

**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

*MARIANA LAGNIER AZEVEDO*

**AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE MÁSCARAS METÁLICAS  
APLICADAS A FERRAMENTAS DE FORJAMENTO A  
QUENTE**

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2020

Mariana Lagnier Azevedo  
Engenheira de Materiais

AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE MÁSCARAS METÁLICAS  
APLICADAS A FERRAMENTAS DE FORJAMENTO A  
QUENTE

Dissertação submetida ao Programa de Pós  
Graduação em Engenharia de Minas,  
Metalúrgica e de Materiais da Universidade  
Federal do Rio Grande do Sul, como requisito  
Parcial à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia, modalidade Acadêmica Área de  
Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ing Lirio Schaeffer  
Coorientador: Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

Porto Alegre

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

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

Coordenador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Vice Coordenador: Profa. Dra. Andréa Moura Bernardes

Lagnier Azevedo, Mariana

AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE MÁSCARAS METÁLICAS APLICADAS A  
FERRAMENTAS DE FORJAMENTO A QUENTE / Mariana Lagnier Azevedo. --  
2020. 79 f.

Orientador: Lirio Schaeffer.

Coorientador: Rafael Menezes Nunes.

Dissertação (Mestrado) -- 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, 2020.

1. Forjamento a quente. 2. Máscaras. 3. Desgaste. 4. Matriz. I. Schaeffer, Lirio,  
orient. II. Menezes Nunes, Rafael, coorient. III. Título.

MARIANA LAGNIER AZEVEDO

AVALIAÇÃO DE DESGASTE DE MÁSCARAS METÁLICAS  
APLICADAS A FERRAMENTAS DE FORJAMENTO A  
QUENTE

Esta dissertação foi analisada e julgada adequado para a obtenção do título de mestre em Engenharia e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Lirio Schaeffer

---

Rafael Menezes Nunes

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Diego Lima - IFSC

Prof. Dr. Mario Wolfart Jr. - IFSC

Prof. Dr. Halston Mozetic - UNIRITTER

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades. Agradeço ao Prof. Dr. Ing Lírío Schaeffer, responsável pela orientação desse trabalho. Também sou grata ao meu co-orientador Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes e a mestre Luana de Lucca de Costa, que apoiaram cada etapa da pesquisa e contribuíram com as revisões do conteúdo.

Agradeço minha família e meus amigos por todo o carinho, amor e força. Sou grata, especialmente, a minha mãe, Maria Alcina, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço e ao meu pai Antônio Cacemiro (in memoriam), que em algum lugar deve estar vibrando com a minha vitória. Obrigada, Bruno, meu marido querido, por me ouvir nos momentos difíceis. Não posso deixar de dedicar um agradecimento especial aos meus sogros Afonso e Simone, grandes parceiros e incentivadores.

E por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte deste processo, o meu muito obrigada.

## RESUMO

Uma nova forma de minimizar o desgaste da matriz foi criado por meio de uma máscara, feita de uma chapa de metal, que visa proteger a matriz dos efeitos dos ciclos de forjamento. Além de ser uma solução mais barata do que a troca da matriz, a máscara é facilmente substituída. Neste trabalho foi estudado a viabilidade de utilização de chapas de aço DIN 22Mn5B utilizadas como máscaras e proteção para matrizes de forjamento a quente. Testes de compressão com um martelo de queda foram realizados para avaliar o desgaste superficial progressivo de uma chapa usadas como máscara protetora. As análises foram feitas através de resultados dos perfis de rugosidade, microdureza e mudanças microestruturais da chapa. Os resultados da perfilometria mostram que a máscara sofreu desgaste abrasivo devido ao aumento da sua rugosidade. As partes não afetadas pela deformação mantiveram os valores de rugosidade durante todo o experimento, com valores menores que  $10\mu\text{m}$ . A área mais afetada da máscara, parte central, após as 300 compressões apresentou valores de rugosidade perto de  $40\mu\text{m}$  para o maiores picos e  $20\mu\text{m}$  para os vales. A microdureza da máscara manteve-se próxima aos valores próprios deste aço, com o maior valor de microdureza de 235 HV e o menor de 188 HV. Na microestrutura, foram encontrados grãos deformados próximo à superfície, indicando início do desgaste por deformação plástica após as 300 compressões. Contudo, no interior da máscara, nem o tamanho de grão nem a microestrutura foram afetados.

**Palavras chave:** *desgaste, matriz de forjamento, máscaras, forjamento a quente.*

## **ABSTRACT**

A new way to minimize or use the die was created by a metal mask, made of a metal plate, which aims to protect a die from the effects of forging cycles. In addition to being a cheaper solution than changing the die, a mask is easily replaced. In this work, the feasibility of using DIN 22Mn5B steel sheets was studied, used as masks and protection for hot forging dies. Compression tests with a few hammer were performed to evaluate or use the progressive surface of a plate used as a protective mask. As analyzes were made through results of profiles of roughness, microhardness and microstructural changes of plate. The results of profiling show that the mask suffers abrasive wear due to the increase of its roughness. As parts not affected by the deformation, they maintain the robustness values throughout the experiment, with values less than 10 $\mu$ m. An area most affected by the mask, the central part, after 300 compressions shows roughness values close to 40 $\mu$ m for the largest peaks and 20 $\mu$ m for the values. A microhardness of the mask remains close to the lower values of this steel, with a greater microhardness value of 235 HV and less than 188 HV. In the microstructure, deformed grains were found close to the surface, with the beginning of wear due to plastic formation after 300 compressions. However, inside the mask, neither the grain size nor the microstructure was affected.

***Key words:*** wear, forging die, masks, hot forging.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 : Fluxograma do trabalho .....	17
Figura 2.1: Processos de Conformação Mecânica – (a) Forjamento, (b) Laminação, (c) Estiramento, (d) Dobramento, (e) Extrusão, (f) Trefilação, (g) Embutimento Profundo e (h) Cisalhamento. ....	19
Figura 2.2 : Processo de Forjamento .....	20
Figura 2.3: Parâmetros de Processo do Forjamento .....	22
Figura 2.4 : Esquema dos ciclos térmicos de forjamento .....	28
Figura 2.5 : Desgaste Abrasivo.....	28
Figura 2.6: Superfície danificada por desgaste abrasivo vista com MEV.....	29
Figura 2.7 : Desgaste Adesivo.....	30
Figura 2.8: Adesão vista no MEV: A seta indica pedaços do outro material que ficou aderida na superfície. ....	31
Figura 2.9: Parâmetros de Rugosidade .....	33
Figura 2.10: Rugosidade média de dez pontos e rugosidade média quadrática .....	34
Figura 2.11: Funcionamento do Perfilômetro Óptico.....	34
Figura 2.12 : Curva Tensão x Deformação Verdadeira aço 22Mn5B a temperatura ambiente, a 650°C e a 800°C por diferentes modelos matemáticos .....	37
Figura 2.13 : Microestrutura 22Mn5B.....	38
Figura 2.14 : Diagrama CCT do aço 22Mn5B. ....	39
Figura 2.15:Dureza Vickers (HV) do aço 22Mn5B sem tratamento.....	40
Figura 3.1 : Montagem da matriz e corpo de prova no martelo de queda.....	42
Figura 3.2 : Dimensões da matriz.....	43
Figura 3.3: Dimensões do corpo de prova e da máscara. ....	43
Figura 3.4 : Dimensões do Martelo de Queda: (a) visão superior da massa do martelo; (b) visão frontal da massa do martelo; (c) corpo do martelo.....	46
Figura 3.5 : Forno Sanchis.....	46
Figura 3.6: Esquema do procedimento experimental: (a) corpo de prova a ser forjado; (b) aquecimento do corpo de prova; (c) colocação do corpo de prova quente no martelo de queda; (d) compressão do corpo de prova; (e) corpo de prova deformado. ....	47
Figura 3.7 : Interferômetro .....	47
Figura 3.8 : Posição das medidas.....	48
Figura 3.9 : Estereoscópio .....	49
Figura 3.10: Gabarito Estereoscopia .....	49
Figura 3.11: Medição da Microdureza .....	50
Figura 3.12: Partes retiradas para análise metalográfica da máscara .....	51
Figura 4.1 : Imagens obtidas na perfilometria do eixo “x”: (a) 50 compressões; (b) 100 compressões; (c) 150 compressões; (d) 200 compressões; (e) 300 compressões.....	53
Figura 4.2 : Imagens obtidas na perfilometria do eixo “y”: (a) 50 compressões; (b) 100 compressões; (c) 150 compressões; (d) 200 compressões; (e) 300 compressões.....	54
Figura 4.3 : Perfil de Rugosidade Média Ra eixo “x” .....	57
Figura 4.4 : Perfil de Rugosidade Média Ra eixo “y” .....	57
Figura 4.5 : Perfil de Rugosidade Total Rt eixo “x” .....	60



Figura 4.6 : Perfil de Rugosidade Total Rt eixo “y” .....	60
Figura 4.7: Rugosidade após 50 compressões no eixo “x” .....	61
Figura 4.8:Rugosidade após 100 compressões no eixo “x” .....	61
Figura 4.9: Rugosidade após 150 compressões no eixo “x” .....	62
Figura 4.10:Rugosidade após 200 compressões no eixo “x” .....	62
Figura 4.11:Rugosidade após 300 compressões no eixo “x” .....	63
Figura 4.12: Rugosidade após 50 compressões no eixo “y” .....	63
Figura 4.13:Rugosidade após 100 compressões no eixo “y” .....	64
Figura 4.14:Rugosidade após 150 compressões no eixo “y” .....	64
Figura 4.15:Rugosidade após 200 compressões no eixo “y” .....	65
Figura 4.16:Rugosidade após 300 compressões no eixo “y” .....	65
Figura 4.17 : Máscara Protetora. (a) 50 compressões; (b) 100 compressões; (c ) 150 compressões; (d) 200 compressões. ....	66
Figura 4.18 : Perfil de Microdureza.....	68
Figura 4.19 : Metalografia aumento 200x: (a) não sofreu compressão (parte não afetada); (b) sofreu compressão (centro da máscara) .....	68
Figura 5.1: Relação intensidade qualitativa do desgaste e rugosidade.....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: composição química em peso do Aço ABNT 1045.....	43
Tabela 3.2: Propriedades do aço ABNT 1045.....	43
Tabela 3.3: composição química em peso do Aço DIN 22Mn5B.....	43
Tabela 3.4: composição química em peso do Aço ABNT H13.....	44
Tabela 4.1: Valores de Rugosidade Ra eixo “x” .....	55
Tabela 4.2: Valores de Rugosidade Ra eixo “y” .....	56
Tabela 4.3: Valores de Rugosidade Total Rt eixo “x” .....	58
Tabela 4.4: Valores de Rugosidade Total Rt eixo “y” .....	59
Tabela 4.5: Distribuição de Microdureza .....	67

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	American Iron and Steel Institute
BRAGECRIM	Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura
CP	Corpo de Prova
CVD	Deposição química em fase vapor
HV	Microdureza Vickers
IBF	Instituto de Conformação Mecânica
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
LM	Linha Média
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PVD	Deposição física de vapor
RWTH	Universidade Técnica de Aachen

## LISTA DE SIMBOLOS

$\varnothing$	Diâmetro [mm]
$\varphi$	Deformação Verdadeira
Ra	Rugosidade Média [ $\mu\text{m}$ ]
Rq	Rugosidade Média Quadrática [ $\mu\text{m}$ ]
Rt	Rugosidade Total [ $\mu\text{m}$ ]
Rz	Rugosidade Média de Dez Pontos [ $\mu\text{m}$ ]
d	Distância do centro da máscara [mm]
l	Comprimento [mm]

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1	CONFORMAÇÃO MECÂNICA .....	18
2.2	PROCESSO DE FORJAMENTO .....	20
2.3	PARÂMETROS DO PROCESSO.....	22
2.3.1	Temperatura do Forjamento .....	22
2.3.2	Considerações sobre o Atrito no Processo de Forjamento .....	24
2.4	DEFEITOS EM PEÇAS FORJADAS .....	25
2.5	MATRIZ DE FORJAMENTO .....	26
2.5.1	Desgaste da Matriz .....	27
2.5.2	Métodos de Proteção Superficial.....	34
2.5.3	Máscaras de Proteção .....	36
2.5.4	Projeto BRAGECRIM.....	40
3.	MATERIAIS E METODOLOGIA .....	42
3.1	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	42
3.2	MATERIAIS.....	44
3.3	METODOLOGIA.....	45
3.3.1	Compressões.....	45
3.3.2	Perfilometria .....	47
3.3.3	Estereoscopia .....	48
3.3.4	Distribuição da Microdureza .....	49
3.3.5	Metalografia.....	50
4.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	52
4.1	COMPRESSÕES .....	52
4.2	PERFILOMETRIA .....	52
4.2.1	Imagens da Perfilometria.....	52
4.2.2	Rugosidade Média (Ra) .....	54
4.2.3	Rugosidade Total (Rt) .....	57
4.2.4	Perfil de Rugosidade.....	60
4.3	ESTEREOSCOPIA.....	65
4.4	DISTRIBUIÇÃO DE MICRODUREZA.....	66
4.5	RESULTADOS DA METALOGRAFIA .....	68

5.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	69
5.1	COMPRESSÕES.....	69
5.2	PERFILOMETRIA.....	69
5.2.1	Rugosidade Média (Ra).....	69
5.2.2	Rugosidade Total (Rt).....	70
5.2.3	Perfil de Rugosidade.....	70
5.3	ESTEREOSCOPIA.....	71
5.4	DISTRIBUIÇÃO DE MICRODUREZA.....	72
5.5	MICROESTRUTURA.....	73
6.	CONCLUSÃO.....	74
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	75
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à alta competição entre os produtores de forjados, além do preço, a qualidade dos produtos forjados oferecidos é um fator cada vez mais levado em conta na escolha de um fornecedor. A fabricação sem defeitos de forjados com formas complicadas tais como bielas, roscas sem fim, paletas, alavancas, etc. que satisfazem as expectativas de alta qualidade dos clientes, requer muita experiência das forjarias (AHN et al., 2016; BARRAU et al., 2003) .

O forjamento a quente é um processo de conformação de metal no qual os materiais são aquecidos a altas temperaturas, geralmente acima de 1000°C, e são moldados usando matrizes de alta precisão geométrica. Esta operação complexa é caracterizada pela velocidade da deformação, força de forjamento e temperatura, sendo a qualidade do produto e a produtividade do forjamento dependente, dentre outros aspectos, da qualidade das matrizes. A temperatura de forjamento, selecionada para otimizar o processo, é um dos principais fatores críticos na fabricação de produtos. Como resultado da alta temperatura de trabalho e das cargas necessárias para deformar o material na forma desejada, a matriz vai inevitavelmente deteriorar-se durante o processo.

No forjamento a quente, devido ao contato da matriz com o material a ser forjado a uma elevada temperatura, as superfícies da ferramentas sofrem drásticas mudanças durante esses ciclos; as ferramentas aquecem devido à deformação do material e à elevada temperatura do mesmo e, em seguida, antes da conformação da nova peça, já sofre resfriamento (BARRAU et al., 2003). Uma desvantagem do processo de forjamento a quente é que as ferramentas são expostas a altas tensões térmicas e mecânicas. Essas tensões causam a falha das ferramentas devido ao desgaste, à fadiga térmica e a fadiga mecânica. As ferramentas então devem ser trocadas após um certo tempo de uso (LEE; KIM; KIM, 2003). A vida útil das matrizes é uma consideração importante do ponto de vista da redução de custos associada à substituição e manutenção de ferramentas (CHOI; GROSECLOSE; ALTAN, 2012).

No processo de forjamento, a vida útil das ferramentas é afetada por uma combinação complexa de altos esforços mecânicos e térmicos. Os esforços mecânicos são devidos aos repetitivos impactos sofridos pela matriz durante o forjamento. Já os esforços térmicos se devem a tensões geradas pelo contato cíclico da matriz e o material que está sendo forjado a uma temperatura elevada (HAWRYLUK; JAKUBIK, 2016). Deste modo, o método de

falha que ocorre predominantemente nas matrizes de forjamento a quente é o desgaste da superfície de contato matriz-forjado, representando mais de 70% da falha total de matrizes de forjamento a quente (HAWRYLUK; JAKUBIK, 2016; LEE; KIM; KIM, 2003). O desgaste é causado por uma ligação física entre a peça de trabalho quente e a matriz, e uma diminuição da dureza.

O material da matriz é especialmente sujeito a fadiga de baixo ciclo de alta temperatura e fadiga termomecânica. Deste modo, as matrizes utilizadas no forjamento a quente geralmente são de aços série H, especialmente H13, já que estes possuem propriedades capazes de suportar as altas cargas e temperaturas de forjamento. O desgaste de ferramentas e matrizes é um problema comum e a alternativa mais comumente utilizada é a realização de tratamentos térmicos seguida da aplicação de revestimentos, tais como: Nitretação, PVD, CVD, entre outros.

Neste contexto, um projeto de cooperação internacional foi iniciado em 2014 entre os países do Brasil e Alemanha intitulado “Evaluation of Sheet Metal Covers to Improve Tool Life in Forging”. Este projeto é parte da Iniciativa Brasil-Alemanha para Pesquisa Colaborativa em Tecnologia de Manufatura (BRAGECRIM), realizado em parceria entre o Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o Instituto de Conformação Mecânica (IBF) da Universidade Técnica de Aachen (RWTH), Alemanha. O principal objetivo deste projeto é desenvolver uma proteção, feita com uma máscara metálica, para as matrizes de forjamento. Deste modo, a vida útil da matriz de forjamento seria aumentada, já que a máscara metálica sofreria o desgaste no lugar da matriz, e a troca da máscara desgastada é mais rápida e não exige parada da produção para sua troca.

Em matrizes aplicadas a processos de forjamento uma nova alternativa em relação as técnicas convencionais. Esta alternativa consiste na aplicação de máscaras na matriz, estas máscaras consistem em uma chapa de aço de alta resistência aplicada diretamente a matriz. A grande vantagem da aplicação dessas máscaras é o baixo custo da máscara aliado a facilidade de manutenção e troca, mantendo a superfície da matriz livre de desgaste. O princípio desta técnica é a fabricação de uma matriz com uma cavidade para aplicação desta máscara, assim que um certo ciclo de peças é forjada na matriz e a máscara sofre algum tipo de dano, rapidamente ela é substituída por outra, tornando o processo de



set-up rápido e de baixo custo. Além disso, pode-se utilizar materiais com menor custo na máscara (LUO et al., 2017).

Assim, uma previsão precisa do comportamento do desgaste torna-se um requisito cada vez maior no processo de forjamento, começando pela superfície de contato para os dois lados e avaliando as distribuições de desgaste que são extremamente não uniformes. Desta forma, o principal objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade de utilização de aço 22Mn5B como máscara protetora sobre matrizes de forjamento a quente. Assim, são realizados testes de compressão sobre uma matriz protegida pela máscara metálica e a cada 50 compressões é analisado o perfil de rugosidade média da máscara ( $R_a$ ) e, ao final de 300 compressões, são analisadas a microdureza e a microestrutura da máscara. O fluxograma mostrado na Figura 1.1 apresenta as principais etapas deste trabalho.

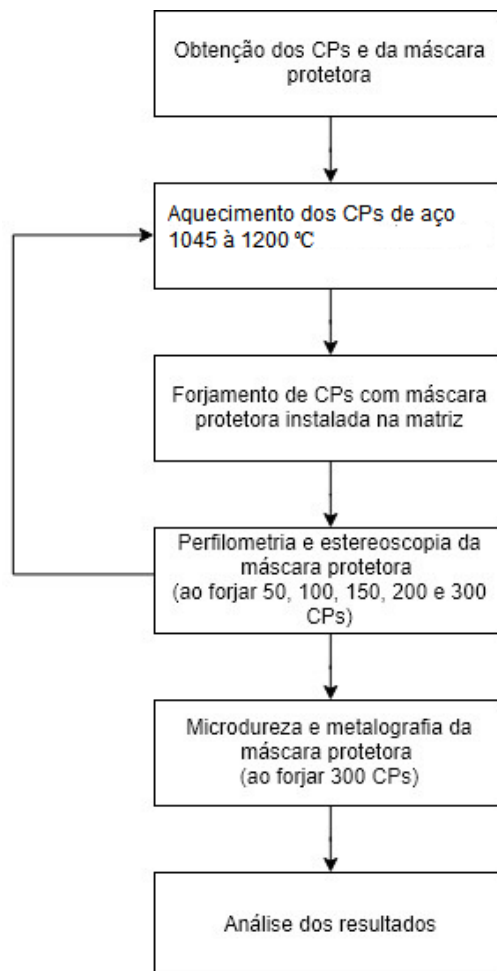


Figura 1.1 : Fluxograma do trabalho

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a conformação mecânica de qualquer material é necessária à avaliação da trabalhabilidade desse material, já que ela está relacionada com a capacidade que um material de ser deformado sem que ocorra o aparecimento de trincas. A trabalhabilidade ou conformabilidade de um material não depende somente das características do material, mas também das características do processo de conformação tais como a velocidade, temperatura, atrito e taxa de deformação (DIETER, 1998).

Quanto às características inerentes do material, pode-se afirmar que de maneira geral, os metais que possuem maior ductilidade, ou seja, possuem uma resistência maior para suportar esforços mecânicos que irão levar a deformação plástica do mesmo, possuem uma capacidade maior de ser conformados mecanicamente (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Assim, é necessário saber as características do processo e dos materiais envolvidos para a realização de qualquer processo de conformação mecânica. Neste caso, os parâmetros e características do processo de forjamento a quente e a avaliação de seus componentes estão expostos nesta seção.

### 2.1 CONFORMAÇÃO MECÂNICA

No processo de conformação mecânica é extremamente importante o controle do processo para o realce das propriedades mecânicas desejadas. Para isso, é preciso que o controle do encruamento no material, além da temperatura e taxa de deformação. Os processos de conformação mecânica podem ser classificados quanto ao tipo de esforço aplicado sendo eles processos de compressão indireta, processos de compressão direta, processos do tipo trativo, processos de dobramento e processos de cisalhamento como mostrado na Figura 2.1.

