o preenchimento da matriz na região dos raios foi insatisfatório (Figura 4.26a), sendo necessário um punção com dimensões específicas. A variação da espessura da máscara pode ser observada na Figura 4.26(b), onde o fundo do copo pode ser identificado como a região mais crítica com redução de 40% em relação a espessura inicial, o que pode ser prejudicial para o processo subsequente de forjamento.

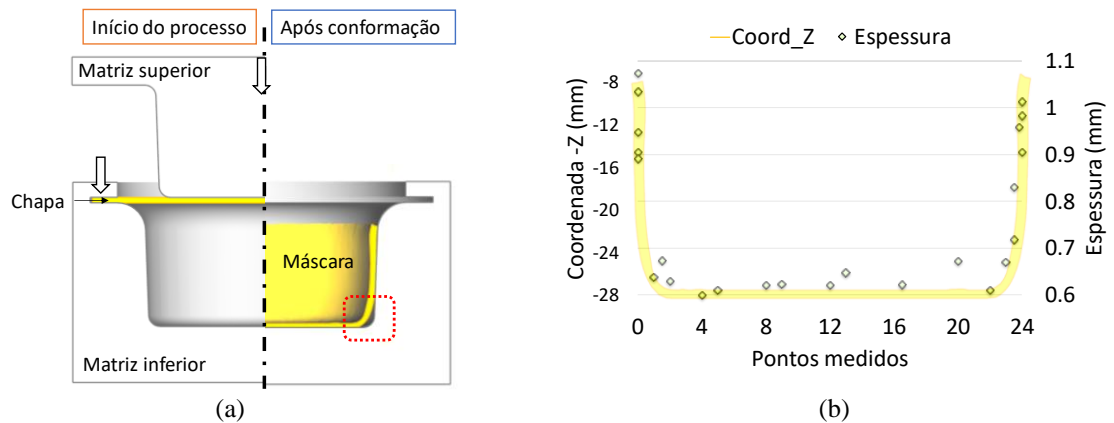


Figura 4.26 Resultado da simulação de conformação da máscara de 1 mm na matriz cilíndrica de forjamento.

A mesma geometria foi utilizada para analisar a conformação de material com espessura de 2.0 mm, conforme apresentado na Figura 4.27.

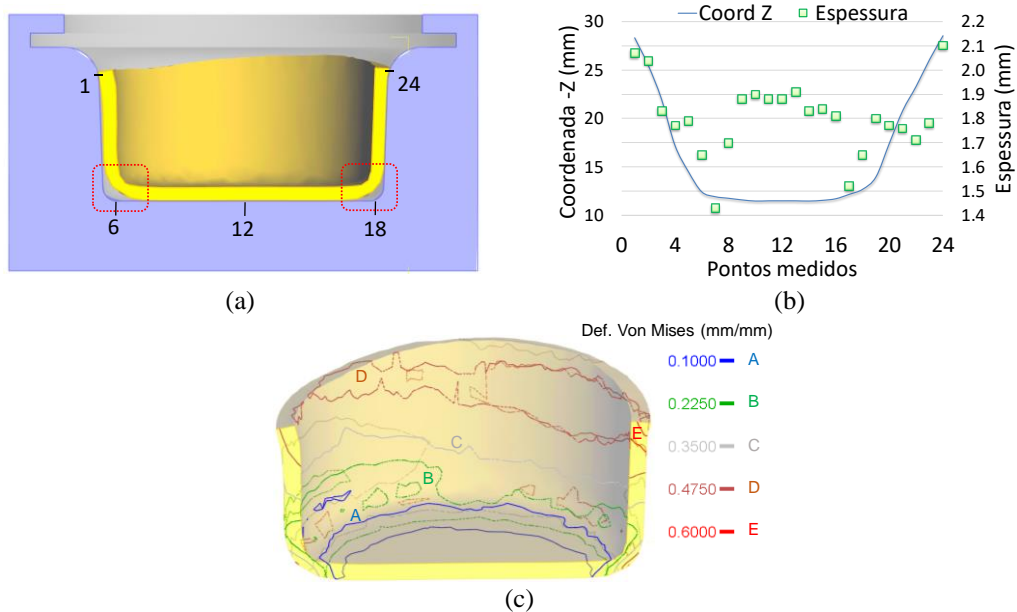


Figura 4.27 Modelo numérico com prensa chapas desenho esquemático (a) da estampagem e (b) resultados numéricos de espessura, tensão e deformação efetiva na chapa.



O preenchimento da cavidade da matriz foi crítico nos raios inferiores, como pode ser observado na Figura 4.27(a), e insuficiente. Porém, verifica-se para este caso, uma redução de espessura em torno de 26%, com valores entre 1,43 e 1,52 mm, o que pode significar uma maior resistência quando submetido ao processo de forjamento.

As Figuras Figura 4.28 e Figura 4.29 apresentam os resultados da simulação de conformação da chapa considerando um processo de estampagem profunda para a matriz de geometria cônica, com punção de dimensões específicas e diretamente no setup de forjamento, respectivamente. Para esta análise, conforme descrito na metodologia, as curvas de escoamento resultantes dos ensaios de tração do aço microligado 22MnB5 (laminado) foram inseridas no modelo e os demais parâmetros podem ser observados na Tabela 4.5 e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Além da variação de geometria, para esta análise o processo de conformação utilizou uma velocidade de 20 mm/s e uma chapa inicial com 100 mm de diâmetro, mantendo-se em torno de 10 mm de borda para posterior fixação, e 1,5 mm de espessura.

Tabela 4.5 Propriedades do material.

<b>Propriedade</b>	<b>Descrição</b>
Material das matrizes	H13
Material da chapa	22MnB5 (laminado)
Módulo de Young	E=206,754 GPa
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,3$
Temperatura	25°C
Tipo de Malha	Tetraédrica
Tamanho de Malha	mínimo 0,5 mm
Remeshing	Ativo – 0,7
Comportamento da chapa	Plástico
Espessura inicial	1,5 mm

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.6 Parâmetros do processo, entrada do software.

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>
Matriz superior	Primária
Comportamento das matrizes	Rígido
Coefficiente de atrito Shear	0,12
Velocidade de estampagem	20 mm/s
Função de escoamento	Von Mises
Encruamento	Isotropic
Tipo	Lagrangian Increm.
Solver	Conjugate gradient
Método de iteração	Direct method
Deslocamento	0,03125 mm/step

Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando a máscara conformada com punção específico, verifica-se que há preenchimento total da cavidade da matriz e variações próximas aos raios e na parte inferior ou fundo do copo (Figura 4.28(a) e (b)). Os raios nas extremidades superiores ou bordas do copo apresentaram entre 15,33 e 26,67% de redução em relação a espessura nominal (1,5 mm).

A Figura 4.28(c) apresenta os valores de deformação total (Von Mises) após a conformação, onde podem ser observados os pontos e regiões críticas com deformações entre 0,1 e 0,2 para o fundo do copo e entre 0,3 e 0,5 para as extremidades ou bordas superiores.

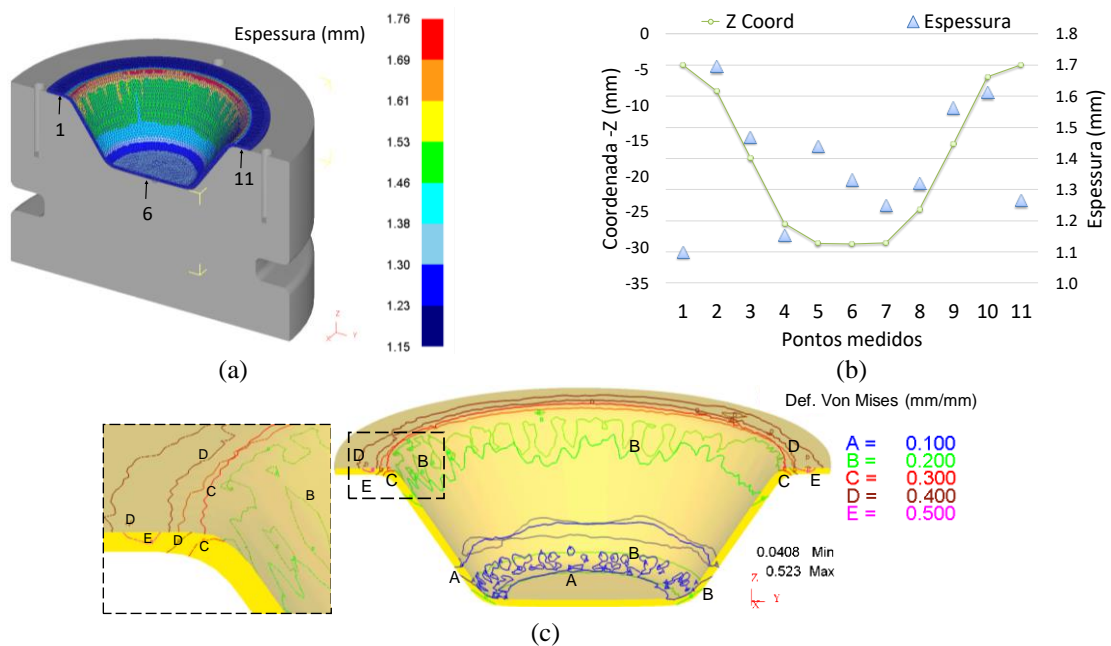


Figura 4.28 Resultados numéricos do processo de estampagem com geometria cônica. Fonte: Elaborado pela autora.

Enquanto que, para a simulação com matriz de geometria cônica e matriz superior de forjamento utilizada como punção (Figura 4.29) foi possível observar que a máscara apresenta deformações significativas após sua conformação no setup de forjamento e que o preenchimento da superfície ou cavidade da matriz é insuficiente (Figura 4.29a). A espessura da máscara (22MnB5) variou de 1,6 mm a 0,8 mm, apresentando valores heterogêneos nas extremidades ou bordas superiores, e uma redução em relação à espessura inicial (1,5 mm) de 16,33% para os raios inferiores ou próximos ao fundo do copo.

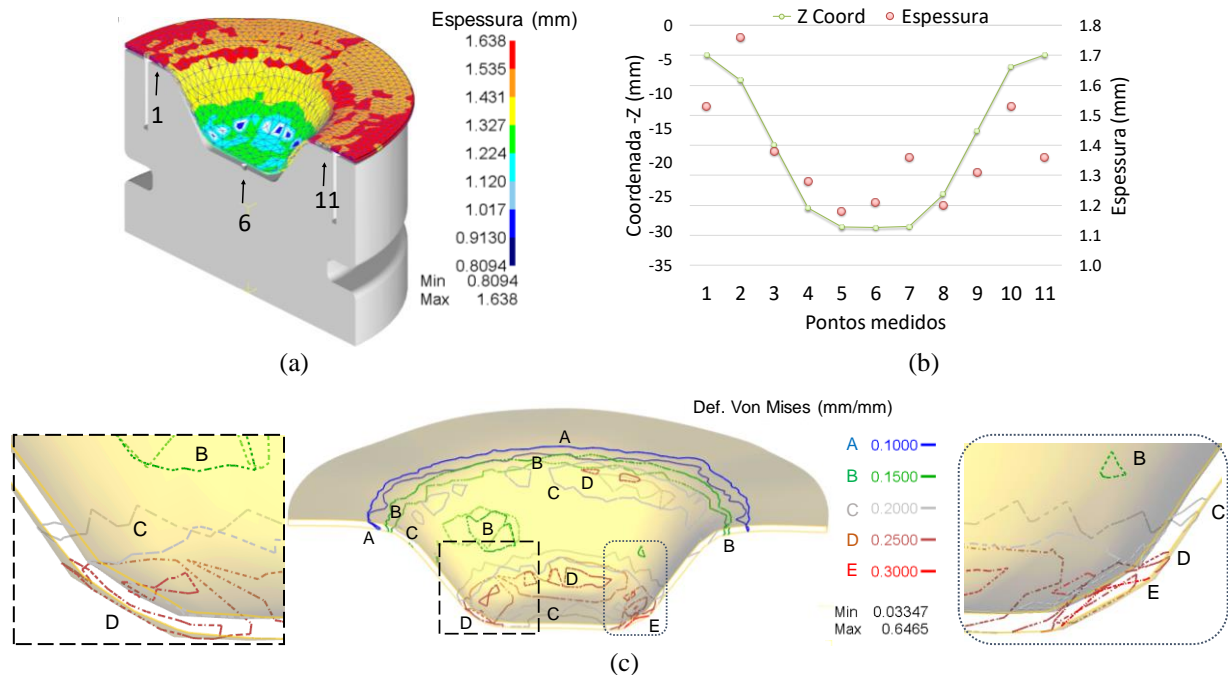


Figura 4.29 Resultado numérico da conformação da máscara (22MnB5 – 1,5 mm) diretamente no setup de forjamento de geometria cônica. Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 4.7 apresenta de um modo geral a avaliação dos processos de conformação analisados, considerando o equipamento necessário para a fabricação, o custo, a complexidade, as tolerâncias geométricas e o tempo.

Tabela 4.7 Análise geral das variáveis do processo de conformação das máscaras.

VARIÁVEIS	PROCESSO DE CONFORMAÇÃO DA MÁSCARA		
	Estampagem Profunda	Estampagem Incremental	Setup de forjamento
Equipamento	complexo	simples	-
Custo	alto	médio	baixo
Facilidade	média	alta	média
Tolerâncias e Precisão	média	alta	baixa
Tempo de processo	médio	alto	Baixo

Fonte: Elaborado pela autora.

Assim, o processo de estampagem ou embutimento profundo apresenta precisão na geometria final da máscara fabricada (impacto: tolerâncias do produto forjado); aumento da complexidade do processo (impacto: custo); para cada geometria a ser forjada, um novo set de matrizes e um novo equipamento de estampagem torna-se necessário (impacto: custo e tempo de fabricação); e ângulos e raios (extração do produto forjado).

Por outro lado, o processo de conformação por estampagem incremental oferece precisão da geometria final da máscara; redução da complexidade do equipamento; aumento do número de classes de materiais fabricados com o mesmo equipamento; tempo de fabricação

dependente da resistência do material – necessidade de um ou mais passes de conformação conforme o retorno elástico e a precisão necessária para conformar os ângulos.

E ainda, a conformação diretamente no setup de forjamento pode resultar em uma redução dos custos com fabricação das máscaras; porém com possíveis problemas de preenchimento da cavidade da matriz (impacto: tolerâncias do produto forjado); enrugamento das extremidades pela falta de controle da pressão no prensa chapas, pois, no caso do setup de forjamento, o *holder* é fixo apenas com parafusos de pressão (impacto: força do processo, solicitações e durabilidade da máscara).

### 4.3.3 Principais parâmetros do processo de forjamento

Assim como a análise de material e a estratégia de fabricação da máscara, os parâmetros do processo de forjamento devem ser considerados de tal maneira que auxiliem na utilização deste método de aplicação de máscaras metálicas como revestimento de matrizes.

A Figura 4.30 apresenta o resultado numérico para uma peça forjada sobre a máscara (material 22MnB5 – 2,0 mm) conformada diretamente na matriz de geometria cilíndrica. Como pode ser observado, as regiões de raio apresentam uma variação significativa em espessura e deformações, sendo consideradas críticas. Estas regiões coincidem com as regiões de maior deformação após o processo de conformação da máscara, além de suportarem as maiores solicitações térmicas em função do tempo de contato e, conseqüentemente, temperatura.

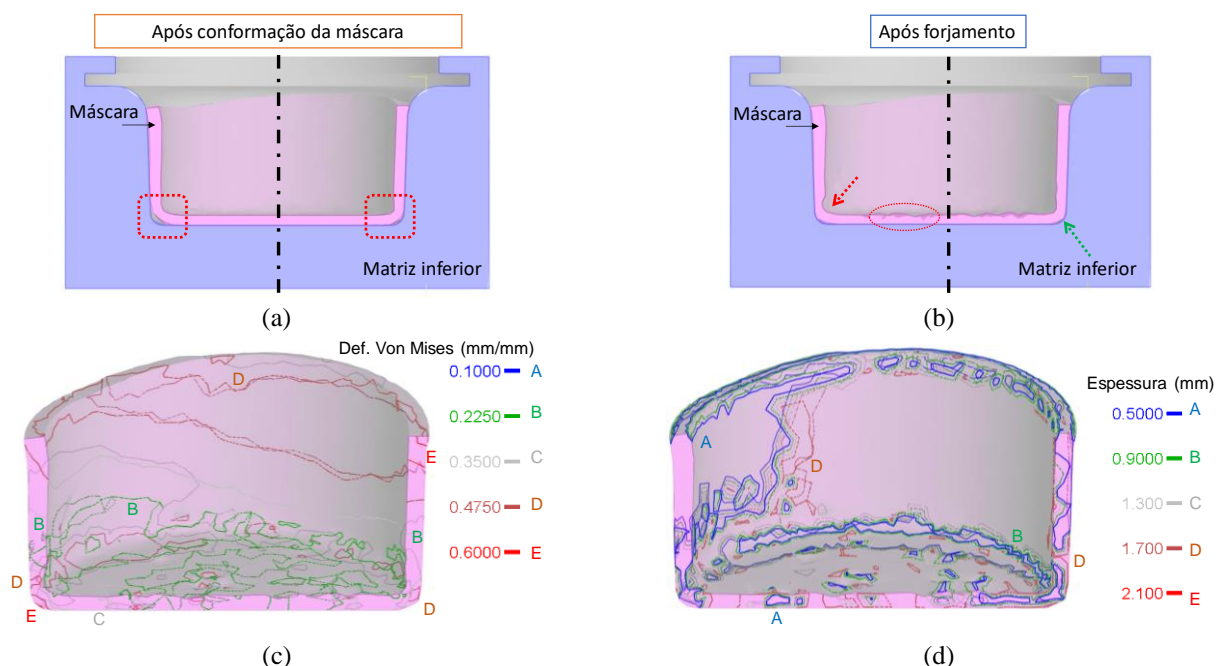


Figura 4.30 Análise da máscara (a) geometria conformada diretamente no setup de forjamento, (b) geometria, (c) deformação total e (d) espessura após uma peça forjada. Fonte: Elaborado pela autora.

Verificou-se ainda que a máscara preenche toda a cavidade da matriz após uma peça forjada, porém as deformações no fundo do copo e nos raios podem indicar dificuldade na extração do produto. Portanto, dois fatores importantes que devem ser controlados no processo são a fixação da máscara e o tempo de forjamento, pois, quanto menor o tempo de contato, menor a temperatura e maior o número de ciclos que a máscara irá suportar sem falhar.

A Figura 4.31 apresenta os resultados da análise numérica para a matriz de geometria cônica. Verifica-se que na região do fundo do copo ocorre a maior solicitação termomecânica, com cerca de 31,65% de redução na espessura da máscara. Além disso, em função da direção do fluxo do billet, as extremidades tendem a apresentar maior força e conseqüentemente, maiores deformações. Neste caso, a fixação, além de auxiliar na extração da peça forjada, deve ser de tal maneira que auxilie na restrição do movimento da máscara, para evitar enrugamento ou dobramento que possam causar falha prematura.

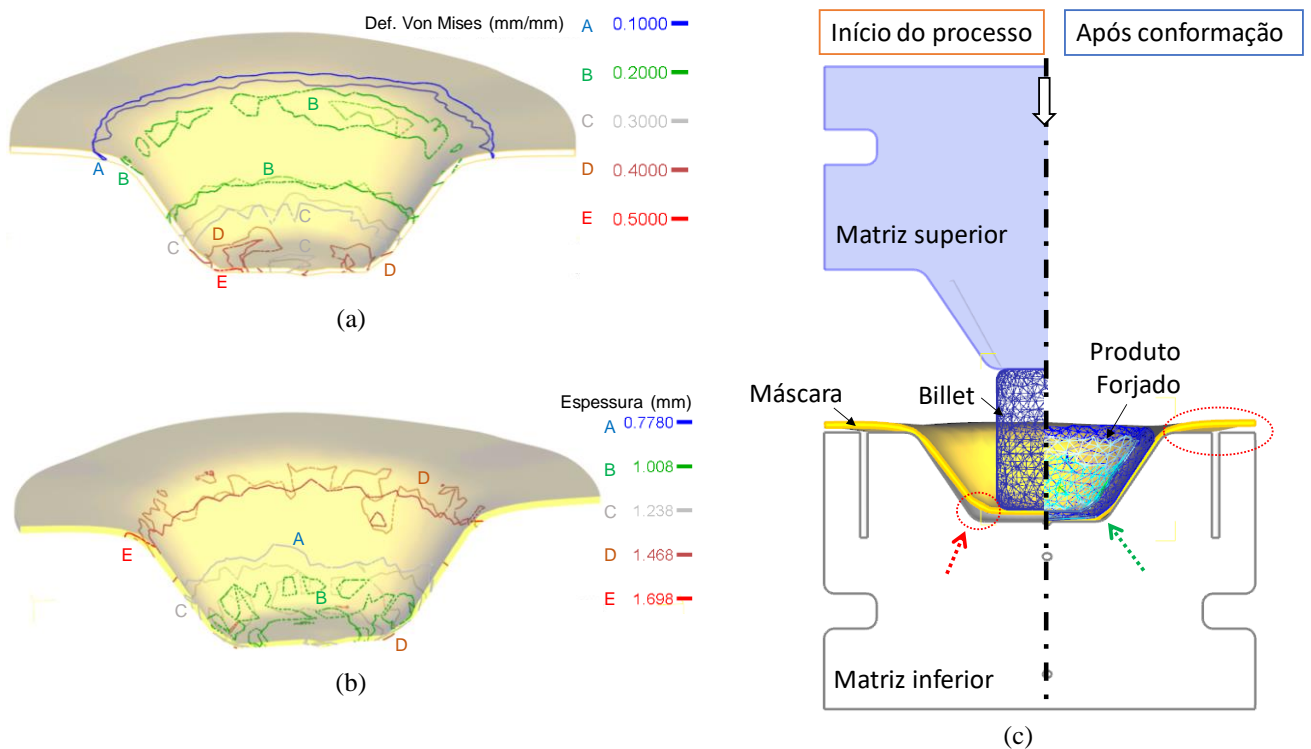


Figura 4.31 Regiões críticas na máscara após forjamento de uma peça: (a) matriz com geometria cilíndrica e (b) geometria cônica após estampagem diretamente no setup seguida de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4 Análise de uma geometria axissimétrica escalonada

Os resultados das análises em matriz de geometria axissimétrica simples serviram como base para o desenvolvimento da geometria axissimétrica escalonada. Assim, o design proposto considerou ângulos e profundidade adequados para facilitar a extração do produto forjado, além de prevenir a falha prematura da máscara de proteção.

A Figura 4.32 apresenta as etapas necessárias de desenvolvimento e análise para a avaliação da aplicabilidade de máscaras metálicas em uma geometria base ou bloco para engrenagens. Inicialmente, simulações através do software Deform<sup>TM</sup> 2D/3D foram realizadas para o design dos componentes, além de identificar parâmetros e regiões críticas do processo. Após as adaptações necessárias, as matrizes foram fabricadas para realização das análises experimentais com diferentes ciclos de forjamento.

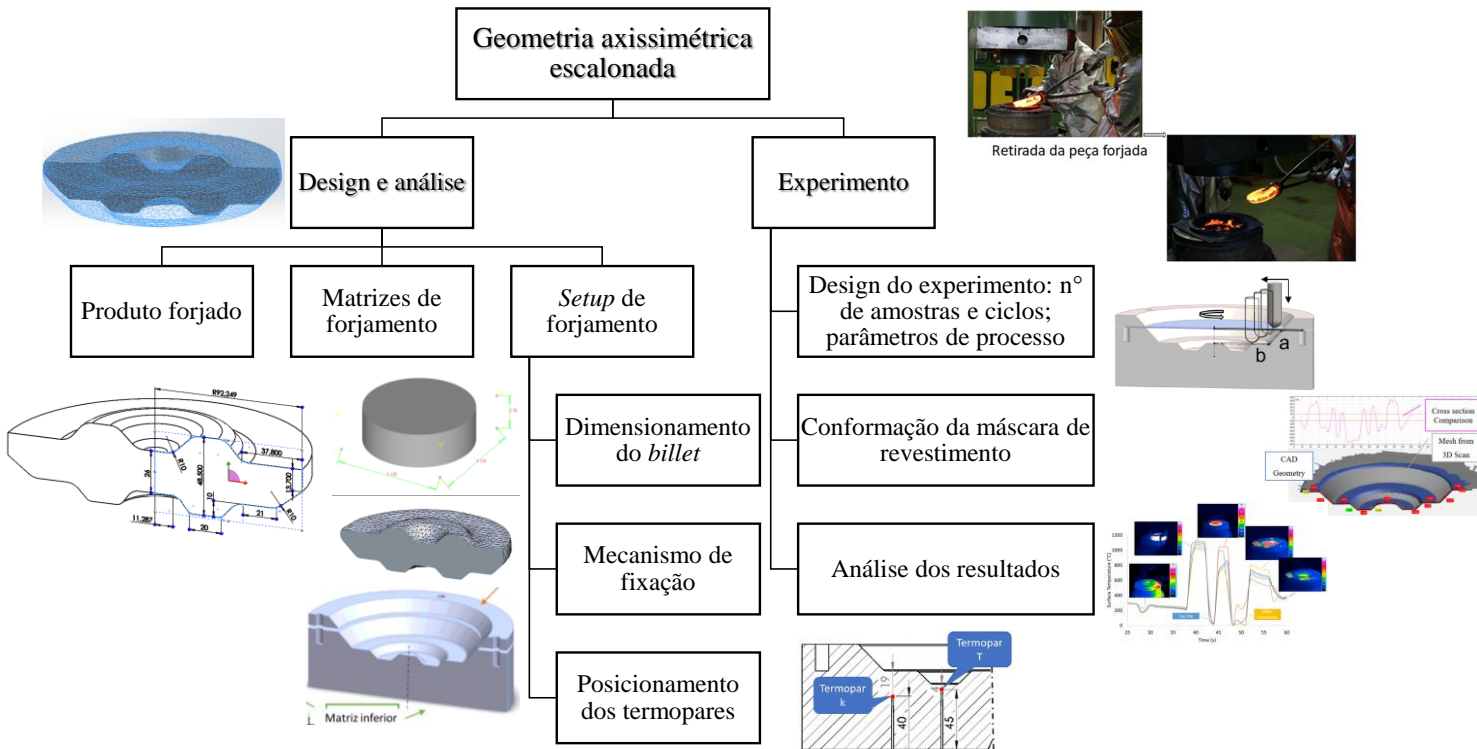


Figura 4.32 Representação das etapas de análise do método de aplicação de máscaras em uma geometria axissimétrica. Fonte: Elaborado pela autora.

Os materiais pré-selecionados foram conformados a frio através de estampagem incremental sobre ferramenta de apoio (matriz inferior de forjamento). Posteriormente, as máscaras foram submetidas ao ensaio de forjamento a quente em duas etapas, na primeira todos os materiais foram aplicados para 4 ciclos completos de forjamento. Em seguida, os materiais foram ensaiados com um número maior de ciclos.

#### 4.4.1 Análise numérica inicial do conjunto de forjamento com geometria axissimétrica escalonada

O tamanho do billet foi analisado em função do preenchimento total da matriz sem o aparecimento de rebarba, da capacidade do equipamento e das condições de processo, neste caso, com posicionamento manual.

O resultado das simulações numéricas em função do carregamento na direção Z de acordo com o tamanho do billet a ser forjado está apresentado na Figura 4.33, onde o billet com dimensões 110x90mm representa a menor força de forjamento, em torno de 3MN, porém esta geometria apresenta dificuldade de centralização quando utiliza-se posicionamento manual. Por isso, foi necessário redimensionar o billet a fim de manter a centralização com menor tempo. Utilizando um billet com 155 x 50 mm, o resultado do carregamento foi de aproximadamente 4MN sendo considerado aceitável para o equipamento disponível para os experimentos (prensa hidráulica com capacidade máxima de 6,3MN). Neste caso o preenchimento da matriz foi completo e o processo pode ser realizado satisfatoriamente sem a utilização de máscaras protetivas.

Para realização da análise experimental com diferentes materiais de chapas como máscara de revestimento, foram subtraídos 5 mm do diâmetro do billet, sendo que o carregamento resultante se manteve em torno de 4MN. Assim, pode ser observado que os valores obtidos com o billet 150x50 mm utilizando a máscara de revestimento apresentaram um aumento de 0,65MN nos valores de carregamento na direção Z de forjamento, sendo que o preenchimento da matriz se manteve satisfatório.

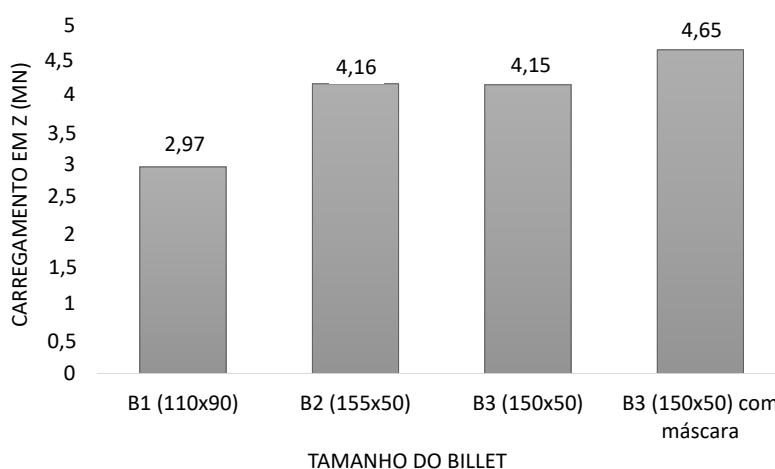
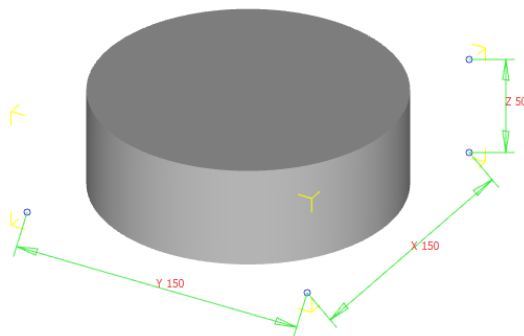


Figura 4.33 Simulação numérica de análise do tamanho do billet em função do carregamento de forjamento.  
Fonte: Elaborado pela autora.



Portanto, conforme apresentado na Figura 4.34, o billet escolhido para melhor atender ao processo de posicionamento sem mecanização e aplicação de máscaras metálicas como revestimento foi o B3 com 150 mm de diâmetro e 50 mm de altura. O volume e a massa necessária foram calculados, sendo que cada peça a ser forjada possui em torno de 88,4 cm<sup>3</sup> e 6,9 kg.



Volume do Billet:

$$V = \pi \times R^2 \times h$$

$$V = 88,357 \text{ cm}^3$$

Massa do billet:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho_{\text{steel}} \times V$$

$$m = 6,918 \text{ Kg}$$

Figura 4.34 Dimensões do billet para análise experimental de forjamento, cálculo de massa e volume. Fonte: Elaborado pela autora.

A temperatura, fator importante do processo de forjamento a quente, deve ser controlada e homogênea nas matrizes e no billet a ser forjado, a fim de reduzir ao máximo o gradiente térmico e consequentemente, desgaste nas ferramentas.

A Figura 4.35 apresenta o perfil de temperatura do billet de dimensões 150 x 50 mm submetido a uma atmosfera de 1200°C. Os resultados mostraram que o billet atinge 1150°C após 800 segundos de aquecimento. Porém, é possível observar que a distribuição da temperatura interna é heterogênea, além disso, o modelo considera uma atmosfera controlada, sem a influência de óxidos ou outras impurezas. Portanto, para o experimento de forjamento, o billet foi mantido em um forno resistivo de atmosfera controlada de 1200°C durante 1 h e 15 minutos, a fim de garantir uma distribuição de temperatura o mais homogênea possível.

A Figura 4.36 apresenta o resultado da simulação da transferência do billet do forno até o setup de forjamento, considerando 15 segundos para o posicionamento do billet em uma atmosfera a 20°C. Para estas condições, pode ser observado uma redução de até 155°C na superfície do billet, ou seja, o posicionamento deve ser realizado da forma mais rápida possível.



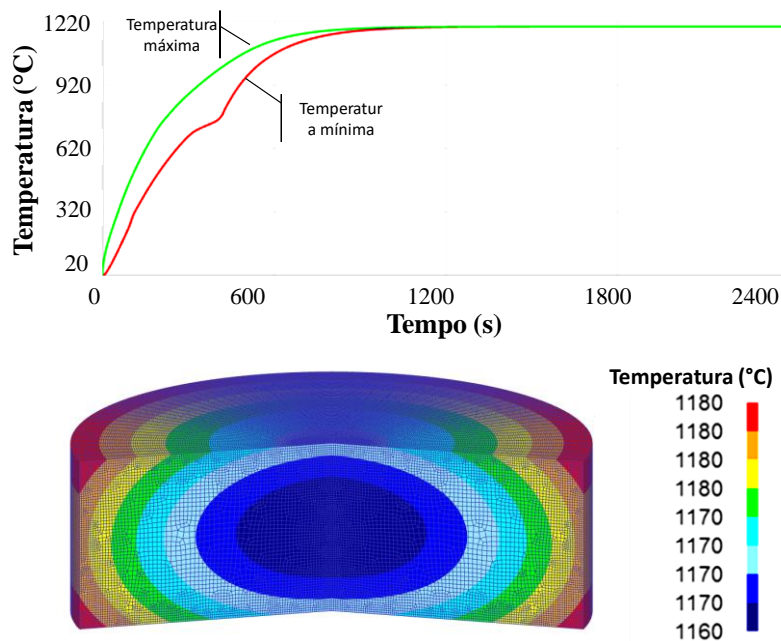


Figura 4.35 Simulação do aquecimento do bilhet 150 x 50 mm (atmosfera de 1200°C). Fonte: Elaborado pela autora.

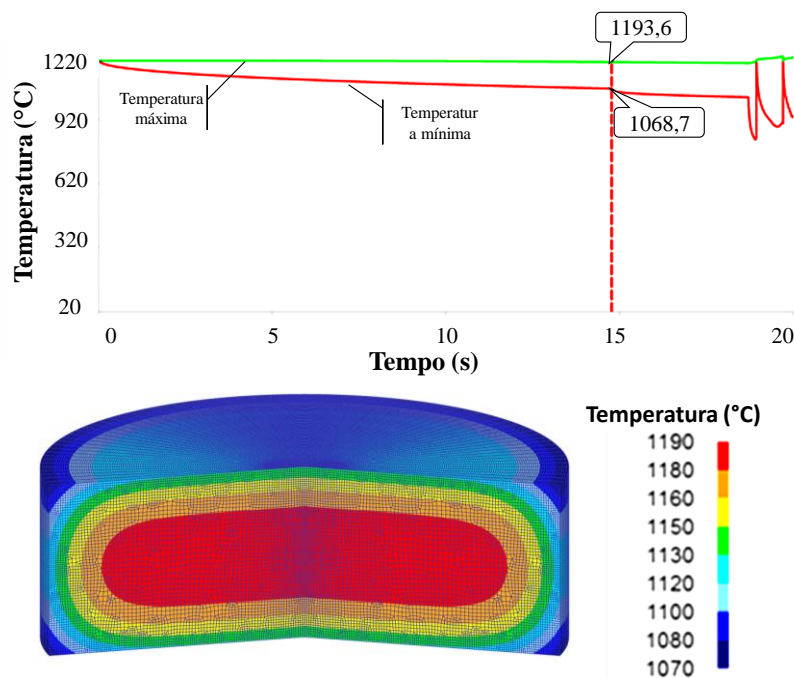


Figura 4.36 Simulação da transferência do bilhet ao ar (atmosfera de 20°C). Fonte: Elaborado pela autora.

Com as análises iniciais de tamanho e temperatura do bilhet, foram realizadas simulações para avaliar o comportamento do conjunto matriz de forjamento, máscara de revestimento e peça forjada. A Figura 4.37 mostra a distribuição de tensão efetiva na máscara (1,5 mm) após um ciclo de forjamento, ou seja, após uma peça forjada. Pode ser observado um deslocamento

de 1,6 mm na direção Z após um ciclo de forjamento, sendo que a máxima tensão efetiva, em torno de 465 MPa, ocorre próximo aos ângulos da matriz inferior.

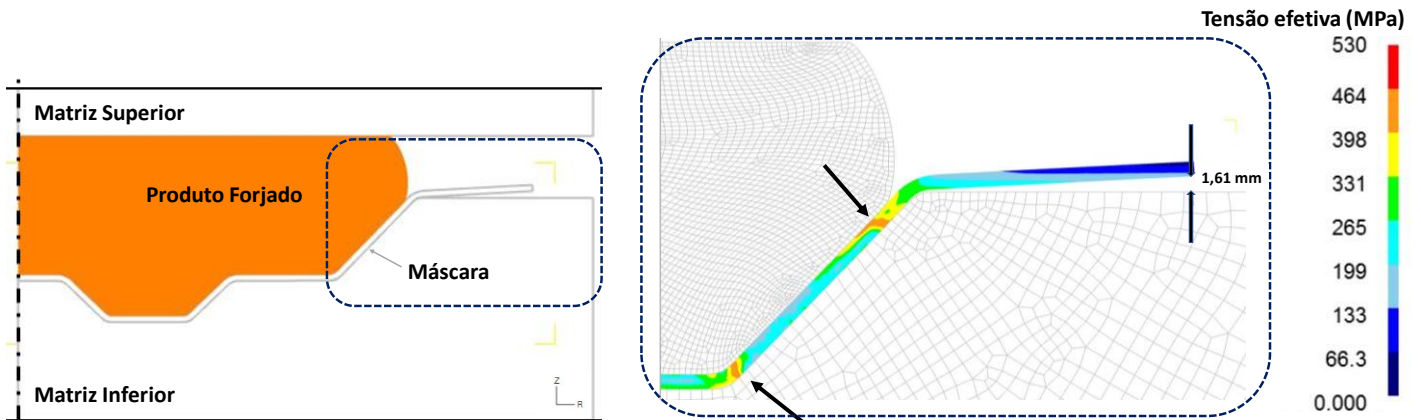


Figura 4.37 Deslocamento e Tensão efetiva da máscara após de um forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

Foi possível identificar ainda que o deslocamento da máscara de revestimento aumenta com o aumento do número de ciclos. Após 4 ciclos de forjamento (Figura 4.38), atinge-se aproximadamente 3,0 mm de deslocamento na extremidade da máscara, dificultando a retirada do produto forjado e a aumentando a probabilidade de falha precoce da máscara de proteção.

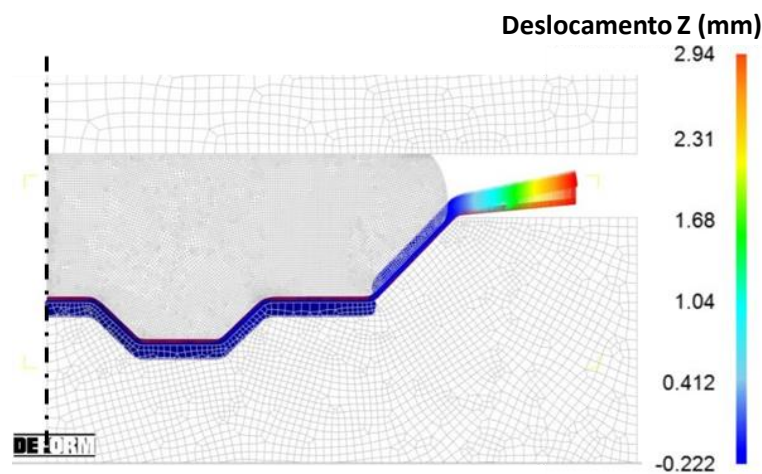


Figura 4.38 Resultado numérico após 4 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

Portanto, foi evidenciada a necessidade de uma fixação para evitar o risco de escorregamento e enrugamento da máscara de cobertura da matriz. Um anel de fixação foi projetado tomando como base o *holder* ou prensa chapas utilizado nos processos de conformação de chapas metálicas, o modelo numérico pode ser observado na Figura 4.39. Este mecanismo foi projetado ainda para agir como um delimitador do processo, auxiliando na forma do forjado e na sua retirada após forjamento.

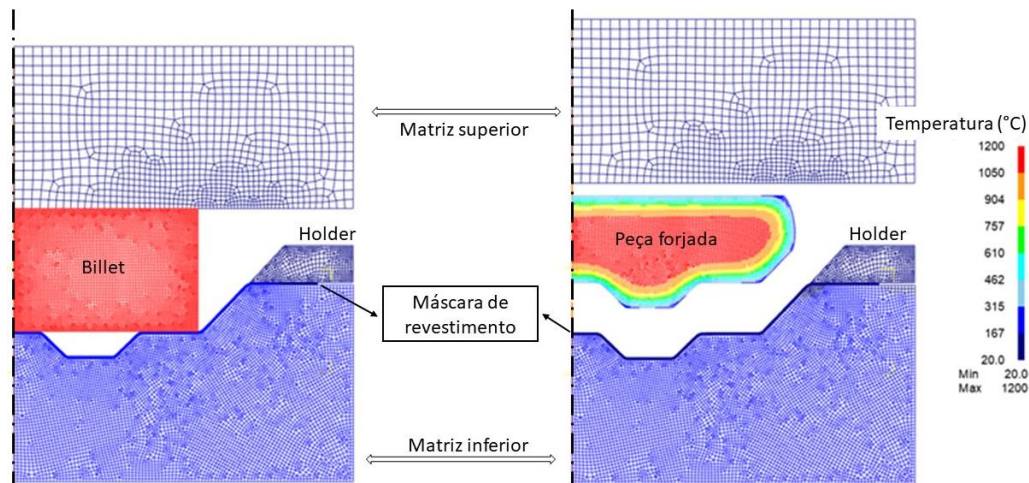


Figura 4.39 Modelo numérico computacional 2D utilizando anel de fixação e máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados da simulação mostraram que a máscara de revestimento é mantida na posição ideal durante o processo de forjamento utilizando o mecanismo de fixação. A inserção do *holder* diminuiu ainda a intensidade das tensões efetiva em torno de 60 MPa, mantendo-se com valores máximos próxima aos ângulos da matriz inferior.

A Figura 4.40 apresenta os resultados numéricos de força para uma única peça forjada com e sem aplicação de máscara. Observa-se que as máscaras DP600 e 22MnB5 (tratado\_QI =900°C) com 1,0 mm de espessura apresentam uma redução de 3 a 4 % na força máxima, quando comparadas com a simulação sem a aplicação de máscara. Por outro lado, com o aumento de 0,5 mm na espessura da máscara resulta no aumento da força máxima de 7 a 10,5%, ou seja, quanto maior a espessura da máscara, maior a força necessária para realizar o preenchimento total da matriz.

