

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS DAGOSTIN ROVEDA

INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DO PARALELO DE UMA FIEIRA NA
TREFILAÇÃO DE ARAME

São Leopoldo
2018

LUCAS DAGOSTIN ROVEDA

**INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DO PARALELO DE UMA FIEIRA NA
TREFILAÇÃO DE ARAME**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pelo Curso de Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientador: Prof. Ms. Fabiano da Silva Brites

São Leopoldo

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Ludimar Luiz Roveda e Veranilse Dagostin Roveda, que foram fundamentais ao longo de todos esses anos de estudo.

Aos meus avós Antonio Francisco Roveda e Jolair Antonia Cristan Roveda, que sempre estavam disponíveis para ajudar e apoiar.

Ao professor e orientador Ms. Fabiano da Silva Brites, que auxiliou a elaboração desse trabalho através de reuniões e ensinamentos.

Ao consultor João Perez Montilla, que apoiou com ideias para desenvolvimento da pesquisa, além de ajudar com a criação e definição de testes.

Aos colegas do laboratório químico e metalúrgico da Gerdau Riograndense, pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao Tiago Mascarenhas Reis, que acreditou e concedeu os recursos necessários para o trabalho, além de me proporcionar crescimento profissional e pessoal.

À usina Gerdau Riograndense, que disponibilizou materiais e equipamentos na execução dos ensaios.

À toda equipe da Gerdau Riograndense, que apoiaram e estimularam para a concretização desse trabalho.

À empresa Retimicron Indústria Metalúrgica, que ajudou no dimensionamento e fabricação das feiras utilizadas nos testes.

RESUMO

O presente trabalho visa avaliar na trefilação a influência do comprimento do paralelo numa fieira de diâmetro de 4,60 mm, que realiza a primeira redução (deformação relativa em área) de 30% num fio-máquina do aço SAE 1045. Dessa maneira, foi possível analisar as forças de trefilação, a agregação de sabão no arame e a capacidade produtiva das fieiras. Foram utilizadas três modelos de matriz, sendo que a única dimensão que variou entre eles foi o comprimento de paralelo, visto que foi empregado 15%, 40% e 70% do diâmetro da fieira nessa dimensão. Nos testes realizados foram utilizados corpos de prova, sabão de trefila, máquina universal de ensaios de tração, máquina de trefilação, fieiras, entre outros itens. Os procedimentos adotados seguiram uma metodologia de modo a isolar a variável a ser estudada, favorecendo a análise e discussão dos resultados. As forças de trefilação foram obtidas numa máquina de tração, trefilando através das fieiras de teste um fio-máquina coletado nas condições reais de operação. Para obtenção da agregação de sabão sobre o arame, foi trefilado o material numa máquina de trefilação e feita a análise da camada de sabão sobre o fio. Com relação a capacidade produtiva da fieira, foram feitos testes numa máquina de trefilação, avaliando quantos quilos de material a matriz foi capaz de produzir para se deformar em um centésimo de milímetro no seu diâmetro. Como resultados desse trabalho, a fieira com comprimento de paralelo de 15% do diâmetro da fieira gerou os melhores resultados, obtendo menor força de trefilação, maior agregação de sabão sobre o arame e maior capacidade produtiva, sendo seguida pela fieira de 40% e pela de 70% de comprimento de paralelo. Portanto, foi comprovado que o comprimento de paralelo tem grande influência na trefilação.

Palavras-chave: Trefilação. Arame. Fieira. Paralelo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produtos gerados conforme o processo de conformação	17
Figura 2 – Fieira de trefilação	19
Figura 3 – Variação das propriedades mecânicas com aumento da redução por trabalho a frio	20
Figura 4 – Fluxograma do processo de trefilação	21
Figura 5 – Tipos de carepa do fio-máquina	22
Figura 6 – Decapagem por dobração	23
Figura 7 – Máquina de trefilação: a) monobloco, b) múltiplos passes	24
Figura 8 – Máquina de trefilação: a) cumulativa, b) não cumulativa	25
Figura 9 – Bobinador de máquinas de trefilação: a) em carretel, b) em estocador ...	26
Figura 10 – Regiões de uma fieira	27
Figura 11 – Forças presentes no atrito entre corpos	29
Figura 12 – a) representação à nível microscópico de duas superfícies, b) relação qualitativa da variação da área de cisalhamento e da força de atrito com a força normal	30
Figura 13 – Lubrificação na trefilação	32
Figura 14 – Utilização de aplicador de sabão	33
Figura 15 – Geometria da fieira na agregação de sabão	34
Figura 16 – Trabalho conforme ângulo de trefilação	37
Figura 17 – Triângulo retângulo para definição de α otimizado	38
Figura 18 – Fluxograma do trabalho	40
Figura 19 – Desenho ilustrativo da máquina de trefilação múltiplos passes	45
Figura 20 – Região onde foram retiradas as amostras na máquina de trefilação	47
Figura 21 – a) apontamento da amostra, b) corte da ponta do arame.	48
Figura 22 – a) marcação dos pontos a serem cortados, b) corte da amostra, c) ilustração de como foi alcançado o tamanho da amostra	49
Figura 23 – a) adição de sabão, b) início do ensaio de tração, c) final do ensaio de tração	50
Figura 24 – Medição do dimensional das amostras	52
Figura 25 – Início da trefilação com a fieira	53
Figura 26 – Amostras coletadas	54
Figura 27 – Pesagem da amostra com sabão residual	55

Figura 28 – a) amostras com clorofórmio, b) amostras dentro da lavadora ultrassônica, c) algodão e álcool utilizados	56
Figura 29 – Medição da deformação indireta da fieira	58
Figura 30 – Pesagem do material produzido pela fieira	58
Figura 31 – a) núcleo da fieira antes dos ensaios, b) núcleo da fieira depois dos ensaios.....	64
Figura 32 – Charuto formado na trefilação com a fieira 70% de comprimento de paralelo	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Força associada ao deslocamento do arame para fieira com comprimento de paralelo de 0,684 mm (15%).....	60
Gráfico 2 – Força associada ao deslocamento do arame para fieira com comprimento de paralelo de 1,784 mm (40%).....	61
Gráfico 3 – Força associada ao deslocamento do arame para fieira com comprimento de paralelo de 3,195 mm (70%).....	62
Gráfico 4 – Comparação das forças entre os modelos de fieiras	63
Gráfico 5 – Camada de sabão residual para cada modelo de fieira	67
Gráfico 6 – Capacidade produtiva de cada modelo de fieira	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas das fieiras.....	42
Tabela 2 – Parâmetros para o ensaio de força de trefilação.....	51
Tabela 3 – Análise dimensional das amostras	65
Tabela 4 – Resultado da camada residual de sabão para os modelos de fieiras.....	67
Tabela 5 – Dados da produção e deformação de cada modelo de fieira	69

LISTA DE SÍMBOLOS

A_0	Área inicial	[mm ²]
A_1	Área final	[mm ²]
A_c	Área de contato	[mm ²]
A_n	Área de contato nominal	[mm ²]
A_s	Área de cisalhamento	[mm ²]
C	Camada residual de sabão sobre o arame	[g/m ²]
Cap Prod	Capacidade Produtiva	[kg/centésimo de mm]
D	Diâmetro do arame	[mm]
D_0	Diâmetro do arame na entrada da fieira	[mm]
D_1	Diâmetro do arame na saída da fieira	[mm]
F	Força	[N]
F_a	Força de atrito	[N]
F_c	Força de cisalhamento interna do material	[N]
F_m	Força imposta pelo movimento	[N]
F_n	Força normal	[N]
F_r	Força de reação imposta pela força normal	[N]
G_e	Grau de esforço	[Adimensional]
m	Coeficiente de atrito interfacial	[Adimensional]
M_f	Massa final	[g]
M_i	Massa inicial	[g]
P%	Comprimento de paralelo	[%]
r_0	Raio inicial	[mm]
r_1	Raio final	[mm]
T	Trabalho total	[N/mm]
T_A	Trabalho do atrito	[N/mm]
T_C	Trabalho interno de cisalhamento	[N/mm]
T_U	Trabalho útil	[N/mm]
W_a	Energia de atrito	[J]
W_{pl}	Energia de deformação	[J]
W_r	Energia redundante	[J]

W_t	Energia total de trefilação	[J]
α	Ângulo do cone de trabalho da fieira	[rad]
α_{ot}	Ângulo ótimo do cone de trabalho da fieira	[rad]
ε_A	Deformação relativa em área	[Adimensional]
ε_c	Deformação relativa circunferencial	[Adimensional]
μ	Coefficiente de atrito coulombiano	[Adimensional]
$\mu_{máx}$	Coefficiente de atrito coulombiano máximo	[Adimensional]
π	Pi	[Adimensional]
σ	Tensão normal	[MPa]
σ_1	Tensão na saída da fieira	[MPa]
σ_e	Tensão de escoamento	[MPa]
$\overline{\sigma_e}$	Tensão de escoamento média	[MPa]
σ_e^f	Tensão de escoamento final	[MPa]
σ_e^i	Tensão de escoamento inicial	[MPa]
σ_r	Tensão de ruptura	[MPa]
τ	Tensão de cisalhamento	[MPa]
τ_e	Tensão de escoamento ao cisalhamento	[MPa]
φ_A	Deformação verdadeira em área	[Adimensional]
$\varphi_{A\ final}$	Deformação verdadeira em área final	[Adimensional]
$\varphi_{A\ inicial}$	Deformação verdadeira em área inicial	[Adimensional]
$\varphi_{A\ total}$	Deformação verdadeira em área total	[Adimensional]

LISTA DE SIGLAS

CP	Corpo de Prova
OTO	<i>Overhead Take Off</i>
SAE	Norma (<i>Society of Automotive Engineers</i> – EUA)
SICETEL	Sindicato Nacional da Indústria de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS	Universidade do Vale do Rio dos Sinos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivos Específicos	14
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	15
1.4 JUSTIFICATIVA	15
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 CONFORMAÇÃO DOS METAIS.....	17
2.2 TREFILAÇÃO.....	19
2.2.1 Etapas do processo de trefilação	20
2.2.2 Preparação superficial	22
2.2.3 Máquinas de trefilação	24
2.2.4 Fieiras	26
2.3 ATRITO	28
2.4 LUBRIFICAÇÃO (OU ENSABOAMENTO)	31
2.5 CÁLCULOS DE TREFILAÇÃO.....	35
2.5.1 Modelo teórico de Sachs	36
2.5.2 Modelo teórico de Siebel	36
2.5.3 Ângulo ótimo do cone de trabalho da fieira	37
2.5.4 Redução máxima (grau de esforço)	39
3 METODOLOGIA	40
3.1 DEFINIÇÃO DAS FIEIRAS.....	40
3.2 DEFINIÇÃO DA TREFILAÇÃO	43
3.3 TESTE DA FORÇA DE TREFILAÇÃO.....	45
3.3.1 Coleta das amostras	45
3.3.2 Ensaio na máquina de tração	49
3.4 TESTE DE AGREGAÇÃO DE SABÃO NO ARAME	52
3.4.1 Coleta das amostras	52
3.4.2 Medição da camada residual de sabão	55
3.5 TESTE DA CAPACIDADE PRODUTIVA DA FIEIRA	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60

4.1 FORÇA DE TREFILAÇÃO	60
4.2 AGREGAÇÃO DE SABÃO NO ARAME	66
4.3 CAPACIDADE PRODUTIVA DA FIEIRA.....	68
5 CONCLUSÃO	73
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
REFERÊNCIAS.....	76
APÊNDICE A – DESENHO DAS FIEIRAS	79
APÊNDICE B – DISPOSITIVO PARA MÁQUINA DE TRAÇÃO.....	80
ANEXO A – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 1045	81
ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DO METAL DURO CLASSE H6F	82
ANEXO C – CERTIFICADO DE QUALIDADE DAS FIEIRAS.....	83

1 INTRODUÇÃO

A siderurgia é um segmento muito importante para a economia. O aço está presente no dia a dia das pessoas, contribuindo com os avanços que a humanidade teve ao longo dos anos. Apesar de ser fundamental, segundo Sindicato Nacional da Indústria de Trefilação e Laminação de Metais Ferrosos (SICETEL, 2017), tem-se um excedente de capacidade mundial de aço de quase 800 milhões de toneladas, não sendo esperado um cenário de maior equilíbrio em curto prazo. Dessa maneira, a indústria do aço possui um índice de ocupação abaixo de 70% da capacidade instalada. Logo, essa grande oferta pressiona os preços dos produtos siderúrgicos, comprometendo a rentabilidade do setor.

De acordo com SICETEL (2017, p. 15), “o consumo aparente de aços longos caiu 19% em 2016 em relação ao ano anterior e acumulou uma queda de 31% nos últimos 5 anos”. Assim, o setor de arames industriais, uma das finalidades do segmento de longos, foi, por consequência, impactado pela baixa demanda. Apesar desse setor possuir diversas aplicações, como por exemplo, cercas, arame farpado, alça para balde, cabos para pincéis, entre outras utilizações que o fazem um ramo diversificado e importante para a sociedade, também foi atingido pela crise do aço. Logo, as organizações industriais (empresas siderúrgicas) estão apresentando dificuldades de se manterem viáveis economicamente. E nesse panorama um fator que agrava tal situação é de que o preço internacional desse tipo de produto é ditado pelo cliente e não pela indústria, fazendo com que a margem de lucro seja ainda mais comprometida.

Devido à esse cenário, as empresas siderúrgicas, em especial as trefilarias de aço, estão na busca constante de reduções de despesas. Uma forma de se alcançar isso é reduzindo o número de interrupções de máquinas, otimizando os processos e/ou ferramentais no intuito de aumentar a produtividade. Nesse contexto as fieiras, que são matrizes utilizadas para trefilar o arame, se tornam objetos de grande relevância, na medida em que ao atingirem condições de suportar os esforços com redução de desgastes, e por sua vez, possibilitar um aumento de tempo de máquina em operação com velocidades superiores, garantirão um processo mais rentável. Isso faz com que as empresas busquem otimizá-las, de modo a garantir um custo competitivo e adequado à qualidade requerida.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A empresa no qual está sendo desenvolvido esse trabalho, possui um “gargalo” de produção numa de suas trefiladeiras. E para aumentar a performance e produtividade desta máquina é muito importante saber a influência do comprimento do paralelo da primeira fieira. Tal matriz possui um diâmetro de 4,60 mm e realiza uma deformação relativa em área (redução) de 30% de um fio-máquina do aço SAE 1045, porém não se tem informações precisas com relação à força de trefilação, à agregação de sabão no arame e à capacidade produtiva da fieira em função do comprimento do paralelo (cilindro de calibração). Logo, analisando tais parâmetros poderá ser avaliado a geometria para aumentar a agregação de sabão no arame, para reduzir os esforços incidentes sobre a fieira e para melhorar sua capacidade produtiva.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência do comprimento do paralelo (cilindro de calibração), da fieira de diâmetro 4,60 mm, que realiza a primeira conformação do material com uma deformação relativa em área de 30%, nas forças geradas na trefilação, bem como, na agregação de sabão no arame e na capacidade produtiva da fieira, considerando a trefilação de um fio-máquina de diâmetro 5,50 mm do aço SAE 1045.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são descritos a seguir:

- a) Avaliar a força necessária para trefilar um arame com fieiras de diferentes comprimentos de paralelo (15%, 40% e 70% do diâmetro da matriz), através de uma máquina universal de ensaio de tração;
- b) Avaliar a agregação de sabão sólido a base de cálcio no arame após a conformação na máquina de trefilação, considerando as fieiras com diferentes comprimentos de paralelo;
- c) Avaliar a capacidade produtiva das fieiras com diferentes comprimentos de paralelo na máquina de trefilação, considerando quantos quilos a fieira

trefilou até que o diâmetro do arame atinja seu limite superior conforme sua tolerância dimensional.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Os testes de força de trefilação serão realizados numa máquina de ensaio de tração, devido à impossibilidade de se fazer tais medições diretamente nas trefiladeiras. Além disso, não será feito ensaio de composição química dos fio-máquinas a serem usados, nem dos materiais que são confeccionados as fieiras.

1.4 JUSTIFICATIVA

O segmento de arames industriais está cada vez mais competitivo, visto a quantidade de oferta de produtos desse portfólio. Sendo assim, as empresas estão em busca constante de processos mais estáveis e com alta produtividade. Nesse ramo, as trefiladeiras tem uma função crucial, pois são as máquinas que fornecem o arame para processos posteriores, como galvanização e recobrimentos diversos, ou até mesmo direto para o cliente. Portanto, as despesas do processo de trefilação carregam os custos de uma vasta linha de produtos, tornando-se muito visadas para melhorias que diminuam os gastos no processo.

Com esse olhar crítico sobre as máquinas de trefilação, e como já citado neste trabalho, o item que é de grande importância são as fieiras, que conformam o arame para o perfil desejado. Se essa matriz for dimensionada adequadamente para o processo trará grandes benefícios, como redução de interrupções e ganhos em velocidade de trefilação. Além disso, a otimização da capacidade produtiva desta resultará numa operação mais estável, com menor probabilidade de gerar produtos não conformes.

Vale ressaltar que a fieira de maior importância para a trefilação considerando um processo de múltiplos passes (mais de uma redução) é a do primeiro passe, pois ela é quem vai agregar maior quantidade de lubrificante no arame, se comparado com qualquer outra. Isso se deve ao fato de que no primeiro passe, o fio-máquina possui uma rugosidade adequada para a penetração do lubrificante nos poros do material, que ao longo da trefilação vai se perdendo através da conformação do mesmo na matriz. (CETLIN, 1982). Por isso, será avaliado o comprimento de paralelo da primeira

feira, pois se essa matriz for especificada de forma ideal, trará grandes ganhos em produtividade na trefilação.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 1 são apresentadas a introdução, a definição do problema, o objetivo geral e específicos, a delimitação do trabalho e a justificativa do estudo.

No capítulo 2 tem-se a fundamentação teórica sobre o processo de trefilação, levando em consideração as características principais desse procedimento. Além disso, é explicado a importância da feira nesse tipo de conformação mecânica.

No capítulo 3 é apresentada e descrita a metodologia adotada neste trabalho.

No capítulo 4 são detalhados e discutidos os resultados obtidos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões pertinentes. E, por sua vez, o capítulo 6 traz sugestões e indicações para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

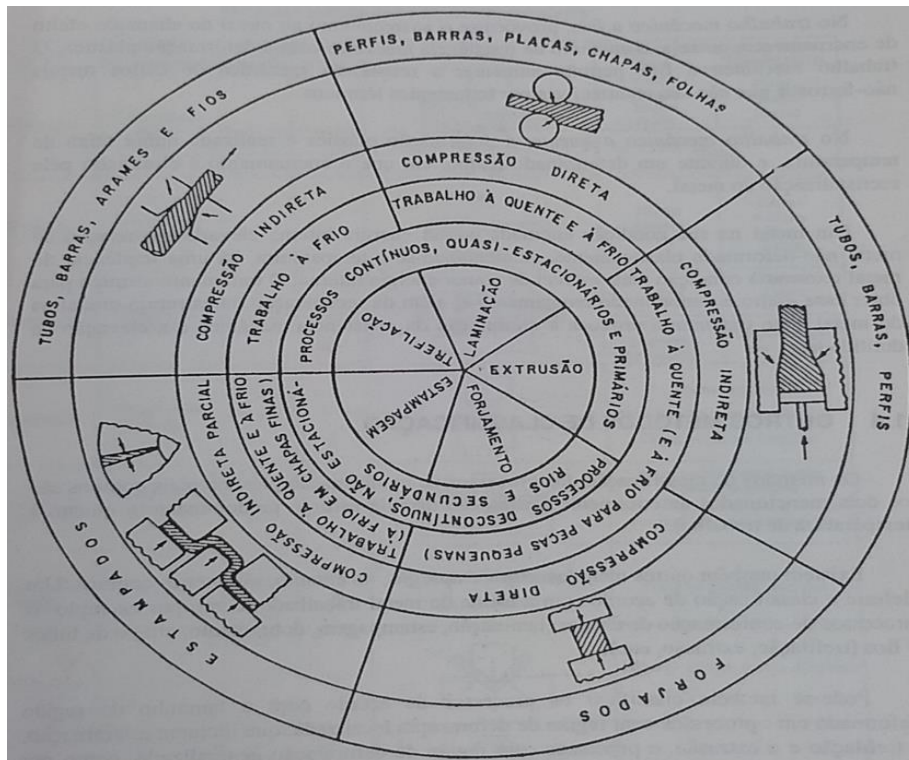
2.1 CONFORMAÇÃO DOS METAIS

A conformação mecânica é definida como uma operação onde se aplicam solicitações em metais gerando mudança permanente de suas dimensões. (HELMAN; CETLIN, 2010). Praticamente todos os produtos metálicos produzidos atualmente são submetidos aos processos de conformação plástica dos metais. (BRESCIANI, 2011). Em função dos esforços aplicados, podem ser classificados nas categorias abaixo.

- Processo de compressão direta;
- Processo de compressão indireta;
- Processo de tração;
- Processo de cisalhamento;
- Processo de flexão.

Na Figura 1 estão dispostos resumidamente os produtos gerados conforme seu processo de conformação.

Figura 1 – Produtos gerados conforme o processo de conformação



Fonte: Bresciani (1991, p. 19).

De acordo com Bresciani (2011, p. 13), “nos processos de conformação por compressão direta, predomina a solitação externa por compressão sobre a peça de trabalho”. Logo, o forjamento e a laminação podem ser classificados nesse grupo. Por outro lado, na conformação por compressão indireta as forças externas aplicadas sobre a peça podem ser tanto de tração como de compressão. Porém, a reação da peça com a matriz produz elevadas forças indiretas de compressão, que efetivamente provocam a conformação plástica do metal. (CHIAVERINI, 1986). Os principais processos que representam tal grupo são a trefilação e a extrusão, de tubos e fios, e a estampagem profunda de chapas.

Por sua vez, na conformação por tração tem-se o exemplo do estiramento de chapas, no qual o material recebe a forma de sua matriz através da aplicação de forças de tração. Com relação aos métodos que visam cortar chapas é evidenciado a conformação por cisalhamento, nas quais há emprego de forças cisalhantes capazes de romper o metal. E no processo de conformação por flexão, o momento fletor é responsável pelas modificações de forma. Este conceito é utilizado para dobrar chapas, barras e outros produtos através dos processos de dobramento livre, dobramento em matriz, calandragem, etc. (BRESCIANI, 2011).