Considerando que a conformabilidade é extremamente influenciada pelo processo de conformação pelo qual o material está sendo submetido, sabe-se que o comportamento do material irá depender do estado de tensões de cada parte do sólido pelo qual ele é composto (HOSFORD; CADDELL, 2007). Desta maneira, pode-se avaliar a influência do atrito na deformabilidade do material. O atrito irá determinar a quantidade de força a ser aplicada para que o material seja conformado, podendo assim, alterar as condições de

conformação. Do mesmo modo, a velocidade influencia na maneira na qual o material irá ser deformado, colaborando com os diferentes comportamentos do material com diferentes velocidades. A medida que a temperatura aumenta, há um aumento também da conformabilidade do material, devido as melhores condições de plasticidade do material (BRESCIANI FILHO et al., 2011). Deste modo, é de extrema importância avaliar a conformabilidade do material para que se obtenha um produto final de qualidade, com as propriedades e dimensões desejadas (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

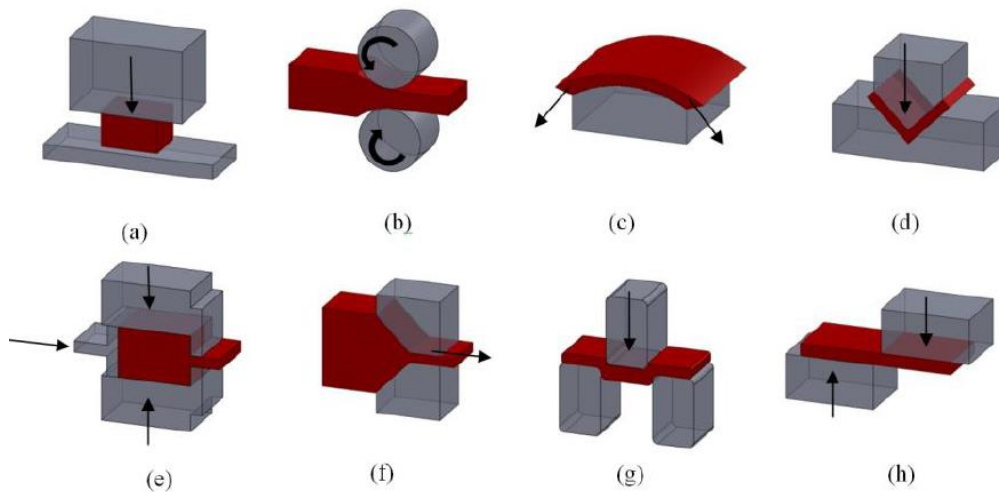


Figura 2.1: Processos de Conformação Mecânica – (a) Forjamento, (b) Laminação, (c) Estiramento, (d) Dobramento, (e) Extrusão, (f) Trefilação, (g) Embutimento Profundo e (h) Cisalhamento.

Fonte: Costa (2014)

Qualquer corpo pode sofrer deformação se estiver sob o esforço de uma ou mais forças até certo limite sem que ele rompa (DIETER, 1998). Esta deformação pode ser denominada elástica ou plástica. Na deformação elástica o material sofre um retorno elástico, ou seja, a deformação não é permanente, além de ser diretamente proporcional ao esforço aplicado. Já na deformação plástica, o material é permanentemente deformado. A transição entre os dois tipos de deformação ocorre quando o valor da tensão de cisalhamento é máximo e ela depende basicamente das condições do material, da temperatura e da velocidade. O limite de deformação máximo vai aumentar se ocorre esforço de compressão juntamente com o de tração já que as tensões de compressão

provocam a ruptura do material depois do que as tensões de tração. A temperatura também provoca o aumento do limite de deformação máxima. Ao contrário da temperatura e das tensões de compressão, o aumento da velocidade diminui o limite de deformação máxima, pois, faz com que o material tenha maior tendência a uma ruptura frágil (SCHAEFFER, 2009).

A deformação do material se deve as forças que levam o material ao escoamento sendo estas relacionadas diretamente com a velocidade das partículas, pressão necessária para a deformação e a distribuição da tensão. Para que a conformação leve a deformação do material sem causar fraturas é necessário o estudo de fenômenos tais como o encruamento e a recristalização (DIETER, 1998).

## 2.2 PROCESSO DE FORJAMENTO

O Forjamento é um dos principais processos de fabricação por Conformação Mecânica. O forjamento é a transformação de um metal em uma forma pré determinada pela(s) matriz(es) através da prensagem ou martelagem, como mostra a Figura 2.2. Esta é a forma mais antiga de transformação dos metais (DIETER, 1998).

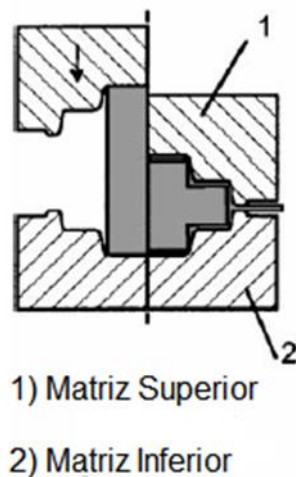


Figura 2.2 :Processo de Forjamento

Fonte: (DOEGE; BOHNSACK, 2000) (adaptado)

Existem várias máquinas de forja capazes de produzir peças que possuem variados tamanhos e formas. A maioria das operações de forja são realizadas a quente, entretanto certos metais podem ser forjados a frio (BRESCIANI FILHO, 2011)

As principais classes de equipamentos de forjamento são os martelos, que deformam o material através do impacto, e as prensas, que comprimem o material a uma baixa velocidade, quando comparadas aos martelos.

O sistema tribológico em forjamento a quente inclui uma peça pré-aquecida com temperatura superior a 1000°C, um lubrificante e uma ferramenta de forjamento para deformação plástica da peça quente. Assim, a matriz do forjamento a quente é sujeita a repetidas cargas mecânicas e térmicas, que finalmente causam grandes danos na superfície da ferramenta devido a erosão, deformação plástica, fadiga térmica e mecânica. (PANJAN et al., 2002) Na conformação a quente, quedas de temperaturas ocorrem devido ao esfriamento da peça em contato com o ar e com a ferramenta. A perda da temperatura decorrente da transmissão de calor para a ferramenta é mais importante do que a perda da temperatura por radiação. A diferença da temperatura entre a peça e a ferramenta determina a velocidade do esfriamento. Outros fatores que influenciam no esfriamento da peça por transmissão de calor são, por exemplo, o tempo de contato entre a peça e a ferramenta e o tamanho da superfície da peça.

As forjarias tem focado em melhorias dos processos de forjamento a quente em alguns quesitos. Uma das formas de melhoria do processo seria diminuir as etapas de deformação que ocorrem no forjamento. Além disso, é necessário que os produtos forjados tenham uma precisão maior o que reduziria outro problema com o grande número de operações de usinagem (DOEGE; BOHNSACK, 2000).

Os principais tipos de forjamento são o forjamento de matriz aberta e o forjamento de matriz fechada. As principais diferenças entre o forjamento de matriz aberta e o forjamento em matriz fechada são que as ferramentas utilizadas consistem de um punção superior e um punção inferior além da superfície em que o material é forjado. Este tipo de forjamento requer tolerâncias amplas de usinagem na superfície da peça e permite uma maior imprecisão dos parâmetros do processo se comparados ao forjamento de matriz fechada. No forjamento de matriz fechada a matriz é fechada pelo punção ou por elementos de fechamento adicionais, que são necessários para fornecer a pressão de fechamento necessária durante a deformação (DOEGE; BOHNSACK, 2000).

## 2.3 PARÂMETROS DO PROCESSO

O processo de forjamento exige que alguns parâmetros sejam controlados para a obtenção de um produto com as propriedades e dimensões desejadas. Estes parâmetros estão exemplificados na Figura 2.3. Para a realização deste trabalho foram avaliados alguns fatores que afetam a lubrificação e a durabilidade da matriz como a temperatura e o atrito.

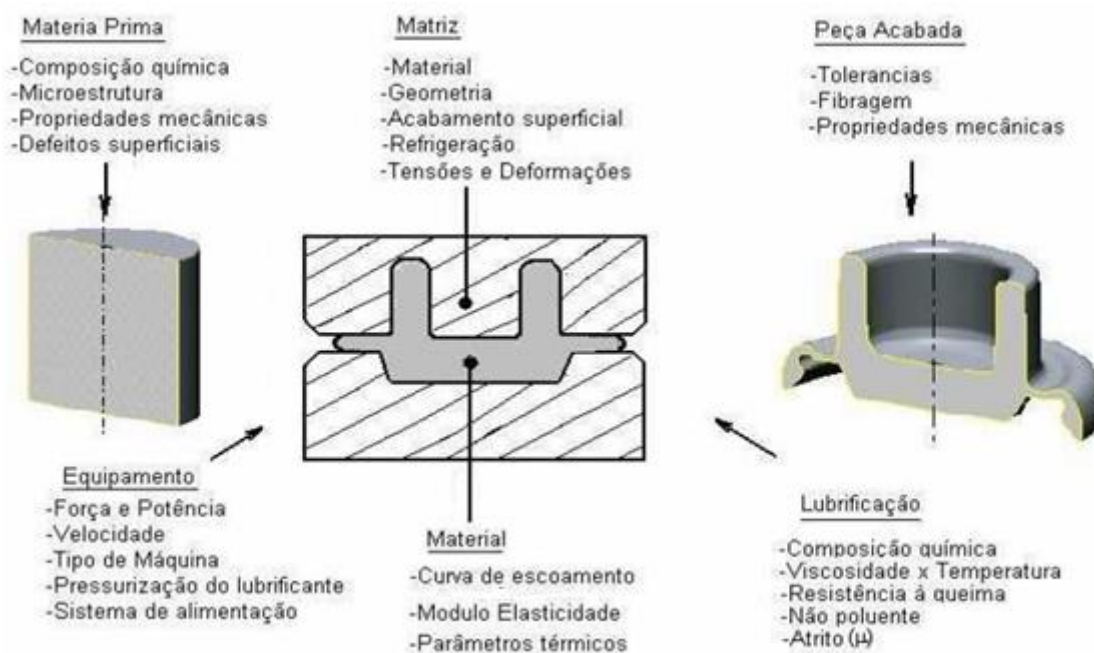


Figura 2.3: Parâmetros de Processo do Forjamento

Fonte: SCHAEFFER (2006)

### 2.3.1 Temperatura do Forjamento

Os processos de conformação são classificados em trabalho a quente e trabalho a frio. O trabalho a quente é definido como a deformação sob condições de temperatura e taxa de deformação nas quais os processos de recuperação e deformação ocorram simultaneamente. No trabalho a frio a deformação realizada em condições nas quais os processos de recuperação não são efetivos.

No trabalho a quente ocorre a eliminação do encruamento e da estrutura distorcida dos grãos produzida pela deformação do material devido a formação de novos grãos como resultado da recristalização. Além disso, a tensão é constante fazendo com que a tensão de escoamento plástico decresça com o aumento da temperatura. Outro fator importante

é que a energia necessária para a deformação é geralmente muito menor para o trabalho a quente do que para o trabalho a frio (DIETER, 1998). A diminuição da tensão de fluxo em altas temperaturas permite a formação com forças de ferramenta menores e, conseqüentemente, equipamentos menores e baixa potência. O trabalho a quente é frequentemente definido como trabalhando acima da temperatura de recristalização de modo que o metal de trabalho recristaliza à medida que se deforma. No entanto, esta é uma visão muito simplificada. As velocidades de deformação de muitos processos são tão elevadas que não há tempo para que a recristalização ocorra durante a deformação. Em vez disso, a recristalização pode ocorrer no período de tempo entre operações repetidas ou após a deformação estar completa, enquanto o material está esfriando até à temperatura ambiente (HOSFORD; CADDELL, 2007).

No trabalho a frio, ao contrário do caso anterior, o encruamento não é aliviado, fazendo com que a tensão aumente com a deformação. Assim, a deformação total é menor no trabalho a frio do que no trabalho a quente, podendo fazer com que os efeitos do trabalho a frio sejam amenizados por tratamentos térmicos (DIETER, 1998).

O trabalho a quente é a etapa inicial na conformação mecânica da maioria dos metais e ligas. Este procedimento não só requer menos energia para deformar o metal e proporcionar maior habilidade para o escoamento plástico sem o surgimento de trincas como também ajuda a diminuir as heterogeneidades da estrutura dos lingotes devido às rápidas taxas de difusão presentes às temperaturas do trabalho a quente. As bolhas de gás e porosidades são eliminadas e a estrutura colunar dos grãos grosseiros da peça fundida é quebrada e refinada em grãos equiaxiais recristalizados de menor tamanho. As variações estruturais devido ao trabalho a quente proporcionam um aumento na ductilidade e na tenacidade, comparado ao estado fundido (DIETER, 1998).

O trabalho a quente possui algumas desvantagens. Devido as altas temperaturas, ocorrem reações superficiais entre o metal e a atmosfera do forno geralmente indesejadas. Trabalho a quente ao ar é geralmente realizado ao ar, causando oxidação do metal da superfície, podendo-se perder uma quantidade considerável de material. Alguns metais reativos podem ser fragilizados pelo hidrogênio, fazendo com que trabalho a quente seja feito em atmosfera. Um bom acabamento superficial é difícil de se obter devido à presença de óxidos que penetram nas superfícies dos materiais. A estrutura e propriedades dos metais trabalhados a quente não são geralmente tão uniformes ao longo da seção

transversal como nos metais trabalhados a frio e recozidos. Já que a deformação é sempre maior nas camadas superficiais, o metal possuirá grãos recristalizados de menor tamanho nesta região (HOSFORD; CADDELL, 2007). O limite inferior de temperatura para o trabalho a quente de um metal é a menor temperatura para a qual a taxa de recristalização é rápida o bastante para eliminar o encruamento quando o metal está submetido àquela temperatura. Uma vez que quanto maior o nível de deformação menor é a temperatura de recristalização, o limite inferior de temperatura para o trabalho a quente diminuirá para grandes deformações. O limite superior de trabalho a quente é determinado pela temperatura em que ocorre o início de fusão ou o excesso de oxidação (DIETER, 1998). Uma desvantagem específica do processo de forjamento a quente é que as ferramentas são expostas a altas tensões térmicas e mecânicas. Essas tensões causam a falha das ferramentas devido ao desgaste e à fadiga termomecânica, levando a troca das ferramentas após um certo tempo de uso. Além disso, os aços de trabalho a quente, normalmente utilizados na fabricação das ferramentas de forjamento, podem sofrer têmpera durante o processo devido às altas cargas térmicas e mecânicas. Os efeitos dessa têmpera por sua vez causam uma maior suscetibilidade ao desgaste (BARRAU et al., 2003).

A temperatura máxima do processo de forjamento, determina a dureza da superfície da ferramenta, enquanto o gradiente de temperatura leva à variação dimensional, gerando tensões e deformações. Durante o processo de forjamento a quente, a superfície da matriz é aquecida parcialmente pela condução do calor da peça de trabalho quente, em parte pela fricção entre a matriz e o blanque. Na camada superficial da ferramenta, a temperatura varia de acordo com: temperatura da peça de trabalho, tempo de contato entre a peça e a ferramenta, pressão de contato e comprimentos de deslizamento, lubrificante, temperatura da base da ferramenta (PANJAN et al., 2002).

### **2.3.2 Considerações sobre o Atrito no Processo de Forjamento**

Conhecer o coeficiente de atrito é importante para o desenvolvimento do processo de forjamento (BUTTON, 2012). O atrito é responsável pelo o desgaste da matriz. Deste modo, o lubrificante tem um papel importante no processo de forjamento. O lubrificante ajuda a resfriar a superfície da matriz, reduzindo o desgaste da matriz por deformação plástica e garantindo uma temperatura de matriz bastante consistente durante processo, além de facilitar a retirada do produto forjado, permitindo o uso de ângulos menores. Para maximizar os efeitos benéficos, um sistema de lubrificação eficaz deve ser relativamente



insensível à temperatura e pressão. Mais importante, deve ser aplicado de maneira uniforme e consistente ao longo de uma execução de forjamento (DOUGLAS; KUHLMANN, 2000).

Lubrificantes são usados em processos de conformação para manter duas superfícies em relativo movimento separadas visando diminuir o atrito e conseqüentemente a geração de calor e desgaste das superfícies de contato (BUTTON, 2012). Com a lubrificação adequada é possível diminuir o desgaste da interface ferramenta-peça, reduzir a possibilidade de peças defeituosas, com dobras ou incompletas, e reduzir as cargas de forjamento – sua função mais importante –, melhorando o acabamento superficial das peças.

Para escolher um lubrificante adequado, é necessário avaliar a temperatura do forjamento, a temperatura da matriz, o tipo de material que será forjado, o equipamento utilizado, a complexidade da forma do forjado, além das condições do ambiente de produção. A temperatura da matriz é uma parte crítica já que para o lubrificante fazer seu papel é necessário que ele forme uma camada uniforme na superfície da matriz. Altas temperaturas na matriz pode causar a formação de uma camada não uniforme e matrizes a baixas temperaturas pode levar a formação de uma camada muito espessa de lubrificante. No forjamento de aços são muito utilizados os lubrificantes a base de grafite, podendo eles ser a base de água ou óleo. Esse tipo de lubrificante é eficaz a uma gama de temperaturas maior do que os demais, além de formar uma camada fluida de lubrificante. Os lubrificantes a base de grafite possuem aditivos que reagem com a superfície lubrificada aumentando o contato com a superfície do material lubrificado (DROZDA; SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS, 1984).

## 2.4 DEFEITOS EM PEÇAS FORJADAS

Uma das vantagens do forjamento a quente é que ele permite o fechamento de vazios internos por causa das tensões compressivas impostas pelo processo, somadas aos fenômenos de recristalização dinâmica, que possibilitam que vazios tornem-se sítios para nucleação de novos grãos (RUDIMYLLA DA SILVA SEPTIMIO, 2015)

Os defeitos de forjamento mais comuns (sub-enchimentos, dobras) são o resultado da geometria imprópria e / ou da posição incorreta do pré-molde. Nos processos de forjamento, o espaçamento apropriado de áreas de seção transversal ao longo do comprimento do eixo reto do pré-molde e a preparação deste último através da formação

é altamente importante para o enchimento correto do molde de cavidade pelo material. Outras causas de defeitos de forjamento incluem: uma temperatura muito baixa do tarugo e as ferramentas mal feitas. A forja é responsável pela maioria das causas de defeitos, mas também há fatores para os quais a forja não é diretamente responsável, no entanto, pode controlá-los e supervisioná-los, a fim de não permitir a deterioração da qualidade dos seus produtos (HAWRYLUK; JAKUBIK, 2016).

Alguns dos defeitos mais comuns encontrados em peças forjadas são as segregações, inclusões não metálicas e stringers. Falhas internas causadas em peças forjadas como trincas (cracks) ou rupturas (tears), além de rachaduras (splits) e fissuras internas são outros tipos de falhas causadas pela falta de manutenção ou pela má sobreposição de matrizes. Também podem ser encontrados defeitos internos como defeitos em “V” (burst) devido a temperaturas excessivas.

## 2.5 MATRIZ DE FORJAMENTO

Para suportar as altas cargas e temperaturas de forjamento a quente, geralmente são utilizados os aços série H para fabricação de matrizes. O tratamento térmico tem relação direta com a resistência ao desgaste de um aço de matriz de trabalho a quente. Ao serem temperados, os aços da série H desenvolvem uma combinação de alta dureza, alta resistência à tração, boa tenacidade à fratura e máxima resistência à fadiga à temperatura ambiente. O aumento da dureza do aço da ferramenta aumenta a resistência ao desgaste e a resistência a quente, mas diminui a resistência ao impacto. (MARASHI et al., 2017).

O material da matriz é especialmente sujeito a fadiga de baixo ciclo de alta temperatura e fadiga termomecânica. Deste modo, as matrizes utilizadas no forjamento geralmente são de aços série H, já que estes possuem propriedades capazes de suportar as altas cargas e temperaturas de forjamento. Devido à sua excelente combinação de alta tenacidade e resistência à trinca por fadiga térmica, o H13 é amplamente utilizado para aplicações de ferramentas de trabalho a quente mais do que qualquer outro aço da série H. H13 oferece alta temperabilidade, excelente resistência ao desgaste e além de tenacidade a quente, o que o torna a primeira escolha para aplicações de trabalho a quente, como ferramentas de fundição sob pressão, ferramentas de extrusão, matrizes de forjamento, lâminas de corte quente, matrizes de estampagem.

O aço ferramenta H13 tem a segunda maior percentagem de cromo em comparação com outras séries H além de quantidades médias de vanádio e molibdênio, tornando-o adequado para o forjamento a quente. O elevado teor de cromo faz com que este aço tenha uma resistência à alta temperatura e oxidação maior se comparado aos outros aços da série H. A presença de molibdênio aumenta a sua temperabilidade e a presença do vanádio aumenta a sua resistência além de facilitar sua fabricação e de melhorar o desempenho em serviço (LUO et al., 2017). A resistência e a dureza do H13 fazem com que ele resista ao craqueamento por fadiga térmica, que geralmente ocorre como resultado do aquecimento e resfriamento cíclico que ocorrem em aplicações de trabalho a quente (JAGOTA; SHARMA, 2018)

Como todos os aços de matriz quente, o H13 é tratado termicamente para obter resistência a temperaturas elevadas. É uma prática comum usar aço de matriz H13 com fase martensítica para aumentar a resistência à temperatura elevada. A fase martensítica obtida pela têmpera é formada quando o aço é aquecido na fase de austenítica e resfriado rapidamente o suficiente para evitar a formação de perlita. Para alcançar a estrutura martensítica, o aço deve passar por um rearranjo estrutural de átomos: a austenita possui um arranjo cúbico de face centrada e a sua estrutura se rearranja para uma estrutura tetragonal de face centrada, estrutura da martensita. Esta transformação é acompanhada por um aumento considerável no volume, assim, o material fica altamente tensionado. Esta é a razão pela qual a martensita exibe maior dureza do que a austenita mesmo para a mesma química (JAGOTA; SHARMA, 2018).

### **2.5.1 Desgaste da Matriz**

O forjamento a quente é uma operação complexa caracterizada por alta velocidade de deslizamento, força de forjamento e temperatura, sendo a qualidade do produto e a produtividade de forjamento dependem altamente das matrizes de forjamento. A Figura 2.4 mostra o ciclo térmico em um processo de forjamento a quente. A partir dele a matriz pode ter sua vida útil afetada. Os fatores que afetam a vida útil das matrizes de forjamento a quente são a fadiga térmica, a deformação plástica e o desgaste.

As condições de trabalho severas do processo de forjamento a quente levam a uma falha prematura e a uma vida útil reduzida de matrizes de forjamento a quente. O modo de falha predominante de matrizes de forjamento a quente é o desgaste das superfícies de matrizes, que representa mais de 70% da falha total de matrizes de forjamento a quente (LUO et

al., 2017). Este desgaste é causado principalmente por uma ligação local entre a peça de trabalho e a matriz, um fenômeno diminuição da dureza devido a temperatura da matriz (AHN et al., 2016). Este fenômeno diminui a resistência ao desgaste da matriz.