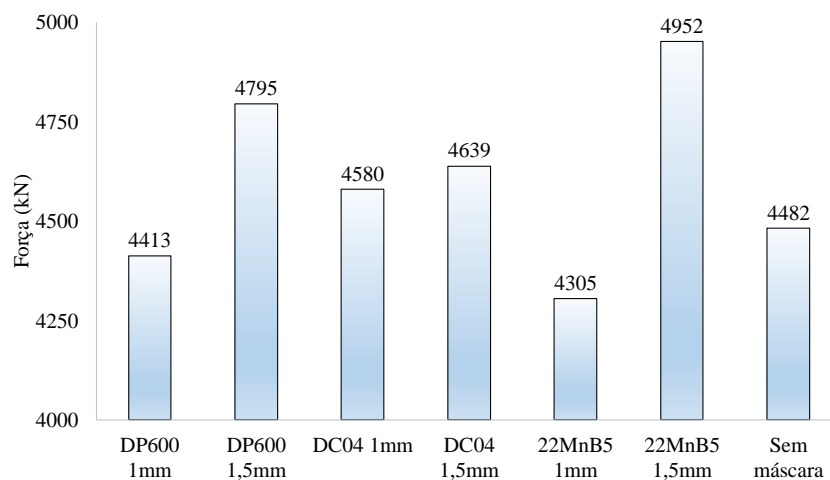


Figura 4.40 Resultado numérico da força máxima de forjamento com e sem aplicação de máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.41 apresenta os perfis de temperatura da máscara e da matriz resultantes da simulação de um ciclo de forjamento. Observam-se valores máximos de temperatura entre 546 e 581°C para os materiais de menor e maior resistência mecânica, respectivamente, assim como uma variação de 35°C entre as espessuras de 1,0 e 1,5 mm (Figura 4.41a). Para as mesmas condições, a temperatura na matriz inferior variou de 326 a 348°C com a aplicação de máscara, em contrapartida, para a simulação sem máscara a temperatura máxima da matriz atingiu 636°C, representando um aumento de 45% (Figura 4.41b).

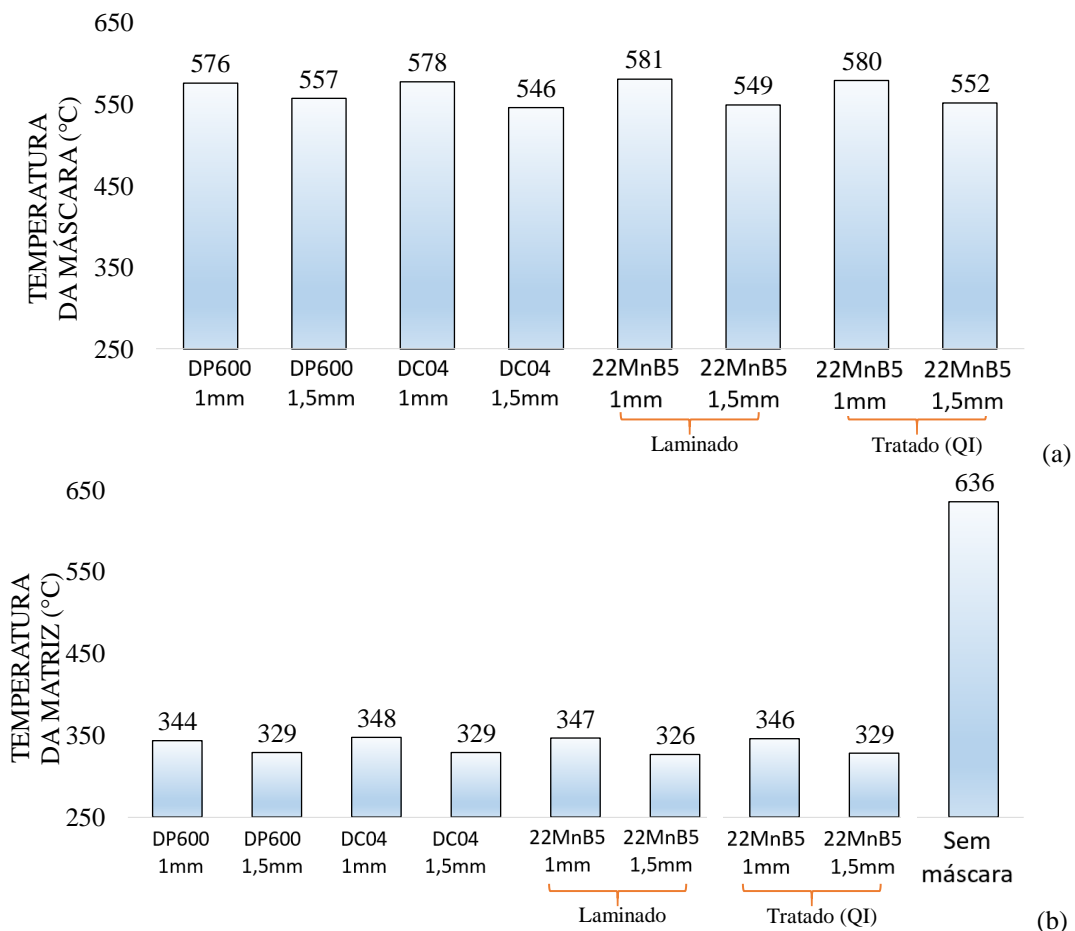


Figura 4.41 Resultado numérico da temperatura máxima (a) na máscara e (b) na matriz inferior de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

O comportamento da máscara durante a simulação de forjamento está apresentado na Figura 4.42, onde verifica-se que o fluxo do billet durante o processo (Figura 4.42a) tende a movimentar a máscara nas regiões entre os raios R5 e R6, assim como entre os raios R1 e R2. Ao final do processo e conseqüente preenchimento total da matriz, este efeito pode ser percebido apenas próximo ao raio R1 (Figura 4.42b).

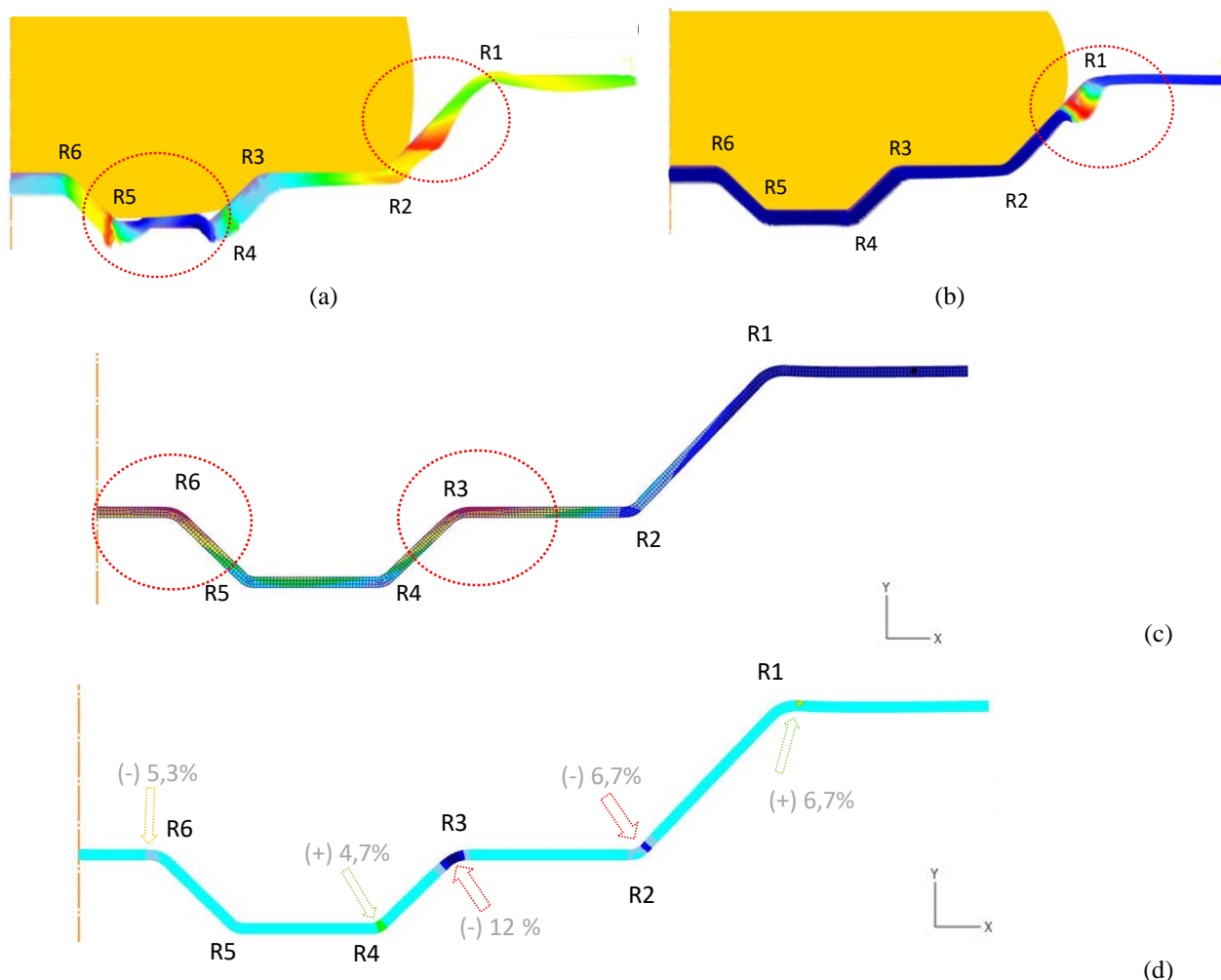


Figura 4.42 Comportamento da máscara (a) durante e (b) ao final do processo de forjamento, (c) regiões de maior temperatura e (d) variações de espessura. Fonte: Elaborado pela autora.

Além disso, as regiões dos raios R3 e R6 apresentaram maior temperatura da máscara e estão evidenciadas na Figura 4.42c, as quais coincidem com as regiões de maior tempo de contato com o billet. Assim, quanto maior o tempo necessário para o posicionamento do billet e extração do forjado, maior o tempo de contato e maior a temperatura nas regiões dos raios R3 e R6.

A variação de espessura da máscara após a simulação de N10 ciclos de forjamento pode ser observada na Figura 4.42d, sendo que os raios R2, R3 e R6 apresentam redução enquanto que os raios R1 e R4 um leve aumento de espessura.

O raio mais crítico foi o R3 com uma variação de aproximadamente 12% da espessura nominal. Tais simulações realizadas nesta etapa consideraram uma máscara de geometria perfeita com espessura homogênea e igual a 1,5 mm, sem a presença de possíveis efeitos do processo de fabricação.



A Figura 4.43 apresenta o perfil da temperatura superficial e 0,5 mm abaixo da superfície da matriz inferior após a simulação do forjamento de 10 peças sem aplicação de máscara. Pode ser observado que a região dos raios R6 e R3 apresentaram valores de temperatura em torno de 700°C, enquanto a região dos raios R2 e R1 apresentam os menores valores, em torno de 400°C, o que representa uma diferença de 46%.

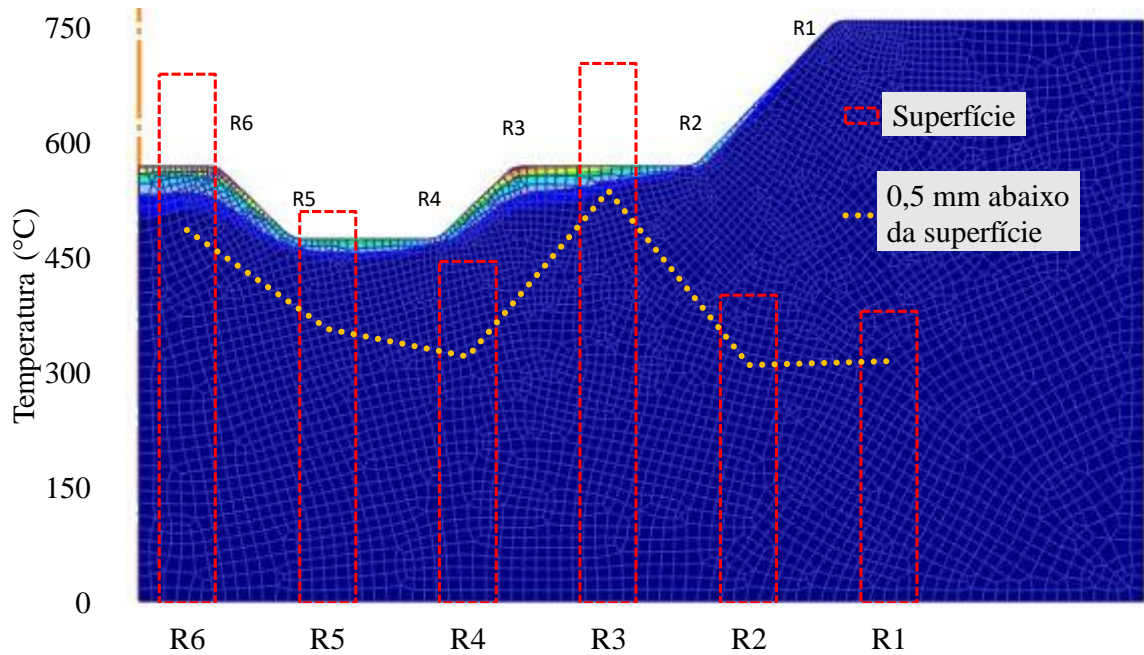


Figura 4.43 Temperatura da matriz inferior após simulação de N10 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

Para a matriz inferior, as regiões críticas foram caracterizadas como as regiões onde se concentram as maiores temperaturas do processo de forjamento, ou seja, as regiões dos raios R6 e R3.

Observa-se uma redução de 20% entre as medições na superfície e 0,5 mm abaixo da superfície da matriz inferior, ou seja, o efeito da temperatura pode ser percebido nas regiões R6 e R3 com valores de 540°C.

## 4.4.2 Análise da máscara fabricada

### 4.4.2.1 Análise da geometria das máscaras antes do experimento de forjamento

As máscaras foram analisadas antes do experimento de forjamento, a fim de identificar as possíveis influências do processo de fabricação na performance e capacidade das máscaras de suportar o maior número possível de ciclos de forjamento.

Conforme apresentado na metodologia, a parte inferior das amostras foram marcadas a laser antes do processo de estampagem. Após o processo de estampagem incremental, as amostras foram analisadas através de imagem utilizando equipamento ótico 3D ARGUS 5M (GOM mbH).

Os resultados das medições na amostra de material DP600 com 1 mm de espessura podem ser observados na Figura 4.44, onde a redução mais significativa em termos de espessura foi evidenciada nas paredes laterais, entre os raios R1 e R2, bem como entre os raios R3 e R4.

Tal redução de espessura nas paredes da máscara representa em torno de 36% em relação a espessura nominal (1,0 mm), ou seja, nestas regiões a espessura passa a ser cerca de 0,6 mm após o processo de conformação. Por se tratar de uma geometria axissimétrica, comparando as duas linhas (x e y) medidas na seção transversal da amostra (Figura 4.44a) pode ser visto que o perfil de espessura é semelhante em ambas as direções (Figura 4.44b). Esta análise leva ao cálculo da espessura final que pode ser observado na Figura 4.44c.

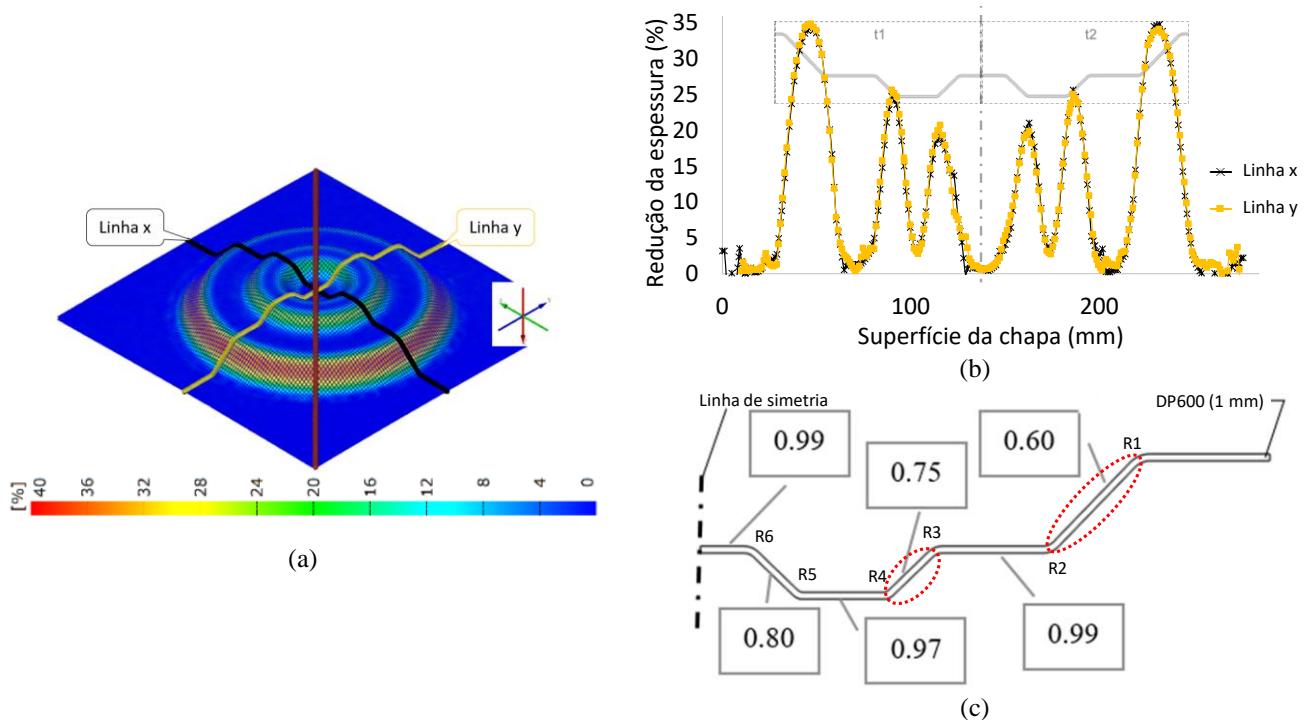


Figura 4.44 Análise da espessura da amostra de DP600 (1,0 mm) após ISF. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.45 apresenta o resultado das análises realizadas através do escaneamento da superfície da máscara e comparação com o design inicial (CAD) utilizando o software GOM *Inspect*. Esta etapa foi necessária devido a oxidação e degradação do revestimento, os quais comprometeram a leitura das marcações a laser para as amostras DC04 e 22MnB5(revestido). Ambas as superfícies superior e inferior da máscara foram escaneadas e comparadas com a geometria ideal gerada através do software SolidWorks®. Com isso, foi possível identificar as variações na geometria da máscara antes da sua aplicação sobre a matriz de forjamento.

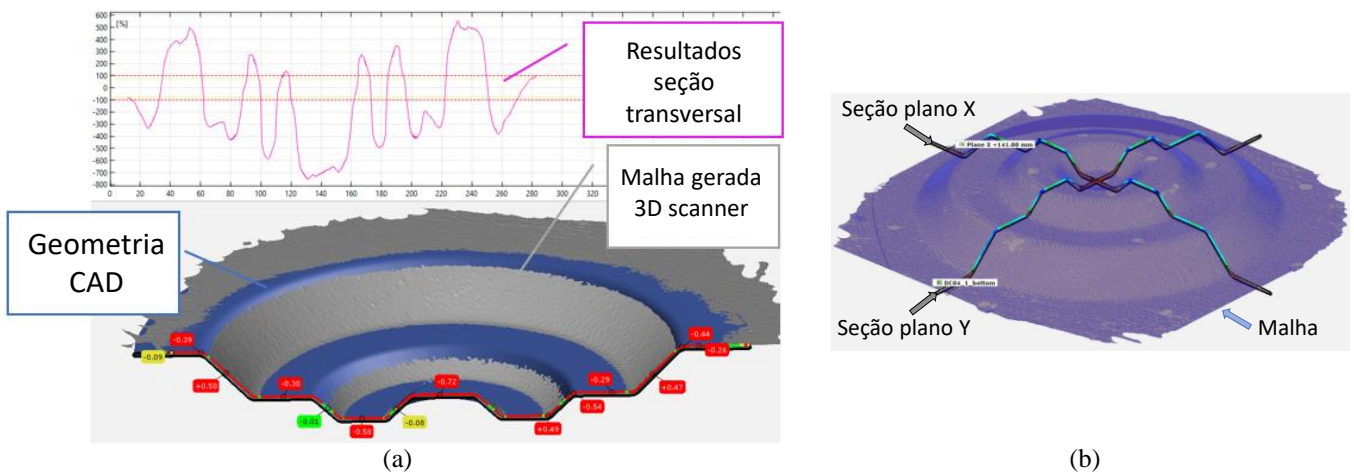


Figura 4.45 Representação (a) da análise através do comparativo das medições 3D e CAD, (b) das seções medidas no software GOM *Inspect*. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.46 apresenta a análise da superfície inferior da máscara DP600 de 1,0 mm de espessura e a Figura 4.47 a média das seções nos planos X e Y, onde podem ser observadas variações ou desvios positivos, as quais se referem a uma possível interferência com a superfície da matriz; e negativos, que se referem a um possível gap entre a matriz e a máscara.

Sem considerar o erro de medição do equipamento 3D utilizado, estas variações podem estar relacionadas ao retorno elástico do material após o processo de conformação, ou ainda ao controle dos parâmetros utilizados no processo, como velocidade e trajetória da ferramenta, lubrificação, fixação e posicionamento, ou até mesmo desalinhamento da mesa e movimentação relativa do material durante a estampagem.

Da mesma maneira, a máscara em aço DC04 (1,0 mm) apresentou variações na geometria, conforme pode ser observado na Figura 4.48. Por ser um material dúctil, a influência do retorno elástico pode ser considerada mínima, assim como as variações de geometria.



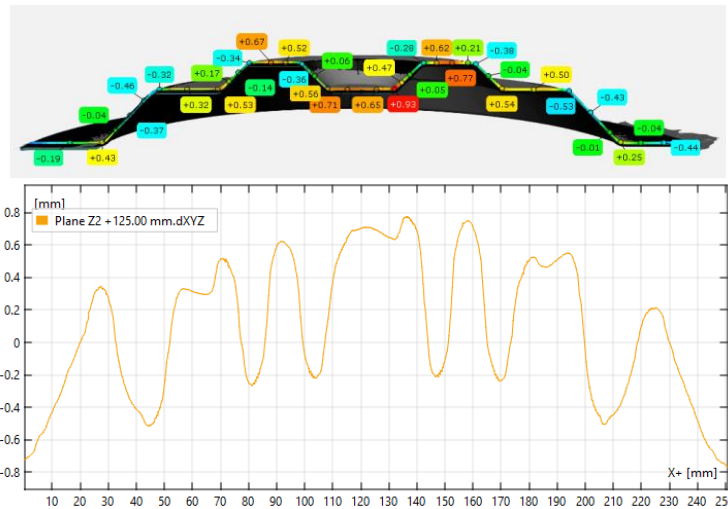


Figura 4.46 Análise através do software GOM Inspect da máscara DP600 (1 mm) conformada. Fonte: Elaborado pela autora.

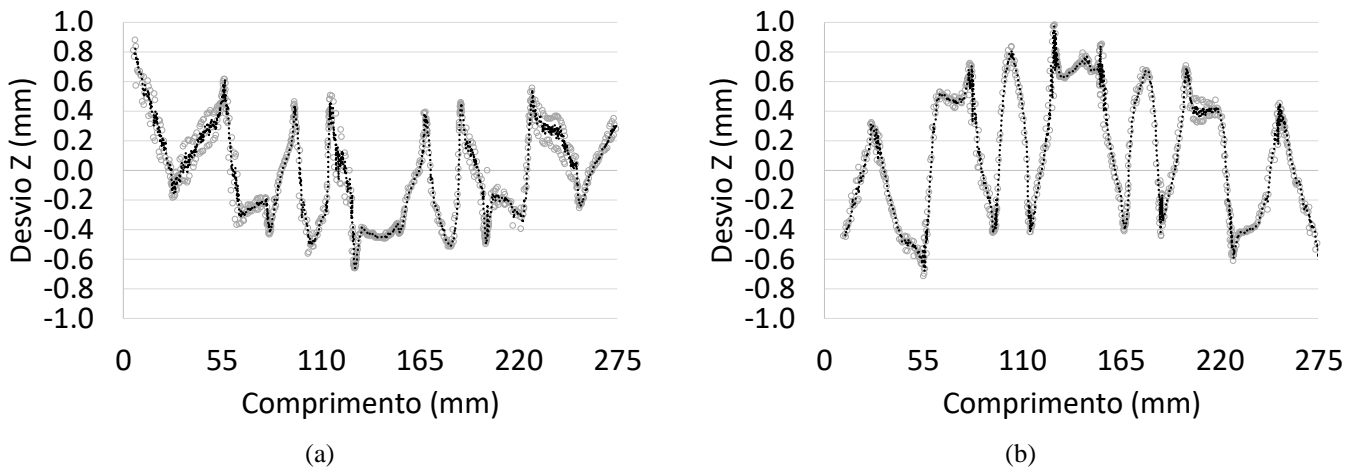


Figura 4.47 Média das seções para a análise da geometria através do software GOM Inspect para a superfície (a) superior e (b) inferior da máscara DP600 (1mm). Fonte: Elaborado pela autora.

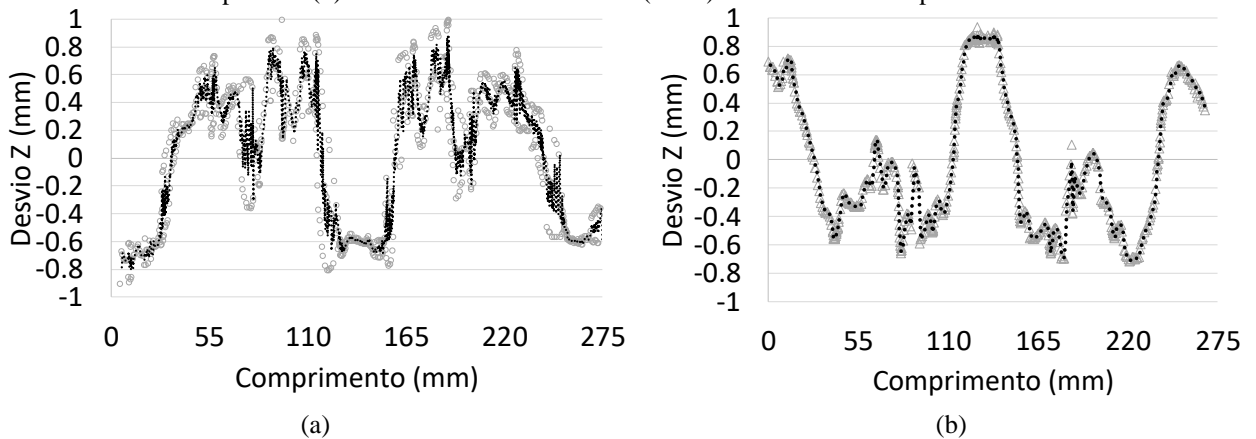


Figura 4.48 Média das seções para a análise da geometria através do software GOM Inspect para a superfície (a) superior e (b) inferior da máscara DC04 (1mm). Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.49 apresenta os resultados da comparação CAD e medições superficiais (3D) para o material 22MnB5 (revestido) com 1,5 mm de espessura. Como o material foi conformado em seu estado mais dúctil (antes do tratamento térmico), seu comportamento foi semelhante ao material DC04.

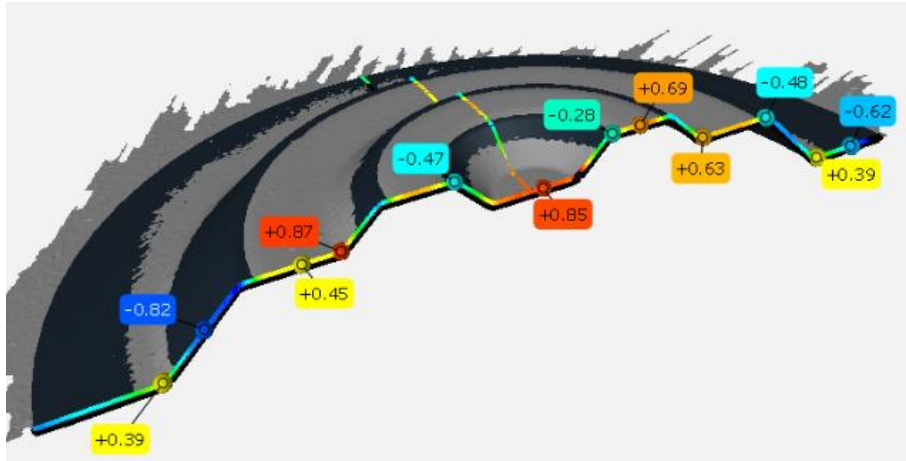


Figura 4.49 Média das seções para a análise da geometria através do software GOM Inspect para a superfície (a) superior e (b) inferior da máscara 22MnB5 (1,5 mm). Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.50 apresenta os resultados das análises de espessura utilizando o microscópio Keyence (VHX-1000D 20X) para o material 22MnB5 (1,5 mm), após o processo de estampagem incremental sobre matriz de apoio. Para as três seções (t1, t2 e t3) retiradas da amostra (máscara) foi possível observar maior influência da ferramenta e movimento incremental na espessura de parede da chapa entre as regiões R1 e R2, assim como R3 e R4. Por outro lado, as amostras apresentaram significativa diferença de espessura entre si, o que não era esperado se tratando de uma geometria axissimétrica. Tais diferenças podem ser explicadas por irregularidades do processo de estampagem e do material da chapa.

Os resultados da análise da chapa estampada de 22MnB5 mostram que a geometria final da peça apresentou diferenças significantes de espessura para uma amostra (t2), apresentando espessura de parede mínima de 0,8 mm, sendo que a amostra t1 retirada a 180° da t2 apresentou 0,95 a 1,1 mm de espessura na mesma posição medida. A máscara estampada apresentou uma espessura heterogênea após o processo, o que pode ser caracterizado como potencial de falha quando aplicada nos experimentos de forjamento.

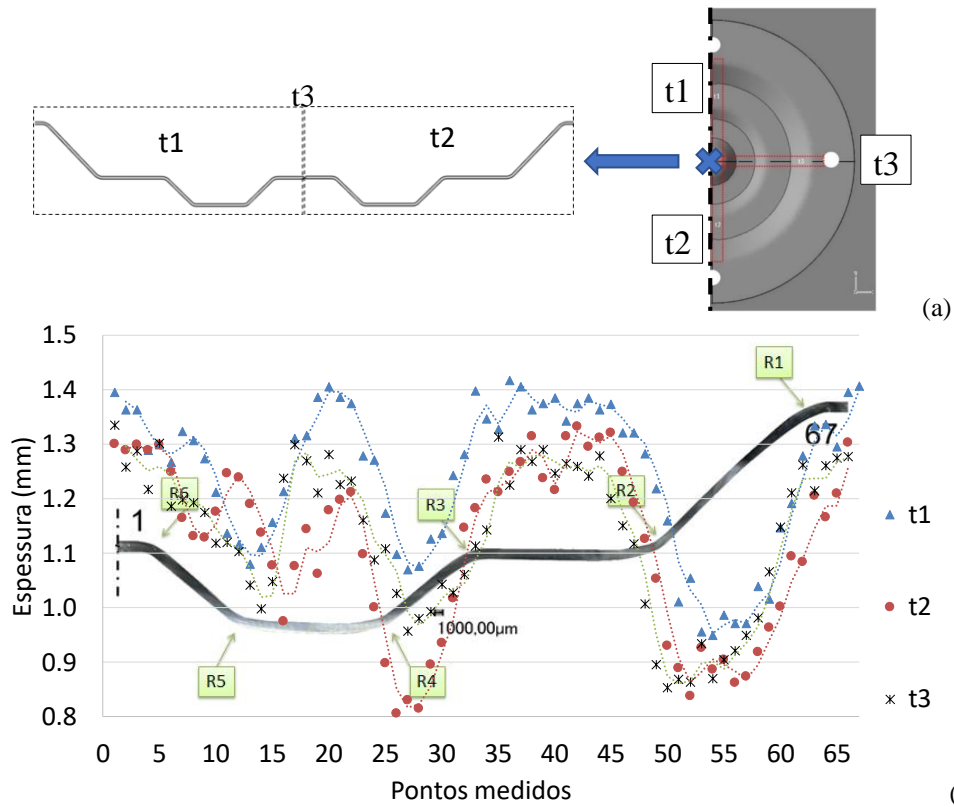


Figura 4.50 (a) Representação das seções e (b) resultados de espessura da amostra 22MnB5 (1,5mm) depois do processo de estampagem incremental (ISF) – microscópio Keyence 20x. Fonte: Elaborado pela autora.

O mesmo comportamento pode ser observado para o material DC04 (1,5 mm), conforme Figura 4.51, onde a espessura da parede entre os raios R1 e R2 apresentou uma redução de 30% após o processo de estampagem. Assim como a espessura da parede entre os raios R3 e R4 reduziu em torno de 15% com relação a espessura nominal.

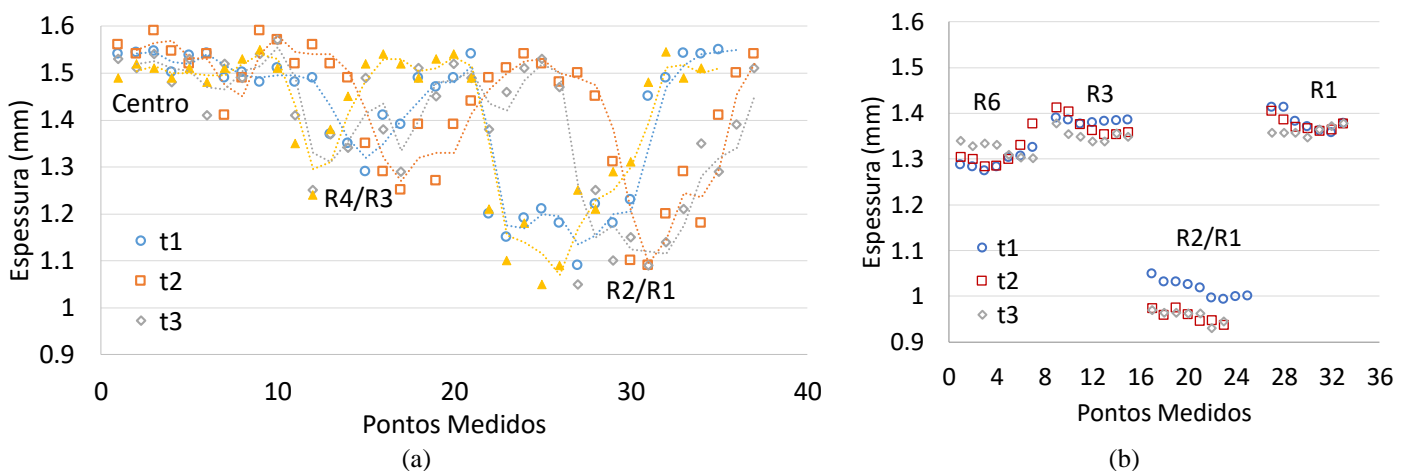


Figura 4.51 Análise da espessura da máscara em aço DC04 (1,5 mm) após processo de estampagem nas regiões (a) de fundo e parede – através de micrômetro e (b) de raios e parede críticos através de microscópio. Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4.2.2 Análise da máscara de aço 22MnB5 (revestido)

A Tabela 4.8 apresenta os dados do processo de têmpera realizado após a conformação das máscara em aço 22MnB5 (revestido). A variação no tempo de aquecimento para as amostras de 4 a 9 pode ser explicada pela incerteza de medição dos termopares que é de aproximadamente 1,5%.

Tabela 4.8 Dados de temperatura e tempo da têmpera realizada para cada amostra de material 22MnB5.

#Teste	#amostra	T <sub>ref</sub>	T <sub>forno</sub>	T <sub>amostra</sub>	e	t <sub>up</sub>	t <sub>hold</sub>	Dados de Temp.
[-]	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm]	[s]	[s]	
1	1	800	820	808	1,0	300	300	Não
2	2	800	820	-	1,0	300	300	Não
3	3	800	820	-	1,0	300	300	Não
4	4	900	911	906	1,0	180	300	Sim
5	5	900	911	902	1,0	300	300	Sim
6	6	900	911	900	1,0	360	300	Sim
7	I	900	911	900	1,5	360	300	Sim
8	II	900	911	904	1,5	300	300	Sim
9	III	900	911	902	1,5	300	300	Sim

Fonte: Elaborado pela autora.

O comportamento da temperatura durante o processo de têmpera QI a 900°C para as amostras de material 22MnB5 (a) 1,0 mm e (b) 1,5 mm de espessura pode ser observado na Figura 4.52.

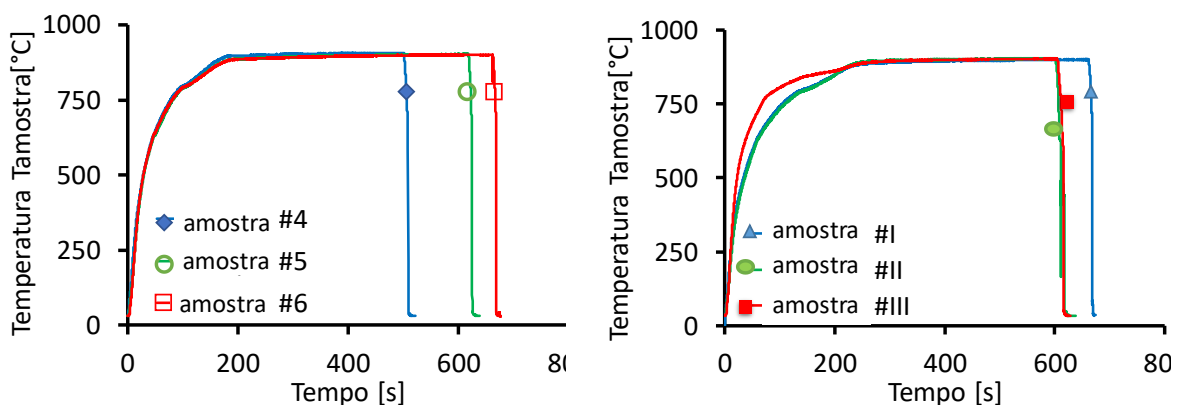


Figura 4.52 Temperatura durante o processo de têmpera QI a 900°C para as amostras de material 22MnB5 (a) 1,0 mm e (b) 1,5 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora.

As amostras foram analisadas antes do tratamento térmico sendo que a microestrutura do material como recebido pode ser observada na Figura 4.53. Neste caso, o material apresenta estrutura ferrita+perlita e comportamento dúctil, além da presença de revestimento Al-Si com aproximadamente 30(±3) μm de espessura.

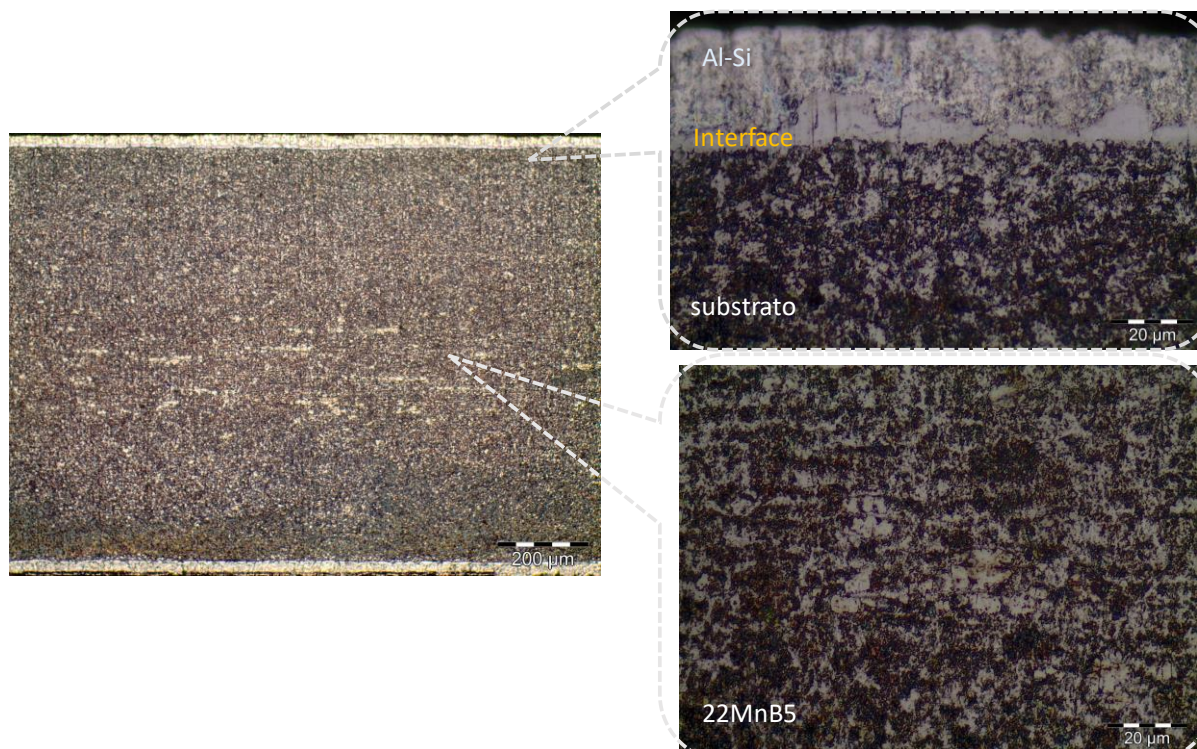


Figura 4.53 Microestrutura do material 22MnB5 (1 mm) como recebido. Fonte: Elaborado pela autora.

O material foi submetido a tratamentos térmicos de têmpera em duas condições de temperatura e apresentou as modificações microestruturais esperadas, como pode ser observado na Figura 4.54. Usualmente o tratamento térmico consiste na austenitização do material a uma temperatura de 900°C (QI) e posterior resfriamento rápido (neste caso em água) a fim de transformar a estrutura inicial (ferrita+perlita) em uma estrutura martensítica de dureza em torno de  $528^{\pm 11}$  HV0,5 (Figura 4.54a). Por outro lado, ao realizar um tratamento a 800°C foi possível obter uma microestrutura com menor volume de martensita, conforme apresentado na Figura 4.54(b), e dureza média  $537^{\pm 9}$  HV0,5.