Em relação à temperatura de trabalho, os processos de conformação são classificados como a frio, a quente, a morno e isotérmico. Quando a temperatura de trabalho for superior a temperatura que provoca a recristalização do metal, o processo é definido como de trabalho a quente e, inferior a essa temperatura, é definido como de trabalho a frio. No trabalho a quente o material não fica encruado, pois ocorre a recristalização do metal devido à temperatura. Por outro lado, no trabalho a frio o material fica encruado, alterando drasticamente suas propriedades. (BRESCIANI, 2011). Com relação ao trabalho a morno o aquecimento do material é moderado e abaixo da temperatura de recristalização, obtendo resultados intermediários entre as conformações a frio e a quente nos requisitos de potência e tensão de conformação e demais propriedades. Por sua vez no processo isotérmico as matrizes possuem a mesma temperatura (ou temperaturas muito próximas) da peça a ser conformada, sendo indicado para produtos não ferrosos ou ligas leves com baixo ponto de fusão. É importante destacar que entre todas essas classificações, a conformação a frio apresenta grandes vantagens se o produto exige qualidade no acabamento superficial

e necessidade de resistência mecânica, e largamente utilizado na fabricação de arames via trefilação.

2.2 TREFILAÇÃO

A trefilação é um processo de conformação plástica que consiste na operação de passar uma barra ou um arame através de uma matriz cônica denominada fieira de formato externo cilíndrico, e que contém um furo em seu centro. (BRESCIANI, 1991). Esse furo, com diâmetro decrescente, apresenta um perfil cônico visando fornecer ao material uma seção redonda de diâmetro cada vez menor (ver Figura 2).

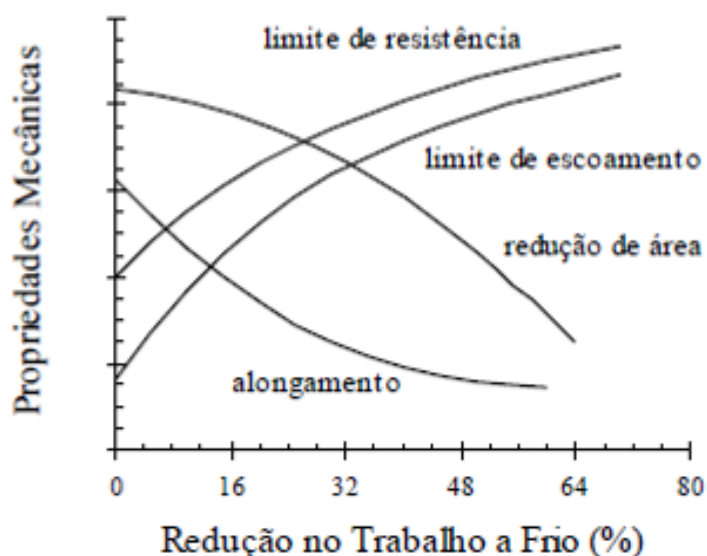
Figura 2 – Fieira de trefilação



Fonte: Adaptado de Esteves Group (2018, s.p.).

A passagem do arame pela fieira causa a redução de sua seção e, como a operação é geralmente realizada a frio, isto é, a uma temperatura de trabalho abaixo da temperatura de recristalização, ocorre o encruamento e alteração das propriedades mecânicas do material do arame. Tais alterações geram redução da ductilidade e aumento da resistência mecânica. (BRESCIANI, 1991). Como pode ser observado na Figura 3, quanto maior for a redução por trabalho a frio, maior será o encruamento do material, causando o aumento do limite de resistência e diminuindo o alongamento percentual.

Figura 3 – Variação das propriedades mecânicas com aumento da redução por trabalho a frio



Fonte: Adaptado de Dieter (1988, p. 148).

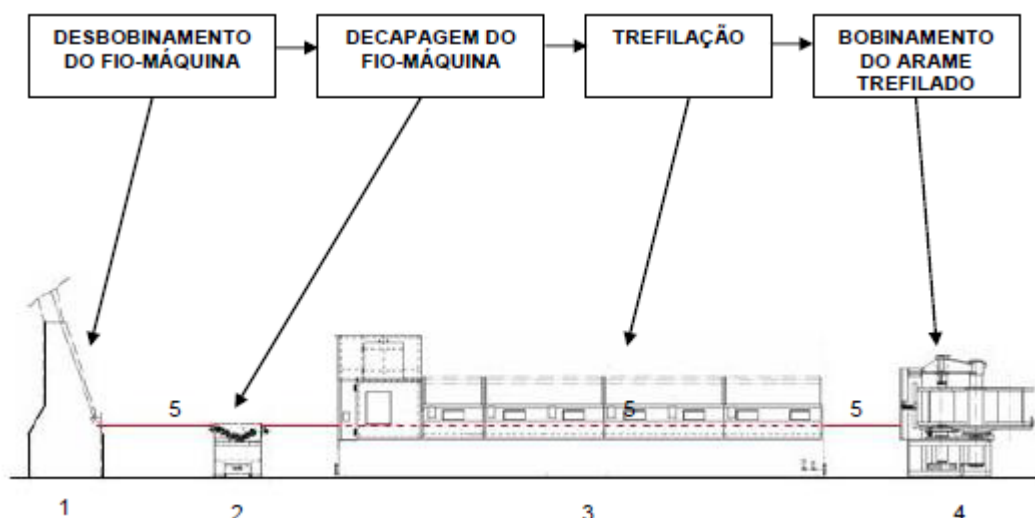
Após a passagem do aço pela fieira, seus grãos que antes eram arredondados, passam a ser alongados, sendo que quanto maior for a redução de área, mais alongados ficam seus grãos. De acordo com Dieter (1988), na maioria dos trabalhos a frio, uma ou duas dimensões do metal são reduzidas para o aumento de outras dimensões, produzindo um alongamento dos grãos na direção principal do trabalho.

Portanto, o processo de trefilação visa obter fios de diâmetros menores e com propriedades mecânicas controladas. Como resultado, é obtido um produto com comprimento maior e seção transversal menor, com controle dimensional e qualidade superficial condizentes. (HELMAN; CETLIN, 2010).

2.2.1 Etapas do processo de trefilação

O processo de trefilação, de forma geral, apresenta o fluxograma apresentado na Figura 4, onde é possível visualizar que uma instalação típica de uma linha de trefilação possui um desbobinador vertical para o fio-máquina (1), um decapador mecânico (2), uma máquina de trefilar (3) e um bobinador para o arame trefilado (4), sendo que por todos esses equipamentos passa o arame a ser trabalhado (5).

Figura 4 – Fluxograma do processo de trefilação



Fonte: Gerdau (2007, p. 8).

O fio-máquina é a matéria prima para a trefilação. Ele é produzido pelo processo de laminação ou extrusão, nos quais se obtém estruturas recozidas de grãos de dimensões variáveis com poucas dispersões entre os mesmos. (BRESCIANI, 2011). Posteriormente, o fio-máquina é embalado em fardos ou bobinas para ser empregado nas máquinas de trefilação.

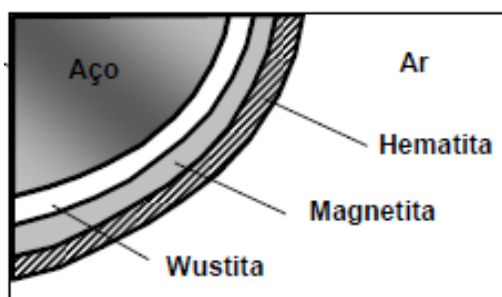
A matéria prima (fio-máquina), antes de ser colocado no equipamento de trefilação, é soldado à ponta final de um rolo, de modo a permitir operar os equipamentos de trefilação por períodos maiores (continuidade), otimizando a produtividade. Após esse processo, os fardos são levados para os desbobinadores das máquinas, que podem ser verticais ou horizontais. Nesse desbobinamento, o material é tracionado pela máquina de trefilar, de modo a puxar o fio pelas outras partes do equipamento. (BRESCIANI, 2011).

Vale ressaltar que o fio-máquina deve ser decapado antes de ser submetido à redução de área para remover a carepa presente na sua superfície, caso contrário, problemas de desgaste de fieiras e problemas superficiais no material trefilado irão aparecer. (FERREIRA, 2010). Após isso o material é trefilado dentro da máquina de trefilação, de modo a reduzir o diâmetro do arame para ser bobinado em carretel ou estocador, dependendo de como é o bobinador do equipamento em questão.

2.2.2 Preparação superficial

O fio-máquina, em geral, contém em sua superfície uma camada de óxidos metálicos, também chamada de carepa, cuja dureza é de 2 a 10 vezes maior que a do aço. Ela é formada por três tipos de óxidos de ferro, a mais externa é a Hematita, a do meio é a Magnetita e a de dentro é a Wustita, como pode ser visualizado na Figura 5. (CETLIN, 1982). Esses óxidos são retirados no processo de decapagem, que pode ser mecânico ou químico, de modo a garantir maior capacidade produtiva para as feiras, que não sofrerão atrito com camadas de materiais de elevada dureza.

Figura 5 – Tipos de carepa do fio-máquina

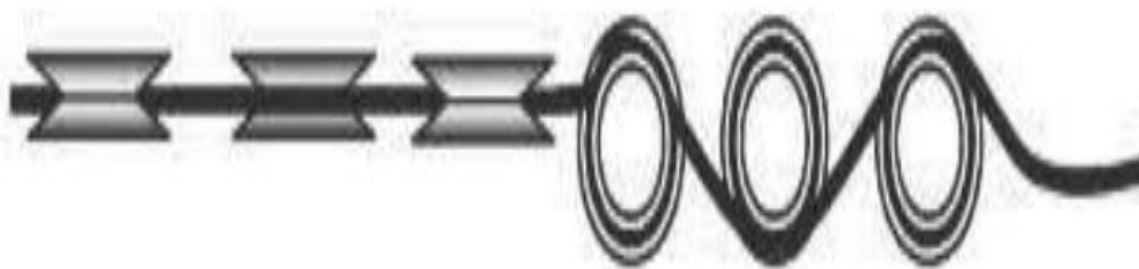


Fonte: Brusius (2009, p. 4).

Conforme Ferreira (2010, p. 176), “Na decapagem química, o material é imerso numa solução aquosa a 20% de ácido sulfúrico (H_2SO_4) ou de ácido clorídrico (HCl)”. O tempo de decapagem depende da quantidade de carepa presente no fio-máquina, sendo que para melhor eficiência desse processo, a solução deve ser mantida a $40^\circ C$. Depois de removidos os óxidos, o material deve ser retirado do tanque de decapagem para ser colocado num tanque com óxido de cálcio (CaO), ou numa solução aquosa a 10% de cianeto de sódio ($NaCN$), ou num banho de borax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$) para neutralização. Com a neutralização concluída, o fio-máquina é seco em estufas e encaminhado para as máquinas de trefilação. Opcionalmente, para possibilitar um aumento de velocidade de trefilação, é realizada uma deposição eletrolítica de um filme de cobre ou estanho sobre o fio-máquina. Entretanto, a decapagem química vem sendo gradativamente eliminada na indústria, pois o descarte e/ou tratamento dos resíduos gerados é dispendioso e a estrutura dos prédios no qual está a instalação desse processo se deteriora com maior facilidade. (FERREIRA, 2010).

Por sua vez, a decapagem mecânica retira os óxidos do fio-máquina por quebra e escovamento. O material ao ser puxado pela primeira bobina da máquina, passa pelos roletes dispostos horizontal e verticalmente, conforme Figura 6, resultando na quebra da carepa devido à flexão alternada (dobramento) em duas direções. (FERREIRA, 2010).

Figura 6 – Decapagem por dobração



Fonte: Ferreira (2010, p. 177).

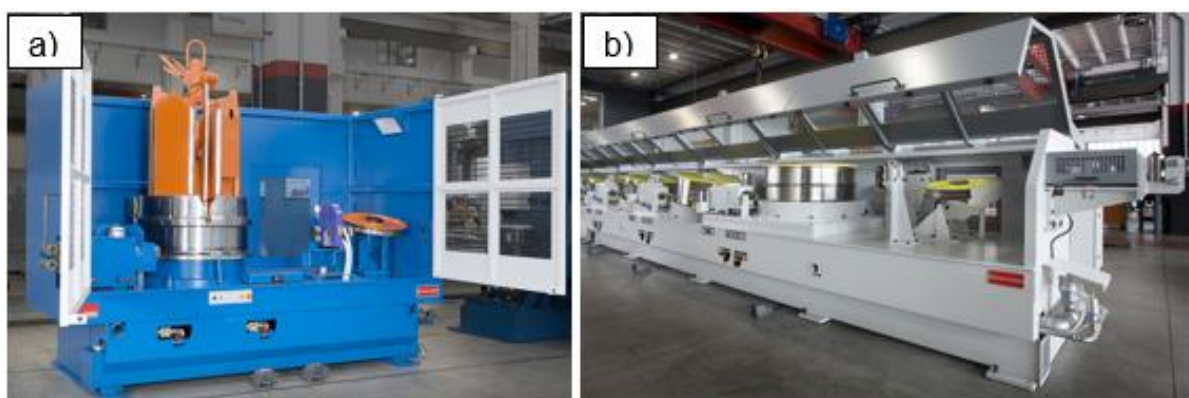
Como o processo de decapagem por dobramento não é capaz de retirar toda a carepa, muitas máquinas de trefilação utilizam escovas de aço ou um sistema de lixamento com cinta, que retiram os óxidos remanescentes no material. Como essa carepa pode ficar em suspensão sobre a superfície do fio-máquina, utiliza-se uma unidade de limpeza da superfície com jatos de água. Porém esta água deve ser completamente retirada do material com utilização de ar comprimido, caso contrário, prejudica a ação do lubrificante na primeira caixa de sabão. Algumas máquinas possuem após a decapagem uma unidade que recobre o material com uma camada de carreador salino (pré-lubrificante) para facilitar a trefilação. (CETLIN, 1982).

A superfície do material após a decapagem varia de acordo com a carepa que ali estava. Carepa grossa depois de retirada deixa a superfície mais irregular, enquanto que a carepa fina deixa a mesma muito lisa. Isso influencia diretamente a lubrificação, visto que superfícies mais rugosas e irregulares facilitam a penetração do lubrificante, o que torna a necessidade de sempre buscar carepas grossas nos fio-máquinas. (CETLIN, 1982).

2.2.3 Máquinas de trefilação

No processo de trefilação existem diversos tipos de equipamentos empregados, sendo que as máquinas monobloco (apenas um bloco) realizam somente uma redução, caracterizando-se por trefilar diâmetros de arame maior, entre 8 a 10 mm, e com baixas velocidades. Já as máquinas múltiplos passes (mais de um bloco) realizam mais de uma redução no fio, podendo atingir altas velocidades e obter diâmetros de arame menor, entre 1 a 3 mm. Além dessas duas variações, os equipamentos podem ter diferenças no seu sistema de trefilação, podendo ser cumulativos ou não cumulativos. (BRUSIUS, 2009). Na Figura 7a) pode ser visualizado uma máquina monobloco e na 7b) uma múltiplos passes.

Figura 7 – Máquina de trefilação: a) monobloco, b) múltiplos passes



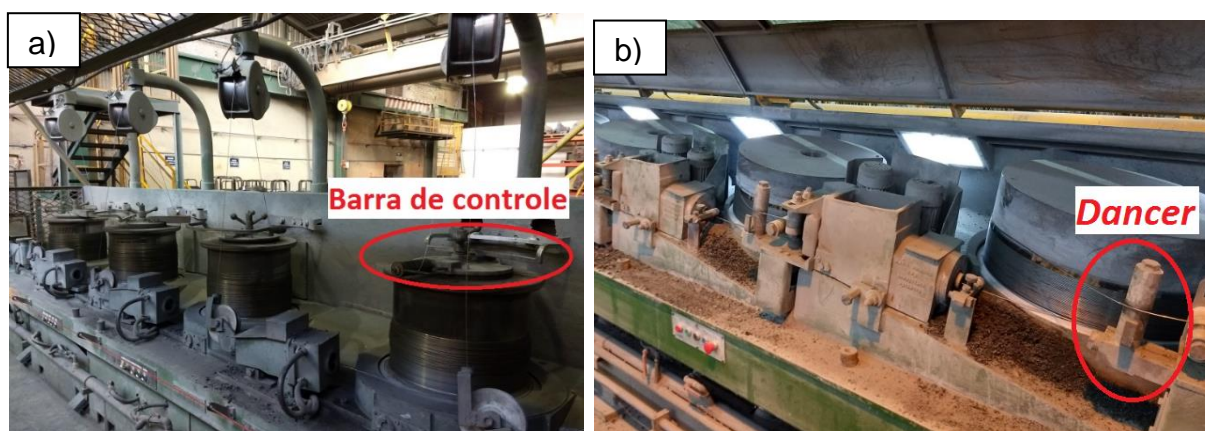
Fonte: Adaptado de Mario Frigerio Group (2018, s.p.).

As máquinas cumulativas possuem rotação fixa em todos os seus blocos durante a operação, sendo que a rotação é maior nos últimos passes que nos primeiros. Isso se deve à velocidade que o arame entra na fieira, sendo menor que a velocidade de saída decorrente do alongamento do fio ao ser feita a redução. Logo, com os desgastes das fieiras os parâmetros de operação não permanecem mais constantes, explicando o motivo de que muitas máquinas possuem blocos *Overhead Take Off* (OTO). Esse bloco possui na sua parte superior uma barra de controle de movimento independente, tendo o objetivo de manter o número de espiras constante na bobina. Dessa maneira, quando a quantidade de arame que sai do bloco é igual à que entra, a barra de controle fica parada. Porém, se a quantidade de material que está saindo do bloco for maior que a quantidade que está entrando o bloco perderá

material. Logo, a barra de controle gira em direção contrária à do bloco para corrigir tal diferença. Em contrapartida, quando a quantidade de material que estiver saindo do bloco é menor que a quantidade que está entrando o bloco ganhará material, assim, a barra de controle gira na mesma direção do bloco para correção. (CETLIN, 1982).

As máquinas não cumulativas possuem velocidade controlada em cada bloco, de modo a se ajustarem ao longo da trefilação. Nessa configuração, tais equipamentos possuem um braço de controle, conhecido como *Dancer*, que fica entre os blocos. Sua função é controlar a velocidade de cada bloco pelo tensionamento do arame ao longo da trefilação, garantindo um controle mais robusto e possibilitando operações em velocidades de até 30 m/s. (CETLIN, 1982). Nesse sistema, o arame sai do bloco na tangencial, enquanto que no sistema de bloco OTO o arame sai pela vertical, como pode ser visualizado na Figura 8a), onde encontra-se uma máquina cumulativa e na Figura 8b) uma não cumulativa.

Figura 8 – Máquina de trefilação: a) cumulativa, b) não cumulativa



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quanto ao bobinamento do arame, pode ser em carretel ou em estocador. Quando o bobinamento do material for feito em carretel, “deve-se fazer variar continuamente a velocidade angular do carretel para cada camada de fio enrolado, pois a velocidade periférica deve ser mantida constante”. (BRESCIANI, 2011, p. 51). Além do controle da velocidade variável para cada camada é necessário ainda controlar a posição do fio através de movimento de velocidade lateral, de acordo com o diâmetro do arame trefilado. (BRESCIANI, 2011). Isso garantirá um material

bobinado uniforme ao logo do carretel. Quando o bobinamento for em estocador, tais controles não são necessários, visto que o material é depositado de forma gradual. Algumas máquinas, entretanto, possuem na base do estocador um movimento circular para melhorar a deposição das espiras. Na Figura 9a) é possível visualizar o bobinador em carretel e na Figura 9b) o bobinador em estocador.

Figura 9 – Bobinador de máquinas de trefilação: a) em carretel, b) em estocador



Fonte: Elaborado pelo autor.

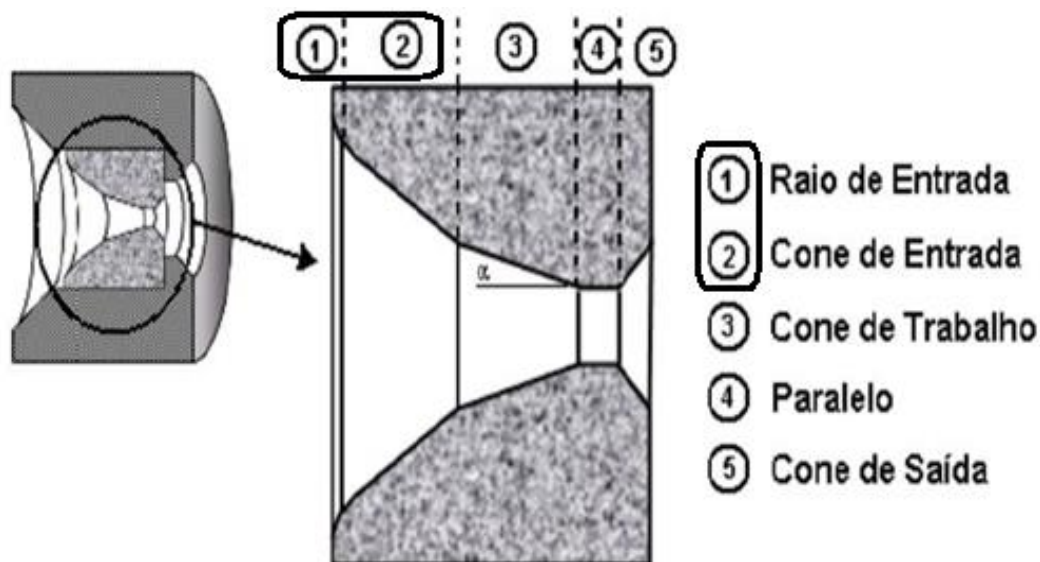
2.2.4 Fieiras

Conforme já citado nesse trabalho, a ferramenta (matriz) utilizada no processo de trefilação é a fieira (ou também chamada de trefila), que é constituída de um núcleo fabricado com um material extremamente duro que é alojado numa carcaça de aço carbono. Seu núcleo pode ser confeccionado com vários materiais, como aços resistentes ao desgaste, produtos cerâmicos, diamantes, entre outros, porém, o mais utilizado pela indústria é o carbeto de tungstênio (WC). (FERREIRA, 2010). Uma das grandes vantagens desse material é seu reaproveitamento, pois após a utilização e desgaste da fieira o mesmo pode ser retrabalhado para fabricação de um arame de diâmetro maior. O objetivo do núcleo da fieira é resistir ao máximo o desgaste provocado pela passagem do fio dentro dele, enquanto que da carcaça é proteger o núcleo contra sua quebra, suportando às solicitações do processo. (CETLIN, 1982).