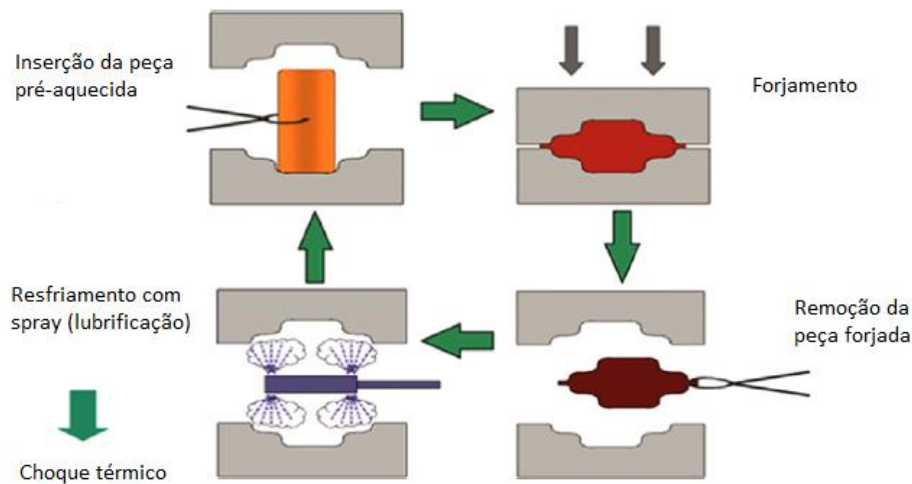


Figura 2.4 : Esquema dos ciclos térmicos de forjamento

Fonte: PASCHKE et al. (2015)

O desgaste e a consequente falha da ferramenta podem ocorrer devido a diversos fatores. Estes incluem a temperatura de forjamento, os tempos de ciclo e o uso de atmosfera protetora durante o aquecimento do material a ser forjado.

Os principais mecanismos de falha podem ser descritos como:

- **Desgaste Abrasivo:** É o resultado da perda de material, principalmente através da separação do material da superfície. Isso ocorre quando há partículas abrasivas soltas ou fixas ou irregularidades salientes (formadas por material mais duro) nas superfícies das partes que interagem, como mostrado na Figura 2.5 (GRONOSTAJSKI et al., 2014).

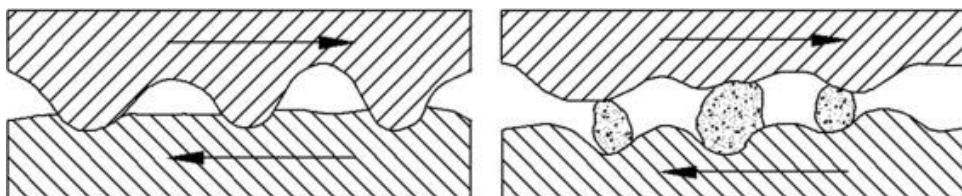


Figura 2.5 : Desgaste Abrasivo

Fonte: GRONOSTAJSKI et al. (2014)

Deste modo, segundo GROSECLOSE et al., 2009, o desgaste abrasivo pode ser definido como um fenômeno de falha de matriz, em que o molde perde a sua geometria original devido a uma ação abrasiva constante das partículas através da superfície da matriz sob altas pressões durante o forjamento.

O desgaste abrasivo pode ser intensificado pelos óxidos formados nas superfícies do material e da matriz durante o forjamento a altas temperaturas. Como resultado deste mecanismo, formam-se ranhuras ao longo da direção na qual o material se desloca, como mostra a Figura 2.6. Sua profundidade e forma dependem principalmente das condições de forjamento. As protuberâncias são particularmente suscetíveis à abrasão e são rapidamente removidas da superfície da ferramenta, o que resulta em perda de material e em uma mudança na geometria da ferramenta.

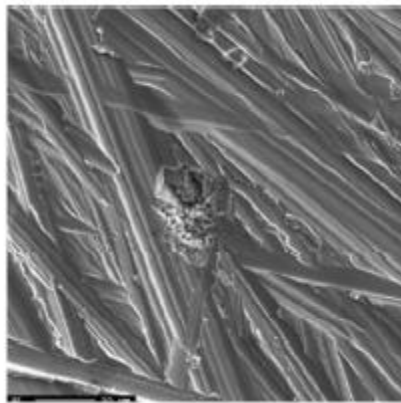


Figura 2.6: Superfície danificada por desgaste abrasivo vista com MEV

Fonte: SOUZA (2016) (adaptado)

O desgaste abrasivo da matriz é influenciado pela resistência ao desgaste do material da matriz, temperatura da superfície da matriz e pela velocidade relativa de deslizamento na interface matriz / material. Ele é responsável pela precisão dimensional e o acabamento superficial dos produtos durante o processo de forjamento a quente. Então, para estimar a vida útil da matriz com base no desgaste abrasivo, é necessário considerar a mudança de dureza da matriz em alta temperatura (KIM; KIM; KANG, 2005)

- Desgaste adesivo: O desgaste adesivo ocorre nas áreas de deformação plástica da camada superficial, especialmente onde há irregularidades na superfície, como mostrado na Figura 2.7.

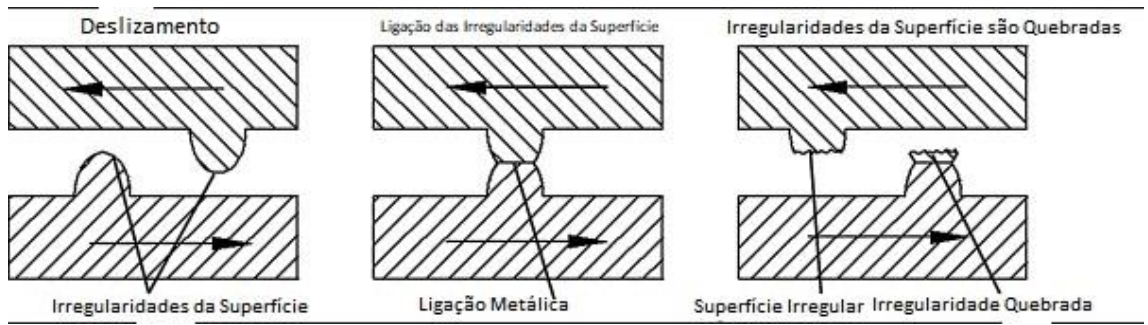


Figura 2.7 : Desgaste Adesivo

Fonte: Gronostajski et al. (2014)

Geralmente, o desgaste adesivo, ocorre sob altas pressões e em velocidades relativamente baixas durante a interação entre materiais similares ou materiais que apresentam afinidade química (condições típicas do processo de forjamento). Sob altas pressões, o material que está sendo forjado se desloca na superfície da ferramenta, removendo o revestimento de óxido cobrindo a superfície do forjado e da ferramenta e expondo as superfícies limpas, como mostrado na Figura 2.8. Isso acontece principalmente em áreas de projeção de irregularidades superficiais (picos de rugosidade superficial). A perda de material que acompanha o desgaste do adesivo é frequentemente atribuída ao desgaste abrasivo. O tamanho das partículas quebradas depende principalmente dos parâmetros do processo de forjamento e das propriedades da camada superficial da ferramenta e do forjamento (GRONOSTAJSKI et al., 2014).

- Fadiga térmica: a fadiga térmica é definida como o surgimento da fissura devido às mudanças repetitivas de temperatura; Especificamente a razão é a diferença de temperatura entre as superfícies da matriz e seu interior. Quaisquer diferenças de temperatura entre a superfície e o interior resultam em tensão causada pela expansão térmica; Quando a tensão resultante excede a resistência à quente do material, é mostrada a produção de camadas de superfície. O ciclo prolongado resultará no início da fissura e no subsequente crescimento de fissuras térmicas.

O desgaste é um processo dinâmico que é a função da geometria da ferramenta, acabamento superficial, propriedades do material, parâmetros de formação, lubrificação e outros fatores do processo. A complexidade de ter uma combinação de

parâmetros do processo e propriedades do material torna difícil prever com precisão a perda de desgaste do ferramental.

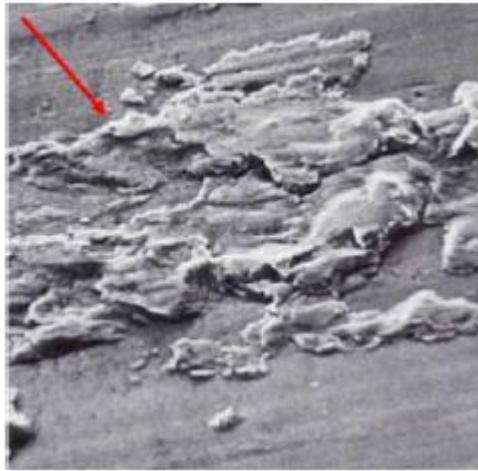


Figura 2.8: Adesão vista no MEV: A seta indica pedaços do outro material que ficou aderida na superfície.

Fonte: SOUZA (adaptado)

As tecnologias que permitem reduzir o desgaste incluem otimização de geometrias de ferramentas, tratamentos melhorados de calor e superfície e otimização de ligas de aço para ferramentas para materiais de matrizes avançados.

Em operações de conformação contínua, tais como o processo de forjamento a quente, o material normalmente é deformado a alta velocidade e a temperatura pode ser aumentada devido à deformação plástica e fricção entre a matriz e a peça. As variações de temperatura durante o processo afetam as propriedades do produto final e da vida útil do molde. Hoje, os custos de fabricação dependem principalmente de como a vida útil pode ser estendida para produtos sem qualquer tipo de defeitos internos e externos durante o processo de forjamento.

Segundo Barrau et al. (2003), os aços de trabalho a quente normalmente usados para as ferramentas de forjamento estão expostos a têmperas devido às altas cargas térmicas e mecânicas. Estas têmperas por sua vez causam uma maior suscetibilidade ao desgaste. Geralmente, as temperaturas de forjamento excedem os 1000 ° C, fazendo com que a temperatura da superfície da ferramenta ultrapasse temporariamente 500 ° C, ou seja, a temperatura de revenimento do aço ferramenta utilizado em matrizes de trabalho a quente. Assim, a dureza da ferramenta é reduzida e os impactos mecânicos durante as operações

de forjamento podem facilmente causar deformação plástica, bem como a abrasão do material da ferramenta.

Além disso, as ferramentas sofrem esforços mecânicos durante o forjamento. Estes esforços podem causar o desgaste da matriz e assim, podem melhorar as vias de difusão da oxidação na matriz. A oxidação também desempenha um papel importante no desgaste da ferramenta. Os danos causados pelo atrito podem ser muito diferentes de acordo com a natureza e as propriedades físicas das superfícies de contato (camadas de metal ou de óxido formado (BARRAU et al., 2003).

Durante o processo de conformação a quente também há a formação e têmpera do processo a quente, o calor é transferido entre o blanque de alta temperatura e a matriz de temperatura baixa. O coeficiente de transferência de calor interfacial entre blanque e a matriz é um importante parâmetro indicando transferência de calor. Este coeficiente impacta diretamente a distribuição da temperatura no blanque e, conseqüentemente, afeta as propriedades mecânicas e a microestrutura da peça formada. Na teoria de transferência de calor, o coeficiente de transferência de calor é um parâmetro para descrever a transferência de calor entre interfaces e considerado como um valor constante em condições ideais. No entanto, uma condição ideal é difícil de conseguir na prática e o coeficiente de transferência de calor é influenciado por muitos fatores como a carga de contato, a temperatura do blanque e da matriz, a rugosidade da superfície e as propriedades termo físicas do material (CHANG et al., 2016).

A avaliação do acabamento superficial é uma das maneiras de avaliar o desgaste, principalmente através da rugosidade. A rugosidade são as irregularidades da superfície de um material que tem relação com vários fatores tais como:

- Precisão: quanto maior a rugosidade de um material mais desgaste ele vai sofrer;
- Resistência a corrosão: quanto maior a rugosidade, mais exposto o material vai estar a corrosão;
- Resistência a fadiga: quanto maior a rugosidade maior a área propensa a concentradores de tensão propensos a formar uma trinca sobre fadiga;
- Lubrificação: quanto maior a rugosidade maior tem que ser a lâmina de lubrificante para evitar o contato entre duas superfícies.



Várias técnicas foram desenvolvidas para analisar a topografia de uma superfície, a mais usada delas é a medição da rugosidade. A rugosidade pode ser representada por alguns parâmetros. A rugosidade média ( $R_a$ ) é calculada através da média aritmética dos valores absolutos das alturas dos pontos em relação à linha média (LM). A linha média é uma linha de referência que divide o perfil de rugosidade, de forma que a soma das áreas superiores seja igual à soma das áreas inferiores. Trata-se do parâmetro mais utilizado como indicador da rugosidade superficial. O parâmetro  $R_t$  é um indicador de amplitude do perfil de rugosidade superficial, ou seja, da altura das reentrâncias e saliências. O  $R_t$  corresponde à diferença encontrada entre o ponto mais alto e o ponto mais baixo ao longo do perfil de rugosidade traçado (DE AMORIM, 2002), como mostra a Figura 2.9.

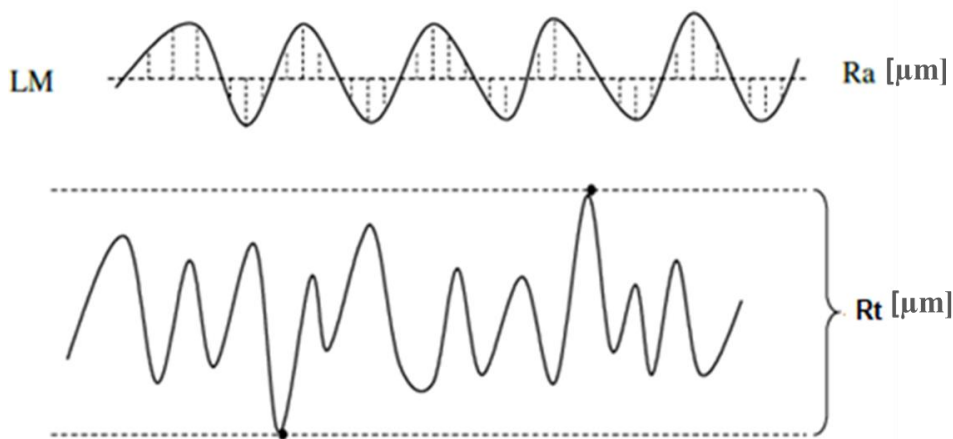


Figura 2.9: Parâmetros de Rugosidade

Fonte: PARRA et al. (2006) (adaptado)

Além da rugosidade média ( $R_a$ ) e a rugosidade total ( $R_t$ ) também são utilizados parâmetros como a raiz quadrada da rugosidade média ( $R_q$ ), a média de dez pontos ( $R_z$ ) dentre outros mostrados na Figura 2.10.

A rugosidade pode ser medida através de um perfilômetro de contato ou um perfilômetro óptico. O perfilômetro de contato desliza sobre a superfície da amostra e dá os resultados em forma de gráficos. Este perfilômetro tem uma desvantagem por apresentar uma medição vertical aumentada em relação a horizontal além da caracterização ser apenas bidimensional. O perfilômetro óptico analisa a topografia em três dimensões através de feixes de luz que refletem na superfície da amostra, como mostra a Figura 2.11. O perfilômetro óptico é mais vantajoso do que o de contato já que não danifica a superfície,

pode analisar superfícies desgastadas, além de conseguir analisar regiões nas quais a agulha do perfilômetro de contato não consegue chegar (SOUZA, 2016).

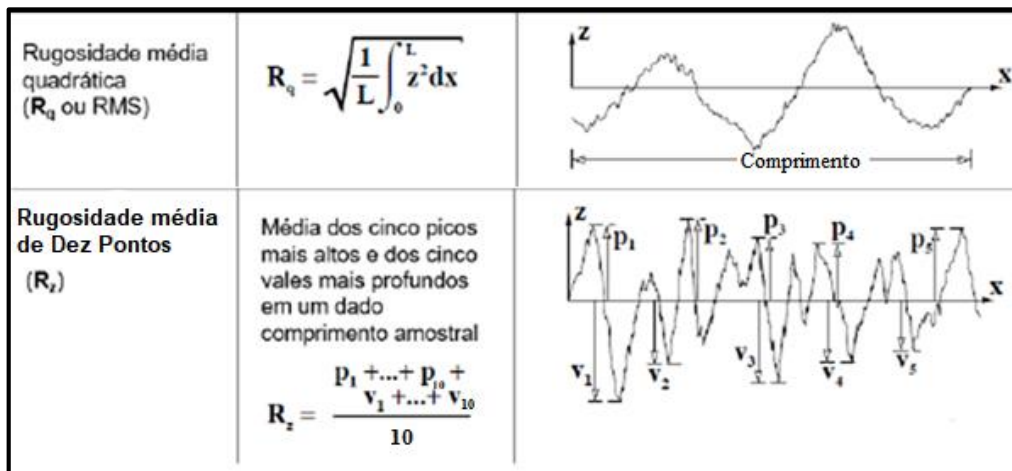


Figura 2.10: Rugosidade média de dez pontos e rugosidade média quadrática

Fonte: SOUZA (2016) (adaptado)

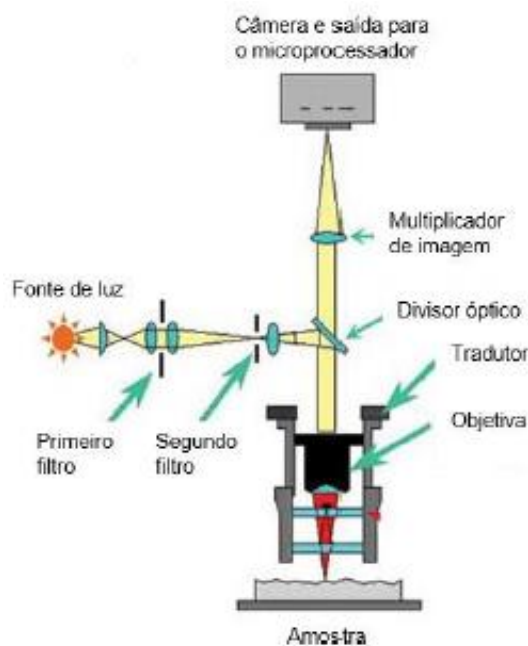


Figura 2.11: Funcionamento do Perfilômetro Óptico

Fonte: SOUZA (2016) (adaptado)

## 2.5.2 Métodos de Proteção Superficial

Os custos de fabricação de produtos forjados dependem de como a vida útil da ferramenta pode ser estendida. Portanto, é importante melhorar as habilidades técnicas nas áreas de

ciência dos materiais e metalurgia, bem como na área de ferramentas para que a vida útil da matriz de forjamento seja aumentada, além da produtividade nas forjarias (KIM et al., 2005) (KIM et al., 2005)(KIM et al., 2005). As matrizes estão sujeitas a tensões (térmicas e mecânicas) que danificam a sua superfície ao longo das sucessivas operações de forjamento (JULIANA ZOTTIS, [s.d.]). O desgaste da superfície da matriz é proporcional ao coeficiente de desgaste entre a matriz e o peça de trabalho, a pressão na superfície da matriz, o movimento relativo entre a matriz e a peça de trabalho e inversa à dureza da matriz (LEE; JOU, 2003).

Como a seleção do material da matriz é importante na proteção da falha, a seleção do material da peça também tem uma enorme influência na vida da ferramenta por causa da interação entre os dois materiais. Deste modo, várias técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos focando na melhoria das condições da superfície visando benefícios na resistência ao desgaste e no comportamento à fadiga dos materiais. A maior parte dos métodos existentes são métodos mecânicos e termoquímicos. Esses processos geralmente criam uma camada rígida com altas tensões residuais de compressão sobre ou perto da superfície das ferramentas afim de protegê-las (FARRAHI; GHADBEIGI, 2006). Algumas dessas técnicas são a nitretação a gás, nitretação a plasma, técnicas de pulverização de plasma, eletrodeposição, CVD, revestimentos PVD, etc (TERČELJ et al., 2006). A nitretação, um dos métodos termoquímicos mais amplamente utilizados, produz uma camada superficial com altas tensões residuais de compressão na superfície. (FARRAHI; GHADBEIGI, 2006). A nitretação é um processo para endurecer a superfície ao difundir o nitrogênio na superfície. Durante a nitretação, dois tipos diferentes de microestrutura são formados na superfície da matriz. A superfície possui uma microestrutura com uma “camada composta” no topo e uma camada de difusão sob ela (LAVTAR et al., 2011). Os revestimentos PVD oferecem uma combinação atraente de alta dureza superficial, boa resistência ao desgaste e estabilidade química. Suas características são determinadas pela composição química e estrutura. Propriedades como a sua tensão residual, microdureza, o coeficiente de expansão térmica e a resistência à oxidação podem ser modificados (PODGRAJŠEK; GLODEŽ; REN, 2015) . Outro conceito para proteger a matriz é a utilização de pastilhas de cerâmica, que são menos suscetíveis a altas temperaturas ou desgaste abrasivo (ROSENSTOCK; SEGEBADE; HIRT, 2015).

Todavia, todos os métodos para reduzir o desgaste da matriz de forjamento trazem algumas desvantagens a longo prazo. No caso da nitretação, a vida em fadiga pode ser reduzida já que as camadas externas possuem microestrutura heterogênea (FARRAHI; GHADBEIGI, 2006). Quando pressões de contato levemente mais altas (cerca de 20 MPa) são aplicadas, a camada de composto geralmente se desprende da superfície da matriz no início do processo de forjamento, e isso geralmente acelera bastante o processo de desgaste (LAVTAR et al., 2011). No caso das partilhas cerâmicas, um dos principais problemas é a inserção de cerâmica e da matriz (ROSENSTOCK; SEGEBADE; HIRT, 2015). Outros métodos utilizados também tem problemas, os quais necessitam que a linha de produção pare para que o problema seja resolvido, levando ao aumento do custo e do tempo de produção.