Outro fator importante a ser observado para esta classe de aços é o comportamento do revestimento Al-Si, tanto após a conformação da máscara, quanto durante o tratamento térmico. A Figura 4.55 apresenta a análise microestrutural do revestimento Al-Si após a conformação (Figura 4.55a) sem tratamento e (Figura 4.55b) com tratamento térmico a 900°C, onde pode ser observada uma distribuição mais uniforme.

Após o tratamento térmico, as amostras tratadas a 900°C (QI) foram submetidas ao ensaio de tração para análise do comportamento da curva de escoamento durante o processo de forjamento a quente. A Figura 4.10 (apresentada no subcapítulo 4.1), mostra a elevada resistência do material 22MnB5 (revestido) após a têmpera, acima de 1600MPa a temperatura ambiente, e a 500°C a tensão reduz aproximadamente 750 MPa.



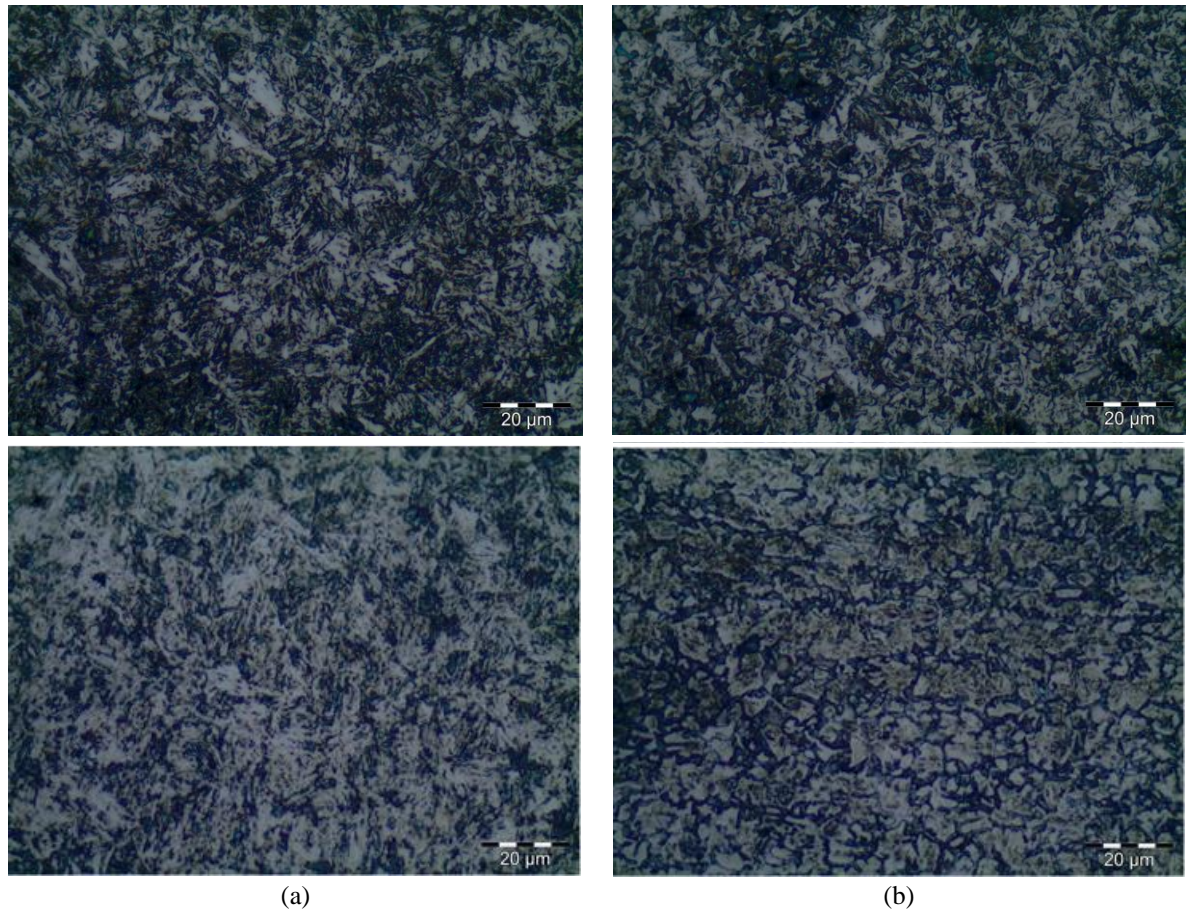


Figura 4.54 Microestrutura do material 22MnB5 (1 mm) após têmpera a (a) QI = 900°C e (b) QII = 800°C, na seção longitudinal (superfície) e transversal (espessura), respectivamente. Fonte: Elaborado pela autora.

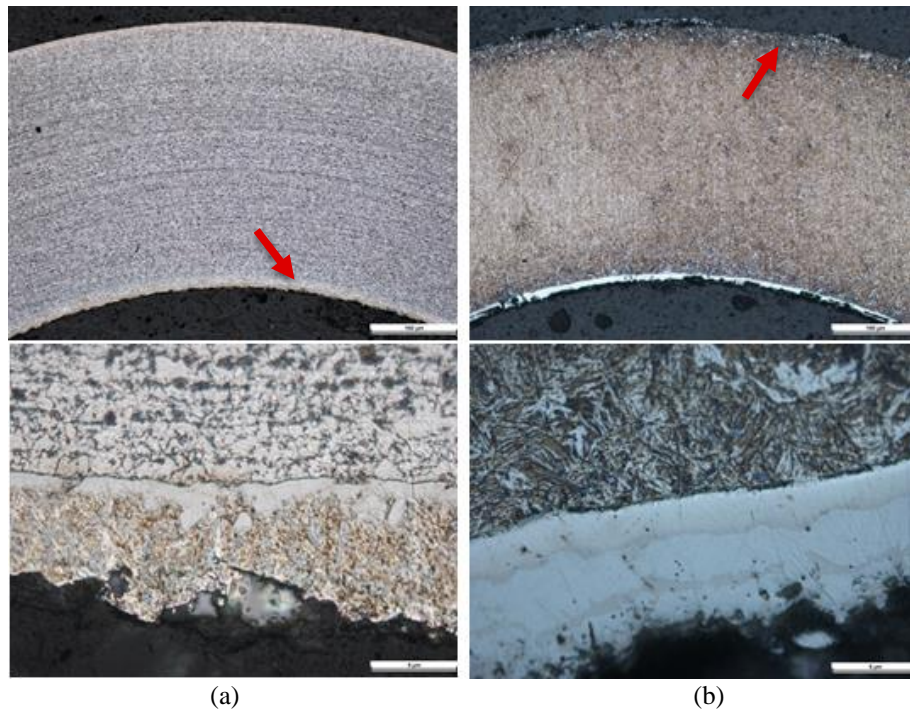


Figura 4.55 Análise do comportamento do revestimento Al-Si após a conformação (a) sem tratamento e (b) com tratamento térmico a 900°C. Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4.3 Experimentos de forjamento a quente

Através da realização dos experimentos I e II foi possível observar o tempo de cada etapa do processo, a temperatura na matriz inferior e a facilidade de fixação e troca da máscara aplicada a uma geometria axissimétrica escalonada. Os resultados detalhados para cada uma das máscaras testadas estão apresentados nos próximos subcapítulos.

As Tabelas Tabela 4.9 e Tabela 4.10 apresentam uma visão geral dos tempos médios de aquecimento, transferência e posicionamento do billet, processo de forjamento, retirada e lubrificação das matrizes, bem como o tempo médio de contato entre o billet e a máscara de revestimento para os experimentos I e II de forjamento, respectivamente. Como pode ser observado, o experimento II foi aprimorado e o tempo médio de cada operação reduzido de 35 a 60 %.

Tabela 4.9 Tempo entre as operações do experimento I de forjamento.

Experimento I	Tempo
<b>Aquecimento</b>	Billet ~ 1h 15 min Matrizes ~ 1h
<b>Transferência do Billet</b>	~22 s
<b>Posicionamento e início do processo</b>	1,25 s – 3,50 s
<b>Forjamento</b>	6,75 s – 8,75 s
<b>Extração do forjado</b>	2,50 s – 5,67 s
<b>Contato (Billet/Máscara)</b>	11,00 s – 16,00 s
<b>Lubrificação</b>	4,0 s – 10,00 s

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4.10 Tempo entre as operações do experimento II de forjamento.

Experimento II	Tempo
<b>Aquecimento</b>	Billet ~ 1h 15 min Matrizes ~ 1h
<b>Transferência do Billet</b>	6,0 s – 10,0 s
<b>Posicionamento e início do processo</b>	1,6 s – 2,0 s
<b>Forjamento</b>	4,2 s – 5,2 s
<b>Extração do forjado</b>	2,3 s – 3,7 s
<b>Contato (Billet/Máscara)</b>	8,7 s – 10,0 s
<b>Lubrificação</b>	3,3 s – 4,8 s

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir dos ensaios iniciais (experimentos I), foi possível observar que a máscara em aço DC04 apresenta baixa resistência para aplicação no processo de forjamento com geometria axissimétrica e peças de 200 mm de diâmetro (~7kg). Por isso, a segunda configuração de experimentos (II) foi realizada utilizando os materiais 22MnB5 e DP600 como máscara de revestimento. Cada amostra foi submetida a 10 ciclos de forjamento ou até a sua falha, conforme apresentado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 Máscara de revestimento vs. número de ciclos de forjamento durante o experimento II.

Máscara de revestimento	Número de ciclos	Observação
1. 22MnB5_QI (900°C) (1,0 mm)	4 + 7	Falha por problemas de fixação
2. 22MnB5_QI (900°C) (1,0 mm)	4 + 9 + 5	não apresentou falha
3. 22MnB5_QII (800°C) (1,0 mm)	4 + 11	Falha
4. DP600 (1,0 mm)	4 + 3	Falha por problemas de fabricação
5. 22MnB5_QI (900°C) (II – 1,5 mm)	18	não apresentou falha

Fonte: Elaborado pela autora.



As operações realizadas em cada ciclo do experimento podem ser observadas na Figura 4.56(a), onde o billet foi retirado do forno e posicionado sobre a matriz e/ou a máscara manualmente, forjado e então extraído do setup de forjamento, sendo que após cada ciclo o spray lubrificante foi aplicado na superfície da máscara/matriz.

Conforme apresentado na Figura 4.56b, as amostras dos diferentes materiais de máscara testadas foram substituídas manualmente após os ciclos de forjamento e fixadas novamente, sendo que esta operação teve uma duração máxima de 10 minutos.



**Substituição da máscara após desgaste excessivo ou falha:**



(b)

Figura 4.56 Experimento I de forjamento: (a) etapas do ciclo de forjamento, (b) troca das máscaras e fixação.

Fonte: Elaborado pela autora.



#### 4.4.3.1 Análise dos experimentos sem aplicação de máscara

A fim de comparar o comportamento do conjunto e, principalmente, a temperatura na matriz inferior durante o forjamento, foram realizados experimentos sem a aplicação de máscara de revestimento.

A força e o deslocamento da matriz superior durante os experimentos I e II podem ser observados na Figura 4.57. Para ambos os experimentos as condições iniciais de temperatura e lubrificação foram mantidas, sendo realizados 4 ciclos de forjamento (N1-4<sub>Exp\_I</sub>) para o experimento I e 5 para o II (N1-5<sub>Exp\_II</sub>).

Pode ser observado que a força da matriz superior variou de 3,8 a 5 MN (Figura 4.57a) e o deslocamento de 350 a 240 mm (Figura 4.57b) para o experimento I e II, respectivamente.

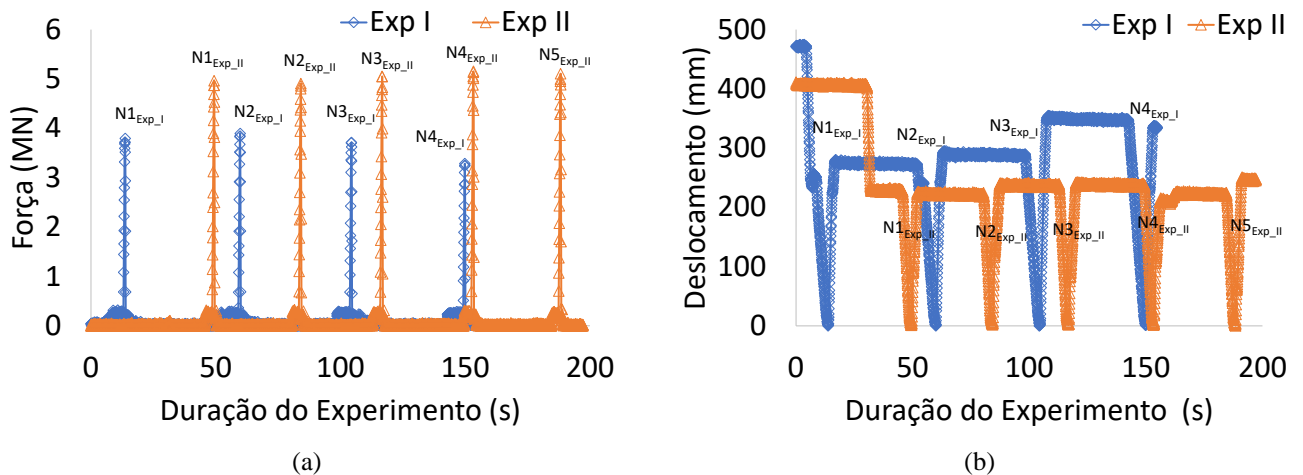


Figura 4.57 (a) Força e (b) deslocamento da matriz superior dos experimentos I e II de forjamento sem máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.58 apresenta o tempo de cada etapa do processo para os billets forjados sem aplicação de máscara. Como pode ser observado, o tempo para o experimento II foi reduzido em torno de 50% a fim de otimizar o processo. Foram verificadas ainda diferenças de temperatura ambiente e quantidade de óxidos do billet no momento das análises.

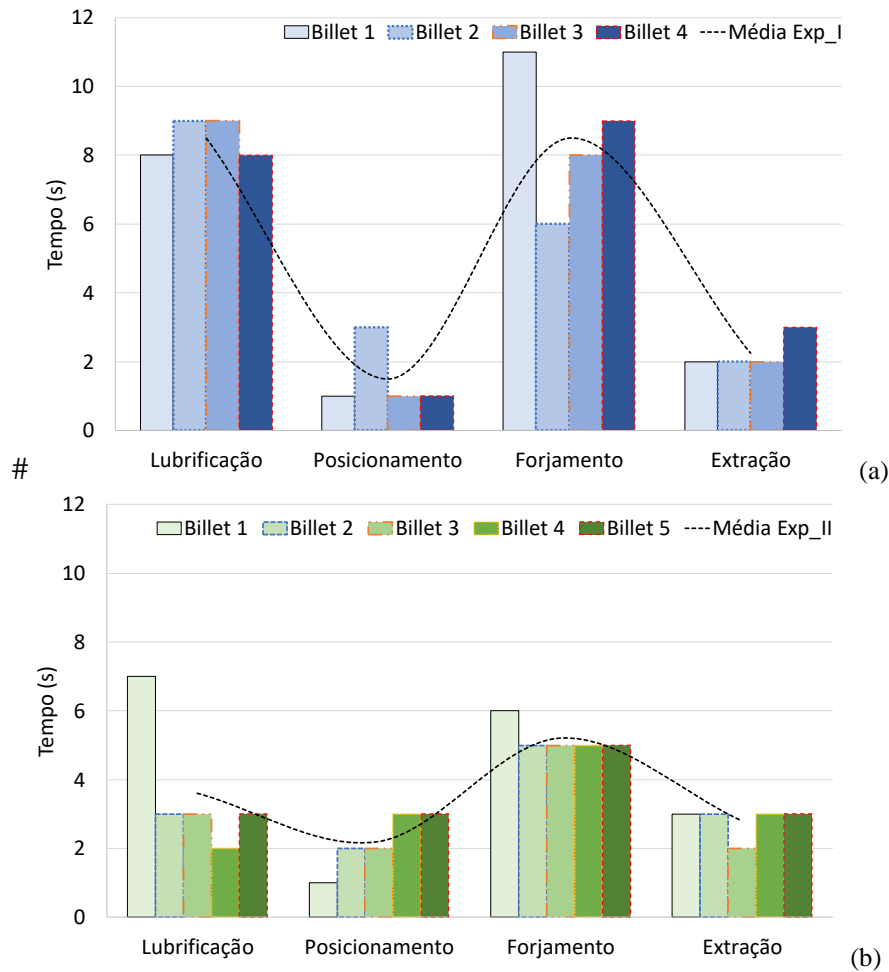


Figura 4.58 Tempo necessário para cada operação durante os experimentos (a) I e (b) II. Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados da temperatura medida dentro da matriz inferior estão apresentados na Figura 4.59, sendo possível observar que o ponto (termopar T) mais próximo da superfície (4 mm) apresenta valores entre 220 e 350°C, enquanto o ponto (termopar K) a 19 mm da superfície 355 e 440°C representando 59% e 24% de aumento, respectivamente.

Apesar de iniciar o experimento com temperaturas diferentes, para ambas as análises o termopar K apresentou um aumento de 50 °C comparando a primeira com a última peça forjada. Por outro lado, o termopar T apresentou um aumento de 100°C para o experimento I e 80°C para o experimento II, o que pode ser atribuído as diferenças de tempo entre o experimento I e II.

Para ambos os experimento I foi possível identificar que a amplitude de temperatura da matriz reduziu em torno de 33,3 % e, para o experimento II, 35%. Porém não foi possível identificar que a temperatura da matriz atingiu o estado estacionário, ou seja, a estabilização da amplitude térmica entre os ciclos.

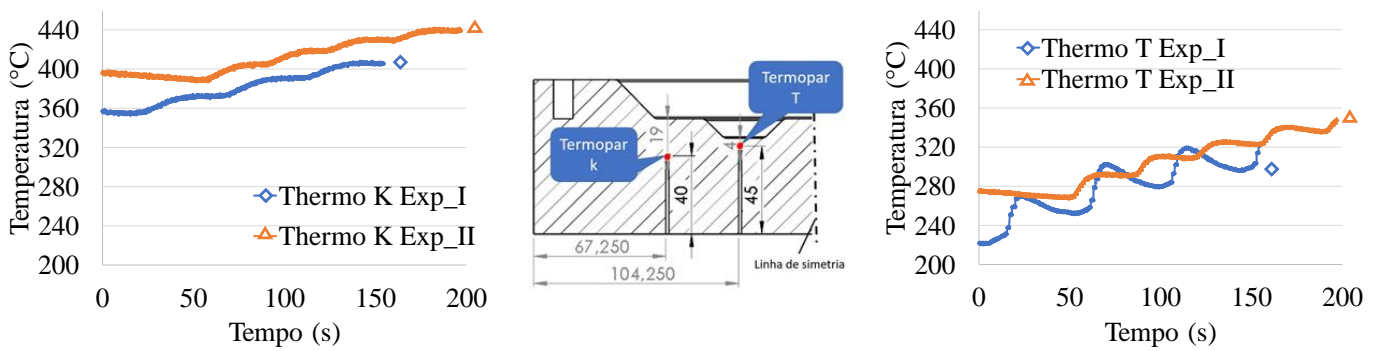


Figura 4.59 Temperatura na matriz inferior para os experimentos I e II por tempo de duração do experimento.  
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.60 apresenta a temperatura superficial durante o experimento I de forjamento onde é possível observar que a temperatura da matriz aumenta de 140°C (Figura 4.60a) para 660°C (Figura 4.60c) após um ciclo de forjamento. Porém, verificou-se a necessidade de reposicionar o equipamento de medição para melhor análise da cavidade da matriz.

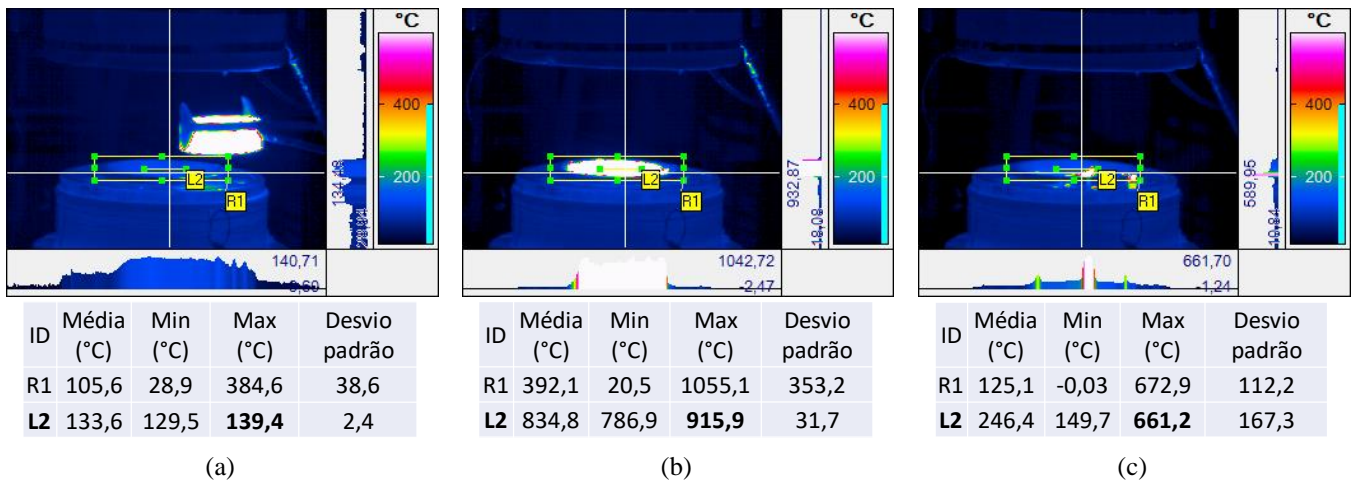


Figura 4.60 Temperatura superficial durante o experimento de forjamento I: (a) antes do posicionamento do billet, (b) antes e (c) depois da extração da peça forjada. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.61 apresenta a análise da temperatura superficial durante o experimento II. Com o reposicionamento da termo câmera foi possível realizar oito linhas medidas de medição na superfície da matriz (Figura 4.61a), o que permitiu um análise detalhada das etapas do processo (Figura 4.61b). Pode ser observado a temperatura do billet antes do experimento de forjamento ficou em torno de 900°C o que resultou na maior força da matriz superior, apresentada na Figura 4.57.

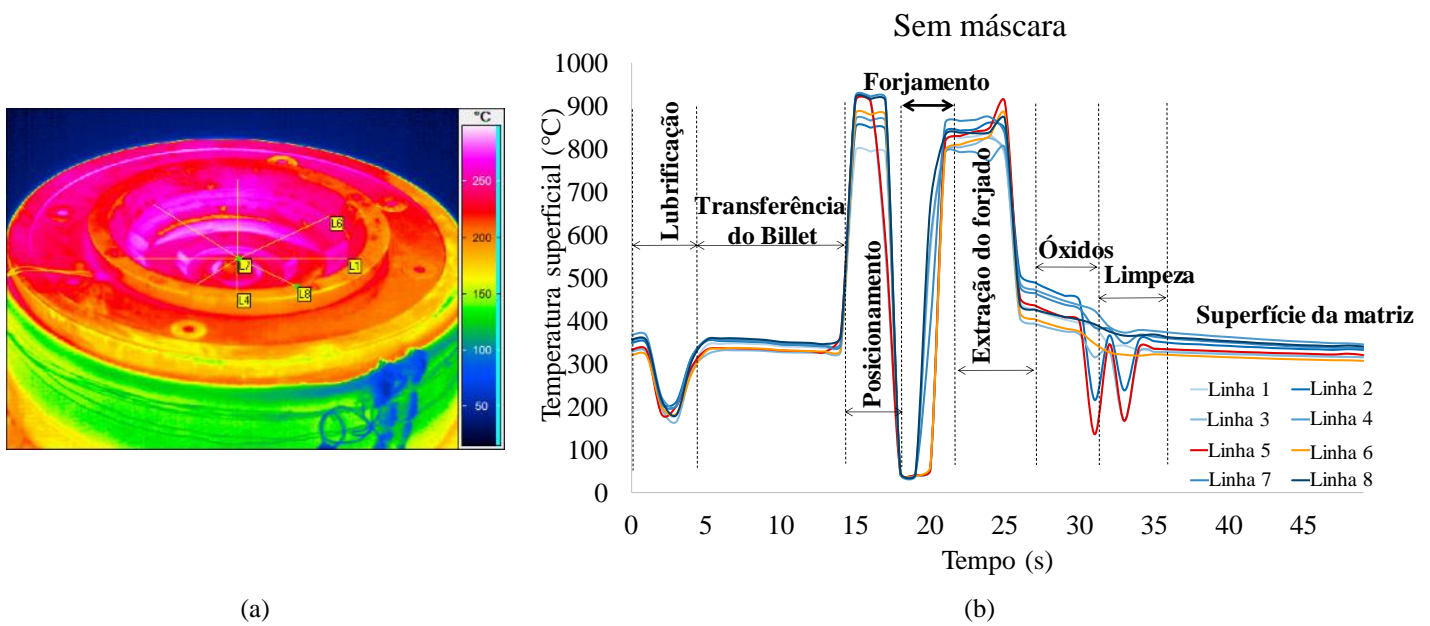


Figura 4.61 Análise da temperatura superficial da matriz para o experimento sem aplicação de máscara durante um ciclo de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.62 apresenta o perfil da temperatura superficial durante os 5 ciclos de forjamento. Através da média das linhas, foi possível verificar o resfriamento da superfície de 300°C para 180°C em função da lubrificação antes do início do primeiro ciclo. Assim, a etapa de lubrificação representa uma redução de 30 a 45% da temperatura superficial da matriz a cada ciclo realizado. Além disso, considerando que a temperatura da matriz antes do experimento de forjamento estava homogênea a 300°C, ao final dos 5 ciclos de forjamento a diferença na temperatura superficial resultante foi de 156°C, caracterizando um aumento de 52%.

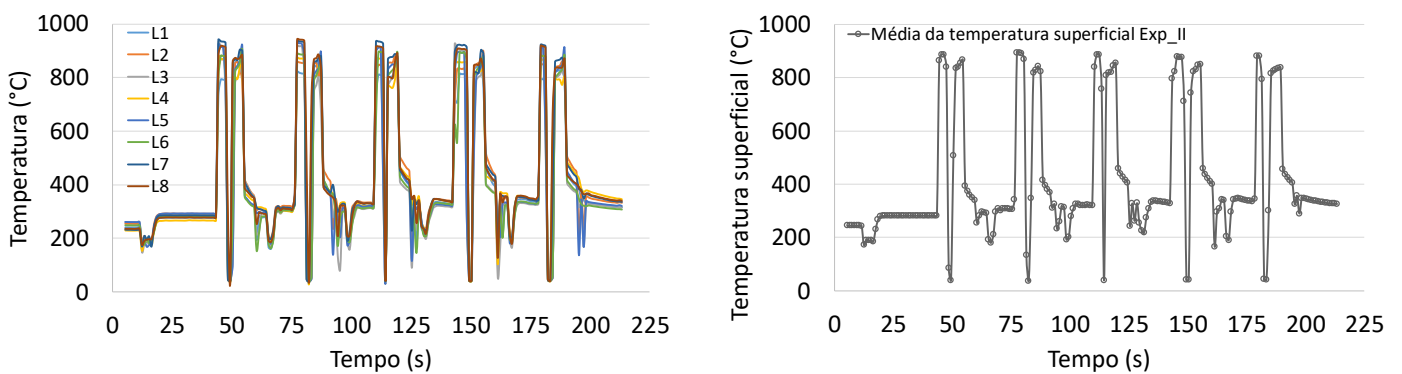


Figura 4.62 Perfil da temperatura superficial medida durante o experimento II de forjamento – N5 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4.3.2 Análise do aço DC04 como máscara

Após a fabricação, as máscaras foram aplicadas sobre a matriz de forjamento e submetidas a 4 ciclos de forjamento (experimento I). A Figura 4.63 apresenta os resultados de força e tempo do processo utilizando máscara DC04 com 1 mm de espessura nominal. Foram realizados experimentos com 3 amostras – Nr1, Nr2 e Nr3, a fim de garantir a repetibilidade dos resultados. Os principais resultados em termos de força podem ser observados na Figura 4.63 (a), variando de 2,6 a 3,24MN, assim como o tempo de cada operação na Figura 4.63 (b), o qual variou em média de 2 a 7,75 segundos.

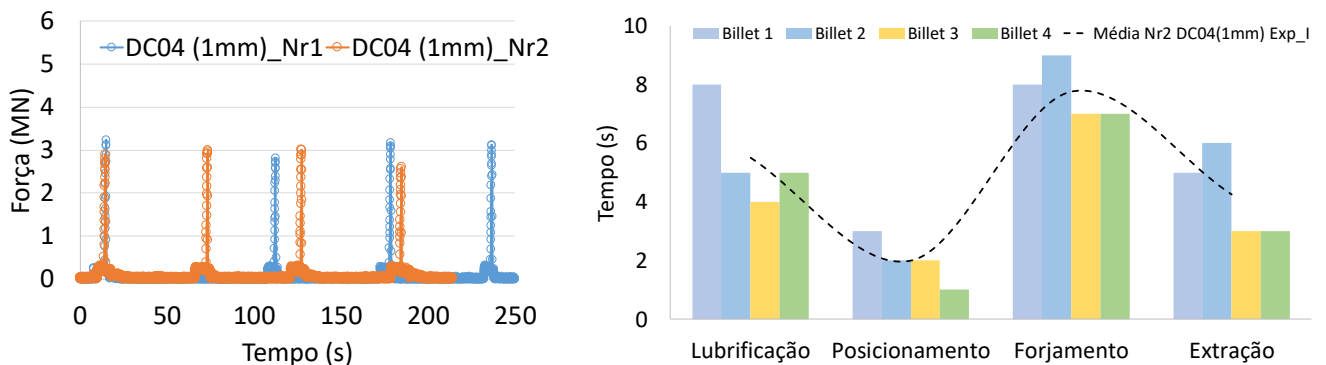


Figura 4.63 Experimento I de forjamento com máscara DC04 (1mm) – amostra Nr2: (a) força e (b) tempo.  
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.64 apresenta o perfil de temperatura medido na matriz inferior durante o experimento utilizando DC04 (1.0 mm) como máscara de revestimento. Os gráficos apresentam a comparação entre as temperaturas medidas nas amostras Nr1 e Nr2 durante os 4 ciclos de forjamento. O termopar (*K*) posicionado aproximadamente a 19.0 mm da superfície da matriz apresentou valores máximos de 336 e 370°C para as amostras Nr1 e Nr2, respectivamente. (Figura 4.64a) Por outro lado, o termopar (*T*) posicionado aproximadamente a 4,0 mm da superfície, apresentou valores de 250 e 275°C (Figura 4.64b). Tal variação de temperatura pode ser explicada devido a maior troca térmica próximo a superfície central da matriz, em contrapartida o isolamento e aquecimento constante (~300°C) mantém a temperatura elevada no ponto K. Apesar da temperatura inicial diferir em torno de 50°C, foi possível verificar que quanto mais próximo da superfície, maior o gradiente de temperatura.

Quanto à diferença do perfil de temperatura para as duas amostras, tal variação deve-se em função do estado inicial heterogêneo de temperatura da matriz, o que pode influenciar significativamente nos resultados de choque térmico. Por outro lado, ao observar o perfil de temperatura para cada uma das 4 peças forjadas com a amostra Nr2, conforme Figura 4.64(c) e

Figura 4.64(d), é possível afirmar que o processo atinge o estado estacionário em torno do 4º ciclo, sendo que a temperatura do billet 4 é muito próxima do perfil para o billet 3.

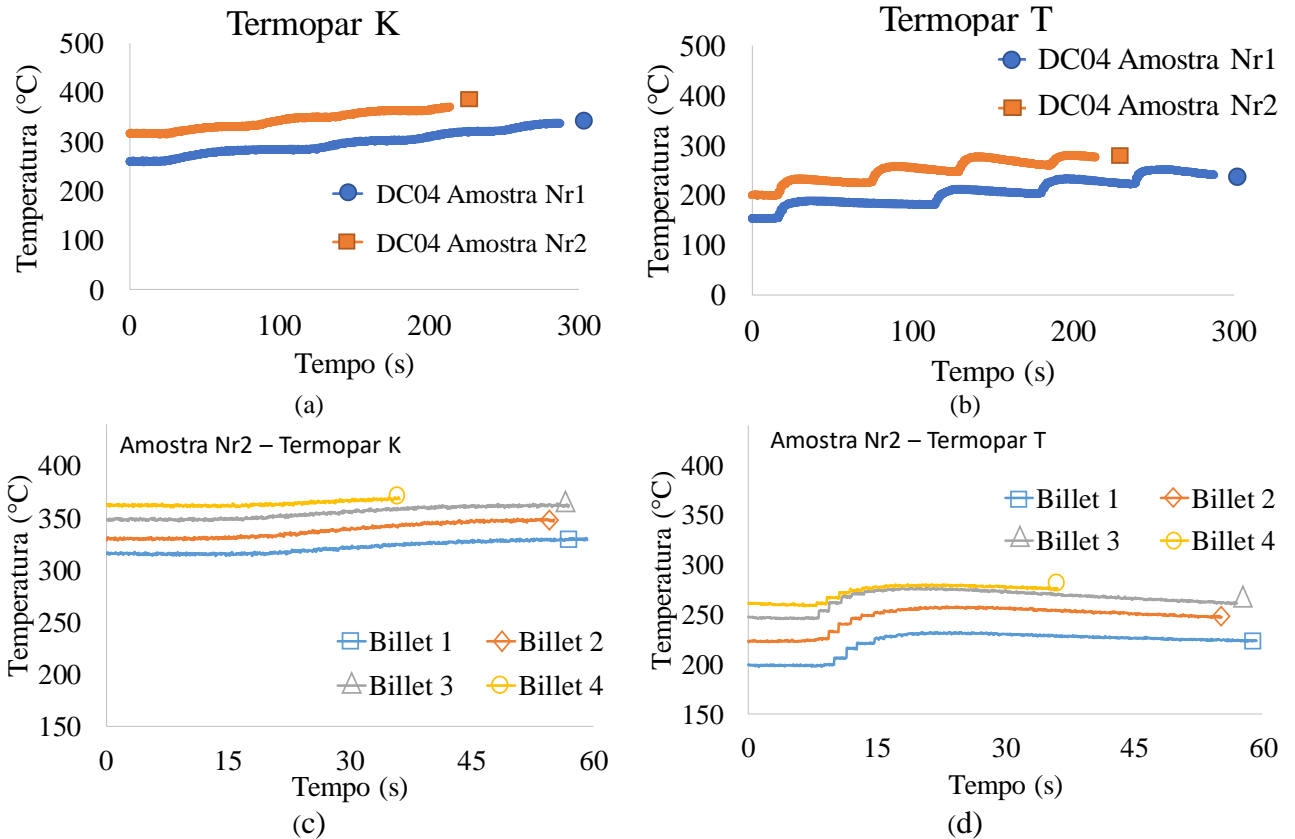


Figura 4.64 Experimento I utilizando máscara DC04 (1,0 mm): perfil de temperatura geral da posição (a) termopar K e (b) termopar T; temperatura por ciclo (c) termopar K e (d) termopar T. Fonte: Elaborado pela autora.

Da mesma maneira, foram realizados experimentos com máscara DC04 de espessura 1,5 mm e os resultados de força e tempo estão apresentados na Figura 4.65. Para este caso, a força variou de 3,9 a 4,1MN, caracterizando um aumento de 26,5% em relação a força do processo utilizando uma máscara de mesmo material e espessura 1mm.

Através da média do tempo necessário para cada operação, verificou-se uma variação de 1,25 a 8,25 segundos, sendo o posicionamento rápido e a aplicação do lubrificante mais lenta.

A Figura 4.66 apresenta o perfil de temperatura resultante do experimento I utilizando máscara DC04 (1,5 mm) e medido dentro da matriz inferior nas posições termopar K (a 19 mm da superfície) e termopar T (a 4 mm da superfície). A temperatura da matriz variou de 329 a 377,8°C para o termopar K e de 200 a 287,8 para o termopar T, conforme pode ser observado

na Figura 4.66(a) e Figura 4.66(b). Assim, após o 4º ciclo de forjamento a temperatura aumentou 15 e 44% para as medições K e T, respectivamente.

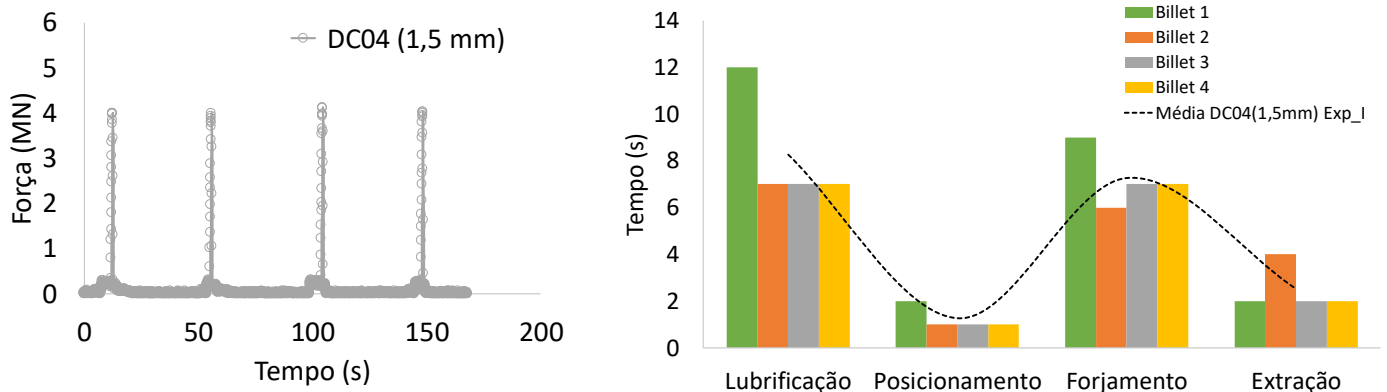


Figura 4.65 Experimento I de forjamento com máscara DC04 (1,5mm): (a) força e (b) tempo. Fonte: Elaborado pela autora.

Comparando os resultados de temperatura para cada um dos 4 ciclos de forjamento (Figura 4.66c e Figura 4.66d) pode ser observado que quanto mais próximo da superfície maior a amplitude de temperatura entre os ciclos e consequentemente, maior a fadiga térmica.

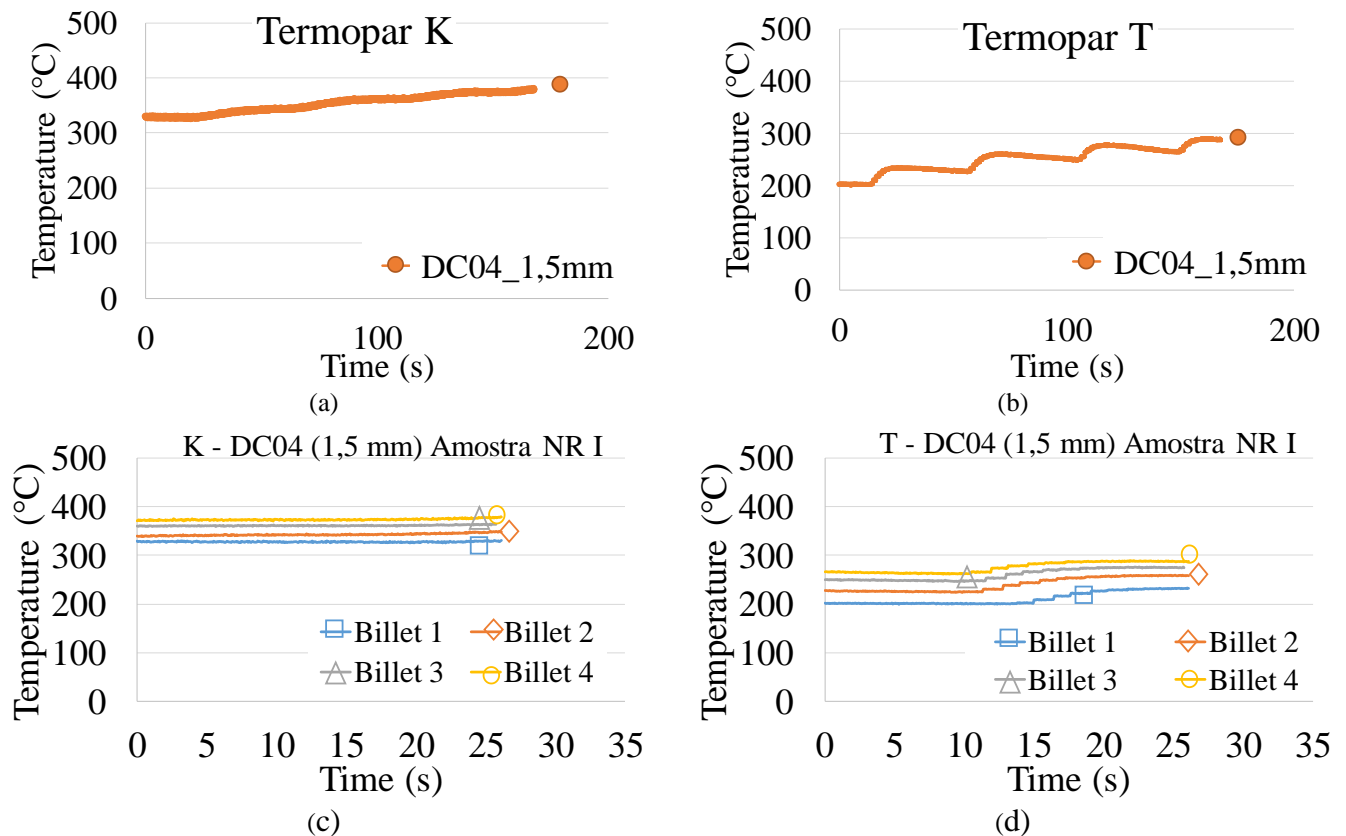


Figura 4.66 Experimento I utilizando máscara DC04 (1,5 mm): perfil de temperatura geral da posição (a) termopar K e (b) termopar T; temperatura por ciclo (c) termopar K e (d) termopar T. Fonte: Elaborado pela autora.



As máscaras de material DC04 (1,5 e 1,0 mm) foram cortadas após o experimento de forjamento e a espessura foi medida inicialmente utilizando micrômetro e sem considerar o raio, após isso, as amostras foram embutidas e preparadas para análise em microscópio ótico.

A Figura 4.67 apresenta os resultados de espessura para a máscara DC04 1mm e 1,5mm, respectivamente após 4 ciclos de forjamento. Foi possível observar que, mesmo com as variações na região de parede (R2/R1) e próxima à extremidade (Raio 1) após a estampagem, o efeito do processo de forjamento foi mais significativo nas regiões dos raios R6 e R3.

