

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola de Engenharia**  
Programa de Pós-Graduação em Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

Fábio Júnior Meurer

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA LÂMINA DE FACA  
EMPREGANDO A LIGA AISI 440 (DIN 1.4116)**

Porto Alegre

2023

Fábio Júnior Meurer

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA LÂMINA DE FACA  
EMPREGANDO A LIGA AISI 440 (DIN 1.4116)**

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.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer

Porto Alegre

2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Meurer, Fábio Júnior  
AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA LÂMINA DE  
FACA EMPREGANDO A LIGA AISI 440 (DIN 1.4116) / Fábio  
Júnior Meurer. -- 2023.  
89 f.  
Orientador: Lírio Schaeffer.

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, 2023.

1. Metalurgia. 2. Lâmina. 3. Otimização Industrial.  
4. AISI 440. I. Schaeffer, Lírio, orient. II. Título.

Fábio Júnior Meurer

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA LÂMINA DE FACA  
EMPREGANDO A LIGA AISI 440 (DIN 1.4116)**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer

---

Coordenador do PPGE3M: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

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

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

---

Prof. Dr. Carlos Augusto Silva de Oliveira  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

Prof. Dr. Diego Rodolfo Simões de Lima  
Instituto Federal de Santa Catarina - IFC

**EPÍGRAFE**

*“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,  
não seremos capazes de resolver os problemas causados  
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.*

*Albert Einstein*

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo aprimorar a metodologia empregada no processo de fabricação de uma lâmina em aço AISI 440 (DIN 1.4116), de modo a aperfeiçoar processos utilizados atualmente e avaliar a possibilidade de reduzir a quantidade da matéria prima. Para isso se produziu amostras com metodologia convencional (corte, têmpera, revenimento e tratamento criogênico) e amostras com a adição do forjamento a frio antes dos tratamentos térmicos. O intuito da adição da operação do forjamento a frio, foi de reduzir a matéria prima, além de elevar a qualidade do produto final gerado. Para validação dos valores dimensionais obtidos, utilizou-se a análise numérica não-linear realizada pelo software ANSYS® Workbench. Utilizando um modelo com 50% do tamanho real, obteve-se a variação de aproximadamente 18% entre o alongamento obtido na simulação computacional e na análise dimensional, além da interpretação do comportamento da amostra na ferramenta. Ambas as amostras, forjadas e não forjadas, após serem tratadas termicamente, passaram pelas etapas de usinagem e afiação. Com o produto acabado, para avaliar as amostras se utilizou o ensaio de dureza, partículas magnéticas (avaliação de trincas e microtrincas), capacidade de corte e corrosão por imersão. O ensaio de dureza revelou valores semelhantes entre as amostras forjadas e não forjadas. O ensaio de partículas magnéticas demonstrou similaridades entre as amostras forjadas e não forjadas, apresentando ausência de fraturas. O ensaio de capacidade de corte apresentou uma maior eficácia da amostra forjada. O ensaio de corrosão exibiu maior concentração de pites de corrosão na amostra forjada, porém o ensaio apresentou que ambas as amostras estariam aptas a utilização. Analisou-se as microestruturas da amostra forjada e não forjada. Observa-se que em ambas as amostras, as ripas martensíticas com maior intensidade de carbonetos secundários em seus contornos além disso a amostra forjada apresentou um alinhamento de inclusões. Constatou-se também que as inclusões contidas após a liga ser tratada eram carbonetos primários não dissolvidos ainda do material bruto e um leve aumento destes carbonetos presentes na amostra que havia passado pela etapa de forjamento. Na análise de microdureza apresentou valores maiores na amostra não forjada. Por fim, a adição do processo de forjamento mostrou vantagens quanto a capacidade de corte do aço, porém uma piora em relação a especificações metalúrgicas do mesmo, como a corrosão e microestrutura.

**Palavras-chave:** Metalurgia, Lâmina, Otimização Industrial, AISI 440.

## ABSTRACT

This work aims to improve the methodology used in the manufacturing process of a blade in AISI 440 steel (DIN 1.4116), in order to improve processes currently used and evaluate the possibility of reducing the amount of raw material. For this, samples were produced with conventional methodology (cutting, tempering, tempering and cryogenic treatment) and samples with the addition of cold forging before heat treatments. The purpose of adding the cold forging operation was to reduce the raw material, in addition to raising the quality of the final product generated. To validate the dimensional values obtained, non-linear numerical analysis performed by the ANSYS® Workbench software was used. Using a model with 50% of the real size, a variation of approximately 18% was obtained between the elongation obtained in the computational simulation and in the dimensional analysis, in addition to the interpretation of the behavior of the sample in the tool. Both samples, forged and non-forged, after being heat treated, went through the machining and sharpening stages. With the finished product, to evaluate the samples, the hardness test, magnetic particles (evaluation of cracks and microcracks), cutting capacity and immersion corrosion were used. The hardness test revealed similar values between forged and non-forged samples. The magnetic particle test showed similarities between the forged and non-forged samples, with no fractures. The cutting capacity test showed a greater efficiency of the forged sample. The corrosion test showed a higher concentration of corrosion pits in the forged sample, but the test showed that both samples would be suitable for use. The microstructures of the forged and non-forged samples were analyzed. It is observed that in both samples, the martensitic battens with a higher intensity of secondary carbides in their contours, in addition to the forged sample, presented an alignment of inclusions. It was also found that the inclusions contained after the alloy was treated were primary carbides not yet dissolved from the raw material and a slight increase of these carbides present in the sample that had gone through the forging step. In the microhardness analysis, it showed higher values in the non-forged sample. Finally, the addition of the forging process showed advantages regarding the cutting capacity of the steel, but a deterioration in relation to its metallurgical specifications, such as corrosion and microstructure.

**Keywords:** Metallurgy, Blade, Industrial Optimization, AISI 440.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parque Industrial Tramontina Cutelaria. (a) matriz. (b) divisão Starflon.[2] .....	16
Figura 2 - Categorias dos aços inoxidáveis [9].....	19
Figura 3 - Microestrutura do aço inoxidável ferrítico recozido. (a) revelado utilizando reagente gliceregia acético. (b) ataque químico eletrolítico com 60% de HNO <sub>3</sub> [16].....	21
Figura 4 - Microestrutura do aço inoxidável austenítico recozido. (a) iluminação de campo claro. (b) iluminação em campo escuro. (c) iluminação diferencial de contraste de interferência. [16].....	22
Figura 5 - Microestrutura do aço inoxidável martensítico temperado. (a) AISI 403 revelado com Picral a 4% mais HCl. (b) AISI 440 revelado com reagente de Vilella. [16].....	23
Figura 6 - Diagrama de fases, sistema Fe-Cr [19] .....	24
Figura 7 - Propriedades mecânicas à tração relacionadas com o percentual de deformação no trabalho a frio em aços [38] .....	27
Figura 8 - Forjamento em matriz aberta [39].....	27
Figura 9 - Interferência do atrito no forjamento. (a) Peça posicionada entre as matrizes. (b) Forjamento sem a ação do atrito. (c) Forjamento com a ação do atrito. Fenômeno do embarrilamento [48]. .....	28
Figura 9 – Estrutura da laminação a frio [53]. .....	30
Figura 11 – Etapas do processo padrão do metodo de elementos finitos [56] .....	31
Figura 12 – Discretização do método de elementos finitos [61] .....	32
Figura 13 – Elementos de uma faca forjada [58].....	33
Figura 14 – Ângulo existente na lâmina [66] .....	34
Figura 15 - Fluxograma de atividades desenvolvidas.....	35
Figura 16 – Croqui de corte das amostras relacionado ao sentido de laminação .....	36
Figura 17 – Parâmetros de recozimento das amostras do aço AISI 440 .....	37
Figura 18 – Amostras em aço AISI 440 .....	38
Figura 19 – Ferramenta de forjamento a frio. (a) Projeto ferramenta inferior. (b) Ferramenta física inferior.....	38
Figura 20 – Parâmetros de têmpera das amostras do aço AISI 440 .....	39
Figura 21 – Máquina de ensaios universal .....	40
Figura 22 – Durômetro Rockwell .....	42
Figura 23 – Principio do ensaio de partículas magnéticas [71] .....	43
Figura 24 – Ensaio de capacidade de corte.....	44



Figura 25 – Ensaio de imersão.....	45
Figura 26 – Microdurômetro Shimadzu .....	47
Figura 27 – Posicionamento das marcações nos corpos de prova .....	48
Figura 28 – Perfil da lâmina antes e após forjamento .....	49
Figura 29 – Curva tensão x deformação aço AISI 440.....	50
Figura 30 – Curva de Escoamento do aço – Região plástica.....	51
Figura 31 – Dureza obtida no ensaio Rockwell .....	51
Figura 32 – Análise por partículas magnéticas fluorescentes. (a) lâmina para calibração do equipamento. (b) lâmina em estudo.....	52
Figura 33 – Lâminas após ensaio de corrosão .....	53
Figura 34 – Regiões avaliadas microscopicamente nas amostras conformadas e não conformadas.....	54
Figura 35 – SC7620 Mini <i>Sputter Coater</i> .....	54
Figura 36 – Perfil de microdureza na amostra conformada e não conformada (a). Posição das medições (b).....	55
Figura 37 – Arranjo da simulação computacional. (a) Condições de contorno. (b) Malha gerada. ....	56
Figura 38 – Força de forjamento – simulação computacional.....	57
Figura 39 – Análise numérica da largura ( $\ell$ ) da peça.....	57
Figura 40 – Concavidade na peça forjada.....	58
Figura 41 – Evolução do forjamento a frio – simulação computacional .....	58
Figura 42 – Capacidade de Corte.....	60
Figura 43 – Capacidade de Corte por Passe .....	61
Figura 44 – Dimensão pites lâmina forjada.....	62
Figura 45 – Pite na face sem desbaste – lâmina conformada .....	62
Figura 46 – Microestrutura do aço AISI 440. (a) sem ataque de reagentes químicos (b) com ataque de reagente químico. ....	63
Figura 47 – Microestrutura do aço AISI 440 não forjado. (a) região longitudinal da lâmina (b) região do dorso da lâmina.....	64
Figura 48 – Microestrutura na região do fio da lâmina do aço AISI 440 não forjado.....	65
Figura 49 – Microestrutura na região do fio da lâmina do aço AISI 440 forjado .....	65
Figura 50 – Microestrutura da amostra conformada. (a) visão global (b)linhas de fibramento do material. ....	66
Figura 51 – Microestrutura na região do fio da lâmina do aço AISI 440 forjado .....	67

Figura 52 – Ampliação gerada pelo MEV para amostra forjada com respectivos gráficos gráfico da composição química da inclusão na matriz metálica. ....	67
Figura 53 – Ampliação gerada pelo MEV para amostra não forjada com respectivos gráficos gráfico da composição química da inclusão na matriz metálica. ....	68

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Aplicações dos diferentes tipos de aços inoxidáveis .....	19
Tabela 2 - Propriedades físicas dos aços inoxidáveis .....	20
Tabela 3 - Propriedades mecânicas mínimas dos aços inoxidáveis martensíticos .....	23
Tabela 4 - Composição química do aço AISI 440.....	24
Tabela 5 – Etapas de produção da lâmina .....	40
Tabela 6 – Etapas da preparação metalográfica das amostras de AISI 440. *Consumíveis da marca Struers. ....	46
Tabela 7 – Dimensão ( $\ell$ ) obtidas nos corpos de prova.....	49
Tabela 8 – Composição química do aço AISI 440.....	59

**LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais ( <i>American Society for Testing and Materials</i> )
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
COPON	Comitê de Política Monetária
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EDS	Microsonda de Energia Dispersiva
FEM	<i>Finite Element Method</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
NIH	<i>National Institute of Health</i>
PPGE3M	Programa de Pós Graduação em Minas, Metalúrgica e Materiais
TCP	Tratamento Criogênico Profundo
TCR	Tratamento Criogênico Raso
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_0$	Área inicial	(m <sup>2</sup> )
$A_i$	Área instantânea	(m <sup>2</sup> )
$C$	Coefficiente de resistência	(Mpa)
$E$	Módulo de Elasticidade	(Gpa)
$F$	Força mecânica	(N)
$k$	Tensão limite de elasticidade em cisalhamento	(Pa)
$k_f$	Tensão de Escoamento	(Pa)
$k_{f0}$	Tensão de Escoamento Inicial	(Pa)
$\ell$	Largura da lâmina	(mm)
$l$	Comprimento da lâmina	(m)
$l_0$	Comprimento inicial da lâmina	(m)
$m$	Fator de Atrito	(-)
$n$	Índice de encruamento	(-)
$R_m$	Tensão Máxima	(Mpa)
$V_f$	Volume Final	(mm <sup>3</sup> )
$V_i$	Volume Inicial	(mm <sup>3</sup> )

## LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

$\varepsilon$	Deformação relativa	(-)
$\mu$	Coefficiente de Atrito	(-)
$\sigma$	Tensão de Engenharia	(MPa)
$\sigma_n$	Tensão Normal	(MPa)
$\sigma_{esc}$	Tensão Escoamento	(MPa)
$\varphi$	Deformação verdadeira	(-)
$\Delta l$	Varição absoluta do alongamento	(mm)
$\tau$	Tensão de Cisalhamento	(Pa)
$\delta$	Alongamento Máximo	(%)

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO.....	14
1.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA.....	15
1.3 TEMA .....	16
1.4 JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	16
1.5 OBJETIVO GERAL .....	17
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS.....	18
2.1.1 – Aço Inoxidável Ferrítico.....	20
2.1.2 – Aço Inoxidável Austenítico .....	21
2.1.3 – Aço Inoxidável Martensítico .....	22
2.1.4 – Aço Inoxidável AISI 440 .....	23
2.3 TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇOS.....	25
2.3.1 Têmpera.....	25
2.3.2 Revenimento .....	25
2.3.3 Recozimento .....	25
2.3.4 Tratamento Criogênico .....	26
2.4 FORJAMENTO A FRIO.....	26
2.4.1 - Efeito do atrito no forjamento.....	28
2.4.2 – Forjamento a frio em facas .....	29
2.5 METODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	30
2.6 FACAS .....	33
<b>3 MATERIAS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1 MATÉRIA PRIMA RECEBIDA .....	36
3.1.1 Análise química do material AISI 440 .....	36
3.2 PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS PARA O FORJAMENTO.....	36
3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	40
3.4 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL.....	41
3.5 ENSAIO POR PARTICULAS MAGNÉTICAS.....	42
3.6 ENSAIO DE CAPACIDADE DE CORTE .....	44
3.7 ENSAIO DE CORROSÃO POR IMERSÃO.....	45

3.8 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA.....	45
3.9 MICROSCOPIA ÓPTICA.....	46
3.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	46
3.11 MICRODUREZA .....	47
<b>4 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>48</b>
4.1 ANÁLISE DIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA APÓS FORJAMENTO .....	48
4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL.....	50
4.3 ENSAIO DE DUREZA .....	51
4.4 ANÁLISE DE TRINCAS.....	51
4.5 ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CORTE DA LÂMINA .....	52
4.6 ANÁLISE DE CORROSÃO POR IMERSÃO .....	52
4.7 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA.....	53
4.8 ANÁLISE POR MEV (MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA) .....	54
4.9 ANÁLISE DE MICRODUREZA.....	55
<b>5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE FORJAMENTO .....</b>	<b>56</b>
<b>6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>59</b>
6.1 AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	59
6.2 AVALIAÇÃO DE DUREZA .....	59
6.3 AVALIAÇÃO DE TRINCAS .....	59
6.4 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE CORTE DA LÂMINA.....	60
6.5 AVALIAÇÃO DE CORROSÃO .....	61
6.6 AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA .....	63
<b>6.6.1 Análise da matéria prima recebida .....</b>	<b>63</b>
<b>6.6.2 Análise material tratado termicamente não conformado .....</b>	<b>64</b>
<b>6.6.3 Análise material tratado termicamente conformado .....</b>	<b>65</b>
6.7 AVALIAÇÃO DE INCLUSÕES .....	67
6.8 PERFIL DE MICRODUREZA .....	68
<b>7 CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO MATERIAL.....</b>	<b>78</b>
<b>ANEXO B – FICHA TÉCNICA BONDERITE L-FM FL 743.....</b>	<b>79</b>
<b>ANEXO C – DADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO.....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta as inserções do assunto proposto, sendo subdividida em contexto do estudo e descrição da empresa.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

A atual diretriz econômica nacional aliada a forte competitividade global, incita a indústria de manufaturas a uma busca incessante de novos mecanismos para elevar a eficiência de sua metodologia de gerar lucros. Segundo publicação trimestral do COPOM (Comitê de Política Monetária), a projeção central para o crescimento do PIB em 2019, que no primeiro trimestre era de 2,0%, após revisão atual, este percentual passou a 0,8%, devido ao recuo de empresas e consumidores relacionados as perspectivas de consumo e investimento.

Aliado a este cenário, o atual contexto mercantil encontra-se em estado de constante transformação. A cada ciclo temporal decorrido, novas prioridades são impostas, e cada vez mais a busca se dá no fazer mais com menos, aliado a um alto padrão de qualidade requisitado. Neste contexto, entre inúmeras possibilidades que possam ser redigidas, uma alternativa viável para moldurar a indústria nas condições coagidas pelo mercado, é o aprimoramento de processos de produção, relacionando o menor consumo de insumos sem perder a qualidade do produto.

Neste âmbito, o polo fabril demanda evoluções tanto tecnológicas como estratégicas, para o refino metódico de obtenção de produtos. Este progresso parte desde o ponto do melhor aproveitamento da matéria prima empregada no método até menores recursos financeiros para implantar e desenvolver ferramental para obtenção do artefato acabado. A busca por aperfeiçoar maneiras de fabricação remete ao aspecto de potencializar lucros sobre o item já produzido.

A cutelaria também foi desenvolvida com intuito de potencializar, porem invés de atingir o setor industrial, os esforços desta estão direcionados ao dia-a-dia do ser humano, principalmente no setor alimentício. O garfo para fixar, a colher para degustar, a tesoura para recortar, a faca para cortar entre outros. Estes utensílios, que em geral auxiliam há muitos séculos e até mesmo milénios, na preparação e no encargo de ingerir alimentos autodenominados talheres.

De todos os utensílios da cutelaria existentes na atualidade, a faca foi uma das primeiras ferramentas a ser concebida pelo *Homo Sapiens* [1]. Este instrumento foi surgindo ao longo da história da humanidade produzida com base em diversos materiais, e atualmente é



principalmente confeccionada de aço. Sua característica principal é ser uma ferramenta perfuro–cortante que discorre sobre a origem remota do modelo de lâminas, que se dá no âmbito da atividade da caça e da coleta [1].

O sistema explorado neste trabalho é caracterizado pela análise de um procedimento de obtenção de lâminas de facas, mais precisamente nas etapas metalúrgicas de forjamento, furação e corte de perfil ou etapas denominadas industrialmente por estágio pré-desbaste. Tendo em vista a possibilidade de se obter um artefato com elevado nível de qualidade em junção a um custeio de confecção reduzido, busca-se lapidar a metodologia utilizada atualmente e avaliar a adição de um sistema de forjamento a frio para elaborar o item pretendido.

## 1.2 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A Tramontina Cutelaria, fundada em 1911, está localizada em Carlos Barbosa, Rio Grande do Sul. Hoje com 282, 000 m<sup>2</sup> de área arquitetada conforme figura 1, esta unidade fabril computa aproximadamente 3.200 funcionários ativos, ocupam de uma ampla variedade de produtos: facas de cozinha, facas esportivas, facas profissionais, facões canivetes, talheres de uso diário, utensílios de cozinha, panelas, formas e frigideiras antiaderentes, linha para queijos e vinhos, espetos e uma linha completa de produtos para churrasco.

Todos os produtos primam pela qualidade, funcionalidade, praticidade, e pela inovação de design. A Tramontina Cutelaria é a primeira unidade fabril da Tramontina – empresa que deu origem ao grupo organizacional Tramontina e há mais de 110 anos vem fabricando produtos para tornar melhor o dia a dia e a vida das pessoas.

O grupo zela por atuar de forma sustentável, por meio de cuidados relacionados ao meio ambiente e colaboração com as comunidades dos mais de 120 países, que se encontra presente em mais diversos segmentos do mercado.



Figura 1 - Parque Industrial Tramontina Cutelaria. (a) matriz. (b) divisão Starflon.[2]

### 1.3 TEMA

O tema do presente trabalho está relacionado a avaliação do processo de manufaturar uma lâmina de faca em meio industrial. Para isso serão abordados conceitos de conformação mecânica correlacionados com a metodologia empregada.

### 1.4 JUSTIFICATIVA DO TEMA

A sociedade atual é constituída com diversos procedentes do metal: objetos, estruturas, ferramentas, entre outros. Sua excessiva utilização se dá em virtude de suas características sendo as principais a condutividade, rigidez e maleabilidade. No ciclo fabril do aço atua desde como maquinário e ferramentaria para produção até produto acabado destinado a consumidor externo.

O valor pago pelo metal em siderurgias, sofre em determinados intervalos de tempo aumento sobre o mesmo. O pretexto da alteração monetária está interligado ao fato deste ser um elemento constituído por minerais extraídos, deste modo um item que possui reservas finitas na natureza além da alta valorização do dólar frente ao real.

A elaboração da pesquisa tem como principal foco o desperdício de matéria-prima para a elaboração de uma lâmina. Em termos de percentual de massa aço, desde o início do ciclo de trabalho até a obtenção do componente concluído, a matéria prima descartada é de aproximadamente 65% em alguns modelos de lâmina.

Para redução dos percentuais de desperdícios serão observadas e avaliadas as metodologias de corte da forma inicial sendo essa proporção importante para etapas subsequentes. Além destes pontos o processo de forjamento a frio surge como uma alternativa de aprimorar tanto propriedade mecânica do material como contenção de gastos com matéria prima.

Além do melhor aproveitamento do material, o processo de forjamento a frio como maneira de produzir facas, dentro da empresa, é visto como inovador, por não se possuir nenhuma lâmina processada desta forma.

## 1.5 OBJETIVO GERAL

Aprimorar a metodologia empregada no processo de fabricação de uma lâmina de aço AISI 440, de modo a avaliar a possibilidade de adicionar um processo de forjamento afim de reduzir a matéria prima.

## 1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elucidar métodos utilizados para fabricação atual.
- Explanar características metalúrgicas e mecânicas do material empregado na fabricação.
- Promover alteração dimensional das amostras via forjamento a frio.
- Comparar modelagem computacional do processo de forjamento a frio com dados provindos da metodologia experimental do mesmo.
- Comparar a performance do material com o processo otimizado relacionado com o método de obtenção antecedente.
- Comparar propriedades metalúrgicas como microestrutura, corrosão e dureza das amostras com e sem forjamento a frio.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os principais tópicos para entendimento e elaboração da proposta de implementação, abordando os temas de ciência dos materiais além de tópicos da metalurgia mecânica.

### 2.1 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis surgiram no mercado na década de 1910 incorporando-se a uma nova classe de materiais com boa resistência à corrosão, com aplicações essencialmente voltadas para a indústria alimentícia e médica [3]. Aço inoxidável é basicamente composto por ligas de ferro, carbono e cromo. Outros elementos metálicos do mesmo modo compõem estas ligas, mas o cromo com um teor mínimo de 10,50%, é considerado o elemento mais importante em virtude de originar uma elevada resistência à corrosão [4].

Obtém-se o nível de resistência à corrosão através da formação de uma camada de óxido, rica em cromo, sobre a superfície do material. Como característica esta camada denomina-se passiva, possui nanômetros de espessura, é altamente aderente, contínua, compacta e isola o material dos efeitos químicos externos [5].

Encontra-se também níquel e molibdênio em ligas de aços inoxidáveis, devido a sua contribuição nas propriedades mecânicas além de aprimorar características da camada passiva comentada anteriormente [6]. Elementos como o titânio e o nióbio são usados para limitar efeitos deletérios de elementos como o carbono, que proporciona a formação de carbonetos de cromo [3]. Na figura 2, observa-se as diferenças entre os grupos de aços inoxidáveis: ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e endurecidos por precipitação, relacionados a percentuais de cromo e níquel presentes na liga.

Determina-se as diferenças entre as classes de aços inoxidáveis com base na fase constituinte predominante na sua microestrutura, podendo possuir diversificados elementos [7]. Efetua-se a diversificação em temperatura ambiente, após o material ser trabalho a quente, sendo que o processo é dependente da capacidade de seus elementos em estabilizar a austenita ou a ferrita contida na liga [8].

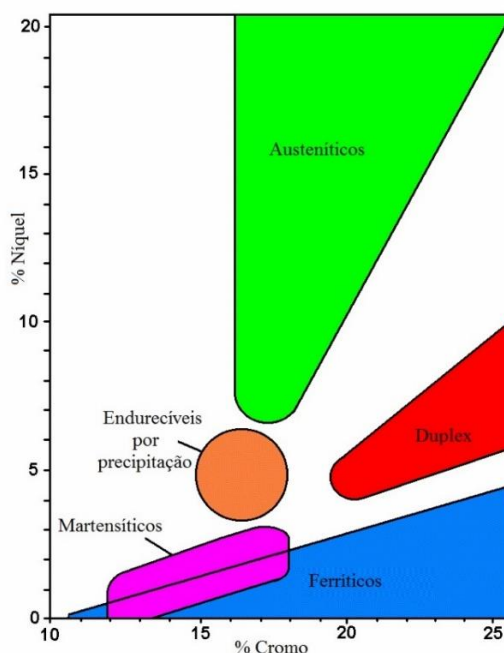


Figura 2 - Categorias dos aços inoxidáveis [9]

Além da resistência a corrosão os aços inoxidáveis possuem uma extensa faixa de propriedades mecânicas, desta forma, concebendo uma grande versatilidade em aplicações para o material. Algumas destas aplicações são citadas na tabela 1, de acordo com a classe específica do aço.

Tabela 1 - Aplicações dos diferentes tipos de aços inoxidáveis

<b>Classe de Aço Inoxidável</b>	<b>Aplicações Típicas</b>
<i>Ferrítico</i>	Componentes de exaustão automotivos, tanques para pulverizadores agrícolas, válvulas (alta temperatura) e câmeras de combustão.
<i>Austenítico</i>	Equipamentos para processos químicos e de alimento, vasos criogênicos e construções com solda.
<i>Martensítico</i>	Canos de rifles, peças de motores de jato, cutelaria, mancais, rolamentos e instrumentos cirúrgicos.

Fonte: Adaptado de CALLISTER [7]

Utiliza-se aços inoxidáveis com constância a temperaturas elevadas e em meio a ambientes severos, visto que eles resistem à oxidação e mantem as suas integridades mecânicas sob essas atmosferas adversas [7]. Outra característica relevante dos aços inoxidáveis é o magnetismo, sendo-se que estes da família martensítica e ferrítica possui a propriedade, já o

aço inox austenítico não a possui. O quadro 1, apresenta as principais propriedades físicas dos aços inoxidáveis a temperatura ambiente.