### **2.5.3 Máscaras de Proteção**

A cobertura da superfície da matriz por uma chapa de metal tem a possibilidade de aumentar a vida útil da matriz, sem ter problemas de aumento de custo e tempo na produção de produtos forjados, já que quando ocorre o desgaste da chapa não é necessário o desmonte de equipamento ou paragem da linha de produção. Assim que ocorrer o desgaste, as coberturas devem ser trocadas. Neste caso, o desgaste abrasivo afeta apenas a superfície da cobertura em vez da matriz, a temperatura e a amplitude térmica da superfície da matriz são reduzidos além de que as tensões mecânicas podem ser diminuídas (ROSENSTOCK; SEGEBADE; HIRT, 2015). O objetivo geral desta proposta é o desenvolvimento de chapas metálicas (die mask) para revestir a superfície da matriz de forjamento. A máscara irá cobrir a superfície da cavidade da ferramenta durante o forjamento em matriz fechada. O desgaste e as deformações resultantes do choque térmico e das altas tensões que a matriz sofre cada vez que uma peça é forjada, será minimizado, já que a máscara absorve os esforços que levam a falha da ferramenta. Para que isso aconteça, é necessário colocar a máscara em uma cavidade para que não haja movimento relativo entre a máscara e a matriz, assim, apenas a máscara é danificada. A máscara tem que ser fina e moldável para poder ser conformada e facilmente encaixar à superfície da cavidade na matriz, além de não causar problemas dimensionais no produto forjado. O material da máscara ainda deve ser resistente para suportar as solicitações do processo.

Aços de alta resistência e aços avançados foram especificamente desenvolvidos para satisfazer a demanda da indústria automobilística. Esses novos tipos de aço já provaram sua superioridade em atender aos requisitos de materiais automotivos: durabilidade, resistência, rigidez, boa absorção de energia e propriedades acústicas, baixo custo de produção em grandes quantidades e possibilidade de reciclagem (GALÁN et al., 2012). O desafio científico para o desenvolvimento do aço foi ajustar a composição química para ter uma austenita facilmente moldável a alta temperatura, um aço temperável, não muito ligado para manter uma boa soldabilidade e um custo aceitável (SCHMITT; IUNG, 2018).

Devido à sua alta resistência e à sua melhor formabilidade, esses aços oferecem alguns novos potenciais em relação à redução de peso. Por exemplo, com a aplicação dos aços 22Mn5B, aços de alta resistência utilizados como para-choques e pilares com uma resistência acima dos 600 MPa, como mostra a Figura 2.12. Esses valores são encontrados quando o aço se encontra no estado em que foi produzido, podendo dobrar esse valores após tratamentos térmicos (MERKLEIN; LECHLER; GEIGER, 2006).

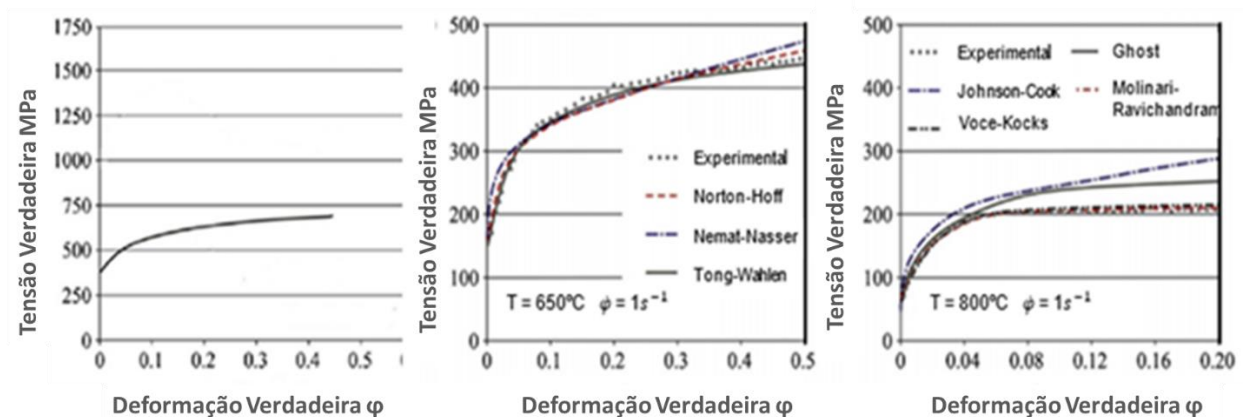


Figura 2.12 : Curva Tensão x Deformação Verdadeira aço 22Mn5B a temperatura ambiente, a 650°C e a 800°C por diferentes modelos matemáticos

Fonte: KARBASIAN; TEKKAYA (2010) (adaptado)

Nos aços 22Mn5B, a quantidade de carbono é então mantida baixa o suficiente, e o boro é adicionado para aumentar a capacidade de resfriamento, ou seja, diminuir a taxa mínima de resfriamento para transformar totalmente austenita em martensita à temperatura ambiente. Um aço 22Mn5B típico possui 0,22% em peso de carbono, 1,3% em peso de

manganês e 0,2% em peso de cromo, que são usados para aumentar a resistência do material temperado que chega valores maiores que 1500 MPa. O cobre, o enxofre e o fósforo são mantidos o mais baixo possível para limitar a quebra da temperatura durante a estampagem. (SCHMITT; IUNG, 2018)

Embora o desempenho dos aços com alto Mn seja muito atraente, esse tipo de liga não é fácil de produzir. Os aços dessa família têm que ser produzidos com extremo cuidado para evitar qualquer adição de fósforo e enxofre, já que as impurezas afetam no seu desempenho. Da mesma forma, o nitrogênio deve ser limitado a quantidades baixas. Durante a fabricação do aço 22Mn5B, o carbono e o manganês interagem de forma a induzir uma importante segregação, originando uma microestrutura heterogênea. Neste ponto, não há transformação de fase, já que o aço se encontra no estado líquido (SCHMITT; IUNG, 2018). Depois de produzido, já laminado e recozido, o aço 22Mn5B possui microestrutura ferrítica/perlítica, como mostra a Figura 2.13, com baixa resistência mecânica (entre 400 e 600 MPa), boa capacidade de estampagem e boa conformabilidade a frio se comparado ao aços normalmente utilizados na estampagem (ANDRÉ OLAH NETO, 2015).

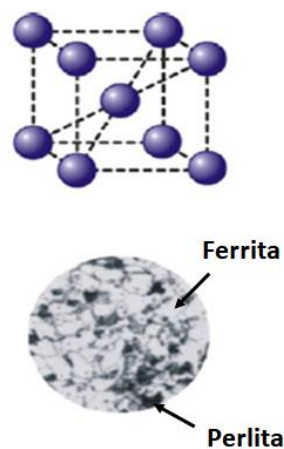


Figura 2.13 : Microestrutura 22Mn5B

Fonte: KARBASIAN; TEKKAYA (2010) (adaptado)

Posteriormente, o material poderá ser temperado, sendo a microestrutura austenítica transformada em microestrutura martensítica. Durante o processo de formação da microestrutura martensítica, devido às alterações microestruturais da austenita na martensita, pode obter-se a resistência desejada do componente de cerca de 1500 MPa (MERKLEIN; LECHLER; GEIGER, 2006). De acordo com o diagrama de transformação

de temperatura de tempo contínuo (TTT), Figura 2.14, uma taxa de resfriamento de pelo menos 27Ks-1 é essencial para evitar a transformação bainítica e alcançar uma microestrutura martensítica completa.

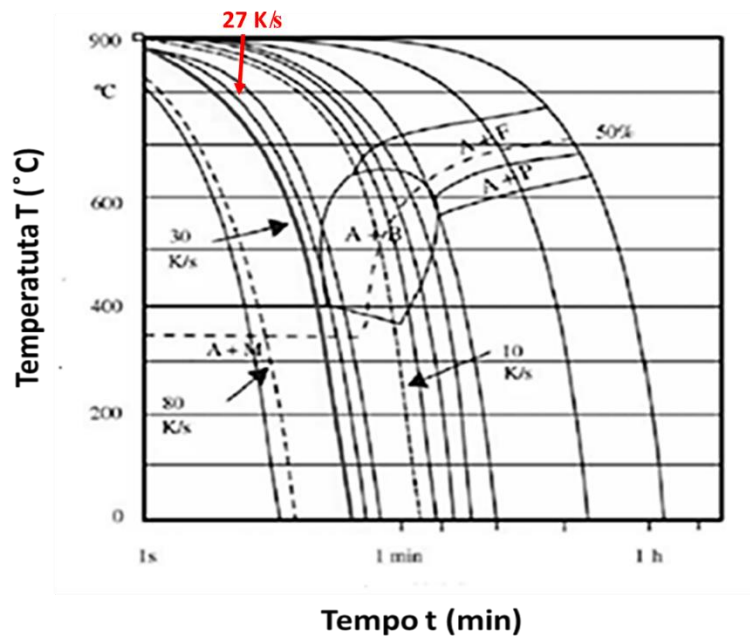


Figura 2.14 : Diagrama CCT do aço 22Mn5B.

Fonte: MERKLEIN; LECHLER (2006) (adaptado)

A temperatura ambiente, o aço 22Mn5B temperado com martensita mostra pouca sensibilidade de deformação. A microestrutura do aço boro formado a quente determina suas propriedades mecânicas. Especialmente, componentes com uma mistura de ferrita e martensita ou bainita e martensita e dão excelentes desempenhos combinados de alta resistência e alongamento (MIN; LIN; MIN, 2013).

Segundo (KARBASIAN; TEKKAYA, 2010), os valores de microdureza Vickers do aço 22MnB5 sem sofrer nenhum tipo de tratamento é por volta de 180HV, como mostra a Figura 5.2.

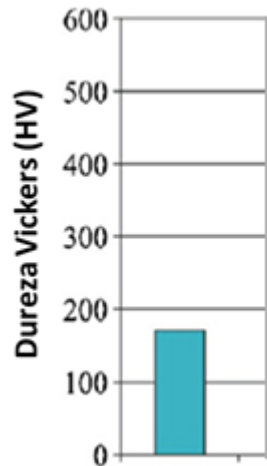


Figura 2.15:Dureza Vickers (HV) do aço 22Mn5B sem tratamento

Fonte: KARBASIAN; TEKKAYA (2010) (adaptado)

#### 2.5.4 Projeto BRAGECRIM

Com o principal objetivo o desenvolvimento de máscaras metálicas produzidas a partir de chapas de aço para o revestimento de matrizes de forjamento a quente este projeto tem importância para o setor produtivo, já que seus resultados podem impulsionar a indústria de forjados nacional melhorando sua competitividade no mercado internacional.

Inicialmente, o projeto visou a caracterização de materiais como DP600, DC04, M2 e 22Mn5B, para serem utilizados como máscara bem como ensaios de forjamento a quente. Nos experimentos em prensa hidráulica realizados com máscaras DP600, M2 e 22Mn5B, ambas com 1,5mm de espessura, apresentaram variações quanto a dureza e a forma da chapa após quatro ciclos de forjamento. As temperaturas das chapas também foram analisadas em função do aumento da força de processo. O forjamento sem a utilização da máscara apresentou valores entre 550 e 570°C, os quais reduziram para 510°C a 525°C quando utilizado o material 22Mn5B, ou seja, a presença da máscara causou um decréscimo na temperatura da matriz. Como o desgaste por fadiga térmica está relacionado com a elevada temperatura, a presença da máscara fez com que o desgaste por fadiga térmica diminuísse na matriz (JULIANA ZOTTIS, 2017).

Simulações numéricas também foram feitas para a análise do comportamento das chapas metálicas como proteção para matrizes de forjamento. Comparando uma matriz com a máscara e uma matriz sem a máscara, as simulações numéricas mostraram uma redução



do pico de temperatura de cerca de 140 K e uma redução da amplitude de temperatura em 37%. O uso de chapas metálicas com materiais de maior resistência, como os aços de alta resistência e baixa liga ou com liga de boro, podem impedir o deslocamento da máscara na matriz (ROSENSTOCK; SEGEBADE; HIRT, 2015).

Outros experimentos estão sendo desenvolvidos para a avaliação da fadiga termomecânica das matrizes protegidas por máscaras metálicas além da caracterização da chapa para forjamentos com geometrias simples. Porém, a caracterização e a avaliação do desgaste e da aplicabilidade de máscaras de 22Mn5B sem tratamentos térmicos ainda não foi executada, justificando a relevância do presente trabalho.

### 3. MATERIAIS E METODOLOGIA

Para a avaliação do desgaste da máscara feita de 22Mn5B, foram feitos experimentos tentando aproximar o máximo possível a realidade das forjarias.

#### 3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental consiste na compressão a quente de corpos de prova cilíndricos utilizando um martelo de queda. A matriz foi coberta com uma máscara e colocada na parte inferior do martelo de queda e lubrificada com Lubrodal, um lubrificante líquido a base de carbono, a cada nova compressão, como mostra o esquema na Figura 3.1. Foram comprimidos um total de 300 corpos de prova, sendo que, ao atingir 50, 100, 150, 200 e 300 compressões foram realizadas análises da máscara protetora em um perfilômetro e em estereoscópio.

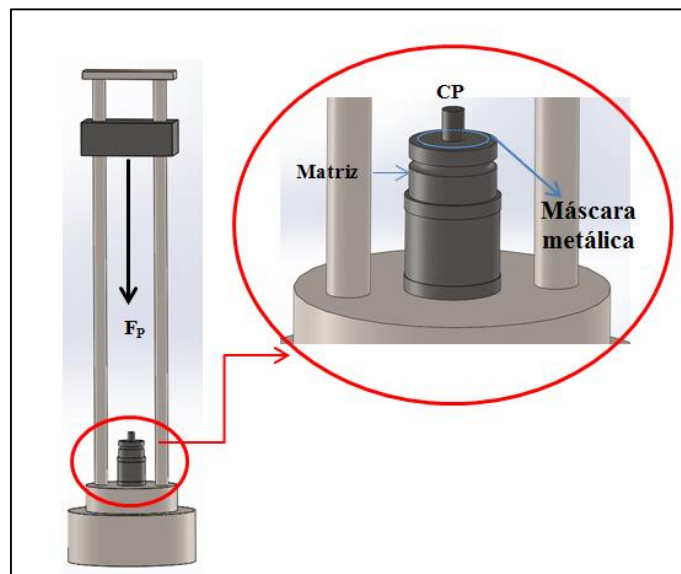


Figura 3.1 : Montagem da matriz e corpo de prova no martelo de queda

Fonte: ZOTTIS (2016)

As dimensões da matriz está ilustrada na Figura 3.2. A matriz tem 100 mm de diâmetro com um rebaixo de 3mm de altura e 90 mm de diâmetro para encaixar a máscara protetora. A altura da matriz é de 60 mm. A matriz está fixada em uma base quadrada de 130 mm de largura e 10 mm de altura.

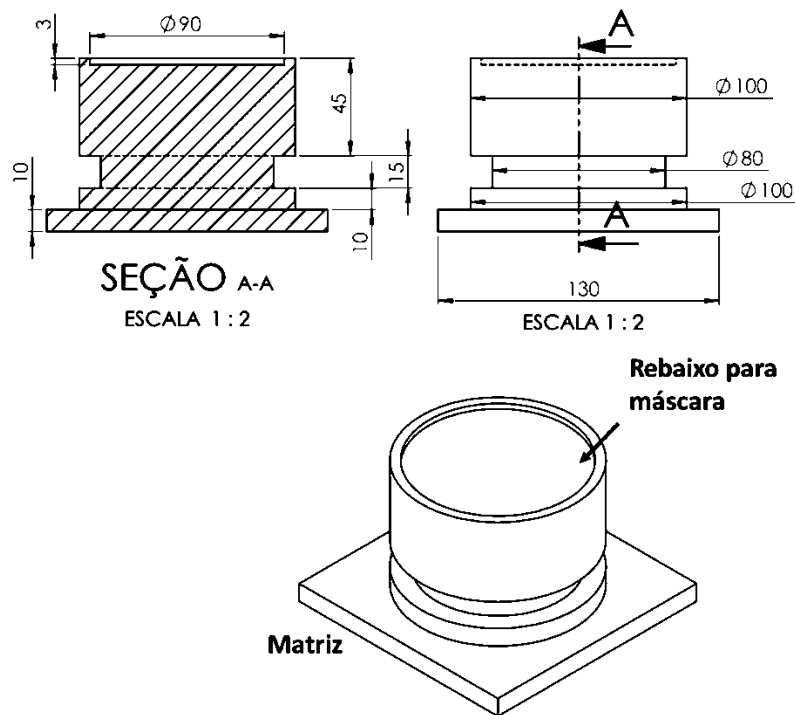


Figura 3.2 : Dimensões da matriz

A máscara protetora da matriz e os corpos de prova tem as dimensões mostradas na Figura 3.3. A máscara tem diâmetro de 80 mm e 1,30 mm de altura. Já os corpos de prova têm 20 mm de diâmetro e 10 mm de altura cada um.

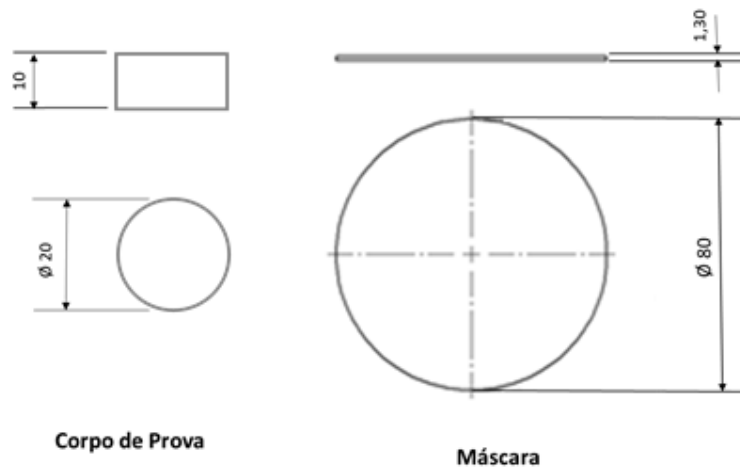


Figura 3.3: Dimensões do corpo de prova e da máscara.

Os experimentos foram realizados da seguinte forma: entre 50, 100, 150, 200 e 300 compressões foram feitas as medidas de rugosidade da superfície da máscara protetora utilizando-se de um interferômetro, além de imagens de microscópio da mesma. Após as

300 compressões, foram analisadas a microdureza e as mudanças de microestrutura da máscara protetora da matriz. Ao final dos experimentos análises foram feitas a partir dos dados obtidos. Deste modo o desgaste e queda de dureza, que são alguns fatores que contribuem para a redução da vida útil das ferramentas, foram analisados para ver a viabilidade da utilização deste material como máscara protetora.

### 3.2 MATERIAIS

A composição química dos materiais utilizados foi verificada em laboratório e apresentada em tabelas.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos de aço 1045, um aço comumente utilizado nesta área, com a composição mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: composição química em peso do Aço ABNT 1045

Aço	C	Mn	P	S
1045	0,43 a 0,50	0,60 a 0,90	0,03	0,05%

As principais propriedades do aço 1045 estão listadas na Tabela 3.2 abaixo.

Tabela 3.2: Propriedades do aço ABNT 1045

Limite de Elasticidade	250 GPa
Limite de Escoamento	310 MPa
Limite de Resistência a Tração	560 MPa
Alongamento	17%

A máscara protetora da matriz foi produzida com aço 22Mn5B, um aço baixa liga que possui elevada resistência ao desgaste. A composição química do 22Mn5B está descrita na Tabela 3.2.

Tabela 3.3: composição química em peso do Aço DIN 22Mn5B

Composição	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Nb
%	0,23	0,21	1,24	0,021	0,002	0,037	0,01	0,002
Composição	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	B	Ca
%	0,004	0,046	0,19	0,02	0,00	0,001	0,0039	0,0013

A matriz foi feita de AISI H13, um dos tipos de aço ferramenta, um material com elevado nível de qualidade, resistente e muito utilizado na fabricação de matrizes de forjamento. A composição do aço H13 está na Tabela 3.3.

Tabela 3.4: composição química em peso do Aço ABNT H13

Aço	C	Mo	Cr	V
H13	0,35	1,5	5,0	1,0

O lubrificante utilizado é líquido feito à base de grafite, lubrodal, e passado na máscara antes de cada compressão. O lubrificante foi passado na matriz e na máscara metálica afim de minimizar os danos com o atrito entre a matriz e a máscara e entre a máscara e os corpos de prova.

### 3.3 METOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consiste em comprimir a quente 300 corpos de prova e avaliar a cada 50 compressões através da perfilometria e da estereoscopia a superfície da máscara. Após os 300 compressões, também foi obtida a microdureza da máscara e analisada a sua microestrutura através da metalografia.

#### 3.3.1 Compressões

Os martelos de queda livre possuem um atuador, cuja a função é elevar o punção a máxima altura permitida pelo equipamento, 1 metro. Neste tipo de martelo a energia de impacto é determinada pela altura máxima do martelo. A pressão máxima é atingida quando o martelo toca a peça, consumindo a energia potencial, deformando assim o corpo de prova. O martelo utilizado tem uma altura máxima de um metro de altura e a massa do martelo é de 40 Kg. As dimensões do martelo utilizados estão especificadas na Figura 3.4.

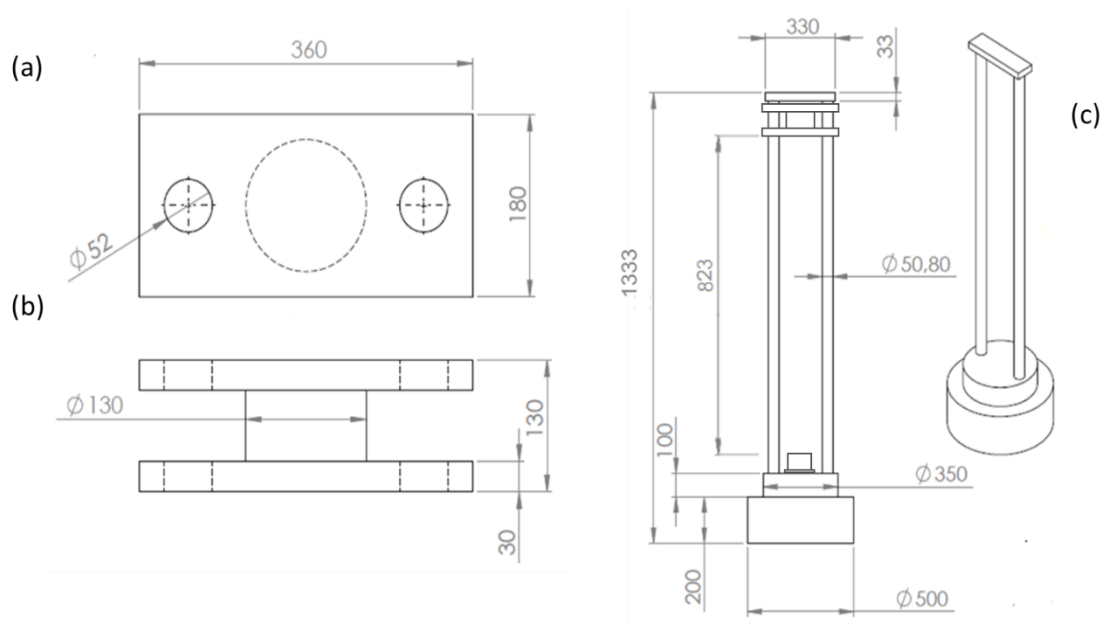


Figura 3.4 : Dimensões do Martelo de Queda: (a) visão superior da massa do martelo; (b) visão frontal da massa do martelo; (c) corpo do martelo

Para a realização de uma série de compressões a quente, foi necessária a utilização de um forno para aquecer os corpos de prova. O forno utilizado tem capacidade para aquecer os corpos de prova até 1200°C. Este forno é elétrico tipo mufla de uma categoria específica desenvolvida para laboratórios da marca Sanchis como mostra a Figura 3.5.