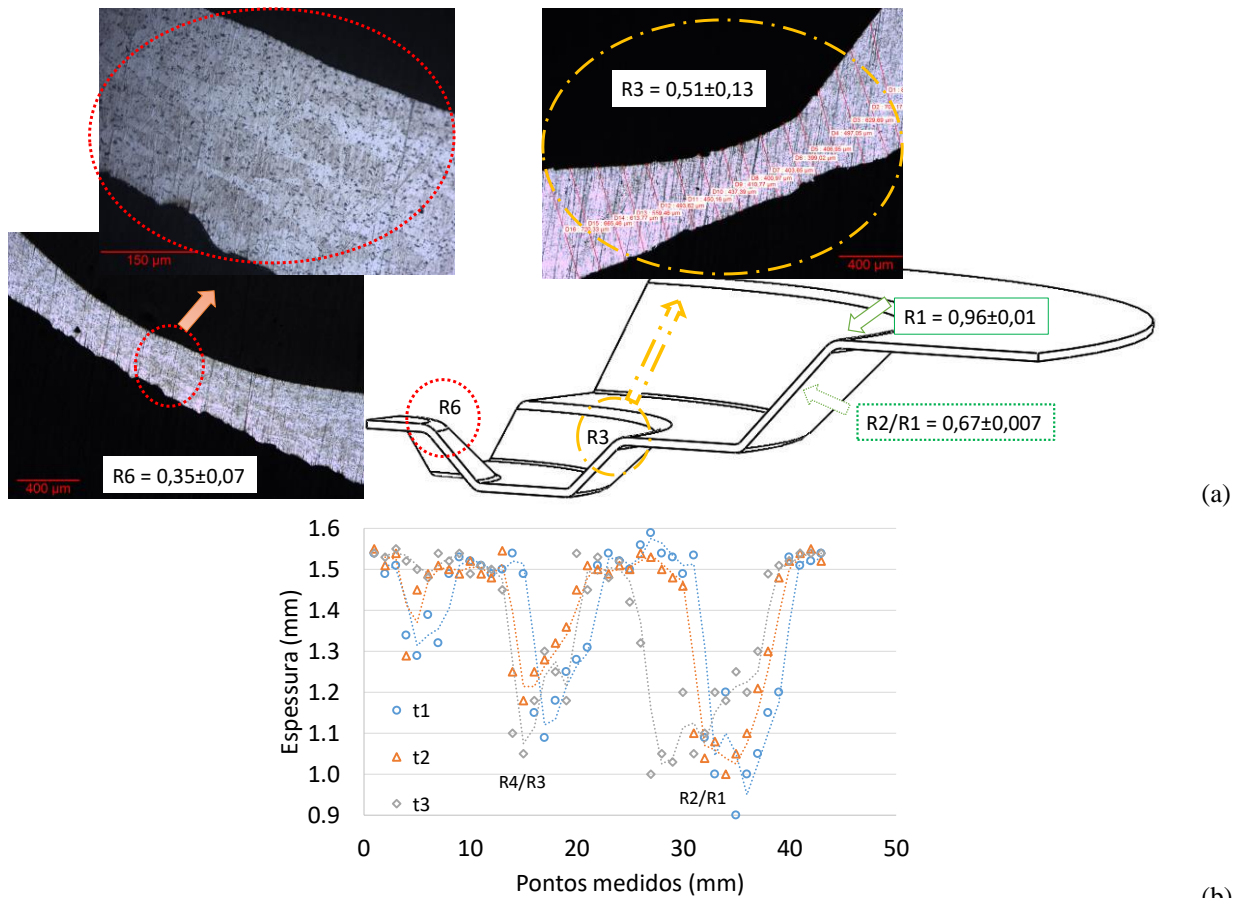


Figura 4.67 Espessura da máscara DC04 após experimento I de forjamento (a) 1,0 mm (b) 1,5 mm. Fonte: Elaborado pela autora.



#### 4.4.3.3 Análise do aço DP600 (1,0 mm) como máscara

A Figura 4.68 apresenta o resultado da força do processo para os experimentos I e II de forjamento utilizando o material DP600 (1mm) como máscara. Observa-se uma variação entre 3 e 3,7MN para o experimento I, e valores próximos a 4,8 MN para o experimento II. Esta variação entre o experimento I e II devem-se em função das diferenças de temperatura ambiente e condições iniciais do billet (oxidação e temperatura).

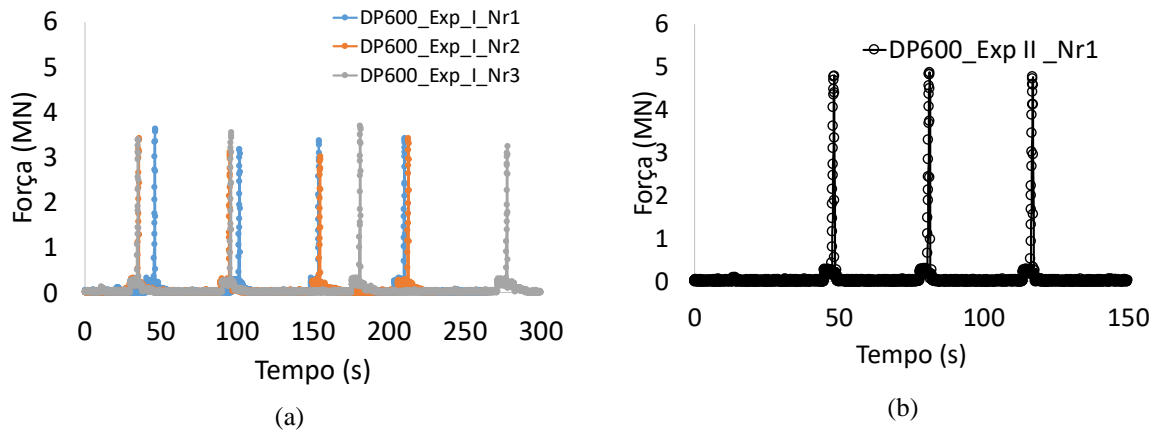


Figura 4.68 Resultado da força para o experimento (a) I e (b) II utilizando DP600 (1,0 mm) como máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

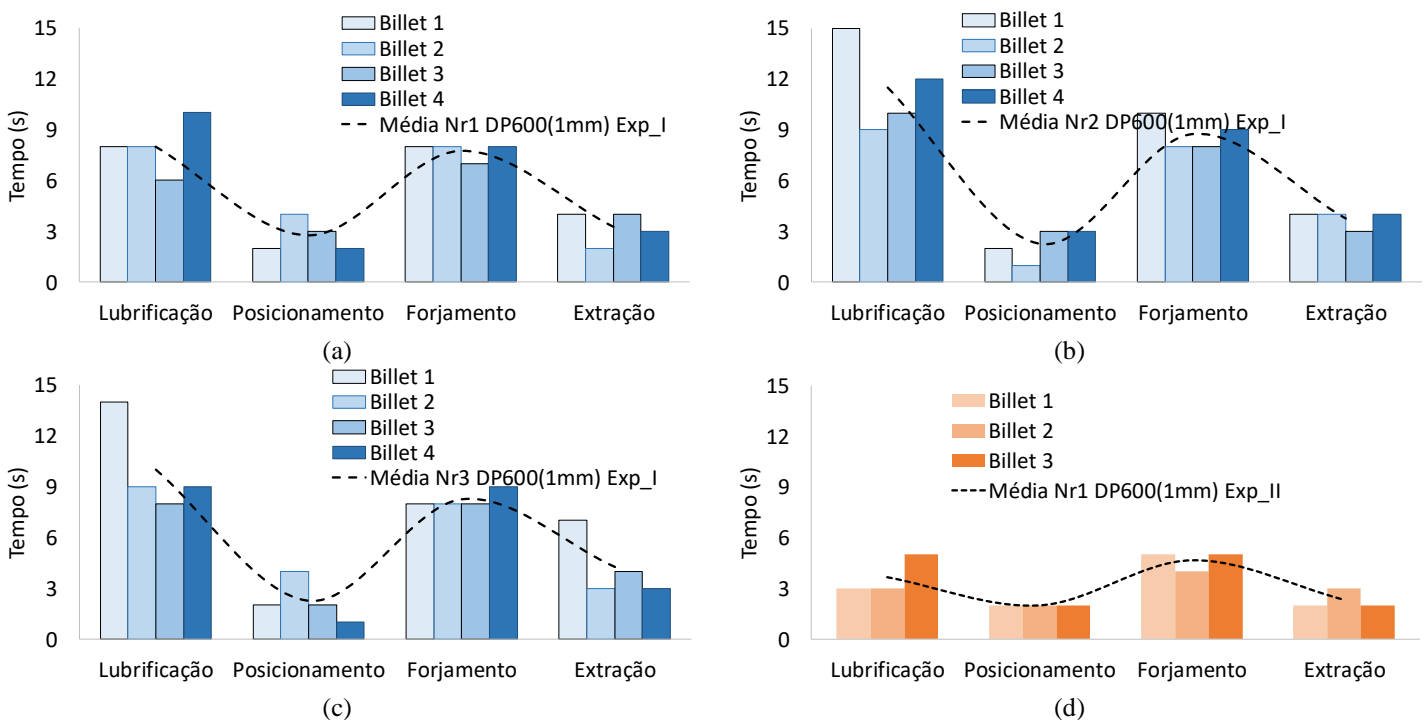


Figura 4.69 Tempo das operações do experimento I para as amostras (a) Nr1, (b) Nr2 e (c) Nr3; e experimento II amostra (d) Nr1 com máscara DP600 (1,0 mm). Fonte: Elaborado pela autora.

O tempo de cada operação também variou em função do experimento realizado, como apresentado na Figura 4.69, principalmente para a operação de lubrificação e forjamento, com

uma redução de 55,6% e 43,4%, respectivamente. Com isso foi possível reduzir o tempo de contato do billet/produto forjado com a máscara, resultando em menor temperatura.

A Figura 4.70 apresenta o perfil da temperatura medida na matriz durante o experimento I de forjamento para as amostras Nr1, Nr2 e Nr3. Considerando a amostra Nr3, a temperatura aumenta em torno de 10% para o termopar K posicionado a 19 mm da superfície da matriz, enquanto, para o termopar T a 4 mm da superfície da matriz, os valores de temperatura aumentam 23,5%. Observa-se ainda certa estabilização da temperatura após o 3º ciclo de forjamento para ambas as posições medidas.

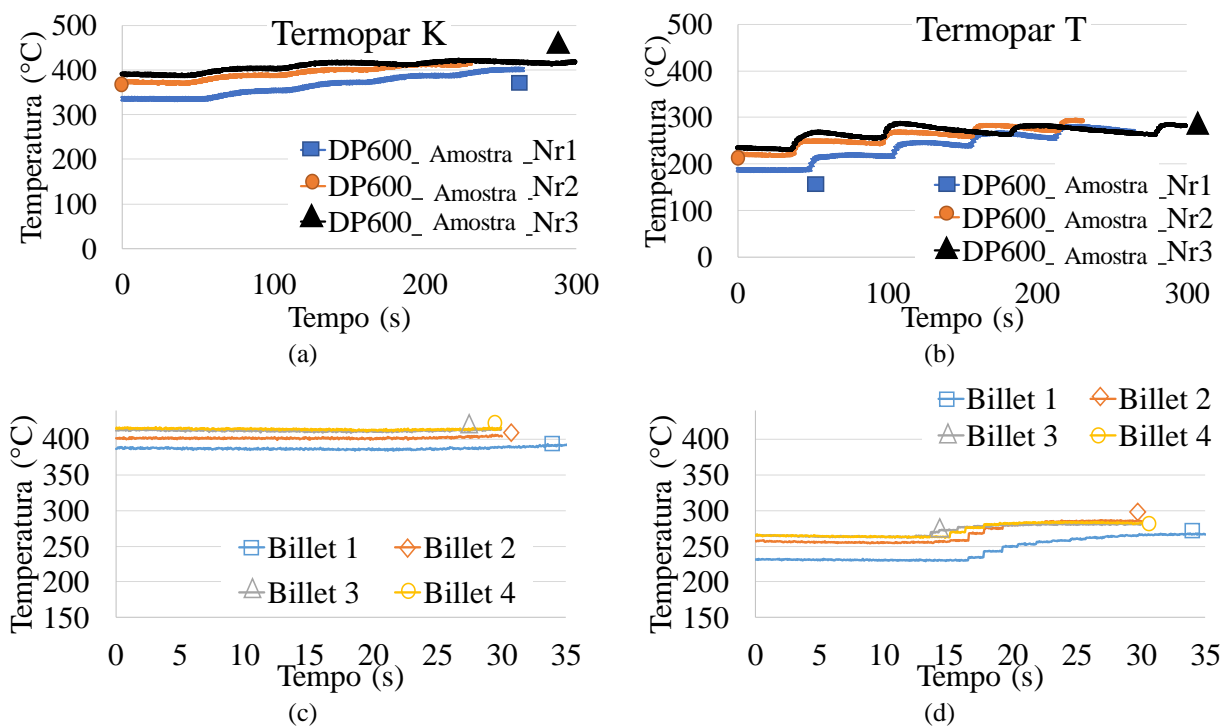


Figura 4.70 Temperatura medida na matriz inferior com máscara DP600 (1mm): durante o experimento I (N=4) nas posições do termopar (a) K e (b) T, temperatura por ciclo (c) termopar K e (d) termopar T. Fonte: Elaborado pela autora.

As variações da temperatura para o experimento II podem ser observadas na Figura 4.71, sendo que a máscara Nr1 foi reutilizada para esta análise. A temperatura inicial medida foi de 307°C para o termopar K e 205°C para o termopar T, sendo que ao final do 3º ciclo houve um aumento de 15,31 e 24,88%, respectivamente.

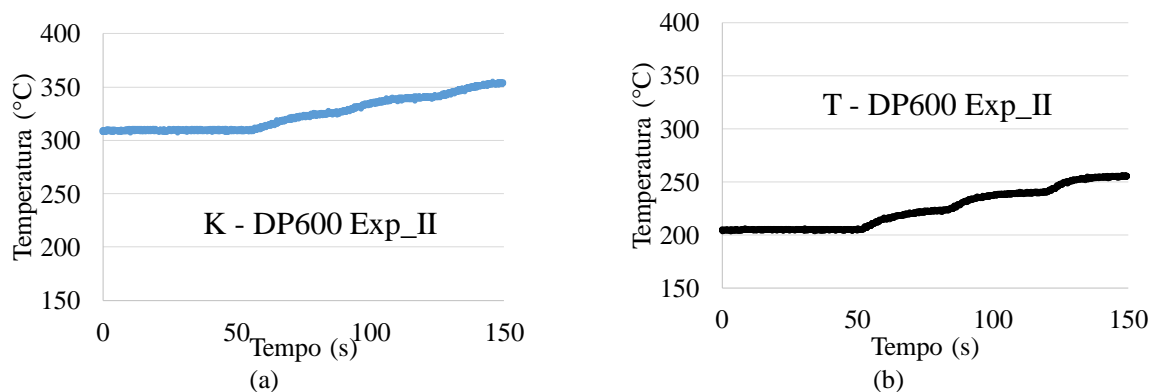


Figura 4.71 Temperatura da matriz inferior durante o experimento II com máscara DP600 (1,0 mm) nas posições (a) termopar K e (b) termopar T. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.72 mostra a temperatura superficial medida durante o experimento II de forjamento com máscara em aço DP600 (1,0 mm). Verifica-se que a superfície da máscara atinge em torno de 600°C após o 3º ciclo, além disso pode ser observado que a temperatura do billet varia de 870 a 980°C.

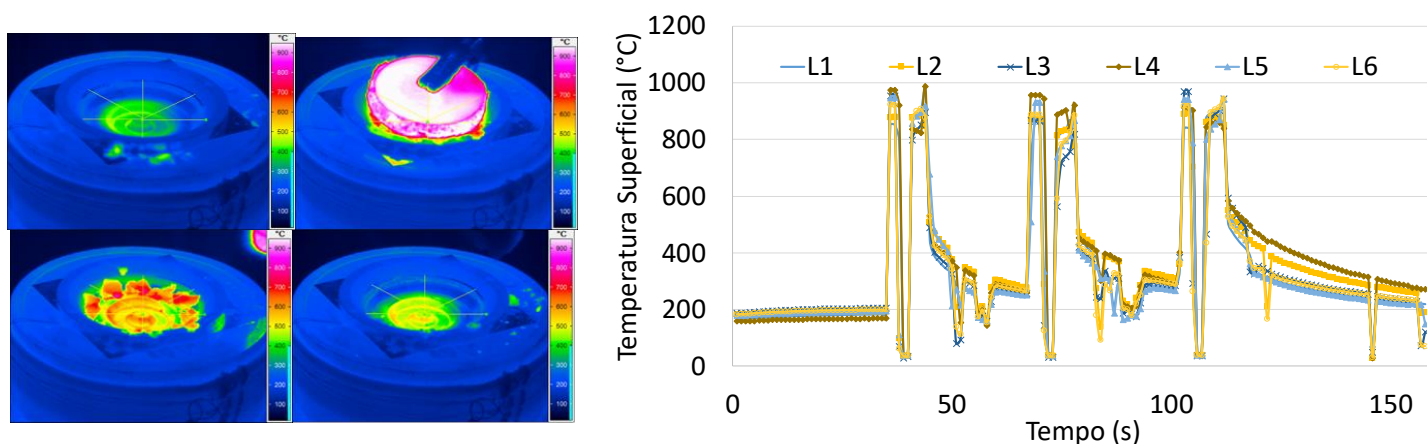


Figura 4.72 Temperatura superficial durante o experimento II utilizando máscara DP600 (1,0 mm). Fonte: Elaborado pela autora.

Através da avaliação da temperatura média foi possível verificar que antes da operação de forjamento a temperatura superficial da máscara era de 326°C, reduzindo para 201°C após a aplicação do spray lubrificante. O billet foi então posicionado com temperatura em torno de 912°C, sendo forjado e retirado com temperatura em torno de 880°C. Verificou-se ainda a presença de óxidos a 500°C na superfície da máscara após a retirada do produto forjado.

A Figura 4.73 apresenta os resultados da espessura da máscara DP600 (1,0 mm) após experimento de forjamento I e II, onde o ponto 0 (zero) representa a região do raio R6, ou seja, o centro da máscara e os pontos 40 e 120 as regiões do raio R1, na extremidade da máscara.

O processo de conformação influenciou significativamente na espessura inicial da máscara, principalmente na região de parede entre os raios R2 e R1. Conforme pode ser observado na Figura 4.73(a), a máscara manteve uma distribuição de espessura semelhante à espessura após o processo de estampagem mesmo após os 4 ciclos de forjamento, sem apresentar falhas visíveis. A mesma amostra do material da máscara testada foi então submetida ao experimento II e apresentou falha após o 3º ciclo de forjamento e o perfil de espessura medida através do microscópio Keyence pode ser observado na Figura 4.73(b).

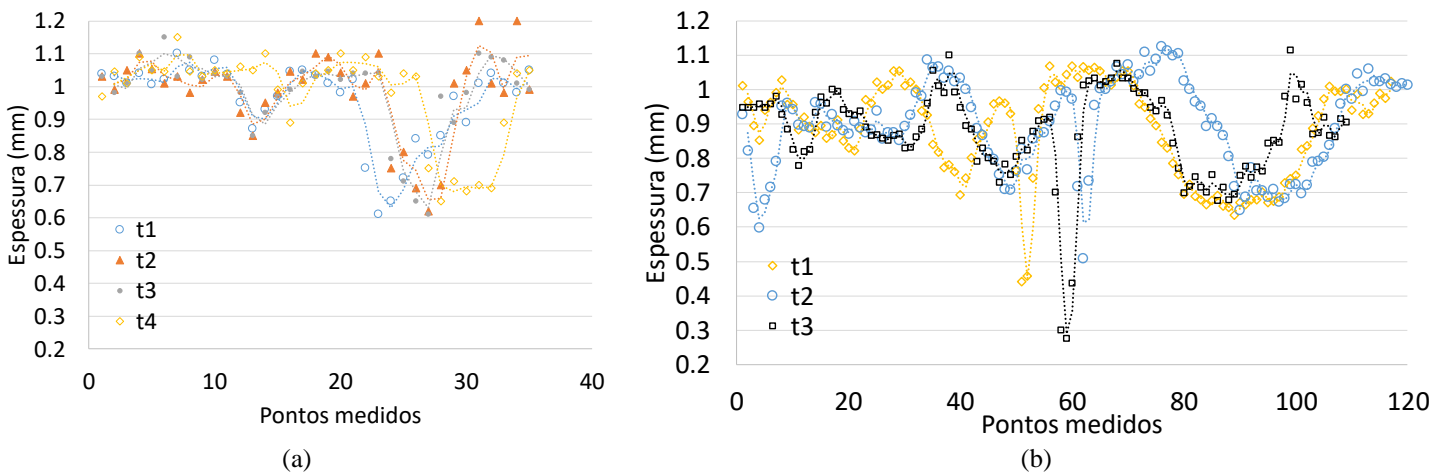


Figura 4.73 Espessura da máscara DP600 após experimento (a) I – perfil medido através de micrômetro e (b) II – perfil medido no microscópio (Keyence). Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.74 apresenta a análise detalhada das variações de espessura entre as amostras t1, t2 e t3 retiradas da máscara DP600 após o experimento II. Pode ser verificado que a região mais crítica foi o raio R3, com espessuras entre 0,6 e 0,3 mm e que o raio R6 apresentou comportamento diferente entre as amostras analisadas. Além disso, a região de parede entre os raios R1 e R2 apresentou elevada deformação para a amostra t3 causada pela elevada sollicitação termomecânica nesta região e, possivelmente, pela movimentação da máscara.

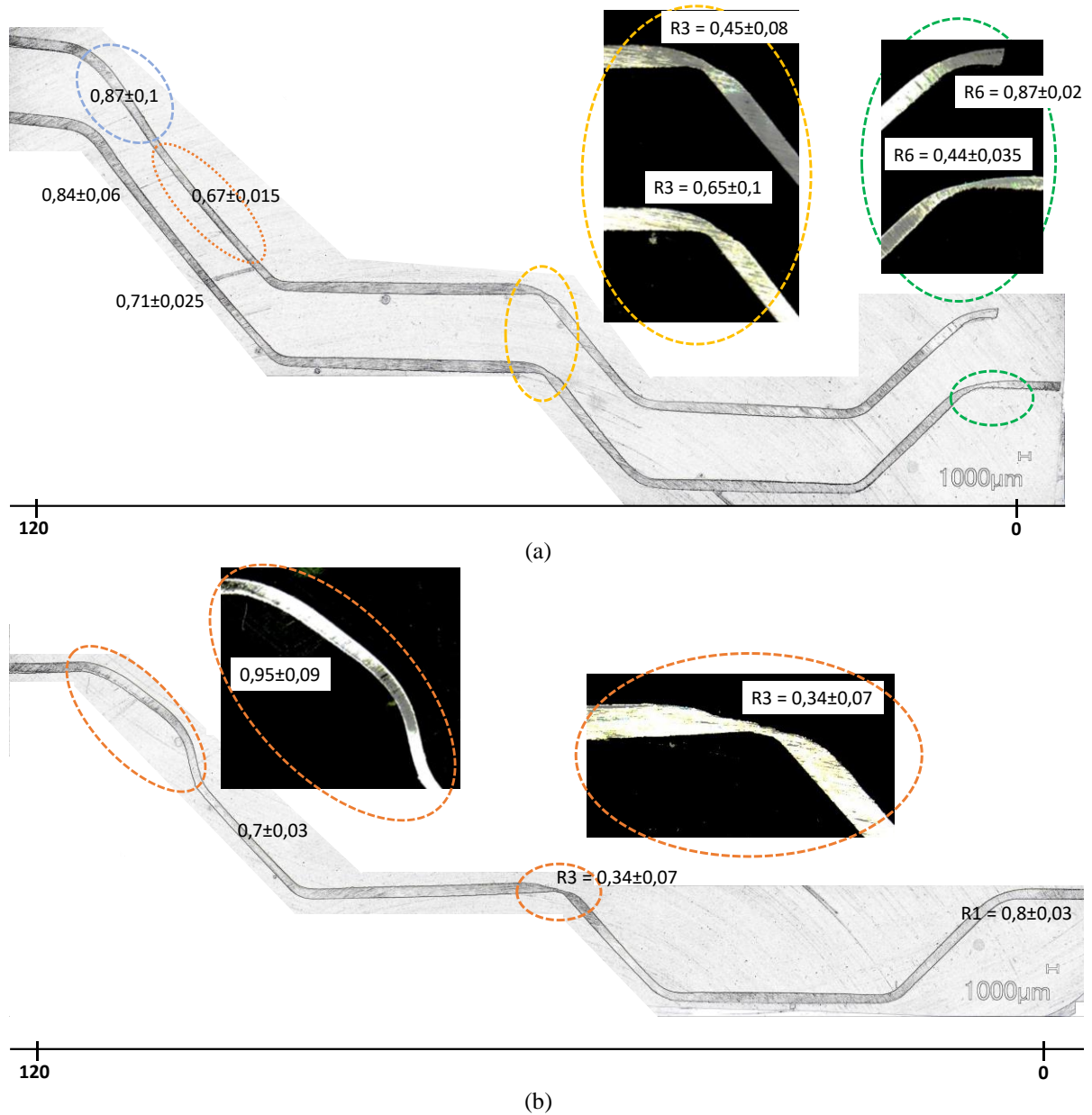


Figura 4.74 Análise das variações na espessura da máscara DP600 após experimento II para as amostras (a) t1 e t2 e (c) amostra t3. Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4.3.4 Análise do aço 22MnB5 (revestido) como máscara

Para a análise do comportamento do material 22MnB5 (revestido) foram utilizadas duas espessuras, de 1,0 mm e 1,5 mm, e dois tratamentos térmicos,  $QI = 900^{\circ}C$  e  $QI = 800^{\circ}C$ . As máscaras de 1,5 mm passaram por tratamento térmico de têmpera a  $900^{\circ}C$  (QI), enquanto as amostras de 1,0 mm passaram por ambos os tratamentos (a  $800$  e a  $900^{\circ}C$ ).

Inicialmente foram realizados 4 ciclos de forjamento (experimento I) com três amostras das máscaras de 1,5 e 1,0 mm, após isto, uma das amostras foi utilizada para o experimento II com maior número de ciclos.

Os resultados de força, tempo e temperatura do processo estão descritos a seguir conforme a espessura e tratamento do material, assim como a análise da máscara após sua aplicação sobre a matriz de forjamento.

##### 4.4.3.4.1 Máscara 22MnB5 (1,5 mm)

A Figura 4.75 apresenta os resultados da força do processo para ambos os experimentos utilizando as máscaras de 1,5 mm de espessura tratadas a  $900^{\circ}C$ . Pode ser observado que o carregamento variou entre 4,3 e 5,3 MN.

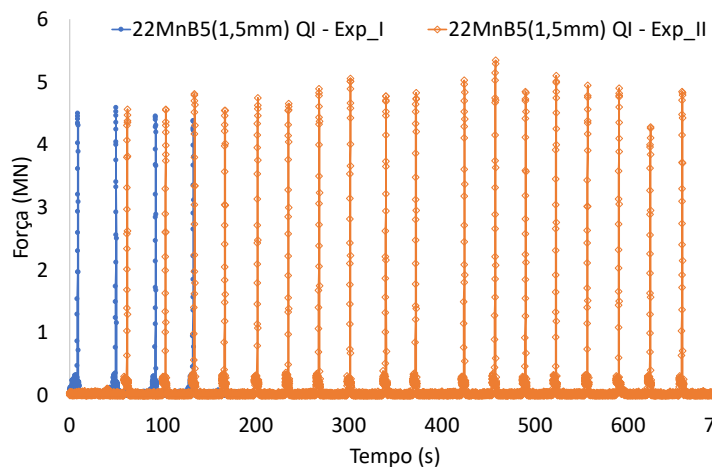


Figura 4.75 Resultado da força durante experimento I e II utilizando máscara 22MnB5 (revestido) temperado a  $900^{\circ}C$  (QI) com 1,5 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.76 apresenta o tempo de cada etapa do ciclo para experimento I para o experimento II utilizando máscara 22MnB5 (1,5 mm) com têmpera a  $900^{\circ}C$ . Para o experimento I (Figura 4.76a), o tempo médio de lubrificação foi de 6,5s e de forjamento foi em torno de 8 segundos. Para o experimento II (Figura 4.76b), o tempo médio de lubrificação passou para 3,3s e de forjamento para 4,8 segundos. Com isso, o tempo de contato entre billet e máscara reduziu em 24%, considerando as etapas de posicionamento e forjamento.

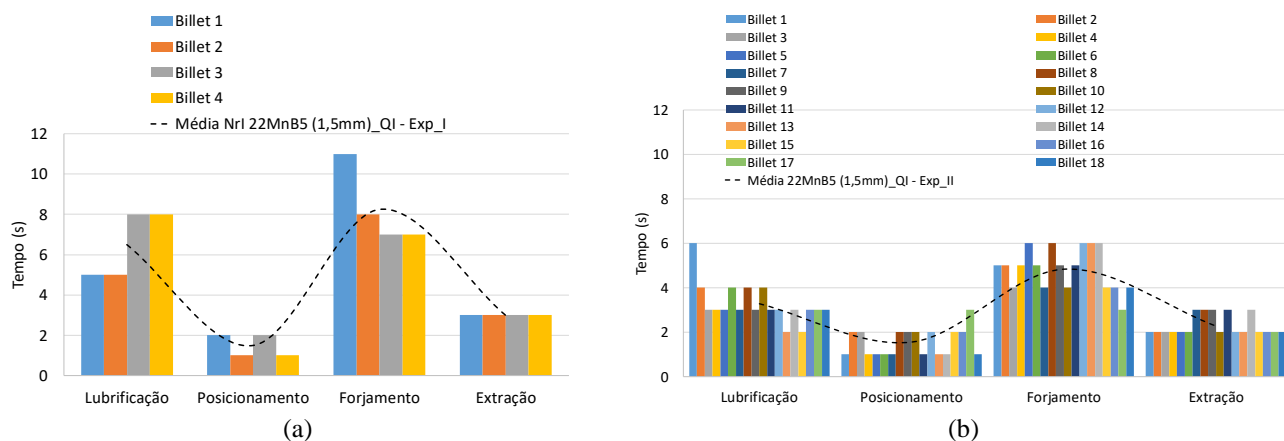


Figura 4.76 Tempo das etapas do processo com máscara 22MnB5 (1,5 mm) temperado a 900°C para (a) experimento I (N=4) e (b) experimento II (N=18). Fonte: Elaborado pela autora.

A temperatura medida dentro da matriz inferior variou de 292 a 350°C para o termopar K a 19 mm da superfície, e de 171 a 242°C para o termopar T a 4 mm da superfície, conforme apresentado na Figura 4.77. Para este caso, a temperatura tende a aumentar após o 3º ciclo de forjamento, levando mais tempo para atingir o estado estacionário de temperatura.

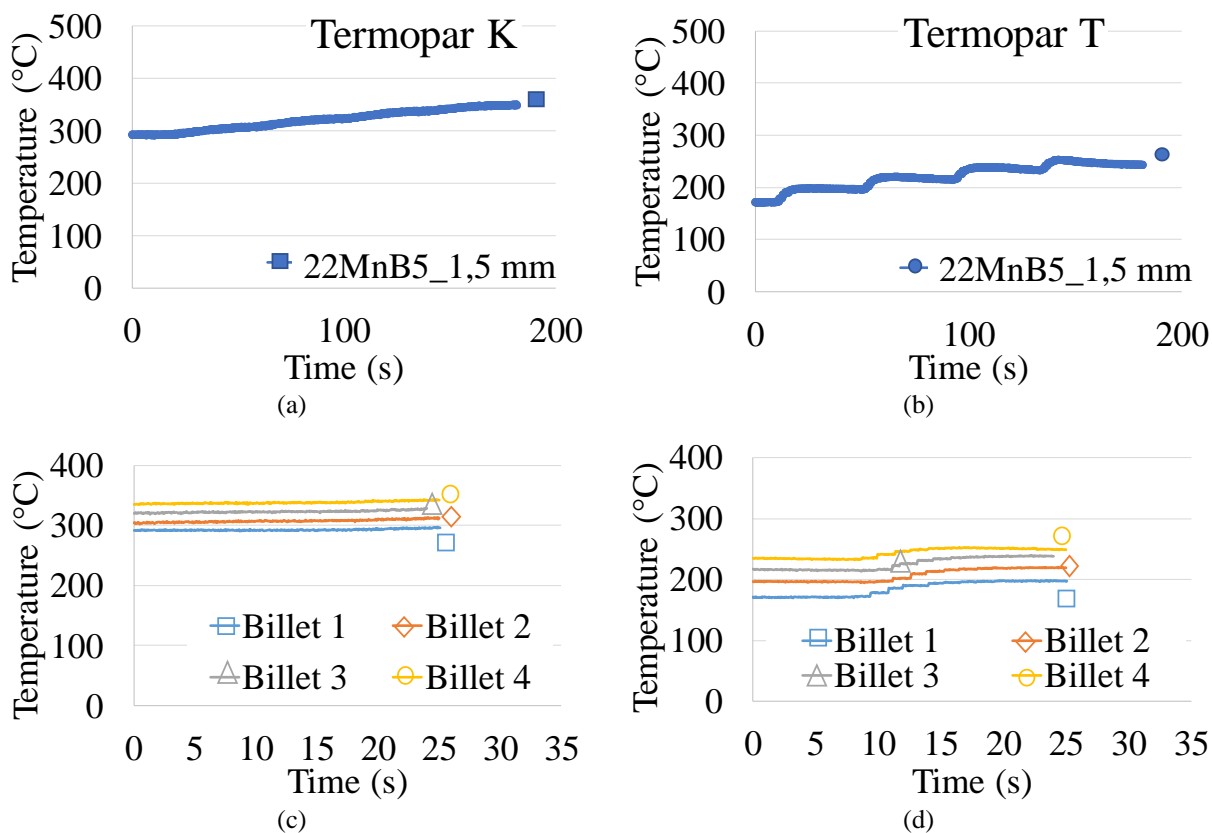


Figura 4.77 Temperatura medida na matriz inferior durante o experimento I com máscara 22MnB5 (1,5mm) QI. Fonte: Elaborado pela autora.

Através da realização do experimento II, foi possível identificar que a matriz tende a atingir um estado mais estável após o 7º ciclo de forjamento, conforme perfil de temperatura apresentado na Figura 4.78. Para este caso, a amplitude de temperatura passa de 20 para 10°C após o 7º ciclo, ou seja, a partir deste ponto a sollicitação termomecânica se mantém.

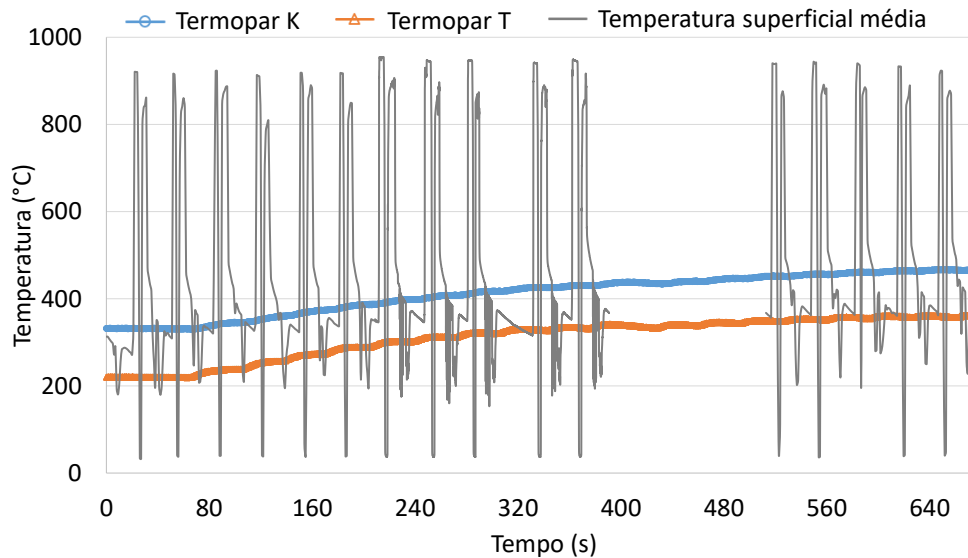


Figura 4.78 Temperatura medida durante o experimento II com máscara 22MnB5 (1,5mm) QI. Fonte: Elaborado pela autora.

Após a realização dos experimentos, as máscaras foram cortadas e analisadas quanto a sua espessura e regiões críticas. A Figura 4.79 apresenta os resultados das seções (t1, t2 e t3) após 4 e 18 ciclos de forjamento. Observa-se que a espessura varia entre as seções analisadas, sendo 0,87 mm o valor mínimo e 1,38 mm o valor máximo da espessura após 4 ciclos de forjamento. Para o experimento II, após 18 ciclos as variações foram de 0,7 a 1,3 mm.

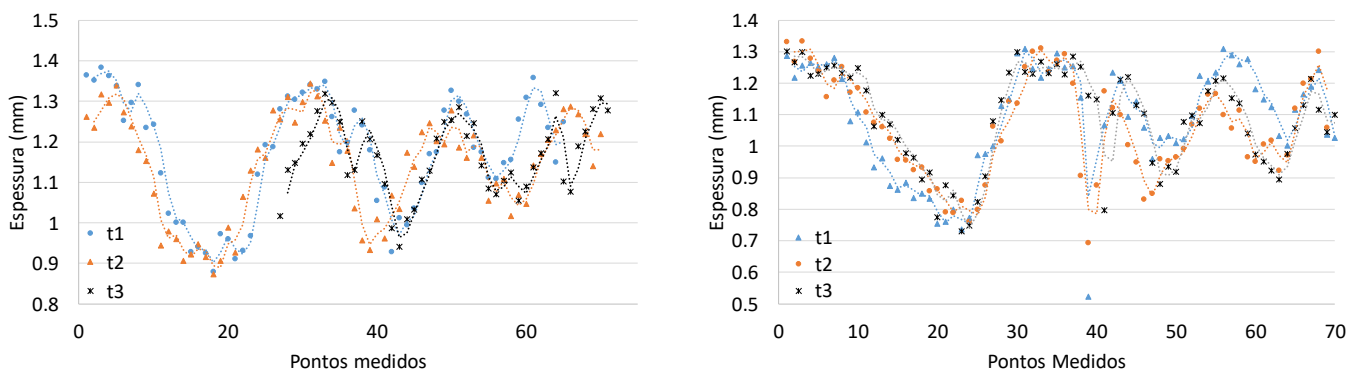


Figura 4.79 Espessura da máscara 22MnB5 (1,5mm\_QI) após experimento (a) I – perfil medido através de micrômetro e (b) II – perfil medido no microscópio (Keyence). Fonte: Elaborado pela autora.



A Figura 4.80 apresenta as seções das máscaras após forjamento de 4 billets (Figura 4.80a) e 18 billets (Figura 4.80b). Como pode ser observado, as regiões de parede (R1/R2 e R3/R4) e o raio R2 apresentaram valores de espessura em torno de 0,9mm para o experimento I, enquanto os raios R1, R3 e R6 valores entre 1,2 e 1,3mm.

As seções analisadas após o experimento II apresentaram valores críticos para as regiões do raio R3, atingindo uma espessura de 0,3mm para a seção t3. Foi possível observar ainda que a região de parede R1/R2 apresentou elevada distorção e espessura de 0,8mm.

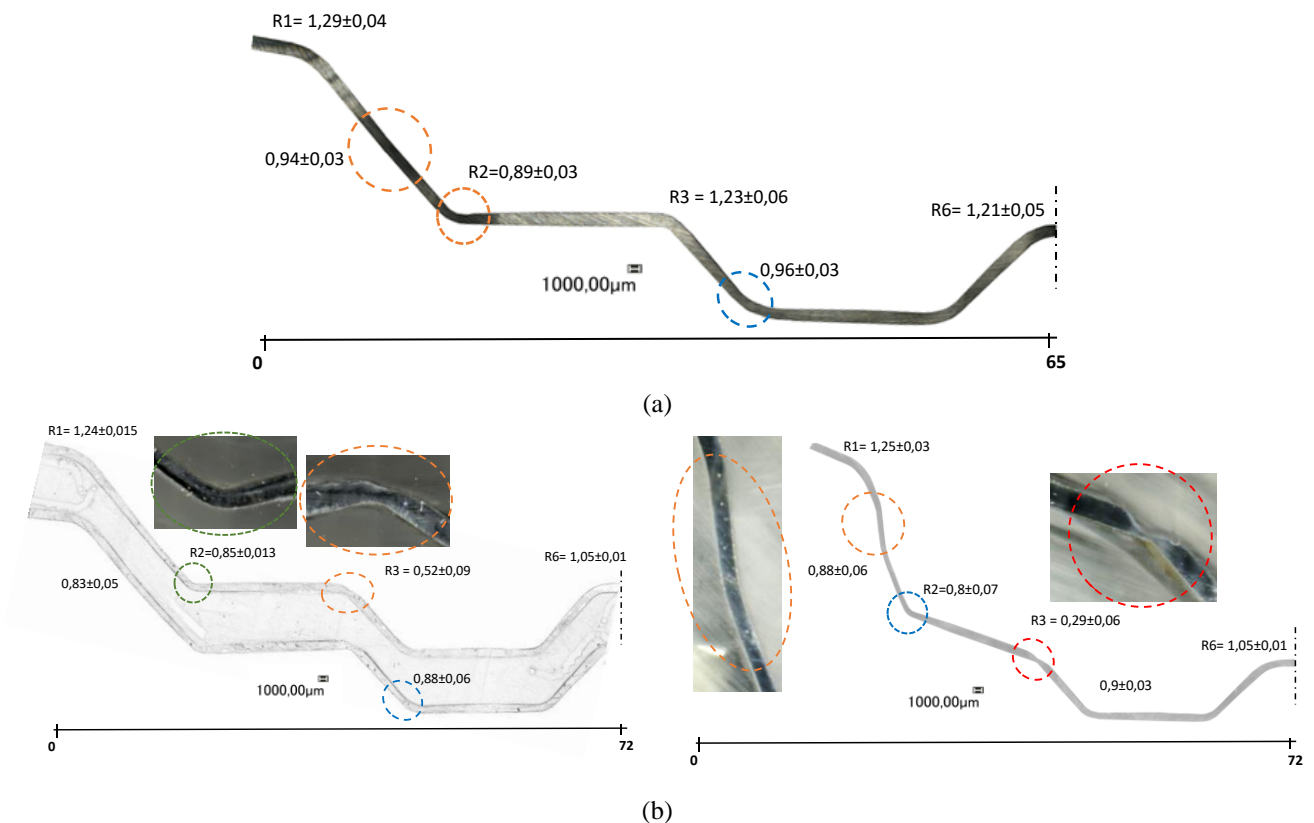


Figura 4.80 Análise das regiões críticas da máscara 22MnB5 (1,5mm) QI após experimento (a) I e (b) II. Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4.3.4.2 Máscara 22MnB5 (1 mm) tratado a 900°C

Para os experimentos utilizando a máscara de 1mm de espessura, a força da matriz superior variou entre 3,3 e 4,5MN, conforme apresentado na Figura 4.81. Comparando com os resultados anteriores com mesmo material e 1,5mm de espessura, verifica-se uma redução entre 23,26% e 15,09% na força do processo.