A fieira possui cinco regiões, o raio de entrada (1), o cone de entrada (2), o cone de trabalho (3), o paralelo (4) e o cone de saída (5), ilustrados na Figura 10 e

explicados a seguir. Vale destacar que em algumas literaturas (PACHECO, 2007) as regiões (1) e (2) são consideradas uma só resultando, nestes casos, quatro regiões.

Figura 10 – Regiões de uma fieira



Fonte: Adaptado de Silva (2011, p. 11).

- **Raio de entrada:** elimina cantos vivos que poderiam danificar o fio-máquina que entra na fieira.

- **Cone de entrada:** auxilia a entrada do lubrificante na região de cone de trabalho.

- **Cone de trabalho:** região onde ocorre a redução da seção do material, sendo necessário ser polido. O ângulo α do cone de trabalho é o principal responsável pela lubrificação da fieira, além de ter influência no esforço feito pelo arame. Se for muito pequeno provoca elevada tensão na trefilação e aumento no atrito. À medida que aumenta, atinge um valor ótimo, onde o atrito e a tensão atingem seus menores valores. Porém se ultrapassar muito este valor podem ocorrer muita deformação na superfície do fio e pouca conformação plástica na parte central do material. Além disso, o comprimento do cone de trabalho deve ser maior ou igual a três vezes o diâmetro de entrada do arame. Se o comprimento de contato entre fieira e material for pequeno a fieira se desgasta depressa, mas se for grande, é difícil a entrada de lubrificante. Devido a isso, esse tamanho é recomendado que seja o diâmetro de entrada do arame dividido por dois. (THE WIRE ASSOCIATION INTERNATIONAL, 1989).

- **Paralelo:** tem como objetivo diminuir o desgaste da saída da fieira e assim manter durante mais tempo a bitola de saída do material. Se seu comprimento for pequeno, o desgaste é rápido e o material sai com bitola acima do aceitável. Se for grande, o desgaste é pequeno, mas a força para trefilar cresce. Normalmente, o comprimento de paralelo é de 0,3 a 0,5 vezes o diâmetro de saída do arame. É importante ressaltar que o paralelo seja cilíndrico, pois se for cônico esse segmento sofrerá rápido desgaste. (THE WIRE ASSOCIATION INTERNATIONAL, 1989).

- **Cone de saída:** tem como objetivo proteger o paralelo contra quebras durante o processo de trefilação.

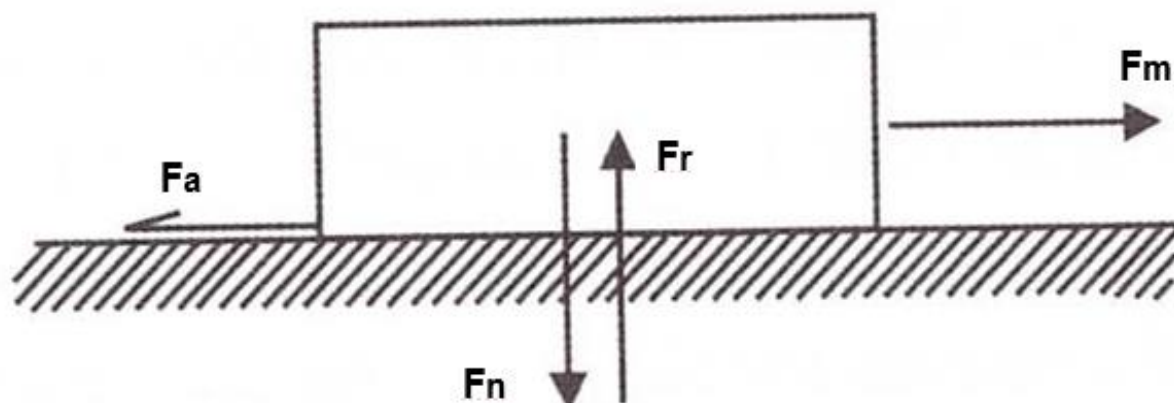
Vale salientar que na trefilação é muito comum um desalinhamento entre o material e a fieira, resultando numa ovalização. Logo, o desgaste da matriz será mais acentuado que o normal, causando paradas de produção e descarte de fieiras. Por esse motivo é empregado fieiras rotativas, que giram no próprio eixo, entre 30 a 250 rotações por minuto (rpm) durante a trefilação. (THE WIRE ASSOCIATION INTERNATIONAL, 1989). Isso possibilita ter maior capacidade produtiva da matriz, impedindo a formação da ovalização do seu núcleo de trabalho.

2.3 ATRITO

Atrito por contato é denominado ao mecanismo no qual se desenvolvem forças superficiais entre dois corpos em contato, traduzindo-se numa resistência ao deslizamento. A causa fundamental das forças de atrito reside em forças de atração, chamadas de força de adesão, entre as pequenas regiões de contato das superfícies deslizantes. Tais superfícies apresentam irregularidades microscópicas que podem constituir-se numa solda no estado sólido devido à uma deformação plástica localizada, sendo que a força de atrito irá cisalhar estas uniões. Este atrito pode ser classificado como atrito por contato fluido ou molhado, quando existe uma película de lubrificante entre as superfícies de contato, ou atrito por contato seco, quando não tem lubrificante interposto. (HELMAN; CETLIN, 2010).

O atrito pode ser representado através de coeficientes, sendo que o atrito coulombiano " μ " expresso pela Lei de Coulomb, representada na Figura 11 e descrita na Equação 1, é frequentemente utilizado nos cálculos de processos de conformação mecânica. (DIETER, 1988).

Figura 11 – Forças presentes no atrito entre corpos



Fonte: Adaptado de Helman, Cetlin (2010, p. 74).

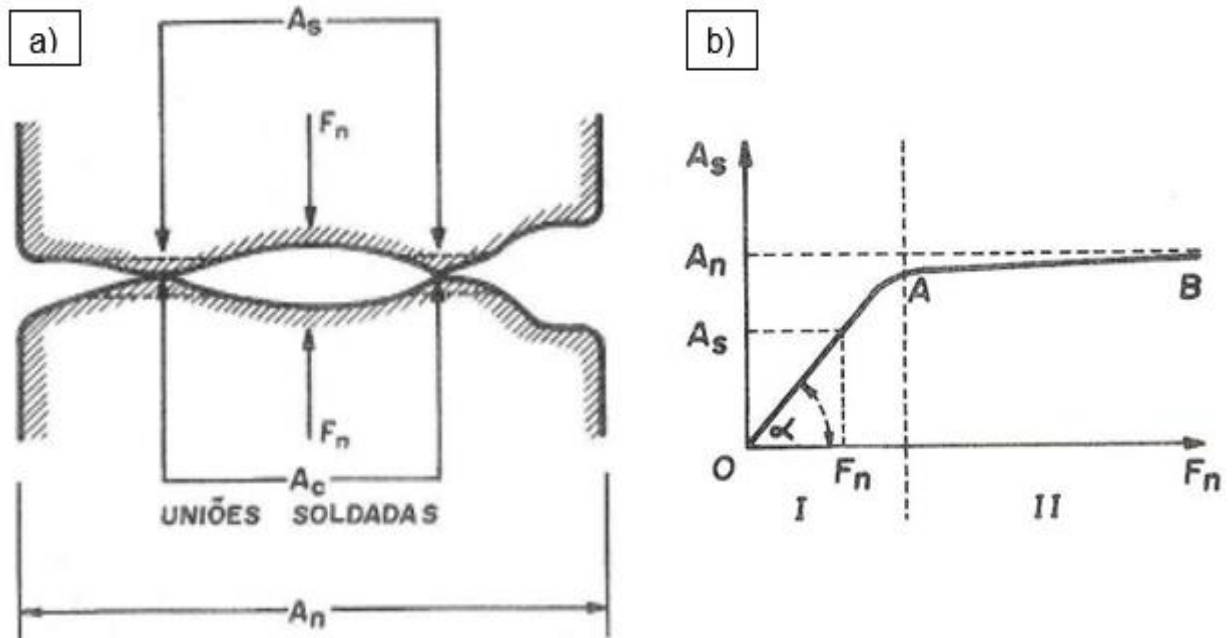
$$\mu = \frac{F_a}{F_r} \quad (1)$$

Na Figura 11 e na Equação 1, " F_a " é a força de atrito que se opõem a força " F_m " que está realizando a movimentação do corpo e " F_r " é a reação imposta a força normal " F_n ". Após o início do movimento de um corpo, a força de atrito diminui, e por consequência a força " F_m " também é reduzida. Logo, é possível afirmar que o atrito dinâmico, quando o corpo está em movimento, é sempre menor que o atrito estático, quando o corpo está em condições de equilíbrio.

Devido às uniões entre as saliências das superfícies de contato sob compressão, existe o atrito dependente da força de cisalhamento dessas uniões soldadas. Sendo assim, a força de atrito " F_a " é representada pela Equação 2, que é influenciada pela resistência ao cisalhamento das superfícies " τ " e a área de cisalhamento " A_s ", cujas dimensões são maiores que a área de contato " A_c ", e que por sua vez é menor que a área de contato nominal " A_n ", como mostrado na Figura 12a). (HELMAN; CETLIN, 2010).

$$F_a = \tau \cdot (A_s) \quad (2)$$

Figura 12 – a) representação à nível microscópico de duas superfícies, b) relação qualitativa da variação da área de cisalhamento e da força de atrito com a força normal



Fonte: Adaptado de Helman; Cetlin (2010, p. 77 e 78).

A medida que a força de compressão aumenta, as áreas de contato “ A_c ” e “ A_s ” aumentarão tendendo a “ A_n ”. Dessa maneira na região I da Figura 12b) é válida a Lei de Coulomb. Entretanto, com a anulação dessa inclinação, a tensão de cisalhamento tende a tensão de escoamento por cisalhamento “ τ_e ”. Porém, como a interface dos metais possui impurezas, existirá uma resistência média ao cisalhamento menor que em condições de limpeza total, sendo nesse caso a tensão demonstrada na Equação 3. Nessa equação o coeficiente “ m ” é o atrito interfacial, que assume nas deformações plásticas valores entre 0 e 1. Assim, e considerando um estado uniaxial onde a tensão de escoamento “ σ_e ” torna-se o valor mínimo de tensão aplicada “ σ ”, é possível estabelecer o valor máximo para o coeficiente de atrito coulombiano através do critério de von Mises descrito na Equação 4. (HELMAN; CETLIN, 2010).

$$\tau = m. (\tau_e) = \mu. (\sigma_e) \therefore \mu = \left(\frac{\tau_e}{\sigma_e}\right). m \therefore \mu = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right). m \therefore m = (\sqrt{3}). \mu \quad (3)$$

$$\mu_{m\acute{a}x} = \frac{\tau_e}{\sigma_e} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cong 0,577 \quad (4)$$

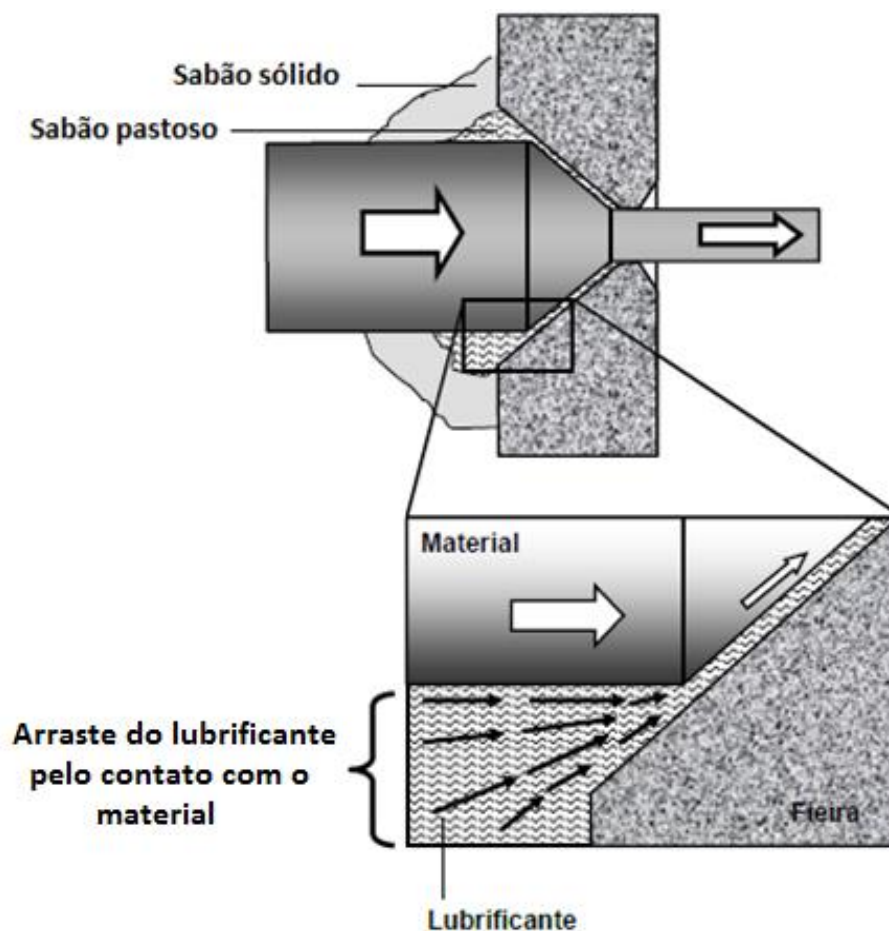
De acordo com Gerbase (1976), o coeficiente de atrito coulombiano para trefilação de aço SAE 1045 utilizando como lubrificante sabão sólido varia de 0,06 a 0,10. Entretanto, conforme Helman; Cetlin (2010), tal coeficiente para trefilação de aço ao carbono numa matriz de WC (carbonetos sinterizados, Widia) com diferentes lubrificantes apresenta valores entre 0,03 a 0,06. Levando em consideração tais diferenças nos valores encontrados pelos autores, será considerado nesse trabalho o valor médio entre os resultados das duas literaturas.

2.4 LUBRIFICAÇÃO (OU ENSABOAMENTO)

O movimento relativo entre o fio e a fieira gera muito atrito, provocando desgaste da ferramenta e causando defeitos superficiais no arame, além de exigir maior esforço de trefilação e elevar a temperatura de trabalho. (HELMAN; CETLIN, 2010). Portanto, é empregado nesse processo lubrificantes que devem penetrar entre o material e a fieira, formando uma camada de lubrificante que reduz a força de trefilação e por consequência, aumentem a capacidade produtiva da matriz. (AVITZUR, TALBERT, 1996).

Em geral, são utilizados dois tipos de lubrificantes na trefilação, os lubrificantes líquidos e os sólidos. Os lubrificantes líquidos são empregados na trefilação de barras e em máquinas de altas velocidades para arames finos. Por sua vez, os lubrificantes sólidos são utilizados na trefilação de arames de aço em qualquer modelo de trefiladeira. O aquecimento gerado no processo transforma o sabão sólido para um estado pastoso na região de entrada do material na fieira e na camada entre eles. (CETLIN, 1982). Entretanto, para ter uma boa performance o sabão deve ser arrastado pelo arame para dentro da fieira, de modo a sempre ter lubrificante entre os dois materiais, garantindo assim a lubrificação hidrodinâmica, conforme Figura 13. (AVITZUR, TALBERT, 1996).

Figura 13 – Lubrificação na trefilação



Fonte: Alterado de Gerdau (2007, p. 8).

Embora os óleos e graxas possam ser utilizados como lubrificantes líquidos, é recomendável a aplicação de lubrificantes sólidos a base de cálcio, sódio ou lítio. Sendo que o sabão deve cobrir completamente o fio e a fiação, sem o risco de formação de túnel. Para garantir tal condição é empregado aplicadores de sabão que tem a finalidade de agitar o lubrificante, garantindo sempre seu contato com o arame. (FERREIRA, 2010). Além disso, os aplicadores ajudam a aderir o lubrificante na superfície do material através da compressão que os roletes proporcionam, sendo que a utilização desse acessório é muito empregado na indústria, principalmente na primeira redução do arame. (BRUSIUS, 2009). Tais dispositivos são utilizados nas caixas de sabão que ficam na frente da fiação, de modo a proporcionarem lubrificação no processo de conformação. Na Figura 14 é possível visualizar essa situação.

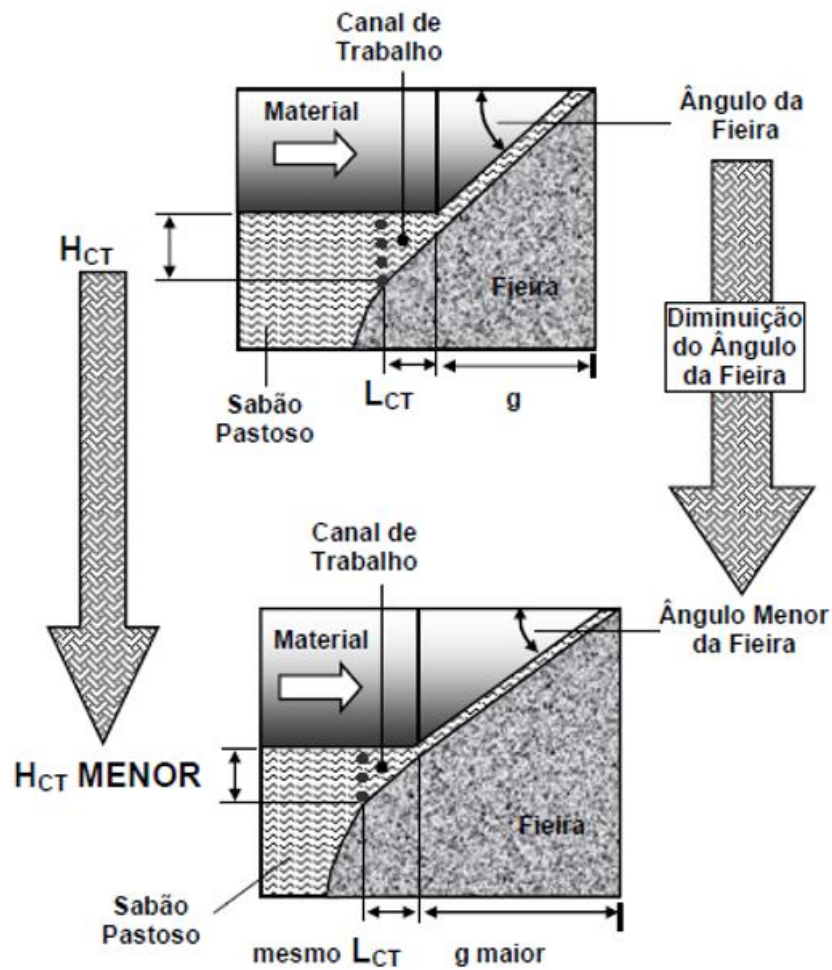
Figura 14 – Utilização de aplicador de sabão



Fonte: Elaborado pelo autor.

O arraste do lubrificante aumenta quando o comprimento do Canal de Trabalho “Lct” (Figura 15) aumenta, quando a altura do Canal de Trabalho “Hct” (Figura 15) diminui e quando a velocidade de trefilação aumenta. As altas velocidades, por outro lado, causam o aquecimento do lubrificante, diminuindo sua viscosidade e piorando o arraste. Sendo esse um dos motivos que os lubrificantes sólidos são mais utilizados que os líquidos, pois possuem maior viscosidade mesmo em maiores temperaturas. Com relação a geometria da fieira para a mesma redução de área no passe, se o ângulo do cone de trabalho diminuir, o comprimento de contato entre o material e a fieira “g” (Figura 15) aumenta. Para manter o mesmo Canal de Trabalho “Lct”, de maneira que a altura do Canal de Trabalho “Hct” diminua e melhore o arraste de sabão, é necessário fazer uma matriz mais comprida. Entretanto, essa prática de aumentar o tamanho da fieira é pouco utilizada na indústria devido ao incremento considerável nos custos. (CETLIN, 1982).

Figura 15 – Geometria da fieira na agregação de sabão



Fonte: Gerdau (2007, p. 28).

Segundo Suliga (2015), numa trefilação de arame de aço com alto teor de carbono (0,79%), reduzindo em 12 passes o diâmetro de 5,50 mm para 1,70 mm, verificou-se que o aumento da velocidade influencia na agregação de sabão. Tal condição foi comprovada, pois alterando a velocidade de 5 m/s para 20 m/s nessa trefilação, obteve-se uma redução de 34% de lubrificante na superfície do fio.

Segundo Menezes (2016), a lubrificação não possui nenhum efeito sobre a rugosidade do material após sua trefilação, pois a qualidade superficial do arame é influenciada pelo acabamento superficial do núcleo da fieira. Além disso, apesar das forças de trefilação serem menores quando se têm boas condições de lubrificação, pelo fato de diminuir o atrito entre fieira e material, as tensões residuais superficiais do arame não são influenciadas por esse fator.

2.5 CÁLCULOS DE TREFILAÇÃO

Para ter uma adequada conformação é imprescindível utilizar os métodos condizentes ao processo proposto. Na trefilação isso não é diferente, pois a definição das variáveis que a influenciam é fundamental na sustentação de tal conformação. Para escolher os parâmetros desse processo, utilizam-se cálculos de dimensionamentos específicos para a obtenção da melhor trefilação possível.

Nesse sentido, a partir de 1915 as forças de trefilação passaram a ser estudadas. Sachs, em 1927, apresentou um modelo baseado na teoria elementar da plasticidade e Siebel apresentou um modelo desenvolvido a partir do trabalho de trefilação. Em 1940, Körber e Eichinger acrescentaram aos dois modelos mais um termo devido ao cisalhamento interno do material trefilado. A partir de então, outros autores, como Geleji e Avitzur, baseados nos modelos já existentes, formularam outras expressões para força de trefilação. (MENEZES, 2016).