Tabela 2 - Propriedades físicas dos aços inoxidáveis

Propriedades	Aços inoxidáveis		
	Martensítico	Ferrítico	Austenítico
<i>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</i>	7800	7800	7800 - 8000
<i>Modulo de elasticidade (GPa)</i>	200	200	193 - 200
<i>Coef. de expansão térmica (mm/m°C<sup>-1</sup>)</i>	11,6 - 12,1	11,2 - 12,1	17,0 – 19,0
<i>Condutividade térmica (W/mK)</i>	28,7	24,4 - 26,3	18,7 – 22,8
<i>Resistividade elétrica(nΩ.m)</i>	550 - 720	590 - 670	690 - 1020
<i>Faixa de Fusão (°C)</i>	1480 - 1530	1480 - 1530	1400 - 1450

Fonte: Adaptado de MODENESI [10]

### 2.1.1 – Aço Inoxidável Ferrítico

São compostos pela fase ferrita alfa ( $\alpha$ -Fe) com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado – CCC [7]. O elemento de liga principal é o Cromo com teor na faixa de 11,5 a 27%. O Manganês normalmente é de 1,00% e os teores de Fósforo e Enxofre encontram-se torno 0,04 e 0,03 respectivamente [11]. Algumas ligas podem conter molibdênio, silício, alumínio, titânio e nióbio para conferir características particulares como boa ductilidade e conformabilidade ao produto final [12]. A título de exemplo, enxofre e selênio podem ser adicionados para aumentar a usinabilidade.

Na aplicação destes aços deve ser levado em consideração uma baixa de resistência ao impacto além de dificuldades pertinentes a soldagem [13]. Fato explicado condigno a zona termicamente afetada perder a tenacidade e à resistência a corrosão, devido a precipitação nos contornos de grãos e ao crescimento dos mesmos.

A micrografia de um aço inoxidável ferrítico, figura 3, é composta de grãos de ferrita. Além da ferrita, a microestrutura apresenta fase intermetálica sigma e carbonetos  $M_{23}C_8$ , onde a letra “M” aponta metal [14]. Os aços inoxidáveis ferríticos em relação aos aços inoxidáveis austeníticos, apresentam tenacidade e resistência a altas temperaturas relativamente menores quando comparados [15].

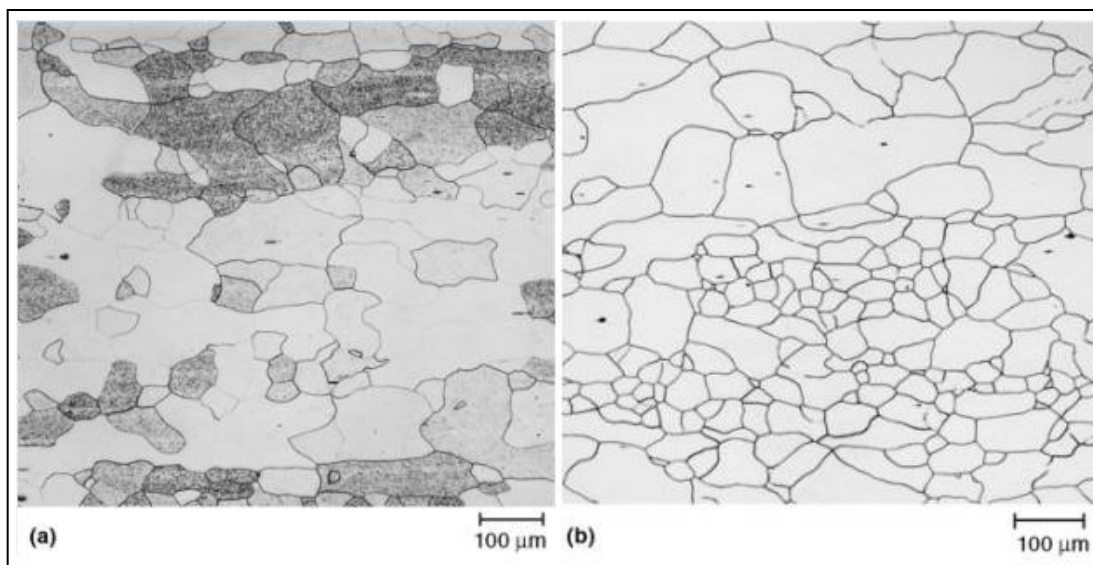


Figura 3 - Microestrutura do aço inoxidável ferrítico recozido. (a) revelado utilizando reagente gliceregia acético. (b) ataque químico eletrolítico com 60% de  $\text{HNO}_3$  [16]

### 2.1.2 – Aço Inoxidável Austenítico

O aço inoxidável austenítico apresenta uma estrutura de cúbica de face centrada – CFC, é o mais resistente a corrosão, devido aos elevados teores de cromo e as adições de níquel [7]. Possuem excelentes propriedades de resistência à temperatura elevada, podendo ser otimizadas através de mecanismos de endurecimento [13]. O teor de cromo presente pode variar de 16 a 26%, o de níquel no máximo 35% e o de manganês no máximo 15%. Os da série 2xx apresentam nitrogênio, 4 a 15,5% de manganês, e no máximo 7% de níquel. Os da série 3xx dispõem de grandes quantidades de níquel e mais de 2% de manganês [12].

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam excelentes valores de resistência ao impacto e não sofrem o fenômeno de transição dúctil-frágil, desta forma recomenda-se para serviços criogênicos ou quando a tenacidade é essencial [13]. Estas ligas não são endurecíveis por tratamento térmico, mas sim por deformação ou fenômeno de encruamento, porém, possuem baixo limite de escoamento [17].

Para trabalhos em meios agressivos, a composição química do aço altera-se afim de se obter propriedades necessárias, como exemplo a operação em meio ácido exige elevados níveis de níquel e molibdênio além da presença de cobre [4]. Observa-se a micrografia típica de um aço inoxidável austenítico na figura 4, onde os principais constituintes são os grãos de austenita. As principais aplicações desta liga compreendem a indústria farmacêutica, alimentícia, química, petroquímica, aeronáutica, nuclear, artística, arquitetônica, entre outras [18].

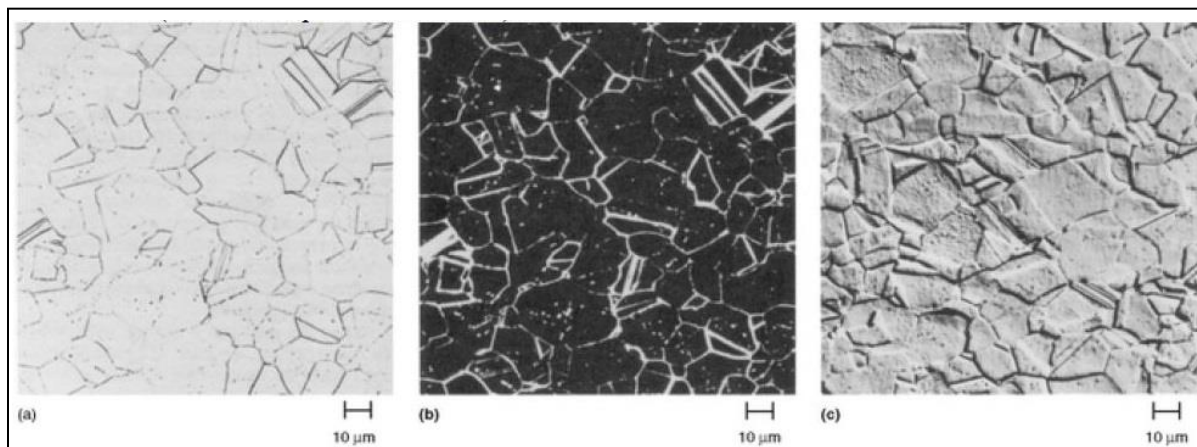


Figura 4 - Microestrutura do aço inoxidável austenítico recozido. (a) iluminação de campo claro. (b) iluminação em campo escuro. (c) iluminação diferencial de contraste de interferência. [16]

### 2.1.3 – Aço Inoxidável Martensítico

Os aços inoxidáveis martensíticos possuem esta nomenclatura devido à microestrutura presente ser provinda do método de têmpera e revenimento, ou seja, a martensita. Afim de explicar, o carbono está em uma determinada concentração que permite a transformação de ferrita em austenita em altas temperaturas, durante o resfriamento, a austenita se transforma em martensita [4]. O elemento de liga principal da classe é o cromo com teor na faixa de 11,5 a 18,00% além de ligas de ferro e carbono [6].

Dispõe de uma estrutura tetragonal de corpo centrado – TCC, podendo esta variar de acordo com seu percentual de carbono. Somente após o tratamento térmico de têmpera, este material passa a ser resistente à corrosão [3]. A liga pode apresentar abundância de carbonetos presentes para aumentar a resistência ao desgaste, além da adição de elementos de liga para melhorias em propriedades mecânicas [12]. A fim de exemplo o molibdênio, melhora a resistência à corrosão deste material e o vanádio melhora a tenacidade. A tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas de alguns aços inoxidáveis martensíticos a temperatura ambiente.

O aumento da dureza destes aços relaciona-se com o teor de carbono que pode variar amplamente e com estabilidade da ferrita- $\delta$  à temperatura de austenitização [12]. O teor de carbono presente na liga permite classificá-los como aços martensíticos de baixo, médio e alto carbono [3].



Tabela 3 - Propriedades mecânicas mínimas dos aços inoxidáveis martensíticos

Classificação AISI	Condição	Tensão Máxima ( $R_m$ ) (MPa)	Tensão de Escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) (MPa)	Alongamento ( $\delta$ ) (%)	Dureza
403	Recozido	485	275	16	-
410	Temp. a 204°C	485	275	16	-
420	Recozido	1720	1480	8	2 HRc
<b>440</b>	<b>Recozido</b>	<b>760</b>	<b>450</b>	<b>14</b>	<b>7 HRb</b>

Fonte: Adaptado de AMERICAN SOCIETY FOR METALS [15]

A alta dureza do material temperado faz com que o aço inoxidável martensítico sejam muito utilizados na fabricação de lâminas de facas [4]. Devido as temperaturas de transição nos aços inoxidáveis martensíticos serem comparáveis com a temperatura ambiente, estes não são empregados em serviços criogênicos. Já a capacidade de soldar estes aços é limitada devido a elevada temperabilidade nestes. A figura 4, demonstra a microestrutura de um aço inoxidável martensítico.

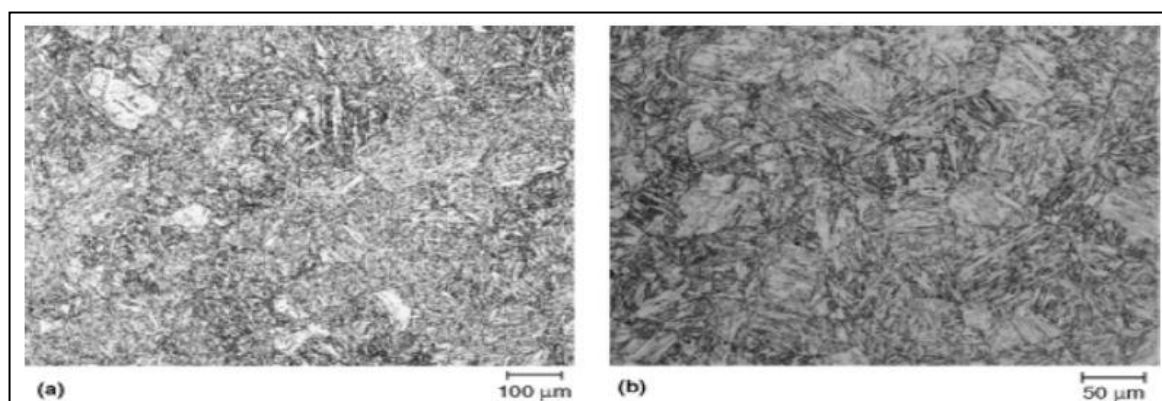


Figura 5 - Microestrutura do aço inoxidável martensítico temperado. (a) AISI 403 revelado com Picral a 4% mais HCl. (b) AISI 440 revelado com reagente de Vilella. [16]

#### 2.1.4 – Aço Inoxidável AISI 440

Equivalente ao aço DIN X50CrMoV15, o aço AISI 440 pertence ao grupo de aços inoxidáveis martensíticos com elevado teor de cromo. Através do diagrama de fases representado na figura 6, observa-se que em uma liga Fe-Cr, que o teor máximo de cromo, é de cerca de 12% e este mesmo percentual também determina o fim do campo austenítico do sistema.

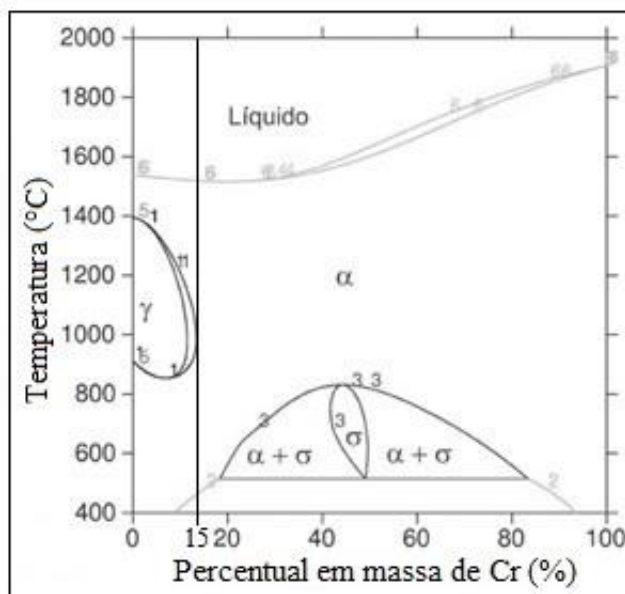


Figura 6 - Diagrama de fases, sistema Fe-Cr [19]

Porem o aço inoxidável AISI 440 possui a adição de um elemento gamagênico como o carbono ou o nitrogênio que desenvolve o tamanho do campo austenítico e permite adicionar mais cromo [3]. Desta maneira, a liga criada apresenta-se com elevada resistência à corrosão, uma liga que proporciona a transformação martensítica além de possuir propriedades como dureza e resistência mecânica em virtude da adição de carbono ou nitrogênio. A composição química do material se apresenta na tabela 3.

Tabela 4 - Composição química do aço AISI 440

%	<b>Carbono</b>	<b>Cromo</b>	<b>Molibdênio</b>	<b>Vanádio</b>
<i>Mínimo</i>	0.45	14.0	0.5	0.1
<i>Máximo</i>	0.55	15.0	0.8	0.2

Fonte: OUTOKUMPU STAINLESS STEEL [20]

Os elementos molibdênio e vanádio tem como característica formar carbonetos, assim elevando a dureza da liga. O vanádio opera como refinador de grão, desta forma desempenhando excelente resposta ao tratamento térmico. A combinação entre os elementos mencionados na tabela 4, proporciona excelente resistência ao desgaste de superfícies funcionais [20].

## 2.3 TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇOS

Designa-se como tratamento térmico como toda e qualquer alteração sofrida por um aço quando este for submetido a aquecimentos e resfriamentos de maneira controlada. Estas alterações têm por finalidade modificar as propriedades do aço, proporcionando características específicas para cada composição de material [21]. A utilização de tratamento térmico em aços para venda comercial é corriqueira em todo o mundo [22].

### 2.3.1 Têmpera

A têmpera é definida como o resfriamento rápido de um aço posterior ao aquecimento em temperatura de austenitização do mesmo (1020/1070°C). O objetivo é transformar a austenita em martensita, que é o produto de maior dureza das transformações dos aços [23]. Desta forma, é de grande importância que ocorra um resfriamento rápido a fim de alcançar a máxima dureza do aço [21].

### 2.3.2 Revenimento

Revenimento é o tratamento térmico caracterizado pelo reaquecimento abaixo da zona crítica (100/200°C), tendo como principal objetivo aliviar as tensões internas e diminuir a fragilidade da martensita [21]. As principais variáveis passíveis de controle no processo são: temperatura, tempo, taxa de resfriamento e composição do aço. Além de aliviar ou remover as tensões do material, corrige-se a excessiva dureza do material, aumentando desta forma a ductibilidade e a resistência ao impacto [21].

### 2.3.3 Recozimento

Caracteriza-se como um tratamento térmico no qual um material é exposto a uma temperatura (750/800°C) por um certo período e, após o mesmo, é resfriado muito lentamente [21]. O parâmetro tempo neste tratamento é de grande importância devido aos gradientes térmicos internos e externos da peça. Caso o parâmetro não esteja correspondente com a pode-se ocorrer empenamentos e formação de tensões residuais internas [7].

### 2.3.4 Tratamento Criogênico

Tratamento criogênico é o procedimento que permite tratar materiais a temperaturas extremamente baixas [24]. Em ligas ferrosas as principais prerrogativas ocorrem nas propriedades mecânicas: transformação completa de austenita retida em martensita, dispersão fina de carbonetos e remoção de estresse residual.

Destaca-se duas categorias de tratamento criogênico. Grupos elaborados de acordo com a temperatura cujas amostras são expostas. Tratamento criogênico raso (TCR) – temperaturas próximas a  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  e tratamento criogênico profundo (TCP) - temperaturas próximas a  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$  [25]. O tratamento criogênico raso reduz a quantidade de austenita. Já no profundo além desta redução é caracterizado com o aumento no número de precipitados finos [26].

## 2.4 FORJAMENTO A FRIO

Define-se como forjamento o processo de fabricação que molda o metal usando forças compressivas localizadas, para fabricar produtos resistentes e de alta qualidade em condições de temperatura controlada [27]. O forjamento, juntamente com a fundição e usinagem, são os três processos de fabricação mais utilizados na produção de produtos metálicos [28]. Já denomina-se o processo de forjamento a frio como um processo de conformação que ocorre no campo plástico da liga metálica, sem remoção do material [29]. As propriedades mecânicas obtidas pelo processo de forjamento trazem uma condição ideal para diversos tipos de peças, que necessitam de alta resistência e possuem geometrias complexas [30].

O processo de forjamento a frio é denominado um processo de conformação plástica, ou seja, que ocorre no campo plástico da liga metálica, sem remoção do material [31]. No forjamento a frio o acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais do item, são superiores quando compara-se a metodologia do forjamento a quente [30]. Na deformação do aço trabalham-se com temperaturas abaixo do ponto crítico ou da temperatura de recristalização. Os parâmetros, como redução em área e temperatura de recozimento são os que possuem maior importância durante o processo de forjamento [32].

Em virtude de a temperatura de trabalho situar-se abaixo da temperatura de recristalização, o material da peça desenvolve uma maior resistência à deformação [33]. Este fenômeno impede intensidades superiores de redução de seção transversal do material trabalhado. Pode-se ter reduções em área de 30% a 70% por passe dependendo do tipo de material, da tempera e da espessura inicial [34]. O forjamento a frio permite a produção

econômica em massa de componentes de metal de alta resistência e precisos devido a boa eficiência do material em ciclos curtos [35].

O tamanho de grão e a orientação cristalográfica no procedimento de deformação a frio altera as propriedades do material [36]. Porém as mudanças das propriedades variam de acordo com a distribuição e número das discordâncias introduzido devido à deformação a frio [37]. A figura 7 apresenta propriedades mecânicas induzidas pelo aumento do percentual de redução a frio. Observa-se as alterações na resistência mecânica, ductilidade e na deformação prévia.

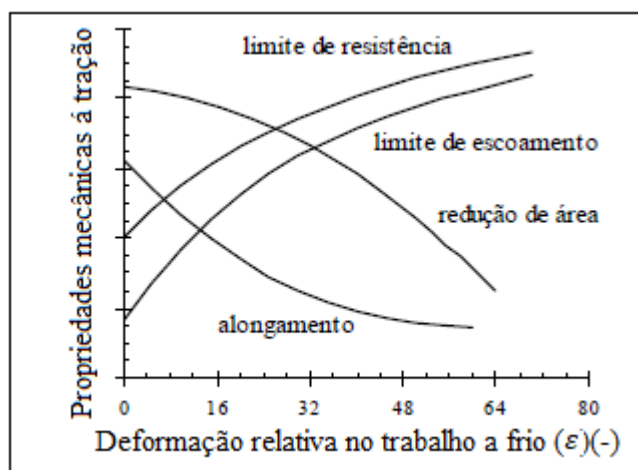


Figura 7 - Propriedades mecânicas à tração relacionadas com o percentual de deformação no trabalho a frio em aços [38]

O processo de forjamento pode também ser subdividido de acordo com o ferramental, sendo este em matriz aberta e fechada. No forjamento em matriz aberta, o corpo de prova é conformado entre duas matrizes de geometrias moderadamente simples de modo que apenas uma parcela do corpo é conformada pelas matrizes, conforme a figura 8.

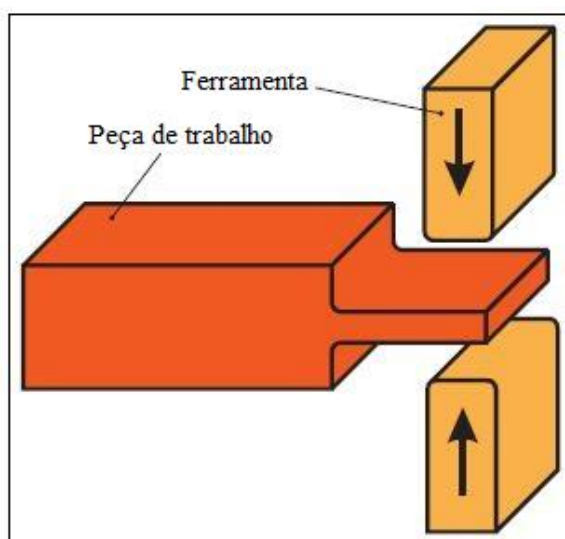


Figura 8 - Forjamento em matriz aberta [39]

Já forjamento em matriz fechada o corpo de prova é completamente envolvido pelas matrizes. Em matriz aberta o material conformado escoar de forma livre, já no segundo caso o material escoar de forma restrita pelas matrizes que compreendem o material [40]. Observa-se casos em que a utilização dos dois modos se faz necessário, nestas situações ocupa-se o forjamento em matriz aberta como uma aproximação da geometria para o forjamento em matriz fechada [41].

Sujeita-se as ferramentas de forjamento a frio uma combinação de produtos abrasivos desgaste e cargas mecânicas muito altas criando uma pressão superficial de até 3000 Mpa, sendo está observada por alto deformação de fluxo de material do tarugo à temperatura ambiente [42, 43]. Restringe-se a vida útil da ferramenta para o processo de forjamento a frio pelo desgaste e fadiga [44].

#### 2.4.1 - Efeito do atrito no forjamento

Intitula-se atrito ao mecanismo pelo qual se desenvolvem forças na superfície de contato entre dois corpos, que estas elaboram uma resistência ao deslizamento de um corpo sobre o outro [45]. Em processos de conformação de metais aplica-se uma pressão nas matrizes que é transferida para a geratriz que encontra-se acomodado entre elas [46].

Na interface de movimento relativo entre o ferramental e a geratriz, observa-se o atrito. Para reduzir os efeitos do atrito são adicionadas finas películas de lubrificantes, os quais apresentam baixa tensão de cisalhamento na interface peça-matriz com intuito de minimizar as tensões que se opõe ao escoamento do material [47]. A figura 9 representa a influência do atrito em um forjamento de matriz aberta.

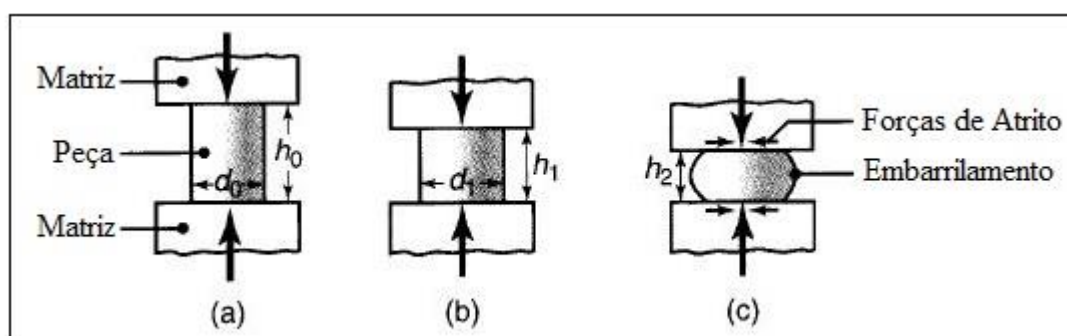


Figura 9 - Interferência do atrito no forjamento. (a) Peça posicionada entre as matrizes. (b) Forjamento sem a ação do atrito. (c) Forjamento com a ação do atrito. Fenômeno do embarrilamento [48].

Inclui-se também as seguintes razões para a grande relevância do atrito nos processos de conformação [49]:

- o atrito desenvolve papel na definição das cargas da conformação assim como nas tensões transferidas para as matrizes.
- dependência da integridade e do acabamento superficial da peça no que diz respeito ao filme lubrificante aplicado.
- a atuação do atrito na relação entre o lubrificante e os componentes da máquina, nas análises de custo e na conservação de energia.

Verifica-se três tipos básicos de lubrificação que respondem a condição de atrito em conformação mecânica para metais: a seco (sem lubrificante); hidrodinâmica (camada espessa de lubrificante na interface); e lubrificação de contorno (lubrificação intermediária entre as comentadas) [50]. Para se obter uma descrição matemática de atrito interfacial no processo de conformação, são empregadas as seguintes leis e teorias sobre o atrito [51]:

- Lei de Amonton e Coulomb

$$\tau = \mu\sigma_n \quad \mu > 0 \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $\tau$  representa a tensão de cisalhamento,  $\mu$  representa o coeficiente de atrito e  $\sigma_n$  representa tensão normal de contato entre as superfícies.

- Lei do atrito constante

$$\tau = mk \quad 0 < m \leq 1 \quad \text{Eq. 2}$$

onde  $m$  representa o fator de atrito e varia de 0 (condições de atrito nulo) a 1 (condições de atrito máximo geralmente com ocorrência de adesão do material na ferramenta,  $k$  corresponde à tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro do material.

- Teorias de adesão, que levam em consideração a rugosidade real de contato das superfícies

A seleção e formulação de lubrificantes tem alta importância tanto quanto a variação dos parâmetros de forjamento, porém o custo dos lubrificantes situa-se em geral abaixo de 2% do custo do produto final [52].

#### 2.4.2 – Forjamento a frio em facas

Acomodar grandes coeficientes de redução a frio não é característica de aços utilizados em lâminas. Trabalhando-se a frio, os grãos do aço são distorcidos pela deformação aplicada, desta forma aumentando a resistência do mesmo. O aço gera cada vez mais deslocamentos à

medida que é forjado [53]. O deslocamento por si, faz com que as discordâncias presentes no aço dificultem as movimentações das mesmas. Na laminação este efeito fica mais evidente, conforme destacado na figura 10.

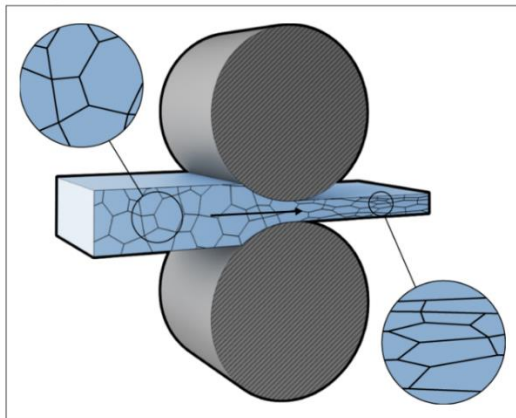


Figura 10 – Estrutura da laminação a frio [53].