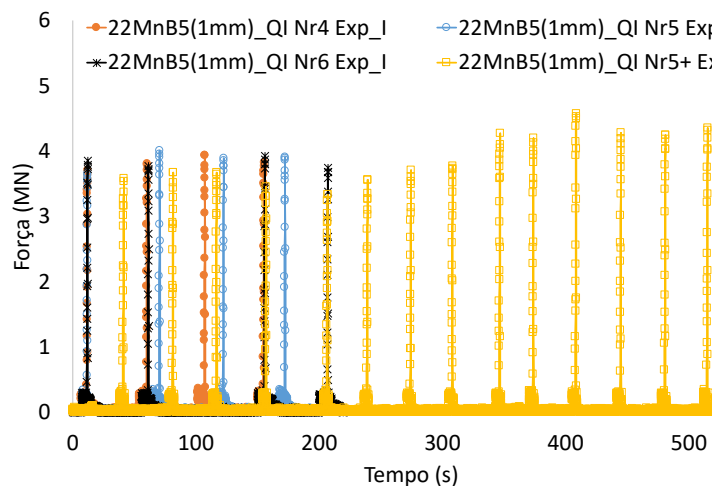


Figura 4.81 Resultado da força durante experimento I e II utilizando máscara 22MnB5 (revestido) temperado a 900°C (QI) com 1 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora.

Os experimentos foram realizados com o mesmo material, porém com 1 mm de espessura, sendo avaliadas três amostras de máscara (Nr4, Nr5 e Nr6) para o experimento I e uma amostra para o experimento II.

As análises do tempo de cada etapa para ambos os experimentos podem ser observadas na Figura 4.82. O tempo médio para o experimento I (N=4) variou de 6,25s para a etapa de lubrificação, 1,92s para o posicionamento do billet, 7,33s para o forjamento e 3,42 para a extração do produto forjado. Para as mesmas etapas, a média do tempo do experimento II foi de 4,8s, 1,8s, 4,2s e 2,9s, respectivamente. Com isso, foi possível observar uma redução de 35,14% no tempo médio de contato entre o billet e a máscara (posicionamento + forjamento) no experimento II (N=9).

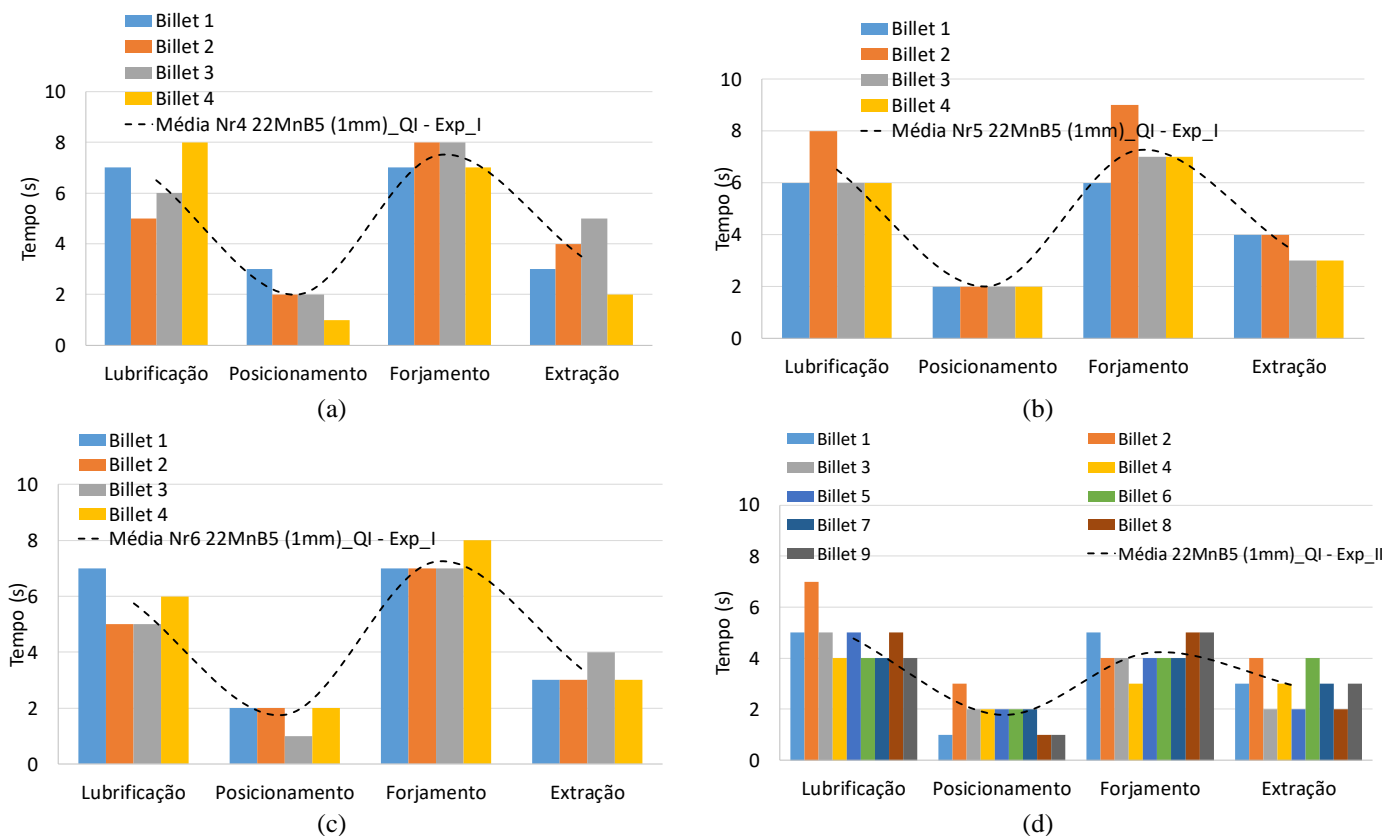


Figura 4.82 Tempo das etapas do ciclo para o experimento I amostras (a) Nr4, (b) Nr5 e (c) Nr6; e (d) para o experimento II utilizando máscara 22MnB5 (1mm) com têmpera a 900 C. Fonte: Elaborado pela autora.

O perfil de temperatura medido na matriz inferior para o experimento I com máscara 22MnB5 (1mm\_QI) tratado a 900 C está apresentado na Figura 4.83. A temperatura média a 19mm da superfície da matriz (termopar K) apresentou temperaturas entre 375 C e 414,5 C para a terceira amostra Nr6 analisada, enquanto os valores a 4 mm da superfície (termopar T) ficaram entre 220 C e 298 C, representando um aumento de 10,5 e 35,5%, respectivamente. Observando ainda o comportamento da temperatura para o termopar T, verifica-se que a amplitude de temperatura passou de 30 C para 25 C a partir do 4  billet forjado.

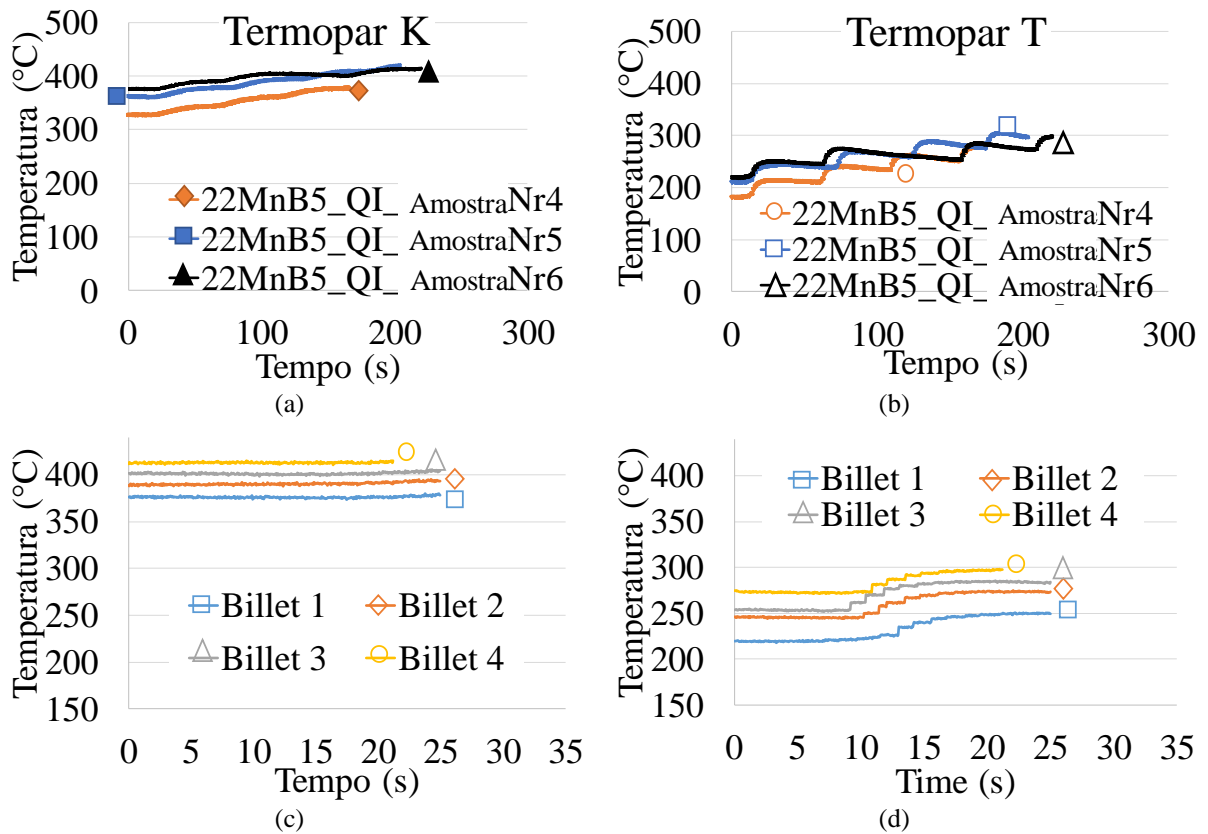


Figura 4.83 Temperatura interna da matriz durante experimento I com máscara 22MnB5 (1mm) QI. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.84 apresenta as variações de temperatura, tanto superficiais quanto as medidas internamente na matriz inferior, para o experimento II com máscara 22MnB5 (1mm\_QI). Para esta análise a máscara utilizada no experimento I foi submetida inicialmente a mais 9 ciclos, e posteriormente a mais 5 ciclos de forjamento.

Analisando os ciclos apresentados na Figura 4.84(a), a temperatura interna da matriz variou de 293°C a 391°C para as medições a 19 mm da superfície (termopar K) e de 198°C a 312°C para 4 mm da superfície (termopar T), representando um aumento de 33,5 e 57,6%, respectivamente. Foi possível verificar que a amplitude de temperatura para o termopar K passa de aproximadamente 20°C para 8°C a partir do 5º ciclo de forjamento. Enquanto o termopar T apresentou variações de 25°C para 7°C também a partir do 5º ciclo.

Para os últimos 5 ciclos do experimento (Figura 4.84b), foi possível observar uma variação da temperatura no termopar K de 352°C a 405°C e de 240°C a 307°C para o termopar T, representando um aumento de 15% e 27,9%, respectivamente. A amplitude de temperatura passou de 10 para 6°C a partir do 4º ciclo a 19 mm da superfície (termopar K) e de 16°C para 10°C a 4mm da superfície (termopar T).

Avaliando a média das linhas no 9º ciclo (Figura 4.84a) a temperatura superficial da máscara passa de 400°C para 180°C após a lubrificação, sendo que o billet manteve-se a 972°C quando posicionado no setup de forjamento e a 900°C quando retirado. Após a extração do produto forjado foi possível observar que os óxidos sobre a máscara apresentam uma temperatura em torno de 594°C, sendo um fator relevante para o aumento do tempo a elevada temperatura, retardando a troca térmica e consequente resfriamento da máscara.

Ao final do 18º ciclo de forjamento (Figura 4.84b), a superfície da matriz passa de 419 para 385,5°C após lubrificação, o billet forjado a 985°C e retirado a 948°C, presença de óxidos a 598°C e superfície da máscara após limpeza com temperatura em torno de 451°C.

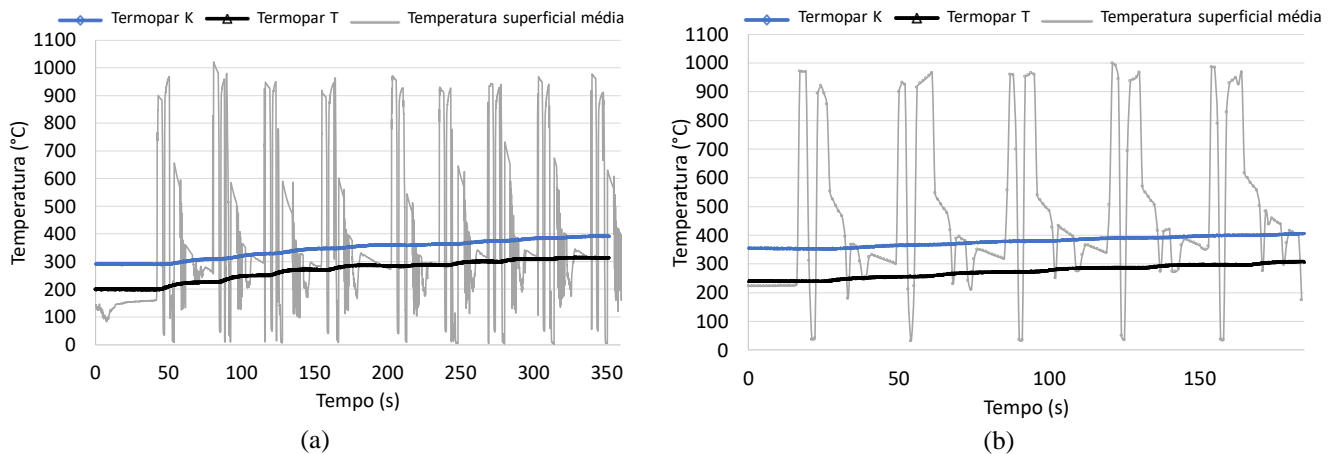
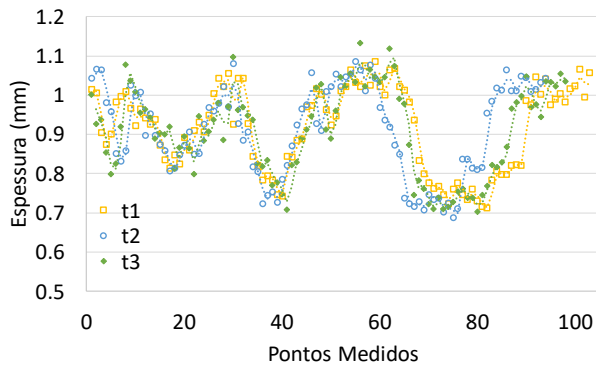


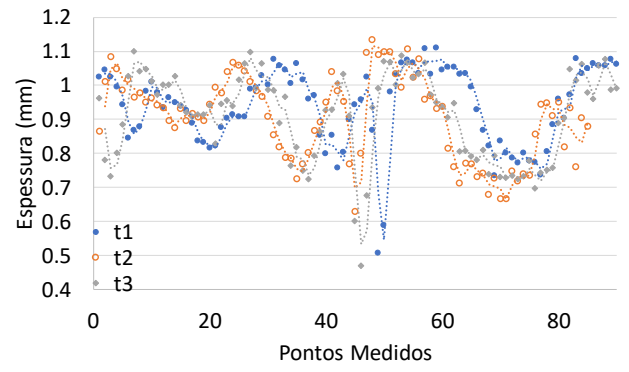
Figura 4.84 Temperatura medida durante o experimento II com máscara 22MnB5 (1mm) QI para os ciclos (a) N=4+9 e (b) N=4+9+5. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.85 apresenta as análises da espessura após os experimentos I e II de forjamento a fim de analisar o comportamento do material e as regiões críticas, conforme apresentado na Figura 4.86.

Através dos resultados pode ser observado que ambas as seções (t1, t2 e t3) apresentaram valores semelhantes entre si com valores entre 0,7 e 1,1mm após o 4º ciclo de forjamento (Figura 4.85a). Enquanto a espessura da máscara após 18 ciclos variou entre 0,5 a 1,1mm, representando uma redução de aproximadamente 33% em relação ao experimento I. Para o experimento II, os resultados das seções analisadas variaram entre si com valores menores para a seção t3 e presença de distorção crítica da parede (R1/R2).

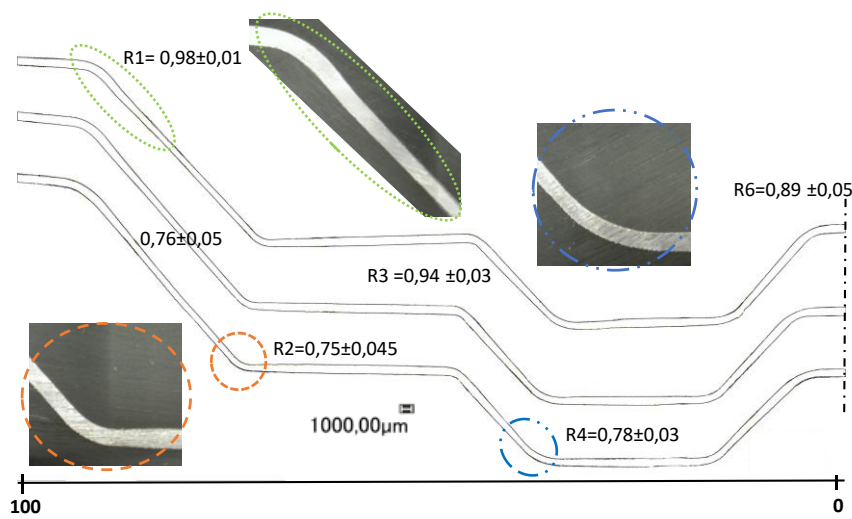


(a)

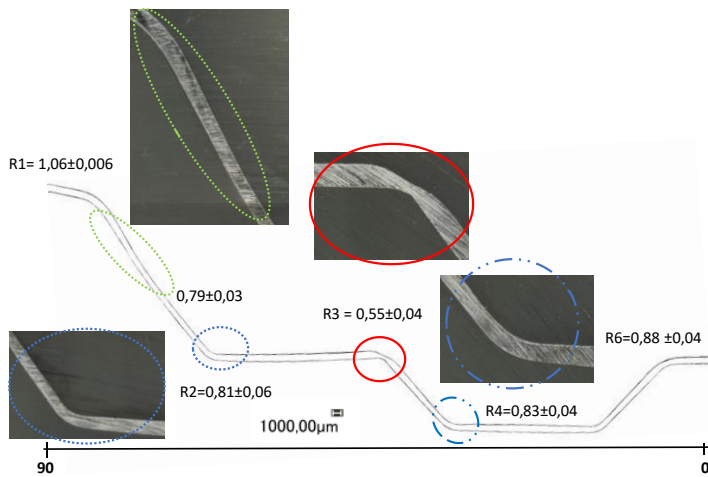


(b)

Figura 4.85 Análise da espessura da máscara 22MnB5 (1mm) QI após experimento (a) I (N4) com microscópio Keyence e (b) II (N18) com micrômetro. Fonte: Elaborado pela autora.



(a)



(b)

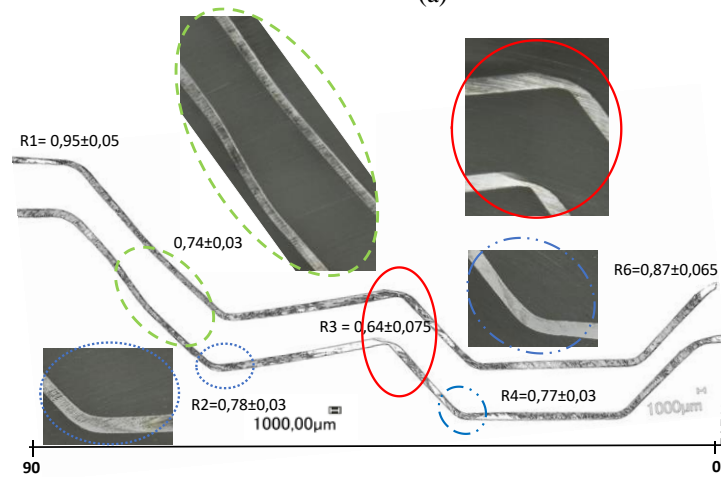


Figura 4.86 Análise das regiões críticas da máscara 22MnB5 (1mm) QI após experimento (a) I e (b) II. Fonte: Elaborado pela autora.

#### 4.4.3.4.3 Máscara 22MnB5 (1 mm) tratado a 800°C

O material 22MnB5(revestido) com 1mm de espessura e tratado a 800°C (QII) apresentou valores de força entre 2,6MN para o experimento I e de 4,2 MN para o experimento II, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 4.87.

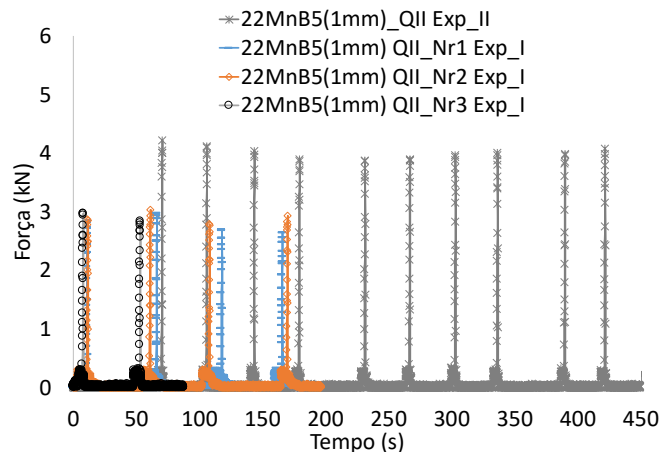


Figura 4.87 Resultado da força durante experimento I e II utilizando máscara 22MnB5 (revestido) temperado a 800°C (QII) com 1 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora.

O tempo de cada etapa do processo para os experimentos I e II está disposto na Figura 4.88, bem como a média total dos ciclos. No experimento I, foram analisadas três amostras (Nr1, Nr2 e Nr3) a fim de garantir a repetibilidade dos resultados, sendo que o tempo médio foi de 6s para a lubrificação, 1,92s para o posicionamento, 7,17s para o forjamento e 3,08 para a extração do produto forjado. Para a análise com maior número de ciclos (experimento II), os resultados médios passaram para 3,82s, 1,64s, 4,45s e 2,91s, respectivamente. Comparando os experimentos, foi possível observar que o tempo médio de contato, ou seja, do posicionamento mais forjamento, reduziu em torno de 33% no experimento II.

A Figura 4.89 mostra os resultados de temperatura medidos dentro da matriz inferior durante o experimento I de forjamento com máscara em aço 22MnB5 (1mm\_QII). Observa-se que a temperatura inicial do experimento foi em torno de 100°C, não ultrapassando 200°C após os 4 ciclos de forjamento. Através das medições com o termopar T a 4 mm da superfície da matriz nota-se que, ao forjar o 4º billet, a amplitude de temperatura tende a estabilizar em 18°C.



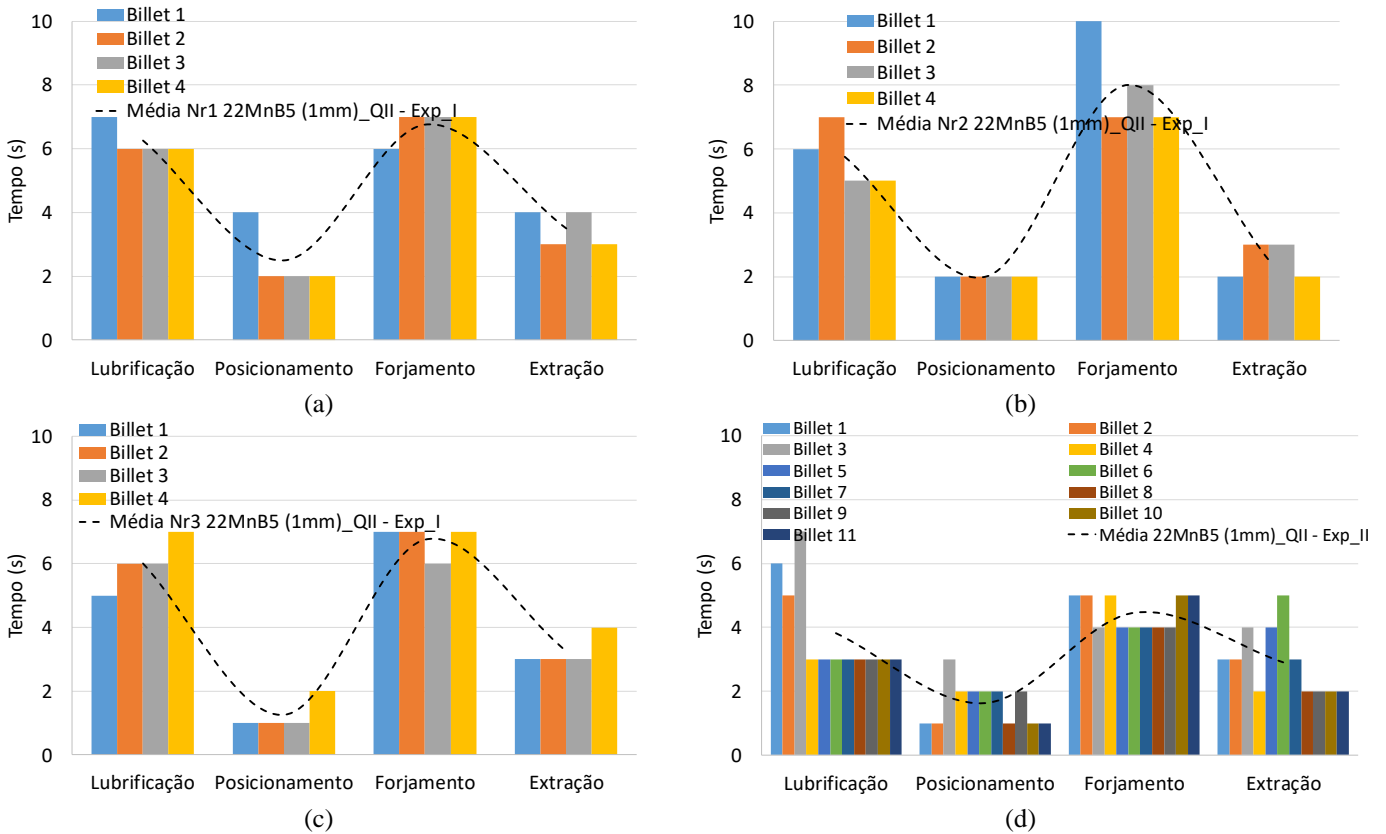


Figura 4.88 Tempo das etapas do ciclo para o experimento I amostras (a) Nr1, (b) Nr2 e (c) Nr3; e (d) para o experimento II utilizando máscara 22MnB5 (1mm) com têmpera a 800 C. Fonte: Elaborado pela autora.

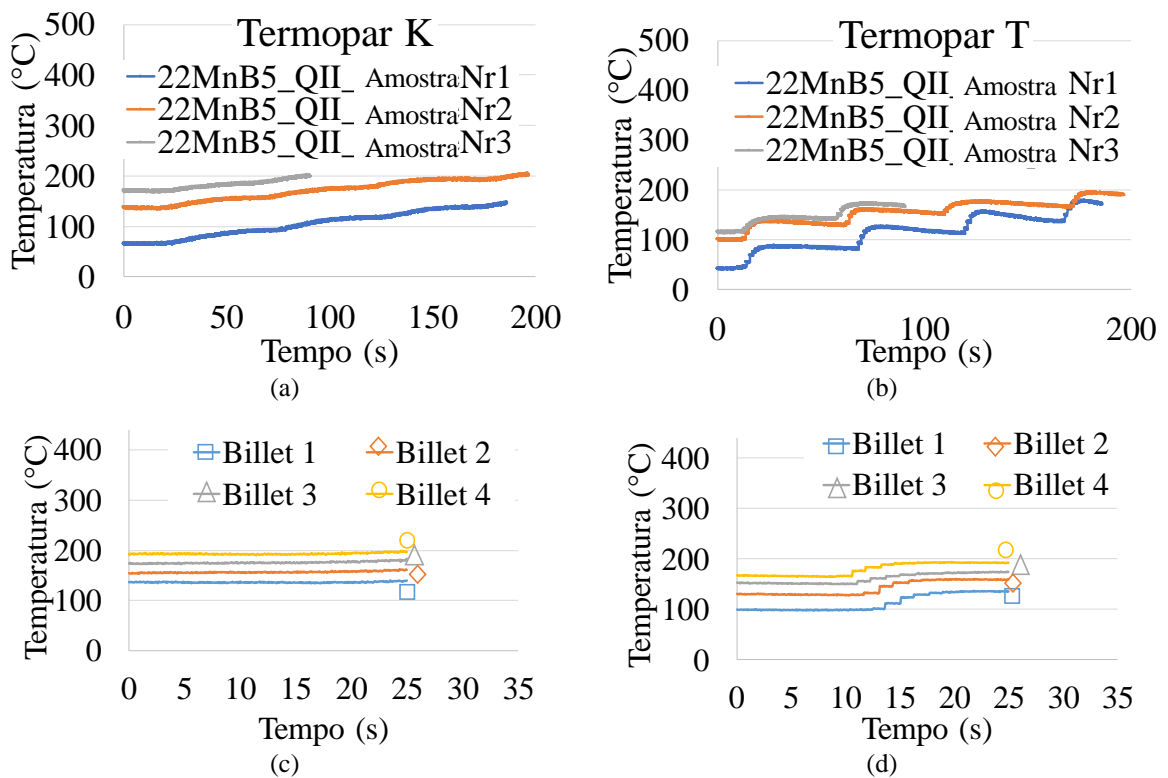


Figura 4.89 Temperatura interna da matriz durante o experimento I com máscara 22MnB5 (1mm) QII. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.90 apresenta o perfil de temperatura interna da matriz e superficial do processo durante o experimento II. Considerando o primeiro e o último (N=11) ciclo de forjamento, a temperatura variou de 296,8 a 422°C no termopar K e, para o termopar T, de 198 a 325,7°C, representando um aumento de 42,2% e 64,5%, respectivamente.

A amplitude de temperatura do termopar K passa de 19 para 12°C a partir do 4º ciclo e então para 5°C a partir do 8º ciclo de forjamento. Enquanto a amplitude para o termopar T passa de 23°C para 12°C a partir do 4º ciclo e então para 5°C a partir do 8º ciclo.

Avaliando a média das linhas, percebe-se que a temperatura superficial da máscara passa de 445°C para 251,5°C após a aplicação do lubrificante, e que a temperatura inicial do billet, ou seja, no momento do seu posicionamento no setup de forjamento, foi em torno de 936,4°C e extraído com 917,8°C. Para este experimento, foi possível observar elevada presença de óxidos com aproximadamente 538,6°C, retardando as trocas térmicas e contribuindo para o aumento da temperatura superficial da máscara.

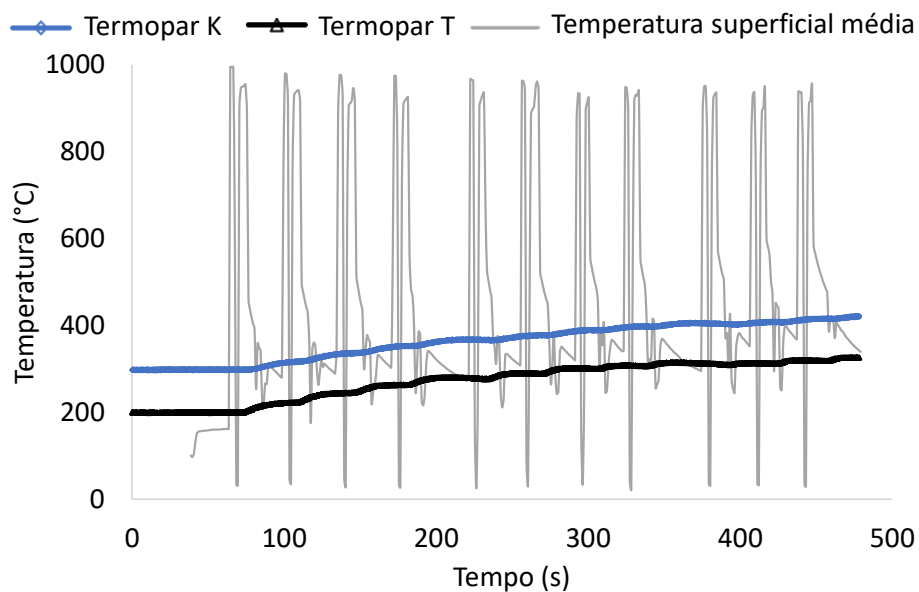


Figura 4.90 Temperatura medida durante o experimento II com máscara 22MnB5 (1mm) QII. Fonte: Elaborado pela autora.

Após a realização dos experimentos, as máscaras foram cortadas para análise de espessura e variações nas regiões críticas. Foi possível observar comportamento semelhante ao material bifásico, com redução significativa na região de raio R3.

#### 4.4.4 Análise da geometria axissimétrica escalonada via simulação numérica

A modelagem através do módulo de operações múltiplas (MO) disponível no software Deform<sup>TM</sup>2D-3D permitiu avaliar os ciclos de forjamento com as operações de transferência e posicionamento do billet, forjamento, extração da peça forjada e lubrificação realizadas experimentalmente.

Conforme apresentado na Figura 4.91, a distribuição da temperatura varia de acordo com a região de maior tempo de contato com o billet. Após um ciclo de forjamento, observa-se que as regiões próximas ao raio R6 e ao raio R3 apresentam os maiores valores de temperatura, tanto da máscara quanto da matriz inferior. A superfície da máscara atinge valores de aproximadamente 590 a 600°C, enquanto a superfície da matriz 355 a 380°C.

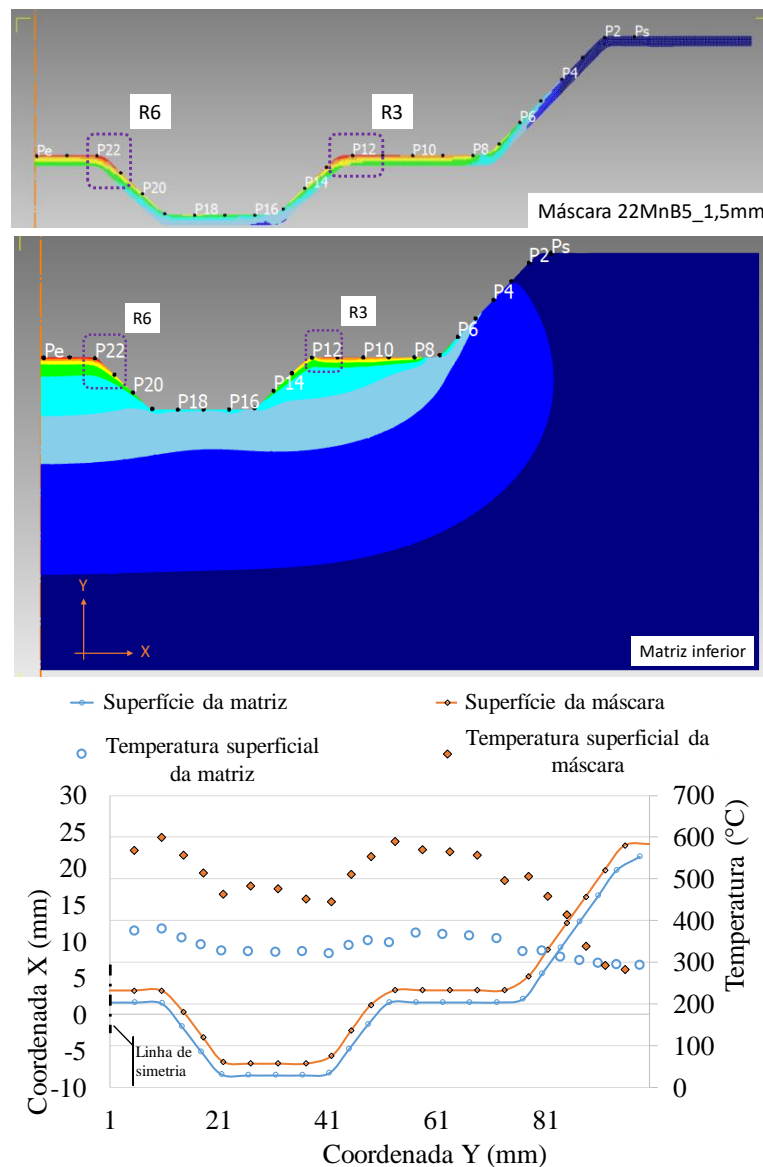


Figura 4.91 Perfil de temperatura superficial com máscara 22MnB5\_1,5mm. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 4.92 apresenta o comportamento da temperatura geral durante cinco ciclos de forjamento para a matriz com e sem a aplicação de máscara, além dos valores de temperatura da máscara 22MnB5 (1,5mm). Observam-se diferenças significativas na temperatura da matriz, com um aumento de 76°C e 342°C com e sem a aplicação de máscara, respectivamente, após o último (5º) ciclo de forjamento. Além disso, a amplitude de temperatura passa de 283°C para 33°C com a aplicação de máscara 22MnB5 com espessura de 1,5mm.

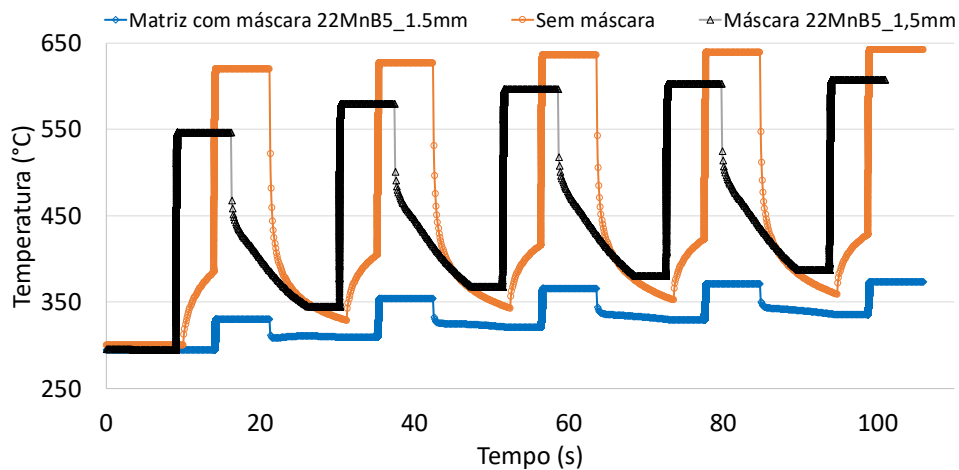


Figura 4.92 Resultado numérico da temperatura geral da matriz com e sem máscara e da máscara 22MnB5 (1,5mm) durante 5 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados foram analisados em pontos internos da matriz e a Figura 4.93 apresenta o perfil da temperatura sem a aplicação de máscara durante os cinco ciclos de forjamento. Observa-se que a amplitude de temperatura no ponto P6 a 1,7mm da superfície da matriz e próxima a região de raio R3 apresenta valor em torno de 97°C para o 5º ciclo de forjamento.

Avaliando o mesmo ponto para a simulação utilizando máscara (22MnB5\_1,5mm), verifica-se que a amplitude para a ser de 11°C, além disso, mesmo após o 8º ciclo de forjamento o ponto P6 atinge um valor máximo de 336°C (Figura 4.94).

Conforme análise inicial, as regiões próximas aos raios R6 e R3 apresentam maior sollicitação termomecânica em função do fluxo do material do billet e tempo de contato. A Figura 4.95 apresenta o perfil de temperatura da matriz para a região do raio R6 durante a simulação de 10 ciclos de forjamento com máscara de revestimento (22MnB5\_1,5 mm). A temperatura medida em pontos a 0,1 mm da superfície da matriz nesta região varia de 325 a 390 °C, com uma amplitude final (N10) de 37,44°C. Avaliando os pontos a 1,5 mm da superfície da matriz, a temperatura reduz para valores entre 298 e 360°C e a amplitude passa para 8°C.