De acordo com Schaeffer e Rocha (2007), tem-se a deformação relativa circunferencial, a deformação verdadeira em área e a deformação relativa em área que são aplicadas para qualquer tipo de conformação, expressas pelas Equações 5, 6 e 7, respectivamente. Vale destacar que r_0 é o raio inicial e r_1 é o raio final do material conformado em mm e que A_0 é área inicial e A_1 a área final do material conformado em mm².

$$\varepsilon_c = \frac{2\pi r_1 - 2\pi r_0}{2\pi r_0} \quad (5)$$

$$\varphi_A = \ln \frac{A_1}{A_0} \quad (6)$$

$$\varepsilon_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \quad (7)$$

Na sequência são apresentados os métodos teóricos de Sachs e Siebel, sendo que ambos estão descritos nos livros Schaeffer (1983) e Schaeffer e Rocha (2007), além do trabalho de Menezes (2016).

2.5.1 Modelo teórico de Sachs

Sachs desenvolveu seu modelo matemático a partir da teoria da plasticidade, no qual considera um elemento de certa espessura no interior da fieira fazendo o equilíbrio de forças no sentido axial e o critério de escoamento de Tresca, propondo a Equação 8.

$$F = A_1 \cdot \bar{\sigma}_e \cdot \left(1 + \frac{1}{\mu \cdot \cot \alpha}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^{\mu \cdot \cot \alpha}\right] \quad (8)$$

Onde $\bar{\sigma}_e$ é a tensão média de escoamento do material, μ é o coeficiente de atrito coulombiano e α é o ângulo da fieira.

Körber e Eichinger acrescentaram nessa fórmula o termo F_C , que considera o cisalhamento interno do material, dado pela Equação 9.

$$F_C = \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \bar{\sigma}_e \cdot \alpha \cdot A_1 \cong 0,77 \cdot \bar{\sigma}_e \cdot \alpha \cdot A_1 \quad (9)$$

Portanto, tem-se a fórmula de Sachs expressa pela Equação (10).

$$F = A_1 \cdot \bar{\sigma}_e \cdot \left\{ \left(1 + \frac{1}{\mu \cdot \cot \alpha}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0}\right)^{\mu \cdot \cot \alpha}\right] + 0,77 \cdot \alpha \right\} \quad (10)$$

2.5.2 Modelo teórico de Siebel

Siebel realizou seu modelo teórico através do cálculo do trabalho necessário de trefilação, expresso na Equação 11, onde T_U é o trabalho útil, T_A o trabalho do atrito e T_C o trabalho interno de cisalhamento conforme Körber e Eichinger.

$$T = T_U + T_A + T_C \quad (11)$$

A soma das três parcelas de trabalho resulta na Equação 12.

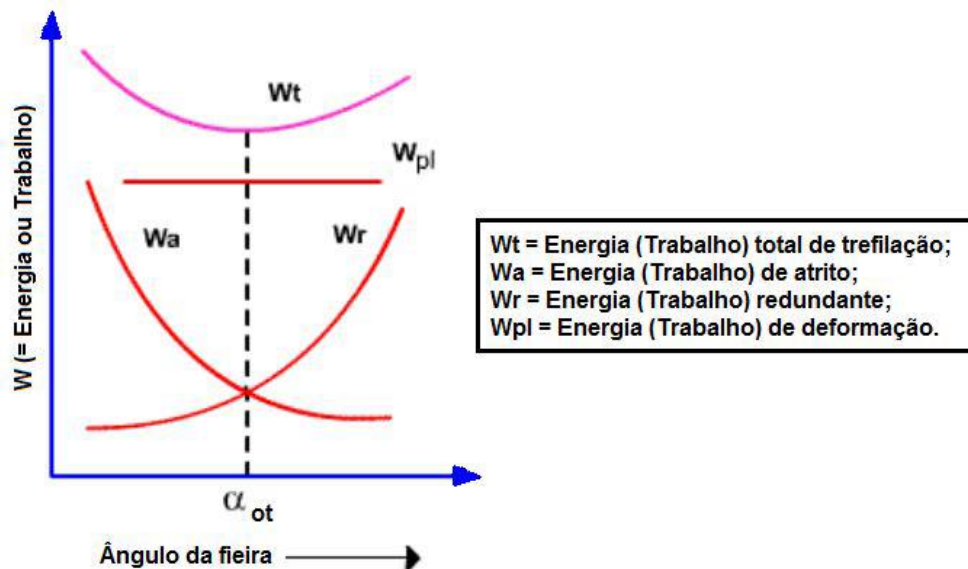
$$F = A_1 \cdot \varphi_A \cdot \bar{\sigma}_e \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A}\right) \quad (12)$$

Onde φ_A é a deformação verdadeira em área já demonstrada na equação 6.

2.5.3 Ângulo ótimo do cone de trabalho da fieira

De acordo com Pacheco (2007), a Figura 16 apresenta as parcelas que compõem a energia total de trefilação “ W_t ”. Essa composição é formada pelo “ W_a ” trabalho de atrito que diminui com o aumento do ângulo da matriz, “ W_r ” trabalho redundante que não é utilizado para redução de área e sim para a distorção secundária que aumenta com o ângulo da fieira e “ W_{pl} ” trabalho de deformação que é constante durante o processo.

Figura 16 – Trabalho conforme ângulo de trefilação



Fonte: Pacheco (2007, p. 47).

Conforme Altan, Oh, Gegel, (1999, p. 293), “o ângulo ótimo da ferramenta é frequentemente definido como o ângulo no qual se obtém a mínima tensão de trefilação”. De acordo com Pacheco (2007), tal variável é chamada de “ α_{ot} ” podendo ser encontrada pela Equação 13.

$$\alpha_{ot} = \sqrt{0,87 \cdot \mu \cdot \left(\frac{A_0 - A_1}{A_1} \right)} \quad (13)$$

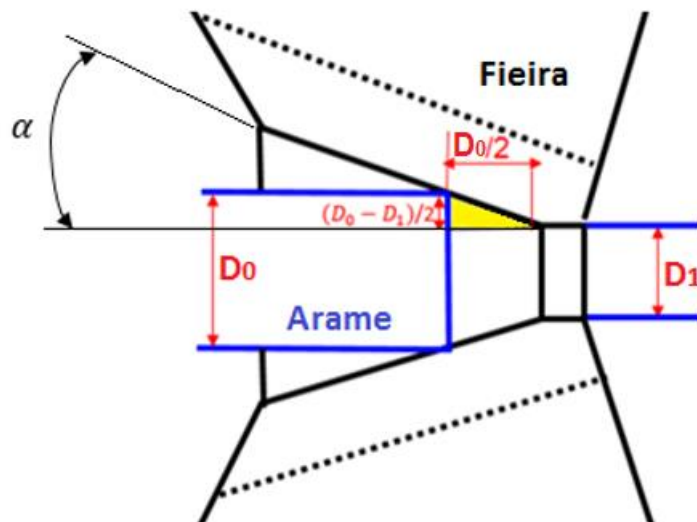
Entretanto, de acordo com The Wire Association International (1989), o ângulo ótimo de trefilação deve respeitar a geometria ideal da fieira descrita no item 2.2.4

desse trabalho, no qual o comprimento de contato entre fieira e material seja o diâmetro de entrada do arame dividido por dois. Para seguir essa definição, o ângulo ótimo é obtido pela Equação 14, no qual se baseia na trigonometria para definição do ângulo, como pode ser visualizado na Figura 17.

$$\alpha_{ot} = \tan^{-1} \left(1 - \frac{D_1}{D_0} \right) \quad (14)$$

Onde D_1 é o diâmetro de saída do arame na fieira e D_0 é o diâmetro do arame na entrada da matriz.

Figura 17 – Triângulo retângulo para definição de α otimizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora não se tenha um único ângulo ótimo para qualquer fieira, visto que dependerá da redução a ser feita e do coeficiente de atrito empregado no processo, o ângulo de $6 \pm 2^\circ$ é uma escolha bastante robusta. Tal parametrização é aceita, visto que esse ângulo é suficientemente grande para absorver as variações inevitáveis do atrito durante o processo. (BOBADILLA; FOURMENT; MASSÉ; MONTMITONNET, 2012). Isso pode explicar o motivo de muitas empresas, que fabricam suas fieiras de reposição, utilizarem esse ângulo para a fabricação de suas matrizes.

2.5.4 Redução máxima (grau de esforço)

As tensões de serviço são fatores fundamentais para o processo de trefilação, pois se forem maiores que a tensão média de escoamento do material, junto a zona de trabalho, poderá haver fraturas no arame trefilado. Para evitar defeitos nesse processo, deve-se considerar o grau de esforço do processo G_e menor ou igual a 0,75, no qual está demonstrado na Equação 15, onde σ_1 é a tensão na saída da fieira e $\bar{\sigma}_e$ é a tensão média de escoamento. (PACHECO, 2007).

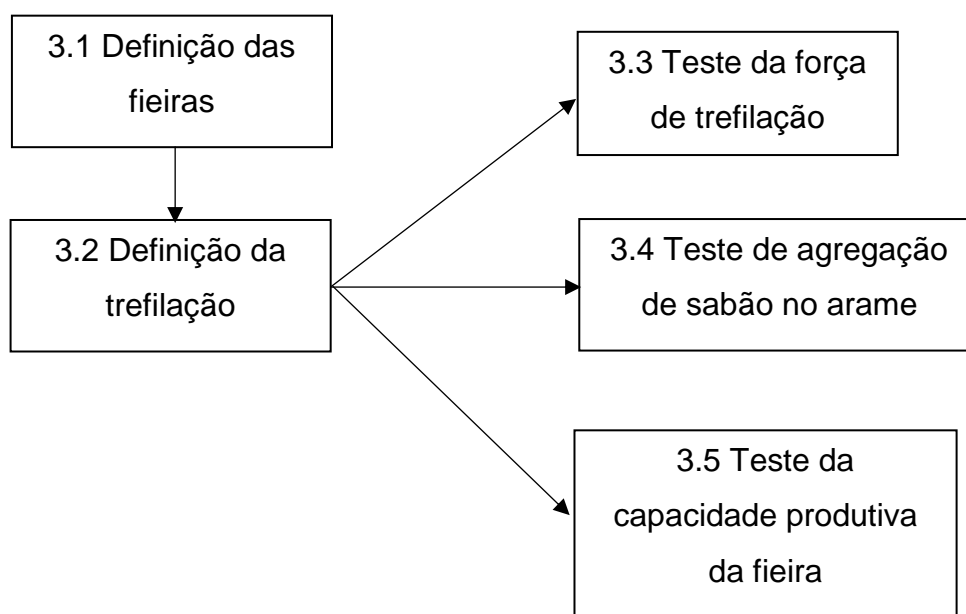
$$G_e = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_e} \quad (15)$$

Segundo Schaeffer (1983), as maiores reduções (deformações relativas em área) verificadas são da ordem de 45 a 50%. Caso ultrapasse esse valor, tem-se o risco de provocar microfissuras no interior do material, diminuindo a qualidade do mesmo.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho é apresentada no fluxograma disposto na Figura 18, sendo todas as etapas detalhadas na sequência.

Figura 18 – Fluxograma do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 DEFINIÇÃO DAS FIEIRAS

Para esse trabalho foi fundamental definir os materiais e a geometria das fieiras a serem utilizadas nos testes. Nesse sentido foram avaliados três modelos de fieiras, sendo que cada um possuía comprimento de paralelo diferente, enquanto que as demais variáveis permaneceram constantes. Vale ressaltar que essa matriz foi dimensionada para redução de um fio-máquina que possui diâmetro inicial D_0 de 5,50 mm para o diâmetro final D_1 de 4,60 mm em um único passe.

O ângulo α do cone de trabalho das fieiras foi calculado segundo a Equação 13, sendo que o coeficiente de atrito coulombiano considerado foi de 0,063, se constituindo na média entre os coeficientes divulgados por Gerbase (1976) e Helman; Cetlin (2010), mostrados no item 2.3 desse trabalho.

$$\alpha_{ot} = \sqrt{0,87 \cdot \mu \cdot \left(\frac{A_0 - A_1}{A_1}\right)} = \sqrt{0,87 \cdot 0,063 \cdot \left(\frac{23,76 \text{ mm}^2 - 16,62 \text{ mm}^2}{16,62 \text{ mm}^2}\right)} = 0,153 \text{ rad} = 8,77^\circ$$

Em contrapartida, na sequência está a mesma variável especificada pela Equação 14.

$$\alpha_{ot} = \tan^{-1}\left(1 - \frac{D_1}{D_0}\right) = \tan^{-1}\left(1 - \frac{4,60 \text{ mm}}{5,50 \text{ mm}}\right) = 9,29^\circ$$

Portanto, o ângulo ótimo do cone de trabalho nesse caso foi de aproximadamente 9°, sendo a média entre os valores 8,77° e 9,29°. E para tal dimensão foi adotado como tolerância de fabricação afastamentos superior e inferior de mais ou menos 0,25°, respectivamente.

O cone de entrada e o cone de saída das fieiras possuíam ângulo de 60° e a carcaça da fieira foi um perfil redondo de diâmetro 50 mm e comprimento de 38 mm, visto que o compartimento da caixa de fieira da máquina de trefilação comporta esse tamanho de matriz. Além disso, a carcaça foi fabricada em aço SAE 1045, cujas propriedades mecânicas encontram-se no Anexo A conforme Groehs (2014) e o núcleo em metal duro classe H6F, possuindo as características detalhadas no Anexo B conforme Sandvik (2002). Ambos os materiais são empregados para tais finalidades com frequência na indústria.




O comprimento de paralelo foi a única medida que variou entre as fieiras, justamente para avaliar sua influência na trefilação. Portanto foram utilizados os comprimentos de paralelo com 15%, 40% e 70% de D_1 , ou seja, 0,69 mm, 1,84 mm e 3,22 mm respectivamente, com afastamentos de mais ou menos 2,5% de D_1 , ou 0,115 mm em relação à tolerância. Esses parâmetros foram escolhidos visando obter resultados associados ao extremo inferior e superior dessa geometria, bem como o valor médio da recomendação descrita no item 2.2.4 desse trabalho.

Levando em consideração tais definições além das tolerâncias dimensionais, foi gerado desenho das fieiras através do software SolidWorks em conjunto com o fornecedor de matrizes, sendo disposto no Apêndice A. E, tal desenho foi utilizado para a fabricação dessas peças.

As matrizes produzidas foram confeccionadas e inspecionadas pelo setor de qualidade da empresa de feiras. Para a medição das medidas especificadas para cada modelo, o fornecedor utilizou um micrômetro Mitutoyo com capacidade de 0 a 25 mm e resolução de 0,001 mm, um micrômetro Mitutoyo com capacidade de 25 a 50 mm e resolução de 0,001 mm, um paquímetro Mitutoyo de capacidade de 0 a 150 mm e resolução de 0,01 mm e um projeto de perfil Easson modelo EV3020 com resolução de 0,001 mm e 0,01°.

As medidas especificadas e encontradas para cada modelo de feira estão apresentadas na Tabela 1, sendo que o certificado de qualidade da empresa que forneceu esse produto está no Anexo C.

Tabela 1 – Medidas das feiras

Modelo	Descrição	Especificação	Afastamentos	Valor encontrado
15% 	Ø Interno	4,600 mm	+ 0,01 mm 0,00 mm	4,600 mm
	Ø Externo	50,000 mm	± 0,1 mm	50,02 mm
	Altura	38,000 mm	± 0,1 mm	38,01 mm
	Paralelo (P%)	0,69 mm (15%)	± 0,115 mm (± 2,5%)	0,694 mm (+ 0,09%)
	Ângulo cone de trabalho (2α)	18°	±0,5°	18°
40% 	Ø Interno	4,600 mm	+ 0,01 mm 0,00 mm	4,600 mm
	Ø Externo	50,000 mm	± 0,1 mm	50,06 mm
	Altura	38,000 mm	± 0,1 mm	38,03 mm
	Paralelo (P%)	1,84 mm (40%)	± 0,115 mm (± 2,5%)	1,784 mm (- 1,23%)
	Ângulo cone de trabalho (2α)	18°	±0,5°	18°
70% 	Ø Interno	4,600 mm	+ 0,01 mm 0,00 mm	4,600 mm
	Ø Externo	50,000 mm	± 0,1 mm	50,07 mm
	Altura	38,000 mm	± 0,1 mm	38,05 mm
	Paralelo (P%)	3,22 mm (70%)	± 0,115 mm (± 2,5%)	3,195 mm (- 0,54%)
	Ângulo cone de trabalho (2α)	18°	±0,5°	18°

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 DEFINIÇÃO DA TREFILAÇÃO

As trefilações foram feitas em uma máquina de ensaio de tração e no primeiro passe de uma máquina de trefilação múltiplos passes. Para ambos os processos, foi utilizado fio-máquina de diâmetro de 5,50 mm do aço SAE 1045. Sabendo que o diâmetro de saída da fieira era de 4,60 mm, foi possível calcular a deformação relativa em área, a deformação verdadeira em área, a força de trefilação e o grau de esforço teórico para tal trefilação. A deformação relativa em área foi obtida utilizando a Equação 7 e a deformação verdadeira em área utilizando a Equação 6, conforme detalhado a seguir.

$$\varepsilon_A = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = \frac{\frac{\pi D_0^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4}}{\frac{\pi D_0^2}{4}} = \frac{\frac{\pi (5,50 \text{ mm})^2}{4} - \frac{\pi (4,60 \text{ mm})^2}{4}}{\frac{\pi 5,50^2}{4}} = \frac{23,76 \text{ mm}^2 - 16,62 \text{ mm}^2}{23,76 \text{ mm}^2} = 0,30$$

$$\varphi_A = \left| \ln \frac{A_1}{A_0} \right| = \left| \ln \frac{16,62 \text{ mm}^2}{23,76 \text{ mm}^2} \right| = |-0,35738| = 0,35738$$

De acordo com Norton (2013), a deformação verdadeira em área comercial do aço SAE 1045 laminado a quente é de 0,2%, sendo essa, portanto, a deformação verdadeira inicial em área. Além disso, segundo Schaeffer e Rocha (2007), para esse material a tensão de escoamento inicial é de 390 MPa e a tensão após a trefilação pode ser obtida pela Equação 16, onde $\varphi_{A \text{ total}}$ é a deformação verdadeira em área total dada pela soma da deformação verdadeira em área inicial $\varphi_{A \text{ inicial}}$ com a deformação verdadeira em área final $\varphi_{A \text{ final}}$, tendo assim o equacionamento abaixo.

$$\sigma_e^f = 1000 \cdot \varphi_{A \text{ total}}^{0,167} \quad (16)$$

$$\sigma_e^f = 1000 \cdot \varphi_{A \text{ total}}^{0,167} = 1000 \cdot (\varphi_{A \text{ inicial}} + \varphi_{A \text{ final}})^{0,167} = 1000 \cdot (0,002 + 0,35738)^{0,167}$$

$$\sigma_e^f = 1000 \cdot (0,35938)^{0,167} = 842,90 \text{ MPa}$$

Possuindo as tensões de escoamento inicial σ_e^i e final σ_e^f , foi possível calcular a tensão de escoamento média pela Equação 17.

$$\bar{\sigma}_e = \frac{\sigma_e^i + \sigma_e^f}{2} \quad (17)$$

$$\bar{\sigma}_e = \frac{\sigma_e^i + \sigma_e^f}{2} = \frac{390 + 842,90}{2} = 616,45 \text{ MPa}$$

Posteriormente, determinou-se a força de trefilação utilizando o método de Sachs pela Equação 10 e pelo método de Siebel pela Equação 12, sendo detalhado a seguir.

Pelo método de Sachs:

$$F = A_1 \cdot \bar{\sigma}_e \cdot \left\{ \left(1 + \frac{1}{\mu \cdot \cot \alpha} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right] + 0,77 \cdot \alpha \right\}$$

$$F = 16,62 \cdot 616,45 \cdot \left\{ \left(1 + \frac{1}{0,063 \cdot \cot(0,157 \text{ rad})} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{16,62}{23,76} \right)^{0,063 \cdot \cot(0,157 \text{ rad})} \right] + 0,77 \cdot 0,157 \text{ rad} \right\}$$

$$F = 6009,71 \text{ N} = 612,61 \text{ kgf}$$

Pelo método de Siebel:

$$F = A_1 \cdot \varphi_A \cdot \bar{\sigma}_e \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A} \right)$$

$$F = 16,62 \cdot 0,35938 \cdot 616,45 \cdot \left(1 + \frac{0,063}{0,157 \text{ rad}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{0,157 \text{ rad}}{0,35938} \right) = 6231,33 \text{ N} = 635,20 \text{ kgf}$$

Com os valores de força encontrados pode-se avaliar o grau de esforço, conforme Equação 15, sendo que o primeiro valor é referente a força encontrada pelo método de Sachs e o segundo pelo método de Siebel.

$$G_e = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_e} = \frac{6009,71/16,62}{616,45} = 0,587$$

$$G_e = \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}_e} = \frac{6231,33/16,62}{616,45} = 0,608$$

Portanto, foram determinados os valores teóricos que definem características importantes da conformação em questão, além de evidenciar que a trefilação não irá gerar defeitos, visto que o grau de esforço ficou com valores inferiores a 0,75, tanto para a força calculada por Sachs como por Siebel.

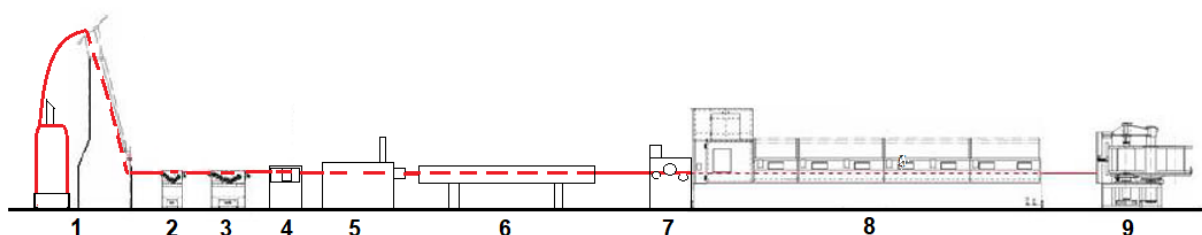
3.3 TESTE DA FORÇA DE TREFILAÇÃO

A força de trefilação, em geral, não é possível de se avaliar diretamente nas trefiladeiras, visto que as mesmas não possuem dispositivos que façam tal medição. Por esse motivo, essa variável foi analisada na máquina de ensaios de tração EMIC modelo DL 10000, conforme descrito a seguir.