Devido à falta de energia no processo a frio, a matriz do aço da lâmina se mantém com alta densidade de deslocamentos. Porém, quanto mais redução a frio for aplicada ao aço, menor será a temperatura necessária para a recristalização [53]. Desta forma o trabalho a frio aplicado sobre a lâmina proporciona aumento da energia para a recristalização, permitindo assim que o processo ocorra em temperaturas menores.

O fenômeno da recristalização neste caso ocorre em três períodos: incubação, nucleação e crescimento [53]. No período de nucleação ocorre crescimento de estado estacionário. Quando ocorre o impacto entre os grãos, a taxa de crescimento reduz à medida que os grãos são bloqueados uns pelos outros [53]. Com a ausência de energia para recristalização a lâmina forjada a frio torna-se com dureza elevada e com patamar de fragilidade aumentado.

## 2.5 METODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A contínua necessidade industrial de aprimorar o nível de controle no processamento em virtude do aumento da taxa de produção e da otimização de parâmetros, faz análises numéricas tornarem-se cada vez mais importantes no meio fabril. A técnica dos elementos finitos tem sido utilizada como uma ferramenta poderosa na modelagem de conformação de metal [54].

Ao se realizar o processo de laminação, desde a geometria mais simples a se conformar até a mais complexa, o sistema traz consigo inúmeras incógnitas que o cercam. A análise por meio da simulação numérica traz variadas simplificações ao procedimento, como: reduzir o tempo de projeto, analisar o enchimento dos canais, evolução de defeitos além da distribuição



de temperatura, tensões e grau de deformação [55]. Demonstra-se na figura 11, que o método de elementos finitos na prática, se subdivide em três etapas.

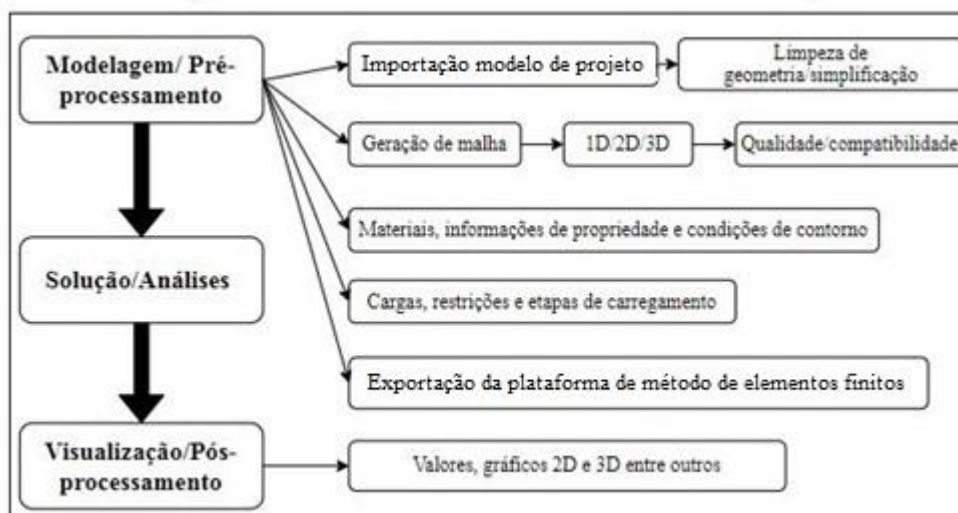


Figura 11 – Etapas do processo padrão do método de elementos finitos [56]

Utiliza-se o mecanismo numérico do método de elementos finitos, na obtenção da solução aproximada numa geometria definida. Aplica-se esta ferramenta com o objetivo de determinar o estado de tensão e deformação de um domínio, submetido a esforços externos [57]. Como etapa de pré-processamento, discretiza-se esse domínio em elementos que mantêm as propriedades de quem os originou. Os elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos para que se obtenha os resultados desejados [58]. O produto do modelo matemático é regido por coordenadas nodais, elementos finitos e como eles estão unidos, propriedades materiais dos elementos, condições de contorno e o tipo de análise a ser realizada [59].

Ao conjunto de elementos finitos e coordenadas nodais, dá-se, usualmente o nome de malha. A figura 12 apresenta a demonstração do método de elementos finitos (a), na análise de compressão de uma chapa com furação no centro. A caracterização do fenômeno por meio de um elemento (b) e a malha gerada (c). Com intuito de obter resultados mais próximos dos reais, pode-se refinar a malha (d). O refino de malha baseia-se na alteração de nós em meio a geometria trabalhada. Considera-se uma malha eficiente, aquela que está em conformidade, que seus elementos possuam uma boa forma e que os contornos de limite da geometria sejam respeitados [60]. Na condição de pré-processamento se anexa também as condições de contorno, que referem-se a esforços e graus de liberdade aplicados em cada elemento.

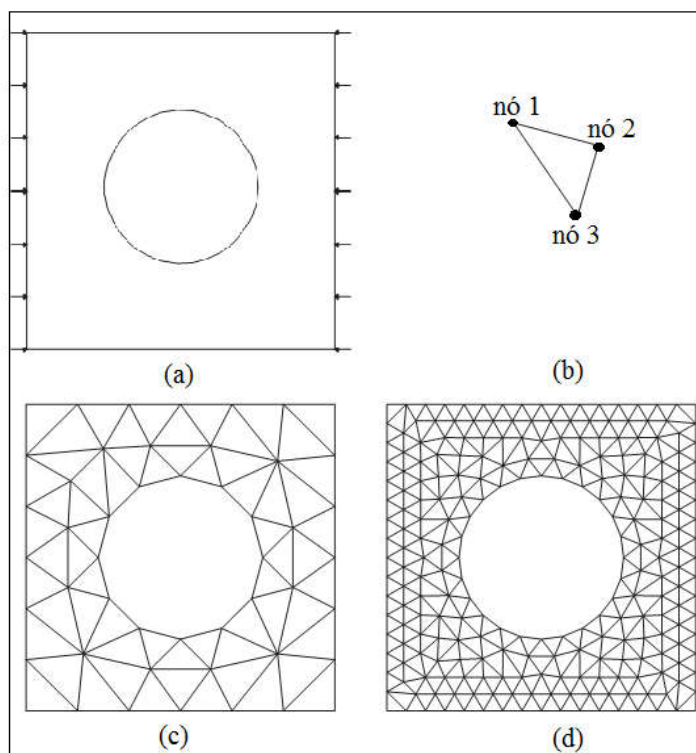


Figura 12 – Discretização do método de elementos finitos [61]

Para a etapa de análise utiliza-se a ferramenta apropriada para equacionar e processar as condições iniciais e de contorno impostas pelo modelo provindo da etapa de pré-processamento. Em malhas com um número grande de elementos e nós observa-se problemas com programas comumente usados que são muito lentos e para algumas operações frequentemente inutilizáveis.

Estruturas e algoritmos de dados eficientes foram projetados e implementados para que se possibilite um trabalho rápido com malhas de elementos finitos grandes [62]. Usualmente utiliza-se *softwares* comerciais com necessidade de supervisão humana para alcançar bons resultados. Se concluí a etapa de solução do modelo após definir-se o número de iterações e o método utilizado, que deve ser adequado de acordo com cada problema. Relacionado aos métodos de interação entre os elementos formadores do modelo em análise, normalmente aplica-se o de *Newton-Raphson*, devido sua rápida convergência [63].

Por fim, na etapa denominada pós-processamento utiliza-se interpolações com dados gerados pelo algoritmo na etapa de interpretação e verificação dos resultados, para gerar uma interface palpável dos mesmos. Elabora-se a saída de dados por meio de impressão de números, que exigem futuras interpretações, como também através de gráficos, que beneficiam a interpretação dos resultados

Na solução, apresenta-se dados como taxas de tensões e deformações, distribuição de temperaturas, deslocamento de material, força de trabalho, evolução microestrutural, entre outros que a ferramenta disponibiliza. Em virtude da precisão requerida na solução das equações, verifica-se a coerência dos resultados apresentados, analisando a necessidade de um reprocessamento do fenômeno em estudo [55]. Para se obter resultados aprimorados, pode-se alterar fatores como: refino da malha, as condições de contorno e equações regentes.

## 2.6 FACAS

Denomina-se faca o utensílio cortante capaz de ser empunhado. As facas são ferramentas utilizadas desde as mais primitivas eras da humanidade como instrumentos de defesa ou sobrevivência, até dias atuais como acessórios altamente empregados na culinária. No mercado atual, observa-se uma ampla diversidade de tipos e marcas de facas. Mas entre toda a heterogeneidade existente, preza-se que todas as lâminas de facas devem ser elaboradas de aço inoxidável de alto teor de carbono [64]. Em virtude da necessidade da capacidade de resistência a ferrugem e manchas, mantendo-se sua parte cortante afiada.

Divide-se as facas em duas categorias principais: facas forjadas e facas estampadas. Produz-se uma faca forjada de uma única peça de metal, já uma faca estampada é cortada mecanicamente de um grande pedaço de metal [65]. As principais partes de uma faca forjada são apresentadas na figura 13. Já a diferenciação entre lâminas existentes se dá entre flexíveis, rígidas e semi-rígidas ou semi-flex [64]. A escolha por modelo se dá em virtude de sua aplicação, assim como a experiência de manuseio de cada operador.

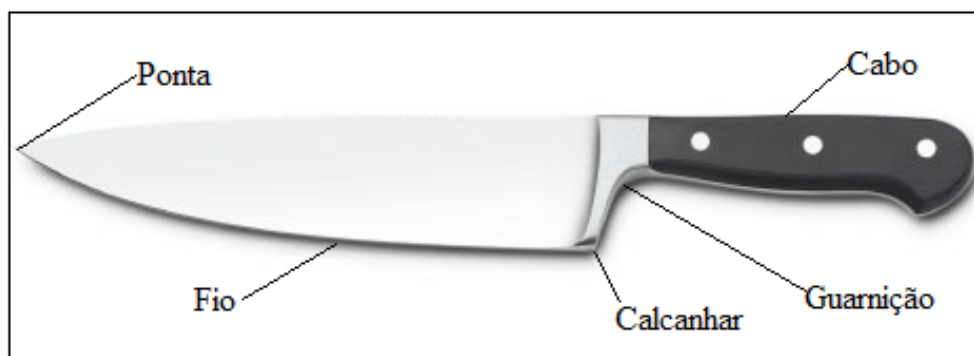


Figura 13 – Elementos de uma faca forjada [58]

Para a análise de uma faca é primeiramente necessário se observar o tipo de aço empregado em sua construção. Na distinção do aço empregado busca-se avaliar sua composição química e o efeito que gera o aumento ou redução de determinado elemento químico na liga. Desta forma apresenta-se as principais especificações necessárias ao selecionar o aço: a

quantidade de carbono, a faixa de temperatura de forjamento, a temperatura de recozimento, têmpera e de revenimento, a disponibilidade do mesmo e a viabilidade de utilização no geral [65].

Na metalurgia das facas, os carbonetos são compostos duros que formam-se no aço, elaborado por partículas de ferro e carbono. O tipo e o tamanho do carboneto afetam a resistência ao desgaste e a tenacidade [66]. Relaciona-se a dureza na lâmina, como resultado de um tratamento térmico. Com maior dureza, aumenta-se resistência ao desgaste assim como a agudez em sua borda.

Outro aspecto importante é o ângulo de borda da lâmina, apresentado na figura 14. A maior gama de facas que se encontram no mercado possui ângulo de borda  $25^\circ$  por lado, mas observa-se casos, como exemplo, onde um dos lados da lâmina é  $0^\circ$  e o outro aproximadamente  $15^\circ$ , figura 13 [67]. No caso específico apresentado a lâmina denomina-se *Yanagiba*, com origem japonesa [66]. Se confere a ângulos menores maior precisão no corte, porém maior fragilidade consigo. Relacionando a geometria ao tipo de aço, esta é um dado muito mais crítico quando relacionado a performance, porém pode-se alterar a geometria.

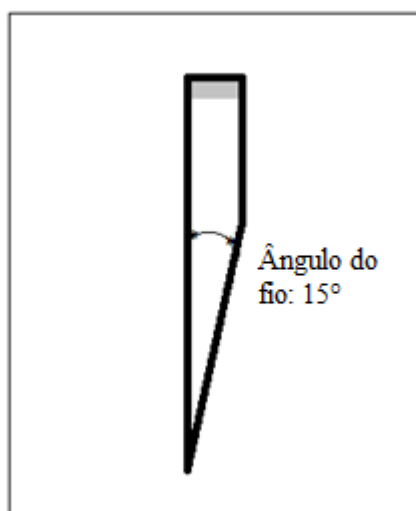


Figura 14 – Ângulo existente na lâmina [66]

Com a lâmina em constante trabalho ocorre desgaste na borda da mesma, que está em contato direto com o material processado. Determina-se a degradação do ângulo da faca através de fatores como calor, pressão dureza e abrasão [68]. Com o desgaste observa-se uma ação ineficiente de cisalhamento de materiais. Desta forma, a única solução é restaurar o ângulo da lâmina através de afiação da mesma [68].

### 3 MATERIAS E MÉTODOS

Este capítulo pretende descrever minuciosamente a metodologia experimental utilizada para o desenvolvimento do estudo. A estrutura utilizada apresenta-se na forma de fluxograma na figura 15, ordenando as ações de maneira coerente com o propósito de obter resultados característicos de cada etapa. O texto apresenta-se segmentado em subtítulos que definem o assunto discutido.

O procedimento experimental apresenta-se decomposto em três grupos principais: elaboração de amostras, recozimento das amostras e forjamento a frio de uma parte das amostras. Cada etapa exhibe ferramentas utilizadas para obter dados afim de realizar o estudo e levantar hipóteses sobre o tema.

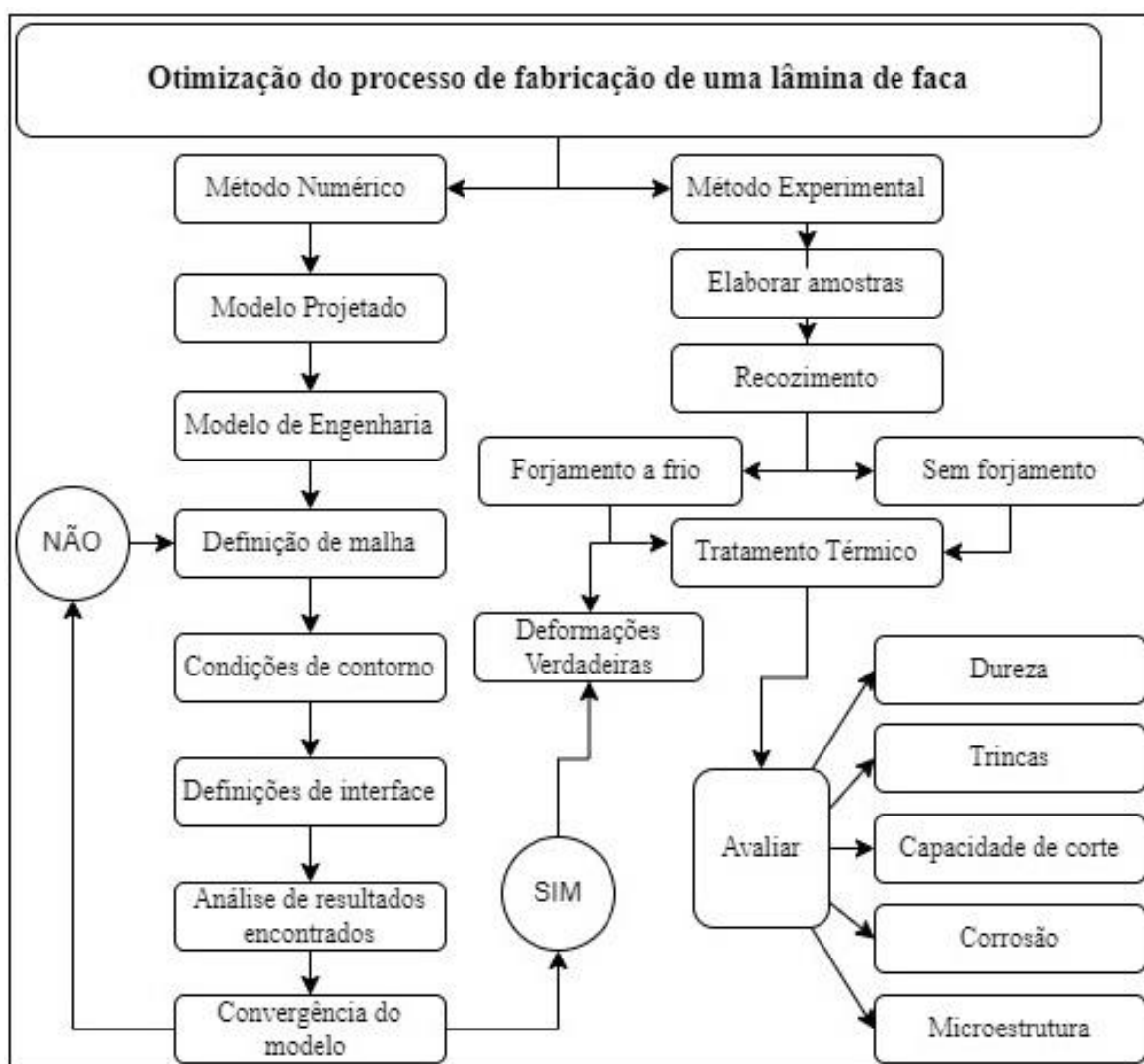


Figura 15 - Fluxograma de atividades desenvolvidas

### 3.1 MATÉRIA PRIMA RECEBIDA

Utilizou-se o aço o martensítico AISI 440 (DIN 1.4116) para análise. Utilizou-se amostras que partiram de uma bobina, certificado de qualidade anexo A, sendo que esta em seu processamento siderúrgico realizou-se laminação a frio para dimensionamento de espessura, 3,5mm.

#### 3.1.1 Análise química do material AISI 440

Realizou-se a análise química do aço AISI 440 com o intuito de certificar a composição química do material estudado. Para este se utilizou o espectrômetro de emissão óptica modelo SpectromaX da marca Spectro, com o objetivo de quantificar o percentual de cada elemento de liga presente no material. Determinou-se para esta avaliação, um corpo de prova do aço nas dimensões de 100 mm x 100 mm x 2,5 mm.

Usinou-se um corpo de prova com a finalidade de remover óxidos e camadas irregulares da superfície. Efetuou-se 3 queimas sobre a amostra. Empregou-se um padrão de referência de aço inox martensítico elaborado e certificado de acordo com as exigências da ISO Guide 34-2009 e ISO GUM, afim de calibrar o equipamento utilizado.

### 3.2 PROCESSAMENTO DAS AMOSTRAS PARA O FORJAMENTO

Como etapa inicial, corta-se em guilhotina, uma chapa de uma bobina do aço. Após em uma máquina de corte a laser segmenta-se as peças com geometria especificada em desenho técnico. O esquema de como realiza-se o corte é esboçado na figura 16.

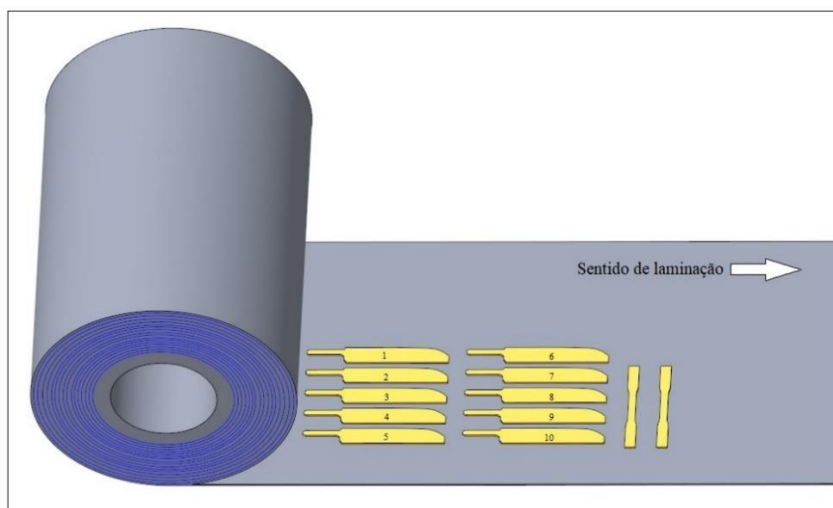


Figura 16 – Croqui de corte das amostras relacionado ao sentido de laminação

Junto as amostras, cortou-se também corpos de prova para posterior ensaio de tração, afim de aferir dados para posterior simulação do processo. Deixou-se os corpos de prova no mesmo sentido quando relacionado a deformação que se pretende realizar na lâmina. Descarta-se efeitos gerados pela anisotropia do material em virtude de ambas as amostras (forjadas e não forjadas) estarem no mesmo sentido relacionado a orientação da laminação da chapa do aço.

Após a etapa de corte, direcionou-se as amostras à etapa de recozimento da liga. Utilizou-se nesta etapa um forno a vácuo, modelo TAV, do fabricante LMTERM com intuito de máximo controle ao longo do próprio tratamento. Destaca-se que nos parâmetros de tratamento térmico a temperatura de recozimento de 850°C e o tempo de resfriamento de 10 horas. Estes e os demais parâmetros utilizados são apresentados na figura 17. Após o recozimento da liga separa-se os corpos de prova para o ensaio de tração e as demais amostras encaminha-se à etapa de lubrificação. O gráfico é elaborado diretamente pelo software de controle do forno.

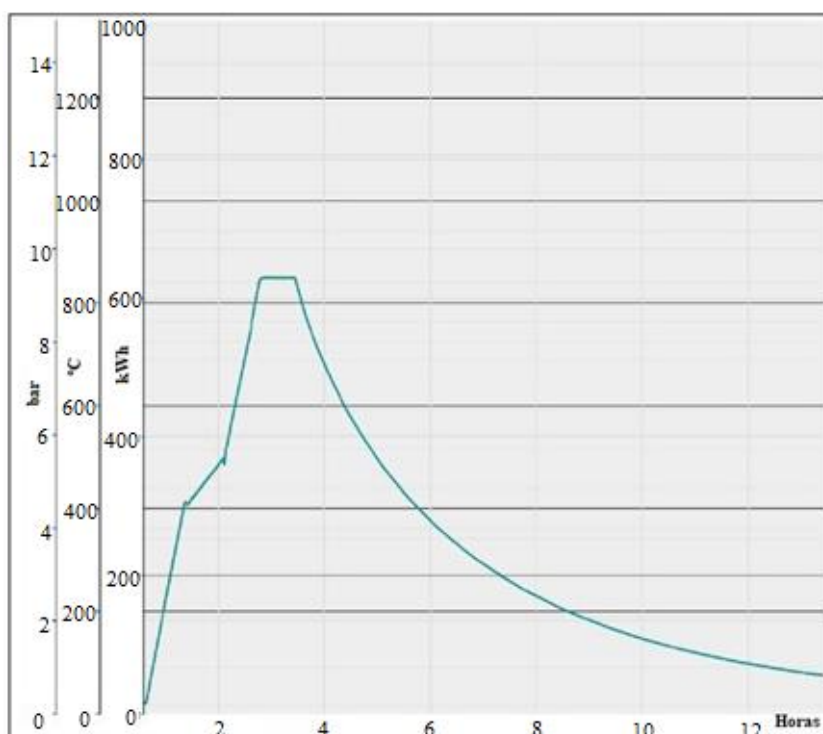


Figura 17 – Parâmetros de recozimento das amostras do aço AISI 440

A aplicação do lubrificante consiste primeiramente na imersão das amostras em água quente (55-60°C) desmineralizada por período de 5 minutos. Na etapa seguinte mistura-se 10% de água desmineralizada com 90% do lubrificante Bonderite L-FM FL 743 do fabricante Henkel, ficha técnica anexo B, se aquece a mistura (50-60°C) e em seguida as amostras são submergidas na solução por um período de 5 minutos. Por fim seca-se as amostras, à quente (100°C) em estufa. Após secagem do lubrificante, marca-se as amostras por meio de uma

turbina manual. As amostras numeradas de 1 a 5, figura 18, são submetidas ao processo de forjamento a frio.



Figura 18 – Amostras em aço AISI 440

Utilizou-se para ferramentas aço ferramenta para trabalho a frio (DIN 1.2767 - VCO) temperado com acabamento polido nas superfícies que entram em contato com amostra, a figura 19 apresenta o projeto do ferramental. Para o forjamento utilizou-se a prensa de rosca de fricção modelo 10 NS-C da fabricante Vaccari, com capacidade de força de prensagem 5000 kN (aproximadamente 509 tonelada-força). Para o forjamento, utilizou-se a carga máxima da prensa. Após forjadas as amostras, parte-se para o tratamento térmico das mesmas.

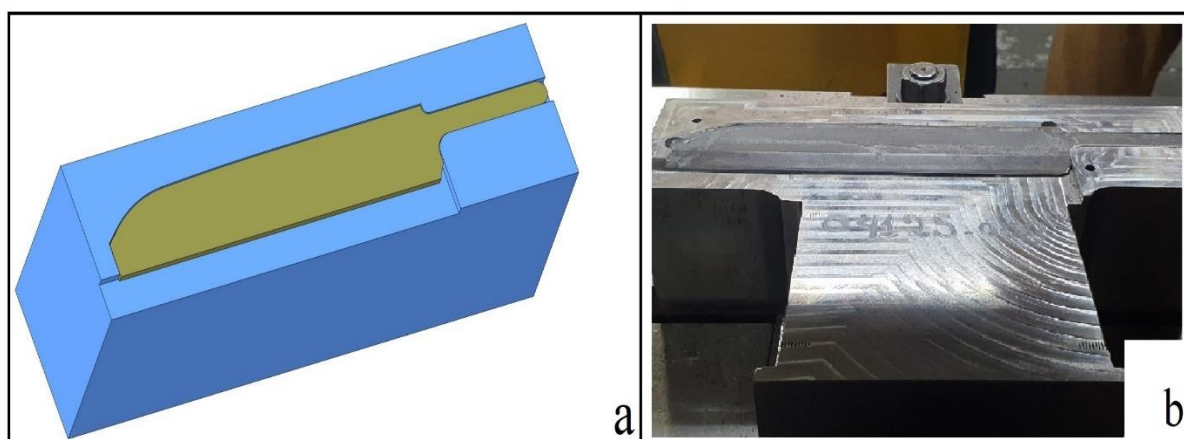


Figura 19 – Ferramenta de forjamento a frio. (a) Projeto ferramenta inferior. (b) Ferramenta física inferior.

Utilizou-se nesta etapa novamente o forno a vácuo, modelo TAV, do fabricante LMTERM. Como parâmetro utilizou-se as temperaturas de têmpera de 550, 780, 1070°C. Demais parâmetros apresenta-se na figura 20. Após a têmpera, aloca-se as amostras no forno de criogenia. Utilizou-se o processo de criogenia raso, realizado a -80 °C, pelo método de nebulização direta. O equipamento utilizado é do modelo Cryo Ap 700, produzido pela empresa



*Air Products*, que utiliza como principal insumo nitrogênio. O tempo de execução do tratamento criogênico foi de 20 minutos, em uma temperatura estável de  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Dando continuidade a produção das amostras, as mesmas passam para a etapa de revenimento. Emprega-se nesta etapa o forno VTE da fabricante Metaltrend. Como parâmetros utilizou-se uma temperatura de  $250^{\circ}\text{C}$  com um interalo de tempo de 20 minutos. Após concluídas as etapas de tratamento térmico destaca-se que no recozimento, têmpera e revenimento das amostras os fornos possuíam atmosfera controlada. Desta forma previndo a descarbonetação das amostras.