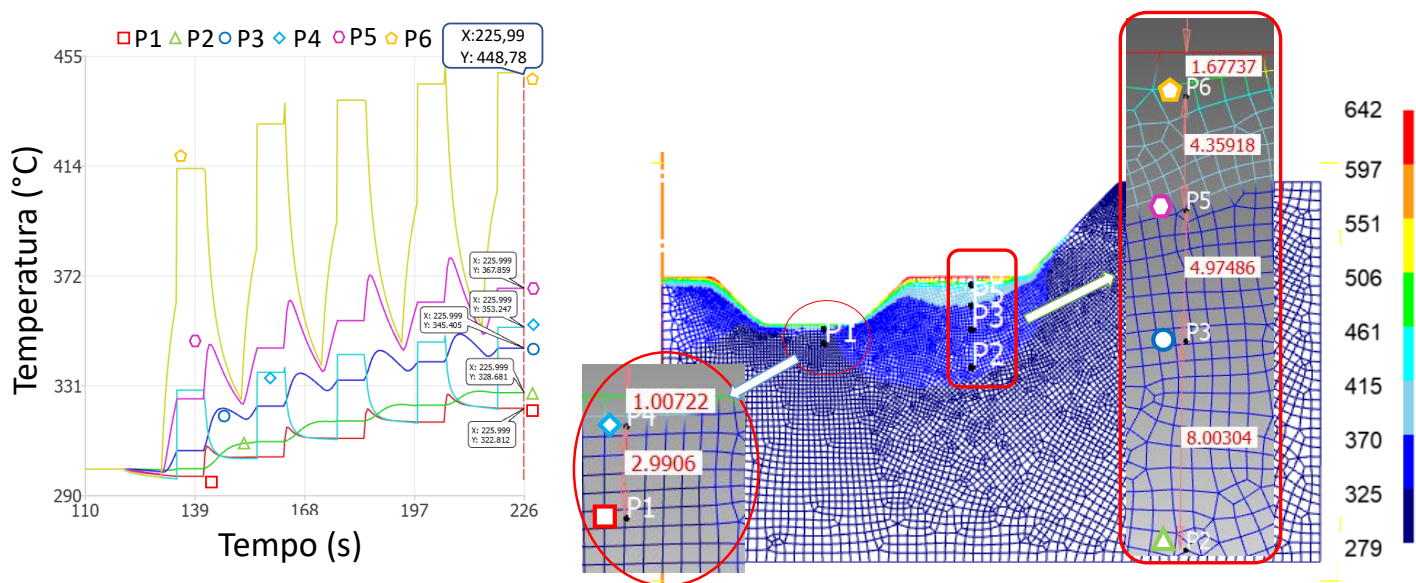


Figura 4.93 Análise da temperatura em pontos dentro da matriz sem aplicação de máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

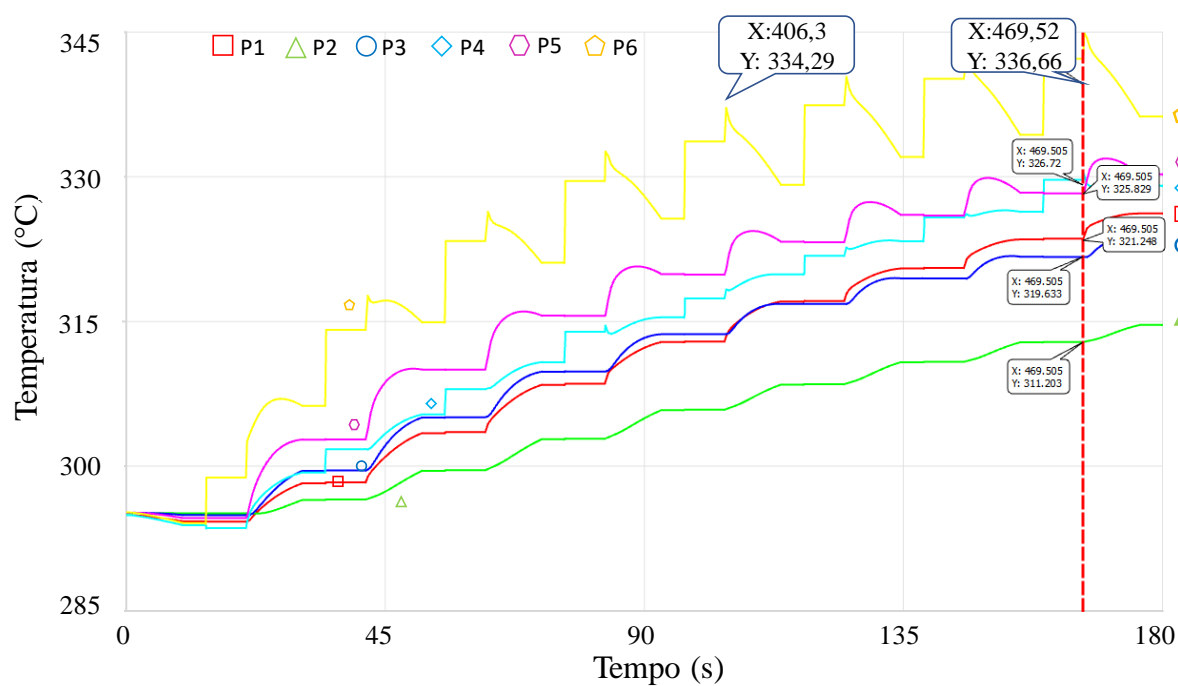


Figura 4.94 Temperatura da matriz durante a simulação com aplicação de máscara (22MnB5\_1,5mm). Fonte: Elaborado pela autora.

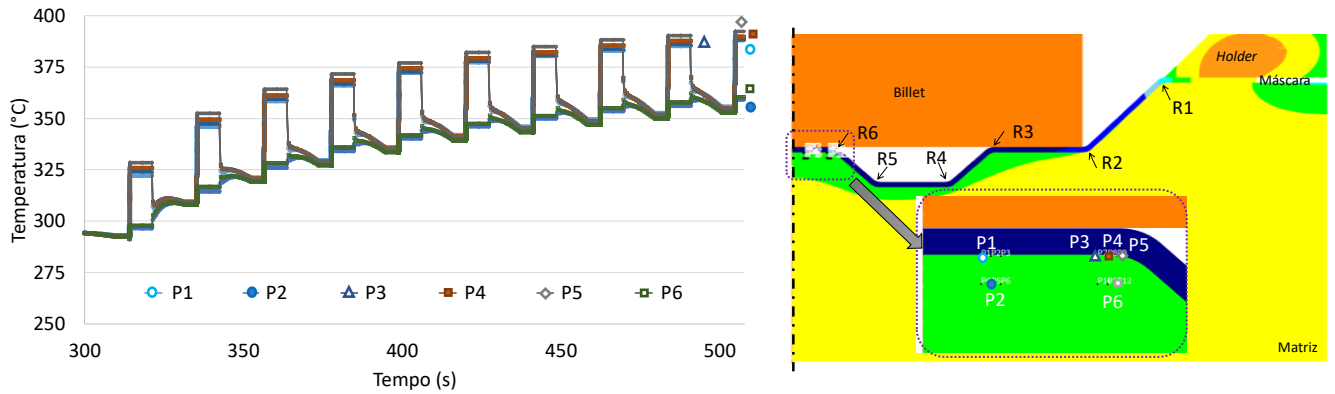


Figura 4.95 Análise da temperatura da matriz na região central e do raio R6 para a simulação utilizando máscara 22MnB5 (1,5mm). Fonte: Elaborado pela autora.

A partir da equação de Archard, foi possível prever as regiões de desgaste através da análise numérica, com e sem a aplicação de máscaras sobre a matriz de forjamento, conforme apresentado nas Figuras Figura 4.97 e Figura 4.97. Estima-se que, com a aplicação de máscaras protetivas, o desgaste da matriz reduza em 98% para as regiões crítica, ou seja próximas aos raios R6 e R3.

$$W = \int K \frac{p^a v^b}{H^c} dt$$

$a = b = 1$   
 $c = 2$   
 $K = 0.00002$

$p =$  pressão de interface  
 $v =$  velocidade de escorregamento  
 $H =$  dureza do material  
 $dt =$  incremento de tempo

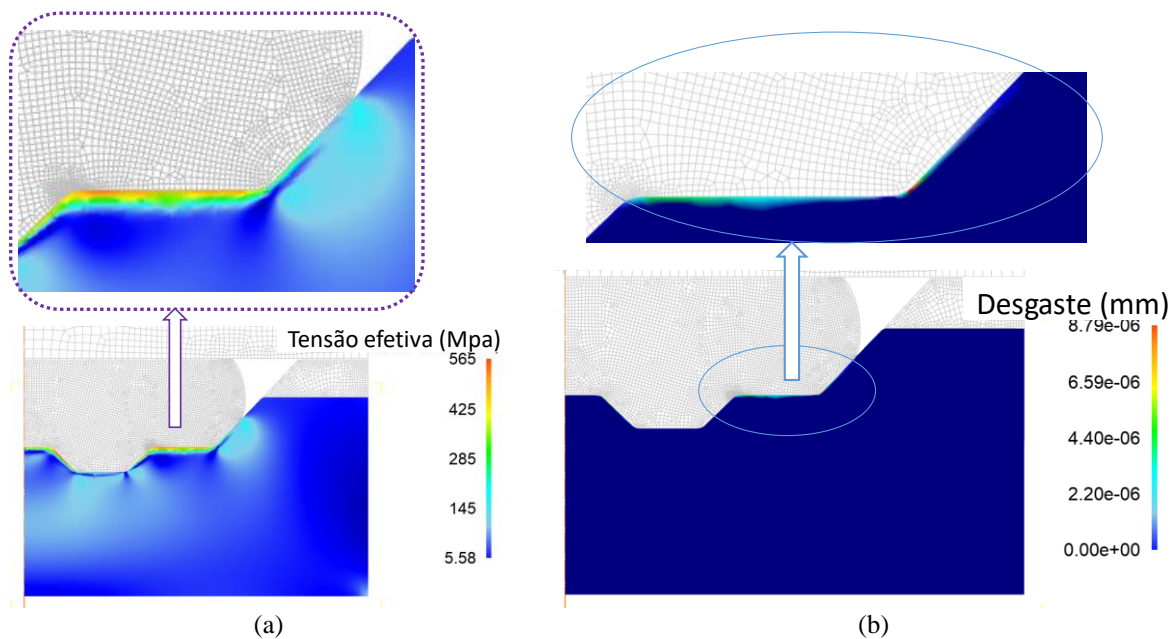


Figura 4.96 Análise da ferramentação através de simulação numérica sem a aplicação de máscara: (a) tensão efetiva e (b) previsão de desgaste. Fonte: Elaborado pela autora.

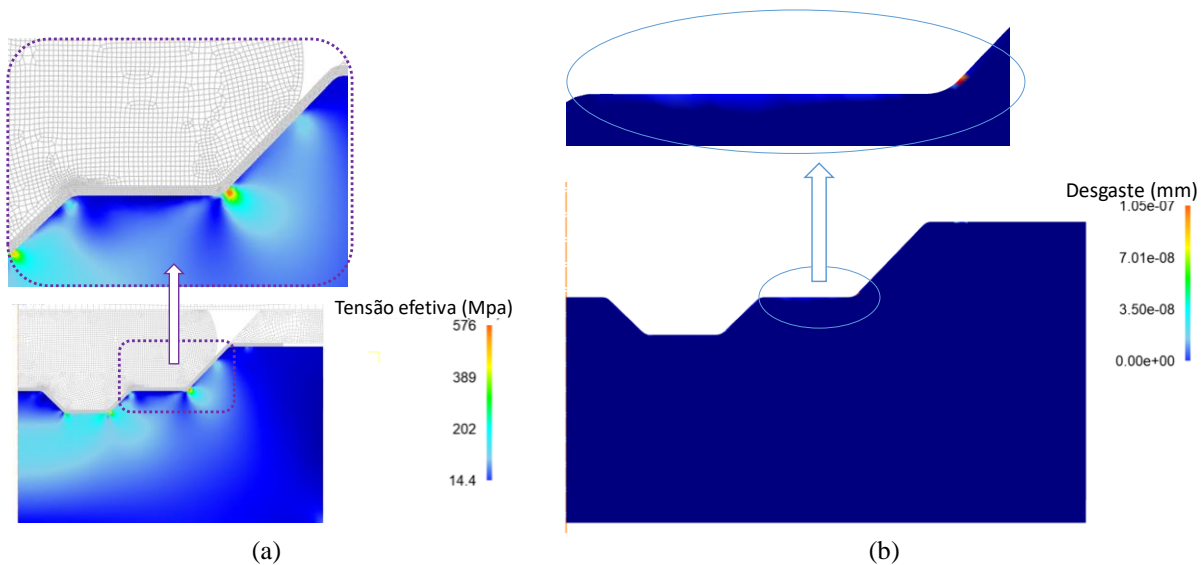


Figura 4.97 Previsão de desgaste na ferramenta através de simulação numérica (a) tensão efetiva e (b) desgaste com utilização de máscara 22MnB5 (1,5 mm). Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados de profundidade do desgaste da superfície da matriz para 20 ciclos de forjamento com aplicação de máscara 22MnB5 (1,5 mm) estão apresentados na Figura 4.98. Pode ser observado que à medida que o número de ciclos aumento, maior a probabilidade de desgaste na ferramenta em torno da região do raio R3, seguida da região R6. Com isso foi possível confirmar que a região R3 apresenta maior solicitação termomecânica, tempo de contato com o billet e maior possibilidade de falhas da máscara.

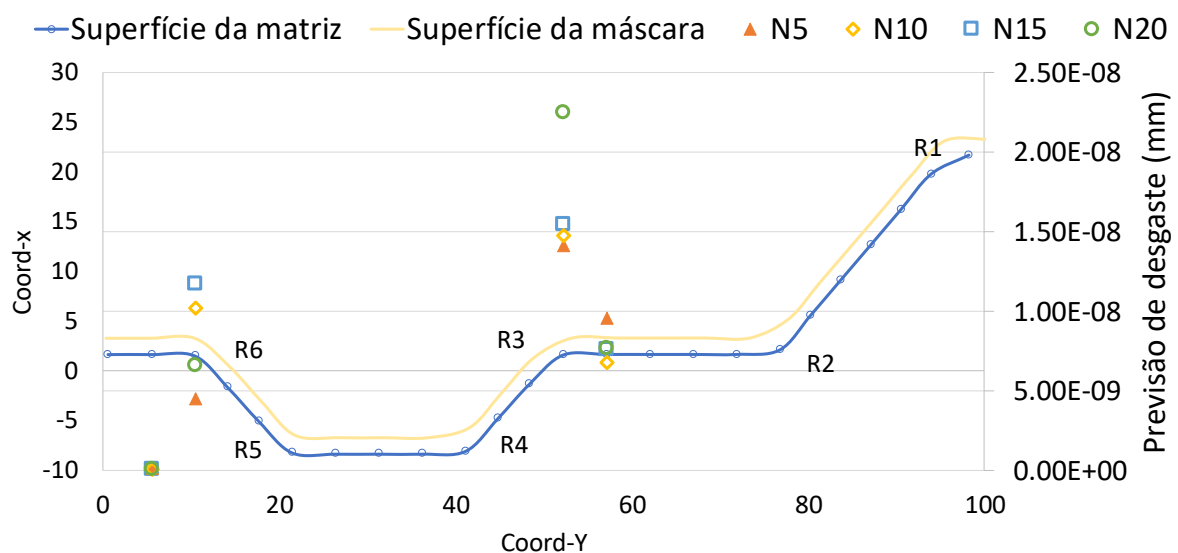


Figura 4.98 Análise das regiões de maior potencial de desgaste para 20 ciclos de forjamento com máscara 22MnB5 (1,5 mm). Fonte: Elaborado pela autora.



## 5 DISCUSSÃO GERAL

---

Através das análises realizadas foi possível observar as características das diferentes classes de materiais, seu comportamento quanto utilizados como máscara protetiva, assim como os principais parâmetros do processo. Foram avaliadas diferentes geometrias e condições via simulação numérica e experimentos, sendo que os principais tópicos são discutidos a seguir.

### 5.1 Comportamento da máscara em aço DP600

Experimentos de forjamento utilizando martelo de queda e máscara de aço *Dual Phase* DP600 indicaram que, mantendo a temperatura da matriz em torno de 150°C, é possível aumentar a dureza do material em torno de 24% após 5 ciclos. A máscara de 1,0 mm de espessura apresentou maior dissipação de calor durante o experimento, o que pode ter causado um efeito de encruamento localizado e conseqüente aumento de dureza.

Através dos experimentos com prensa hidráulica e matriz aquecida a 300°C, foi possível avaliar o processo sem a influência do impacto, onde a aplicação de máscara causou uma redução de 100°C na temperatura da matriz inferior. O experimento realizado com 60% de deformação do billet forjado mostra que a temperatura superficial da máscara varia de 450°C a 740°C, com elevada heterogeneidade na distribuição da temperatura devido à presença de óxidos.

Dentre os materiais analisados, a máscara DP600 apresentou diferenças significativas no perfil de dureza Vickers após 8 ciclos de forjamento em matriz aberta, conforme mostrado na Figura 5.1. Verificou-se que existem variações entre as regiões com e sem contato da máscara com o billet, além de variações comparando as duas espessuras analisadas. Para a máscara de 1,0 mm de espessura (Figura 5.1a), houve um aumento significativo da dureza (85,7%) em relação a dureza nominal e distribuição homogênea entre as regiões com e sem contato. Por outro lado, a máscara de espessura 1,5 mm (Figura 5.1b) apresentou um aumento de 28% em relação a dureza nominal e um comportamento heterogêneo entre as regiões com e sem contato com o billet, apresentando diferença de 61,5HV1.

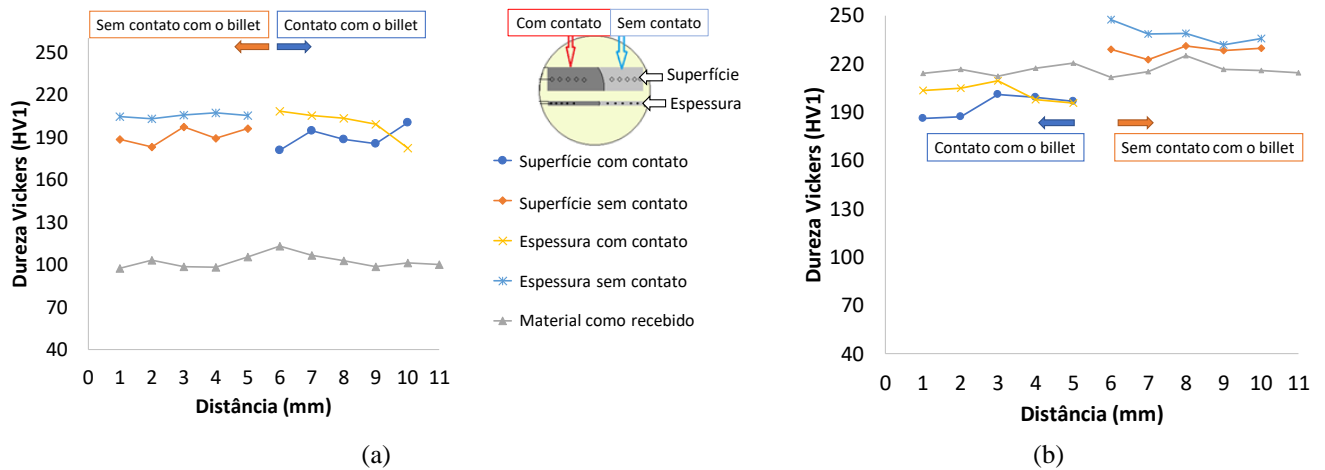


Figura 5.1 Análise do perfil de dureza Vickers depois do ensaio de forjamento (8 ciclos) em matriz aberta com máscara DP600 (a) 1,0 mm e (b) 1,5 mm. Fonte: Elaborado pela autora.

Tais variações podem ser explicadas em função das deformações impostas pelo processo de forjamento, juntamente com o tempo de contato e a temperatura do billet. Ao mesmo tempo em que o centro da máscara suporta elevada sollicitação termomecânica, as extremidades auxiliam na dissipação do calor para o ambiente, causando modificações na microestrutura do material e conseqüente, variação na dureza e resistência.

A Figura 5.2 apresenta os perfis de temperatura e tensão efetiva resultantes da análise numérica do forjamento em matriz aberta com aplicação de máscara DP600 de 1,0 mm de espessura. Observa-se elevada troca térmica sendo que a temperatura superficial da máscara varia de 640°C no 1º ciclo (N1) para 680 °C no 8º (N8), enquanto que a matriz varia de 480°C para 524 °C.

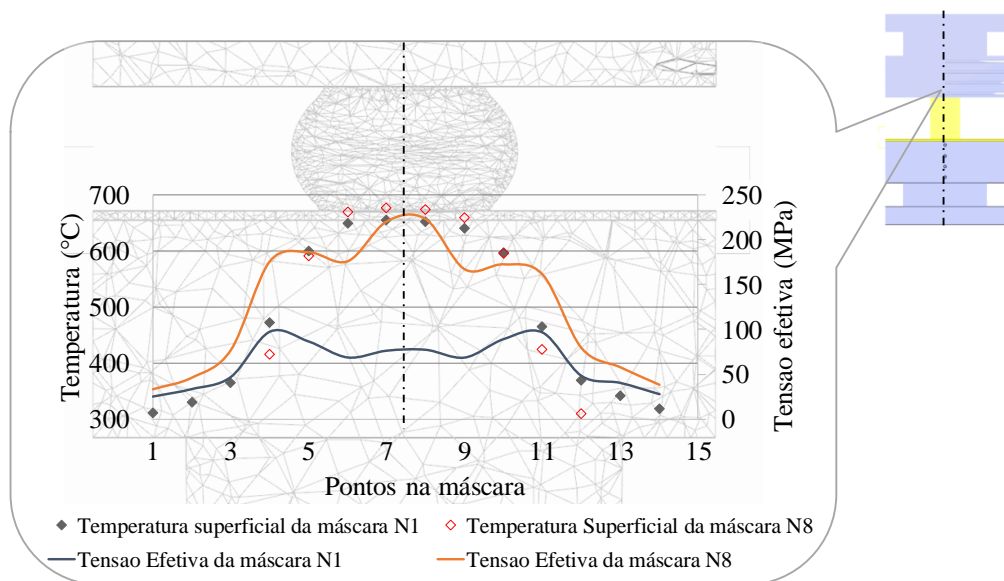


Figura 5.2 Perfis de temperatura e tensão efetiva da máscara DP600 (1,0 mm) após a simulação de N1 e N8 ciclos de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

A máscara DP600 com 1,0 mm de espessura, aplicada sobre matriz fechada de geometria axissimétrica cilíndrica, apresentou falha após o forjamento de apenas 4 peças (conforme apresentado na Figura 4.14), o que pode ser explicado se devido à movimentação durante o processo. Com isso evidenciou-se a necessidade de fixação da máscara para manter seu posicionamento durante o processo. Para este caso foi observado ainda a influência dos ângulos de saída da ferramenta de forjamento, quanto maior o ângulo de abertura menor a probabilidade de agarramento da máscara ao billet, ou seja, maior a facilidade de realizar a operação de extração do produto forjado.

Utilizou-se da simulação numérica computacional para aprofundar a análise da aplicação do aço DP600 como máscara de geometria simples. Esta análise mostrou que, ao final de um ciclo de forjamento, a temperatura da máscara atinge um máximo de 610°C na superfície (superior) em contato com o billet, e um máximo de 537°C na superfície (inferior) em contato com a matriz de forjamento. Avaliando-se o comportamento do conjunto durante um ciclo, pode ser observado que, antes do preenchimento total da matriz inferior, o fluxo do billet tende a forçar o deslocamento da máscara na direção Z (conforme Figura 4.15), bem como a aumentar as tensões próximas aos raios. Assim, o fluxo do material, juntamente com as solicitações termomecânicas podem causar dobramento da máscara na região do raio superior e redução na espessura na região inferior, conforme evidenciado nos experimentos.

O experimento com geometria cilíndrica (copo) comprovou a importância dos fatores de influência do processo, como profundidade e ângulos de saída, assim como a necessidade da utilização de um equipamento de fixação da chapa. Ao analisar os resultados de dureza apresentados na Figura 5.3, pode ser observado que o comportamento difere da análise com geometria plana. Para este caso, verifica-se uma redução de dureza em torno de 32,6% para o fundo do copo e de 51% para as extremidades. Com isso, indica-se a geometria com um fator de influência no desempenho da máscara em aço DP600.

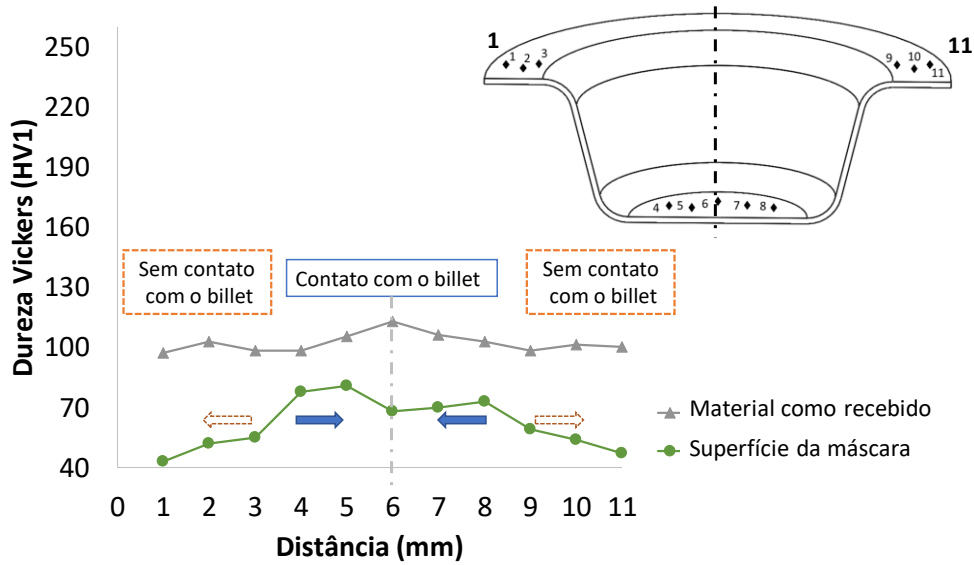


Figura 5.3 Análise de dureza Vickers após ensaio de forjamento (4 ciclos) em matriz fechada de geometria simples com máscara DP600 de 1,0 mm de espessura. Fonte: Elaborado pela autora.

Portanto, as diferenças de temperatura em regiões da máscara (como fundo do copo e parede) causam heterogeneidades de microestrutura e resistência, aumentando a tensão em pontos específicos e, conseqüentemente potencializando o aparecimento de falhas. Assim como a direção do fluxo do material do billet durante o forjamento, que tende a forçar a máscara para fora da matriz aumentando as tensões nas extremidades (Figura 5.4a).

Conforme apresentado por Rosenstock et al (2015) e Yu et al (2016), observa-se que a variação do sentido ou direção do fluxo do material do billet pode causar o aparecimento de dobras e redução da espessura da máscara durante o forjamento (Figura 5.4b). Os autores apontam ainda que a tensão da máscara varia em função do atrito e comprimento de contato com o billet, conforme equação a seguir.

$$\sigma_z = \frac{1}{b \cdot s} \cdot (\mu_{bc} - \mu_{cd}) \cdot \sigma_n \cdot b \cdot l$$

$$\approx \frac{l}{s} \cdot (\mu_{bc} - \mu_{cd}) \cdot k_{fb}$$

$$\sigma_b = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} \quad \sigma_b \approx \frac{l_1}{s_1} \cdot (\mu_{bc} - \mu_{cd}) \cdot k_{fb}(T_1) + \frac{l_2}{s_2} \cdot (\mu_{bc} - \mu_{cd}) \cdot k_{fb}(T_2)$$

$$\sigma_b \geq k_{fc}(T_b)$$

---

$\sigma_z$  = tensão de tração na região de primeiro contato  
 $b$  = largura da matriz  
 $s$  = espessura da máscara  
 $\mu_{bc}$  = coef. de atrito entre billet e máscara  
 $\mu_{cd}$  = coef. de atrito entre máscara e matriz  
 $\sigma_n$  = tensão normal da região de contato  
 $l$  = comprimento da região de contato  
 $k_{fb}$  = tensão de escoamento do billet  
 $k_{fc}$  = tensão de escoamento da máscara

---

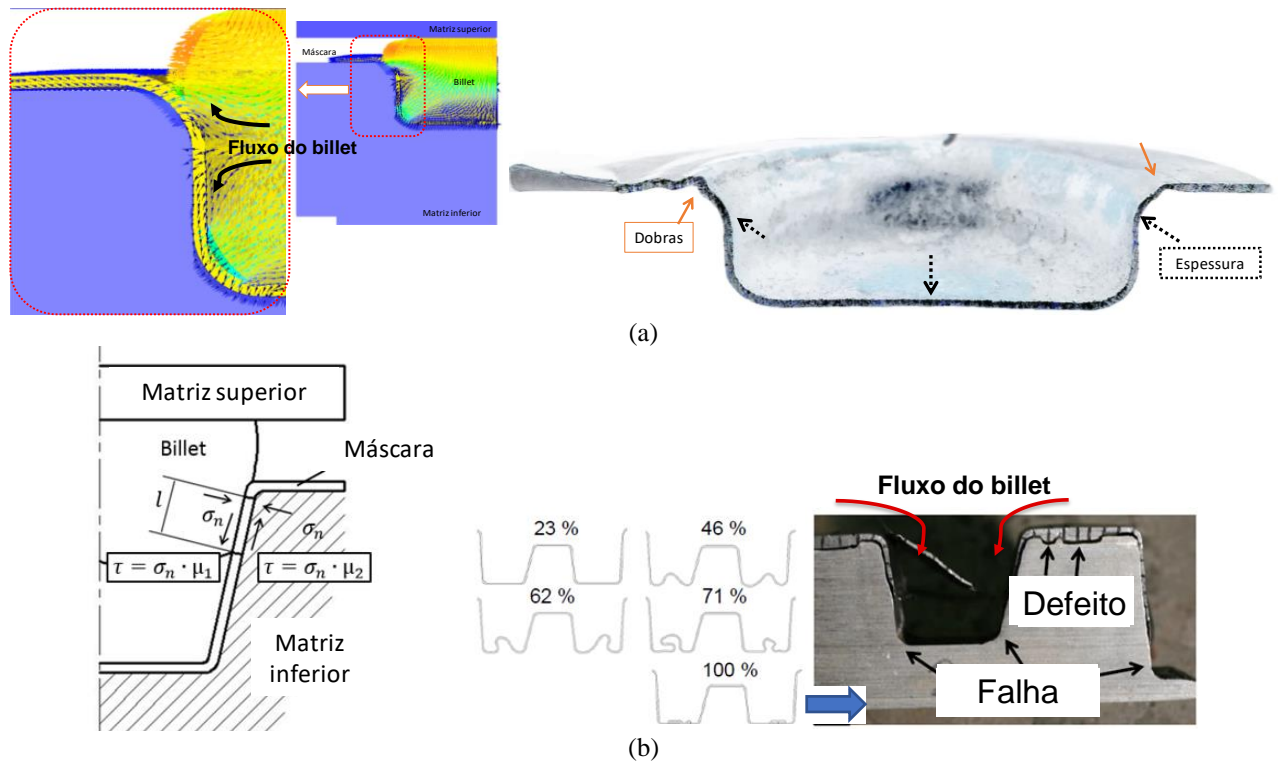


Figura 5.4 Influência da direção do fluxo do billet (a) geometria copo máscara DP600 (Fonte: Elaborado pela autora.) e (b) geometria simples máscara DC04 (Fonte: adaptado de Rosenstock et al, 2015 e Yu et al,2016).

Estudo realizado por Ivaniski (2017) apresentou o comportamento do aço DP600 submetido a ciclos térmicos entre 200 a 600°C, onde foi possível verificar uma redução da dureza e da tensão do material a partir de 400°C (Figura 5.5). Com isso, no presente trabalho evidenciou-se a necessidade de avaliar o comportamento das chapas através de ensaios de tração em diferentes temperaturas. Conforme apresentado na Figura 5.6(a), a máxima tensão a 700°C não ultrapassa 294 MPa para o aço rápido M2 e chega a 85 MPa para o aço DC04. Observou-se que os resultados de tensão reduzem entre 67 a 85 % quando comparados com o ensaio em temperatura ambiente (~20°C), conforme apresentado na Figura 5.6b.

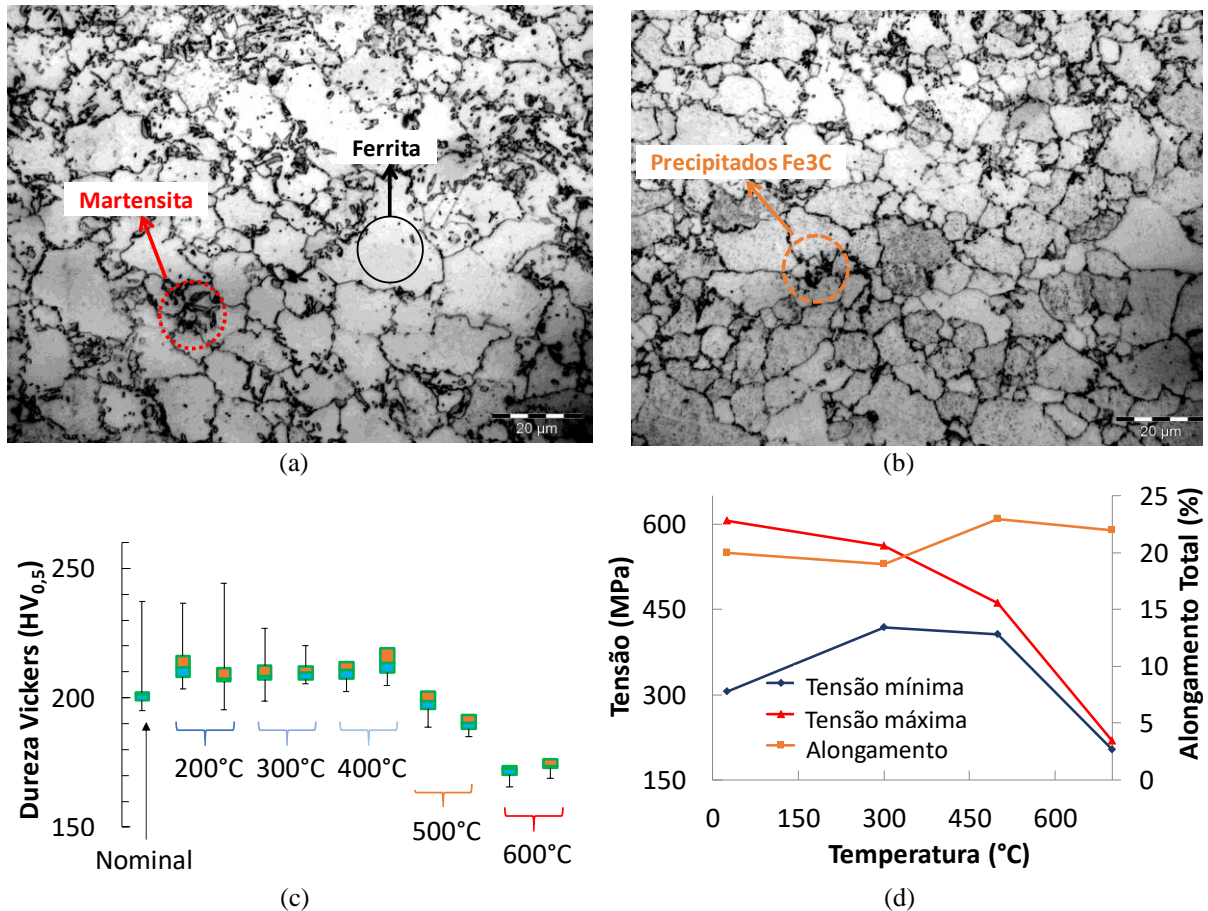


Figura 5.5 Microestrutura do material DP600 (a) como recebido e (b) aquecido a 600°C por 900s; (c) perfil de dureza com e sem lubrificação em diferentes temperaturas e (d) perfil de tensão e alongamento em função da temperatura (adaptado de Ivaniski, 2017).

## 5.2 Resistência mecânica da máscara vs. parâmetros do processo de forjamento

Por apresentarem elevada resistência mecânica, a aplicação dos materiais de aço M2 e Hardox450® possivelmente exigirão um processo de conformação mais complexo, com restrições de geometria, o que poderá elevar o custo final do processo.

A Figura 5.6(a) apresenta a máxima tensão limite de escoamento (LE) em função da temperatura e, na Figura 5.6 (b) pode ser observada a porcentagem de redução da resistência do material em função dos ensaios em temperatura ambiente (20°C).

O comportamento dos materiais 22MnB5 (revestido) e DP600 foi similar para as temperaturas analisadas no ensaio de tração, com redução em torno de 10% a 300°C e menor que 30% a 500°C. Apesar da queda de tensão quando ensaiados a 700°C, as chapas de material 22MnB5 (revestido) e DP600 apresentaram a menor redução dentre os materiais analisados, caracterizados assim com potencial de aplicação como máscaras.

Os resultados de tensão demonstram que a temperatura de 700°C pode ser considerada crítica, para ambos os materiais analisados com potencial de aplicação como máscara. Portanto, a geometria da ferramenta deve ser projetada de maneira a auxiliar nas trocas térmicas e garantir temperaturas menores.

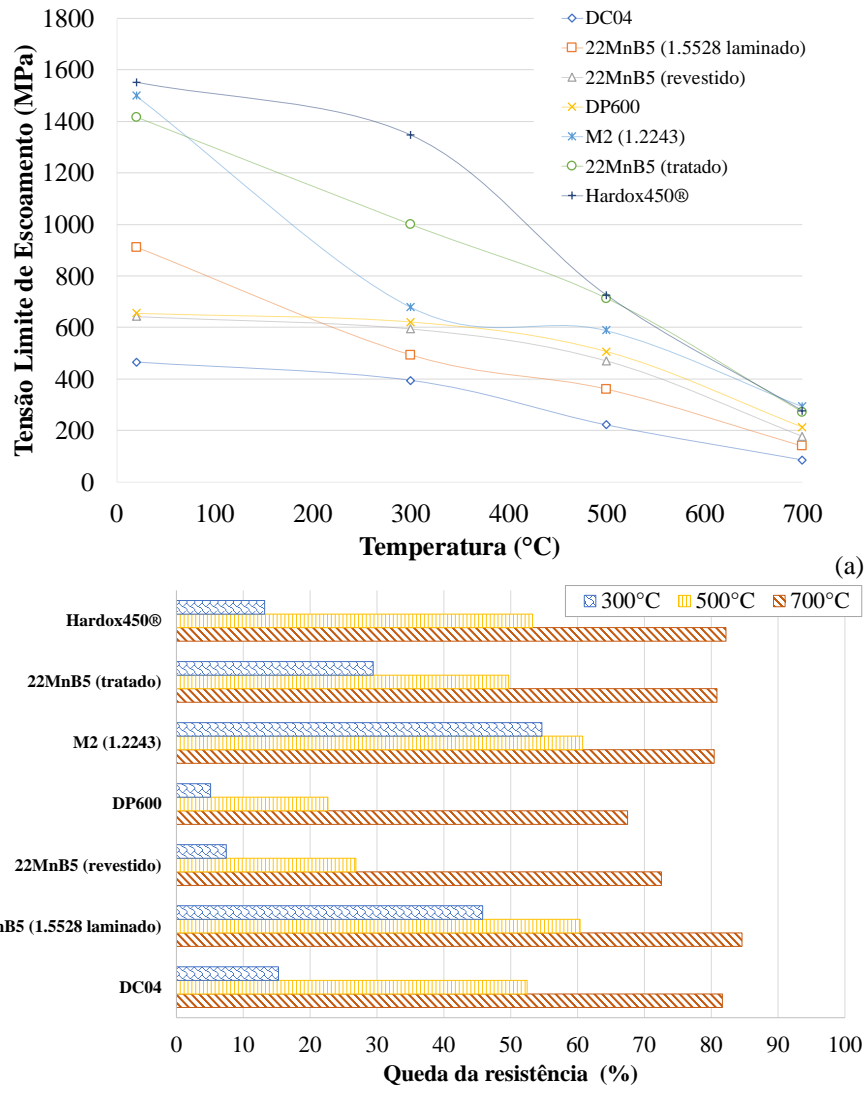


Figura 5.6 (a) Máxima tensão limite de escoamento (LE) em função da temperatura e (b) Porcentagem de redução da resistência do material em função dos ensaios em temperatura ambiente (20°C). Fonte: Elaborado pela autora.

Da mesma maneira, através da análise numérica foi possível observar que a temperatura e o tempo de maior solitação térmica, ou seja, o tempo e região de contato da máscara com o billet depende diretamente da geometria avaliada (Tabela 5.1). Além disso, observando as faixas de força e tensão pode ser verificada uma variação de 250 (kN) e 280 (MPa) entre as



matrizes plana e de geometria axissimétrica simples, o que irá influenciar diretamente no número de ciclos ou performance das máscaras.

Apesar do modelo numérico considerar apenas as etapas de transferência do billet e forjamento, foi possível identificar a influência do ângulo de saída e profundidade da matriz no carregamento termomecânico, sendo possível atingir uma diferença de 110 kN e 50°C da geometria cilíndrica para a cônica. Estas análises numéricas com geometria axial simétrica simples demonstram, para ambos os casos, uma redução de temperatura na matriz inferior em torno de 200°C.

Tabela 5.1 Parâmetros de acordo com a geometria analisada.

<i>Geometria da matriz de forjamento</i>	<i>Força máxima (kN)</i>	<i>Tempo de contato (s)</i>	<i>Região de contato (mm)</i>	<i>Superfície da máscara (°C)</i>	<i>Tensão efetiva (MPa)</i>
<i>Plana</i>	300 a 340	6 a 8	25 a 30	250 a 650/740	190 a 340
<i>Cilíndrica</i>	200 a 260	6 a 10	35 a 62,5	300 a 600/650	590 a 620
<i>Cônica</i>	80 a 90	5 a 10	30 a 55	280 a 610/800	540 a 620

*Fonte: Elaborado pela autora.*

### **5.3 Estratégia de conformação da máscara**

Por outro lado, a estratégia de fabricação das máscaras deve ser avaliada em função da geometria da ferramenta de forjamento, juntamente com as propriedades do material. Os resultados desta tese demonstram que quanto maior a acurácia do processo de conformação, maior a durabilidade do material aplicado como máscara no processo de forjamento. Comparando-se os processos de estampagem profunda, estampagem incremental e conformação direta no setup de forjamento, verifica-se a necessidade de controle dos parâmetros e influência na performance final da máscara.

Os resultados numéricos para a estampagem profunda em matriz cônica evidenciaram variações na distribuição da espessura, com redução de aproximadamente 33% na parede do copo. Assim, a conformação pode ser realizada diretamente no setup de forjamento, auxiliando na redução dos custos finais de processo, porém a heterogeneidade da espessura pode caracterizar um enfraquecimento de certas regiões, levando a falhas ou deformações da peça forjada. Além disso, a variação na espessura da máscara irá afetar as dimensões do produto forjado, ou seja, está diretamente ligada as tolerâncias admissíveis do produto.

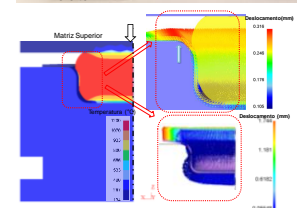
O processo de estampagem profunda requer um equipamento complexo, com dimensões do punção dependentes da espessura da chapa e maior probabilidade do aparecimento de falhas, como dobras, além de variações da espessura final nos raios e centro da máscara.

Em contrapartida, o processo de estampagem incremental pode ser realizado para diferentes geometrias em um equipamento mais simples, como por exemplo em um torno

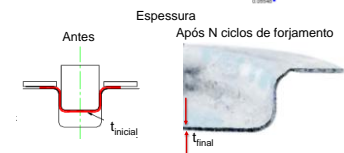
(CNC) com ferramenta de ponta esférica. Apesar da necessidade do controle dos parâmetros, este processo de estampagem é indicado pelo baixo retorno elástico da máscara em função da deformação que é aplicada de forma gradual e localizada.

Com isso, através das análises realizadas foi possível identificar os seguintes parâmetros como relevantes na utilização do método de aplicação de máscaras como proteção de ferramentas, tanto no que tange a conformação da máscara, quanto à sua aplicação no processo de forjamento:

1. **Movimento relativo entre a máscara e a matriz** – para evitar a falha prematura da máscara torna-se imprescindível a fixação da mesma sobre a matriz de forjamento de maneira tal que a pressão seja suficiente, para evitar a movimentação da máscara durante o forjamento.