3.3.1 Coleta das amostras

As amostras de fio-máquinas foram coletadas na máquina de trefilação de múltiplos passes (7 passes) do fabricante Mario Frigerio Group, visando utilizar o material como ele se encontra logo antes de ser trefilado na fieira. Para isso, o fio-máquina coletado passou por todos os processos do equipamento antecessores à primeira fieira, conforme ilustrado e indicado na Figura 19 e cuja sequência é detalhada a seguir.

Figura 19 – Desenho ilustrativo da máquina de trefilação múltiplos passes



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Desbobinamento vertical (1):** o rolo de fio-máquina, de aproximadamente 2.000 kg, foi acomodado em um estocador, sendo que o fio foi desbobinado de forma vertical, entrando para a máquina de trefilação. Tal estrutura possui aproximadamente 6 metros de altura, justamente para possuir uma distância maior entre o rolo de fio-máquina e o início do equipamento. Isso garante a redução de enleios, problema este

caracterizado pelas espiras do fio-máquina ficarem presas umas nas outras, levando a parar a máquina de trefilação;

- **Decapagem por dobramento (2)**: o material sofreu a decapagem por dobramento, passando por rolos que dobram o arame de modo que a carepa fosse retirada de sua superfície;

- **Decapagem por lixa (3)**: nessa etapa o fio-máquina entrou em um decapador que utiliza duas lixas cintas de grão 60, que por sua vez lixam toda a superfície do arame retirando a carepa residual que não foi eliminada pelo processo de decapagem por dobramento. Tal lixamento também proporciona uma rugosidade ideal no fio-máquina para posterior agregação de lubrificante. Para melhor controle desse processo, foram utilizadas duas lixas novas;

- **Limpeza (4)**: após decapagem foi utilizado um sistema de soprador de água e ar comprimido que direcionam os dois fluídos na superfície do arame, de modo a limpar o mesmo de eventuais óxidos arrastados pelo fio. A pressão do ar comprimido utilizada foi de 6 bar;

- **Agregação de sal carreador (5)**: o arame foi mergulhado em um tanque que possui uma mistura de água com sal carreador a uma temperatura de 75 °C a 85 °C com densidade controlada entre 1,08 g/mL a 1,10 g/mL. Esse sal carreador resulta em uma camada média depositada sobre o arame de 5,8 g/m² com rugosidade de 1,85 µm. Tal revestimento melhora a aderência do lubrificante seco a base de cálcio (sabão de trefila), possibilitando operar em velocidades maiores e com baixo consumo de fieira;

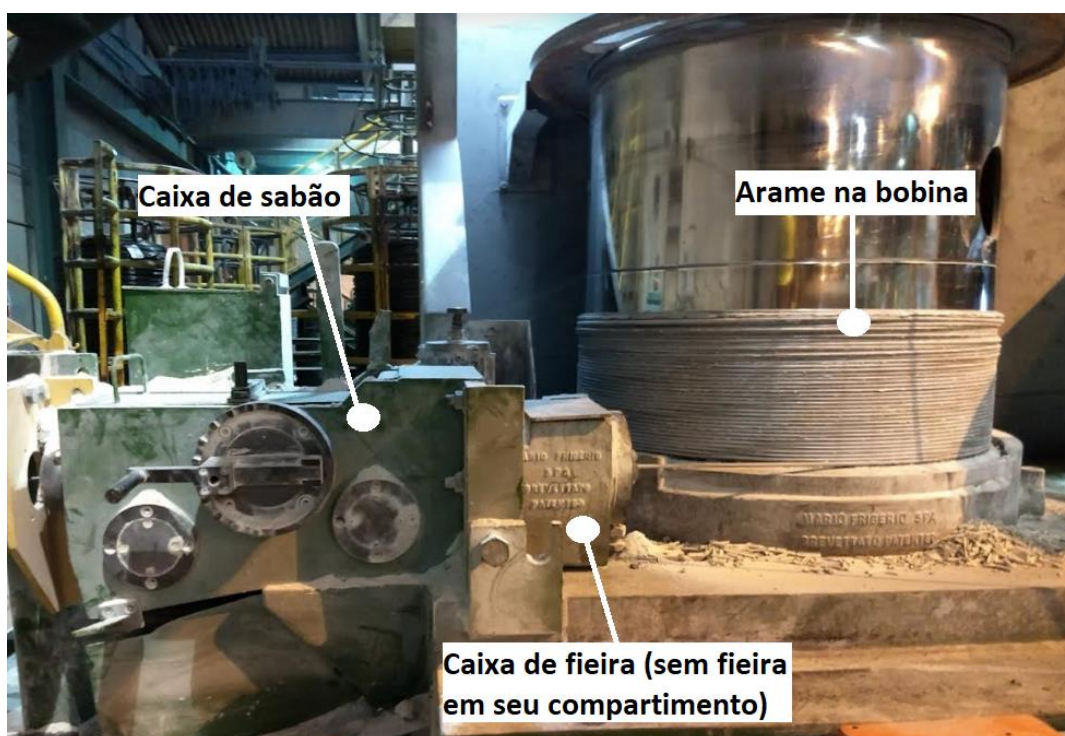
- **Secagem (6)**: nessa etapa o arame, com o sal carreador em sua superfície, foi seco através da utilização de sopradores de ar quente em uma estufa. Essa estufa possui um comprimento de aproximadamente 4 metros, para possibilitar a secagem completa do arame, sabendo que o mesmo pode estar a uma velocidade de até 3 m/s;

- **Agregação de sabão (7)**: para agregar sabão, foi utilizado uma caixa de sabão que contém três polias imersas em lubrificante à base de cálcio. Quando o arame entra nesse recipiente e passa pelas polias que dobram levemente o fio, as mesmas funcionam como agregadoras de sabão, proporcionando maior arraste de lubrificante. E embora uma das polias possuísse regulagem (podendo pressionar o arame), esta foi mantida com regulagem constante em todo o procedimento. As polias

além de garantirem uma boa lubrificação no material, impedem ou minimizam a formação de túnel, visto que as mesmas movimentam o sabão constantemente.

Após passar pela caixa de sabão, o arame entrou na caixa de fieira, porém essa não continha a matriz, justamente para poder ser coletado o fio-máquina na primeira bobina do equipamento na condição que ele é trefilado pela fieira. Dessa maneira, o fio-máquina não foi submetido aos processos 8 e 9 da Figura 19, sendo eles a trefilação com utilização de fieiras e o bobinamento em carretel, respectivamente. Com isso, estava disponível o material ideal para os testes, sendo que tal condição pode ser visualizada na Figura 20, na qual o fio-máquina está com lubrificante e isento de carepa na primeira bobina da máquina. A velocidade que o arame passou por esses processos foi de 0,8 m/s.

Figura 20 – Região onde foram retiradas as amostras na máquina de trefilação

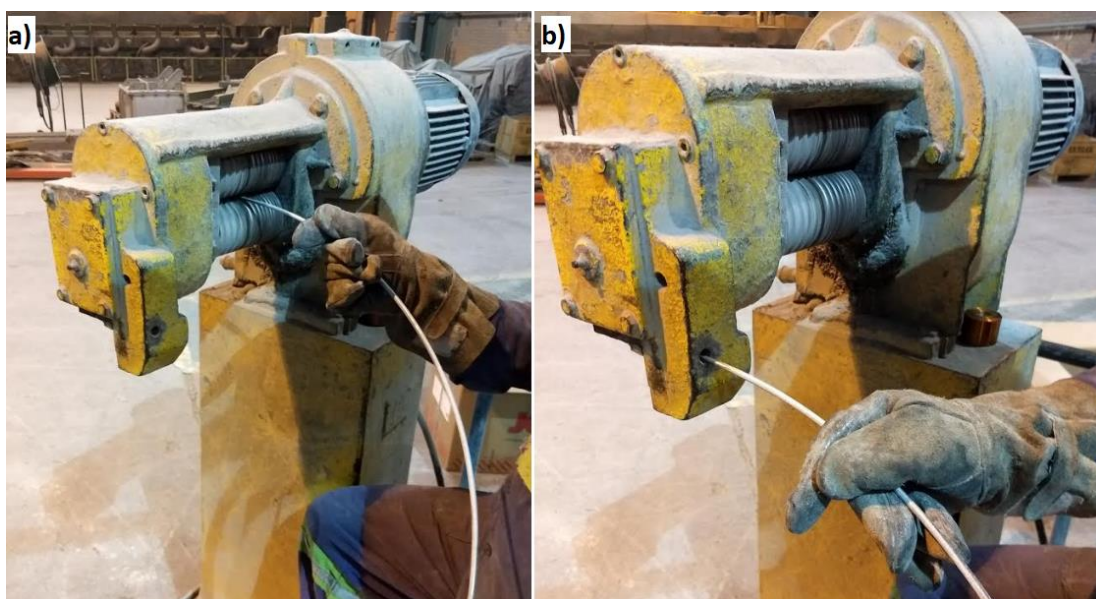


Fonte: Elaborado pelo autor.

Após esse procedimento, foram coletadas as amostras de fio-máquinas cortando o arame num tamanho aproximado de 600 mm através de um alicate. E, para ser possível inserir o fio-máquina na fieira posteriormente na máquina de tração, foi necessário apontar um dos lados do corpo de prova na máquina apontadora de arame.

Essa máquina faz o afilamento da ponta do fio-máquina pelo processo de laminação a frio, através de várias duplas de rolos laminadores, podendo afilar em vários tamanhos. Com isso, foram manuseados e apontados os corpos de prova na máquina em questão, até que o diâmetro do arame ficasse menor que 4,60 mm e com comprimento aproximado de 300 mm. Um ponto de atenção no momento do afilamento, foi de iniciar e terminar esse procedimento sempre no mesmo local da amostra. Isso garantiu que quando a fieira fosse trefilar o arame na máquina de tração, a mesma conformasse o material no diâmetro de entrada de 5,50 mm e não uma medida diferente causada pelo apontamento do arame. No final do afilamento foi feito o corte da ponta do fio na própria máquina em aproximadamente 10 mm, pois nessa região o diâmetro fica maior que 4,60 mm, visto que a mesma é difícil de apontar de forma uniforme. Tal procedimento pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – a) apontamento da amostra, b) corte da ponta do arame.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente as amostras foram inseridas manualmente num recipiente contendo sabão a base de cálcio, de maneira que fosse repostado o lubrificante que possivelmente foi retirado pelo manuseio das mesmas no processo de afilamento. Esse procedimento garantiu, em tese, que todas as amostras possuíssem a mesma quantidade de sabão em sua superfície. Após todos os arames foram acomodados numa caixa para serem transportados até a máquina de ensaio de tração.

3.3.2 Ensaio na máquina de tração

Com as amostras dentro do laboratório de ensaios de tração, as mesmas foram medidas e cortadas, de maneira que todas tivessem aproximadamente 378 mm de comprimento. Para garantir isso, foi inserido uma fieira de diâmetro 4,60 mm no arame até que a mesma não entrasse mais. Nesse ponto o arame foi marcado com uma caneta preta a 120 mm do final da fieira (para o lado apontado) e 220 mm do início da fieira (para o lado não apontado). Com as marcações feitas, foi retirado a fieira do arame e cortado o mesmo com o auxílio de um alicate nos pontos demarcados. Tal procedimento pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22 – a) marcação dos pontos a serem cortados, b) corte da amostra, c) ilustração de como foi alcançado o tamanho da amostra



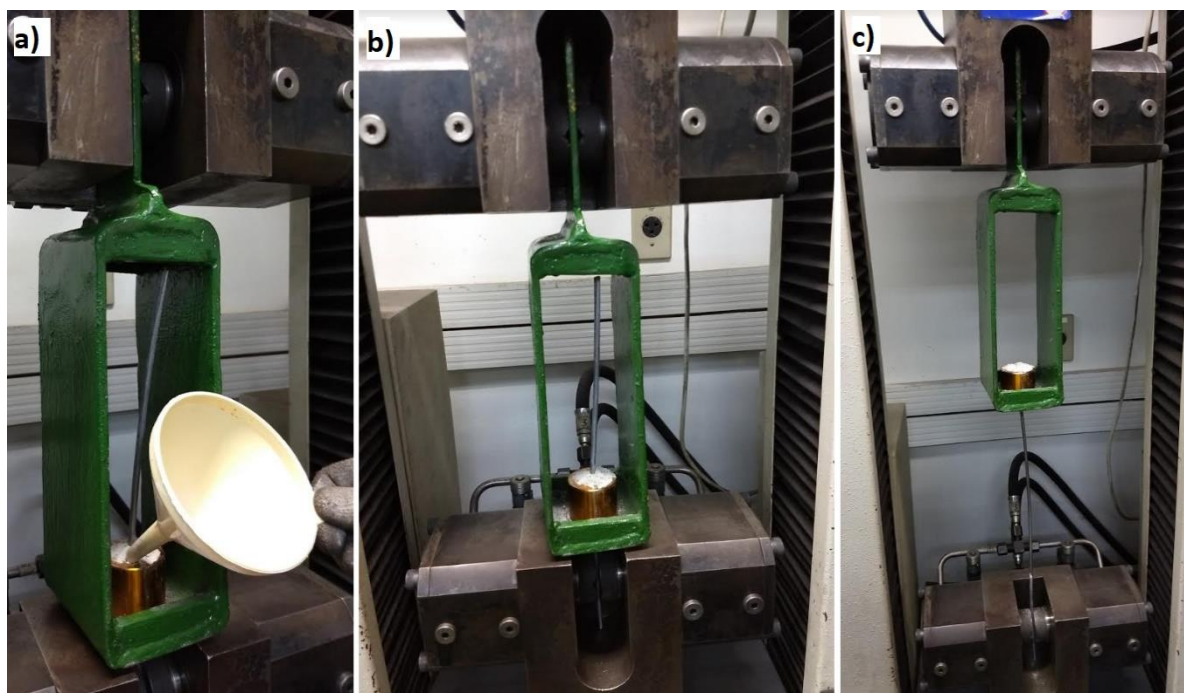
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para viabilizar os ensaios na máquina de tração, foi necessário desenvolver um dispositivo para trefilar o arame na mesma. Tal dispositivo possibilitou a conformação de um comprimento de arame de 220 mm mantendo a fieira paralela à base da máquina de tração, de modo que o fio passasse pelo centro da matriz distribuindo as tensões geradas em todo o núcleo de forma uniforme. O desenho técnico do dispositivo encontra-se no Apêndice B.

Para preparar a máquina de tração para o ensaio, primeiramente foi fixado pelas garras móveis da máquina de tração o dispositivo construído. Posteriormente

foi inserido a parte apontada da amostra de fio-máquina na fieira e esse conjunto posicionado no centro da base do dispositivo. Como a extremidade apontada do arame possuía um comprimento de 158 mm, o mesmo ultrapassava a fieira e o dispositivo, chegando até a base da máquina de tração, possibilitando que suas garras inferiores prendessem o arame. Dessa maneira, quando a máquina de tração foi acionada, o dispositivo movimentou a fieira, trefilando o arame, já que esse estava fixo. Tal procedimento possibilitou que o fio-máquina a ser trefilado ficasse mais vertical possível, garantindo o alinhamento da fieira com o material a ser trefilado. Isso evitou variações de forças que poderiam ser causadas para endireitar o arame para o núcleo da fieira no momento do ensaio. Além disso, para simular uma condição mais próxima do real, foi colocado sabão sobre a fieira antes de iniciar cada ensaio na máquina de tração, até que a mesma fosse coberta de lubrificante, de modo a simular a caixa de sabão na máquina de trefilação. O sabão foi colocado sobre a matriz com auxílio de um funil, numa quantidade aproximada de 56 gramas. Na Figura 23 pode ser visualizado o procedimento.

Figura 23 – a) adição de sabão, b) início do ensaio de tração, c) final do ensaio de tração



Fonte: Elaborado pelo autor.

A quantidade de arame a ser trefilada foi limitada em 220 mm, pois foi o comprimento de arame que o dispositivo confeccionado permitiu posicioná-lo no seu centro. Esse espaço, por sua vez, foi dimensionado observando o curso da máquina de tração, que garante a trefilação de um tamanho adequado para a análise. Salienta-se ainda que foi medida a deflexão do dispositivo durante o ensaio através de um relógio comparador Mitutoyo com resolução de 0,01 mm e com um suporte magnético articulado também Mitutoyo, não sendo constatada qualquer deflexão. O que garante a ausência deste tipo de interferência nos testes.

Na Tabela 2 estão descritos os parâmetros utilizados nos ensaios, lembrando que o único fator que se alterou foi o comprimento de paralelo da fieira, sendo a variável que se deseja avaliar a influência nesse procedimento. O sequenciamento de testes adotados foi de 10 ensaios de tração utilizando um modelo de fieira para depois iniciar com outro modelo de matriz, justamente para poder avaliar possíveis variações de forças na medida que a fieira fosse utilizada.

Tabela 2 – Parâmetros para o ensaio de força de trefilação

Parâmetro	Definição
Fio-máquina	Aço SAE 1045 de diâmetro 5,50 mm
Fieira	Conforme Apêndice A
Lubrificante	Sabão sólido à base de cálcio
Máquina de tração	Máquina EMIC, modelo DL 10000
Capacidade da máquina de tração	98.100 N
Software para ensaio de tração	Software Tesc 3.1
Velocidade do ensaio	120 mm/min (0,002 m/s)
Comprimento de arame a ser conformado	220 mm
Comprimento de arame já apontado	158 mm
Comprimento total do arame	378 mm
Deformação relativa em área	30%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esse procedimento foi avaliado de forma complementar o diâmetro do fio-máquina antes do ensaio e o diâmetro do arame após trefilação para cada modelo de fieira, de modo a avaliar possíveis variações nas dimensões nominais. Para tal

processo, foram utilizados um micrômetro externo digital Mitutoyo com resolução de 0,001 mm e um suporte para micrômetro externo. Foram realizadas no mesmo ponto do material três medições, com o objetivo de encontrar possíveis ovalizações na seção transversal. Tal procedimento pode ser visualizado na Figura 24.

Figura 24 – Medição do dimensional das amostras



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 TESTE DE AGREGAÇÃO DE SABÃO NO ARAME

3.4.1 Coleta das amostras

O teste de agregação de sabão no arame foi realizado na máquina de trefilação de múltiplos passes (7 passes) do fabricante Mario Frigerio Group, visto que essa variável é importante ser avaliada quando se conforma o fio em velocidades reais de operação, já que o lubrificante se comporta de forma ideal. Essa máquina de trefilação é a mesma explicada no item 3.3.1 desse trabalho, além de que o arame passou pelos mesmos processos já descritos em tal capítulo, sendo: desbobinamento vertical, decapagem por dobramento, decapagem por lixa, limpeza, agregação de sal carreador, secagem e agregação de sabão. Na caixa de fieira, entretanto, foi inserida a matriz para conformar o fio-máquina e possibilitar a análise da camada de sabão residual sobre o arame após a conformação.

Para realizar tal teste, foi colocado sabão a base de cálcio na caixa de sabão e ajustado o aperto da polia que funciona como aplicadora de lubrificante, além de ter sido inserido a matriz a ser testada na caixa de fieira. Essa caixa de fieira permite a refrigeração da matriz através de água, que fica circulando pelo compartimento a uma temperatura aproximada de 25 °C. Além disso, tal caixa de fieira é rotativa, ou seja, a matriz fica girando, garantindo um desgaste uniforme em todo o núcleo da fieira, evitando uma possível ovalização. Realizado tais atividades, foi apontado o fio-máquina na máquina apontadora de arame, até que seu diâmetro fosse menor que 4,60 mm num comprimento de 300 mm, para possibilitar a inserção do mesmo dentro da matriz. Com o afilamento concluído, foi inserido o fio-máquina dentro da fieira manualmente e com o auxílio de um puxador de arame, foi fixada a extremidade do arame apontada nessa ferramenta, que por sua vez foi presa à primeira bobina da máquina de trefilação, possibilitando a conformação. Na Figura 25 é possível visualizar como foi realizado a primeira trefilação com a matriz de teste.

Figura 25 – Início da trefilação com a fieira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Concluídos tais processos, foi retirado o puxador e soldado a extremidade do arame que ficou na primeira bobina da máquina no arame que estava entrando na segunda caixa de sabão. Isso permitiu que o material fosse trefilado no restante do

equipamento para o dimensional desejado no produto. Vale lembrar que a densidade do banho de sal carreador para todos os testes das fieiras foi ajustada para 1,10 g/mL, além de que foram colocadas duas lixas novas de grão 60 no decapador de lixas e o ajuste da polia agregadora de sabão na caixa de sabão foi mantida igual durante a operação, de modo a não ter variações entre os testes.

Para permitir que a fieira estivesse totalmente lubrificada e trefilando na velocidade normal de operação, as amostras foram coletadas após a matriz ter trefilado aproximadamente 1600 kg. A velocidade que o arame foi conformado ao longo desses 1600 kg foi sendo aumentada gradativamente, iniciando em 1,1 m/s até 2,1 m/s. Isso foi necessário, pois inicialmente a fieira estava sem lubrificante, necessitando trefilar em velocidades inferiores até receber a lubrificação. Após essa massa ter sido conformada, foi possível retirar as amostras da máquina de trefilação. Foram coletadas três espiras de arame no tamanho aproximado de 1500 mm cada uma. Vale destacar que essa coleta exigiu muito cuidado no manuseio, visto que a manipulação do arame pode retirar o sabão sobre a superfície do fio. Devido a isso, as três amostras foram manuseadas somente em suas extremidades, sendo que nessa região foi colocado um adesivo para identificação do local onde não poderia ser considerado nas análises. Na Figura 26 pode ser visualizada as amostras.

Figura 26 – Amostras coletadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.2 Medição da camada residual de sabão

Com as amostras coletadas, as mesmas foram levadas imediatamente ao laboratório da Gerdau Riograndense para serem realizados os ensaios, sendo baseados nos procedimentos padronizados conforme Gerdau (2011). Tais ensaios visam obter a camada de sabão em g/m^2 através da pesagem do arame com o sabão em sua superfície e a pesagem do mesmo sem o lubrificante. Para se obter isso, primeiramente foram cortados na região central de cada uma das três espiras, local onde não houve manuseio para a coleta na máquina de trefilação, oito corpos de prova de 50 mm de comprimento com auxílio de um alicate. Tal procedimento gerou para cada espira coletada na máquina de trefilação, uma amostra contendo oito corpos de prova. Essas amostras foram pesadas numa balança analítica Sartorius Research, de resolução de 0,0001 gramas, obtendo a massa das amostras com o sabão residual. Na Figura 27 pode ser visualizada a pesagem de uma amostra.