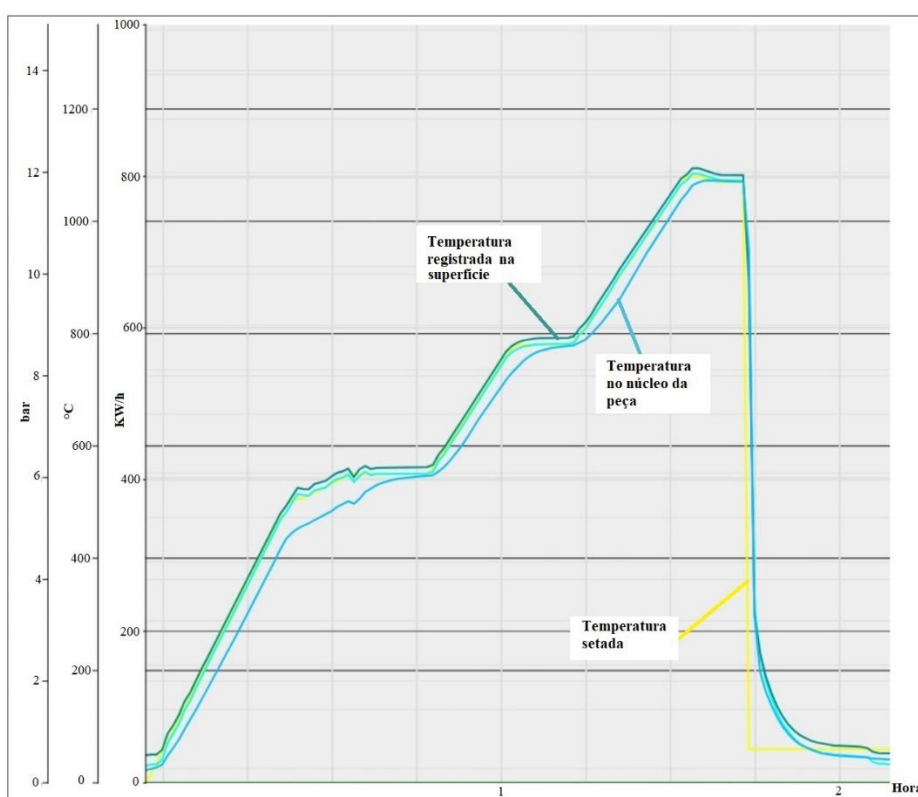


Figura 20 – Parâmetros de têmpera das amostras do aço AISI 440

Concluída a etapa de tratamento térmico, designa-se as amostras ao desbaste. Realiza-se este por meio de equipamento com movimento rotativo regulável mecanicamente que utiliza rebolos abrasivos como consumível no processo. Lubrifica-se a lâmina com água e emulsão de óleo. Após o desbaste, amostras forjadas e não forjadas apresentam mesma geometria. Por fim afia-se as amostras com o uso de lixas em cintas variando a granulação da mesma. Mantêm-se uma parede reta e o fio é produzido em apenas um lado com ângulo de  $\leq 30^{\circ}$ . Afim de tornar mais visível o procedimento elaborado nas amostras apresenta-se a tabela 5.

Tabela 5 – Etapas de produção da lâmina

<b>Processo</b>	<b>Lâmina Tradicional</b>	<b>Lâmina Forjada</b>
<i>Corte laser</i>	X	X
<i>Recozimento</i>	-	X
<i>Forjamento a frio</i>	-	X
<i>Tempera/Revenimento</i>	X	X
<i>Desbaste</i>	X	X
<i>Afiação</i>	X	X

### 3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Tendo como base a norma ASTM A370 – 21 (2021) - *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*– dimensionou-se corpos de prova, desenho técnico contido no anexo C, para o ensaio de tração do aço. Com o corpo dimensionado utiliza-se a máquina universal de ensaios da fabricante INSTRON/EMIC MODELO 23-100, carga máxima de 100kN, com auxílio de extensômetro figura 21. Se operou o equipamento operou a uma velocidade de ensaio baseada na taxa de tensão descrita na norma NBR-6892-1:2013,



Figura 21 – Máquina de ensaios universal

Ensaia-se o corpo de prova até seu rompimento. Os dados do ensaio são captados e apresentados posteriormente por meio de uma planilha de dados pelo *software* Bluehill® com o intuito de caracterizar o aço em estudo além de identificar a tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) e a tensão máxima ( $R_m$ ). Utiliza-se as formulas a seguir a fim de se trabalhar os dados.

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \text{Eq. 4}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq. 5}$$

Com os dados gerados pelo *software*, utilizou-se a força mecânica do equipamento (F) dividida pela área da seção transversal do corpo de prova ( $A_0$ ) para se definir a tensão de engenharia ( $\sigma$ ), equação 3. Da mesma forma com variação absoluta do alongamento ( $\Delta l$ ) fracionado pelo comprimento inicial ( $l_0$ ) encontra-se a deformação relativa ( $\varepsilon$ ), equação 4. Desta forma determinou-se a curva de engenharia ( $\sigma$  x  $\varepsilon$ ).

O intuito da utilização do método algébrico é determinar dados que apresentem o comportamento do aço em estudo sobre ação da força de tração, bem como, descrever o material com dados coletados como a tensão máxima ( $R_m$ ) e o módulo de elasticidade ( $E$ ). Utilizando a área instantânea do corpo de prova ( $A_i$ ) calcula-se também a tensão de escoamento ( $k_f$ ), equação 6, e a deformação verdadeira ( $\varphi$ ), equação 7. Tendo em vista que a área instantânea ( $A_i$ ) é calculada pela lei da constância de volume, equação 8.

$$k_f = \frac{F}{A_i} = \sigma(\varepsilon + 1) \quad \text{Eq. 6}$$

$$\varphi = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(\varepsilon + 1) \quad \text{Eq. 7}$$

$$V_i = V_f \rightarrow A_i \cdot l = A_0 \cdot l_0 \rightarrow A_i = (A_0 \cdot l_0) / l \quad \text{Eq. 8}$$

### 3.4 ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL

O ensaio baseia-se na medição da profundidade de penetração produzida sob ação de um penetrador. Pontos observados como rapidez de execução, maior exatidão e pequeno tamanho da impressão são característicos deste ensaio. O ensaio de dureza Rockwell é

normalizado pela ASTM E18-11 (2008) (*Standard methods for Rockwell hardness and Rockwell superficial hardness of metallic materials*).

Trabalha-se a superfície da peça por meio de limpeza, secagem e posicionamento da mesma de maneira perpendicular ao penetrador do equipamento. Inicia-se o processo, liberando-se uma pré-carga sobre a peça; a pré-carga é necessária para eliminar a ação de defeitos superficiais, ajudar na fixação da amostra no suporte da máquina e para causar uma pequena deformação permanente na peça, para que se evite erros provenientes da deformação plástica [69]. Aplicou-se a pré-carga de 10kgf num tempo de 2 segundos, e após, conforme recomendado, aplicou-se a carga total de 150kgf num período de 7 segundos. A carga é disposta na faixa central da peça.

Utilizou-se um indentador de formato cônico com angulação  $120^\circ$  confeccionado em diamante. A profundidade que o penetrador atinge é convertida diretamente pelo equipamento a um número arbitrário que apresenta-se no seu próprio visor. Empregou-se o durômetro modelo HP-110MR da empresa Rockwell, figura 22. Desprezou-se a primeira leitura, que serviu apenas para a acomodação do penetrador em cada amostra.



Figura 22 – Durômetro Rockwell

### 3.5 ENSAIO POR PARTICULAS MAGNÉTICAS

A avaliação por partículas magnéticas se caracteriza por uma experimentação com o objetivo principal de detecção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais em componentes ferromagnéticos, como trincas, junta fria, inclusões, gota fria, entre outras [70]. O ensaio é normatizado pela ASTM E2297-15 (2016) (*Standard Guide for Use of UV-A and Visible Light Sources and Meters used in the Liquid Penetrant and Magnetic Particle Methods*).

O princípio básico é que o defeito ou interstício perturbe o fluxo magnético no componente em teste e cria-se campos magnéticos na superfície do mesmo [71]. Desta forma o campo magnético criado atrai pequenas partículas magnéticas, dispersas no meio. Detecta-se a descontinuidade por meio do cruzamento ou interceptação destas com as linhas de campo [72]. Para detectar todos os defeitos com orientações diferentes, deve-se gerar o campo em duas instruções [71]. Apresenta-se visível o campo magnético quando este, atravessa rachaduras que estas quebram linhas de campo, figura 23.

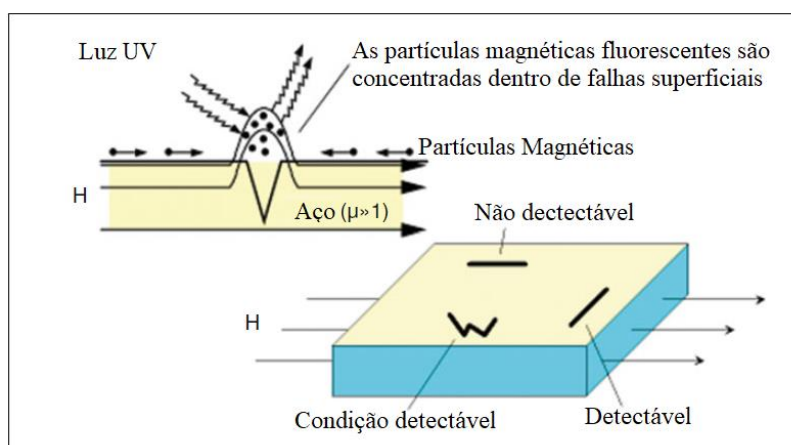


Figura 23 – Princípio do ensaio de partículas magnéticas [71]

Neste processo utilizou-se o equipamento estacionário do fabricante MAGNAFLUX IMADEN, sendo este de modelo estacionário BEM 10 K, de meio úmido com a cabine escura para avaliação dos produtos. Utilizou-se também os consumíveis (partículas magnéticas fluorescentes) do mesmo fornecedor do equipamento, modelo 14A, sendo esta altamente sensível, elaborada para a localização de interrupções muito finas em execuções críticas. Suspensões em meios líquidos como água ou óleo são frequentemente utilizadas com intuito de reduzir o atrito entre as partículas e as superfícies das peças [71].

Inicia-se o ensaio avaliando uma peça com uma fratura conhecida, sendo uma peça distinta das ensaiadas, afim de aferir o funcionamento do método. Mergulha-se a amostra no meio úmido que contém as partículas magnéticas, dando assim o início do ciclo de análise. Concluído o ciclo, remove-se as amostras com EPIs necessários. Executa-se o processo na peça de fratura conhecida e após nas peças para análise.

No processo úmido as partículas são menores e conseqüentemente detectam trincas menores [73]. Utiliza-se luz ultravioleta para avaliar as peças. O ensaio é realizado com auxílio de profissional capacitado para avaliar os resultados.

### 3.6 ENSAIO DE CAPACIDADE DE CORTE

O ensaio baseia-se em adquirir dados do fio de corte de uma lâmina por meio de movimentos horizontais (similar ao de utilização da lâmina) com aceleração controlada, atritando-se o fio da lâmina sob força gravitacional constante a tiras de papel normatizadas, que possuem em sua composição abrasivo. O ensaio é normatizado pela ISO 8442-5 (2004) (*Materials and articles in contact with foodstuffs — Cutlery and table holloware — Part 5: Specification for sharpness and edge retention test of cutlery*).

Fixa-se a lâmina afiada ao dispositivo por meio de parafusos na região não cortante da mesma. Alinha-se o fio por meio de lasers. O fio da lâmina deve ser posicionado perpendicular as tiras de papel utilizadas no ensaio. Após fixar e alinhar a lâmina, posiciona-se o papel sobre a mesma por sistema automatizado, garantido estabilidade e uniformidade na etapa.

Inicia-se o ciclo liberando a carga de 50 N sobre a lâmina. Simultaneamente inicia-se também o movimento da faca com velocidade controlada de 50mm/s. A figura 24, representa o ensaio em funcionamento. Ao encerrar o ensaio com 60 ciclos o equipamento remove o peso da região do fio da lâmina. Por fim, com os dados adquiridos plota-se os mesmos, observando a espessura do papel cortado por ciclo e o somatório de papel cortado por ciclo em milímetros. Conforme norma, a lâmina deve atingir 150mm de corte para ser aprovada.

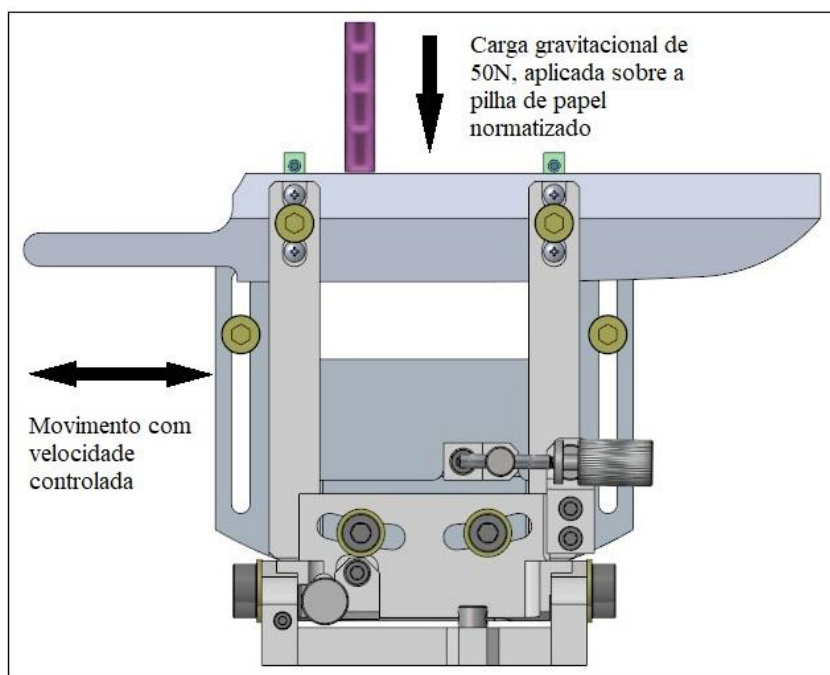


Figura 24 – Ensaio de capacidade de corte

### 3.7 ENSAIO DE CORROSÃO POR IMERSÃO

Seguiu-se como base para este ensaio as orientações da norma ISO 8442-2:1997 – *Materials and articles in contact with foodstuffs – Cutlery and table holloware*. Inicialmente enxaguou as amostras com água quente e detergente neutro. Com as amostras secas, aplica-se acetona para remoção de resíduos de gordura da superfície do aço.

Na sequência do ensaio, submete-se as amostras a uma solução a 1 % de cloreto de sódio à temperatura de 60°C +/- 2°C. No equipamento utilizado acopla-se as amostras, tanto forjada como não forjada a um suporte e submersas a solução durante 6 horas, com aproximadamente de 2 a 3 submersões por minuto, figura 25.

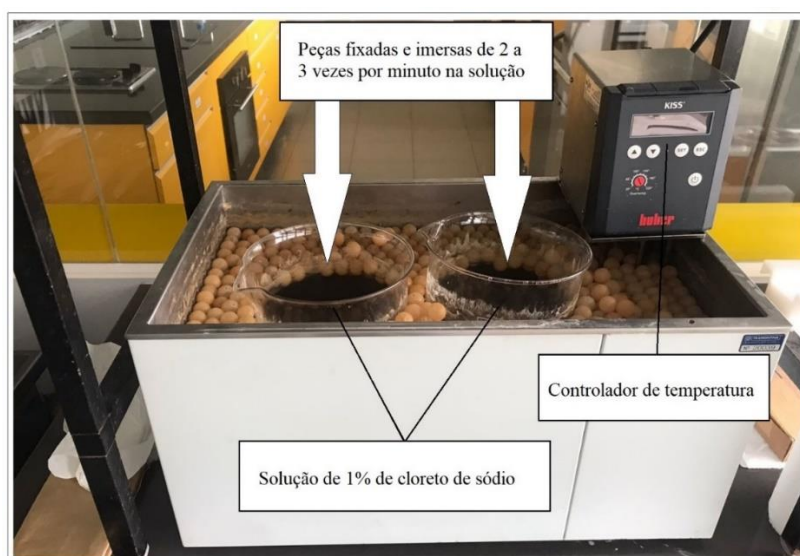


Figura 25 – Ensaio de imersão

Após o tempo do ensaio, retira-se as amostras e lava-se com água destilada o excesso do produto de corrosão na superfície das lâminas avaliadas. Por fim, utiliza-se um pano macio com uma leve camada de pasta de polimento DP – Paste, da fabricante Struers, para remoção dos resíduos de óxido formados na superfície do material. O intuito do polimento é facilitar a observação do mecanismo de corrosão, presente nas amostras.

### 3.8 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

Com objetivo de determinar características que se apresentam na microestrutura do material utilizado para produção da lâmina, aço inoxidável AISI 440. Retirou-se amostras de duas bobinas distintas empregadas na produção. Dimensionou-se as amostras de maneira a poder-se trabalhar com as mesmas em ensaios mecânicos e laboratoriais.

Para que se manuseie as amostras do aço facilmente, nas avaliações microestruturais, as mesmas são embutidas em uma bucha de resina termo fixa fenólica, comercialmente conhecida como baquelite. Realizou-se o procedimento para embutir as amostras na embutidora LaboPress-3 da Struers. Após inicia-se o processo de lixamento e polimento para que a superfície da amostra seja livre de riscos indesejáveis. Para as etapas de lixamento e polimento, os principais parâmetros estão apresentados na tabela 5. Usou-se como equipamento para lixar as amostras, a politriz DP-10 da Struers.

Tabela 6 – Etapas da preparação metalográfica das amostras de AISI 440. \*Consumíveis da marca Struers.

<b>Etapa</b>	<b>Superfície (lixa/pano)</b>	<b>Abrasivo / Lubrificante</b>
Lixamento	Lixa de carbetto de silício (SiC)	320-1000 / Água
Polimento	Pano dureza média/alta DP - Mol	Pasta de diamante de 3 $\mu$ m / DP - Lubrificante Blue

O processo de lixamento é feito por lixas movimentadas mecanicamente, sendo estas com graduação de 320 a 1000(variação do grão), partindo da mais grossa até a mais fina, tomando o cuidado de alterar a direção do lixamento e lavando as amostras a cada troca de lixa. Após inicia-se o polimento onde os discos são cobertos por panos onde são depositados os abrasivos. Realiza-se o ataque químico por imersão com o reagente Picral 2% com tempo de contato de aproximadamente 45s.

### 3.9 MICROSCOPIA ÓPTICA

Para se caracterizar o material microscopicamente, utilizou-se o microscópio Olympus BX60, pertencente ao laboratório da empresa Tramontina. Buscou-se avaliar níveis, tipos e quantidade de inclusões presentes na liga em estudo.

### 3.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Determinados elementos estruturais e microestruturais são exíguos para permitir sua observação utilizando microscopia ótica. Desta forma, como uma solução, emprega-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV), que é capaz de gerar aumentos de até 50.000 vezes. Como funcionamento do equipamento, o mesmo gera sobre superfície da amostra uma varredura com um feixe de elétrons e este é refletido, ou retroespalhado. Capta-se as radiações,



sendo que estas geram informações sobre a topografia da superfície, a composição da amostra, potencial eletrostático e campo magnético local.

Acopla-se ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) uma Microsonda de Energia Dispersiva (EDS) que permite a análise qualitativa de quaisquer elementos químicos, caracterizando os diferentes elementos que podem ser encontrados na amostra, além da análise química pontual, o mapeamento da composição química para avaliação da distribuição dos elementos na microestrutura analisada [74].

Utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Zeiss modelo EVO MA15. Avaliou-se as amostras em sistema de alto vácuo ( $10^{-6}$  e  $10^{-7}$  torr). Foram utilizados os sistemas de detecção com detector de elétrons secundários (SE).

### 3.11 MICRODUREZA

Realiza-se a análise de microdureza para elaborar um perfil de dureza na parte conformada da amostra. Realizou-se a análise por meio de do microdurômetro digital da marca Shimadzu modelo HMV 2000, conforme ilustrado na figura 26. Após análises de metalografia fixou-se a amostra na base do equipamento. Buscou-se marcar a amostra na fronteira entre a baquelite e o aço em estudo. Após encontrada, desloca-se com um passo de 0,5mm a base do equipamento partindo da região mais estreita (aproximadamente 1mm) da amostra até a região mais larga da mesma (3,5mm).

A metodologia de utilização do equipamento se baseia inicialmente no posicionamento da amostra, libera-se uma pré-carga, ajusta-se por meio do visor o local da liberação da carga principal. Após ajustada, libera-se a carga principal de 500 gramas. O indentador é em formato piramidal composto de diamante. A microdureza é obtida por meio da avaliação da dimensão gerada pelo indentador na peça.



Figura 26 – Microdurômetro Shimadzu

## 4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Este capítulo pretende apresentar, comentar e interpretar minuciosamente os dados coletados no capítulo anterior, matérias e métodos, dando ênfase na metodologia para o desenvolvimento do estudo. A estrutura utilizada apresenta inicialmente os resultados do método analítico dimensional. Após apresenta-se os resultados das análises laboratoriais. O texto apresenta-se segmentado em subtítulos que definem o assunto discutido.

### 4.1 ANÁLISE DIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA APÓS FORJAMENTO

Como ponto de partida, submeteu-se as amostras a uma análise dimensional afim de aferir dimensões que foram obtidas por meio do trabalho a frio. Para esta, se marcou as peças por meio de um bits de marcação aferido com ângulo de  $45^\circ$  espaçando-se as marcações com um entre centro de 10 mm, conforme figura 27. Elaborou-se desta forma 19 pontos de medição da largura ( $\ell$ ) da lâmina.

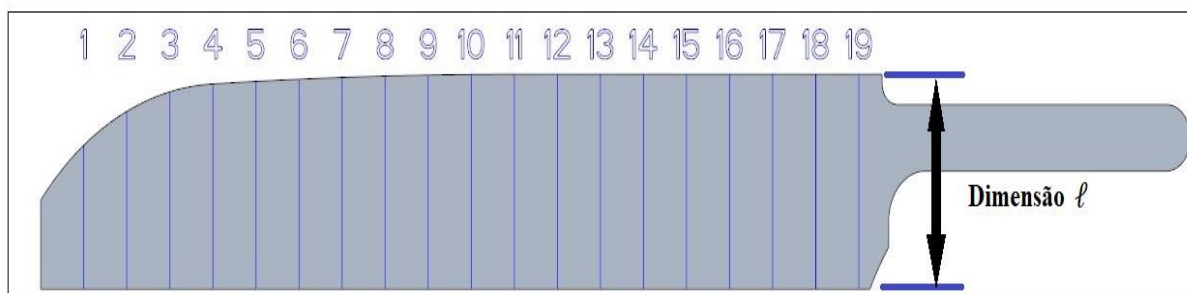


Figura 27 – Posicionamento das marcações nos corpos de prova

Após geradas as marcações, inicia-se o processo de medição. Com um paquímetro digital 150mm, da fabricante *Mitutoyo Absolute 0,01mm*, realiza-se as medições em cada uma das marcações. Toma-se o cuidado de durante as medições para a que aresta plana do paquímetro fique perpendicular à região superior não deformada da amostra. Após medições realizadas obtém-se as dimensões apresentadas na tabela 7. Diversifica-se as amostras pela numeração gravada anteriormente por meio de turbina.

Tabela 7 – Dimensão ( $\ell$ ) obtidas nos corpos de prova

Posição da medição	Amostra					Média de valores	Desvio Padrão	
	Sem forjamento	1	2	3	4			5
1	26,4	28,3	28	29	28,1	28	<b>28,28</b>	0,42
2	30	35,2	34,4	34,3	34	34	<b>34,38</b>	0,49
3	34,5	37,4	36,9	36,6	36,8	36,2	<b>36,78</b>	0,43
4	34,9	37,8	37,8	37,6	37,6	37,65	<b>37,69</b>	0,10
5	35,3	38,2	38,2	38,3	38	38,1	<b>38,16</b>	0,11
6	35,7	38,5	38,5	38,3	38,4	38,45	<b>38,43</b>	0,08
7	35,9	38,9	38,8	38,5	38,8	38,55	<b>38,71</b>	0,17
8	36,1	39,2	39,1	38,95	39	39	<b>39,05</b>	0,10
9	36,3	39,2	39,3	39	39,1	38,75	<b>39,07</b>	0,21
10	36,4	39,35	39,3	39,2	39,3	39	<b>39,23</b>	0,13
11	36,4	39,35	39,4	39,2	39,3	39	<b>39,25</b>	0,15
12	36,4	39,35	39,4	39,3	39,3	39,1	<b>39,29</b>	0,11
13	36,4	39,3	39,4	39,3	39,3	39,1	<b>39,28</b>	0,10
14	36,4	39,4	39,4	39,3	39,3	39,1	<b>39,3</b>	0,12
15	36,4	39,4	39,4	39,3	39,3	39,1	<b>39,3</b>	0,12
16	36,4	39,4	39,4	39,3	39,3	39,1	<b>39,3</b>	0,12
17	36,4	39,4	39,4	39,4	39,3	39,1	<b>39,32</b>	0,13
18	36,4	39,4	39,6	39,6	39,55	39,6	<b>39,55</b>	0,08
19	36,4	39,45	39,6	39,6	39,55	39,6	<b>39,56</b>	0,06

Observando-se uma faixa entre a medida 10 e a medida 19 onde a variação dentro da mesma peça torna-se quase nula. Nesta faixa optou-se por cortar as amostras na seção transversal da mesma, afim de conferir valores de deformação neste sentido obtidos. Utilizando o mesmo paquímetro mediu-se o início visível da deformação (após a espessura da chapa iniciar a redução de espessura) e o fim da mesma. Após realizadas medições que as mesmas resultaram no perfil esboçado aproximado na figura 28. Observou-se também uma concavidade na peça sendo esta não aferida nas medições.

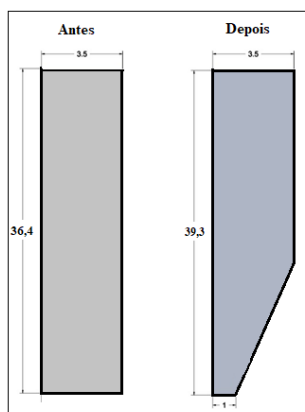


Figura 28 – Perfil da lâmina antes e após forjamento

## 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MATERIAL

Ensaia-se dois corpos de prova. O primeiro como teste, para verificar aquisição de dados do equipamento e o segundo sendo o corpo a se adquirir informações. Apresentam-se os dados obtidos no ensaio de tração no anexo C. Por meio dos dados juntamente com as equações 3 e 4 é possível calcular a tensão de engenharia ( $\sigma$ ) e a deformação relativa ( $\varepsilon$ ) para posteriormente confeccionar a plotagem da curva de engenharia. A figura 29 exibe a curva de engenharia do aço AISI 440 recozido.