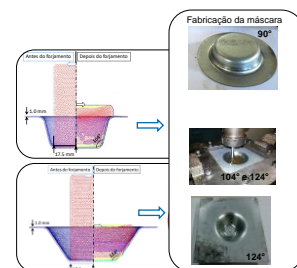


2. **Tolerâncias dimensionais** – A espessura e resistência da máscara irão influenciar na geometria final do forjado, por isso deve-se considerar uma tolerância geométrica adequada.

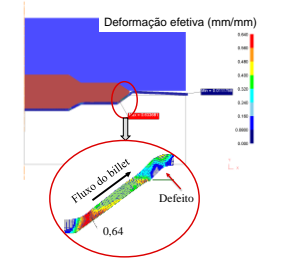


- A espessura e resistência da máscara irão influenciar na geometria final do forjado, por isso deve-se considerar uma tolerância geométrica adequada

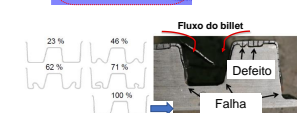
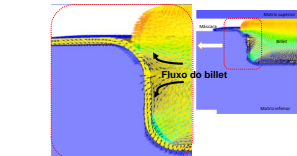
3. **Geometria** – a matriz de forjamento deve conter ângulos de saída que auxiliem na retirada do produto forjado, bem como na fabricação da máscara de revestimento. Ângulos muito fechados (90°) tendem a dificultar o processo de conformação por estampagem incremental em um equipamento CNC simples ou com restrição de movimento, por exemplo, além de impossibilitar a extração do produto forjado de maneira adequada.



4. **Rebarba** – as análises realizadas neste trabalho consideraram um processo de forjamento com geometria de precisão (*near-net-shape*) ou flash-less a fim de eliminar o canal de rebarba. Por se tratar de um dos pontos de maior solicitação termomecânica e, por coincidir com as extremidade da máscara no posicionamento de fixação, processos com rebarba devem ser evitados, pois podem tornar a aplicação de máscaras metálicas como revestimento de matrizes inviável



5. **Fluxo do material a ser forjado** – o escorregamento da máscara é dependente da força do processo, da resistência do material e da direção do fluxo do billet em função das solicitações do processo (elevada fadiga térmica, maior tempo de contato, alta pressão e carregamento)



#### 5.4 Geometria axissimétrica escalonada

A partir dos resultados obtidos, uma geometria axissimétrica foi desenvolvida para a fabricação de blocos de engrenagens. Com isso, foi possível investigar a aplicabilidade do método de máscaras metálicas na fabricação de peças em torno de 7kg, com geometria um pouco mais complexa que as iniciais. Conforme discutido anteriormente, observou-se a necessidade do controle do processo de fabricação, a fim de garantir a uniformidade da espessura e prevenir falhas prematuras da máscara. Além disso, a precisão do posicionamento do billet e o tempo de contato entre billet e máscara, são fatores importantes que influenciam no número de ciclos máximo ou performance da máscara.

Foram identificadas diferenças de força média e temperatura entre os experimentos realizados com e sem a aplicação de máscara protetiva, variando de acordo com o material da máscara utilizada. Tais variações podem ser explicadas devido à presença de óxidos, heterogeneidade da espessura, revestimento superficial e material da máscara, além da temperatura do billet no momento da operação de forjamento.

A Figura 5.7 apresenta a média da força nos experimentos I e II sem e com a aplicação de máscara. Pode ser verificada uma variação entre 2,8 a 5,0 MN, sendo que a utilização da chapa 22MnB5 de 1,0 mm de espessura e tratamento térmico a 800°C resultou na menor força de forjamento. Dentre os materiais avaliados (DP600, DC04 e 22MnB5 em diferentes condições), o DC04 apresentou menor resistência mecânica com redução significativa da espessura já nos primeiros 4 ciclos de forjamento e, por isso, foi descartado.

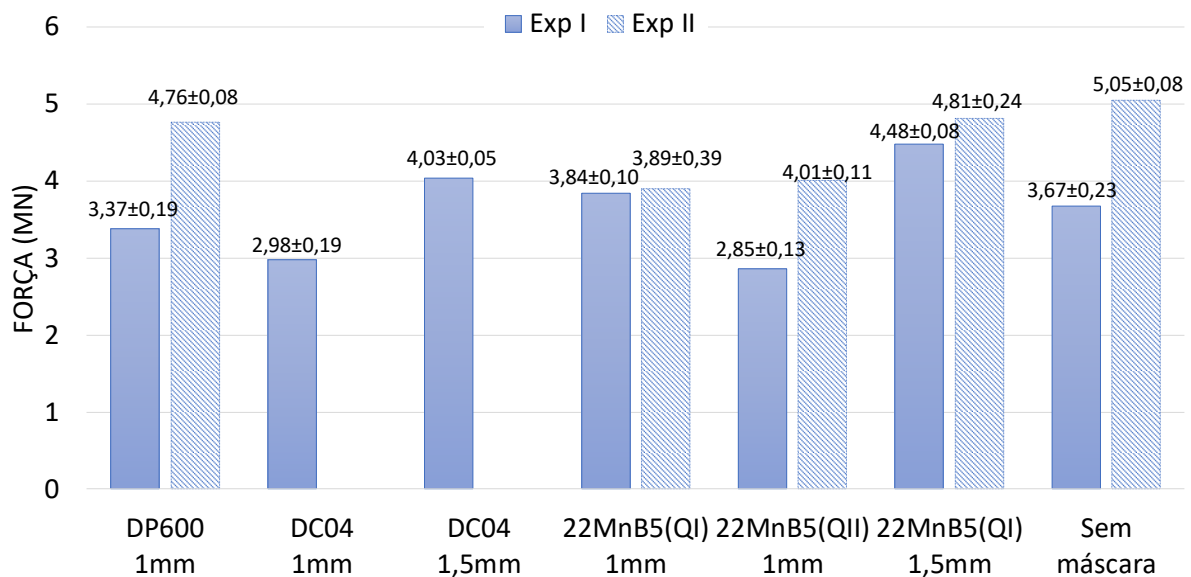


Figura 5.7 Resultado da média das forças do experimento I e II de forjamento. Fonte: Elaborado pela autora.

A temperatura do billet é um fator importante no processo, sendo influenciada pela troca térmica com o ambiente e tempo de transferência até o setup de forjamento. A média dos valores de temperatura do billet antes do processo de forjamento está apresentada na Figura 5.8. Para os experimentos utilizando máscara 22MnB5 com 1,0 e 1,5 mm de espessura pode ser observado que a temperatura do billet foi de 5 a 7% maior que para os experimentos sem a aplicação de máscara.

Apesar das diferenças de temperatura do experimento, a máscara agiu como proteção da matriz inferior de forjamento reduzindo a temperatura interna e o gradiente responsável pela fadiga térmica. Aplicando-se máscaras de 22MnB5 com 1,0 e 1,5mm de espessura foi possível reduzir a temperatura interna da matriz de 18 a 23%, respectivamente, em relação ao experimento sem a aplicação de máscara.

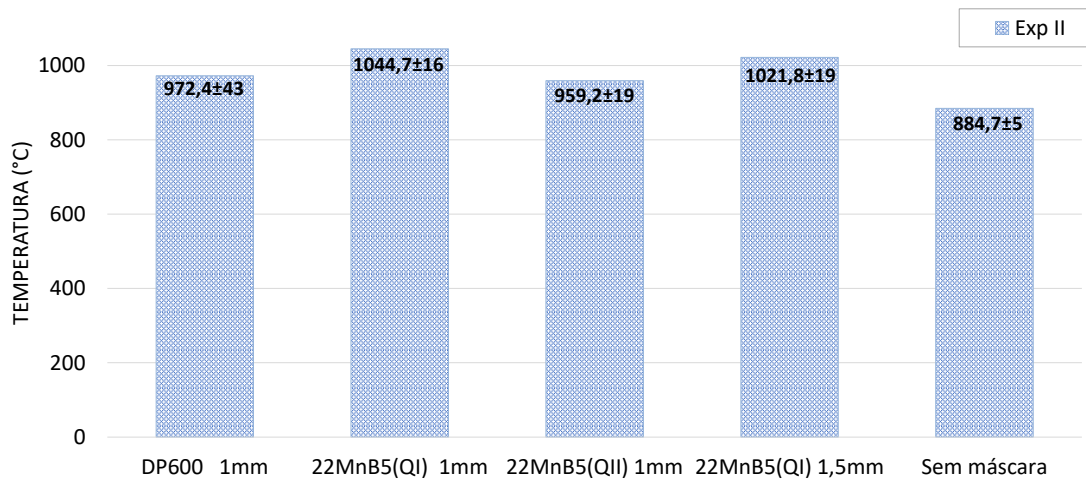


Figura 5.8 Temperatura média do billet antes da operação de forjamento com e sem aplicação de máscara. Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme pode ser observado nos perfis apresentados na Figura 5.9, as diferenças de temperatura do billet influenciaram nas variações da temperatura superficial do conjunto (Figura 5.9a) e na temperatura interna da matriz (Figura 5.9b) durante o processo.

Apesar de iniciar o experimento com temperaturas diferentes, para ambas as análises o termopar (K) posicionado a 19 mm da superfície apresentou um aumento de 50 °C quando comparadas a primeira com a última peça forjada. Por outro lado, o termopar (T) posicionado a 4 mm da superfície da matriz, apresentou um aumento de 100°C para o experimento I e 80°C para o experimento II, o que pode ser atribuído as diferenças de tempo de contato entre os experimentos, em função do posicionamento e extração manual.

Comparando estes resultados com os resultados observados nos mesmos pontos para os experimentos com a aplicação da máscara é possível comprovar o efeito de proteção não apenas

da superfície da matriz inferior, mas também pelo fato de observar-se uma distribuição mais homogênea da temperatura interna da matriz de forjamento.

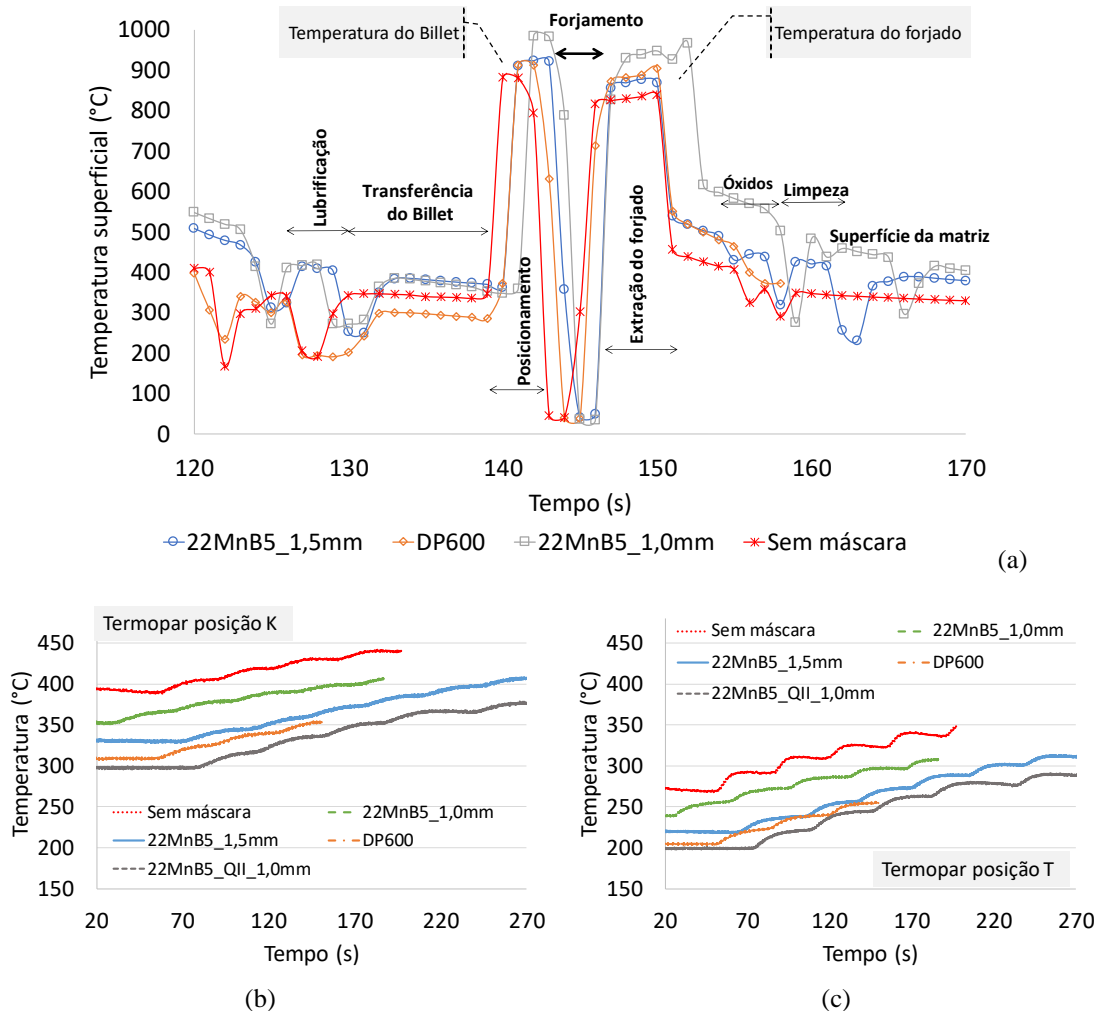


Figura 5.9 Temperatura durante o experimento II de forjamento: (a) média das linhas na superfície do setup de forjamento para o último ciclo e temperatura interna termopar (b) posição K e (c) posição T. Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 5.10 apresenta os valores da espessura nas principais regiões da máscara de aço 22MnB5 (1,0 e 1,5mm) e DP600 (1,0mm) para as condições iniciais, ou seja, após a estampagem, comparadas com as espessuras após 4 e 18 ciclos de forjamento.

Conforme apresentado na Figura 5.10(a), foi possível verificar diferenças de 6 a 15% entre as seções t1, t2 e t3 (conforme apresentado na Figura 4.50a) da espessura da máscara 22MnB5\_1,5mm analisadas após a fabricação, sendo a espessura máxima igual a 1,4 mm e a espessura mínima 0,8mm. Após a realização de 4 ciclos de forjamento (experimento I) e, considerando as diferenças de espessura provenientes da fabricação da máscara, foram observadas variações entre 2,2 e 8,5%, sendo 0,87 mm o valor mínimo e 1,38 mm o valor

máximo da espessura após 4 ciclos de forjamento. Para o experimento II, após 18 ciclos as variações foram de 0,7 a 1,3 mm. Sendo que, para esta condição, a seção t3 apresentou valores críticos para o raio R3 em torno de 0,23mm.

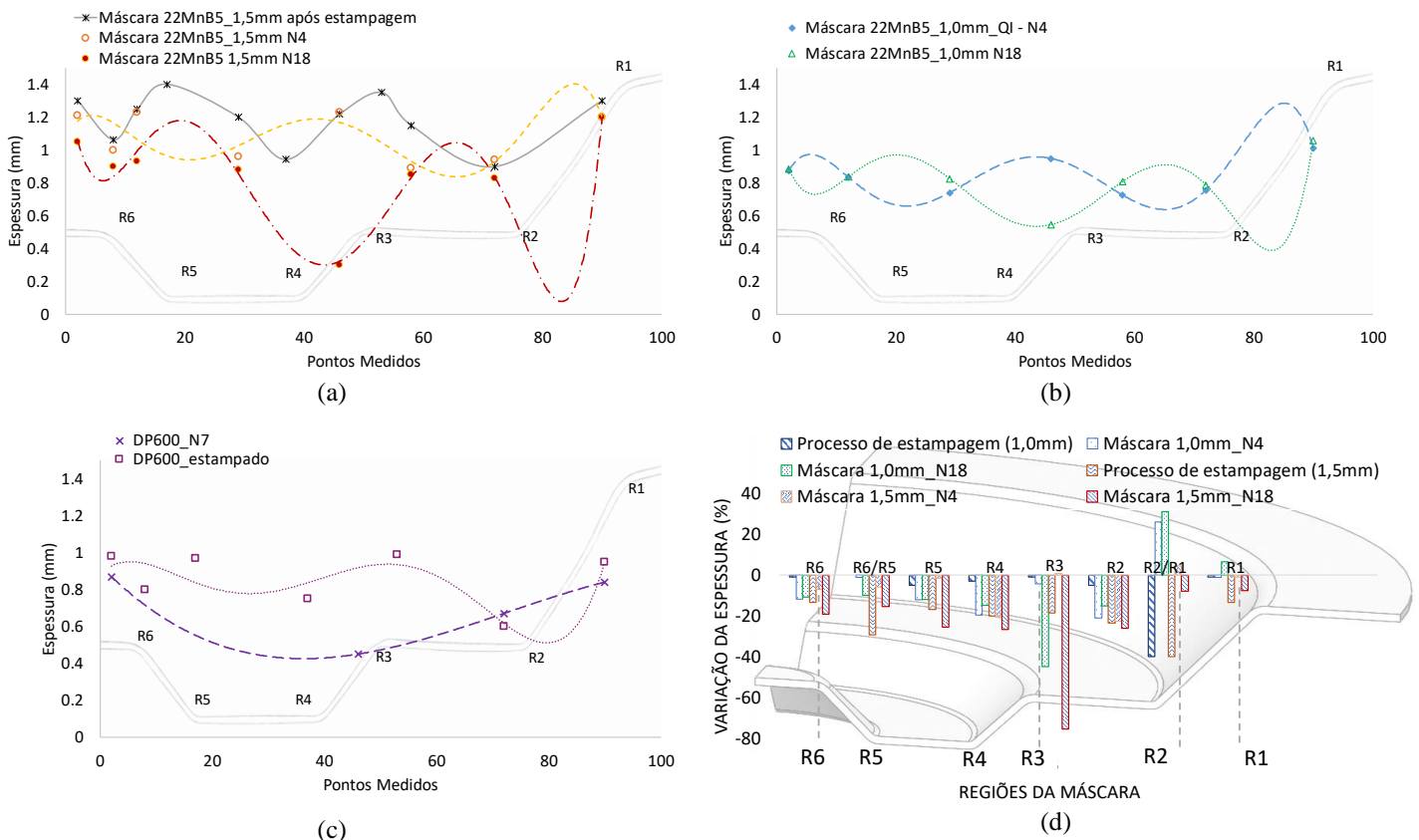


Figura 5.10 Análise da espessura das máscaras de material (a) 22MnB5\_1,5mm; (b) 22MnB5\_1,0 mm e (c) DP600; (d) porcentagem de redução da espessura para as máscaras de 22MnB5. Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme pode ser verificado na Figura 5.10(b), a máscara 22MnB5 com espessura inicial de 1,0 mm apresentou maior resistência que a máscara de 1,5 mm de espessura após 18 ciclos de forjamento. Observando-se os resultados de espessura, verifica-se uma redução de 80% para a região do raio R3 da máscara com espessura nominal 1,5 mm, atingindo valores em torno de 0,3 mm após 18 ciclos. Enquanto a máscara com espessura nominal de 1mm apresentou uma redução de 45% após o mesmo número de ciclos, com espessura em torno de 0,5 mm na região mais crítica (raio R3).

A variação da espessura para a máscara DP600 (1 mm) está apresentada na Figura 5.10(c), onde a espessura na região R3 reduziu em 40% após 7 ciclos de forjamento. Para este caso, o processo de conformação da máscara foi heterogêneo com variações significativas causando deformações na região de parede R2/R1 e falha prematura da máscara.

O processo de fabricação influenciou na variação da espessura, apresentando redução nas diferentes regiões da máscara em aço 22MnB5 com valores entre 13 e 40%, conforme pode ser observado na Figura 5.10(d). Para a máscara de espessura nominal de 1,5 mm, tais variações foram menos significativas, pois a troca térmica foi o fator de maior impacto para a degradação da máscara. Porém, para ambos os casos o processo de estampagem deve ser realizado de maneira controlada a fim de garantir uma distribuição o mais homogênea possível.

A dureza das máscaras 22MnB5 e DP600 foi medida nas regiões críticas (região R3 e de parede R2/R1) e na superfície, antes e depois da realização dos experimentos de forjamento (Figura 5.11). Os resultados da análise da máscara 22MnB5 são apresentados na Figura 5.11(a), onde verifica-se um aumento de 184HV0,5, representando 30% em relação à dureza nominal na superfície da máscara (1mm) após 18 ciclos de forjamento e de 50HV0,5 (9,5%) para a máscara de 1,5mm.

As diferenças em termos de dureza demonstram a influência da espessura e do revestimento (Al-Si) presente na chapa de aço 22MnB5. Assim como as variações de microestrutura devido à influência da temperatura e das trocas térmicas na superfície da máscara durante os ciclos de forjamento.

O material DP600 apresenta dureza inferior aos aços ao boro, porém pode ser observado um aumento significativo, de 150 a 200HV0,5 quando comparados os valores nominais e após os experimentos de forjamento. Além disso, a variação máxima entre superfície e espessura foi de 50HV0,5 para a região de parede (R2/R1), ou seja, a distribuição de dureza pode ser considerada homogênea.

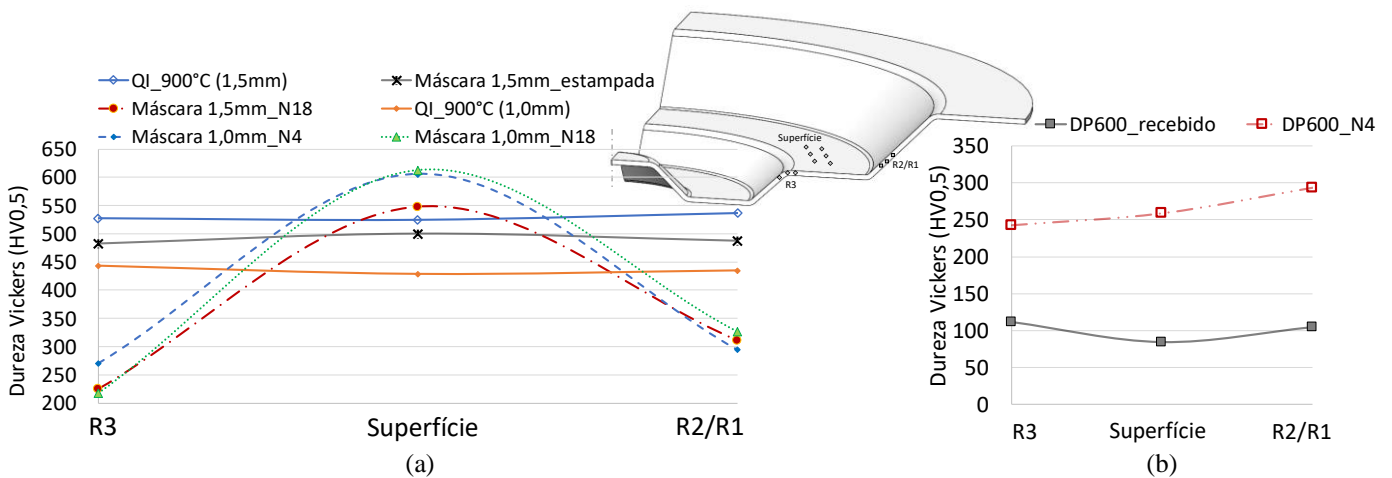


Figura 5.11 Distribuição de dureza Vickers para máscaras em aço (a) 22MnB5 e (b) DP600. Fonte: Elaborado pela autora.



Através da análise numérica foram identificadas as regiões críticas, regiões de maior temperatura da máscara, as quais coincidem com as regiões de maior tempo de contato com o billet e maiores variações de espessura e dureza. Assim, quanto maior o tempo necessário para o posicionamento do billet e extração do forjado, maior o tempo de contato e maior a temperatura nas regiões dos raios R3 e R6.

### **5.5 *Análise e Previsão do Desgaste***

A análise realizada através da equação de Archard considera os parâmetros principais do desgaste abrasivo como pressão e temperatura na interface de contato, velocidade de escorregamento e dureza do material pelo incremento de tempo do processo. Sabe-se, no entanto, que o processo tribológico de desgaste em ferramentas de conformação a quente é muito mais complexo. Portanto, os resultados foram avaliados apenas como valores qualitativos, ou seja, uma avaliação das regiões críticas e do possível desgaste das máscaras apenas considerando-se o modelamento numérico com a equação de Archard.

A Figura 5.12 apresenta os resultados de temperatura para a simulação numérica sem a aplicação de máscara protetiva. Nesta avaliação, pode ser observado que a temperatura superficial da matriz aumenta com o número de ciclos, atingindo valores máximos de até 635°C após 28 ciclos de forjamento. Além disso, a amplitude de temperatura variou de 312°C a 303°C para o primeiro e o 10º ciclo de forjamento, respectivamente. A partir do 11º ciclo, a amplitude manteve-se na faixa de 303 e 301°C, o que caracteriza o estado estacionário. Além disso, a temperatura da interface matriz / billet apresenta distribuição heterogênea para as regiões críticas R3 e R6 com valores de até 824°C.

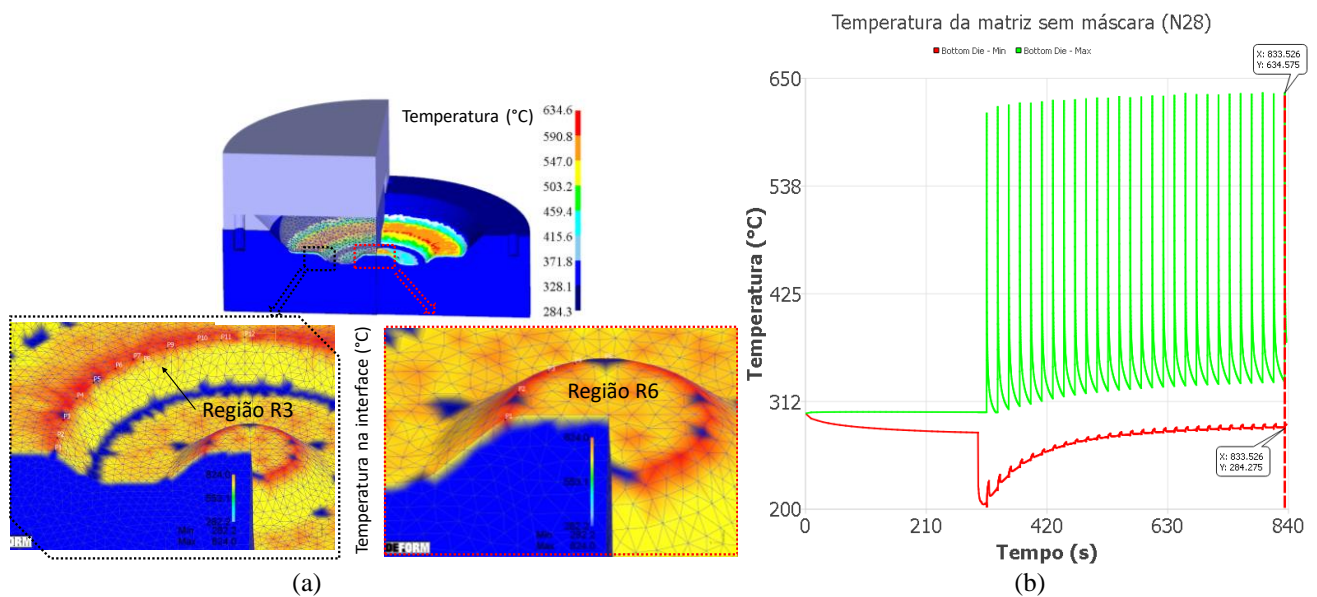
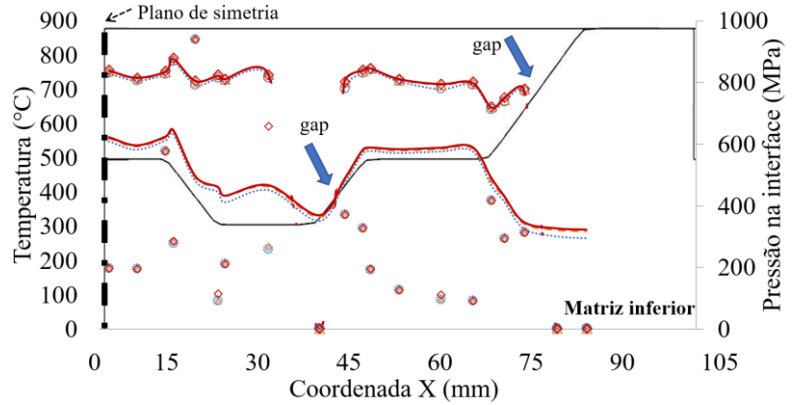
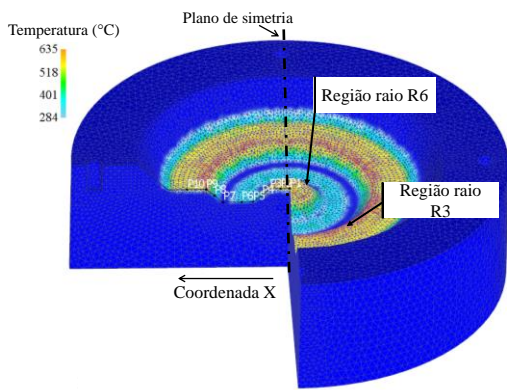


Figura 5.12 Análise numérica das regiões críticas do conjunto sem máscara (a) representação das regiões críticas; (b) distribuição da temperatura durante os 28 ciclos. Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme apresentado na Figura 5.13, o perfil de pressão e temperatura varia de acordo com a região superficial analisada devido ao fluxo e contato do billet durante o processo de forjamento. Pode ser observada a falta de contato (*gap*) entre o billet e a superfície da matriz nas regiões dos raios R4 e R1 e, conseqüentemente os valores de temperatura e pressão na interface são nulos. Ao contrário das regiões crítica R3 e R6, onde a solicitação é máxima, com valores entre 287 e 388 MPa e 825 e 812 °C, respectivamente.

Quando aplicada uma máscara de 1,0 mm de espessura, pode ser verificado que o comportamento da temperatura varia significativamente para a superfície da matriz. A Figura 5.14 apresenta as diferenças de temperatura e pressão para a máscara após 6 ciclos de forjamento, assim como o comportamento do conjunto para a região do raio R3. Observa-se que na região do raio R4 (pontos 13 ao 17) há uma folga entre a máscara e a matriz, assim como próximo à região do raio R1 (pontos 30 a 35).

A máscara passa a absorver as condições de desgaste antes suportadas pela superfície da matriz e apresenta um perfil semelhante, porém com valores de profundidade de desgaste em torno de  $5,76 \times 10^{-5}$  a  $7,8 \times 10^{-5}$ .

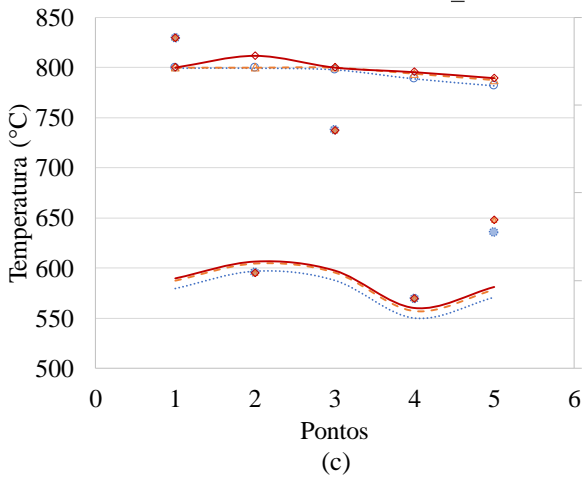


(a)

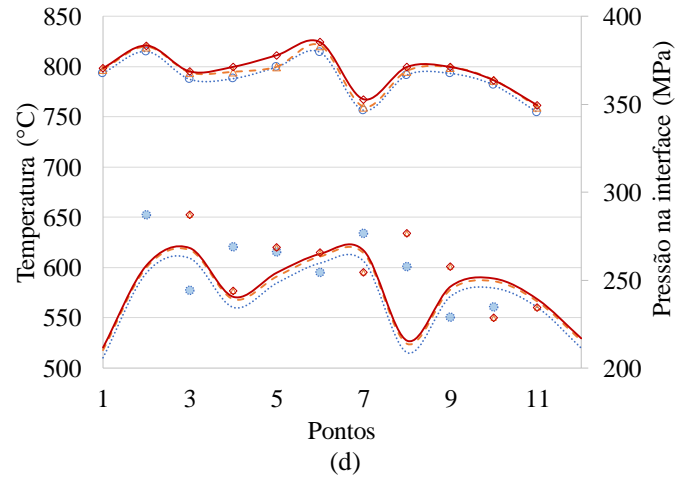
(b)

- temperatura na interface\_N6
- ◇— temperatura na interface\_N28
- Temperatura na superfície da matriz N18
- Pressão na interface\_N6
- ◇ Pressão na interface\_N28

- △- temperatura na interface\_N18
- Temperatura na superfície da matriz N6
- Temperatura na superfície da matriz N28
- △ Pressão na interface\_N18



(c)



(d)

Figura 5.13 Análise da matriz sem máscara (a) representação das regiões e pontos medidos, temperatura e pressão medidos em pontos (b) superficiais na seção da matriz; e nas regiões dos raios (c) R6 e (d) R3. Fonte: Elaborado pela autora.

A profundidade de desgaste na matriz sem aplicação de máscara e na região do raio R3 foi de  $3,41 \times 10^{-6}$  mm e de  $8,31 \times 10^{-6}$  mm na região de raio R6. Comparando com os valores na matriz com aplicação de máscara, verifica-se uma redução de  $6,74 \times 10^{-6}$  para a região R6 e de  $3,31 \times 10^{-6}$  para a região R3, ou seja, de 81 a 97%.

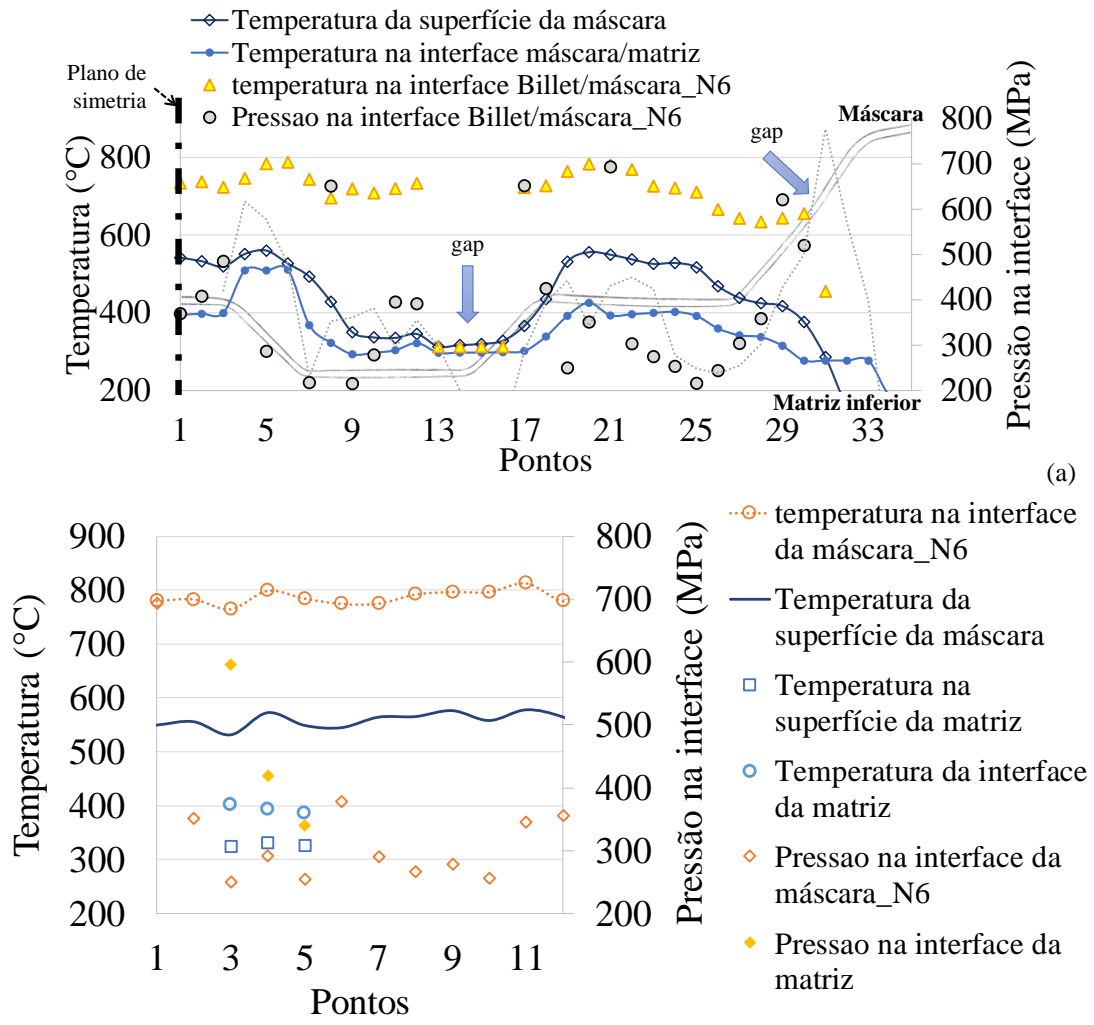


Figura 5.14 Distribuição da temperatura e pressão (a) geral da máscara (1mm) e (b) do conjunto para a região R3. Fonte: Elaborado pela autora.

A amplitude de temperatura da matriz para a análise com aplicação de máscara variou de 37,44°C para espessura 1,5 mm a 45,71°C para espessura 1,0mm. Observando as variações de temperatura para a máscara de um ciclo a outro, a amplitude de temperatura para a máscara de 1,0mm de espessura passa a ser de 364,55°C e de 219,87°C para a máscara de 1,5 mm.

Assim, a variação da espessura da máscara influencia na amplitude de temperatura da matriz, sendo que a simulação numérica com máscara com 1,0mm de espessura resultou em uma amplitude 22,1% maior que com máscara de 1,5 mm. Apesar disso, comparando com os resultados das simulações sem máscara, pode ser verificado que a amplitude de temperatura da matriz sem a aplicação de máscara apresenta um aumento de até 87,6%. Como as variações de temperatura influenciam diretamente no desgaste da matriz por fadiga térmica, pode ser evidenciado que o método de aplicação de máscara metálica contribui significativamente para a conservação da matriz de forjamento.

Além disso, o modelo desenvolvido para a simulação realizada considerou uma máscara de geometria inicial perfeita com espessura homogênea, sem a presença dos efeitos do processo de fabricação. Conforme verificado nas análises experimentais de espessura, a estampagem incremental apresentou influência principalmente nas regiões de parede R2/R1 e R6/R5, com redução de 40 e 30%, respectivamente. Esta redução, principalmente na região de parede R2/R1, atuou como um fator de enfraquecimento e auxiliou nas deformações verificadas na máscara de 1,5 mm após 18 ciclos de forjamento (Figura 4.80b), assim como para a região do raio R3, onde o processo de estampagem influenciou na heterogeneidade da espessura, observando-se uma redução de 20% da espessura inicial.

Após a estampagem incremental das máscaras foi possível observar uma degradação do revestimento Al-Si das máscaras em aço 22MnB5 (revestido), o que pode ter sido causado pela ferramenta de estampagem, assim como o processo de têmpera realizado posteriormente. Esta degradação causou um aumento da rugosidade da superfície da máscara e pode ter auxiliado na ancoragem do spray lubrificante durante o experimento de forjamento.

Além disso, conforme Ghiotti et al. (2011), o revestimento (Al-Si) do material 22MnB5 está susceptível a degradação em função da temperatura de trabalho. Segundo os autores, ocorre difusão atômica que transforma o revestimento em uma liga ternária Al-Fe-Si, sendo que quanto maior o tempo a elevada temperatura, mais homogênea será a superfície do revestimento.

### **5.6 Recomendações para utilização das máscaras estudadas**

Os resultados experimentais e numéricos evidenciam a função protetiva das máscaras, assim como a necessidade de controle dos parâmetros de conformação da geometria desejada, e de propriedades específicas do material conforme a solicitação termomecânica. Portanto, com base nos resultados e análises desenvolvidas, a seguir apresentam-se recomendações para o uso dos diferentes aços investigados neste trabalho como máscaras de proteção para matrizes de forjamento.

O aço DP600 é indicado especialmente para operações de recalque (*upset forging*) e para estágios de baixa deformação (operações de pré-forma, por exemplo), onde a temperatura elevada do billet atua por um curto período em contato com a máscara, e a rápida troca térmica causa um efeito de têmpera localizada. Recomenda-se que o processo de fabricação da máscara seja realizado por estampagem incremental (geometrias mais complexas) ou estampagem profunda (para geometrias mais simples) com controle e máxima precisão possível. Para o caso

da estampagem incremental, além da utilização de duas ferramentas de diâmetros diferentes, pode ser aplicado ainda um suporte para conformação inversa, o que previne a degradação do revestimento na superfície de contato com o billet.

Em contrapartida, o aço 22MnB5 pode ser indicado para operações com geometrias mais complexas, mantendo o menor tempo de contato possível entre a máscara e o billet a ser forjado. Para esta máscara, tanto na etapa de conformação quanto na etapa de tratamento térmico, deve-se tomar cuidado com a temperatura da têmpera e da fabricação, a fim de evitar a degradação do revestimento de Al-Si presente no material da chapa (como recebido).

Por fim, na Tabela 5.2 são expostos os principais requisitos necessários para a utilização do método de máscaras metálicas como revestimento protetivo de matrizes de forjamento. Além da apresentação dos requisitos, são apresentadas soluções e apontadas as vantagens de cada uma das ações sugeridas.

Tabela 5.2 Lista de requisitos necessários para a utilização do método de máscaras metálicas como revestimento protetivo de matrizes de forjamento

REQUISITO	COMO ATENDER	VANTAGENS
<b>Máscara deve agir como revestimento de proteção</b>	Chapas finas (1mm) de aço com elevada resistência termomecânica e temperabilidade	Elevada troca térmica e efeito de têmpera localizada a cada ciclo de forjamento. Facilidade de troca e reciclagem após desgaste.
<b>Centralização do billet</b>	Posicionamento mecanizado	Estabilidade do processo
<b>Curto período em temperatura máxima (têmpera localizada)</b>	Posicionamento e extração mecanizados	Garantia da repetibilidade no tempo de contato e trocas térmicas
<b>Evitar aderência do billet com a máscara</b>	Ângulos de ferramenta abertos	Facilidade na extração do produto forjado
<b>Impedir o movimento relativo da máscara durante o processo de forjamento</b>	Uso de um mecanismo (anel) de fixação da máscara	Pode ser utilizado como delimitador do processo, auxilia na extração do billet e evita defeitos na máscara
<b>Fabricação da máscara com diferentes geometrias</b>	Estampagem incremental	Não necessita de equipamento especial, pode ser realizada com CNC
<b>Homogeneidade na distribuição da espessura</b>	Estampagem incremental com suporte (ferramenta de apoio) e dois passes (1° - Ø 20mm para geometria geral e 2° - Ø 10mm para conformação dos raios)	Auxilia no aumento da performance da máscara
<b>Maior número de ciclos possível sem falhar</b>	Aplicar a máscara em processos com geometria simples	Pode ser utilizada nos estágios de forjamento da pré-forma e peças de diâmetros menores

Fonte: Elaborado pela autora.