Figura 27 – Pesagem da amostra com sabão residual



Fonte: Elaborado pelo autor.

Possuindo a massa dos arames com o sabão residual em sua superfície, foi necessário descobrir a massa dos mesmos sem o lubrificante. Para isso cada amostra foi colocada em um recipiente de vidro, que foi adicionado clorofórmio até que a

solução cobrisse todos os corpos de prova. Tal composto é utilizado como solvente para ajudar na retirada do sabão na superfície dos materiais. Feito isso, foi transferido o recipiente até a lavadora ultrassônica Ultra Cleaner 1400 Unique, permanecendo por uma hora no processo de limpeza. Tal equipamento potencializa limpezas de peças, retirando quase que a totalidade da sujeira e impurezas presentes na superfície por meio do processo de cavitação ultrassônica. Após esse tempo, os corpos de prova foram retirados do recipiente de vidro que continha clorofórmio e colocados em outro seco, e assim possibilitou a passagem de algodão umedecido com álcool e algodão não umedecido em toda a superfície dos mesmos. Concluída essas etapas, as três amostras limpas e secas foram pesadas novamente na balança analítica Sartorius Research, de resolução de 0,0001 gramas, obtendo a massa do arame sem o lubrificante em sua superfície. Vale destacar que tais procedimentos não garantem a retirada total de sabão na superfície dos arames, resultando num valor aproximado. Os procedimentos de limpeza adotados podem ser visualizados na Figura 28.

Figura 28 – a) amostras com clorofórmio, b) amostras dentro da lavadora ultrassônica, c) algodão e álcool utilizados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Realizadas todas essas etapas, foi possível calcular a camada residual de sabão conforme Equação 18, onde M_i é a massa inicial em gramas da amostra, M_f é a massa final em gramas da amostra, D é o diâmetro do arame em milímetros e C é a camada residual de sabão dada em g/m^2 . Vale lembrar que foi medido três vezes na seção transversal do arame o diâmetro dos corpos de prova antes e depois dos procedimentos de limpeza, com o auxílio de um micrômetro Mitutoyo de resolução de 0,01 mm.

$$C = \frac{(M_i - M_f) \cdot D \cdot 10^3}{0,51 \cdot M_f} \quad (18)$$

3.5 TESTE DA CAPACIDADE PRODUTIVA DA FIEIRA

A realização do teste da capacidade produtiva de cada modelo de fieira foi feito juntamente com a avaliação da camada residual de sabão, visto que a fieira entrou em operação naquele momento. Logo, a máquina de trefilação utilizada foi a de múltiplos passes (7 passes) do fabricante Mario Frigerio Group e os processos que o arame foi submetido já foram descritos na metodologia. Para deixar o teste confiável, foi mantida durante todo o tempo a mesma regulagem da polia da caixa de sabão, além de ter sido trocado o lubrificante a base de cálcio a cada 4800 kg de material conformado. Além disso, a cada 1600 kg de arame trefilado foram feitas as substituições das lixas de grão 60 do decapador, de modo que a decapagem mecânica permanecesse igual ao longo dos testes para os três modelos de fieiras. Foi controlado também o banho de sal carreador, de maneira que no início da trefilação a densidade do banho fosse de 1,10 g/mL. A velocidade de trefilação, por sua vez, permaneceu constante em 2,1 m/s, depois da fieira ter trefilado aproximadamente 1600 kg, visto que antes a velocidade foi aumentada aos poucos para a matriz ficar lubrificada.

A determinação da capacidade produtiva da fieira se deu por avaliação da deformação da matriz com a capacidade de produção da mesma, sendo que a medição da deformação foi realizada de forma indireta, ou seja, foi medido o diâmetro do arame no início e no final do teste com o auxílio de um micrômetro Mitutoyo com resolução de 0,01 mm. O critério adotado para capacidade produtiva da matriz foi quando o arame ficou com o diâmetro de 4,71 mm, ou seja, em conformidade à especificação do dimensional desse arame, que nesse processo era de 4,59 mm até 4,71 mm. Vale destacar que a medição do arame foi realizada na própria máquina de trefilação, mensurando três regiões na mesma seção transversal do fio, para verificar uma possível ovalização. Tal procedimento pode ser observado na Figura 29.

Figura 29 – Medição da deformação indireta da fieira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em paralelo a verificação da deformação da fieira de forma indireta, foram controlados quantos quilos de material a mesma conformou nesse período. Para isso, foi registrado a data e a hora que cada fieira iniciou e terminou a operação, sendo verificado a quantidade de material que a máquina trefilou nesse intervalo de tempo. A quantidade de material trefilado foi contabilizada pesando as peças produzidas com a balança de piso da marca Alfa Instrumentos, que utiliza quatro células de carga modelo I e um indicador modelo 3104B, apresentando uma capacidade de 4000 kg e resolução de 1 kg. Tal procedimento de pesagem pode ser visualizado na Figura 30.

Figura 30 – Pesagem do material produzido pela fieira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os resultados coletados, foi possível obter o valor de quantos quilos a fiação foi capaz de produzir por um centésimo de milímetro de desgaste, resultando na capacidade produtiva de cada modelo de matriz. Para conseguir esse valor foi utilizado a Equação 19.

$$Cap\ Prod = \frac{Produção\ (kg)}{Desgaste\ (mm) \cdot 100} \left[\frac{kg}{centésimo\ de\ mm} \right] \quad (19)$$

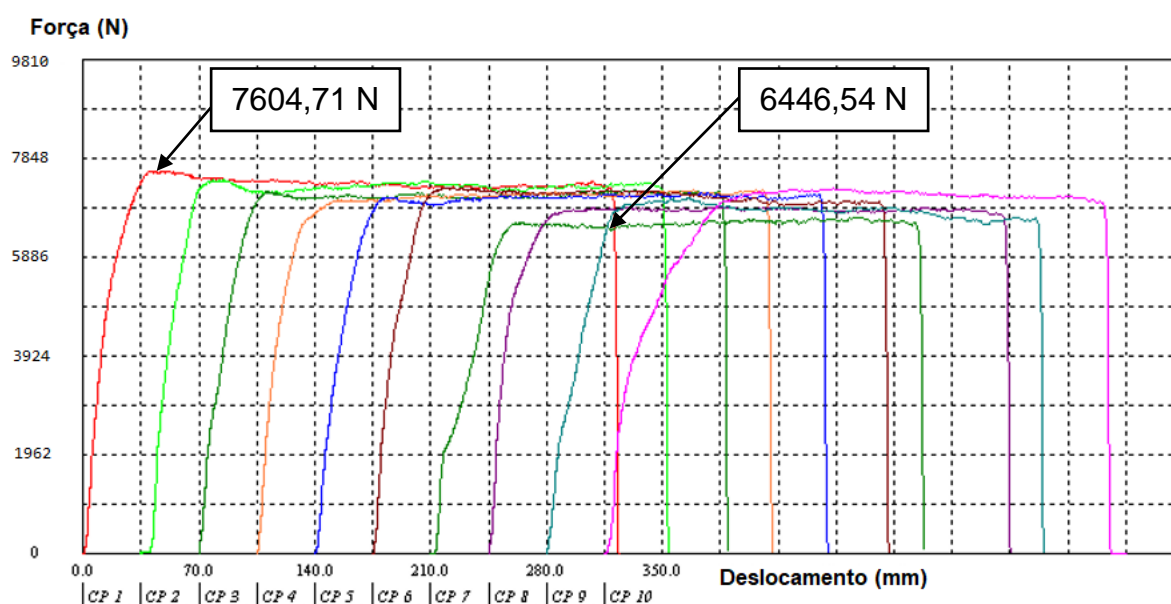
A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta neste trabalho.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 FORÇA DE TREFILAÇÃO

Conforme já descrito na metodologia, e com o objetivo de mensurar a força de trefilação, foram utilizados 10 corpos de prova para cada modelo de fieira no ensaio na máquina de tração EMIC. O Gráfico 1 apresenta os valores encontrados para a fieira de comprimento de paralelo de 0,684 mm (15%).

Gráfico 1 – Força associada ao deslocamento do arame para fieira com comprimento de paralelo de 0,684 mm (15%)



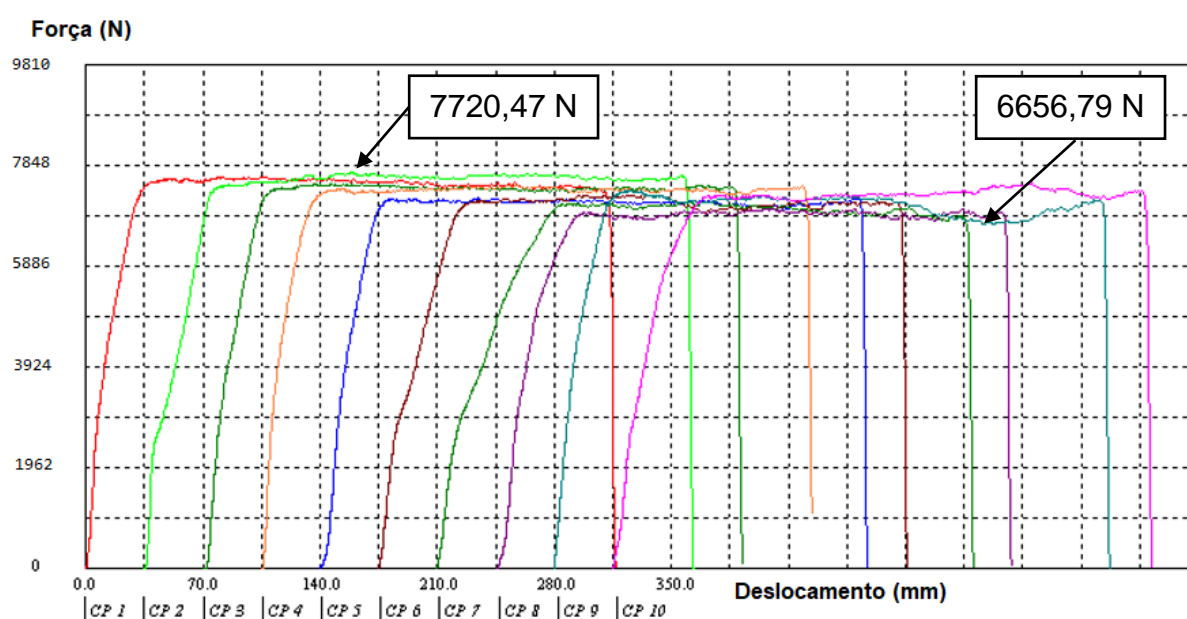
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse gráfico é possível analisar que a força associada ao deslocamento do arame se comportou muito parecida para os dez ensaios, sendo que CP no gráfico significa corpo de prova. Isso sugere que todos os procedimentos adotados para garantir a homogeneidade entre as amostras foram consistentes. Vale destacar que para uma melhor visualização do comportamento dos corpos de prova no gráfico, cada CP iniciou numa defasagem entre eles de 35 mm na escala do eixo da abscissa, apesar de que todos começaram o ensaio com deslocamento de 0,0 mm. Com relação aos valores obtidos, foi possível identificar que a força máxima foi de 7604,71 N, local onde estava o maior valor no gráfico. A força mínima foi de 6446,54 N, ponto no qual

foi encontrado a menor força entre os dez corpos de prova. Além disso, a força média foi de 7077,23 N, sendo obtida na região de maior concentração de linhas no gráfico, local onde a força apresentou valores muito próximos ao longo de todos os ensaios realizados.

No Gráfico 2 é possível avaliar a força com relação ao deslocamento para a feira de comprimento de paralelo de 1,784 mm (40%).

Gráfico 2 – Força associada ao deslocamento do arame para feira com comprimento de paralelo de 1,784 mm (40%)

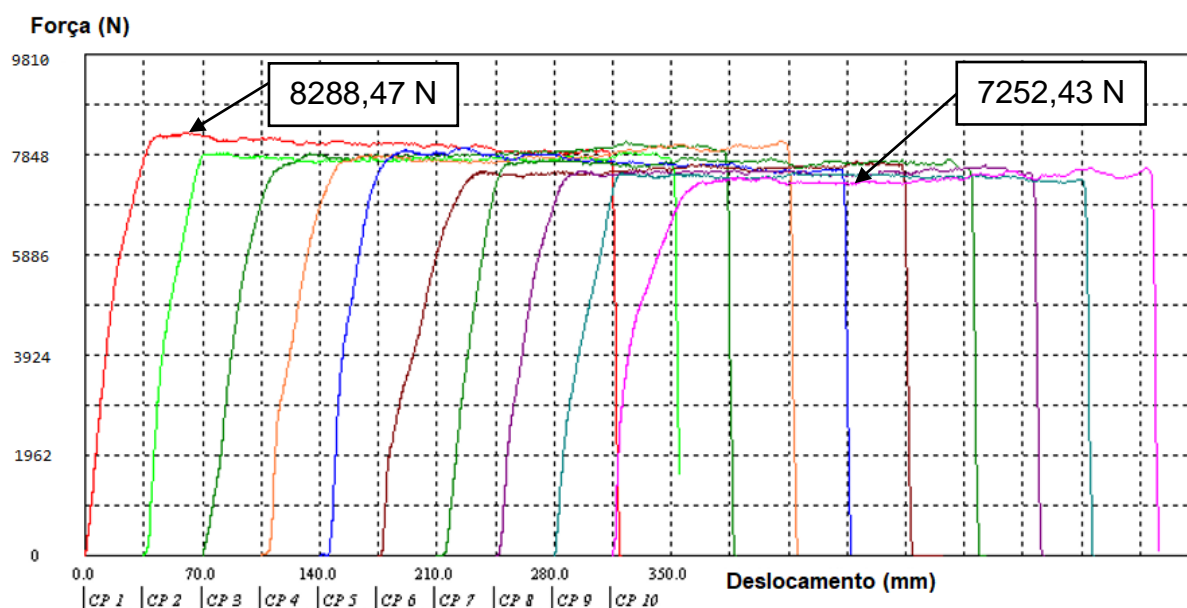


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse gráfico também é possível analisar que a força associada ao deslocamento do arame se comportou de forma similar entre os ensaios. Com relação aos resultados obtidos, foi possível identificar que a força máxima encontrada foi de 7720,47 N e a mínima de 6656,79 N. Além disso, a força média foi de 7217,32 N, sendo obtida na região de maior concentração de linhas no gráfico.

No Gráfico 3 é possível avaliar a força relacionada ao deslocamento para a feira de comprimento de paralelo de 3,195 mm (70%).

Gráfico 3 – Força associada ao deslocamento do arame para fieira com comprimento de paralelo de 3,195 mm (70%)



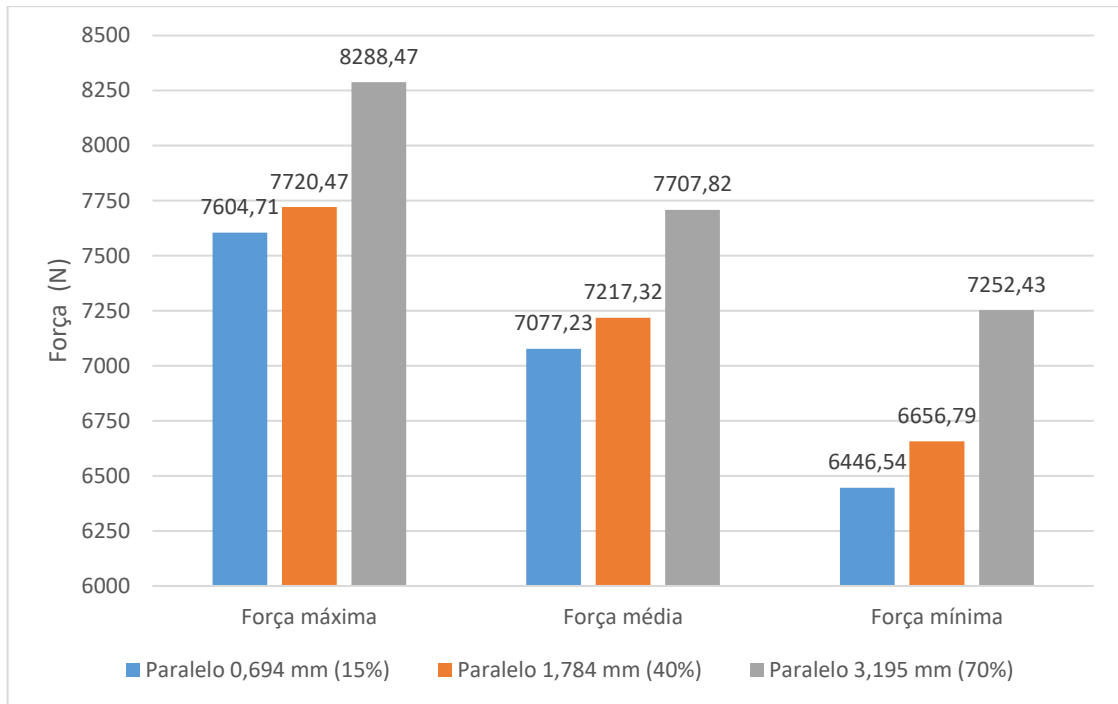
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesses resultados observou-se que a força associada ao deslocamento do arame se comportou de forma similar para todos os corpos de prova. Com relação aos valores encontrados, foi possível identificar que a força máxima foi de 8288,47 N e a mínima de 7252,43 N. Além disso, a força média foi de 7707,82 N, sendo obtida na região onde foi observado a maior densidade de linhas no gráfico.

No Gráfico 4 é mostrado o comparativo dos resultados (força máxima, força média e força mínima) encontrados para os três modelos de fieiras. É possível observar que a fieira de comprimento de paralelo de 0,694 mm (15%) é a que apresentou as menores forças para trefilar o fio-máquina, sendo seguida pela fieira de 1,784 mm (40%) e de 3,195 (70%). Considerando a força média para trefilação dos corpos de prova, a fieira de comprimento de paralelo de 0,694 mm (15%) é 8,18% menor que a da fieira de 3,195 mm (70%), já a fieira com 1,784 mm (40%) é 6,36% menor que a da fieira de maior comprimento de paralelo. Portanto, quanto menor o comprimento de paralelo, menor será a força necessária para trefilar o fio-máquina, sendo válida tanto para a força máxima apresentada na conformação, quanto para a média e a mínima apresentadas nos ensaios na máquina de tração. Tal verificação está de acordo com a fundamentação teórica da página 28 desse trabalho, pois segundo The Wire Association International (1989), se o comprimento de paralelo for

muito grande, a força necessária para a trefilação aumentará. Isso é explicado pelo fato do arame atritar com a fieira por mais tempo, visto que o comprimento de paralelo está em contato com o fio, restringindo-o para permanecer na geometria da matriz, e assim garantir o dimensional esperado.

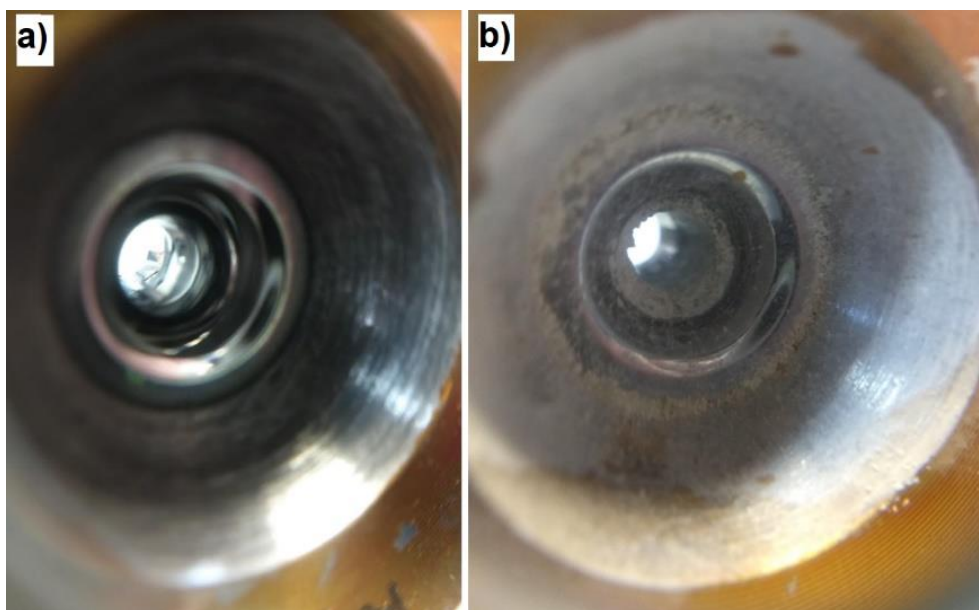
Gráfico 4 – Comparação das forças entre os modelos de fieiras



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar também que o comportamento dos Gráficos 1, 2 e 3 são semelhantes, nos quais a força de trefilação tem a tendência de diminuir na medida que vai sendo feito mais ensaios. Os primeiros corpos de prova exigiram uma força maior para serem trefilados se comparados com os últimos. Isso pode ser atribuído ao fato da fieira estar sem lubrificante no início do ensaio, tendo maior atrito entre a matriz e o arame. Com a trefilação, os poros da fieira começaram a reter o lubrificante, ajudando na redução do atrito e por consequência na redução da força. Na Figura 31 é possível visualizar o núcleo da fieira antes de iniciar os testes, sendo que nesta o núcleo da fieira está polido, e depois que os ensaios terminaram, apresentando um núcleo com sabão incrustado. Vale ressaltar que a foto está aumentada em dez vezes para uma melhor análise visual.

Figura 31 – a) núcleo da fieira antes dos ensaios, b) núcleo da fieira depois dos ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, o calor gerado na conformação também pode ter influenciado nos resultados obtidos. No início dos ensaios a temperatura da fieira estava em temperatura ambiente, sendo que na medida que eram conformados os arames a temperatura da fieira aumentava, ajudando a deixar o sabão do estado sólido para o estado pastoso no núcleo da fieira, melhorando assim a lubrificação e reduzindo a força para conformar o material pela redução do atrito. Tal constatação está de acordo com a fundamentação teórica da página 31 desse trabalho, pois segundo Cetlin (1982), o aquecimento gerado no processo transforma o sabão sólido para um estado pastoso, garantindo melhor lubrificação.