Figura 3.5 : Forno Sanchis

Os corpos de prova foram colocados no forno durante uma hora, para garantir que todas os corpos de prova estivessem aquecidos igualmente. Após esse tempo, os corpos de prova eram comprimidos um a um de acordo com o esquema mostrado na Figura 3.6.

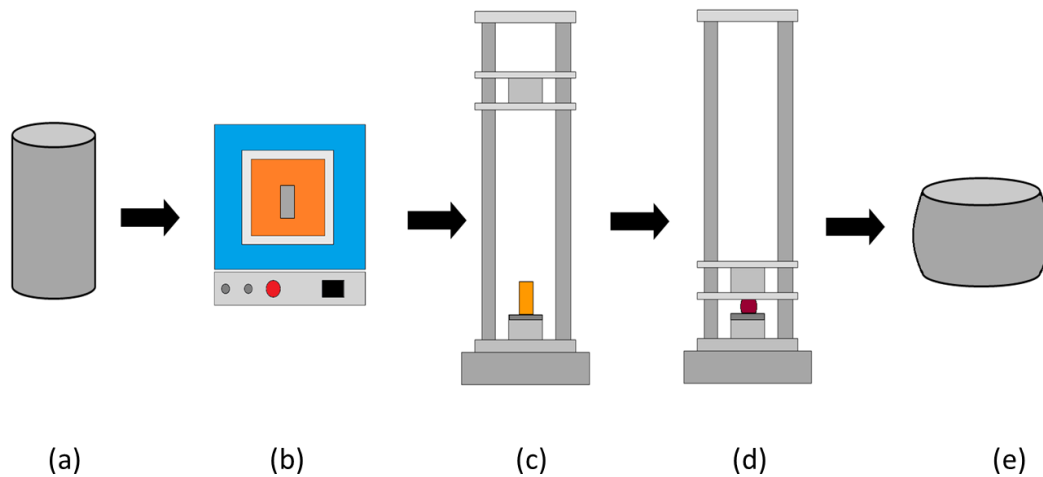


Figura 3.6: Esquema do procedimento experimental: (a) corpo de prova a ser forjado; (b) aquecimento do corpo de prova; (c) colocação do corpo de prova quente no martelo de queda; (d) compressão do corpo de prova; (e) corpo de prova deformado.

### 3.3.2 Perfilometria

A perfilometria foi feita com um interferômetro Bruker Contour GT-K, um microscópio óptico utilizado na metrologia de superfície. Tem capacidades de medição 2D/3D, imagens de alta resolução e a interface mais fácil de usar e avançada. O sistema compatível com medidor permite um acesso a uma extensa biblioteca de filtros e análises previamente programados para uma ampla gama de aplicações de metrologia de superfície. O interferômetro é mostrado na Figura 3.7.



Figura 3.7 : Interferômetro

Para a realização da perfilometria um gabarito foi utilizado para que a distância entre os pontos de medição fosse igual. Foram feitas 11 medidas no eixo x e 11 medidas no eixo

y, como indicado na Figura 3.8. Sempre começando e acabando na área que não entrou em contato com o corpo de prova. O feixe de luz do perfilômetro abrange um diâmetro de 2,5mm, sendo assim, foi analisada uma área que abrange tanto a parte afetada nas compressões quanto a parte não afetada nas compressões, podendo comparar os resultados de ambas as áreas da máscara.

A partir da perfilometria, pode-se obter imagens da superfície da máscara e os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) e rugosidade total ( $R_t$ ), além do perfil de rugosidade da chapa depois de 50, 100, 150, 200 e 300 compressões. A rugosidade média representa a média da altura dos picos e dos vales em relação a linha média, ou seja, é uma média aritmética dos valores de rugosidade da superfície. Este parâmetro é amplamente utilizado no meio industrial, já que ele mostra uma condição que afeta a aparência e a conformabilidade do material. O parâmetro  $R_t$  informa o pico mais alto e o vale mais baixo da amostra.

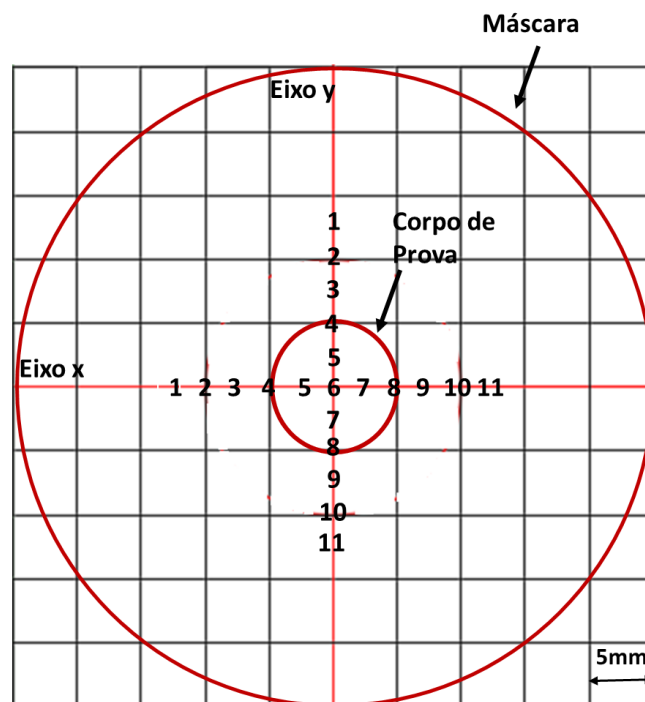


Figura 3.8 : Posição das medidas

### 3.3.3 Estereoscopia

O estereoscópio utilizado é da marca Leica modelo EZ4HD, assim como mostra a Figura 3.9. Ele possui sete LEDs que fornecem luz transmitida, incidente e oblíqua para iluminação e contraste de alta qualidade. A câmera é digital e de alta definição e mostra



a imagem na tela do computador. As imagens feitas foram obtidas com uma lente de aumento de 10 vezes.



Figura 3.9 : Estereoscópio

Foram tiradas 25 fotos da máscara a cada 50 compressões. As fotos seguem a numeração do gabarito na Figura 3.10. As imagens formam uma matriz 5x5 que, ao serem colocadas juntas, formam a imagem da máscara ao final de cada ciclo de compressões.

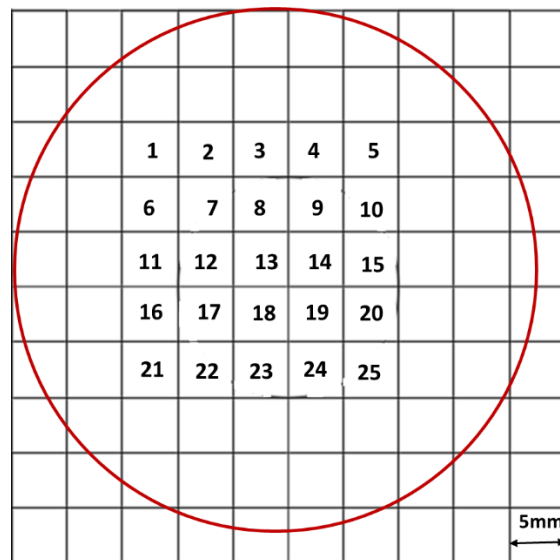


Figura 3.10: Gabarito Estereoscopia

### 3.3.4 Distribuição da Microdureza

Para realizar a microdureza Vickers, a chapa foi cortada por cisalhamento na seção transversal, sendo utilizada apenas uma das metades. Em uma das metades foi retirada uma amostra de 25 mm de largura, abrangendo a parte que sofreu compressão, ou seja, região afetada, com diâmetro de 20 mm, igual do corpo de prova, e parte que não sofreu

compressão, que abrange a região de transição e a região periférica como na Figura 3.11. Após ser embutida em baquelite, foram feitas as microdurezas na espessura da chapa com a carga de 500 gramas com o tempo de 10 segundos. As medidas foram feitas a partir da parte que não sofreu compressão na região periférica em direção da parte que sofreu compressão com distâncias entre elas de 1mm como apresentado no corte transversal da Figura 3.11.

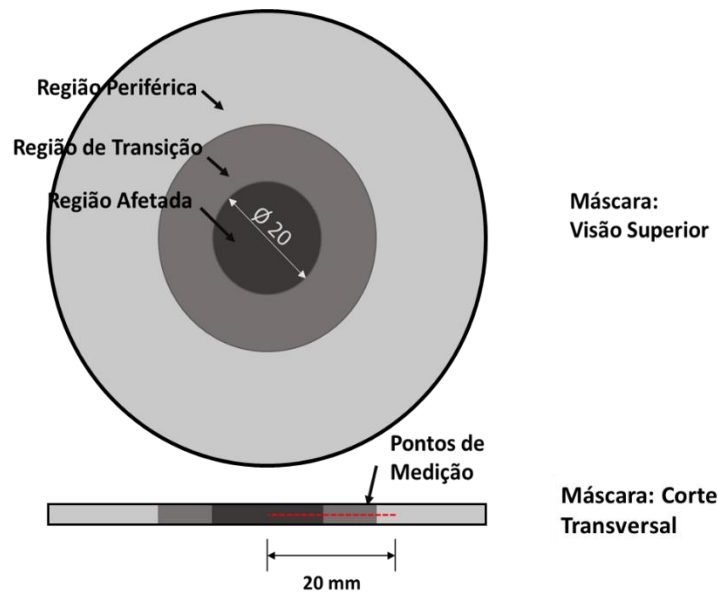


Figura 3.11: Medição da Microdureza

### 3.3.5 Metalografia

A metalografia da amostra foi feita após cortar a máscara utilizada na seção transversal. A partir de uma das metades, foram retiradas amostras da parte comprimida e da parte não comprimida, como mostra a Figura 3.12. A preparação da amostra seguiu desta forma: depois de embutir as amostras em baquelite, para o lixamento das amostras, foram usadas as lixas de granulometria 100, 220, 400, 600 e 1200, sempre girando a amostra em 90° ao mudar a lixa. Após o lixamento, a amostra foi polida utilizando pasta de diamante de 3 microns. Para o ataque, o picral foi preparado com 55ml de detergente, 75ml de água e 3 gramas de ácido pícrico. O ataque foi feito embebendo um pedaço de algodão no ácido e esfregando na amostra por 2 minutos. Foram feitas fotos da microestrutura da amostra da parte forjada e da parte não forjada com aumento de 200 vezes e 1000 vezes. O microscópio utilizado é da marca Olympus modelo GX51.

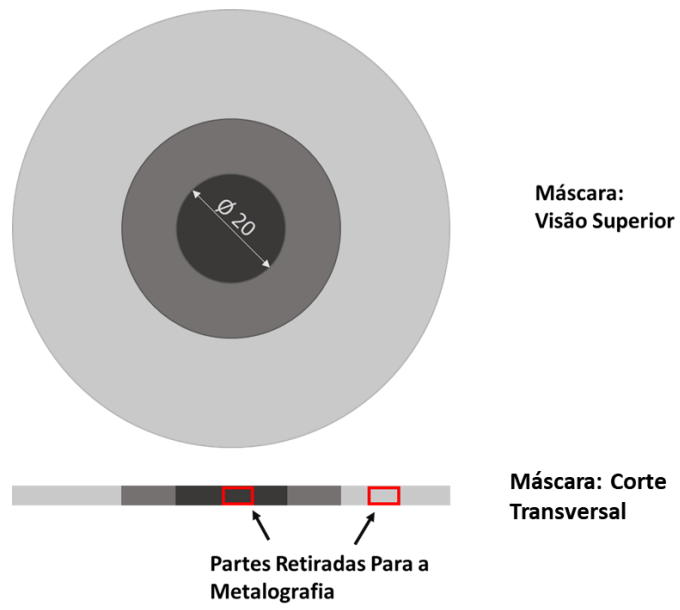


Figura 3.12: Partes retiradas para análise metalográfica da máscara

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A partir da realização das compressões dos 300 corpos de prova foram obtidos os resultados de rugosidade, microdureza e microestrutura da máscara metálica.

### 4.1 COMPRESSÕES

Após a compressão dos corpos de prova, a altura final dos mesmo foi medida e a média encontrada foi de 8,88 mm. A deformação verdadeira média dos corpos de prova foi de 0,12 e o desvio padrão dessas medidas é de 0,012.

### 4.2 PERFILOMETRIA

Na perfilometria são obtidos os resultados relacionados a rugosidade da máscara depois de cada ciclo de compressão. A rugosidade é mostrada através de valores ponto a ponto de rugosidade média (Ra) e rugosidade total (Rt) além de gráficos onde o perfil de rugosidade de toda a superfície analisada. Na perfilometria também são obtidas imagens que mostram a superfície da amostra analisada através de perfis de cores onde eles indicam a presença de vales, picos e áreas não afetadas.

#### 4.2.1 Imagens da Perfilometria

As imagens obtidas pelo perfilômetro mostram o perfil de rugosidade da máscara protetora da matriz. As imagens são obtidas em cada ponto medido de acordo com o gabarito mostrado na Figura 3.8 da seção 3.3.2. Foram obtidas 11 imagens no eixo x e 11 imagens no eixo y que foram colocadas juntas para ilustrar o perfil da superfície medida com o software Image Compose. O esquema das cores representa picos, vales ou áreas pouco afetadas. Os tons de azul mais escuro até azul mais claro, representam vales com valores de até 30  $\mu\text{m}$ . Os tons de verde e amarelo mostram que o relevo teve poucas alterações, sendo protuberâncias com valores próximos a zero  $\mu\text{m}$ . Já as partes em tons avermelhados indicam a presença de picos com valores máximos de 50  $\mu\text{m}$ .

Na Figura 4.1 observa-se as imagens obtidas no eixo x para 50, 100, 150, 200 e 300 ciclos de compressão. Na Figura 4.1(a) pode-se observar o perfil de rugosidade da máscara após 50 compressões. Após 50 compressões a máscara protetora possui poucos picos mais relevantes, sendo a maior parte analisada constituída de relevos de alturas parecidas, perto do nível inicial da peça. Além disso pode-se observar algumas áreas com vales. Já com 100 compressões, Figura 4.1(b), a quantidade de picos é maior em relação a imagem de

50 compressões. A parte analisada parece mais homogênea com relevos da altura inicial da peça, mas ainda pode-se observar muitas partes com vales. A Figura 4.1(c) apresenta as imagens após 150 compressões. Neste caso observa-se que a parte analisada está cada vez com o relevo mais homogêneo, porém com maior número de picos, além deles serem mais expressivos e vales menos profundos. Com 200 compressões pode-se observar na Figura 4.1(d) uma área com picos mais próximos, porém o número de áreas com vales cresceu em detrimento das áreas com relevo próximo a zero presentes com 150 compressões, mostrando uma homogeneidade na rugosidade da peça. Por fim, com 300 compressões, pode-se observar na Figura 4.1(e) que a área de vales continuou aumentando enquanto os picos se concentraram em uma região.

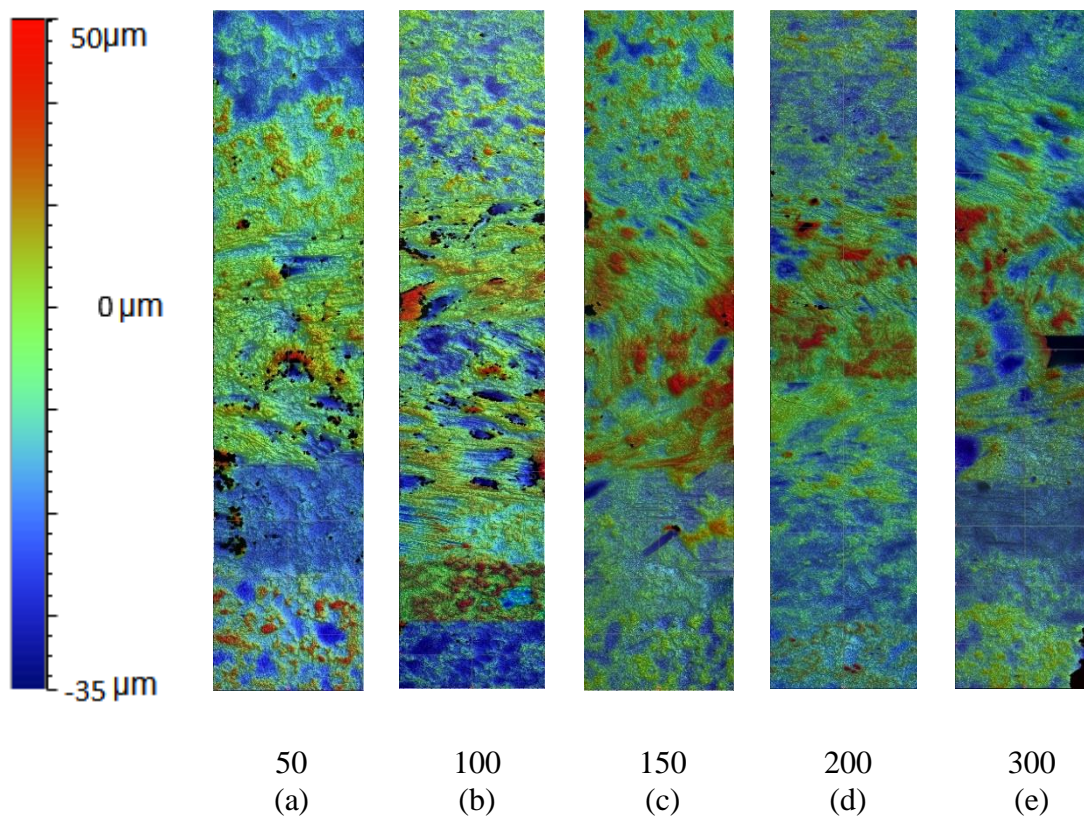


Figura 4.1 : Imagens obtidas na perfilometria do eixo “x”: (a) 50 compressões; (b) 100 compressões; (c) 150 compressões; (d) 200 compressões; (e) 300 compressões

Na Figura 4.2 pode-se observar as imagens obtidas pelo perfilômetro no eixo y após 50, 100, 150, 200 e 300 compressões. Após 50 compressões na Figura 4.2(a), as imagens mostram a presença de picos, além da presença de regiões com a presença de vales. Mesmo com a presença desses picos e vales, a maior parte da peça é constituída por

regiões sem grandes modificações no relevo. Porém após 100 compressões mostrado na Figura 4.2(b), pode-se observar que a quantidade de picos aumentou, além da diminuição do número de vales. Depois de 150 compressões, como mostrado na Figura 4.2(c), surgiu uma região com maior relevo que as outras e mais concentrada do que aconteceu com 100 compressões. Além disso, uma região com vale mais profundo também pode ser observada. Já com 200 compressões, Figura 4.2(d), existem mais regiões com vales e relevo próximo a zero, além da diminuição drástica do número de picos existentes com 150 compressões. Na Figura 4.2(e) pode-se observar a imagem de 300 compressões. Nela podemos ver que houve um aumento significativo de picos e uma diminuição dos vales anteriormente presentes.

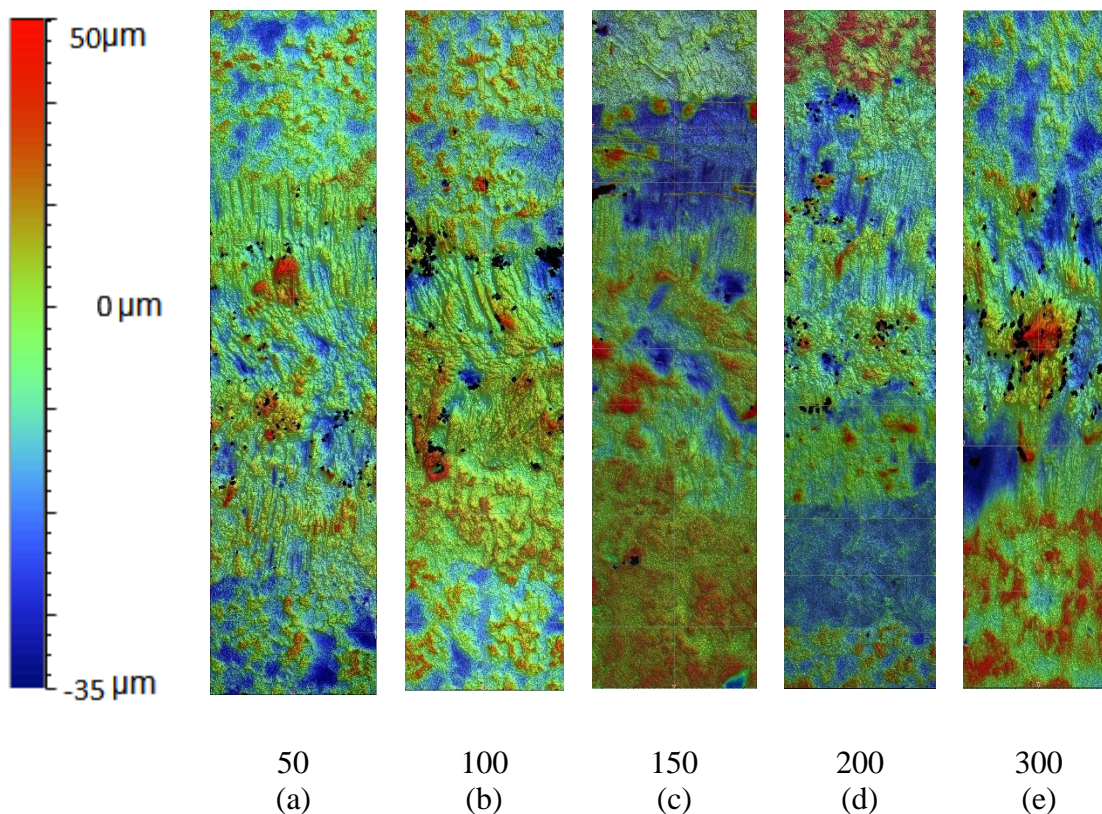


Figura 4.2 : Imagens obtidas na perfilometria do eixo “y”: (a) 50 compressões; (b) 100 compressões; (c) 150 compressões; (d) 200 compressões; (e) 300 compressões

#### 4.2.2 Rugosidade Média (Ra)

A rugosidade média (Ra) é a média de todas as medidas de rugosidade. Neste caso, as medidas foram feitas nas mesmas regiões mostradas no gabarito da Figura 3.6 na seção 3.2. Foram feitas 11 medidas no eixo x e no eixo y após 50, 100, 150, 200 e 300

compressões. As medidas dos perfis de rugosidade foram feitas de acordo com a posição no eixo x e no eixo y, sendo os números de 1 a 11 a posição no eixo da máscara em que cada rugosidade média foi medida.