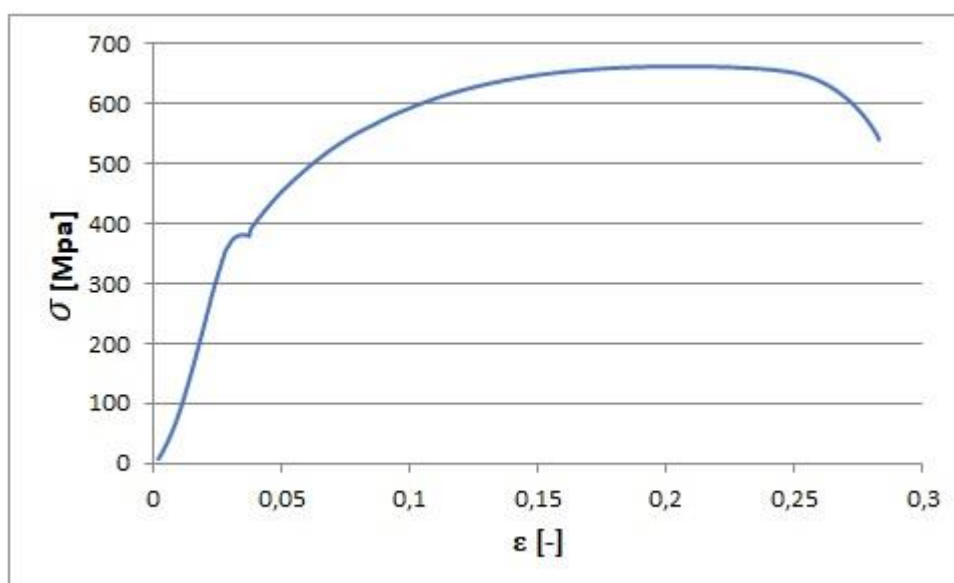


Figura 29 – Curva tensão x deformação aço AISI 440

Por meio do ensaio se observou patamares estáveis de tensão de escoamento ( $\sigma_{esc}$ ) e a tensão máxima ( $R_m$ ) do material. Os valores obtidos respectivamente para estes parâmetros foram de 375 Mpa e 662 Mpa com alongamento de 20,8%. O alongamento de ruptura da amostra foi de 28,3%.

Posterior a obtenção da curva de engenharia busca-se agora elaborar a curva de escoamento real do material. Para isto calculou-se a tensão de escoamento ( $k_f$ ) x a deformação verdadeira ( $\varphi$ ), por meio respectivamente das equações 6, 7 e 8 do item 3.3. Após plotar a curva real de escoamento, utiliza-se o recurso de linha de tendência através do *software* Excel para obter os valores conforme a equação de Hollomon-Ludwing ( $k_f = C\varphi^n$ ), figura 30. Utiliza-se os pontos gerados nesta curva para alimentar o campo de informações do material na simulação do processo, pelo fato de representarem o comportamento do material.

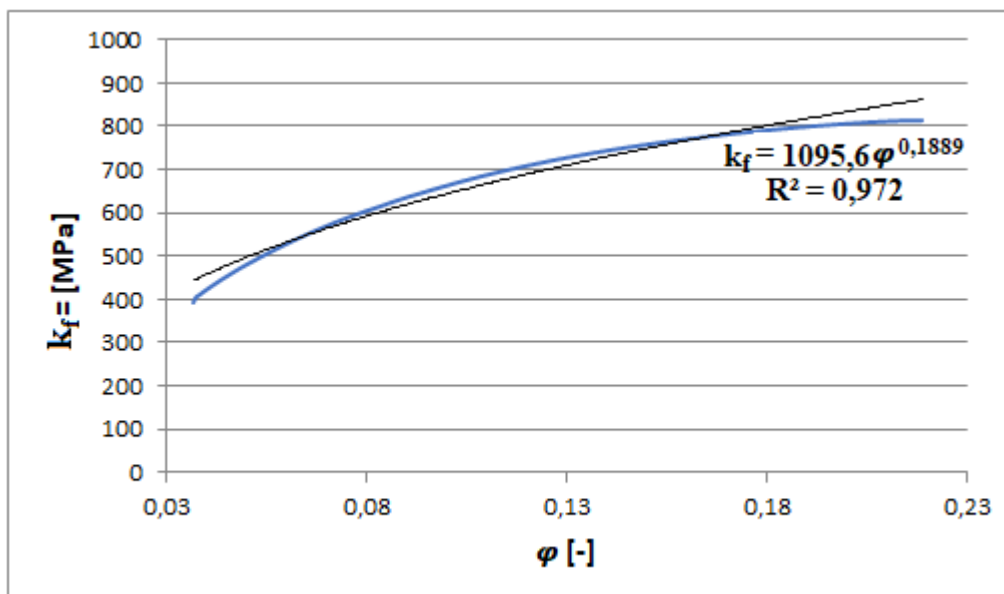


Figura 30 – Curva de Escoamento do aço – Região plástica

#### 4.3 ENSAIO DE DUREZA

A seguir, na figura 31, apresenta-se os valores de dureza encontrados no ensaio de dureza realizado. Observa-se por meio de diversas referências bibliográficas, que um dos efeitos da transformação martensítica nos aços é o aumento da dureza [13, 27, 28]. Após o tratamento de revenimento alivia-se tensões provindas dos tratamentos anteriores.

Amostra	Dureza média amostras (HRc)		
	pós Têmpera	pós Sub-Zero	pós Revenimento
Forjadas	58	60	56
Desvio Padrão das medições Forjadas	0,4±0,01	0,2±0,01	0,2±0,01
Não forjadas	59	60	56
Desvio Padrão das medições não Forjadas	0,4±0,01	0,3±0,01	0,2±0,01

Figura 31 – Dureza obtida no ensaio Rockwell

#### 4.4 ANÁLISE DE TRINCAS

Primeiramente, inspeciona-se a peça com a falha conhecida, distinta das peças ensaiadas geometricamente, apenas utilizada para calibração do equipamento. Deixa-se escorrer o excesso de fluido e após avalia-se sob luz ultravioleta. A falha presente na peça, fica evidente

sob coloração distinta do restante da peça, figura 32. Concluída a etapa de calibração passa-se para a análise das amostras forjadas. Remove-se as amostras do fluido magnético e deixa-se também escorrer o excesso de fluido.

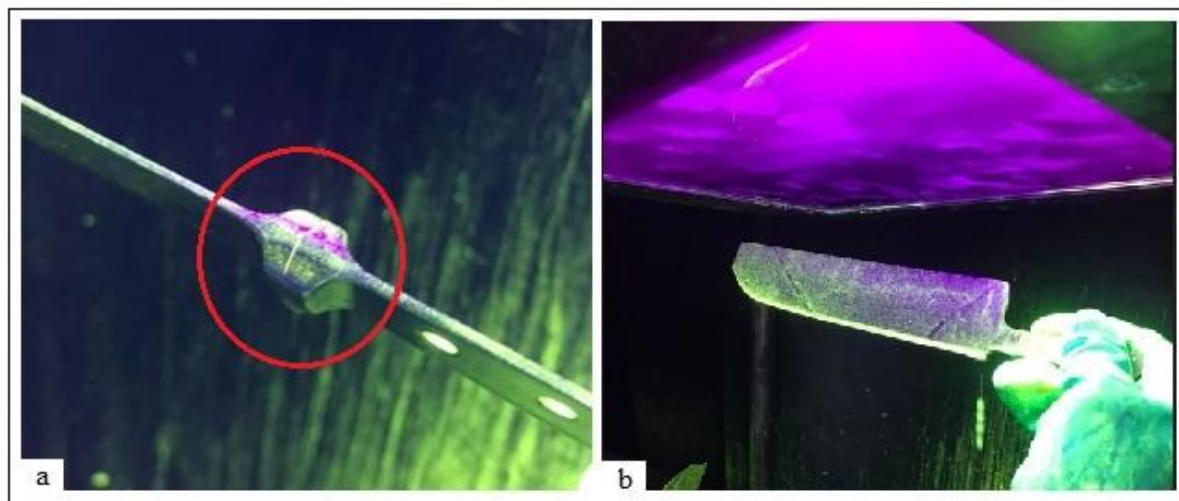


Figura 32 – Análise por partículas magnéticas fluorescentes. (a) lâmina para calibração do equipamento. (b) lâmina em estudo.

#### 4.5 ANÁLISE DA CAPACIDADE DE CORTE DA LÂMINA

Para se avaliar o ensaio de capacidade de corte da lâmina se fez três amostras forjadas e não forjadas, com intuito de se obter dados mais precisos sobre estas além de reduzir variações provindas do processo de afiação. Com os dados obtidos é possível avaliar ciclo a ciclo ou a soma de milímetros cortados em um total de 60 ciclos. Reforça-se que o ciclo de corte do equipamento tem aproximadamente 50mm de amplitude, com tempo de aproximadamente 1 segundo.

O fio da lâmina sobre desgaste por abrasão ciclo após ciclo. Pela semelhança nos valores obtidos, optou-se por realizar uma média entre estes obtidos, tanto na lâmina forjada como na não forjada.

#### 4.6 ANÁLISE DE CORROSÃO POR IMERSÃO

De acordo com a norma ISO 8442-2, a lâmina para ser aprovada para uso doméstico deve possuir uma quantidade mínima de pites por área além de não possuir nenhum pite maior 0,6mm de diâmetro. A figura 33, apresenta uma das faces da lâmina de ambas as amostras avaliadas. Observa-se o processo corrosivo mais acentuado na faca conformada.



Figura 33 – Lâminas após ensaio de corrosão

A influência do processo de conformação na corrosão se apresenta na forma de redução da resistência da mesma no aço. O fenômeno é devido a tensões residuais provenientes do processo de conformação que a lâmina foi submetida [75].

#### 4.7 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA

Com o objetivo de avaliar se a microestrutura do material encontra-se propício em relação à matéria-prima, ao tratamento térmico e a conformação que foi submetido durante o seu processamento, foram realizadas avaliações da microestrutura do aço inoxidável AISI 440 na condição bruta, após tratado termicamente e conformada e após tratado termicamente e não conformado.

Afim de se apontar regiões avaliadas nas amostras conformadas e não conformadas apresenta-se na figura 34 a amostra embutida. Avaliou-se as amostras, após ataque metalográfico nas mesmas.

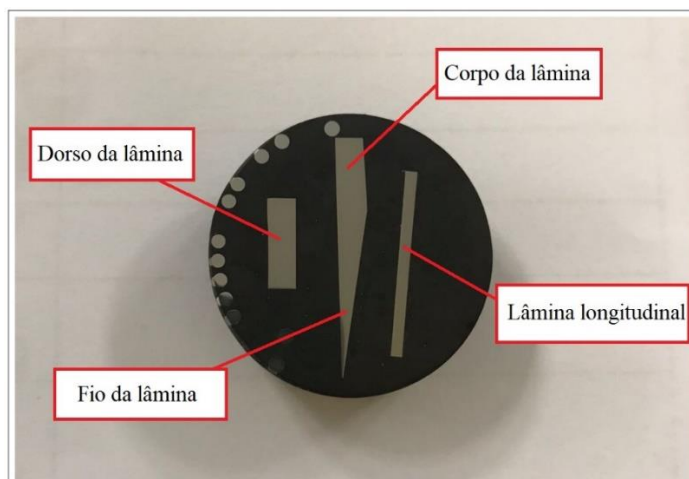


Figura 34 – Regiões avaliadas microscopicamente nas amostras conformadas e não conformadas

#### 4.8 ANÁLISE POR MEV (MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA)

Afim de se comprovar que os possíveis carbonetos verificados nas amostras forjada e não forjada são ou não primários analisou-se as mesmas por meio da análise semi quantitativa do MEV. Após concluir-se as análises microscópicas, a baquelite contendo as amostras foi novamente utilizada. Para isso foi necessário recobrir/metalizar a amostra. A metalização foi realizada no equipamento SC7620 Mini *Sputter Coater*, do fabricante Quorum, figura 35. Utilizou-se corrente de 10-20mA, tempo de execução de 90 segundos e pressão na câmara de  $6 \times 10^{-1}$  -  $4 \times 10^{-1}$  mbar como parâmetros utilizados no processo. Como consumíveis do processo empregou-se gás argônio e ouro para a deposição. O ouro possui a capacidade de aterrar a amostra e o recobrimento com ele aprimora o nível de emissão de elétrons secundários utilizados no MEV.



Figura 35 – SC7620 Mini *Sputter Coater*



#### 4.9 ANÁLISE DE MICRODUREZA

O resultado obtido na análise de microdureza das amostras forjadas e não forjadas apresenta-se na figura 36. No levantamento de dados se fez a medição de 34 pontos em cada amostra. Apresenta-se também na imagem um croqui de como se procedeu as medições ao longo do ensaio. Se elaborou uma linha imaginária no perfil estudado, sendo esta do ponto de primeira medição até o ultimo. Sobre a linha se executou as medições mantendo um passo de medição determinado. Se realizou uma medição de dureza a cada passo dado.

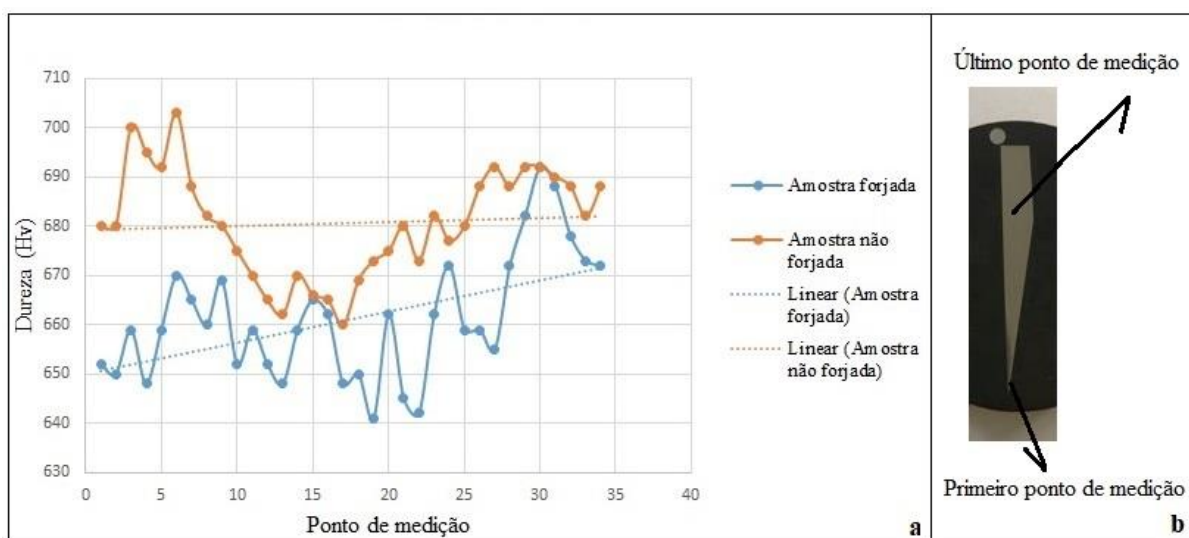


Figura 36 – Perfil de microdureza na amostra conformada e não conformada (a). Posição das medições (b).

## 5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO PROCESSO DE FORJAMENTO

Para aferir dados obtidos na análise dimensional, utilizou-se do método numérico. Porém para o mesmo foi necessário criar um modelo reduzido do sistema a fim de enquadrar a simulação no limite máximo estipulado pela licença do programa utilizado. Com o auxílio de um *software* CAD (*Computer Aided Design*) confeccionou-se o sistema de contato reduzido, com 1/2 do comprimento real, largura real(36,4mm) e espessura real(3,5mm). Desta forma recriando a geometria parcial que será intitulada para contato obtendo o modelo dos itens que formam o mesmo, isto é, as superfícies dos blocos de forjamento, e a amostra a ser forjada. Por meio do fabricante do lubrificante, se obtém o coeficiente de atrito do mesmo,  $\mu = 0,2$ .

Para a realização da simulação numérica, utilizou-se o *software* de elementos finitos ANSYS® Workbench 2020 R2. Nele utilizou-se o método de análise não linear adaptativa. Para a simulação se fez necessário elaborar a malha do projeto de maneira a reproduzir o máximo refino da geometria relacionado ao menor tempo possível necessário para realizar a simulação desta. A malha gerada pelo sistema possui 108.142 nós, 22.510 elementos com comprimento médio de 0,8mm e configuração geométrica tetraédrica. Como demais parâmetros se utilizou as temperaturas de ferramenta e amostra em 20°C e velocidade de fechamento da ferramenta em 25mm/s.

Como condições de contorno atribuídas ao corpo de prova foram: fixação e deslocamento. As faces foram deixadas livres assim como a face que representa o lado do fio da lâmina. Fixa-se as demais superfícies(regiões onde no modelo físico existe restrição de movimento por parte da ferramenta), conforme figura 37, também da mesma forma como ocorreu na ferramenta utilizada que possui nestes pontos, paredes de contato na lâmina.

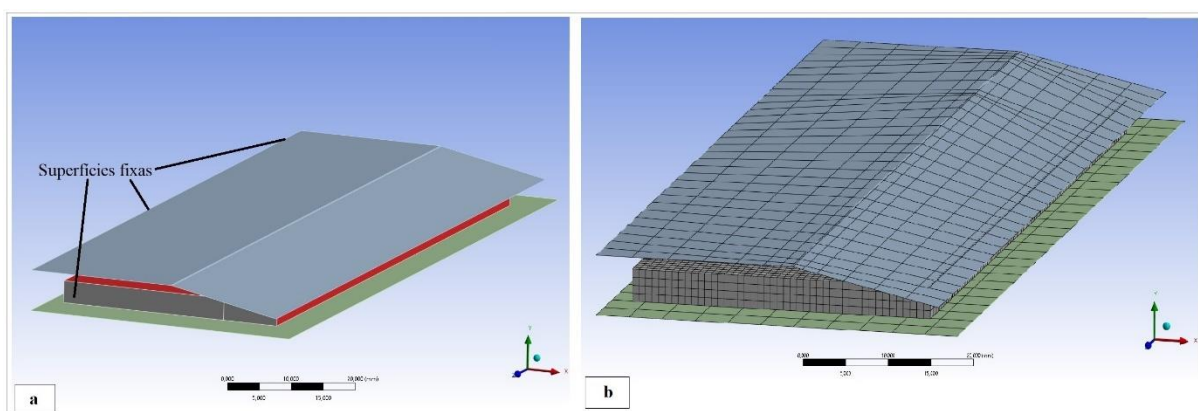


Figura 37 – Arranjo da simulação computacional. (a) Condições de contorno. (b) Malha gerada.

Após aplicar as condições de contorno simula-se o arranjo. Como primeiro ponto a ser avaliado na simulação foi a força necessária para o fechamento das ferramentas. O *software*

como resultado nos gera uma planilha com valores de força relacionado ao tempo de execução. Confeccionou-se com esta, um gráfico, apresentado na figura 38. Observa-se como último ponto, atingiu-se a força de 2320kN, aproximadamente 237 toneladas-força. Recordando que a força necessária nas amostras físicas, foram de 2490kN, aproximadamente 254 toneladas-força.

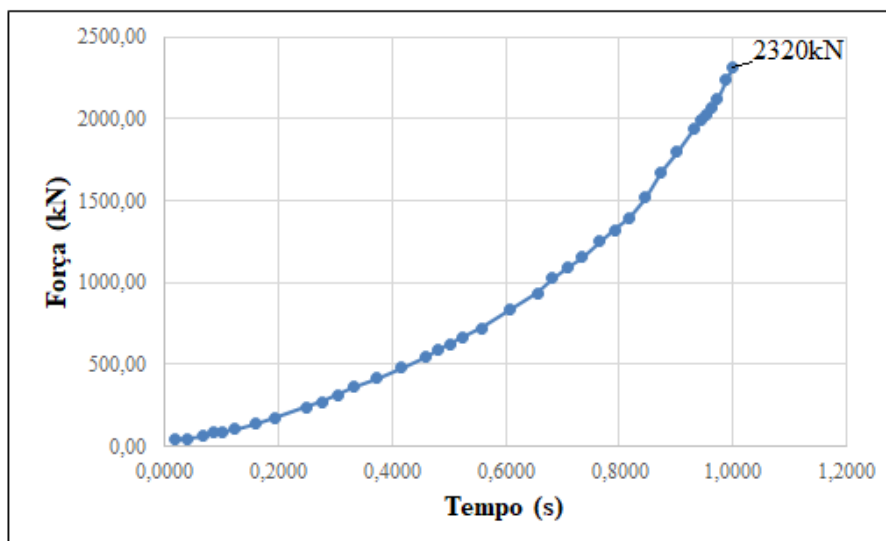


Figura 38 – Força de forjamento – simulação computacional

O principal objetivo sobre a simulação era determinar o comprimento ou estiramento da lâmina quando forjada no sentido do fio da lâmina ( $\ell$ ). A figura 39 demonstra a largura atingida pela simulação. Obteve-se um estiramento médio na lâmina da faca de 2,4mm. Avaliou-se numericamente a amostra na região reta do perfil. Na análise dimensional obteve-se uma deformação média de 2,9mm.

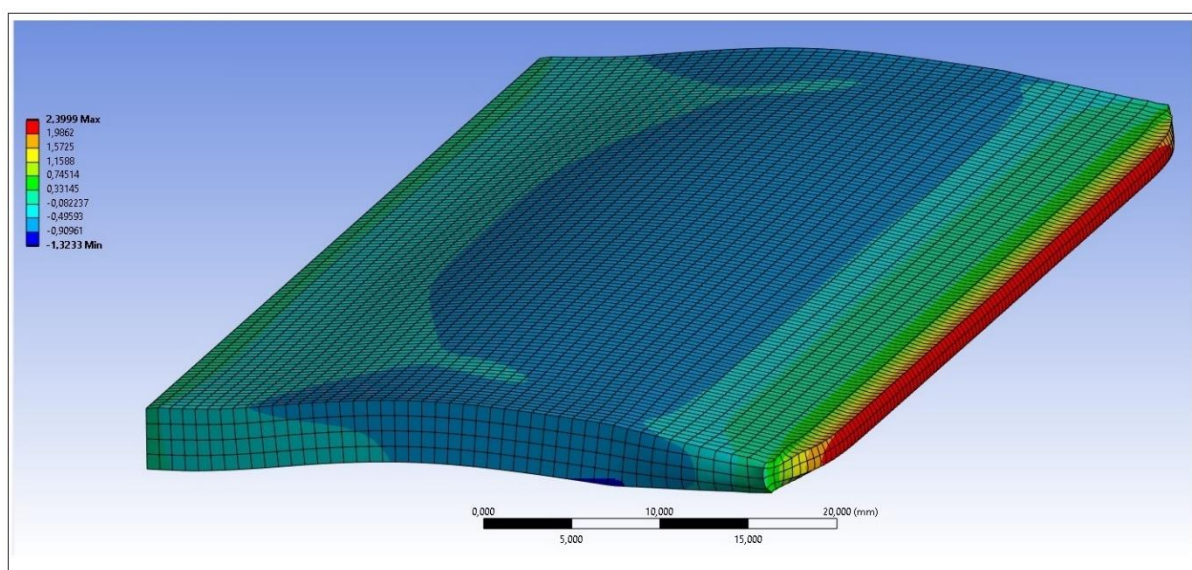


Figura 39 – Análise numérica da largura ( $\ell$ ) da peça.



## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1 AVALIAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Pelo método de análise qualitativa de espectrometria identificou-se a composição química da liga. Os valores encontrados apresentam-se tabela 8. Constatou-se, nas três análises feitas, que o percentual encontrado se enquadra nos valores comentados em norma, assim como os percentuais contidos no certificado de qualidade de material, anexo A. Observa-se também que os valores comentados na tabela 8 referem-se a valores exatos contidos em norma.

Tabela 8 – Composição química do aço AISI 440

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>
<b>1</b>	0,48	0,46	0,41	0,027	0,009	14,49	0,60	0,16
<b>2</b>	0,48	0,50	0,42	0,029	0,009	14,53	0,60	0,16
<b>3</b>	0,48	0,47	0,40	0,027	0,009	14,52	0,59	0,16
<b>Média</b>	<b>0,48</b>	<b>0,48</b>	<b>0,41</b>	<b>0,028</b>	<b>0,009</b>	<b>14,51</b>	<b>0,60</b>	<b>0,16</b>
<b>Norma</b>	<b>Min. (%)</b>	<b>0,45</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>14,0</b>	<b>0,50</b>	<b>0,10</b>
	<b>Máx. (%)</b>	<b>0,55</b>	<b>1,0</b>	<b>1,0</b>	<b>0,04</b>	<b>0,015</b>	<b>15,0</b>	<b>0,20</b>

### 6.2 AVALIAÇÃO DE DUREZA

Após avaliar valores obtidos no ensaio de dureza observa-se que mesmo a peça passando por um processo de forjamento, os tratamentos térmicos posteriores acabam homogeneizando a dureza superficial no material. Verifica-se também que a dureza se manteve igual em todas as amostras avaliadas, dentro do seu respectivo tratamento térmico. Em todas amostras, os parâmetros dos equipamentos utilizados nos itens forjados como não forjados foram mantidos idênticos. Desta forma é justificável a mesma dureza em todas amostras.

### 6.3 AVALIAÇÃO DE TRINCAS

Avaliou-se toda a peça, com principal atenção na região com maior percentual de forjamento. Em nenhuma das amostras encontrou-se fraturas. Ao não se encontrar trincas ou fraturas na região forjada, comprova-se também a eficiência do lubrificante utilizado, somado ao processo de recozimento da liga. Realizou-se o recozimento da liga com o principal objetivo

a esferoidização do grão da matriz ferrítica provinda da usina, desta forma facilitando movimentações dos grãos na mesma.

#### 6.4 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE CORTE DA LÂMINA

Plotou-se gráficos afim de evidenciar as diferenças obtidas entre a lâmina forjada e não forjada. Na figura 42, relaciona-se o somatório de milímetros cortados em relação a ciclos realizados. Observa-se curvas com formato similar, apresentando que o comportamento de desgaste é similar em ambas. Porém com a faca forjada cortou-se aproximadamente 235mm de material enquanto a faca não forjada cortou em média 198mm.

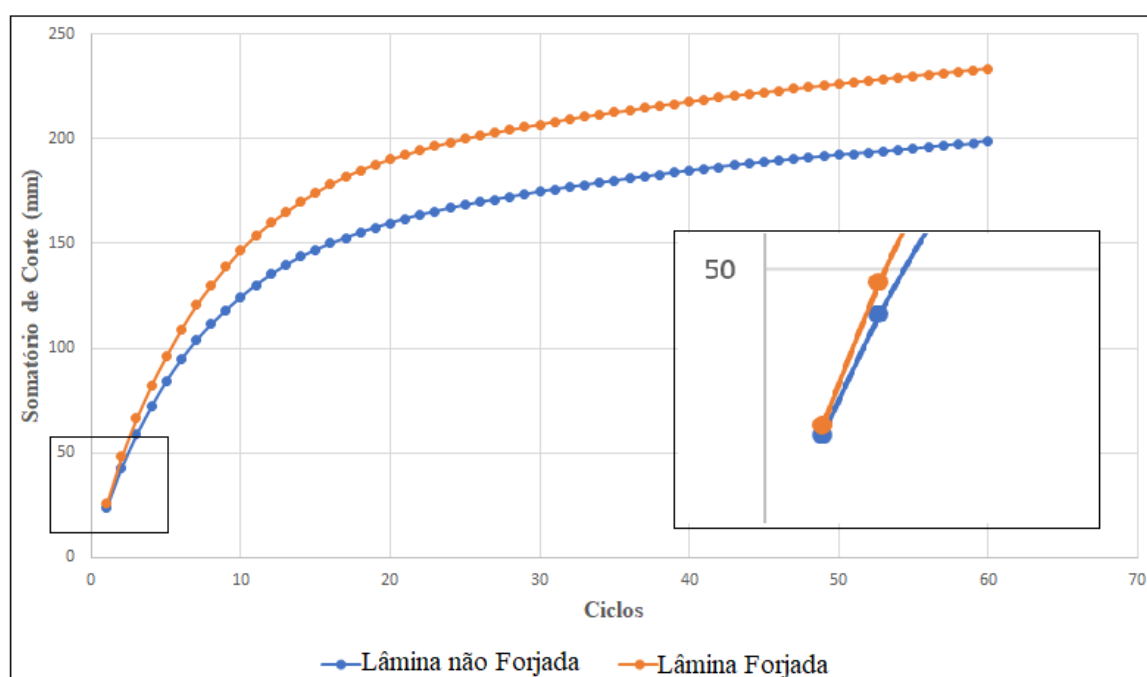


Figura 42 – Capacidade de Corte

Observa-se também que a diferença quantitativa de corte ocorre na primeira metade das curvas. Como exemplo no primeiro ciclo apara-se 25,5mm com a lâmina forjada enquanto a não forjada 24mm. Evidencia-se a diferença de montante cortado na primeira parte do ensaio por meio da figura 40. A figura 43, relaciona o ciclo com a quantidade de material cortado neste mesmo ciclo.