A força real média entre os três comprimentos de paralelo resultante dos ensaios para a trefilação em questão, 7334,12 N, foi maior em 18,06% que a força calculada pelo método de Sachs e em 15,04% maior que a força calculada pelo método de Siebel. Essa diferença é explicada, além das afirmações acima, pois nas condições reais dessa trefilação, a velocidade do fio é de 0,7 m/s até 3 m/s, sendo que a utilizada no ensaio na máquina de tração foi de 0,002 m/s, que é 0,11% da velocidade média de trefilação. Essa diferença faz com que no ensaio de laboratório o sabão não fique totalmente no estado pastoso dentro da matriz, visto que o aquecimento gerado nos testes (embora não medido) é menor que nas condições

reais (junto à indústria), prejudicando a lubrificação da fieira e por consequência aumentando o atrito e a força para conformar o arame. Tal constatação está de acordo com a fundamentação teórica da página 31 desse trabalho, pois segundo Avitzur e Talbert (1996), o sabão deve penetrar entre o material e a fieira, formando uma camada de sabão no estado pastoso, resultando em uma lubrificação hidrodinâmica, que por consequência reduz a força de trefilação. Outro fator é que quanto mais rápido o arame entrar na fieira, mais sabão o mesmo levará consigo. Com isso, a quantidade de sabão carregada junto ao arame na máquina de tração foi menor que nas condições reais na máquina de trefilação. Além disso, no início de qualquer trefilação a fieira estará sem lubrificante, sendo que passará a ter na medida que estiver conformando o material.

Nos ensaios realizados na máquina de tração, foram trefilados no total 2200 mm de arame para cada modelo de matriz, uma quantidade pequena, visto que em condições normais de operação numa máquina de trefilação típica isso é conformado em apenas 1,19 segundos. Portanto, para essa quantidade de material conformada pela matriz, a mesma ainda não estava completamente lubrificada, apresentando uma força maior para a conformação.

De forma complementar, foram realizadas medições dimensionais no fio-máquina antes dos ensaios e no arame após a conformação para cada modelo de fieira. Os resultados de tais verificações estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise dimensional das amostras

Material	Diâmetro nominal (mm)	Diâmetro maior medido (mm)	Diâmetro menor medido (mm)
Fio-máquina	5,50	5,45	5,24
Arame fieira 0,694 mm (15%)	4,60	4,64	4,64
Arame fieira 1,784 mm (40%)	4,60	4,62	4,61
Arame fieira 3,195 mm (70%)	4,60	4,62	4,61

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode ser observado na Tabela 3 que existem variações nas medidas com relação ao valor nominal, tanto para o fio-máquina, como para o arame trefilado. O fio-máquina pode ter essa variação, inclusive a ovalização apresentada, devido ao

processo de laminação. Com relação aos arames após a trefilação, é possível afirmar que a fieira de menor comprimento de paralelo gerou o arame conformado com maior diferença no dimensional se comparado com a medida nominal, enquanto que os comprimentos de paralelo acima de 1,784 mm (40%) apresentaram valores mais próximos do desejado, apesar de esses estarem com ovalização de 0,01 mm considerando a diferença entre os diâmetros maior e menor. Tal variação foi gerada apenas pela diferença do comprimento de paralelo, visto que as demais variáveis estavam iguais nos ensaios. Portanto, quanto menor for o comprimento de paralelo, maior a probabilidade que o diâmetro do material conformado fique acima do especificado. Tal verificação está de acordo com a fundamentação teórica da página 28, pois de acordo com The Wire Association International (1989), se o comprimento de paralelo for pequeno, o desgaste é rápido e o material sai com bitola acima do aceitável. Isso pode ser explicado, pelo fato do arame permanecer menos tempo no cilindro de calibração, onde garantirá o dimensional desejado para o arame, favorecendo o retorno elástico.

Vale destacar que os dez corpos de prova apresentaram as mesmas dimensões da seção transversal após a conformação por seu respectivo modelo de fieira. Isso mostra que nenhuma das matrizes apresentaram desgastes a ponto de alterar o dimensional do arame produzido, sendo algo esperado, já que foi trefilado apenas 2200 mm de fio-máquina em cada fieira, um valor pequeno comparado com a capacidade de trefilação dessa ferramenta. Além disso, todas as amostras de fio-máquina apresentaram as mesmas dimensões na seção transversal, não interferindo nos testes realizados.

4.2 AGREGAÇÃO DE SABÃO NO ARAME

Com os procedimentos adotados para a verificação da camada residual de sabão descritos no item 3.4 desse trabalho, foi possível obter os resultados da Tabela 4. Vale lembrar que para cada modelo de fieira, foram feitas três amostras, sendo nomeadas como “a”, “b” e “c”, e contendo oito corpos de prova cada.

Tabela 4 – Resultado da camada residual de sabão para os modelos de fieiras

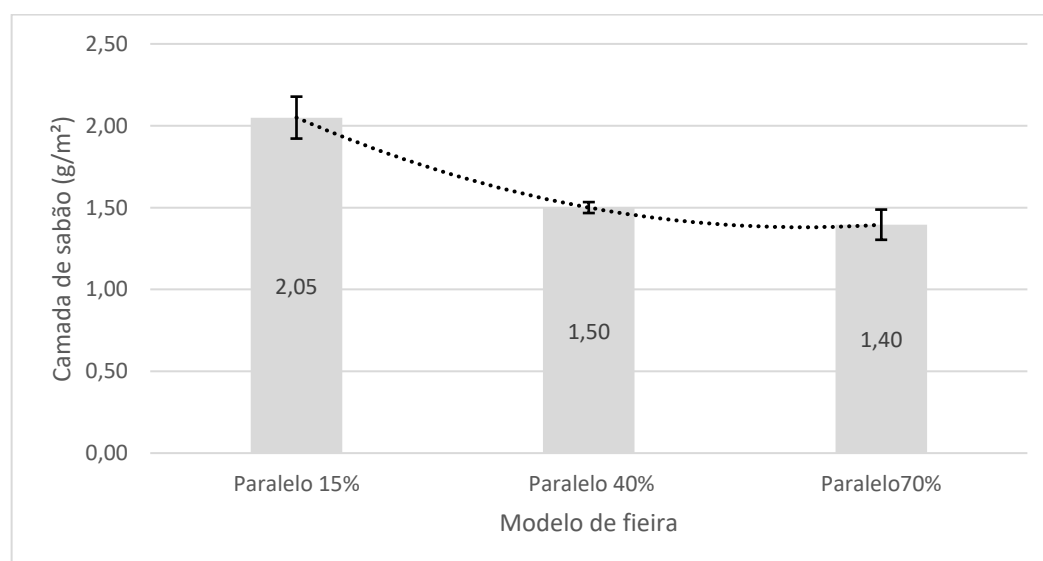
Amostra	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Diâmetro (mm)	Camada de sabão (g/m ²)	Camada de sabão média (g/m ²)	Desvio padrão (g/m ²)
15%	a	54,3348	4,62	2,17	2,05	0,13
	b	53,5041	4,62	1,91		
	c	55,2188	4,62	2,07		
40%	a	48,2927	4,60	1,49	1,50	0,03
	b	48,4763	4,60	1,47		
	c	47,5673	4,60	1,54		
70%	a	53,0323	4,60	1,35	1,40	0,09
	b	49,9505	4,60	1,33		
	c	51,0221	4,60	1,50		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostrado na Tabela 4, foi possível observar que o diâmetro do arame trefilado com a fieira de comprimento de paralelo de 15% (0,694 mm) iniciou com a dimensão de 4,62 mm, sendo que para os demais modelos de fieiras o diâmetro do arame foi de 4,60 mm, como especificado na matriz. Tal constatação comprova o que foi evidenciado na máquina de tração, item 4.1 desse trabalho, sendo que o comprimento de paralelo de 15% do diâmetro da fieira não foi o suficiente para garantir que o diâmetro do arame ficasse dentro da especificação inicial.

Com os resultados coletados nos ensaios, foi possível elaborar o Gráfico 5, mostrado na sequência para uma melhor análise visual.

Gráfico 5 – Camada de sabão residual para cada modelo de fieira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como evidenciado nos dados coletados, o arame que apresentou a maior camada de sabão residual foi o conformado pela fieira de comprimento de paralelo de 0,694 mm (15%), sendo seguida pela de 1,784 mm (40%) e pela de 3,195 mm (70%). Esse resultado mostra que quanto menor o comprimento de paralelo, maior será a agregação de sabão no arame conformado. Tal verificação pode ser explicada, pelo fato do comprimento de paralelo ser uma restrição para o sabão passar pela matriz e continuar sobre o arame, se comportando como uma barreira, impedindo o lubrificante de acompanhar o fio. Segundo Brusius (2009), o primeiro passe de uma máquina de trefilação é o que mais agrega sabão no arame. Sabendo disso, é de grande importância que a camada de sabão sobre o material seja elevada após a primeira fieira, justamente para carregar lubrificante sobre o fio, que será conformado pelas demais matrizes na sequência do equipamento. Com tal observação, a fieira ideal para lubrificar o arame é uma de comprimento de paralelo pequeno, como a de 15% do diâmetro da fieira.

Analisando o Gráfico 5, foi possível verificar também que a fieira com comprimento de paralelo de 1,784 mm (40%) gerou um arame com menos 26,8% de camada de lubrificante residual que a de 0,694 mm (15%), sendo que a de 3,195 mm (70%) foi menor em 31,7% que a de 0,694 mm (15%). Tal constatação mostra que a redução da camada residual de sabão entre a fieira com comprimento de paralelo de 15% do diâmetro da matriz com a de 40% foi de 0,55 g/m², ou seja, uma redução de 0,022 g/m² a cada 1% de incremento no comprimento de paralelo. Por outro lado, a redução do lubrificante entre a fieira de comprimento de paralelo de 40% do diâmetro da matriz com a de 70% foi de 0,10 g/m², equivalente a uma redução de 0,003 g/m² a cada 1% de aumento no comprimento de paralelo. Isso mostra que a redução da camada residual de sabão é muito perceptível até o comprimento de paralelo de 40% do diâmetro da fieira, sendo pouco alterada a partir dessa dimensão.

4.3 CAPACIDADE PRODUTIVA DA FIEIRA

Conforme descrito na metodologia, foi avaliado para cada modelo de fieira a quantidade de arame produzido pela sua deformação. Os resultados encontrados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados da produção e deformação de cada modelo de fieira

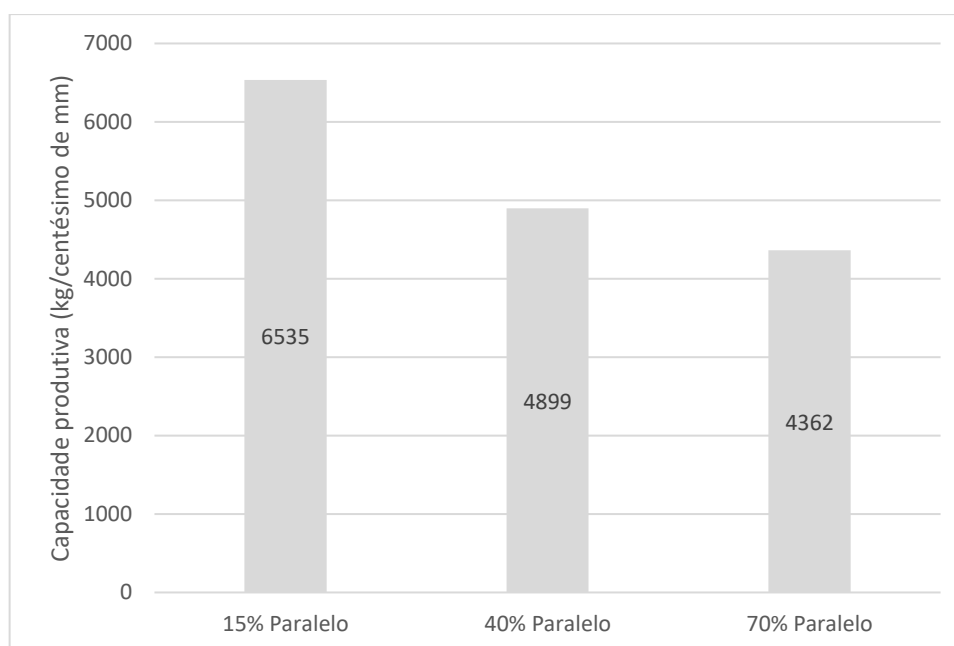
Modelo da fieira	Diâmetro inicial do arame (mm)	Diâmetro final do arame (mm)	Quantidade produzida (kg)	Capacidade produtiva (kg/centésimo de mm)
15% Paralelo	4,62	4,71	71887	6535
40% Paralelo	4,60	4,71	53884	4899
70% Paralelo	4,60	4,71	47981	4362

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se, analisando a Tabela 5, que a fieira de 15% de comprimento de paralelo gerou inicialmente um arame com 0,02 mm acima da dimensão nominal, mesmo que a matriz tenha o diâmetro de 4,60 mm. Por outro lado, as fieiras com 40% e 70% de comprimento de paralelo garantiram a dimensão nominal do arame no início da trefilação. Tais constatações confirmam as medições feitas nos corpos de prova utilizados na máquina de tração e nos ensaios de camada residual de sabão. Na máquina de tração os arames conformados pelo modelo de fieira com menor comprimento de paralelo obtiveram a variação 0,04 mm acima da dimensão nominal e para os demais modelos de fieiras uma variação média de mais 0,015 mm. Isso sugere que se o comprimento de paralelo for pequeno, ele não será robusto o suficiente para garantir a dimensão nominal da fieira, visto que o arame ficará por um menor tempo na área de calibração. Vale destacar que as diferenças encontradas nas medições do diâmetro do arame feitas na máquina de tração com as realizadas no início da conformação na máquina de trefilação, podem ser associadas à diferença de velocidade e à lubrificação entre os dois processos. Com relação aos valores encontrados entre Tabela 5 e Tabela 4, mostram que nenhum dos modelos de fieiras se deformou após conformar 1600 kg, visto que no início da trefilação (Tabela 5) e após trefilação dessa quantidade de massa (Tabela 4), o diâmetro dos arames não variou.

Para o cálculo da capacidade produtiva foi utilizada a Equação 19, sendo que para todos os modelos de fieiras a deformação considerada foi de 0,11 mm, visto que as matrizes possuíam um diâmetro de 4,60 mm e que os testes terminaram quando o diâmetro do arame ficou com 4,71 mm. No Gráfico 6 foi possível avaliar a capacidade produtiva de cada modelo de matriz em kg/centésimo de mm, ou seja, são quantos quilos de material que a fieira consegue conformar, para se desgastar em um centésimo de milímetro no seu diâmetro.

Gráfico 6 – Capacidade produtiva de cada modelo de fieira



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado no Gráfico 6, para melhor análise visual da última coluna da Tabela 5, a fieira com comprimento de paralelo de 15% obteve a maior capacidade produtiva, pois foi capaz de produzir 6535 kg de arame para se desgastar 0,01 mm no seu diâmetro. Essa matriz foi seguida pela fieira de 40% de comprimento de paralelo e pela de 70%, visto que a matriz de 15% obteve mais 25% de capacidade produtiva em comparação com a matriz de 40% e 33% a mais que a fieira de 70%. Tais resultados conflitam com a fundamentação teórica da página 28 desse trabalho, pois de acordo com The Wire Association International (1989), se o comprimento de paralelo for grande o desgaste será pequeno. Isso não foi evidenciado nos testes, pois quanto maior essa dimensão, menor foi a capacidade produtiva da matriz, possuindo, por consequência, o maior desgaste, apesar de garantir inicialmente a dimensão nominal do arame.

Os resultados encontrados sobre a capacidade produtiva da fieira, estão coerentes com os resultados de agregação de sabão e de força de trefilação mostrados nesse trabalho. A fieira que possuiu a maior capacidade produtiva (15% de comprimento de paralelo), foi a que agregou maior sabão sobre o arame, e por consequência manteve uma melhor lubrificação no processo. Além disso, foi a que gerou a menor força para trefilar o material na máquina de tração, causando menores esforços sobre a matriz. Já a fieira que possuiu a menor capacidade produtiva (70%

de comprimento de paralelo) foi a que agregou menor quantidade de sabão sobre o arame e a que gerou a maior força para conformar o material. Sendo assim, a fieira intermediária na capacidade produtiva (40% de comprimento de paralelo), foi a que apresentou os valores intermediários tanto para a agregação de sabão sobre o fio como para a força necessária na conformação. Tal constatação está de acordo com a fundamentação teórica da página 31, pois de acordo com Avitzur, Talbert (1996), quanto mais lubrificante estiver entre o material e a fieira, menor será a força de trefilação e maior será a capacidade produtiva da matriz.

Salienta-se que durante os testes da fieira de comprimento de paralelo de 70%, foi possível verificar que dentro da caixa de sabão eram gerados blocos de lubrificante queimado. De acordo com Silva (2011), parte do sabão de trefilação é carregado com o arame para dentro da fieira e outro é queimado pelo aquecimento gerado na conformação, que é definido como charuto. Esse sabão queimado era formado em grandes quantidades, dificultando ainda mais a lubrificação do arame, visto que os charutos formados ficavam em volta do fio dentro da caixa de sabão, impedindo que o mesmo entrasse em contato com o lubrificante que não estava queimado. Tal condição reduz a lubrificação da matriz, e por consequência aumenta a força gerada para a conformação e diminui a capacidade produtiva da fieira. Na Figura 32 é possível visualizar um charuto formado.

Figura 32 – Charuto formado na trefilação com a fieira 70% de comprimento de paralelo



Fonte: Elaborado pelo autor.

A formação de charuto também foi observada com a fieira de comprimento de paralelo de 40%, porém em menor quantidade que a matriz de 70%. Entretanto, para a fieira de comprimento de paralelo de 15% não foi constatado sabão queimado, sendo este um dos fatores que contribuiu para a matriz de menor comprimento de paralelo possuir a maior capacidade produtiva. Essa verificação está de acordo com o resultado da força de trefilação, visto que quanto maior o comprimento de paralelo, maior será a força para trefilar o arame, e por consequência maior será o aquecimento da conformação, influenciando para a formação de charuto. Além disso, quanto maior for o comprimento de paralelo, maior é a dificuldade do sabão passar pela matriz, tendenciado a formação de sabão queimado.

5 CONCLUSÃO

Tendo como base os resultados encontrados nesse trabalho, foi possível concluir que:

- a) Quanto menor o comprimento de paralelo, menor é a força gerada na trefilação, visto que a fieira com 15% de comprimento de paralelo necessitou de uma força 1,94% menor para conformar o arame, se comparada com uma fieira de 40% de comprimento de paralelo e 8,18% menor se comparada com uma matriz de 70% de comprimento de paralelo;
- b) A força de trefilação foi maior no início da conformação independente do comprimento de paralelo, visto que a fieira foi sendo lubrificada durante a operação;
- c) O comprimento de paralelo de 15% não conseguiu garantir a dimensão nominal da fieira no início da trefilação, produzindo um fio com diâmetro 0,43% maior, enquanto que as matrizes de 40% e 70% produziram um arame na dimensão inicial desejada na máquina de trefilação;
- d) Quanto menor o comprimento de paralelo da fieira, maior é a agregação de sabão sobre o fio após sua conformação. A matriz com 15% de comprimento de paralelo gerou uma camada residual de sabão maior em 26,8% em relação à fieira de 40% de comprimento de paralelo e superior em 31,7% em relação a matriz de 70% de comprimento de paralelo;
- e) A camada de sabão residual sobre o arame reduziu 0,55 g/m² entre as fieiras de 15% e 40% de comprimento de paralelo, enquanto que entre as fieiras de 40% e 70% de comprimento de paralelo reduziu 0,10 g/m². Tal comportamento mostra que a redução da camada residual de sabão sobre o fio é muito perceptível até a fieira de comprimento de paralelo de 40%;
- f) A maior capacidade produtiva foi na matriz de 15% de comprimento de paralelo, enquanto que a menor foi na matriz de 70% de comprimento de paralelo. A fieira de 15% de comprimento de paralelo possuiu uma capacidade produtiva 25% maior que a fieira de 40% e 33% maior que a fieira de 70% de comprimento de paralelo;

- g) Quanto maior o comprimento de paralelo, maior é a tendência de formar charuto na caixa de sabão, prejudicando a trefilação.

Portanto, para a trefilação em estudo nesse trabalho, a fieira com comprimento de paralelo de 15% foi a melhor se comparada com os demais tamanhos testados, visto que gerou menores forças para a conformação, agregou maior quantidade de sabão sobre o arame, apresentou maior capacidade produtiva e não gerou charuto na caixa de sabão. Já a fieira de 70% de comprimento de paralelo foi a que obteve um menor desempenho, visto que foi pior em todos os resultados, enquanto que a fieira de 40% de comprimento de paralelo gerou resultados intermediários. Com isso, foi possível concluir que o comprimento de paralelo de uma fieira é muito importante para a trefilação, pois influencia diretamente a produtividade desse tipo de processo de conformação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser complementado pelas seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- a) Fazer o mesmo estudo para outros tipos de aço, de modo a avaliar possíveis alterações nos resultados influenciados por tal fator;
- b) Realizar os mesmos procedimentos com mais modelos de fieiras com comprimento de paralelo diferentes, entre 5% a 40%, verificando se existe um tamanho ideal;
- c) Simular a trefilação no software Simufact Forming com fieiras de comprimento de paralelo entre 5% a 70%, utilizando um incremento de 5% de comprimento de paralelo a cada novo teste;
- d) Variar os parâmetros de trefilação utilizados, como velocidade de trefilação, deformação relativa em área e lubrificante de trefilação, para verificar qual a influência do comprimento de paralelo de uma fieira em diferentes condições de conformação;
- e) Utilizar um procedimento de limpeza do arame que consiga retirar a totalidade do sabão presente em sua superfície, de modo a encontrar um valor de camada residual de sabão mais assertivo;
- f) Monitorar e/ou analisar a variação térmica durante o processo, e seu efeito sobre as características do produto final.

REFERÊNCIAS

ALTAN, Taylan; OH, Soo-Ik; GEGEL, Harold L. **Conformação de metais.** Fundamentos e aplicações. 1. ed. São Paulo: EESC/USP, 1999.

AVITZUR, Betzalel; TALBERT, Samuel H. **Elementary mechanics of plastic flow in metal forming.** 1. ed. New York: John Wiley, 1996.