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos de rugosidade de acordo com a distância do centro da máscara no eixo x mostrada na Figura 3.8. Os valores de rugosidade média (Ra) vão aumentando quanto mais perto do centro da máscara e quanto maior o número de compressões realizadas.

Tabela 4.1: Valores de Rugosidade Ra eixo “x”

Local	Distância do centro da máscara d[mm]	Ra 50 [μm]	Ra 100 [μm]	Ra 150 [μm]	Ra 200 [μm]	Ra 300 [μm]
1	12,5	1,724	1,466	1,376	1,388	1,706
2	10	1,625	1,407	1,778	1,417	7,342
3	7,5	1,251	1,491	2,150	2,524	6,441
4	5	3,774	3,925	5,195	6,389	9,728
5	2,5	4,203	6,381	9,137	6,389	7,083
6	0	5,378	4,522	6,086	6,037	11,992
7	2,5	5,645	4,902	8,221	5,342	4,953
8	5	3,921	5,428	5,289	5,896	2,632
9	7,5	1,928	1,563	3,307	3,829	2,046
10	10	1,647	1,965	1,995	1,513	1,476
11	12,5	1,412	1,461	1,308	1,448	1,367

Na Tabela 4.2 observa-se os valores de rugosidade média (Ra) no eixo y. Assim como no eixo x, os valores de rugosidade média (Ra) vão aumentando quanto mais perto do centro da máscara e quanto maior o número de compressões realizadas.

Tabela 4.2: Valores de Rugosidade Ra eixo “y”

Local	Distância do centro da máscara d [mm]	Ra 50 [μm]	Ra 100 [μm]	Ra 150 [μm]	Ra 200 [μm]	Ra 300 [μm]
1	12,5	1,709	1,434	1,446	1,632	1,574
2	10	1,489	1,640	6,108	3,122	1,485
3	7,5	1,270	1,580	4,250	4,220	4,653
4	5	3,932	4,530	5,110	4,128	8,175
5	2,5	5,763	5,761	7,823	4,929	9,324
6	0	2,803	3,231	8,199	5,064	9,286
7	2,5	5,337	3,458	6,004	10,341	10,462
8	5	4,838	5,730	6,064	5,412	12,386
9	7,5	1,964	1,647	2,090	1,865	2,115
10	10	2,635	1,621	1,617	1,500	1,937
11	12,5	1,534	1,541	1,730	1,254	1,178

A partir das tabelas 4.1 e 4.2, foram construídos gráficos de rugosidade média do eixo x e do eixo y. Na Figura 4.3 pode-se observar os primeiros 50 compressões no eixo x. Eles apresentaram picos com menores valores no entorno de 6 μm perto do meio da peça e vales com valores perto de 2 μm. Os seguintes 100 compressões mostram valores de Ra elevados entre as posições 5 e 8, em torno de 6 μm. A partir de 150 compressões, mostram valores de Ra elevados entre as posições 5 e 7, assim como nas primeiras 100 compressões, com valores entre 9 μm e 7 μm. Além disso, o perfil de rugosidade diminui gradativamente até a última posição. Para os 200 compressões o perfil de rugosidade tem uma queda de valores nas posições próximas ao meio da peça com valor de 6 μm. Com 300 compressões, os valores de Ra aumentaram bastante em relação as outras medições com pico no valor de 12 μm, e tendo um decréscimo após o pico máximo.

A Figura 4.4 mostra o perfil de rugosidade média Ra do eixo y. Com 50 compressões, os maiores valores de Ra foram de 6 μm nas posições 5 e 7, tendo uma queda na posição 6. Com 100 compressões, o perfil de rugosidade mantém o perfil de rugosidade como no caso anterior, tendo a mesma queda no valor de Ra na posição 6. O perfil de rugosidade dos 150 compressões, muda completamente tendo valores mais altos desde o começo das



medições e tendo uma queda a partir da posição 6, onde se encontra o seu pico com valor de 8  $\mu\text{m}$ . Já nas 200 compressões, os valores de Ra crescem conforme passam as posições tendo seu pico na posição 7 com valor de 10  $\mu\text{m}$  e tendo uma forte queda logo após o pico. Com 300 compressões, assim como no caso anterior, os valores de Ra vão crescendo conforme vão se passando as posições medidas, porém dessa vez com uma inclinação maior e com um pico na posição de número 8, mais perto da borda da peça, com valor de 12  $\mu\text{m}$ .

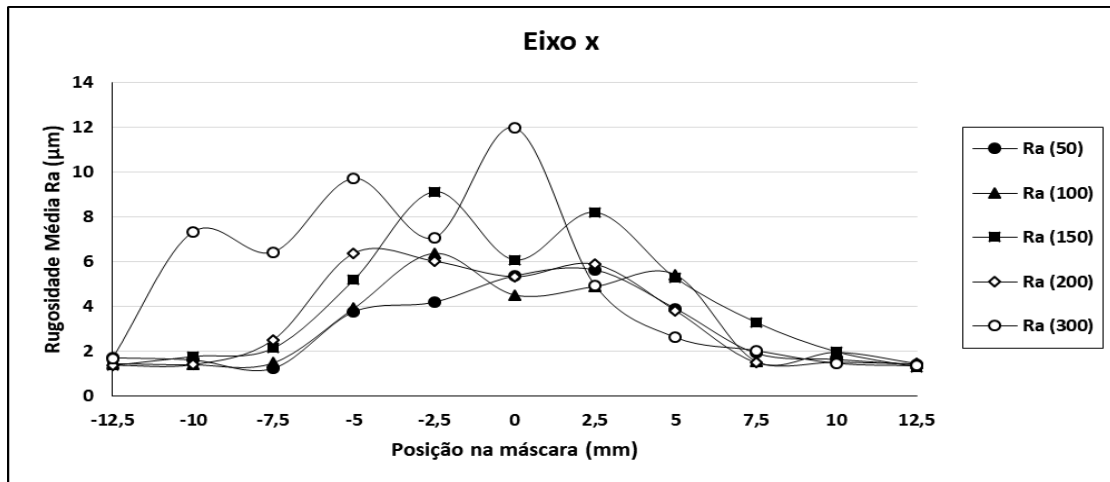


Figura 4.3 : Perfil de Rugosidade Média Ra eixo "x"

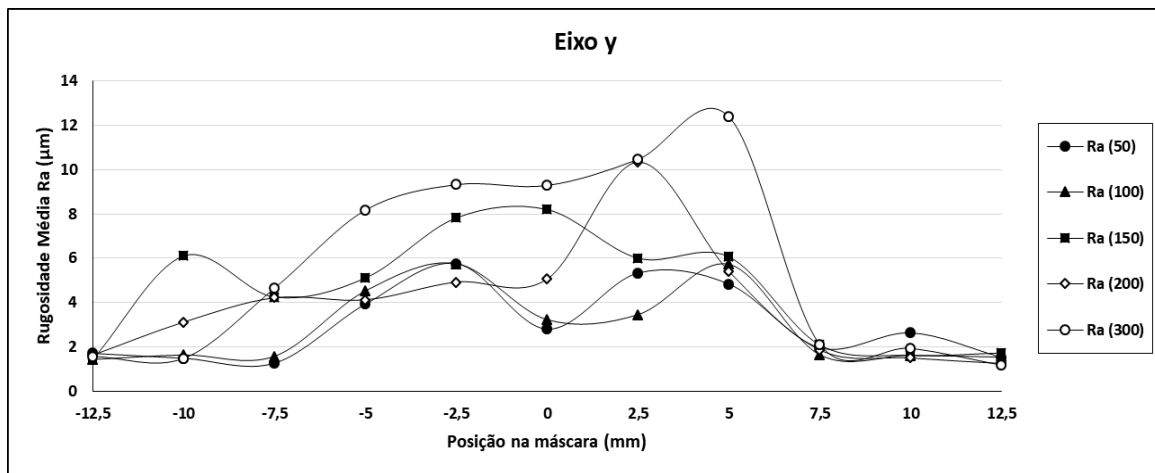


Figura 4.4 : Perfil de Rugosidade Média Ra eixo "y"

### 4.2.3 Rugosidade Total (Rt)

Os valores de Rt pegam o valor do pico mais alto e do vale mais profundo da amostra. Assim como na rugosidade média, medidas foram feitas nas mesmas regiões do gabarito da Figura 3.8 da seção 3.3.2. Foram feitas 11 medidas no eixo x e no eixo y após 50, 100, 150, 200 e 300 compressões. As medidas dos perfis de rugosidade total foram feitas de

acordo com a posição no eixo x e no eixo y, sendo os números de 1 a 11 a posição no eixo da máscara em que cada rugosidade média foi medida.

Os valores de rugosidade total (Rt) no eixo x estão relatados na Tabela 4.3. Os maiores valores de rugosidade total (Rt) são encontrados mais perto do centro da máscara além de serem maiores também quanto maior o número de compressões.

Tabela 4.3: Valores de Rugosidade Total Rt eixo “x”

Local	Distância do centro da máscara d [mm]	Rt 50 [μm]	Rt 100 [μm]	Rt 150 [μm]	Rt 200 [μm]	Rt 300 [μm]
1	12,5	26,145	24,908	12,710	22,140	32,796
2	10	14,236	13,802	21,334	33,597	78,964
3	7,5	18,678	17,331	31,904	42,466	58,458
4	5	43,021	57,068	44,581	54,373	75,165
5	2,5	53,818	68,909	69,580	70,188	61,446
6	0	65,198	44,274	59,625	71,670	84,722
7	2,5	57,204	54,477	60,052	81,237	66,820
8	5	49,874	60,785	58,907	48,705	47,559
9	7,5	56,873	20,336	51,077	26,956	69,468
10	10	24,710	28,416	48,614	33,193	34,019
11	12,5	11,700	24,813	18,122	23,852	22,918

Os valores de rugosidade total (Rt) no eixo y foram apresentados na Tabela 4.4. Os valores de rugosidade total (Rt) são maiores mais perto do centro da máscara além de quanto maior o número de compressões.

Tabela 4.4: Valores de Rugosidade Total Rt eixo “y”

Local	Distância do centro da máscara d[mm]	Rt 50 [μm]	Rt 100 [μm]	Rt 150 [μm]	Rt 200 [μm]	Rt 300 [μm]
1	12,5	14,054	15,718	45,071	26,465	17,022
2	10	16,917	19,212	50,102	59,459	25,560
3	7,5	16,393	16,626	49,221	57,102	55,524
4	5	52,558	60,965	53,846	50,333	65,167
5	2,5	49,720	58,314	71,682	54,351	74,264
6	0	32,354	40,331	72,497	69,058	83,096
7	2,5	47,624	56,594	61,127	69,353	80,405
8	5	50,521	67,354	70,979	64,689	91,755
9	7,5	24,191	29,947	68,186	38,061	29,826
10	10	37,495	20,797	22,054	49,875	62,209
11	12,5	15,034	12,568	40,849	14,743	17,090

A partir das tabelas apresentadas acima foram construídos gráficos de rugosidade total do eixo x e do eixo y. Na Figura 4.5 pode-se observar os primeiros 50 compressões no eixo x. Neste caso, nas primeiras posições os valores de Rt tem um decréscimo, mas logo começam a aumentar e tem seu pico no centro da amostra e depois começam a cair de novo. Os seguintes 100 compressões mostram valores de Rt nas primeiras medias seguem o padrão dos primeiros 50 compressões, porém, neste caso, os valores mais altos estão nas posições em volta do centro da amostra e depois começam a decair. A partir de 150 compressões, o pico fica na posição de número 5 e depois mantém uma certa constância nos valores até começar a decair na posição 8. Para os 200 compressões o perfil de Rt tem um aumento até a posição 7, onde se encontra o valor máximo, e depois os valores de Rt começam a ficar menores. Com 300 compressões, os valores de Rt se mantém altos, acima dos 50 μm a partir da posição 2 até a posição 9.

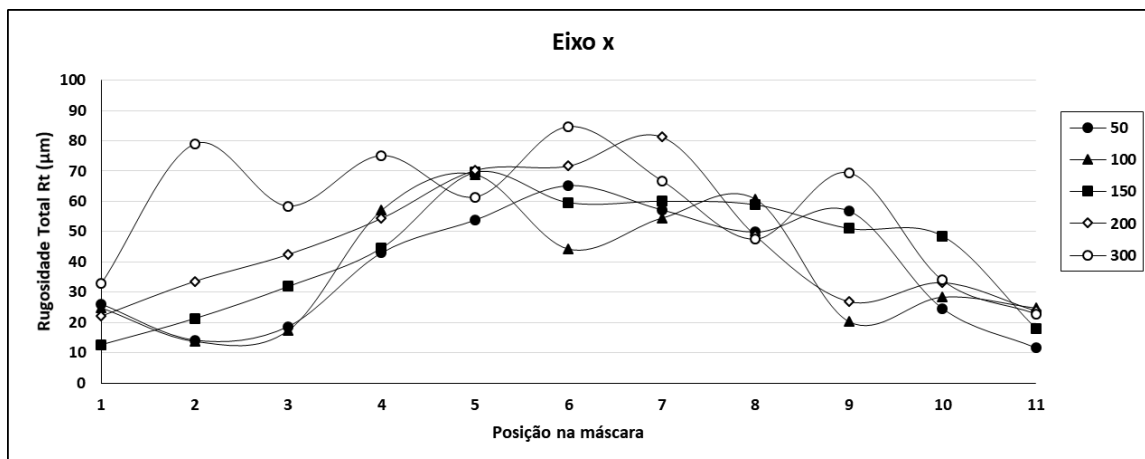


Figura 4.5 : Perfil de Rugosidade Total Rt eixo “x”

Na Figura 4.6 observa-se os valores de Rt no eixo y. Nas primeiras 50 e 100 compressões, os valores mais altos oscilam em volta da posição central da máscara, entre as posições 4;5 e 6;7. A partir de 150 compressões, existem dois picos, um no centro da máscara e um mais perto da posição 9. Para as 200 compressões o perfil de Rt tem uma certa estabilidade na região perto do centro da máscara, além de dois picos menos no começo e no fim da região medida. Com 300 compressões, são crescentes até a posição 8. Depois disso os valores de Rt começam a decair.

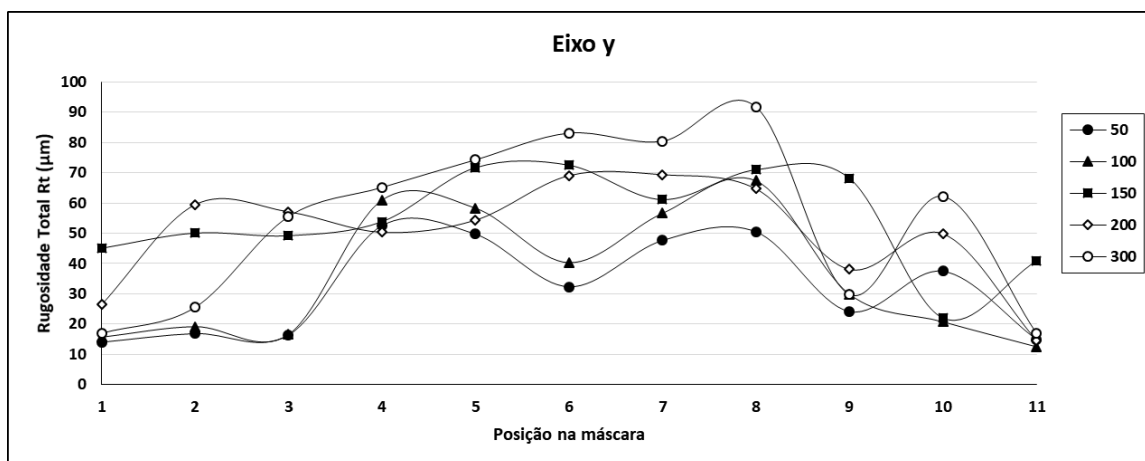


Figura 4.6 : Perfil de Rugosidade Total Rt eixo “y”

#### 4.2.4 Perfil de Rugosidade

Além da rugosidade média e rugosidade total, também pode-se obter o perfil de rugosidade ao longo de 30mm da chapa. Os valores dos dois extremos (0 e 30m) refletem as partes que não sofreram as compressões e a região central é onde foram feitas as compressões. Assim como na rugosidade média e rugosidade total, os valores foram

obtidos no eixo x e no eixo y da máscara. Os valores de rugosidade variam entre  $-30\mu\text{m}$  e  $50\mu\text{m}$ .

Os gráficos que refletem os valores da rugosidade no eixo x depois de 50, 100, 150, 200 e 300 compressões. A Figura 4.7 mostra a rugosidade depois de 50 compressões. Neste caso pode-se observar que os valores da rugosidade não tem grandes amplitudes, exceto na região perto dos 20mm onde tem-se um pico com valor próximo de  $50\mu\text{m}$  e vale com valor de  $-25\mu\text{m}$ .

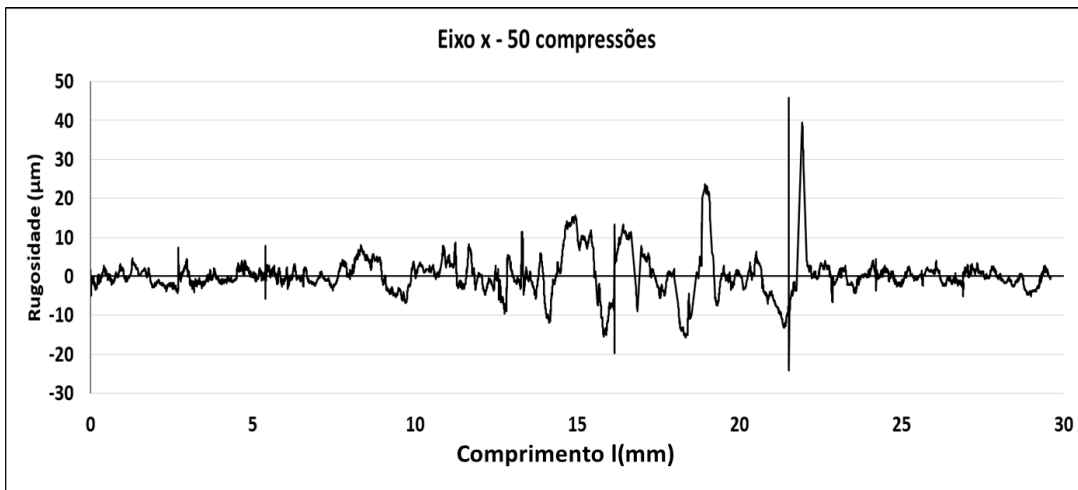


Figura 4.7: Rugosidade após 50 compressões no eixo “x”

A Figura 4.8 reflete os valores de rugosidade depois de 100 compressões. Assim como anteriormente, perto dos extremos os valores ficam perto de zero com uma baixa amplitude. Porém, agora percebe-se a presença de mais picos e vales. Os maiores picos possuem valores acima de  $20\mu\text{m}$  e os vales maiores que  $-20\mu\text{m}$ .

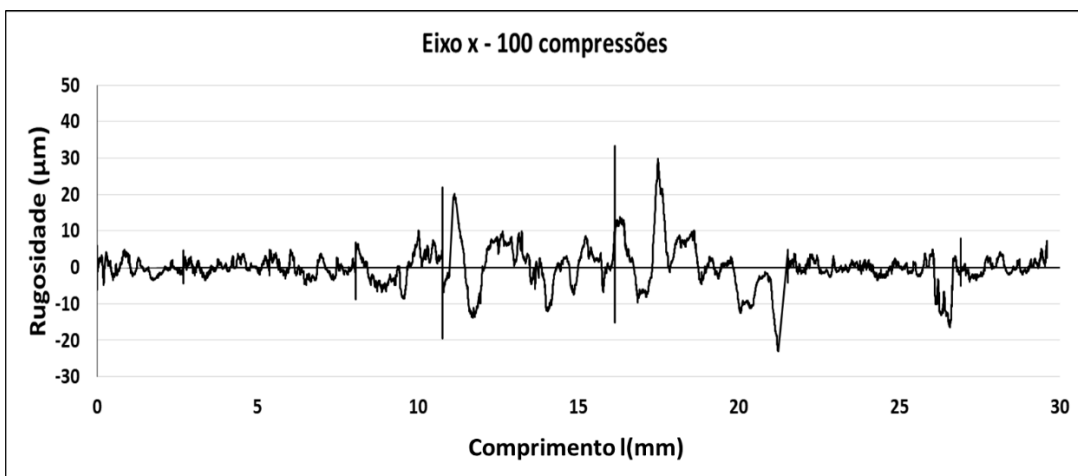


Figura 4.8:Rugosidade após 100 compressões no eixo “x”

Na Figura 4.9 pode-se observar a rugosidade obtida após 150 compressões. Neste caso pode-se observar que a quantidade de vales expressivos aumentou e que a região mais afetada é a região central da máscara. Os picos são pouco expressivos, sendo que todos são menores que  $20\ \mu\text{m}$ .