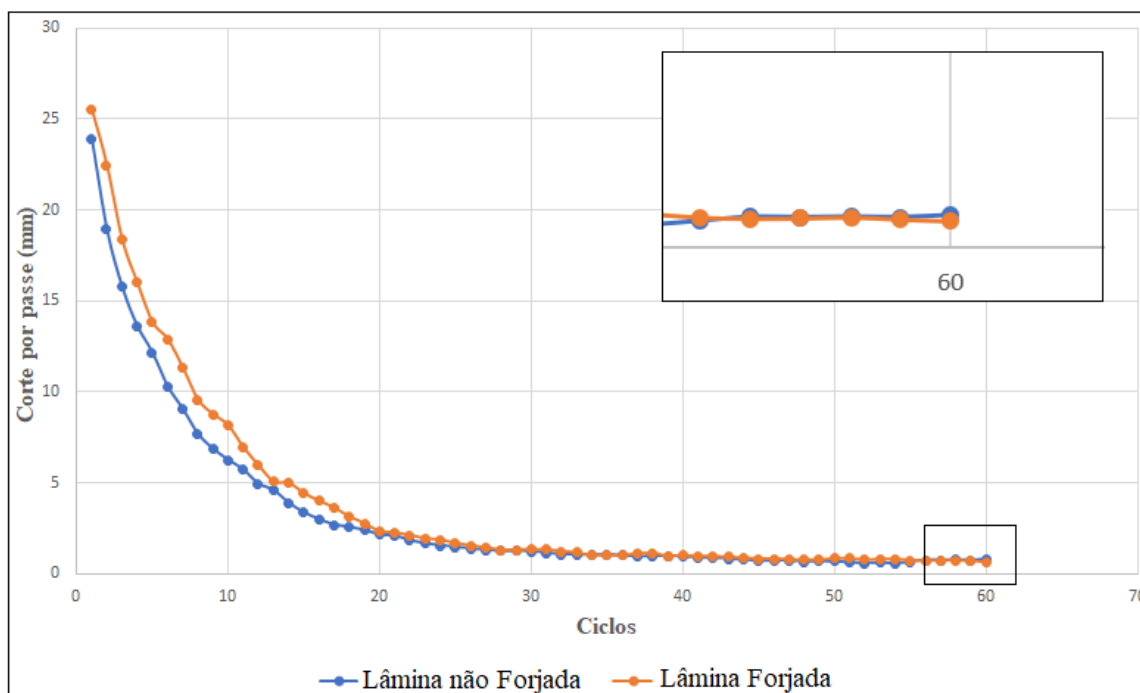


Figura 43 – Capacidade de Corte por Passe

No segundo terço observa-se uma semelhança de valores que corta-se por passe. Por fim constata-se que na parte final do ensaio a igualdade de valores deixa de acontecer, dando lugar a uma maior taxa de corte por parte da lâmina não forjada. Evidencia-se essa tendência por meio do último ciclo onde é cortado com a lâmina forjada 0,63mm enquanto a lâmina não forjada corta 0,77mm.

## 6.5 AVALIAÇÃO DE CORROSÃO

Avaliando-se as faces nas lâminas, observou-se além de uma incidência maior de pites na lâmina conformada além uma maior homogeneidade de medidas nestas, figura 44. A lâmina nas faces usinadas apresentou 7 pites mantendo diâmetros inferiores a 0,2mm. Desta forma estando dentro da tabulação de valores apresentada pela norma. A face não conformada, apresentou 1 pite com diâmetro inferior a 0,2mm nas faces usinadas e apenas 1 com diâmetro menor que 0,6mm, também estando dentro dos limites estabelecidos pela norma. Explica-se este fenômeno pelo deslocamento de discordâncias, faixas de deformação e bandas de cisalhamento na microestrutura ocorridas pelo forjamento a frio.

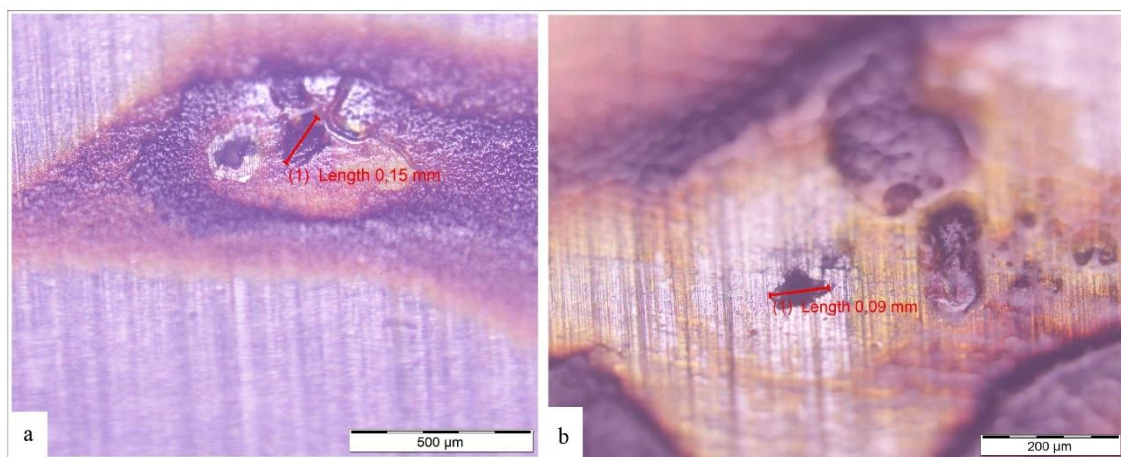


Figura 44 – Dimensão pites lâmina forjada

A face oposta da apresentada na figura 32, apresenta uma tira sem desbaste e em ambas sem conformação. Nesta região observou-se um menor número de pites de corrosão tanto na lâmina conformada como na lâmina sem conformação. Além de uma menor quantidade de pits os dimensionais dos mesmos foram reduzidos, conforme figura 45.



Figura 45 – Pite na face sem desbaste – lâmina conformada

Avaliando, a região do fio, não se observou nenhuma corrosão na lâmina conformada. Já na lâmina não conformada apresentou um ponto enfatizado de corrosão, possivelmente em virtude do ponto coincidir com uma inclusão na matriz. Não foi possível identificar e dimensionar o pite nesta região devido ao óxido retido na lacuna ser difícil de ser removido com a pasta de polimento.

Por fim, no perfil da lâmina, ou no lado oposto ao fio, identificou-se, o maior percentual de pites encontrados. Em ambas as lâminas esta região não sofreu desbaste. Por se tratar de uma



região de contorno de perfil, esta esteve em contato direto com o laser de corte, assim se tornando uma região termicamente afetada. Em ambas as lâminas o limite de pites por área foi respeitado. Via de norma ambas as lâminas estariam aprovadas. A norma, por si, não é clara da condição do corpo de prova a ser analisado. Por se tratar de um estudo de uma lâmina se avaliou toda superfície.

## 6.6 AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA

### 6.6.1 Análise da matéria prima recebida

Na figura 46, apresenta-se a microestrutura das amostras conforme o estado de fornecimento. Avaliou-se as amostras, após ataque metalográfico e sem nenhum ataque químico. Observa-se em nível granular, sem ataque químico, que a liga é completamente homogênea e isenta de inclusões.

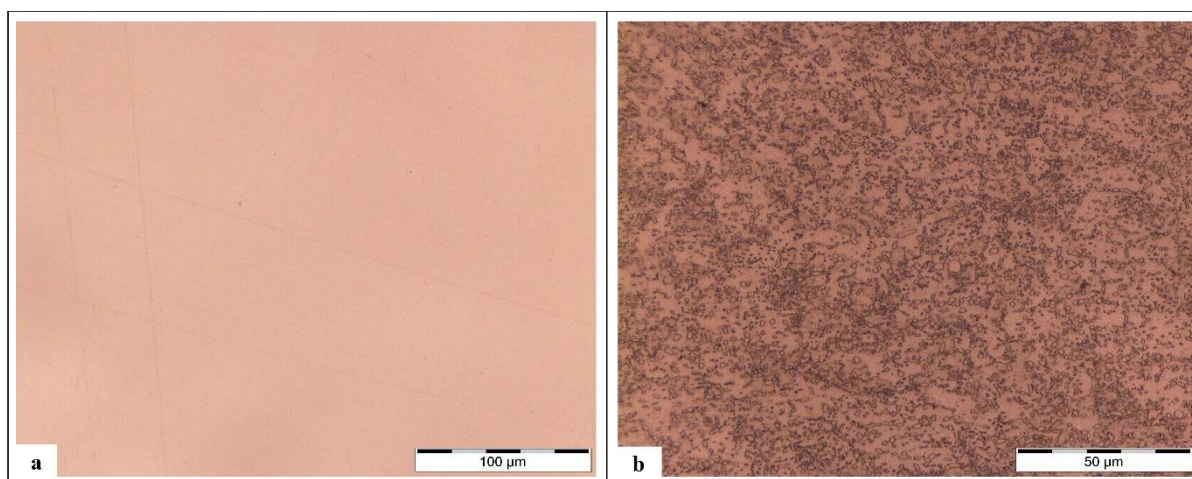


Figura 46 – Microestrutura do aço AISI 440. (a) sem ataque de reagentes químicos (b) com ataque de reagente químico.

No mesmo aparato com aproximação e ataque químico é possível observar contornos de grãos. Nota-se que o material mantém a similaridade relacionado a microestrutura da matéria-prima. Com esta característica é possível atribuir que propriedades mecânicas da liga também se apresentam homogêneas em toda a extensão da amostra em análise. Através da análise da figura 46 também observa-se a existência da matriz ferrítica do aço e de carbonetos secundários ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) e carbonetos primários ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ). Características como coloração e similaridade de tamanho aferem características de se tratarem carbonetos comentados.

### 6.6.2 Análise material tratado termicamente não conformado

Utiliza-se o mesmo ataque químico, empregado na amostra com material ainda bruto. A metalografia apresentou microestrutura martensítica homogênea em ripas em toda a sua extensão com uma pequena densidade de inclusões, podendo ser estas, carbonetos primários ainda não dissolvidos da matéria prima bruta, figura 47. Observa-se uma grande concentração, de carbonetos secundários na matriz, principalmente nos contornos de grão. Sendo que estes carbonetos conferem o endurecimento da matriz.

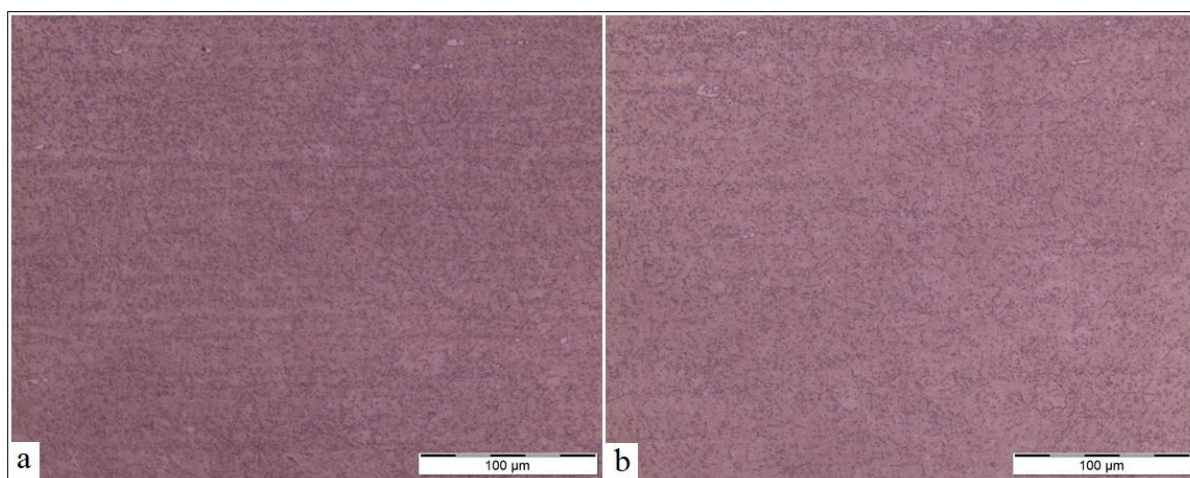


Figura 47 – Microestrutura do aço AISI 440 não forjado. (a) região longitudinal da lâmina (b) região do dorso da lâmina.

Na região do fio, figura 48, percebe-se as mesmas características metalográficas, como tamanho de grão e fração de carbonetos secundários nos contornos de grão. Afim de determinar a densidade de possíveis carbonetos primários na região do fio da lâmina, utilizou-se o software *ImageJ*, sendo este, de domínio público desenvolvido pelo *National Institute of Health*, NIH nos Estados Unidos. O programa realiza análises em imagens de maneira automatizada, por meio de operações de matrizes que alteram o valor de seus pixels [76]. Por meio do *software* se determinou a fração volumétrica de 0,226%.

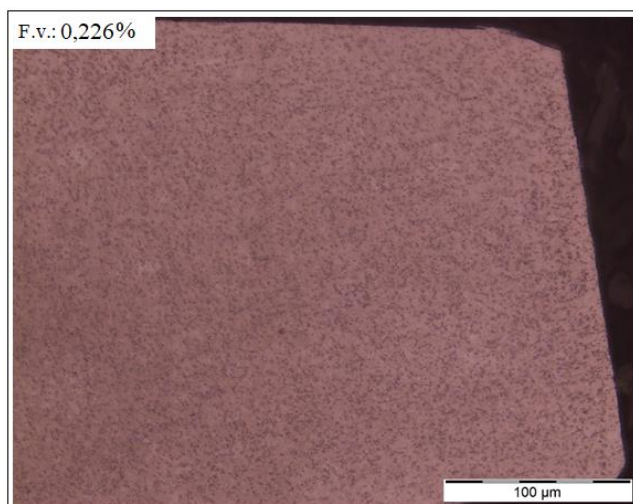


Figura 48 – Microestrutura na região do fio da lâmina do aço AISI 440 não forjado

### 6.6.3 Análise material tratado termicamente conformado

Passando a avaliar os resultados encontrados na microestrutura do material conformado, mantém-se o mesmo ataque químico. Na região longitudinal e dorso da lâmina apresenta uma microestrutura similar, figura 49. Gerou-se a figura, como se facesse fio da lâmina, paralelo ao comprimento do item. Observa-se novamente uma grande quantidade de carbonetos secundários, porém desta vez, com uma densidade mais acentuada de possíveis carbonetos primários, sendo estes, apresentados principalmente em faixas, da amostra avaliada. O alinhamento das inclusões é maléfico para um item da cutelaria, visto da possibilidade se ter uma faixa de inclusões no fio da lâmina. O dimensional dos possíveis carbonetos primários em ambas as imagens, tanto forjada quanto não forjada, mantiveram as mesmas dimensões:  $\approx$  diâmetro de  $2 \mu\text{m}$ .

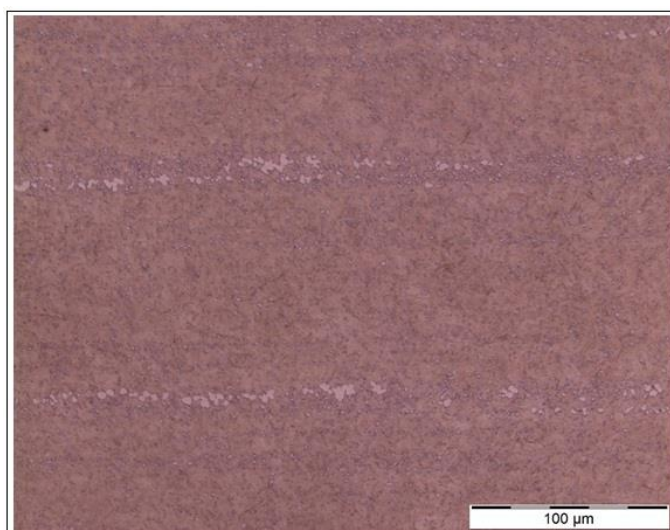


Figura 49 – Microestrutura na região do fio da lâmina do aço AISI 440 forjado

Passando a se avaliar a região do fio, figura 50, observa-se primeiramente que as tonalidades escuras apresentam a fronteira entre a baquelite e o aço em análise. Observa-se na figura, as linhas de fibramento no limite inferior da amostra conformada. É possível identificar que no limite inferior o material é provindo de deslocamento, apresentando uma granulometria não encruada. Além disso, a microestrutura apresenta em sua faixa central o material não encruado, com a granulometria muito similar do material não conformado.

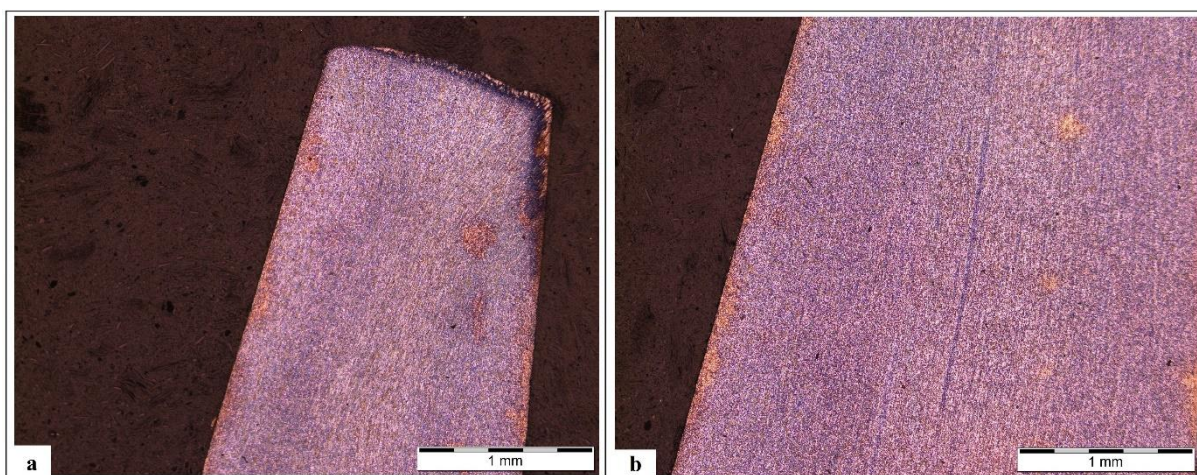


Figura 50 – Microestrutura da amostra conformada. (a) visão global (b)linhas de fibramento do material.

Observando-se mais detalhadamente a microestrutura conformada nota-se o alinhamento das ripas em direção para onde ocorre alongamento da amostra, no caso específico, em direção onde ocorre a maior redução de espessura, figura 49. Na figura observa-se as linhas de fibramento do material de maneira visível, evidenciado o comportamento do material frente a tensão. Verifica-se também o alinhamento das ripas com o contraste existente entre as cores produzidas pelo reagente *Prical*. Em uma vista global, nota-se uma faixa mais clara no centro da amostra, nela ocorre o menor deslocamento de material devido ao atrito em superfícies externas das amostras.

Por fim, a metalografia com aproximação de 1000 vezes, na região do fio não apresentou diferença metalográfica considerável relacionada a microestrutura tratada termicamente não conformada, figura 51. A única diferença observada foi um grau maior de possíveis carbonetos primários. Afim de confirmar a hipótese, avaliou-se novamente o percentual volumétrico destas, obteve-se um valor de 0,61%.

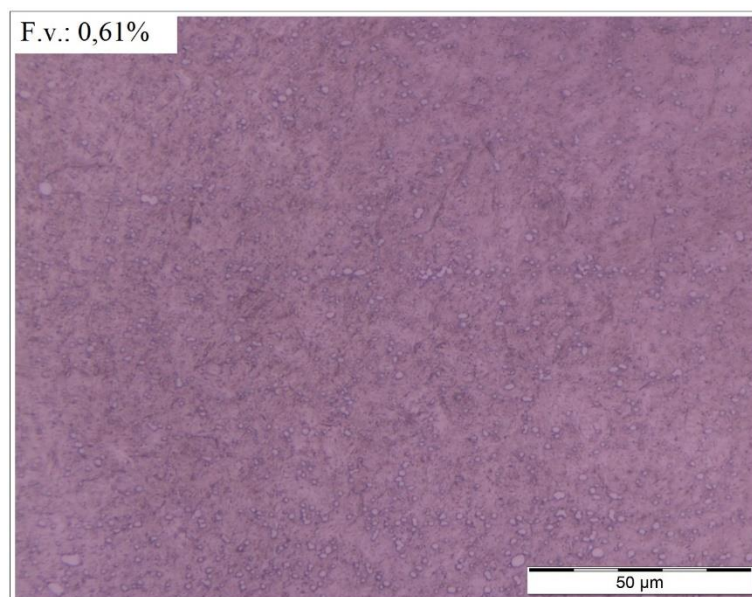


Figura 51 – Microestrutura na região do fio da lâmina do aço AISI 440 forjado

## 6.7 AVALIAÇÃO DE INCLUSÕES

Com as amostras embutidas e metalizadas, coloca-se a mesma na câmara de vácuo do MEV. Após ajustes, busca-se as inclusões maiores para verificar do que estas se tratam. As figuras 52 e 53 apresentam os resultados obtidos tanto na amostra forjada, quanto na não forjada.

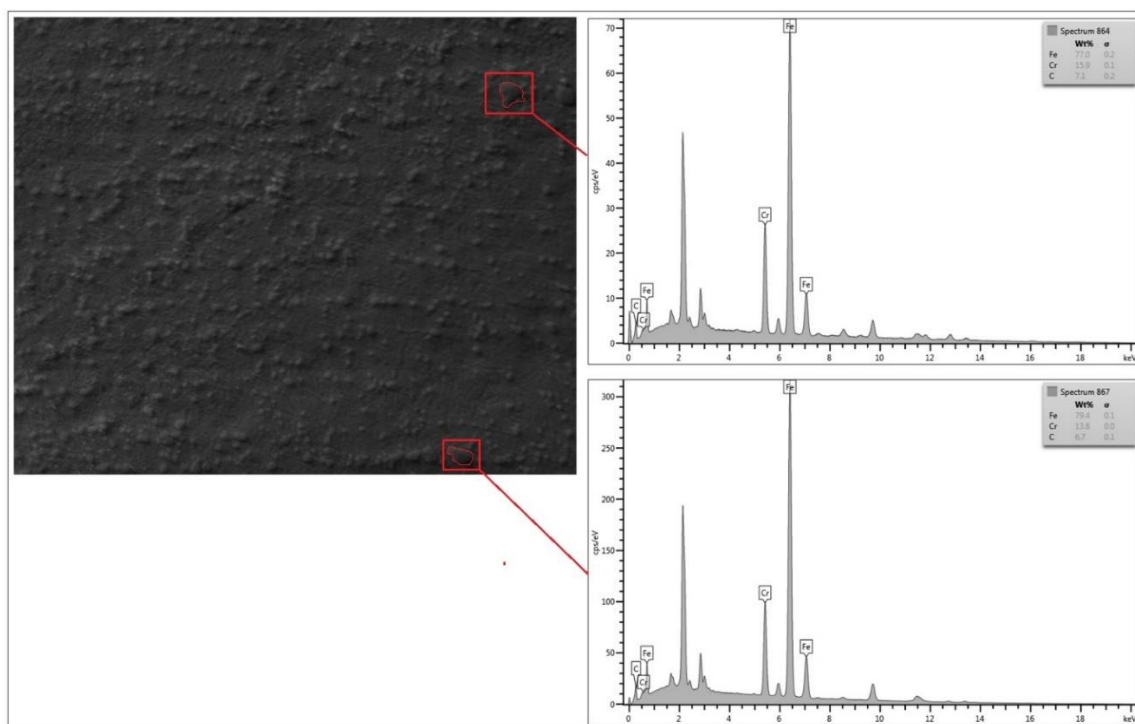


Figura 52 – Ampliação gerada pelo MEV para amostra forjada com respectivos gráficos gráfico da composição química da inclusão na matriz metálica .

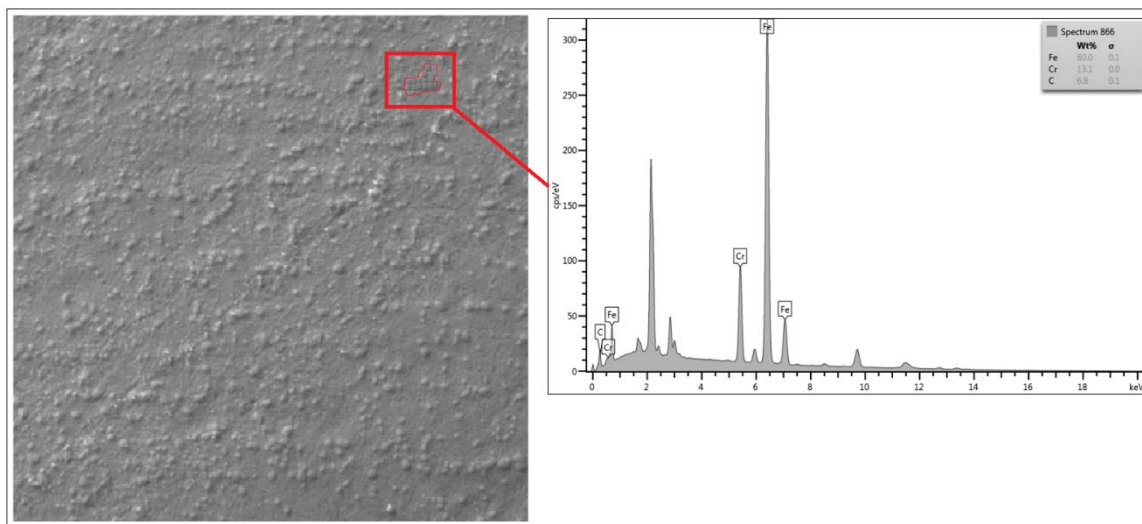


Figura 53 – Ampliação gerada pelo MEV para amostra não forjada com respectivos gráficos gráfico da composição química da inclusão na matriz metálica .

Verificando-se os resultados obtidos nos gráficos das figuras 52 e 53, sendo estes obtidos pela análise semi-quantitativa feita pelo MEV, determina-se que as inclusões presentes nas amostras tratam-se de carbonetos de cromo (FeCr), sendo estas inclusões não diluídas nos processos de processamento em siderurgia e nem por tratamentos térmicos e mecânicos posteriores.