BOBADILLA, C.; FOISSEY, S.; FOURMENT, L.; MASSÉ, T.; MONTMITONNET, P. **The optimal die semi-angle concept in wire drawing, examined using automatic optimization techniques.** 1. Ed. França: Springer-Verlag, 2012.

BRESCIANI, Filho Ettore. **Conformação plástica dos metais.** 4. ed. São Paulo: Unicamp, 1991.

BRESCIANI, Filho Ettore. **Conformação plástica dos metais.** 6. ed. São Paulo: EPUSP, 2011.

BRUSIUS, William Jr. **Análise da lubrificação seca para trefilação e proposta de padronização de lubrificantes para arame de médio carbono.** 2009. 27 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

CETLIN, Paulo Roberto. **Tecnologia de trefilação de arames de aço.** Porto Alegre: Dept. de Enga, Metalúrgica e de Materiais, UFMG, 1982. Apostila.

DIETER, George E. **Mechanical Metallurgy.** 2. ed. London: SI Metric, 1988.

ESTEVES GROUP. **Wire die solutions.** São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.estevesgroup.com/pt/products/wire-drawing-dies/tungsten-carbide-dies/index.php>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

FERREIRA, Ricardo Artur Sanguinetti. **Conformação plástica**. Fundamentos metalúrgicos e mecânicos. 2. ed. Recife: Editora Universitária UFPE, 2010.

GERBASE, José F. **Método de medição de força de trefilação de arame**. Avaliação de variação do coeficiente de atrito em trefilação de arames de aço. 1976. 63 f. Trabalho de Conclusão do Curso de Especialização (Especialista em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 1976.

GERDAU. **SR-IO-262-019 Determinação da camada de residual de sabão em arames**. 3. ed. Sapucaia do Sul: Gerdau 2011.

GERDAU. **TRE-001 Introdução trefilação**. 2. ed. Porto Alegre: Gerdau, 2007.

GERDAU. **TRE-012 Lubrificação na trefilação**. 2. ed. Porto Alegre: Gerdau, 2007.

GROEHS, Ademar Gilberto. **Resistência dos materiais e vasos de pressão**. 2. ed. São Leopoldo: Unisinos, 2014.

HELMAN, Horacio; CETLIN, Paulo Roberto. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. Belo Horizonte: Artliber, 2010.

MARIO FRIGERIO GROUP (MFL GROUP). **S Series**. Sensor Arm Wire Dry Drawing line. Molteno, 2018. Disponível em: <<https://www.mflgroup.com/EN/industry/s-series?main=1&industry=22&application=23&return=industry>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

MENEZES, Mateus Sotelo. **Trefilação a frio de um aço SAE 1020: efeitos da variação das condições de lubrificação na força, atrito e propriedades do material**. 2016. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade do Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2016.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PACHECO, Joyson Luiz. **Fabricação por deformação**. Porto Alegre: GPFAI, 2007. Apostila.

SANDVIK. **Sandvik H6F**. [1?]. ed. Estocolmo: Sandvik Hard Materials, 2002.

SCHAEFFER, Lirio. **Introdução à conformação mecânica dos metais**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1983.

SCHAEFFER, Lirio; ROCHA, Alexandre da Silva. **Conformação mecânica**. Cálculos aplicados em processos de fabricação. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2007.

SILVA, Thiago Ferreira. **Efeito dos parâmetros de trefilação nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço SAE 1015 trefilado**. 2011. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade do Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2011.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE TREFILAÇÃO E LAMINAÇÃO DE METAIS FERROSOS (SICETEL). **Análise do mercado do aço 2017**. 6. Ed. São Paulo: SICETEL, 2017.

SULIGA, M. **The analysis of the high speed wire drawing process of high carbon steel wires under hydrodynamic lubrication conditions**. Czestochowa: University of technology faculty of production engineering and materials technology institute of metal forming and safety engineering, 2015.

THE WIRE ASSOCIATION INTERNATIONAL. **Ferrous wire handbook**. 1. ed. Guilford: Inc, 1989.

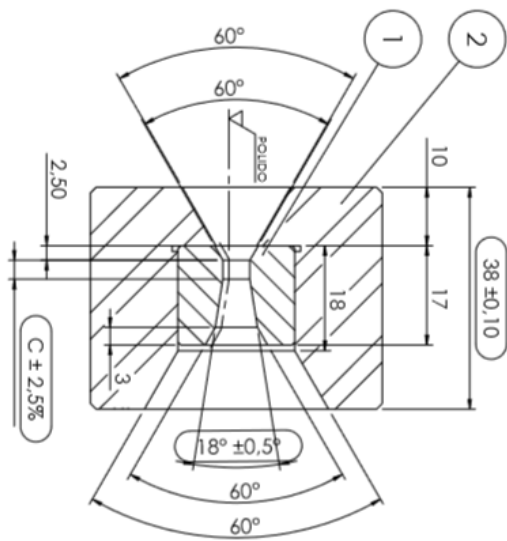
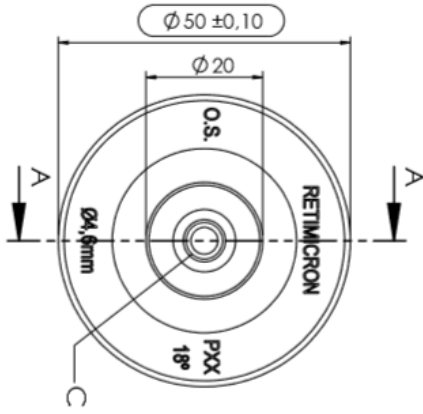
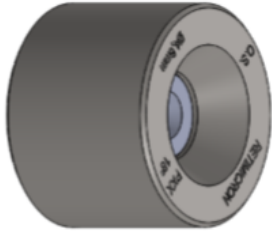
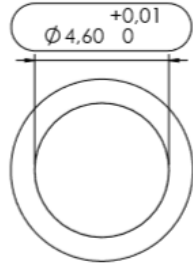
APÊNDICE A – DESENHO DAS FIEIRAS

ESTA INFORMAÇÃO É DE PROPRIEDADE DA RETMICRON IND. E COM. LTDA, SENDO EXPRESSAMENTE PROIBIDA A SUA REPRODUÇÃO, DIVULGAÇÃO E OU USO COMPLETO OU PARCIAL, SEM PRÉVIA E EXPRESSA AUTORIZAÇÃO POR ESCRITO DA RETMICRON INDUSTRIA E COMERCIO LTDA.

4		
3		
2		
1		
NOTA	MODIFICAÇÕES	

NOTAS:

I) Para materiais em aço, deixar sobretal para tratamento térmico de 0,2 a 0,3 mm para retificar Ø Externo ou Interno.



SEÇÃO A-A

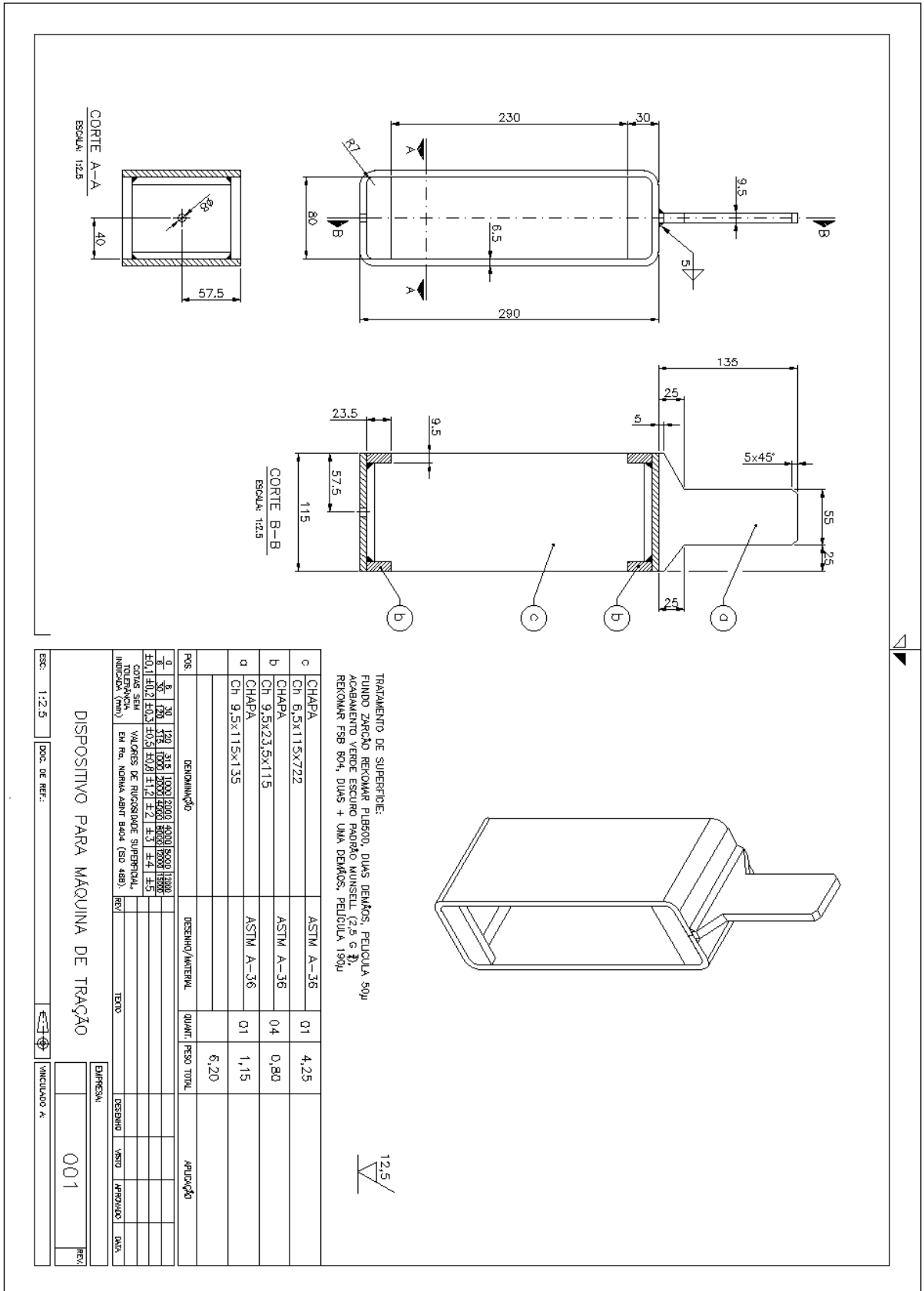
ITEM	P (%)	C (mm)	1	2	CARCAÇA NÚCLEO	SAE 1045 METAL DURO	H6F
1	10	0,46					
2	15	0,69					
3	20	0,92					
4	40	1,84					
5	70	3,22					

RETMICRON	INDUSTRIA METALÚRGICA	DESENHISTA RAPHAEL	DATA 06/06/2018	CLIENTE GERDAU RIO GRANDENSE PARALELO VÁRIAVEL
INDUSTRIA METALÚRGICA	VERBAL	AMOSTRA	CROQUI	DESENHO Nº RET622-020

TOLERÂNCIA LONGITUDINAL NBR ISO 2768-1 DIMENSÃO > 0,5 < 3 < 6 < 30 < 120 < 400 < 1000 < 2000 < 4000 GR.AU ± 0,15 ± 0,2 ± 0,3 ± 0,5 ± 0,6 ± 0,8 ± 1,0 ± 1,2 ± 1,5 ± 2,0 FINE ± 0,05 ± 0,07 ± 0,1 ± 0,15 ± 0,2 ± 0,3 ± 0,4 ± 0,5 ± 0,6 MEIO ± 0,1 ± 0,15 ± 0,2 ± 0,3 ± 0,4 ± 0,5 ± 0,6 ± 0,8 ± 1,0 GROSSO ± 0,2 ± 0,3 ± 0,5 ± 0,8 ± 1,2 ± 1,5 ± 2,0 ± 3,0	TOLERÂNCIA ANGULAR NBR ISO 7163-1 CONFINAMENTO DO LADO CLIENTE > 10° > 10° > 30° > 30° > 30° > 30° > 30° GR.AU ± 1' ± 1' ± 1' ± 1' ± 1' ± 1' ± 1' ± 1' ± 1' FINE ± 5' ± 5' ± 5' ± 5' ± 5' ± 5' ± 5' ± 5' ± 5' MEIO ± 10' ± 10' ± 10' ± 10' ± 10' ± 10' ± 10' ± 10' ± 10' GROSSO ± 30' ± 30' ± 30' ± 30' ± 30' ± 30' ± 30' ± 30' ± 30'
--	--

DOCUMENTO ORIGINAL

APÊNDICE B – DISPOSITIVO PARA MÁQUINA DE TRAÇÃO



ANEXO A – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO SAE 1045

Apêndice VIII

VIII.1 - Valores de Tensão de Ruptura e Escoamento de Aços-Carbono

Este apêndice tem como objetivo apresentar uma tabela com valores de tensão de ruptura e escoamento de alguns aços-carbono.

Tabela VIII.1-1 - Valores de Tensão de Ruptura e Escoamento de Aços SAE/AISI

Número SAE/AISI	Tratamento	σ_r (N/cm ²)	σ_e (N/cm ²)	Dureza Brinell
1010	laminado: a quente	32400	18000	95
	a frio	36500	30000	105
1020	laminado: a quente	38000	21000	110
	a frio	47000	39000	130
1030	laminado: a quente	47000	26000	135
	a frio	52500	44000	150
	normalizado @ 900°C	52000	35000	150
	temperado e revenido @ 540°C	67000	51500	255
	temperado e revenido @ 425°C	73000	58000	300
	temperado e revenido @ 200°C	85000	65000	490
1035	laminado: a quente	50000	27500	140
	a frio	55000	46000	160
1040	laminado: a quente	52400	29000	149
	a frio	58500	49000	170
	normalizado @ 900°C	59000	37000	170
	temperado e revenido @ 730°C	63500	43000	190
	temperado e revenido @ 425°C	75500	55000	240
	temperado e revenido @ 200°C	78000	59000	260
1045	laminado: a quente	56000	31000	160
	a frio	63000	53000	180
1050	laminado: a quente	62000	29000	180
	a frio	69000	49000	195
	normalizado @ 730°C	75000	37000	220
	temperado e revenido @ 540°C	72000	54000	235
	temperado e revenido @ 425°C	109000	79000	440
	temperado e revenido @ 200°C	112000	81000	515
1060	laminado: a quente	67000	37000	200
	normalizado @ 900°C	77000	42000	230
	temperado e revenido @ 730°C	80000	52000	230
	temperado e revenido @ 540°C	95000	67000	280
	temperado e revenido @ 425°C	108000	76000	310
1095	laminado: a quente	83000	46000	250
	normalizado @ 900°C	100000	50000	300
	temperado e revenido @ 730°C	90000	55000	270
	temperado e revenido @ 540°C	120000	77000	350
	temperado e revenido @ 315°C	125000	81000	380

Nota: os valores acima são de referência. A SAE não estabelece valores mínimos de resistência de seus aços.

ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DO METAL DURO CLASSE H6F



SANDVIK H6F

Cemented Carbide Grade for Metal Forming Applications



SANDVIK extra-fine grain cemented carbide grades have been developed to meet the exacting demands placed on solid carbide tooling by modern technology. SANDVIK extra-fine grain cemented carbide grades are true sub micron grain size tungsten carbide alloys. The tungsten carbide grain size is 0.8 μm , which is precisely controlled.

These grades offer an excellent combination of strength and toughness. In addition, a special additive maximises corrosion resistance without loss of toughness.



SANDVIK Grade H6F

SANDVIK grade H6F incorporates 6% cobalt (Co) and 94% tungsten carbide (WC).

- Extra fine carbide grain size.
- Very good wear resistance.

Physical and mechanical properties

Grade	Hardness		Transverse rupture*) strength		Compressive strength		Density g/cm ³	Corrosion resistance 0-10	Wear resistance 0-10
	HV30	HRA	N/mm ²	psi	N/mm ²	psi			
H6F	1 775	93.2	3 500	507 500	7 050	1 022 250	14.90	5	8

Corrosion and wear resistance data is subjective in accordance with 0 = low resistance and 10 = high resistance. All data shown are typical values.


*) Ground cylindrical test specimen 3.25 mm dia. X 38 mm long. Testing conditions according to ISO 3327.

SANDVIK HARD MATERIALS

- Argentina • Australia • Austria • Belgium/Luxembourg • Brazil • Canada • Chile • China • Czech Republic • Denmark
- Estonia • Finland • France • Germany • Hungary • India • Indonesia • Ireland • Italy • Japan • Korea • Lethuania
- Latvi • Malaysia • Mexico • Netherlands • New Zealand • Norway • Philippines • Peru • Poland • Portugal • Russia
- Singapore • Slovak Republic • South Africa • Spain • Sweden • Switzerland • Taiwan • Thailand • Turkey • UK • USA

Please find contact details on www.hardmaterials.sandvik.com

ANEXO C – CERTIFICADO DE QUALIDADE DAS FIEIRAS

RETIMICRON		CERTIFICADO DE QUALIDADE (CQ)		Nº: 82517	
				DATA: 13/08/2018	
CLIENTE: GERDAU - URS		NOTA FISCAL: 31369	PLANTA: SAPUCAIA DO SUL / RS		
NOME DA PEÇA: FIEIRA		MATERIAL: MD	Nº DESENHO / REVISÃO: RET622-020 REVISÃO 00	QUANTIDADE DE PEÇAS: 5	
MOTIVO DA INSPEÇÃO:					
<input checked="" type="checkbox"/> RELATORIO DE INSPEÇÃO <input type="checkbox"/> LAUDO TECNICO <input type="checkbox"/> RELAT. DE ANALISE <input checked="" type="checkbox"/> RELATORIO DIMENSIONAL <input type="checkbox"/>					
82517-03					
DESCRIÇÃO	ESPECIFICADO	TOLERÂNCIA	ENCONTRADO	Laudo	
				A	R
Ø INT.	4,600	+0,01	4,600	X	
Ø EXT.	50,000	±0,1	50,02	X	
ALTURA	38,000	±0,1	38,01	X	
PARALELO (P%)	15% (0,69)	± 2,5%	0,694	X	
ÂNGULO DE REDUÇÃO	18°	±0,5°	18°	X	
OBS.: 100% Lote inspecionado		DADOS PRINCIPAIS:			
		INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS:			
		MICRÔMETRO: 0 à 25 - 25 à 50 mm			
		PAQUÍMETRO: 0 à 150			
		PROJETOR DE PERFIL			
Laudo da Inspeção Final do Lote:			Liberada sob concessão do Cliente (Se Rejeitada/Bloqueada)		
<input checked="" type="checkbox"/> Aprovada <input type="checkbox"/> Rejeitada <input type="checkbox"/> Bloqueada					

RETIMICRON		CERTIFICADO DE QUALIDADE (CQ)		Nº: 82518	
				DATA: 13/08/2018	
CLIENTE: GERDAU - URS		NOTA FISCAL: 31369	PLANTA: SAPUCAIA DO SUL / RS		
NOME DA PEÇA: FIEIRA		MATERIAL: MD	Nº DESENHO / REVISÃO: RET622-020 REVISÃO 00	QUANTIDADE DE PEÇAS: 5	
MOTIVO DA INSPEÇÃO:					
<input checked="" type="checkbox"/> RELATORIO DE INSPEÇÃO <input type="checkbox"/> LAUDO TECNICO <input type="checkbox"/> RELAT. DE ANALISE <input checked="" type="checkbox"/> RELATORIO DIMENSIONAL <input type="checkbox"/>					
82518-05					
DESCRIÇÃO	ESPECIFICADO	TOLERÂNCIA	ENCONTRADO	Laudo	
				A	R
Ø INT.	4,600	+0,01	4,600	X	
Ø EXT.	50,000	±0,1	50,06	X	
ALTURA	38,000	±0,1	38,03	X	
PARALELO (P%)	40% (1,84)	± 2,5%	1,784	X	
ÂNGULO DE REDUÇÃO	18°	±0,5°	18°	X	
OBS.: 100% Lote inspecionado		DADOS PRINCIPAIS:			
		INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS:			
		MICRÔMETRO: 0 à 25 - 25 à 50 mm			
		PAQUÍMETRO: 0 à 150			
		PROJETOR DE PERFIL			
Laudo da Inspeção Final do Lote:			Liberada sob concessão do Cliente (Se Rejeitada/Bloqueada)		
<input checked="" type="checkbox"/> Aprovada <input type="checkbox"/> Rejeitada <input type="checkbox"/> Bloqueada					

FRETAMICRON		CERTIFICADO DE QUALIDADE (CQ)		Nº: 82519	
				DATA: 13/08/2018	
CLIENTE: GERDAU - URS		NOTA FISCAL: 31369	PLANTA: SAPUCAIA DO SUL / RS		
NOME DA PEÇA: FIEIRA		MATERIAL: MD	Nº DESENHO / REVISÃO: RET622-020 REVISÃO 00	QUANTIDADE DE PEÇAS: 5	
MOTIVO DA INSPEÇÃO:					
<input checked="" type="checkbox"/> RELATORIO DE INSPEÇÃO <input type="checkbox"/> LAUDO TECNICO <input type="checkbox"/> RELAT. DE ANALISE <input checked="" type="checkbox"/> RELATORIO DIMENSIONAL <input type="checkbox"/>					
82519-05					
DESCRIÇÃO	ESPECIFICADO	TOLERÂNCIA	ENCONTRADO	Laudo	
				A	R
Ø INT.	4,600	+0,01	4,600	X	
Ø EXT.	50,000	±0,1	50,07	X	
ALTURA	38,000	±0,1	38,05	X	
PARALELO (P%)	70% (3,22)	± 2,5%	3,195	X	
ÂNGULO DE REDUÇÃO	18°	±0,5°	18°	X	
OBS.: 100% Lote inspecionado		DADOS PRINCIPAIS:			
		INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO UTILIZADOS:			
		MICRÔMETRO: 0 à 25 - 25 à 50 mm			
		PAQUÍMETRO: 0 à 150			
		PROJETOR DE PERFIL			
Laudo da Inspeção Final do Lote:			Liberada sob concessão do Cliente (Se Rejeitada/Bloqueada)		
<input checked="" type="checkbox"/> Aprovada <input type="checkbox"/> Rejeitada <input type="checkbox"/> Bloqueada			<i>at</i>		