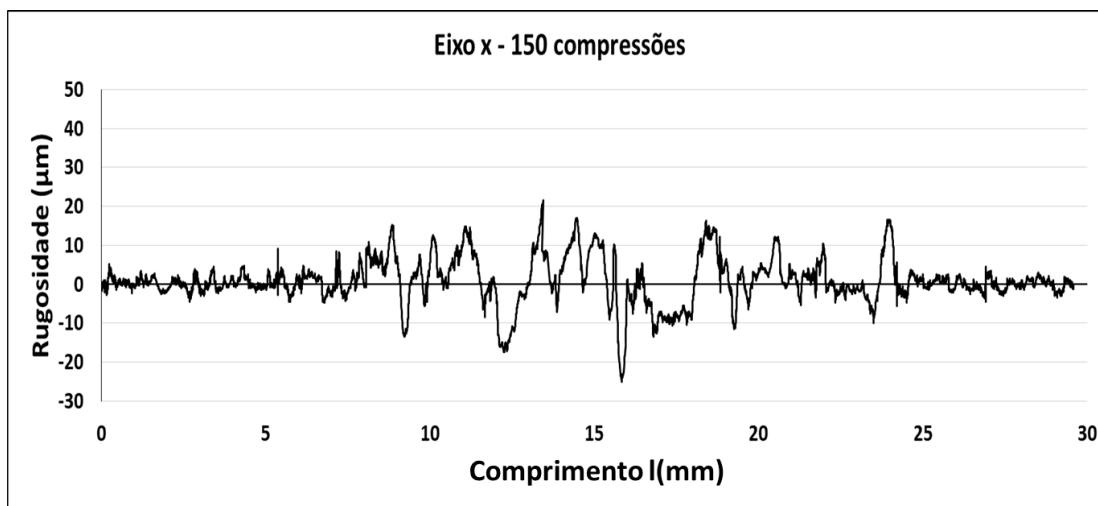


Figura 4.9: Rugosidade após 150 compressões no eixo “x”

A Figura 4.10 mostra a rugosidade da máscara depois de 200 compressões. Neste caso, a área com os maiores valores de pico e vale fica no centro da máscara. Porém, pode-se notar que os valores dos picos não são tão diferentes uns dos outros. O maior pico tem valor de  $25\ \mu\text{m}$  e de vale  $-18\ \mu\text{m}$ .

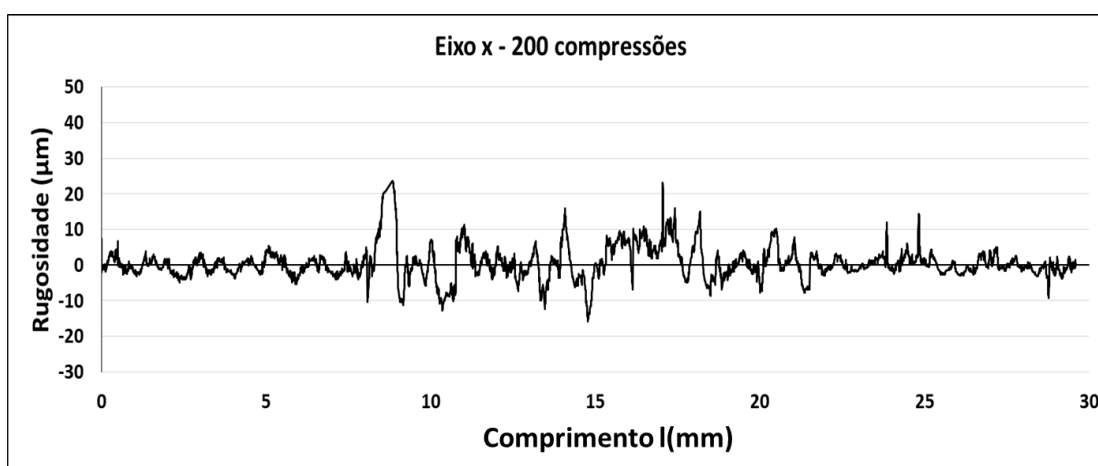


Figura 4.10: Rugosidade após 200 compressões no eixo “x”

A Figura 4.11 mostra a rugosidade da máscara após 300 compressões. Neste caso, pode-se observar uma área maior com maiores amplitudes. Observa-se pelo menos 5 picos com valores maiores que  $20\ \mu\text{m}$  e dois grandes vales com valores maiores que  $-20\ \mu\text{m}$ .

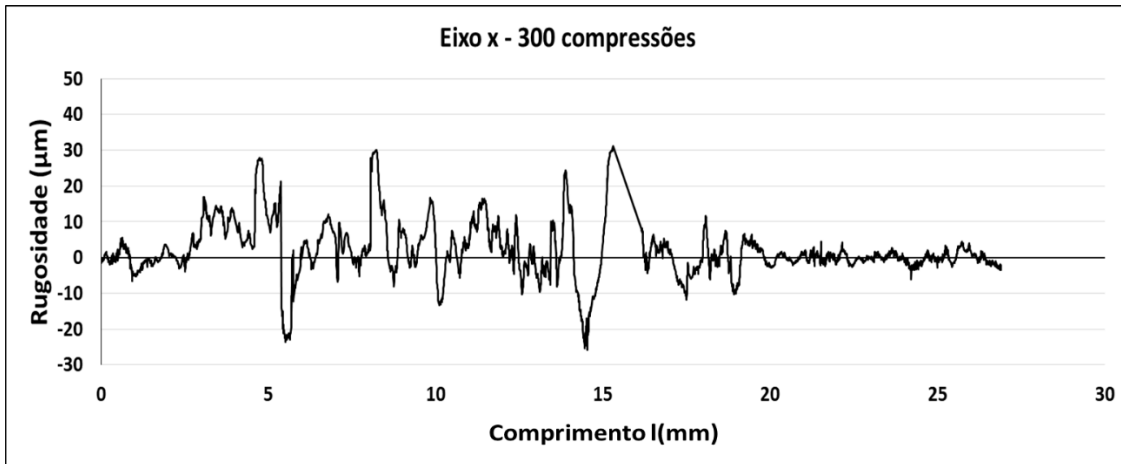


Figura 4.11:Rugosidade após 300 compressões no eixo “x”

Os gráficos que refletem os valores do perfil de rugosidade no eixo y depois de 50, 100, 150, 200 e 300 compressões. A Figura 4.12 mostra a rugosidade depois de 50 compressões. Neste caso pode-se observar que os valores da rugosidade nos extremos permanece perto do zero com uma pequena amplitude. Na região onde ocorreram as compressões, no centro da chapa, pode-se observar que os valores de rugosidade tem uma elevada amplitude podendo encontrar valores máximos de 20 $\mu\text{m}$  e mínimos de -15 $\mu\text{m}$ .

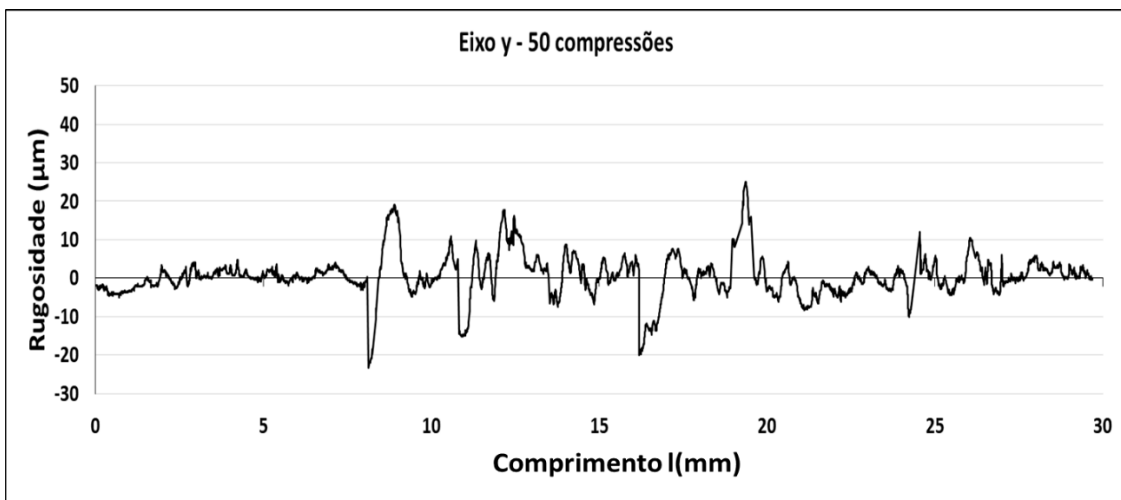


Figura 4.12: Rugosidade após 50 compressões no eixo “y”

A Figura 4.13 reflete os valores de rugosidade depois de 100 compressões. Assim como anteriormente, perto dos extremos os valores ficam perto de zero com uma baixa amplitude sendo os maiores e menores valores de rugosidade sendo encontrados no meio da peça. Os valores máximo e mínimo variam entre 15  $\mu\text{m}$  e -18 $\mu\text{m}$ , sendo que agora, observa-se um menor número de picos e vales.

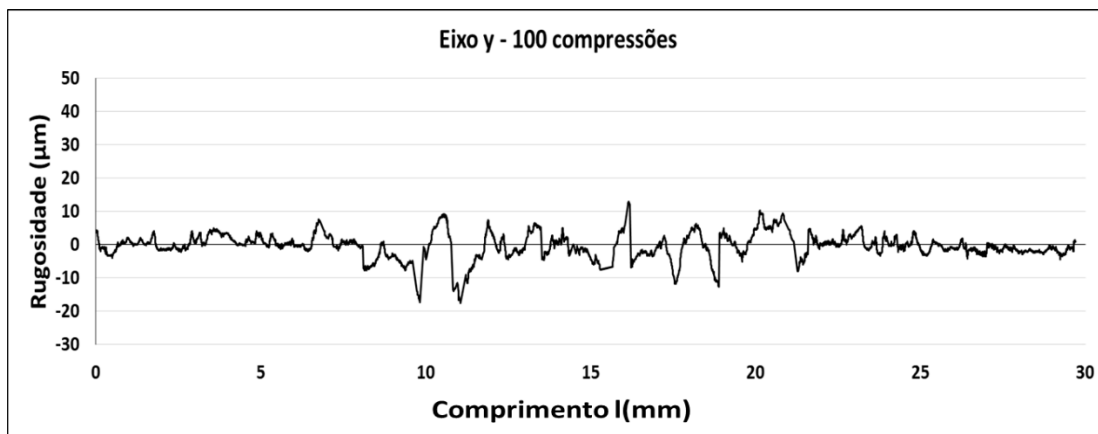


Figura 4.13:Rugosidade após 100 compressões no eixo “y”

Na Figura 4.14 pode-se observar a rugosidade obtida após 150 compressões. Neste caso pode-se observar que uma parte perto dos extremos, que anteriormente não havia muita diferença entre seus valores de pico e vale, agora começa a ser afetada. Apesar disso, ainda há uma parte perto das extremidades da chapa que ainda possui valores de rugosidade perto de zero. Além disso, o valor máximo da rugosidade é de  $20\mu\text{m}$  e o mínimo de  $-15\mu\text{m}$ . Apesar de ter maior número de picos e vales do que os casos anteriores, agora, observa-se que a amplitude destes picos e vales é menor.

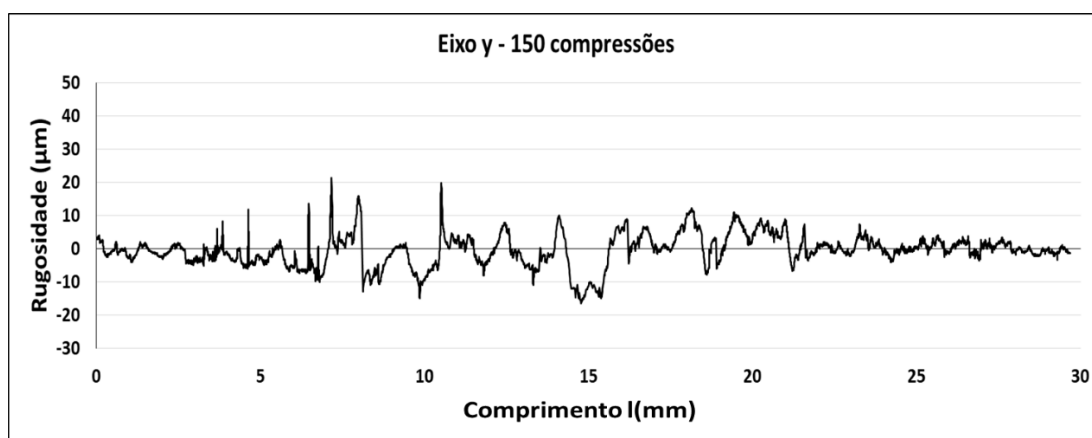


Figura 4.14:Rugosidade após 150 compressões no eixo “y”

A Figura 4.15 mostra a rugosidade da máscara depois de 200 compressões. A faixa de superfície afetada é maior, porém mantendo as extremidades com valores de rugosidade próximo de zero. Os valores de máximo e mínimo aumentaram:  $\pm 28\mu\text{m}$ . A quantidade de vales aumentou e ainda houve o surgimento de um novo pico com valores expressivos.



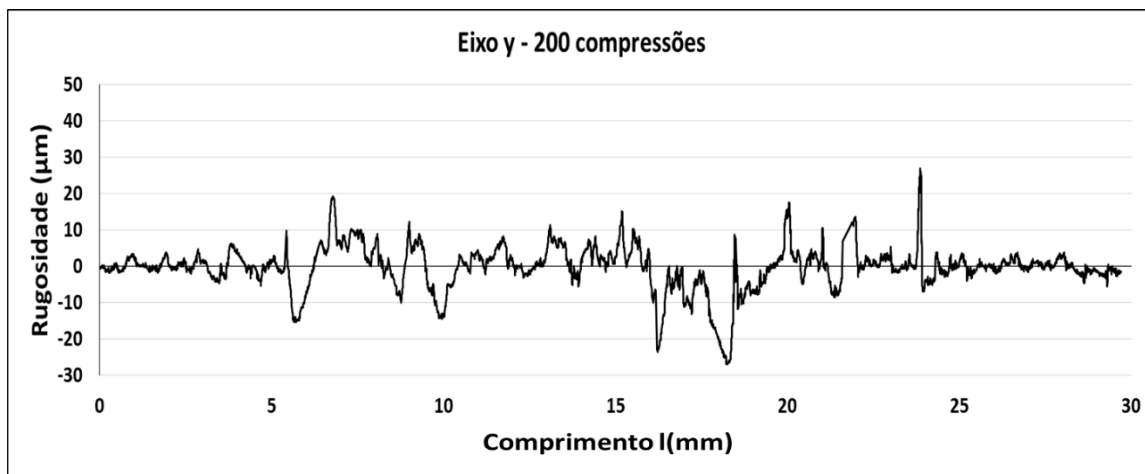


Figura 4.15:Rugosidade após 200 compressões no eixo “y”

A Figura 4.16 mostra a rugosidade da máscara após 300 compressões. A área onde ocorreram as compressões fica bem clara já que neste local pode-se observar picos bem expressivos com valores máximos perto de 40μm. Existem também dois vales com valores acima de -20μm.

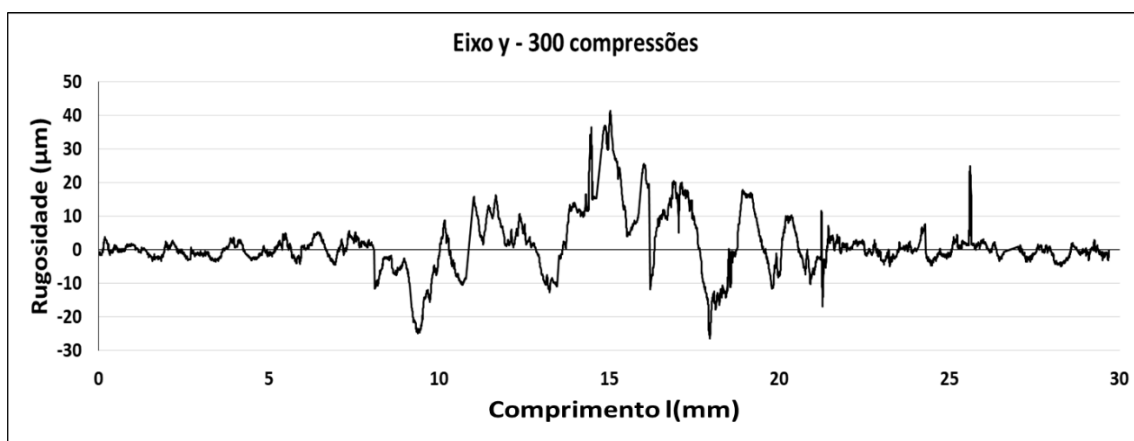


Figura 4.16:Rugosidade após 300 compressões no eixo “y”

### 4.3 ESTEREOSCOPIA

A cada 50 compressões também foram obtidas imagens com o estereomicroscópio. O estereoscópio faz imagens com até 10 vezes de aumento, por isso para obter a imagem da máscara foi necessário fazer uma matriz 5x5 de imagens e juntá-las com o software Image Composite. O resultado foi mostrado na Figura 4.17. Nas primeiras 50 compressões, Figura 4.17(a), pode-se observar que os corpos de prova ficaram bem marcados na máscara protetora. Após os 100 ciclos de compressão, mostrado na Figura 4.17(b), ainda consegue-se ver a marca dos corpos de prova na máscara, porém menos evidente. A Figura 4.17(c) apresenta a máscara com 150 compressões. Neste caso,

consegue-se observar na máscara as marcas provocadas pelos corpos de prova, sendo que na parte onde foram comprimidos os corpos de prova está mais clara e sem oxidação. Após as 200 compressões, Figura 4.17(d), a marca dos corpos de prova é bem visível, mais clara e brilhante e sem oxidações.

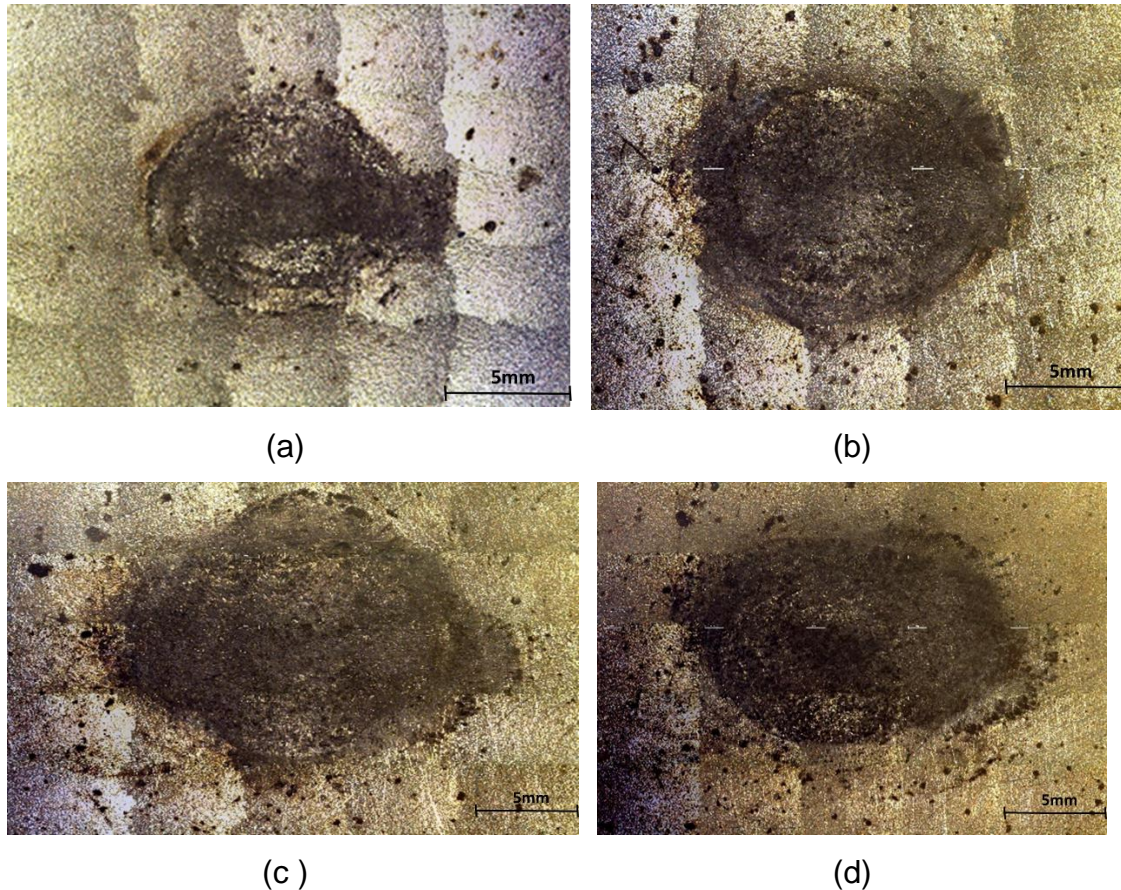


Figura 4.17 : Máscara Protetora. (a) 50 compressões; (b) 100 compressões; (c) 150 compressões; (d) 200 compressões.

#### 4.4 DISTRIBUIÇÃO DE MICRODUREZA

Para analisar a distribuição da dureza na máscara, a microdureza Vickers foi medida em 20 diferentes posições após a realização dos 300 compressões. As medidas foram feitas na seção transversal da máscara abrangendo tanto na parte que aconteceu a compressão quanto na parte que não teve contato com os corpos de prova durante o experimento, conforme a Figura 3.10.

A medição foi feita a partir da parte mais longe do centro da máscara, posição 1, até o centro da máscara, posição 20. A Tabela 4.5 mostra os valores obtidos de microdureza de acordo com a posição medida. A posição 1, a mais longe do centro onde ocorreu a

compressão na máscara tem o menor valor de microdureza (188,29 HV<sub>0,5</sub>). A diferença entre o menor valor e o maior valor de microdureza é de 48,24 HV<sub>0,5</sub>.

Tabela 4.5: Distribuição de Dureza

Posição na Chapa	Microdureza Vickers (HV <sub>0,5</sub> )
1	188
2	186
3	195
4	192
5	197
6	198
7	198
8	195
9	193
10	201
11	207
12	201
13	208
14	208
15	208
16	235
17	213
18	213,18
19	208
20	203

A Figura 4.18 mostra os resultados da microdureza feita na espessura da máscara a partir dos dados da tabela acima. Ao observar os valores obtidos na microdureza, pode-se perceber que o seu valor aumenta conforme as medidas foram feitas perto ou na área onde aconteceu as compressões.