## 6.8 PERFIL DE MICRODUREZA

Observa-se pela linha de tendência, gerada pelo *software* Excel, que na amostra forjada a dureza aumenta de acordo com o aumento da seção da amostra, ou seja, observa-se uma propensão de aumento de dureza em direção oposta ao fio. Após o segundo ponto apresenta-se uma dureza aumentada, relacionando até aproximadamente o 15º ponto, após ocorre uma pequena queda. Na amostra não forjada apresenta dois pontos com dureza acima de 700 Hv. Nestes pontos existe uma grande possibilidade de o indentador do equipamento ter atingido carbonetos da matriz do aço.

Na base da amostra as medidas iniciais também atingiram durezas reduzidas, essas explicam-se devido a ação do atrito sobre a amostra onde o material deslocou-se em direção a extremidade menor. Sendo assim a ação do encruamento é observada a partir de 1mm da base da seção deformada. Por fim, o perfil de microdureza da amostra não forjada apresenta-se com menos variações entre medidas e em toda sua extensão, além de maiores valores de dureza relacionada a amostra forjada.

## 7 CONCLUSÕES

Este estudo teve como objetivo principal aprimorar o processo de produção de uma lâmina de faca produzida de uma matriz ferrítica do aço AISI 440, para isso optou-se pela tentativa de alongamento na região do fio da mesma, por meio da conformação a frio, posterior ao processo de recozimento da liga.

Para tal, por meio de uma metodologia experimental bem definida, este estudo se dividiu em quatro etapas: A primeira foi uma revisão de literatura e análise de equipamentos disponíveis para futuros processos, que forneceram informações e dados referentes aos principais parâmetros do maquinário relacionando as interações pretendidas com o material a ser estudado; a segunda etapa caracterizou-se em elaborar as amostras com o material, com e sem procedimentos de conformação que o mesmo iria passar para alteração da geometria além de posteriores tratamentos térmicos necessários para elaboração de uma lâmina; na terceira etapa foi a comparação de resultados dimensionais obtidos através do ensaio experimental com a simulação computacional elaborada; por fim, a quarta etapa com o propósito de afirmar coerência nos modelos estudados (conformado e não conformado) foram utilizados ensaios de composição química, dureza, corrosão, partículas magnéticas, capacidade de corte, microdureza e metalografia a fim de levantar, explicar e compreender dados relacionados as amostras.

Com intuito de visualizar o comportamento do material se elaborou a simulação computacional. As propriedades mecânicas do aço foram obtidas por meio de ensaios de tração. Com a curva de engenharia de tensão-deformação carrega-se o *software* para a avaliação. Observaram-se coerência relacionada ao alongamento da largura da lâmina e melhorias a serem feitas na ferramenta. As diferenças de alongamento obtidas são explicadas pela necessidade de simplificações no modelo algébrico como, por exemplo simplificação da ferramenta, manuseio algébrico de dados obtidos no ensaio de tração além do coeficiente de atrito entregue pelo fornecedor do lubrificante.

Com base nos resultados do ensaio de dureza demonstra-se uma alta eficiência no processo de tratamento térmico da liga, mantendo durezas similares nas amostras forjadas e não forjadas. O ensaio de partículas magnéticas, constata que o forjamento a frio, quando executado com processos preditivos (lubrificação + recozimento da liga) corretos, não gera trincas a deformações de grande intensidade. Já o ensaio de capacidade de corte evidenciou que a lâmina forjada possui uma capacidade de corte superior no início da vida útil da mesma, sendo esta equalizada, em relação a lâmina não forjada, com o desgaste abrasivo. O ensaio de corrosão

mostrou que o forjamento a frio, trouxe consigo uma maior densidade de pontos de corrosão, porém atendem especificações exigidas pela norma.

Com a metalografia realizada, observou-se que as microestruturas obtidas através análise em microscópio óptico com aumento de 500 e 1000 vezes não apresentam diferença microestrutural considerável. Em ambas as amostras se observou uma microestrutura martensítica, com maior volume de carbonetos no contorno do grão. Na amostra forjada as inclusões se depositaram em faixas, podendo no futuro causar problemas como deslocamento de grãos. As inclusões observadas em ambas as amostras (forjada e não forjada) se tratam de carbonetos primários com tamanho e morfologia similares, ainda oriundos da matéria prima bruta. Por fim a análise de microdureza apresentou valores mais constantes e 5% maiores na amostra não forjada. Outro ponto observado foi que, próximo ao fio da lâmina os valores de dureza de ambas as amostras são menores, na lâmina forjada sendo explicado pelo fato de os primeiros pontos de medição possivelmente realizados sobre o produto do forjamento.

É possível concluir também que, em um ramo de manuseio do aço como a cutelaria, a matéria prima corresponde a um dos pilares de investimento. Desta forma, qualquer percentual de aproveitamento que for aprimorado, causa em um processo de produção de grande escala, ganhos mensuráveis. Além disso no processo estudado obteve-se também alterações em propriedades mecânicas ao produto. Ocasionalmente, assim uma melhora da qualidade do produto para a função no qual este está inserido.



## 8 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A seguir são listadas algumas sugestões para próximos trabalhos que buscam dar continuidade ao estudo do processo avaliado.

- Alterar a liga do material estudado, afim de comparar diferenças entre aços na cutelaria quando relacionado a um posterior processo de forjamento a frio.

- Modificar parâmetros do equipamento, como força e velocidade de avanço. Modificar também parâmetros da ferramenta, como a geometria da mesma, afim de visualizar alongamentos obtidos em cada forma desenvolvida na ferramenta.

- Trabalhar a liga do material a quente ou a morno afim de comparar benefícios e malefícios trazidos por cada tipo de processo ao produto.

- Avaliar ferramentas com outro tipo de matéria-prima, afim de avaliar custo/benefício relacionado as utilizadas atualmente.

- Mensurar custos relacionados ao processo atual, relacionado ao processo com conformação a frio aplicado.

- Avaliar efeito da anisotropia no processo proposto com forjamento a frio.

- Analisar coloração das linhas de fibramento apresentadas nas amostras forjadas a frio.

- Avaliar produção com geratriz de perfil triangular.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAMPELLO, A.J., **Facas brasileiras**. 2. ed. Disponível em: <[http://www.cutelariaartesanal.com.br/downloads/Facas\\_Brasileiras\\_2a\\_Ed.pdf](http://www.cutelariaartesanal.com.br/downloads/Facas_Brasileiras_2a_Ed.pdf)>. Acesso em: 08 dez, 268 p., 2019.
- [2] TRAMONTINA., **Sobre a Tramontina**. Disponível em: <<https://www.tramontina.com.br/sobre/nossas-fabricas/>>. Acesso em 14 março 2021.
- [3] OCHOA, D. L., **Estudo do desgaste erosivo-corrosivo de aços inoxidáveis de alto nitrogênio em meio lamacento**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 176p., 2007.
- [4] CARBÓ, H.M., **Aços inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo: ArcelorMittal Inox Brasil. 29p., 2008. Disponível em: <[http://www.aperam.com/brazil/port/produtos\\_servicos/sucroalcooleiro/pdfs/apostila\\_tecnica.pdf](http://www.aperam.com/brazil/port/produtos_servicos/sucroalcooleiro/pdfs/apostila_tecnica.pdf)>. Acesso em: 08 ago. 2020.
- [5] NINGSHEN, S.; MUDALI, U.K.; MITTAL, V.K.; KHATAK, H.S., **Semiconducting and passive film properties of nitrogen-containing type 316LN stainless steels**. Oxford: Corrosion Science, v. 49, n<sup>o</sup>.2, p. 481-496, 2007.
- [6] TALBOT, D.; TALBOT, J., **Corrosion science and technology**. New York: CRC Press, 3<sup>a</sup> ed., 568p., 2018.
- [7] CALLISTER, Jr. D.W., **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 5<sup>a</sup> ed, 620p., 2002.
- [8] BARBOSA, P. A., **Estudo do comportamento mecânico na usinagem de aços inoxidáveis**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 235p., 2014.
- [9] ATLAS STEELS., **The atlas steels technical handbook of stainless steels**. 2013. 49p. Disponível em: < [www.atlassteels.com.au](http://www.atlassteels.com.au) >. Acesso em: 14 março 2020.
- [10] MODENESI, P. J., **Soldabilidade dos aços inoxidáveis**. São Paulo: SENAI, 110p., 2001.
- [11] SCHEID, A., **Curso básico de aços**. Curso - Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 100p., 2010.

- [12] GASTALDO, F. T., **Efeitos do tratamento de superfície a laser na microestrutura e na resistência ao desgaste do aço inoxidável martensítico**. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas/SP, 83p., 2010.
- [13] SILVA, A.C.; MEI, P.R., **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Eletrometal S.A. Metais Especiais. 2ªed., 512p., 1988.
- [14] OLIVEIRA, M. A., **Nitreção e carbonitreção por plasma em aços e suas influências nas resistências à corrosão e ao desgaste**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo, São Carlos/SP, 117p., 2005.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR METALS., **ASM handbook: properties and selection: irons, steels, and high performance alloys**. 10ª ed., v.1, 2521p., 2005.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR METALS., **ASM handbook: metallography and microstructure**. 9ª ed., v. 9, 2733p., 2004.
- [17] GRAJALES, H. M. D., **Análise dos mecanismos de dano de aços inoxidáveis austeníticos com elevado teor de nitrogênio durante desgaste erosivo por cavitação**. Tese de Doutorado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 134p., 2010.
- [18] BHADSHIA, H. K. D. H.; HONEYCOMBE, R., **Steels: microstructure and properties**. Londres: Butterworth-Heinemann, 3ª ed., 357p., 2006.
- [19] GUIMARÃES F. R.; FIGUEIREDO C. N.; PINHEIRO M. V.; MIRANDA C. H.; ABREU F. H., **Influência do teor de Mo na Microestrutura de Ligas Fe-9Cr-xMo**. São Paulo: Soldagem & Inspeção, v. 15, n.º. 4, p. 254-264, 2010.
- [20] OUTOKUMPU STAINLESS STEEL. **Dura 4116**. 2020. 4p. Disponível em: <<https://www.outokumpu.com/>>. Acesso em: 22 março de 2020.
- [21] CHIAVERINI, V., **Aços e ferros fundidos**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, 165p., 1996.
- [22] GIORA, R. D. P., **Avaliação comparativa de barras laminadas do aço AISI 304L com e sem tratamento térmico de solubilização com foco em corrosão**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 80p., 2012.
- [23] DUFOUR, J.D., **An Introduction to Metallurgy**. 4 ed. Houston-TX, Cooper Cameron Corporation. 433p., 2002.
- [24] BALDISSERA P *et. al.*, **Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review**. The Open Mechanical Engineering Journal, v. 2, n.º.1, p.1-11, 2008.
- [25] BENSELY A. *et. al.*, **Effect of cryogenic treatment on tensile behavior of case carburized steel-815M17**. Materials Characterization, v.58, n.º.5, p.485-491, 2007.

- [26] BENSELEY A., *et. al.*, **Enhancing the wear resistance of case carburized steel (En 353) by cryogenic treatment**. Cryogenics v. 45, n°.12, p.747-754, 2005.
- [27] KARUNATHILAKA, N., TADA, N., UEMORI, T., HANAMITSU, R., & KAWANO, M., **Effect of contact pressure applied on tool surface during cold forging on fatigue life of tool steel**. Procedia Manufacturing, v. 15, p. 488–495, 2018.
- [28] ASM HANDBOOK., **Forming and forging**. Ohio: ASM International, 1ª ed., v. 14, 1993.
- [29] BUTTON, S.T., ROQUE, C.M., CAPORALLI, A., **Planejamento do processo e projeto de ferramentas para o forjamento a frio de eixos de aço**. Apostila do curso de graduação, UNICAMP, 1995.
- [30] BÖRDER, C., **Análise do coeficiente de atrito no ensaio do anel para o forjamento a quente**. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.
- [31] DIETER, E. G., **Metalurgia mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 2ª ed., 653p., 1981.
- [32] ZHA MIN, L., **Microstructure hardness evolution and thermal stability of binary Al–7Mg alloy processed by ECAP with intermediate annealing**. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, vol. 24, n°. 7, p. 2301–2306, 2014.
- [33] FILHO, B. E.; SILVA, B. I.; BATALHA, F. G.; BUTTON, T. S., **Conformação plástica dos metais**. São Paulo: UPUSP, 6ª ed., 258p., 2011.
- [34] OLIVEIRA, R. R. D., **Avaliação da tensão residual em Alumínio 7050 conformado pelo processo *Peen Forming***. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia associada a Universidade de São Paulo, São Paulo, 128 p., 2011.
- [35] LANGE K.; KAMMERER M.; PÖHLANDT K.; SCHÖCK J., **Fließpressen: Wirtschaftliche fertigung metallischer präzisionswerkstücke**. Berlin: Springer; 2008, 541p.
- [36] HUMPHREYS, F. J., **Recrystallization and related annealing phenomena**. Oxford: Pergamon, 2ª ed., 556 p., 2004.
- [37] RAO, A., **Stress corrosion cracking behaviour of 7xxx aluminum alloys: A literature review**. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 26, n°. 6, p. 1447-1471, 2015.
- [38] CORRÊA, E. C. S., **Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 262 p., 2004.
- [39] SCHULER, **Metal forming handbook**. Alemanha, Ed. Springer, 574p., 1998.
- [40] SCHAEFFER, L., **Forjamento**. 1ª. ed. Porto Alegre: Editora Imprensa Livre, 2001.

- [41] FERREIRA, R. A. S., **Conformação plástica: fundamentos metalúrgicos e mecânicos**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2006. p. 20-80, 2011.
- [42] GEIGER, M.; ARBAK, M.; ENGEL, U., **Projeto de ferramenta adaptado de material em forjamento a frio exemplificado por aços-ferramenta metalúrgicos em pó e industriais cerâmica**. Pesquisa e Desenvolvimento de Engenharia de Produção, v: 2, p. 409-415, 2008.
- [43] KU, T.W.; KANG, B.S., **Fabricação de ferramenta controlada por dureza e aplicação ao forjamento a frio de pista interna com ranhuras esféricas enviesadas**. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 74, p. 1337-1354, 2014.
- [44] GEIGER, M.; FALK, B., **Predição de vida útil e probabilidade de falha de ferramentas de forjamento a frio**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 50, p. 173–176, 2001.
- [45] CETLIN, P. R.; HELMAN, H., **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. Artliber Editora: São Paulo, 2ª ed., 263 p., 2005.
- [46] BUENO, A. F. *et al.*, **Comportamento do Coeficiente de Atrito no Aço AISI 4140 em Teste de Compressão do Anel com Diferentes Lubrificantes**. 66º Congresso ABM. São Paulo: [s.n.]. 2011.
- [47] MARTINS, V.; SCHAEFFER, L., **Comparação entre lubrificantes pela verificação do atrito em alumínio e aço**. Revista Corte e Conformação de Metais, p. 44 - 63, 2009.
- [48] KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S., **Manufacturing engineering and technology**. New York: Pearson, 6th ed., 1197p., 2009.
- [49] VALBERG, H. S. **Applied metal forming including FEM analysis**. United Kingdom: Cambridge University Press, 1. ed., 466 p., 2010.
- [50] KOLLER, L. A.; SCHAEFFER, L.; OLIVEIRA, R. A., **Evaluation of two commercially available lubricants by means of ring test to AA6061 F Aluminum alloys**. Materials Research, 6, n. 4, p. 591-597, 2004.
- [51] BÖESCH JÚNIOR, P. R.; MARTINS, V.; SCHAEFFER, L., **Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão**. Revista Thema, v. 8, p. 1-11, 2011.
- [52] ZDILLA, J., POOLE, D., **Uma visão mais próxima dos lubrificantes para forjamento**. Revista Forge, ed. 1, p. 12-16, 2009.
- [53] LARRIN, T., **Knife Engineering: Steel, Heat Treating and Geometry**. Pensilvânia: Independently published. 450p., 2020.
- [54] JIANG, Y. Z.; TIEU, K. A.; LU, C., **A FEM modelling of the elastic deformation zones in flat rolling**. Journal of Materials Processing Technology, v.146, p.167–174, 2004.

- [55] SOARES, R. I., **Simulação por elementos finitos da etapa de desbaste na laminação de longos**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte/MG, 98p., 2010.
- [56] GOLKE, M., **Practical Aspects of Finite Element Simulation**. 3<sup>th</sup> edition. Altair University. Michigan/USA, 503p., 2015.
- [57] AZEVEDO, F. M. A., **Método dos elementos finitos: Apostila** - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 258p., 2003.
- [58] LOTTI, R. S.; MACHADO, W. A.; MAZZIEIRO, T. E.; JÚNIOR L. J., **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos**. Revista Dental Press Ortodontia Ortopedia Facial, v. 11, n. 2, p. 35–43, 2006.
- [59] ELLOBODY, E.; FENG, R.; YOUNG, B., **Finite element analysis and design of metal structures**. Londres: Butterworth-Heinemann, 1<sup>a</sup> ed., 218p., 2014.
- [60] IDELSOHN, S. R.; OÑATE, E., **To mesh or not to mesh. That is the question....** Computer methods in applied mechanics and engineering, v.195, p. 4681–4696, 2006.
- [61] FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A First Course in Finite Elements**. Londres: John Wiley & Sons, 336p., 2007.
- [62] BENEŠ, Š.; KRUIS, J. **Efficient methods to visualize finite element meshes**. Advances in Engineering Software, v.79, p.81–90, 2015.
- [63] HOFFMAN, J.D. **Numerical Methods for Engineers and Scientists**. McGrallhill. New York, 825p., 2014.
- [64] METTLER, J. J., **Basic Butchering of Livestock & Game: Beef, Veal, Pork, Lamb, Poultry, Rabbit, Venison**. New York: Storey Publishing. 209p., 2003.
- [65] COLLINS, B., **Knife Skills**. New York: Storey Publishing. 123p., 2014.
- [66] CARTER, M., **Bladesmithing**. Kansas: F+W Media, Inc. 161p., 2011.
- [67] WARD, C., **An Edge in the Kitchen**. New York: HarperCollins Publishers. 230p., 2008.
- [68] SPINELLI, R.; GLUSHKOV, S.; MARKOV, I., **Managing chipper knife wear to increase chip quality and reduce chipping cost**. Biomass and Bioenergy, v. 62, p. 117–122, 2014.
- [69] FIGUEIREDO L.C., **Avaliação de Soldas produzidas por Arames Tubulares desenvolvidos em Laboratório do Tipo Básico com Adição de Polímero como Ingrediente do Fluxo**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 92p., 2016.
- [70] MARCIÓ, B. S. **Avaliação de Estanqueidade em Vasos de Pressão de Pequeno Porte**. Tese de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 113p., 2014.

[71] MEYENDORF, N.; IDA, N.; SINGH, R.; VRANA J., **Handbook of Nondestructive Evaluation 4.0**. Gewerbestrasse: Springer Nature, 1272p., 2022.

[72] FURTADO, H. C.; FELIPPE, L.; VIEIRA, P.; MAGALHÃES, F. J.; ALMEIDA De, L. D. **Avaliação de Integridade e Estimativa de Vida Útil de Componentes de Caldeiras em UTES**. Grupo de trabalho de manutenção de usinas térmicas – GTMT/ABRAGE, Belo Horizonte, 212p., 2013.




[73] ANDREUCCI, R. **Líquidos Penetrantes**. Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção - ABENDI, São Paulo, 54p., 2018.

[74] SILVA, C.A., **Análise de propriedades mecânicas, tribológicas e Metalográficas de material submetido ao processo de erosão corrosão com sulfetação**. Dissertação – PIPE - Universidade Federal do Paraná, Paraná, 95p., 2009.

[75] AMÉRICO, R. **Efeito Da Conformação Mecânica na Resistência a Corrosão dos Aços NBR7008 ZC/Z275 E GALVALUME ASTM A792 CSB/AZM150**. Tese de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 79p., 2016.

[76] MARCOMINI F. R., SOUZA F. P. M. D. **Caracterização microestrutural de materiais cerâmicos utilizando o programa de processamento digital de imagens Image J**. São Paulo: Cerâmica, 2011, 100-105p.

## ANEXO A – CERTIFICADO DE QUALIDADE DO MATERIAL

Herstellerwerk / Manufacture's works / Usine productrice 		Art der Prüfbescheinigung / Type of inspection document / Type du document <b>ABNAHMEPRUEFZEUGNIS</b> INSPECTION CERTIFICATE CERTIFICAT DE RECEPTION nach / according to / suivant <b>EN 10204-3.1</b>		Bescheinigungsnr. / Document number / Numéro de document 21.08.2019 <b>1000728637 /</b> Seite / Page / Page: <b>1 / 1</b>																																																						
Oberschlesienstrasse 16, 47807 Krefeld TRAMONTINA S.A. CUTELARIA AV. 25 DE SETEMBRO, 1024 95187-000 CARLOS BARBOSA - RS BRASILIEN			Besteller/Empfänger / Customer/Consignee / Acheteur/Destinataire TRAMONTINA S.A. CUTELARIA, 95187-000 CA Kundenbestellnr. / Customer's order number / Numéro de la commande du client 362.249 Werksauftragsnr. / Manufacturer's works order no/ N° de la commande de l'usine productrice 900526080 / 001 Lieferanzeige Nr. / Delivery Note No. / Avis d'expédition N°. 87979177 / 010 Erzeugnis / Product / Produit BAND/COIL/ROULEAU																																																							
Lieferbedingungen / Terms of delivery / Conditions de livraison EN 10088-2			Stahlsorte und Gütegruppe / Steel grade and quality / Nuance de l'acier NIROSTA 4116 / 1.4116																																																							
Kundenmaterial-Nr. / Customer's material number / N° de matière du client 030031		Maße des Erzeugnisses ( Dicke / Breite / Länge ) / Product dimensions ( Thickness / Width / Length ) / Dimensions du produit ( Epaisseur / Largeur / longueur ) 3,5 mm x 1250,0 mm		Hersteller / Steelmaking proc. / Mode d'élabor. AOD	Ausführung / Finish / Fini IIIc /2B																																																					
Paket-Nr. / Packing-No. / N° Palette 9278464 9278465 9278952 9278953 9278954 9278955 9287229 9287232	Stückzahl / No of pieces / Masse effective 1 1 1 1 1 1 1	Ist-Gewicht / Actual weight / Masse effective 8750 KG 8940 KG 8750 KG 8730 KG 8750 KG 8860 KG 8515 KG 8510 KG	Ident.-Nr. Erzeugnis / Ident.-N° of product / Ident.-N° du produit 294016 294016 294292 294292 294293 294293 294017 294017	Schmelzennr. / Cast number / Id. de la coulée 331288 331288 331288 331288 331288 331288 331288 331288	Proben-Id. / Sample Id. / Empl. du prélèvement 1003593240 1003593240 1003593318 1003593318 1003593258 1003593258 1003597239 1003597239	Proben-Id. / Sample Id. / Empl. du prélèvement 1003593241 1003593241 1003593319 1003593319 1003593259 1003593259 1003597240 1003597240																																																				
	8	69805 KG																																																								
Schmelze / Cast-No. / Coulée N° 331288	Chemische Zusammensetzung / Chemical composition/ Composition chimique <table border="1"> <thead> <tr> <th>% C</th> <th>% Si</th> <th>% Mn</th> <th>% P</th> <th>% S</th> <th>% Cr</th> <th>% Mo</th> <th>% N</th> <th>% V</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,467</td> <td>0,57</td> <td>0,36</td> <td>0,023</td> <td>0,0020</td> <td>14,33</td> <td>0,52</td> <td>0,058</td> <td>0,13</td> </tr> </tbody> </table>					% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% N	% V	0,467	0,57	0,36	0,023	0,0020	14,33	0,52	0,058	0,13																																			
% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Mo	% N	% V																																																		
0,467	0,57	0,36	0,023	0,0020	14,33	0,52	0,058	0,13																																																		
Prüflot / Inspection lot / Lot de contrôle Proben-Id./-Lage / Sample Id./-Position / Ident./empl. du prélèvement QUER <table border="1"> <thead> <tr> <th>Rp0,2%</th> <th>Rp1%</th> <th>Rm</th> <th>A5</th> <th>HRB</th> </tr> <tr> <th>MPa</th> <th>MPa</th> <th>MPa</th> <th>%</th> <th>HRB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1003593240</td> <td>391</td> <td>473</td> <td>668</td> <td>30,9</td> <td>90,0</td> </tr> <tr> <td>1003593241</td> <td>394</td> <td>469</td> <td>654</td> <td>29,9</td> <td>89,0</td> </tr> <tr> <td>1003597239</td> <td>365</td> <td>441</td> <td>658</td> <td>31,5</td> <td>89,0</td> </tr> <tr> <td>1003597240</td> <td>372</td> <td>448</td> <td>661</td> <td>27,9</td> <td>89,0</td> </tr> <tr> <td>1003593318</td> <td>398</td> <td>480</td> <td>678</td> <td>30,9</td> <td>90,0</td> </tr> <tr> <td>1003593319</td> <td>393</td> <td>474</td> <td>669</td> <td>32,3</td> <td>90,0</td> </tr> <tr> <td>1003593258</td> <td>398</td> <td>477</td> <td>672</td> <td>29,1</td> <td>90,0</td> </tr> <tr> <td>1003593259</td> <td>400</td> <td>476</td> <td>665</td> <td>32,0</td> <td>89,0</td> </tr> </tbody> </table>	Rp0,2%	Rp1%	Rm	A5	HRB	MPa	MPa	MPa	%	HRB	1003593240	391	473	668	30,9	90,0	1003593241	394	469	654	29,9	89,0	1003597239	365	441	658	31,5	89,0	1003597240	372	448	661	27,9	89,0	1003593318	398	480	678	30,9	90,0	1003593319	393	474	669	32,3	90,0	1003593258	398	477	672	29,1	90,0	1003593259	400	476	665	32,0	89,0
Rp0,2%	Rp1%	Rm	A5	HRB																																																						
MPa	MPa	MPa	%	HRB																																																						
1003593240	391	473	668	30,9	90,0																																																					
1003593241	394	469	654	29,9	89,0																																																					
1003597239	365	441	658	31,5	89,0																																																					
1003597240	372	448	661	27,9	89,0																																																					
1003593318	398	480	678	30,9	90,0																																																					
1003593319	393	474	669	32,3	90,0																																																					
1003593258	398	477	672	29,1	90,0																																																					
1003593259	400	476	665	32,0	89,0																																																					
Maße-Oberfläche/Dimensions-Surface/Dimensions-Surface: Verwechslungsprüfung (Spektralanalyse)/Steel grade verification (PMI)/Contrôle d'identification (analyse spectrale): WAERMEBEHANDLUNG : 780 GRAD C / LUFT TRAITEMENT THERMIQUE : 780 GRADE C / AIR HEAT - TREATMENT : 780 DEGREE C / AIR	I.O. I.O.																																																									
Aussteller der Bescheinigung / Originator of the document / Auteur du document Outokumpu Nirossta GmbH Dieses Zeugnis wurde maschinell erstellt Werk Krefeld  Abnahmebeauftragter/ Inspector/ Expert Nico Masimowsky Tel.: + 49-2151-83-2447 Fax: + 49-2151-83-4106 Certificates.Nirossta@outokumpu.com		Stempel des (der) Abnahmebeauftragten Receiving agent's stamp Poinçon de l'agent réceptionnaire 		Datum der Ausstellung und Bestätigung Date of issue and validation date d'émission et validation 21.08.2019																																																						
Die Lieferung entspricht der Bestellung The delivery meets the order agreement La livraison correspond à la commande																																																										



## ANEXO B – FICHA TÉCNICA BONDERITE L-FM FL 743

Hoja de datos técnicos

**BONDERITE****BONDERITE L-FM FL 743**Conocido como BONDERLUBE FL 743  
Marzo 2015**DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO**

BONDERITE L-FM FL 743 posee las siguientes características:

<b>Tecnología</b>	Lubricante
<b>Tipo de Producto</b>	Lubricante en base agua
<b>Aplicación</b>	Conformado en frío

BONDERITE L-FM FL 743 es un lubricante líquido no reactivo en base agua de color blanco.