## 6 CONCLUSÕES

---

Através deste trabalho foi possível desenvolver e analisar um método de aplicação de máscaras metálicas como revestimento de proteção para matrizes de forjamento. O desenvolvimento de máscaras, produzidas a partir de chapas de aço, para o revestimento de matrizes de forjamento demonstrou potencial de redução do desgaste e das deformações plásticas permanentes, bem como da intensidade de solicitações que levam à fadiga térmica do material das matrizes de forjamento a quente.

Com base nas investigações para a seleção do material mais adequado, são apresentados os principais tópicos ou fatores determinantes:

- A seleção do material está diretamente ligada à complexidade da geometria da peça a ser forjada, suas tolerâncias dimensionais e de acabamento.
- Para um forjamento em matriz fechada sem rebarba (*flashless*), o material da máscara deve apresentar elevada resistência termomecânica, o que pode levar a uma estratégia de conformação mais complexa.
- Os aços de alta resistência mecânica, como Hardox450® e M2 podem ser utilizados como revestimento somente quando o componente forjado apresentar geometria simples ou recobrimento parcial da superfície das matrizes, sendo conformados por exemplo por dobramento. Caso contrário a estratégia de fabricação da máscara se torna mais complexa, o que pode elevar o custo da aplicação em função da dificuldade inicial de conformação do material de revestimento.
- Materiais de aço de baixo carbono apresentam elevada ductilidade e podem ser facilmente conformados, porém suportam um número de ciclos de forjamento muito inferior ao dos outros aços investigados.
- Os experimentos com geometria axissimétrica escalonada evidenciaram o potencial do aço microligado ao boro (22MnB5) para aplicação como máscara protetiva sobre matriz de forjamento a quente, pela redução do desgaste da ferramenta durante o processo e relativa resistência mecânica da chapa.
- Em contrapartida, as análises realizadas com aço DP600 mostraram que este material apresenta potencial de aplicação como máscara para os casos em que a



geometria aplicada seja simples (matriz aberta ou processos de pré-forma com baixa deformação do billet) e onde o tempo de processo seja o menor possível, para auxiliar no aumento da dureza e, conseqüente, resistência da máscara.

Através das análises numéricas, foi possível identificar que parâmetros geométricos (ângulo e profundidade) da matriz, assim como a fixação da máscara exercem influência tanto no comportamento durante o processo de forjamento, quanto no processo anterior de fabricação (estampagem) da máscara. Além disso, verifica-se que a aplicação de máscara sobre a matriz reduz a amplitude térmica entre os ciclos e a matriz atinge o estado estacionário logo nos primeiros 5 ciclos de forjamento.

A estratégia de conformação da máscara está diretamente ligada à geometria do produto forjado e às propriedades do material da chapa a ser utilizada. Quanto mais complexa a geometria e quanto maior a resistência e complexidade do material a ser conformado, maior o tempo de conformação e maiores os custos de projeto. Assim, a estampagem incremental com ferramenta de apoio pode ser utilizada para fabricar máscaras de geometria mais complexa sem a necessidade de equipamento de alto custo, além de garantir baixo retorno elástico. Este processo deve ser realizado sobre suporte (ou ferramenta de apoio) e trajetória controlada da ferramenta a fim de garantir a homogeneidade da espessura. Variações na espessura causam heterogeneidade das trocas térmicas durante o processo de forjamento, além de reduzir a resistência mecânica e causar falha precoce da máscara.

Dentre as estratégias de fabricação investigadas, as análises numéricas apresentaram ainda a possibilidade de conformação da máscara diretamente no setup de forjamento. Para tanto, as tolerâncias do produto a ser forjado devem ser flexíveis e os parâmetros de processo (como temperatura, punção, velocidade de deformação etc.) controlados.

Apesar de tratar-se apenas de uma análise qualitativa, através do modelo de Archard foi possível verificar que a aplicação de máscara metálica reduzir consideravelmente o desgaste na superfície da matriz e modifica a região de maior sollicitação da região central para a região do raio R3.

Por fim, os principais requisitos para a aplicação de máscaras metálicas sobre de matrizes de forjamento devem ser considerados: material da chapa, a geometria do forjado, temperatura do billet, tempo de contato entre o billet e a máscara, fixação etc.; quanto maior o controle destes parâmetros, maior a performance, ou número de ciclos que a máscara irá suportar.

## *SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS*

---

- Desenvolver um aço de composição química e microestrutural específica para a aplicação como máscara de proteção de matrizes, com as propriedades termomecânicas necessárias para suportar as elevadas solicitações do processo de forjamento;
- Realizar uma análise numérica com evolução da microestrutura da máscara a fim de determinar as condições de maior durabilidade, ou seja, condições que potencializem o efeito de endurecimento localizado durante os ciclos térmicos do forjamento;
- Realizar uma análise detalhada do custo total do processo, desde o desenvolvimento e produção do aço, a fabricação da máscara na geometria desejada (conforme a matriz de forjamento), mecanização das operações (posicionamento e extração do billet e troca da máscara após desgaste excessivo) e reciclagem após fim da vida em serviço;
- Aplicar o método em processos de forjamento em escala industrial.

## REFERÊNCIAS

---

- ALTAN, T. OH, S.; GEGEL, H. **Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações** (Tradução de COELHO, R.T., ADAMI, L.A.): Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo EESC/USP. Ed São Carlos-, São Paulo, 1999.
- ALTAN, T.; NGAILE G.; SHEN G. **Cold and Hot Forging: Fundamental and Application**, Materials Park OH: ASM International, 1<sup>st</sup> Ed. ix 341. ISBN 0871708051. 2004.
- ALTAN, T; VELAZQUEZ, V. **Numerical Process Simulation for Tool and Process Design in Bulk Metal Forming**. In Annals of the CIRP, p. 599-615. Columbus, 1996.
- ARBAK, E. et al. **Forging Simulation at Izeltas**. In 4th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds – CESME, 4. Turkey, 2007.
- ASHBY, Michael F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 4th: Elsevier Ltd. Ed., 2011.
- ASM - American Society for Testing and Materials. **E 517-00**. Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal. 2000.
- ASM - Metals Handbook. **Forming and Forging**.9<sup>th</sup> edition, V14., p. 61 – 71. 1988.
- ASM - Metals Handbook. **Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys**. 10th edition, Metals Park, ASM, V1., p. 757 – 779. 1990.
- AZEVEDO, M. L.; SCHAEFFER, L.; DE LUCCA, L.; NUNES, R. M. **Avaliação de desgaste de máscaras aplicadas a ferramentas de forjamento a quente**. 23<sup>o</sup> CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 5406-5418p. 2018.
- BEHRENS, J.A., SCHÄFER, F. **Prediction of wear in hot forging tools by means of finite-element-analysis**; J Mater Process Tech 167, pp. 309-315, 2005.
- BEHRENS; B.A. **Finite element analysis of die wear in hot forging processes**; Cirp Ann-Manuf Techn 57/1, pp. 305-308, 2008.
- BERTI, G. A.; MONTI, M. **Thermo-mechanical fatigue life assessment of hot forging die steel**. Fatigue Fracture Engineering Material Structure, v. 28, p.1025-1034, 2005.
- BOBZIN, K. et al. **Vorstudie zur Entwicklung einer austauschbaren Gesenkmaske**. RWTH Aachen für das Institut für Bildsame Formgebung Bericht Nr. 20090504-Kn-1. Aachen, Alemanha. 37 p. S/ ano.
- BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I.B.; BATALHA, G.F.; BUTTON, S.T. **Conformação Plástica dos Metais**. 1. Ed. 258 p. ISBN 978-85-86686-64-1. São Paulo: EPUSP, 2011.
- BRESCIANI Filho, E.; ZAVAGLIA, C. A. C.; BUTTON, S. T.; GOMES, E.; NERY, FERNANDO A. C., **Conformação Plástica dos Metais**, Editora da Unicamp, 5a edição, 1997.
- BREUER, M. et al. **Influence of Cold Rolling on The Mechanical and Technological Properties of AHSS Steel Grades**. Technical contribution to the 54<sup>o</sup> Seminário de Laminação e Conformação de Metais, part of the ABM Week, October 2nd-6th, São Paulo, SP, Brazil, 2017.
- BRUCELLE, Olivier & BERNHART, Gérard. **Methodology for service life increase of hot forging tools**. *Journal of Materials Processing Technology*, 87 (1-3), pp.237-246. DOI:10.1016/S0924-0136(98)00357-4. Elsevier, 2019.
- BUTTON, S. T. EM 908 - Projeto De Ferramentas Para Conformação: **Planejamento do processo e projeto de matrizes para o forjamento a quente**, 35 p. 1998.
- CALLISTER JR, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, p. 239, 2007.

CALLISTER WD Jr, Rethwisch DG. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8ª Edição. Rio de Janeiro: LTC; 2013.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CAO, J.; BRINKSMEIER, E.; FU, M.; GAO, R. X.; LIANG, B.; MERKLEIN, M.; SCHMIDT, M.; YANAGIMOTO, J. **Manufacturing of advanced smart tooling for metal forming**. CIRP Annals, v. 68, n. 2, p. 605–628, doi:10.1016/j.cirp.2019.05.001. 2019.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. Editora Afiliada, v.3, 2ª ed, 1986.

COSTA, de L. L.; BRITO, A.M.G.; ROSIAK, A.; SCHAEFFER, L. **Estudo Da Aplicabilidade De Chapas De Aço De 22mnb5 Como Máscaras Protetoras Para Aumento Da Vida Útil Das Ferramentas No Processo De Forjamento** 39th SENAFOR, Porto Alegre. Outubro de 2019.

COZZA, R. C. **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro-abrasivo**. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2006.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1981.

DIN - EN 10002-1. **Metallic materials – Tensile testing – Part 1: method of test at ambient temperature**. Deutsches Institut für Normung, 2001.

FOSTER, J.; CULLEN, C.; FITZPATRICK, S.; PAYNE, G.; HALL, L.; MARASHI, J.. **Remanufacture of hot forging tools and dies using laser metal deposition with powder and a hard-facing alloy Stellite 21®**. Journal of Remanufacturing, v. 9, n. 3, p. 189–203. doi:10.1007/s13243-018-0063-9, 2019.

GABARDO, J. F. **Estudo da Tenacidade do Aço Ferramenta H13**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de Manufatura. Curitiba, Paraná, 2008.

GAO; S. **Life Estimation of Forging Dies**, VDI-Fortschritt-Berich, VDI-Verlag, Series 5 No. 716. Düsseldorf, 2005.

GHIOTTI, A.; BRUSCHI, S.; BORSETTO, F. **Tribological characteristics of high strength steel sheets under hot stamping conditions**. In Journal of Materials Processing Technology 211 (11), pp. 1694–1700. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.009, 2011.

GORNI A.A. **Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas**. Corte & Conformação de Metais. p26-57, 2008.

GORNI, A. A. **Novas tendências para o processo de estampagem a quente**. Corte & Conformação de Metais – Junho 2010.

GRANBOM Y. **Structure and mechanical properties of dual-phase steels – an experimental and theoretical analysis**. Tese de Doutorado. Estocolmo: KTH Royal Institute of Technology; 2010.

GRONOSTAJSKI, Z.; KASZUBA, M.; WIDOMSKI, P.; SMOLIK, J.; ZIEMBA, J.; HAWRYLUK, M. **Analysis of wear mechanisms of hot forging tools protected with hybrid layers performed by nitriding and PVD coatings deposition**. Wear, 420-421, p. 269–280. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.003, 2019.

GRONOSTAJSKI, Z.; KASZUBA, M.; WIDOMSKI, P.; SMOLIK, J.; ZIEMBA, J.; HAWRYLUK, M. **Analysis of wear mechanisms of hot forging tools protected with hybrid layers performed by nitriding and PVD coatings deposition**. In Wear 420-421, pp. 269–280. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.003. 2019.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**, 4th ed. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-0470-467002. The United States of America, 2010.

HAUßMANN, A.-K. **Charakterisierung des druckabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten und dessen Auswirkungen auf das Gesenkschmieden unter Einsatz einer Blechschuttschicht.** Dissertação de Mestrado desenvolvido em cooperação entre IBF (RWTH Aachen) e LdTM (UFRGS, Porto Alegre). 101 p. 2015.

HAWRYLUK, M. **Review of selected methods of increasing the life of forging tools in hot die forging processes.** In Archives of Civil and Mechanical Engineering 16 (4), pp.845-866. DOI: 10.1016/j.acme.2016.06.001. 2016.

HOSFORD, W. F. **Mechanical behavior of materials.** 2nd. Cambridge; New York: Cambridge University Press, xv, 419 p. ISBN-13 978-0-511-65836-5, 2010.

HUH, H.; KIM, S. B.; SONG, J. H.; LIM, J. H. **Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body.** International Journal of Mechanical Sciences, 50., p. 918-931, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.09.004>, 2008.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. **Materiais para ferramentas de conformação a quente.** Em: <[http://www.ipt.br/solucoes/269-materiais\\_para\\_ferramentas\\_de\\_conformacao\\_a\\_quente.htm](http://www.ipt.br/solucoes/269-materiais_para_ferramentas_de_conformacao_a_quente.htm)>. Acessado em novembro, 2015.

IVANISKI, T. M. **Caracterização de chapas de alta resistência em aço DP600 e Hardox450® visando a aplicação como máscaras utilizadas em matrizes de forjamento a quente.** 117 p. <<http://hdl.handle.net/10183/182402>> Porto Alegre - RS, 2017.

KALPAKJIAN, S. **Mechanical Testing for Metalworking Processes.** In Handbook of Mechanical Testing and Evaluation. p. 70-78: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v08.a0003258>. ASM International, 2000.

KALPAKJIAN, S., **Manufacturing Processes for Engineering Materials**, Addison-Wesley Publishing Company, 1a edition, ISBN 10: 0201116901 ISBN 13: 9780201116908, 1985.

KCHAOU, M.; ELLEUCH, R.; DESPLANQUES, Y.; BOIDIN, X.; DEGALLAIX, G. **Failure mechanisms of H13 die on relation to the forging process - A case study of brass gas valves.** Engineering Failure Analysis, 17(2):403-415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.08.015>, 2010.

KEELER, S. & KIMCHI, M. **Advanced High Strength Steels Application Guidelines.** Versão 5.0. Disponível em: <<http://www.worldautosteel.org>>. Edição 2014.

KIM, D. H.; KIM, B. M.; KANG, C. G. **Die life considering the deviation of the preheating billet temperature in hot forging process.** Finite Elements in Analysis and Design, v. 41, n. 13, p. 1255-1269, doi: 10.1016/j.finel.2004.11.005. 2005.

KIM, S. B.; HUH, H.; BOK, H. H.; MOON, M. B. **Forming limit diagram of auto-body steel sheets high-speed sheet metal forming.** Journal of Materials Processing Technology, 211., p.851-862, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.006>, 2011.

LESKOVSEK, V.; PODGORNIK, B.; JENKO, M. **A PACVD duplex coating for hot-forging applications.** Wear, 266(3-4):453-460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2008.04.016>, 2009.

LI, G., LI, X., WU, J., **Study of the Thermal Fatigue Crack Initial Life of H13 and H21 Steels.** Journal of Materials Processing Technology 74, p. 23 - 26, [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(97\)00244-6](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(97)00244-6), 1998.

LIU, A.F. **Mechanics and mechanisms of fracture: an introduction.** Materials Park, Ohio: ASM International; vi 458 p. ISBN: 0-87170-802-7, 2005.

LUKIĆ, D.; MILOŠEVIĆ, M.; BOROJEVIĆ, S.; ĐURĐEV, M.; VUKMAN, J.; ANTIĆ, A.: **Manufacturing Cost Estimation in the Conceptual Process Planning;** Machine Design, Vol.8No.3, ISSN 1821-1259; pp. 83-90. Disponível em: <http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/download/v8n3/p3.pdf>. Serbia, 2016.

- MAGRI, M. L. **Influência da topografia superficial na vida da matriz de forjamento a quente.** Dissertação de mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, 160p. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/264194>. São Paulo, 2011.
- MARQUES, A. S.; COSTA, L. L. de; SANTOS, G. R. dos; ROCHA, A. da S. **Wear study of hot forging punches coated with WC-CoCr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr through high-velocity oxygen fuel (HVOF) process.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 100, 1-4, p. 3–11, doi: 10.1007/s00170-018-2693-3. 2019.
- MARQUES, V. MARTINS, L. SCHAEFFER. **Benefícios da simulação computacional no processo de forjamento.** IN 32° SENAFOR - 16ª Conferência Internacional de Forjamento, p.369-384. Disponível em: <https://hospedagemphp.ufrgs.br/ldtm/wp-content/uploads/2018/07/2012-37-Marques-et-al..pdf>. Porto Alegre, 2012.
- MARTINS, P., RODRIGUES, J. **Tecnologia Mecânica: Tecnologia Da Deformação Plástica.** Vol. 1, Lisboa: Escolar Editora, 2005.
- MARTINS, P.A.F., SILVA, M.B., SKJOEDT, M., ATKINS, A. G., BAY, N., **Single-point incremental forming and formability–failure diagrams.** The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, v43, pp. 15–35, <https://doi.org/10.1243/03093247JSA340>, 2008.
- MASSÉ, T., CHASTEL, Y., MONTMITONNET, P., BOBADILLA, C., PERSEM, N., FOISSEY, S.. **Impact of Mechanical Anisotropy on the Geometry of Flat-Rolled Fully Pearlitic Steel Wires.** Journal of Materials Processing Technology 211, p.103-12, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.09.002>, 2011.
- MESQUITA, R. A. & BARBOSA, C. A. **Aços para ferramentas, moldes e matrizes.** Siderurgia Brasil: Processos e Produtos — Edição 23. Centro de Pesquisa, Villares Metals S. A., 2005.
- MEYERS, M.; CHAWLA, K. **Mechanical Behavior of Materials.** 2 ed. New York: Cambridge University Press, 2009.
- MIRANDA, G. P. de. **Estudo da Soldabilidade a Ponto por Resistência Entre os Aços 22MnB5 e DP800.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Área de concentração: Metalurgia Física. Belo Horizonte, 2015.
- MIRANDA, H. C. de. **Tecnologia Mecânica III – Processos de Fabricação.** Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção – Universidade Federal do Ceará, 2012.
- MÜLLER, C.; SCHRUFF, I. **Steel selection contributing to wear reduction of forging dies,** Kind & Co., Edelmetallwerk, GmbH & Co. KG. Alemanha, 2016.
- NADERI, MALEK. **Hot Stamping of Ultra High Strength Steels.** Department of Ferrous Metallurgy, RWTH Aachen University. p. 183. 2007.
- Nasser, A.; Yadav, A.; Pathak, P.; Altan, T. **Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the uniaxial tensile and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests.** Journal of Materials Processing Technology, v. 210, n. 3, p. 429–436, 2010. doi: 10.1016/j.jmatprotec. 2009.10.003.
- PYE, D. **Técnicas de modificação de superfície para matrizes de forjamento.** Metallurgical Consulting - EUA. FORGE edição 13 de julho de 2015. Disponível em: <<http://www.revistaforge.com.br/artigo-tecnico/tecnicas-de-modificacao-de-superficie-para-matrizes-de-forjamento/2955>>. Acessado em dezembro 2015.
- RAVILSON, A. C. Filho. **Estudo Da Fratura De Aços De Nova Geração DP600 Através Da Variação De Pressão No Prensa-Chapas.** Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

- REIS, L.C. dos. **Estudo dos parâmetros de influência na simulação numérica de estampagem de chapas.** Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: UFMG; 2002.
- RIBEIRO, R. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimentos Soldados do Tipo Fe-C-Cr Utilizados na Indústria Sucroalcooleira.** Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP. Ilha Solteira, 2004.
- ROBERTS, G, KRAUSS, G., KENNEDY, R., **Tool Steels.** ASM, 5th edition, EUA, p. 30-32 e 220-250, 1988.
- ROSENSTOCK, D.; SEGEBADE, E.T.; HIRT, G. **First Experimental and Numerical Study on the Use of Sheet Metal Die Covers for Wear Protection in Closed-die Forging.** Key Engineering Materials, Vols 651-653, p. 266–271, 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. 2, n. 9, p. 29–35, 2019.
- SAHIN, M.; ÇETINARSLAN, C. S.; AKATA, H. E. **Effect of Surface Roughness on Friction Coefficients During Upsetting Process for Different Materials.** Materials and Design 28, p. 633-40. 2007.
- SANTAELLA, M. L. **Fatores de influência no desgaste de matrizes de forjamento a quente de bielas automotivas.** Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, São Paulo: 2009.
- SANTAELLA, M.L., FRANZKE, M., HIRT, G., **Numerical analysis of influence factors on hot forging dies.** Forge User Meeting, June 07-08, Sophia Antipolis, France. 2010.
- SCHAEFFER, L. **Introdução ao projeto de ferramentas para forjamento a quente em matriz fechada.** Ferramental, v.9, p. 19-28, 2006.
- SEELIGER, Adrian. **Übertragung des Konzepts der Gesenkmaske auf einen industriellen Anwendungsfall.** Trabalho de conclusão de curso apresentado ao IBF – *Metal Forming Institute* da RWTH Aachen *University*, Alemanha, 55 p. 2016.
- SEGEBADE, Eric Thore. **Numerische Simulationen und Grundlagenversuche zur Implementierung einer austauschbaren Blechschuttschicht für Schmiedegesenke.** Dissertação de Mestrado apresentada ao IBF – *Metal Forming Institute*, RWTH Aachen *University*, Alemanha. 124 p. 2014.
- SERACIOPPI, V. **Simulação Numérica do Campo de Tensões na Microestrutura do Aço Ferramenta AISI H13 Durante o Forjamento a Quente.** Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. São Paulo, 2013.
- SFTC, DEFORM™ - Design Environment for Forming Integrated 2D-3D **User’s Manual.** Version 11.0.2. SFTC - Scientific Forming Technologies Corporation. Columbus, Ohio. December 15th, 2014.
- SHIRGAOKAR, M. **Technology to Improve Competitiveness in Warm and Hot Forging - Increasing Die Life and Material Utilization.** Doctor Thesis. Ohio State University, 2008.
- SOARES, T. J. M. **Análise técnica e econômica do processo de estampagem a quente com aços microligados ao boro.** Dissertação para Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Porto, 2008.
- SOUZA, F. B. P. de. **Simulação Numérica do Processo de Estampagem a Quente do Aço USIBOR® 1500P.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Área de concentração: Metalurgia de Transformação. Belo Horizonte, 2013.



- SROUR, EH Junior. **Determinação do grau de conformabilidade de chapa de aço para suporte de coluna de direção e identificação de similar nacional.** Dissertação de Mestrado. Curitiba: UFPR; 2002.
- STARLING, C. M. D., BRANCO, J. R. T., **Thermal Fatigue of Hot Work Tool Steel with Hard Coatings.** Thin Solids Films 308-309, p. 436 – 442, 1997.
- TEKKAYA, A. E. **State-of-the-Art of Simulation of Sheet Metal Forming.** Journal of Material Processing Technology 103 – p. 14-22, 2000.
- TEKKAYA, E. A. **A Guide for Validation of Fe-Simulations in Bulk Metal Forming.** The Arabian Journal for Science and Engineering 151, no. 1C – p. 58-62, 2005.
- TIGRINHO, L.M.V. **Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência DP600 quando submetido a diferentes estados de tensões.** Tese de Doutorado. Curitiba: UFPR; 2011.
- TISZA, M. **Numerical Modeling and Simulation in Sheet Metal Forming.** Journal of Material Processing Technology 151, p. 58-62. 2004.
- TISZA, M.; LUKÁCS, Z.; GÁL, G. **Numerical Modelling of Hot Forming and Heat-Treatment of Annular Gears.** Department of Mechanical Engineering, The University of Miskolc – Hungary, 2012.
- TRIPATHY, I. **Effect of microstructure on sliding wear behavior of modified 9Cr1Mo steel.** Doctoral Thesis. National Institute of Technology Rourkela: 2011.
- TSIPOURIDIS P. **Mechanical properties of Dual-Phase steels.** Tese de Doutorado. München: 2006.
- VALTONEN, K.; OJALA, N.; HAIKO, O.; KUOKKALA, V-T. **Comparison of various high-stress wear conditions and wear performance of martensitic steels.** Wear, 426-427, p. 3–13, doi:10.1016/j.wear.2018.12.006. 2019.
- WANG, W. R.; HE, C. W.; ZHAO, Z. H.; WEI, X. C. **The limit drawing ratio and formability prediction of advanced high strength dual-phase steels.** Materials and Design, 32. p. 3320–3327, 2011.
- WANG, Z.; GONG, B. **Residual Stress in the Forming of Materials.** In Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. p. 141-49. Canada: ASM International, 2002.
- WERLIMONT, H. **Metal Forming Data of Ferrous Alloys - Deformation Behavior.** Bookmetrix. Springer Materials, 2009.
- WOLFGARTEN, M.; YU, Y.; ROSENSTOCK, D.; HIRT, G. **Influence of the die geometry on the application of a sheet metal cover for wear protection in closed-die forging.** 35th Senafor, p. 1–8. Porto Alegre, 2015.
- WORLD AUTO STEEL. **Advanced High-Strength Steels: Application Guidelines.** 6<sup>a</sup> ed., 314 p. 2017.
- YU, Y.; ZOTTIS, J.; WOLFGARTEN, M.; HIRT, G. **Investigation of applying protective sheet metal die covers for hot forging dies on a cross-forging geometry.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 102, 1-4, p. 999–1007, doi:10.1007/s00170-018-03250-4. 2019a.
- YU, Y.; ALBA, D. R.; SCHAEFFER, L.; HIRT, G. **Experimental evaluation of wear protection ability of sheet metal die covers in closed-die forging.** Production Engineering, v. 13, n. 5, p. 627–634, 2019. doi:10.1007/s11740-019-00917-z. 2019b.
- YU, Y.; ROSENSTOCK, D.; WOLFGARTEN, M.; HIRT, G. **Influence of Die Geometry and Material Selection on the Behavior of Protective Die Covers in Closed-die Forging.** AIP Conference Proceedings 1769, v. 130012, 2016.

**APÊNDICE A – Composição química das chapas metálicas**

A Tabela A – 1 apresenta a composição química das chapas metálicas analisadas inicialmente.

<b>Amostra</b>	<b>DIN 1.3343</b>	<b>DIN 1.5528</b>	<b>DIN 1.0130</b>	<b>DIN EN 10346</b>	<b>DIN EN 10346</b>	<b>Hardox 450®</b>
<b>Elemento</b>	<b>(M2)</b>	<b>(22MnB5)</b>	<b>(DCO4)</b>	<b>(DP600)</b>	<b>(DP600)</b>	<b>1.0 mm</b>
				<b>1.5 mm</b>	<b>1.0 mm</b>	
<b>C</b>	0.85	0.20	<0.005	0.08	0.06	0.169
<b>Si</b>	0.28	0.21	<0.005	0.48	0.007	0.234
<b>Mn</b>	0.32	1.21	0.12	1.91	1.67	0.796
<b>P</b>	0.006	0.004	0.005	0.006	0.005	0.02
<b>S</b>	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	<0.01
<b>Cr</b>	4.09	0.16	0.01	0.02	0.009	0.022
<b>Mo</b>	5.12	<0.005	<0.005	0.006	0.17	0.052
<b>Ni</b>	0.42	0.03	<0.005	<0.005	0.006	0.046
<b>Al</b>	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.05
<b>Co</b>	0.26	0.02	0.01	0.01	0.01	0.014
<b>Cu</b>	0.11	0.07	<0.01	0.01	0.02	0.147
<b>Nb</b>	0.05	0.002	<0.001	0.003	0.01	0.014
<b>Ti</b>	0.01	0.03	0.04	<0.001	<0.001	0.045
<b>V</b>	2.02	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.012
<b>W</b>	6.67	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.1
<b>Pb</b>	<0.002	<0.002	<0.002	0.002	0.003	-
<b>Sn</b>	0.004	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	-
<b>Mg</b>	0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.005
<b>B</b>	0.0009	0.002	<0.0001	<0.0001	<0.0001	-
<b>Fe</b>	<79.8	98.0	99.8	97.4	98.0	98.37

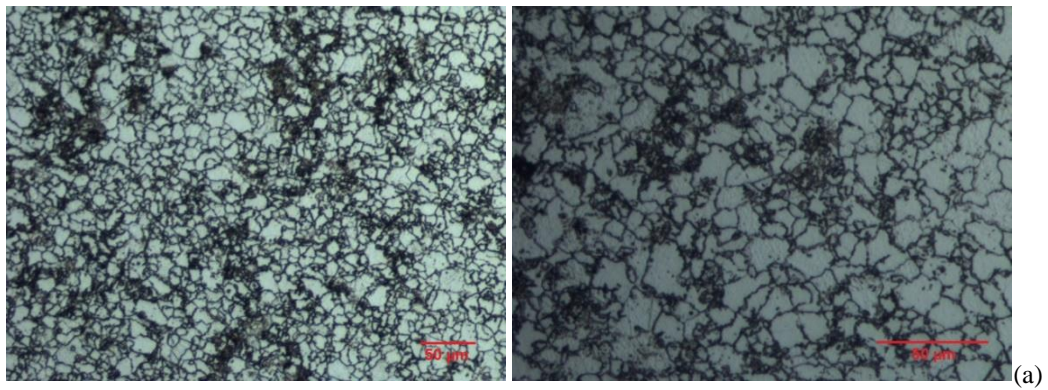
Tabela A-0.1 Análise química (% peso) realizada nas amostras de material das chapas metálicas antes do experimento de forjamento.

## APÊNDICE B – Análise metalográfica

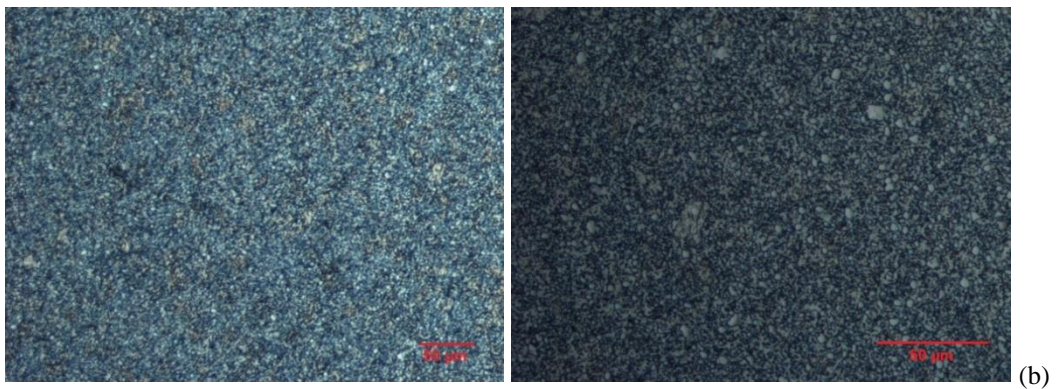
---

### APÊNDICE B1 – Análise metalográfica do material como recebido

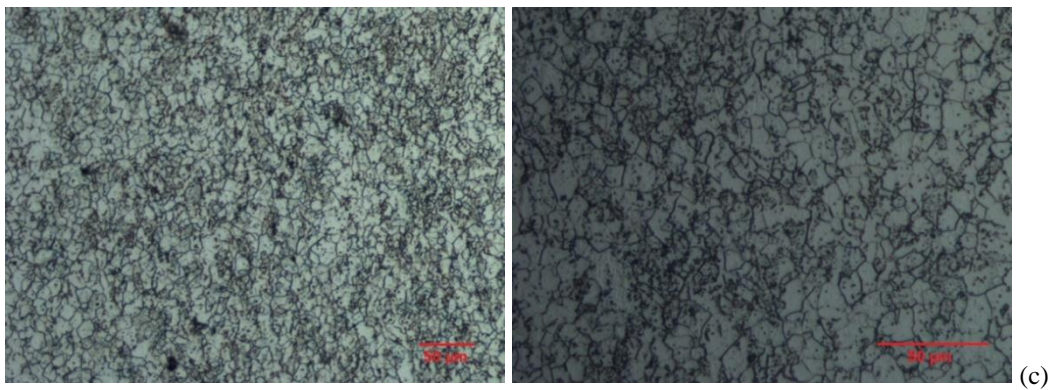
Análise metalográfica do aço DP600.



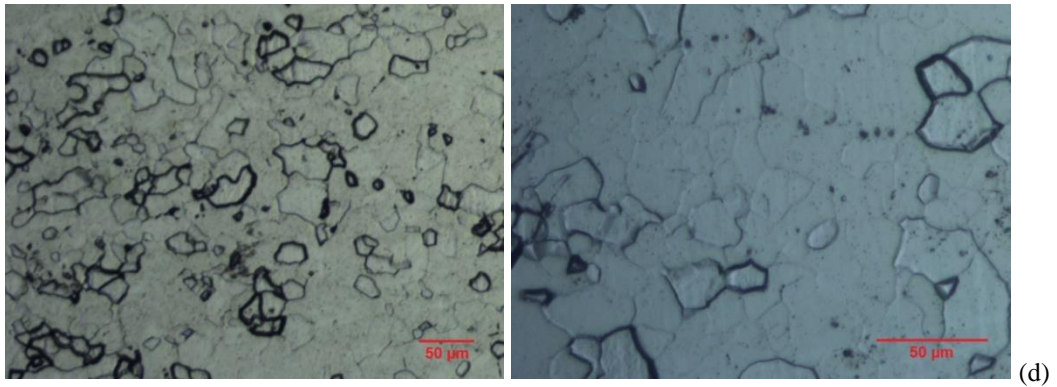
Análise metalográfica do aço M2.



Análise metalográfica do aço 22MnB5(laminado).



Análise metalográfica do aço DC04.



Análise metalográfica Hardox450®.

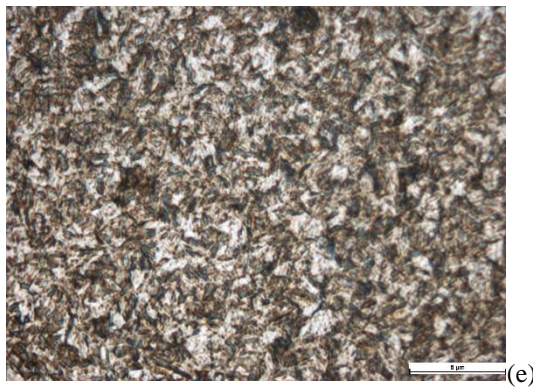
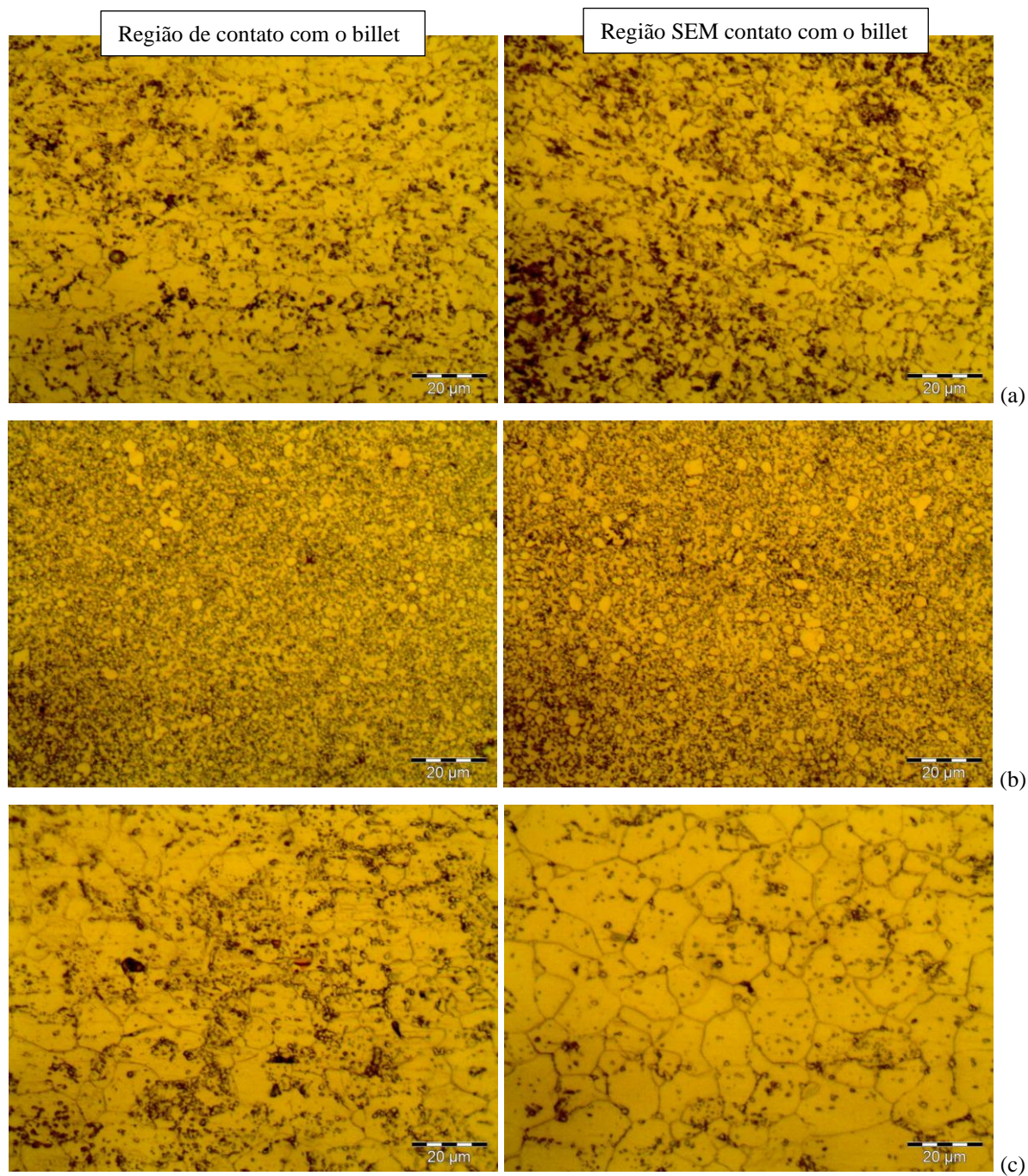


Figura B – 1 Análise metalográfica realizada nas amostras antes do experimento de forjamento (a) DP600; (b) M2; (c) 22MnB5; (d) DC04 e (e) Hardox450®.



## APÊNDICE B2 – Análise metalográfica após experimento de forjamento matriz aberta



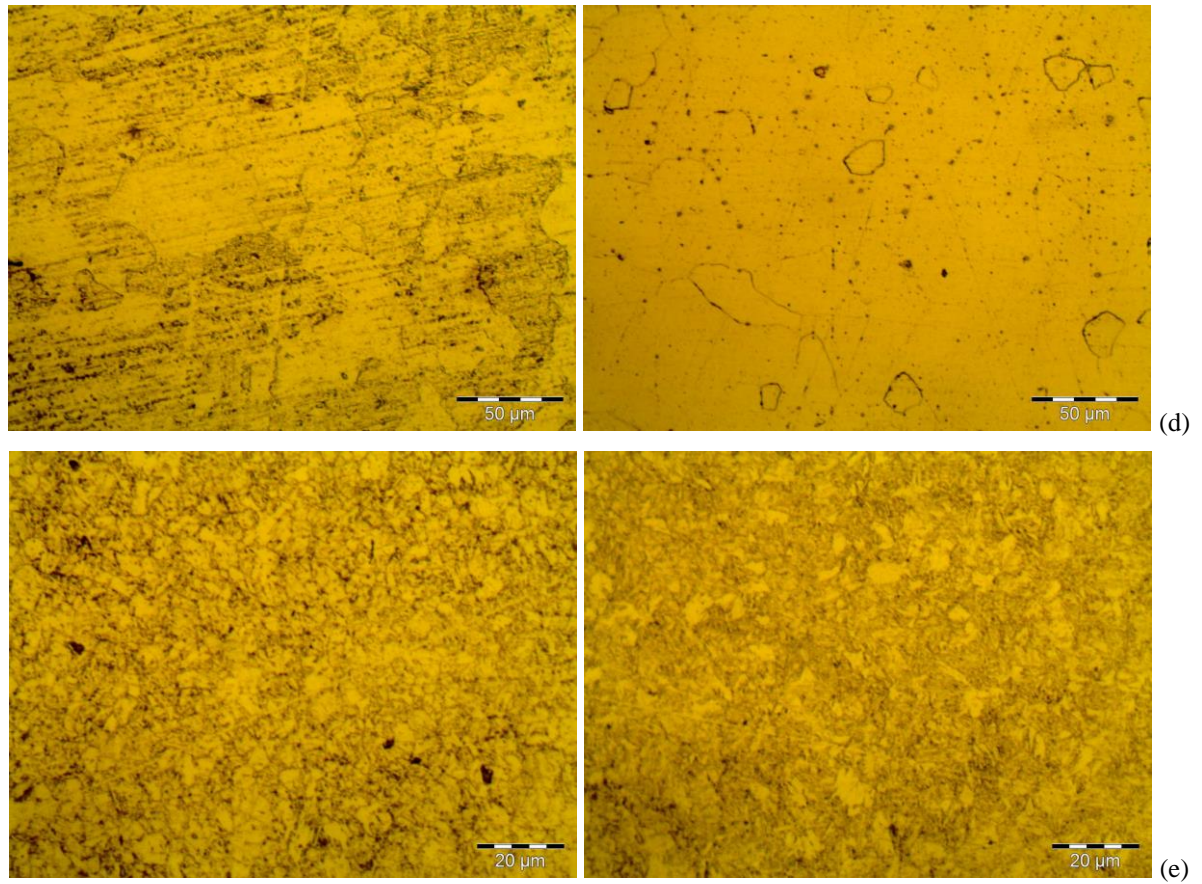


Figura B – 2 Análise metalográfica das amostras de chapas depois do experimento de forjamento em matriz aberta nas regiões COM e SEM contato com o billet (a) DP600; (b) M2; (c) 22MnB5; (d) DC04 e (e) Hardox450®.