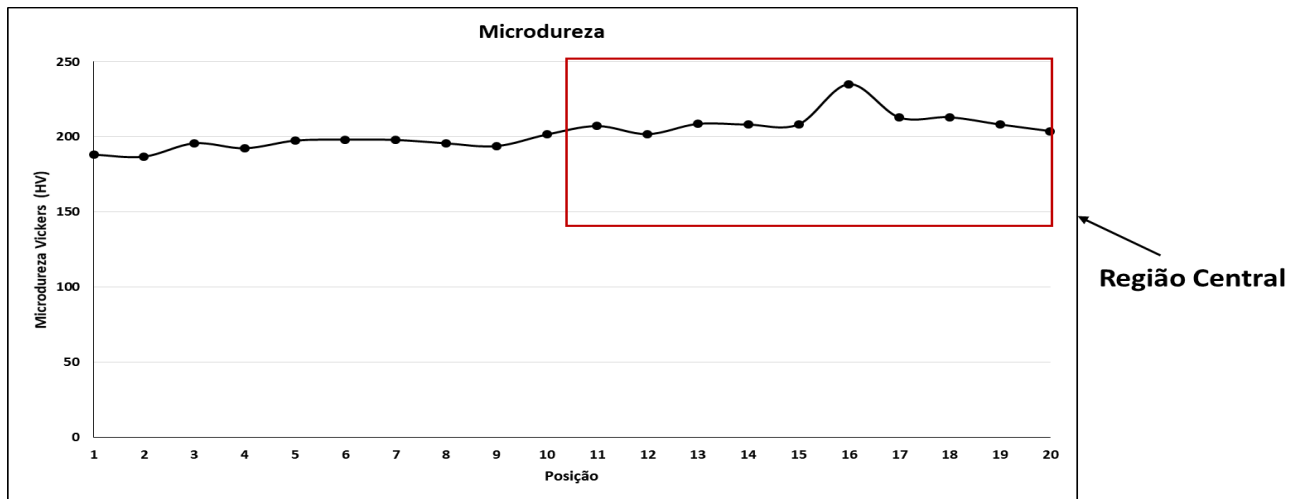


Figura 4.18 : Perfil de Microdureza

#### 4.5 RESULTADOS DA METALOGRAFIA

A metalografia foi feita na parte forjada e na parte não forjada com um aumento de 200 vezes no microscópio óptico, mostrado na Figura 4.19. A Figura 4.19(a) mostra a microestrutura da parte não comprimida da máscara. Nesta imagem pode-se observar uma distribuição dos grãos homogênea por toda a amostra, além disso, em média, os grãos têm o mesmo tamanho. Na Figura 4.19(b) observa-se a microestrutura da parte da máscara que sofreu as compressões. Na parte superior da figura os grãos estão menores e mais próximos parecendo estar em maior quantidade. Na parte inferior os grãos se assemelham com os grãos da parte que não foi comprimida. Além disso, pode-se observar uma quantidade maior de pontos pretos na imagem.

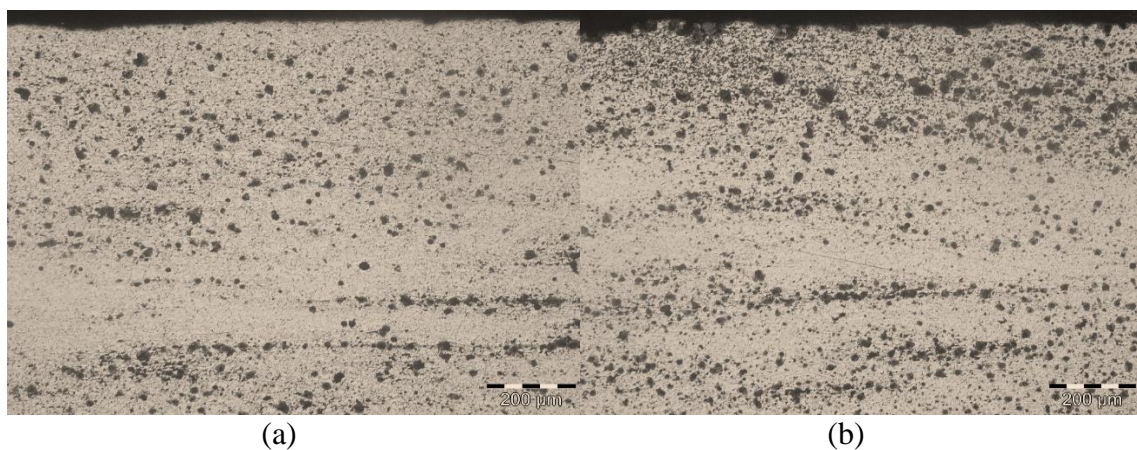


Figura 4.19 : Metalografia aumento 200x: (a) não sofreu compressão (parte não afetada); (b) sofreu compressão (centro da máscara)

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Diante da abordagem sugerida de avaliação do desgaste e da viabilidade da utilização da máscara de aço 22Mn5B, os resultados mostram que o material sofreu desgaste onde ocorreram os forjamentos, porém o desgaste sofrido não foi o suficiente para alterar de maneira expressiva as propriedades avaliadas no trabalho.

### 5.1 COMPRESSÕES

Os corpos de prova comprimidos sofreram uma baixa deformação. Como o objetivo deste trabalho não era dar uma forma aos corpos de prova, a energia gasta pelo martelo para deformar os corpos de prova foi suficiente para a realização dos experimentos.

### 5.2 PERFILOMETRIA

#### 5.2.1 Rugosidade Média (Ra)

De acordo com os resultados obtidos, no eixo x, o valor da rugosidade média Ra perto das áreas não comprimidas é relativamente baixo, 2  $\mu\text{m}$ , se compararmos ao valor da rugosidade média nas áreas que sofreram compressão. Quanto maior for o valor de rugosidade, pior o acabamento superficial do material, portanto, o acabamento superficial no meio da amostra depois de 300 forjamentos foi o pior, 11,99  $\mu\text{m}$ .

Os valores de rugosidade média de acordo com a posição no eixo y, assim como no eixo x, os valores da rugosidade média perto das áreas não comprimidas é baixo, 1,5  $\mu\text{m}$ , ao compararmos ao valor da rugosidade média nas áreas que sofreram compressão, 9,82  $\mu\text{m}$ . Deste modo, a área central da medição possui valores maiores de Ra conforme o número de compressões aumenta. Portanto, o maior valor de rugosidade média se encontra depois das 300 compressões realizadas, 10,46  $\mu\text{m}$ .

Ao observar os gráficos de rugosidade média do eixo x e do eixo y nas Figuras 4.3 e 4.4, pode-se afirmar que em todos os ciclos de compressões analisados, a área em contato com os corpos de prova foram as que mais sofreram desgaste da superfície. Além disso, pode-se notar que o desgaste foi maior depois dos 300 compressões do que nos ciclos de compressão anteriores, mostrando que o material continuou a se desgastar nos pontos de maior contato entre os corpos de prova e a máscara. Este valor já era esperado, pois, foi

o lugar que mais sofreu deformação conforme o número de compressões aumentou. Além disso, o atrito entre o corpo de prova e a máscara protetora e a variação de temperatura causada pelo contato do corpo de prova quente com a máscara a temperatura ambiente, causam um desgaste maior nas áreas onde o corpo de prova entra em contato com a máscara com maior frequência.

### **5.2.2 Rugosidade Total (Rt)**

No eixo x, o valor da rugosidade total vai aumentando quanto mais perto do centro da amostra. Quanto maior for o valor de rugosidade total, maior a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo, assim, o acabamento superficial da amostra é pior. Deste modo, pode-se analisar que além do centro da amostra, que é a área de contato entre os corpos de prova e a máscara protetora, ter pior acabamento superficial, essa condição piora depois dos 300 compressões, com Rt igual a 84,722  $\mu\text{m}$ .

Os valores da rugosidade total aumenta conforme a posição na máscara no eixo y. Assim como no eixo x, perto das áreas não comprimidas os valores de Rt são mais baixos ao compararmos aos valores perto do centro da amostra. O maior valor de rugosidade total se encontra depois das 300 compressões já realizadas, 91,75  $\mu\text{m}$ .

Os valores de Rt reafirmam os resultados obtidos nos valores de Ra, onde as áreas mais desgastadas são aquelas mais próximas ao centro da área analisada. Além disso, os maiores valores de Rt foram obtidos depois dos 300 compressões.

### **5.2.3 Perfil de Rugosidade**

As figuras 4.7 a 4.16 com as rugosidades obtidas mostram que existe uma diferença clara entre a área que sofreu deformação com as compressões e a área mais externa da máscara. Conforme o número de compressões vai aumentando, a profundidade dos vales e altura dos picos também aumenta, sendo estes picos e vales maiores concentrados no centro da amostra. De acordo com (PARRA et al., 2006), a rugosidade superficial é um conjunto de irregularidades que caracteriza superfície. O perfil de rugosidade da máscara protetora se mostrou bem definido ao longo do experimento. A intensidade do desgaste pode se relacionar com a rugosidade do material de acordo com a Figura 5.1. O aumento da intensidade do desgaste não tem uma relação linear com o aumento da rugosidade devido

a vários fatores como a temperatura, material e acabamento superficial de cada tribosistema.

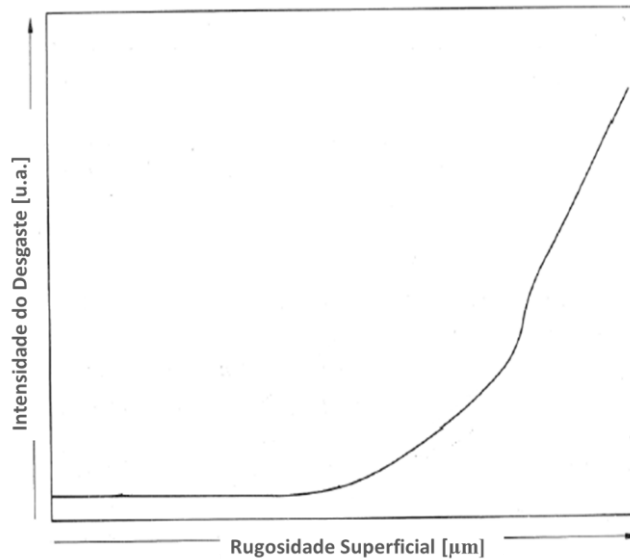


Figura 5.1: Relação intensidade qualitativa do desgaste e rugosidade

Fonte: SOUZA (2016) ( adaptado)

Após as 300 compressões pode-se dizer que a resistência ao desgaste por abrasão diminuiu na área que entrou em contato com o corpo de prova, devido a elevada rugosidade apresentada, se comparada aos valores da áreas não comprimidas. Isso ocorre devido aos picos e vales que formam cantos vivos que, ao sofrerem algum tipo de contato, vão se desprender do material mais facilmente. Além disso, a resistência ao escorregamento aumentou, pois com o aumento da rugosidade há também um aumento do atrito entre as superfícies fazendo com que a resistência ao escorregamento aumente. Com o maior número de picos e vales, ou seja, com uma maior rugosidade o atrito superficial aumenta já que a área de contato também aumenta (SOUZA, 2016).

### 5.3 ESTEREOSCOPIA

Com as imagens do estereoscópio pode-se observar que mesmo as compressões serem realizadas sempre no mesmo lugar, o entorno da marca dos corpos de prova na chapa também parece oxidado. A oxidação da chapa vai diminuindo conforme a distância da marca do corpo de prova aumenta. O aumento da oxidação pode ter ocorrido devido a problemas com a lubrificação, pois, existe um ponto crítico no qual a rugosidade de um material auxilia na lubrificação do sistema, já que devido as reentrâncias presentes no material, o lubrificante penetra e forma uma camada mais espessa evitando o contato entre

as superfícies e mascarando defeitos. Porém, quando a rugosidade é muito alta os picos ultrapassam a camada do lubrificante e entrando em contato com a outra superfície (SOUZA, 2016). Além disso, a temperatura também contribui para que ocorra oxidação na máscara. Outro fator a se observar nestas imagens são as marcas dos corpos de prova. Os corpos de prova marcaram a máscara, porém a marca vai ficando cada vez menos evidente.

#### 5.4 DISTRIBUIÇÃO DE MICRODUREZA

Os maiores valores de microdureza estão na área que sofreu a compressão e os menores valores estão na área que não sofreu compressão. Assim, os resultados de microdureza da parte que não entraram em contato com o corpo de prova estão de acordo com o que era esperado de se encontrar. Além disso, o ganho de microdureza foi relativamente pequeno, 20HV. Segundo (NADERI; SAEED-AKBARI; BLECK, 2008), estes valores são característicos de aço baixo carbono e microestrutura ferrítica. Segundo Rigney (1981), a resistência a abrasão é uma propriedade proporcional a dureza do material. Conforme a dureza do material aumenta, a resistência a propagação de trincas diminui, então, a fratura do material pode ocorrer durante o escoamento do material perto do contato da partícula abrasiva e contribuir para a proporção do volume de material removido como mostra a Figura 5.3. Como a alteração da microdureza foi pequena, a proporção do volume removido também foi pequena, sendo assim, a resistência ao desgaste abrasivo diminui porém não teve uma queda significativa.

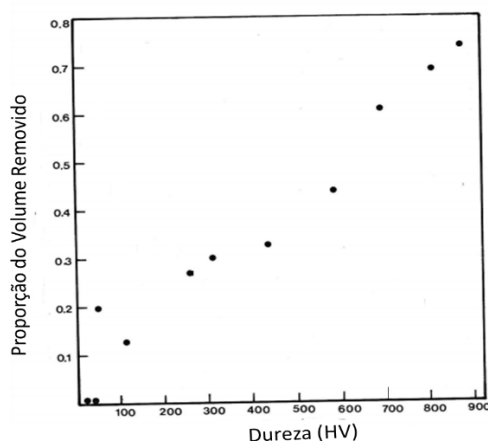


Figura 5.3: Proporção do Volume Removido de Material x Dureza

Fonte: RIGNEY, (1981)(adaptado)



## 5.5 MICROESTRUTURA

A microestrutura da máscara após as 300 compressões não foi modificada, sendo o material ainda com base ferrítica e perlítica. Neste caso, apenas houve uma mudança no formato dos grãos superficiais que ficaram mais alongados devido a deformação do material.

## 6. CONCLUSÃO

Para a conclusão deste trabalho foram levados em conta os resultados obtidos entre as compressões e após todas as compressões realizadas. As conclusões foram as seguintes:

- Conforme o número de compressões foi aumentando a rugosidade média e total da área comprimida também aumentou.
- O perfil de rugosidade de cada ciclo de compressões mostra que a área não comprimida sofreu poucas alterações na rugosidade, ou seja, o efeito do aumento da rugosidade foi local.
- Com o aumento da rugosidade da área comprimida pode-se inferir mudanças nas propriedades tais como a queda da resistência ao desgaste e o aumento da resistência ao escorregamento
- A oxidação é maior na parte da máscara que entrou em contato com o corpo de prova provavelmente em decorrência de problemas com a lubrificação devido ao aumento da rugosidade.
- A microdureza da máscara tanto na parte comprimida quanto na parte não comprimida mostrou valores de acordo com o material da mesma.
- A microestrutura da máscara não foi modificada a ponto de afetar suas características e propriedades, apesar da presença de grãos deformados perto da superfície da amostra como sinal da deformação plástica na superfície da amostra.
- A microestrutura presente pode ser identificada com a presença de ferrita e perlita, com durezas abaixo de 250HV, e com grãos aproximadamente do mesmo tamanho.

## **7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Como sugestão para futuros trabalhos, poderiam ser feitos os mesmos procedimentos experimentais em temperaturas diferentes ( 1200°C, 1150°C e 1100°C) para que deste modo, fossem analisados os efeitos da temperatura no desgaste das máscaras protetoras.

Além disso, poderia ser utilizado um software de simulação em forjamento para prever depois de quantas compressões sofridas a máscara protetora sofrerá falha.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, D.-G. et al. Improvement of the wear resistance of hot forging dies using a locally selective deposition technology with transition layers. **CIRP Annals**, v. 65, n. 1, p. 257–260, 2016.

ANDRÉ OLAH NETO. **Estudo do efeito da deformação plástica Sobre a cinética de transformação de fase Do aço 22mnb5 estampado a quente**. Santa Catarina: Universidade do Estado de Santa Catarina, 2015.

BARRAU, O. et al. Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging. **Wear**, v. 255, n. 7–12, p. 1444–1454, ago. 2003.

BRESCIANI FILHO. **Conformação Plástica Dos Metais**. 6. ed. São Paulo: [s.n.].

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

CHOI, C.; GROSECLOSE, A.; ALTAN, T. Estimation of plastic deformation and abrasive wear in warm forging dies. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, n. 8, p. 1742–1752, ago. 2012.

COSTA, Luana de Lucca de. **Efeito de Diferentes Ciclos Termomecânicos no Comportamento Microestrutural do Aço ABNT 4140**. 2014. 76 f. Porto Alegre - RS: Dissertação (Mestrado)- PPGE3M - UFRGS.

DE AMORIM, H. J. **Estudo Da Relação Entre Velocidade De Corte, Desgaste De Ferramenta, Rugosidade E Forças De Usinagem Em Torneamento Com Ferramenta De Metal Duro**. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

DOEGE, E.; BOHNSACK, R. Closed die technologies for hot forging. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 98, n. 2, p. 165–170, jan. 2000.

DOUGLAS, R.; KUHLMANN, D. Guidelines for precision hot forging with applications. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 98, n. 2, p. 182–188, jan. 2000.

DROZDA, T. J.; SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS (EDS.). **Tool and manufacturing engineers handbook: a reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians. Vol. 2: Forming.** 4. ed ed. Dearborn, Mich: Society of Manufacturing Engineers, 1984.

FARRAHI, G. H.; GHADBEIGI, H. An investigation into the effect of various surface treatments on fatigue life of a tool steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 174, n. 1–3, p. 318–324, maio 2006.

GALÁN, J. et al. Advanced high strength steels for automotive industry. **Revista de Metalurgia**, v. 48, n. 2, p. 118–131, 30 abr. 2012.

GRONOSTAJSKI, Z. et al. A review of the degradation mechanisms of the hot forging tools. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 14, n. 4, p. 528–539, ago. 2014.

HAWRYLUK, M.; JAKUBIK, J. Analysis of forging defects for selected industrial die forging processes. **Engineering Failure Analysis**, v. 59, p. 396–409, jan. 2016.

JAGOTA, V.; SHARMA, R. K. Interpreting H13 steel wear behavior for austenitizing temperature, tempering time and temperature. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 40, n. 4, p. 219, abr. 2018.

JULIANA ZOTTIS. Forjamento a quente com máscaras Metálicas como revestimento superficial. [2017].

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

KIM, D. H. et al. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 166, n. 3, p. 372–380, ago. 2005.

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, jul. 2005.

LAVTAR, L. et al. Analysis of the main types of damage on a pair of industrial dies for hot forging car steering mechanisms. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, n. 4, p. 1143–1152, jun. 2011.

LEE, H. C.; KIM, B. M.; KIM, K. H. Estimation of die service life in hot forging, considering lubricants and surface treatments. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 217, n. 7, p. 1011–1022, jul. 2003.

LEE, R. S.; JOU, J. L. Application of numerical simulation for wear analysis of warm forging die. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 140, n. 1–3, p. 43–48, set. 2003.

LUO, S. et al. Numerical analysis of die wear characteristics in hot forging of titanium alloy turbine blade. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 123, p. 260–270, abr. 2017.

MARASHI, J. et al. An evaluation of H13 tool steel deformation in hot forging conditions. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 246, p. 276–284, ago. 2017.

MERKLEIN, M.; LECHLER, J. Investigation of the thermo-mechanical properties of hot stamping steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 177, n. 1–3, p. 452–455, jul. 2006.

MERKLEIN, M.; LECHLER, J.; GEIGER, M. Characterisation of the Flow Properties of the Quenchenable Ultra High Strength Steel 22MnB5. **CIRP Annals**, v. 55, n. 1, p. 229–232, 2006.

MIN, J.; LIN, J.; MIN, Y. Effect of thermo-mechanical process on the microstructure and secondary-deformation behavior of 22MnB5 steels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 213, n. 6, p. 818–825, jun. 2013.

NADERI, M.; SAEED-AKBARI, A.; BLECK, W. The effects of non-isothermal deformation on martensitic transformation in 22MnB5 steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 487, n. 1–2, p. 445–455, jul. 2008.

PANJAN, P. et al. Improvement of hot forging tools with duplex treatment. **Surface and Coatings Technology**, v. 151–152, p. 505–509, mar. 2002.

PARRA, B. S. et al. Rugosidade Superficial de Revestimentos Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, 2006.

PASCHKE, H. et al. Adapted surface properties of hot forging tools using plasma technology for an effective wear reduction. **Wear**, v. 330–331, p. 429–438, maio 2015.

PODGRAJŠEK, M.; GLODEŽ, S.; REN, Z. Failure analysis of forging die insert protected with diffusion layer and PVD coating. **Surface and Coatings Technology**, v. 276, p. 521–528, ago. 2015.

RIGNEY, D. A.; AMERICAN SOCIETY FOR METALS; METALLURGICAL SOCIETY OF AIME (EDS.). **Fundamentals of friction and wear of materials: papers presented at the 1980 ASM Materials Science Seminar, 4-5 October 1980, Pittsburgh, Pennsylvania**. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1981.

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**, v. 651–653, p. 266–271, jul. 2015.

RUDIMYLLA DA SILVA SEPTIMIO. **Estudo Do Forjamento Multidirecional De Precisão**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2015-Tese de Doutorado

SCHAEFFER, L. (2006). *Forjamento - Introdução ao Processo*. Porto Alegre: Imprensa Livre

SCHMITT, J.-H.; IUNG, T. New developments of advanced high-strength steels for automotive applications. **Comptes Rendus Physique**, v. 19, n. 8, p. 641–656, dez. 2018.

SOUZA, T. S. G. **Efeito da rugosidade no desgaste de punções de conformação a frio**. Mestrado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação—São Paulo: Dissertação de Mestrado-Universidade de São Paulo, 9 dez. 2016.

TERČELJ, M. et al. A newly designed laboratory hot forging test for evaluation of coated tool wear resistance. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, n. 11, p. 3594–3604, mar. 2006.

**YURGEL, C. C. Substituição do Processo de Usinagem pelo Processo de Forjamento á Quente na Fabricação da Pré Forma de Brocas de Furação de Rochas.** Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

VIECELLI, A. Projeto de matrizes fechadas de forjamento a quente para peças axissimétricas com rebarba auxiliado pelo computador. Dissertação de Mestrado, 1995 Porto Alegre, RS: PPGEM/UFRGS.

ZOTTIS, J. (2016). Aplicação de máscaras metálicas como revestimentos para matrizes de forjamento a quente. Porto Alegre - RS: Exame de Qualificação ao Doutorado - PPGE3M - UFRGS.