El producto pertenece a una innovadora tecnología de tratamiento de superficies para procesos de conformado en frío de acero al carbono, acero inoxidable y metales no ferrosos.

BONDERITE L-FM FL 743 se emplea en una aplicación única, como alternativa al paquete de lubricación tradicional compuesto por recubrimiento de fosfato y jabón.

Por ello, el ciclo de trabajo en materiales procedentes de granallado o decapado químico previos se simplifica considerablemente de acuerdo al procedimiento general siguiente:

- Chorro de arena
- Inmersión en agua desmineralizada caliente (T = 50°C)
- Tratamiento con BONDERITE L-FM FL 743 (T = 40 a 60°C)
- Secado en caliente (T = 100°C)

El material deberá desengrasarse primero en el caso de presentar residuos de aceite.

Como alternativa al chorro de arena, la eliminación de óxidos de superficie puede realizarse con ciclos de tratamiento previo tradicionales que incluyen el decapado químico.

Optimizar las secciones del enjuague posterior para prevenir la introducción de contaminantes en el baño de BONDERITE L-FM FL 743.

El departamento técnico de Henkel puede aconsejarle sobre los productos necesarios para satisfacer sus necesidades específicas.

La película lubricante de BONDERITE L-FM FL 743 tiende a hidratarse parcialmente con humedad; para obtener rendimientos óptimos es necesario someter los materiales tratados a operaciones de deformación dentro de un breve periodo de tiempo para garantizar los mejores resultados conforme al flujo de trabajo.

En caso de almacenamiento durante periodos más prolongados o en entornos con una fuerte humedad, puede ser necesario repetir el proceso de secado para garantizar que se obtienen los mejores rendimientos del producto.

**Áreas de aplicación:**

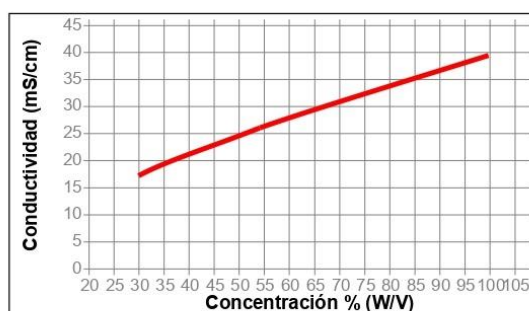
BONDERITE L-FM FL 743 se emplea normalmente por inmersión, ya sea en plantas en continuo ó en cargas; el baño debe agitarse o recircularse en profundidad conforme a las instrucciones recibidas del personal de Henkel para evitar la estratificación del producto.

Los depósitos, los agitadores y las tuberías deben estar fabricados en acero 304o acero al carbono recubierto con FRP (polímeros reforzados con fibra).

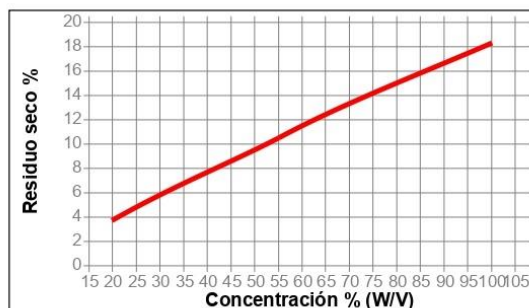
Póngase en contacto con nuestro servicio técnico que le ofrecerá sugerencias sobre cualquier posible modificación del sistema para conseguir los mejores resultados.

**Conductividad:**

Concentración de BONDERITE L-FM FL 743

**Residuo seco:**

Concentración de BONDERITE L-FM FL 743



HDT BONDERITE L-FM FL 743, Marzo 2015

**INSTRUCCIONES DE USO****Declaración preliminar:**

Antes de usar el producto es necesario leer la hoja de datos de seguridad del material para obtener información sobre las medidas de precaución y las recomendaciones de seguridad. Así mismo, para los productos químicos exentos de etiquetado obligatorio deben observarse siempre las precauciones de seguridad relevantes. Consultar también las instrucciones de seguridad locales y contactar con Henkel para obtener soporte analítico.

**Preparación del baño:**

BONDERITE L-FM FL 743 debe diluirse añadiendo agua desmineralizada cuya cantidad depende del tipo de producto y la deformación necesaria, hasta una concentración máxima de entre el 60% y el 100%.

**Datos de funcionamiento:**

Temperatura de tratamiento, °C	40 a 60
Tiempo de procesamiento, min	1 a 5
Concentración, %	60 a 100
Secado, °C	100
Secado (en función de la masa y la forma), min	3 a 15

**Control del baño:**

Para el funcionamiento del baño de BONDERITE L-FM FL 743 pueden emplearse dos métodos de análisis, dependiendo del tipo de equipo que el cliente tenga disponible: medición de la conductividad o determinación del residuo seco.

Dependiendo de la concentración obtenida, añadir producto concentrado si la concentración es menor que el valor fijado o añadir agua desmineralizada si la concentración debe disminuir.

**Funcionamiento mediante la medición de la conductividad:**

El baño de BONDERITE L-FM FL 743 puede hacerse funcionar comprobando la concentración del baño mediante mediciones de conductividad.

**Equipo necesario:**

- Conductímetro con escala de lectura no inferior a 100 mS/cm equipado con compensador de temperatura (TC) de ajuste manual y temperatura de referencia de 25 °C o ajustable entre 20 °C y 25 °C p. ej. tipos de banco Crison).
- Célula conductimétrica con constante 1cm<sup>-1</sup> o 10cm<sup>-1</sup>, capacidad de lectura máxima de al menos 50 mS. (Crison or Metrohm).
- Agitador magnético
- Objetos de cristal de laboratorio estándar

**Instrucciones de manejo:**

- Tomar una muestra de baño de aprox. 200 ml y leer la conductibilidad de la solución (temperatura de referencia 25°C y compensador de temperatura 2,3%) mientras se agita.

- En el caso de que el compensador de temperatura no esté disponible, registrar el valor a 25°C.
- Registrar la fecha en el gráfico anexo y comprobar la concentración correspondiente (%).

**Funcionamiento mediante la determinación del residuo seco:****Equipo necesario:**

- Estufa termostática con una T máxima T ≥ 120°C, ajuste de temperatura ~1°C.
- Escala de análisis (sensibilidad 0,0001 g)
- Cápsulas termorresistentes (aluminio, acero inoxidable, cerámica, ...)
- Secadora
- Objetos de cristal de laboratorio estándar

**Instrucciones de manejo:**

- Precalentar la estufa a 105°C.
  - Secar la cápsula en el horno durante 10' y enfriarla a temperatura ambiente en la secadora.
  - Pesar la cápsula y registrar el valor como P<sub>0</sub>.
  - Transferir una muestra (1 a 2 g) de BONDERITE L-FM FL 743 a la cápsula. Registrar el valor total de la muestra + la cápsula como P<sub>1</sub>.
  - Introducir la cápsula en la estufa precalentada a 105°C y esperar 2 horas.
  - Sacar la cápsula y enfriarla a temperatura ambiente en la secadora.
  - Pesar la cápsula y registrar el valor como P<sub>2</sub>.
  - Calcular el valor de residuo seco con la siguiente fórmula:
- $$\text{Residuo seco \%} = \frac{(P_2 - P_0)}{(P_1 - P_0)} \times 100$$
- Anotar la fecha en el gráfico anexo y comprobar la concentración correspondiente (%).

**Rellenado:**

Para aumentar la concentración del 1 %, añadir 10 Kg de BONDERITE L-FM FL 743 por cada 1.000 litros de baño.

**Classification:**

Por favor, consulte la Ficha de Seguridad e Higiene en vigor para obtener detalles sobre:

**Riesgos****Normativas para el Transporte Normativas sobre Seguridad****Almacenamiento:**

Temperatura de almacenamiento recomendada, °C	5 a 40
Vida útil, meses (si el producto permanece sin abrir en su embalaje original)	12
Sensibilidad a las heladas	sí



**INFORMACIÓN ADICIONAL****Exoneración de responsabilidad****Nota:**

La información proporcionada en esta Hoja de Datos Técnicos (HDT), incluyendo las recomendaciones de uso y aplicación del producto, se basan en nuestro conocimiento y experiencia con el producto a la fecha de elaboración de esta HDT. El producto puede tener una gran variedad de aplicaciones y diferentes condiciones de trabajo y aplicación de acuerdo al medio en que se encuentre, las cuales se encuentran fuera de nuestro control. Por lo tanto, Henkel no será responsable de la idoneidad de nuestro producto en sus procesos y condiciones de producción para el cual se utilice, ni de las aplicaciones o resultados que se esperen del mismo. Recomendamos que lleve a cabo sus propias pruebas para confirmar el funcionamiento de nuestro producto.

Se excluye cualquier responsabilidad sobre la información en la Hoja de Datos Técnicos o en cualquier otra recomendación oral o escrita relativa al producto en cuestión, excepto en los casos en que así se haya acordado expresamente o en caso de muerte o lesiones causados por nuestra negligencia o cualquier otra responsabilidad derivada de las leyes aplicables en materia de productos defectuosos.

**En el caso de que los productos sean suministrados por Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS y Henkel France SA tengan en cuenta también lo siguiente:**

En el caso de que a pesar de ello Henkel fuera considerada responsable en virtud de cualquier fundamento jurídico, la responsabilidad de Henkel en ningún caso superará el importe de la entrega correspondiente.

**En el caso de que los productos sean suministrados por Henkel Colombiana, S.A.S., será de aplicación el siguiente descargo de responsabilidad:**

La información proporcionada en esta Hoja de Datos Técnicos (HDT), incluyendo las recomendaciones de uso y aplicación del producto, se basan en nuestro conocimiento y experiencia con el producto a la fecha de elaboración de esta HDT. Por lo tanto, Henkel no será responsable de la idoneidad de nuestro producto en sus procesos y condiciones de producción para el cual se utilice, ni de las aplicaciones o resultados que se esperen del mismo. Recomendamos que lleve a cabo sus propias pruebas para confirmar el funcionamiento de nuestro producto. Se excluye cualquier responsabilidad sobre la información en la Hoja de Datos Técnicos o en cualquier otra recomendación oral o escrita relativa al producto en cuestión, excepto en los casos en que así se haya acordado expresamente o en caso de muerte o lesiones causados por nuestra negligencia o cualquier otra responsabilidad derivada de las leyes aplicables en materia de productos defectuosos.

**En el caso de que los productos sean suministrados por Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc., o Henkel Canada Corporation, será de aplicación el siguiente descargo de responsabilidad:**

Los datos aquí contenidos se facilitan solo para información, y se consideran fiables. No se pueden asumir responsabilidades de los resultados obtenidos por otros sobre cuyos métodos no se tiene control alguno. Es responsabilidad del usuario determinar la aptitud de los métodos de producción aquí mencionados para sus propios fines, y adoptar las precauciones que sean recomendables para proteger a toda persona o propiedad de los riesgos que pueda entrañar la manipulación y utilización de los productos. A la vista de lo anterior, Henkel Corporation declina específicamente todas las garantías explícitas o implícitas, incluyendo garantías de comercialización o instalación para un propósito en particular, producidas por la venta o uso de productos de Henkel Corporation. Henkel Corporation declina específicamente cualquier responsabilidad por daños de cualquier tipo, incidentales o derivados como consecuencia del uso de los productos, incluyendo la pérdida de ganancias. La exposición aquí ofrecida sobre procesos o composiciones, no debe interpretarse como una afirmación de que estos estén libres de patentes que obran en poder de otras firmas, o que son licencias de Henkel Corporation, que pueden cubrir dichos procesos o composiciones. Se recomienda a cada posible usuario que pruebe la aplicación propuesta antes de su utilización habitual, empleando estos datos como guía. Este producto puede estar cubierto por una o varias patentes estadounidenses o de otras nacionalidades, o por solicitudes.

**Uso de la Marca Registrada**

A no ser que se indique lo contrario, todas las marcas registradas de este documento son marcas de Henkel Corporation en EE.UU. y en cualquier otro lugar. ® indica una marca registrada en la Oficina de Patentes y Marcas de EE.UU.

Referencia 0.0

**Henkel AG & Co. KGaA**  
40191 Düsseldorf, Alemania  
Teléfono: +49-211-797-0

**Henkel Ibérica S.A.**  
08025 Barcelona, España  
Teléfono: +34-93-290-4000



Para obtener más información, póngase en contacto con nosotros a través de [www.henkel.com](http://www.henkel.com)

## ANEXO C – DADOS DO ENSAIO DE TRAÇÃO

$\Delta l(\text{mm})$	$F(\text{N})$	$\Delta l(\text{mm})$	$F(\text{N})$	$\Delta l(\text{mm})$	$F(\text{N})$
0,1661	438,954	1,58346	10805,3	3,00012	18700,6
0,18756	558,343	1,62508	11205,8	3,04179	18709,2
0,23617	741,069	1,66663	11610,2	3,0834	18631,7
0,28496	941,558	1,70819	12016,4	3,1252	19112,6
0,33058	1158,8	1,74998	12424,9	3,16675	19334,1
0,37386	1380,44	1,79159	12833,8	3,2083	19437,4
0,41619	1600,53	1,83333	13242,5	3,24986	19585,9
0,45829	1819,55	1,87506	13649,7	3,29159	19738,9
0,5002	2046,52	1,91661	14049,5	3,33344	19884
0,54181	2282,14	1,95817	14439,1	3,37518	20023,6
0,58337	2526,52	1,9999	14804,2	3,41673	20160,1
0,6251	2777,59	2,04175	15138,4	3,4584	20293,4
0,66665	3037,22	2,08342	15471,2	3,50008	20426,8
0,70839	3306,23	2,12498	15816,7	3,54181	20558
0,75	3592,07	2,16665	16167,9	3,58354	20687,5
0,79161	3882,53	2,20844	16518,9	3,6251	20813,6
0,83329	4185,68	2,25012	16865,6	3,66665	20940,3
0,87496	4500,45	2,29143	17192,2	3,70832	21063,7
0,91669	4827,49	2,33311	17489,9	3,75006	21188,1
0,95843	5166,83	2,3749	17682,9	3,79185	21311,6
0,99998	5515,1	2,41675	17762,7	3,83346	21429,8
1,04153	5869,63	2,45848	17974,8	3,87496	21548,2
1,08327	6229,81	2,50016	18153,8	3,91675	21667,8
1,125	6590,05	2,54177	18307,9	3,95848	21784,5
1,16673	6955,78	2,58332	18422,1	4,00028	21900,6
1,20829	7324,25	2,62506	18511,1	4,04177	22013,5
1,2499	7699,43	2,66685	18579,6	4,08356	22125
1,29157	8077,71	2,70852	18635,6	4,12518	22232,8
1,33319	8459,39	2,7502	18669,7	4,16673	22335,8
1,37492	8844,77	2,79175	18694,2	4,2084	22442
1,41665	9232,04	2,83348	18706	4,25014	22546
1,45827	9621,79	2,87504	18710,9	4,29181	22648,9
1,5	10015,1	2,91683	18713,9	4,33342	22745,5
1,54167	10409	2,9585	18709,2	4,37504	22845,7

$\Delta l$ (mm)	$F(N)$	$\Delta l$ (mm)	$F(N)$	$\Delta l$ (mm)	$F(N)$
4,41683	22949	6,00017	26174	7,58364	28354,8
4,4585	23048,2	6,04191	26241,8	7,62495	28403,4
4,5	23146,1	6,08328	26308,2	7,66669	28455,9
4,54167	23245,3	6,1249	26377,9	7,70854	28506
4,5834	23342,7	6,16681	26447,5	7,75033	28552,2
4,62502	23438,4	6,20854	26511,7	7,79183	28598,1
4,66687	23535	6,25021	26576,6	7,83338	28643,7
4,70854	23628,2	6,29183	26638,7	7,87511	28692,6
4,75004	23721,1	6,33344	26703,1	7,91685	28735,6
4,79165	23813,8	6,37511	26766,8	7,9584	28777,3
4,83332	23909,9	6,41685	26826,9	8,00013	28819
4,87524	24001,7	6,45852	26887	8,04175	28860
4,91685	24091,1	6,50007	26944,2	8,08336	28902,5
4,9584	24179,5	6,54169	27003,6	8,12515	28946,6
5,00002	24269,6	6,58348	27063,3	8,16689	28990,6
5,04181	24359,1	6,62527	27121,2	8,20856	29032,8
5,08348	24447,2	6,66683	27175,3	8,25011	29073,1
5,12504	24533,2	6,70844	27232,4	8,29167	29116
5,16671	24620,7	6,74999	27287,7	8,3334	29161,1
5,20832	24704,9	6,79179	27346,5	8,37519	29201,5
5,25011	24788,8	6,83352	27399,9	8,41675	29243,7
5,29179	24874,7	6,87513	27453,4	8,45848	29282,6
5,33364	24956,4	6,91687	27503,6	8,50009	29324,5
5,37525	25037,9	6,95842	27552,5	8,54177	29365,1
5,41681	25115,6	6,99991	27601,2	8,58332	29405,9
5,45836	25197,9	7,04171	27650,2	8,62517	29445,5
5,50009	25277,9	7,0835	27702,4	8,66685	29486,4
5,54183	25356,3	7,12511	27763,4	8,7084	29525,9
5,58338	25434,7	7,16673	27817,2	8,75007	29566,1
5,625	25511,7	7,20834	27874,6	8,79181	29605,8
5,66679	25588,6	7,25013	27932,1	8,8336	29646
5,70846	25666	7,29193	27986,4	8,87515	29680,7
5,75007	25740,2	7,33348	28040,3	8,91659	29718,1
5,79181	25814,5	7,37509	28092,9	8,95826	29757,9
5,83348	25888,5	7,41665	28146,8	9,00011	29796,4
5,87497	25957,8	7,45832	28199	9,04197	29834,3
5,91659	26031,4	7,50017	28254,3	9,08364	29868,2
5,9585	26104,6	7,54191	28305,2	9,12513	29903,2

$\Delta l$ (mm)	$F(N)$	$\Delta l$ (mm)	$F(N)$	$\Delta l$ (mm)	$F(N)$
9,16686	29941	10,75015	31039,6	12,33356	31756,3
9,20848	29975,6	10,7917	31063,4	12,37517	31769,8
9,25021	30010,7	10,83332	31085,9	12,41672	31786,2
9,29194	30045,2	10,87505	31109,6	12,45846	31800,9
9,33344	30077,2	10,91666	31132,7	12,50025	31815,6
9,37499	30111,5	10,9584	31155,6	12,54186	31826,8
9,41684	30145,5	11,00013	31177,7	12,58354	31840,7
9,4584	30178,5	11,04186	31196	12,62521	31855,7
9,50007	30211,7	11,08354	31219,7	12,66682	31867,5
9,54169	30241,3	11,12509	31240,8	12,70832	31879,9
9,5833	30273,1	11,16676	31264,1	12,75017	31895,5
9,62515	30308,7	11,2085	31282,7	12,79184	31908,4
9,66682	30337,4	11,25017	31303,8	12,83358	31920,2
9,70856	30369,3	11,29178	31325	12,87519	31931,8
9,75017	30397,9	11,33346	31344	12,91686	31943,9
9,79184	30427,7	11,37519	31363,3	12,95859	31957,6
9,83346	30458,4	11,41662	31382,9	13,00033	31966,9
9,87501	30485,9	11,45848	31404	13,04176	31979
9,9168	30518	11,50021	31422,7	13,08332	31990,1
9,95854	30544,1	11,54176	31440,2	13,12505	32004,1
10,00009	30572,9	11,58344	31459,3	13,16672	32014,5
10,04176	30602	11,62505	31477,7	13,20858	32027,8
10,0835	30629,1	11,6669	31495,8	13,25025	32037
10,12529	30657,1	11,70858	31512,7	13,29174	32046,3
10,16696	30683,1	11,75001	31529	13,3333	32057,8
10,2084	30710,4	11,79162	31548,3	13,37509	32069,1
10,25007	30738,2	11,83342	31567,2	13,41688	32079,3
10,29174	30764,9	11,87527	31583	13,45862	32087,5
10,33348	30791	11,91688	31598,8	13,50011	32098,7
10,37521	30819,2	11,95856	31616,3	13,54178	32108,6
10,41694	30841,7	12,00011	31632,9	13,58346	32117,7
10,45838	30867,6	12,04178	31649,6	13,62513	32125,4
10,50005	30894,1	12,0834	31665,6	13,66674	32136,4
10,54178	30920,4	12,12513	31681,3	13,70847	32147,3
10,5837	30944,9	12,16674	31697,2	13,75003	32154,3
10,62519	30966,6	12,20842	31710,8	13,79182	32164,4
10,66668	30991,3	12,25003	31726,8	13,83355	32172,8
10,70842	31018,2	12,29188	31743,9	13,87535	32181,9

$\Delta l$ (mm)	$F(N)$	$\Delta l$ (mm)	$F(N)$	$\Delta l$ (mm)	$F(N)$
13,9169	32189,4	15,50019	32411,2	17,08329	32473,4
13,95845	32196,5	15,54162	32414,2	17,12502	32476,1
14,00007	32204,7	15,58335	32419,6	17,16682	32476,9
14,0418	32215,1	15,62527	32426,2	17,20867	32474,8
14,08347	32221,6	15,66688	32426,3	17,2501	32472,4
14,12521	32230,8	15,70843	32429,5	17,29178	32471,3
14,16688	32235,8	15,75017	32432,4	17,33351	32473,7
14,20855	32246	15,79184	32435,3	17,37536	32471,9
14,25005	32248,7	15,83351	32438,5	17,4168	32468,8
14,29172	32258,8	15,87507	32440,9	17,45835	32468,8
14,33357	32266,3	15,91674	32443,3	17,50002	32467,3
14,37519	32272,9	15,95847	32446,3	17,54176	32468
14,41668	32278,8	16,00003	32447,2	17,58361	32466,3
14,45842	32286,2	16,04182	32450,9	17,62522	32464,7
14,50009	32293,4	16,08367	32456	17,6669	32462,8
14,54182	32299,3	16,12523	32453,3	17,70851	32460,2
14,58337	32304,5	16,16666	32454,1	17,75013	32457,9
14,62493	32309,8	16,20833	32457,6	17,79186	32458,7
14,66672	32318,7	16,25025	32462,3	17,83359	32455
14,70845	32323,4	16,29198	32461,8	17,87514	32452,9
14,75025	32331,4	16,33347	32463	17,91676	32449
14,79192	32333,9	16,37509	32464,7	17,95843	32449,6
14,83347	32340,7	16,41682	32466,4	18,00023	32448,4
14,87515	32346,5	16,45843	32468,6	18,04184	32445,2
14,91676	32350,6	16,50011	32468	18,08351	32442,5
14,95855	32355,9	16,54178	32470	18,12512	32438,7
15,00017	32362,1	16,58351	32471,5	18,1668	32435,9
15,04172	32365,2	16,62501	32470,8	18,20847	32433,9
15,08339	32371,9	16,66668	32471,7	18,2502	32432,5
15,12507	32375,6	16,70853	32474,7	18,29188	32429,1
15,16686	32382,4	16,75027	32473,9	18,33343	32424,7
15,20841	32384,7	16,79188	32475,7	18,37487	32417,5
15,25009	32388,8	16,83343	32473,1	18,4166	32420,5
15,29176	32394,7	16,87505	32474,3	18,45857	32418,3
15,33349	32397,1	16,91672	32475,9	18,50024	32411,9
15,37511	32400,6	16,95851	32476,6	18,54192	32406,6
15,41696	32404,9	17,00019	32475,8	18,58335	32401,7
15,45863	32408,6	17,04186	32474,2	18,62508	32399,5

$\Delta l$ (mm)	$F(N)$	$\Delta l$ (mm)	$F(N)$	$\Delta l$ (mm)	$F(N)$
18,66688	32396,3	20,25004	32091,9	21,83345	30706,9
18,70855	32391,7	20,2916	32077,3	21,87506	30641,1
18,7501	32386,9	20,33333	32062,8	21,91691	30572,3
18,79172	32380,6	20,37506	32049,3	21,95865	30498
18,83327	32376,7	20,41698	32031,7	22,0002	30424,1
18,87506	32375,4	20,45859	32014,6	22,04181	30348,9
18,91698	32370,5	20,50026	31994,7	22,08348	30271,8
18,95853	32362,6	20,54181	31976,4	22,12522	30189,8
19,00002	32354,2	20,58349	31957,4	22,16665	30108,2
19,0417	32352,2	20,62516	31937	22,20851	30026,4
19,08355	32349,1	20,66689	31916,2	22,25018	29938,7
19,12528	32340,8	20,70845	31891,4	22,29173	29850,8
19,16684	32334,1	20,74994	31867,2	22,33341	29761,4
19,20851	32328,3	20,7918	31845	22,3752	29667,3
19,25018	32321,9	20,83347	31817,9	22,41693	29573,7
19,2918	32316,7	20,87514	31790,8	22,45849	29473,5
19,33347	32309,7	20,91687	31760,8	22,5001	29374,3
19,37514	32303,7	20,95855	31730,2	22,54183	29271,5
19,41676	32294,4	21,00016	31700	22,58351	29166,5
19,45843	32288	21,04183	31665,3	22,62524	29055
19,5001	32281,8	21,08351	31631,1	22,66691	28943,8
19,5419	32274	21,1253	31596	22,70859	28829,5
19,58369	32265,7	21,16692	31555,4	22,75014	28711,6
19,62524	32254,5	21,20835	31515,4	22,79169	28588,7
19,66668	32246,8	21,24996	31476,1	22,83355	28463,4
19,70835	32239,7	21,29176	31433	22,87534	28333,8
19,75002	32230,7	21,33361	31388,1	22,91695	28199,5
19,79188	32221,8	21,37528	31338	22,95839	28061,6
19,83349	32211,6	21,41684	31290,5	23,00012	27918,8
19,8751	32200,1	21,45851	31242,2	23,04191	27772,8
19,91672	32191,9	21,5003	31189,5	23,08371	27616,3
19,95839	32180,9	21,54191	31135,4	23,1252	27457,5
20,00018	32170,4	21,58359	31080	23,16681	27292,1
20,04198	32158,4	21,62508	31022,5	23,20849	27120,3
20,08359	32143,7	21,6667	30964,3	23,25034	26939,5
20,12508	32132,2	21,70837	30902,9	23,29207	26744,9
20,16681	32122,1	21,75034	30841	23,33363	26509
20,20849	32107,4	21,79195	30774,2		



**Área da seção transversal do corpo de prova:** 49mm<sup>2</sup>

**Tempo de execução:** 55,6 segundos

**$l_0$ :** 82,5mm

**Desenho técnico do corpo de prova:**

