

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS

Guilherme Candaten Xavier

**ANÁLISE DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO POR CASSETES PARA A  
PRODUÇÃO DE VERGALHÕES CA-60**

Porto Alegre

2024

GUILHERME CANDATEN XAVIER

**ANÁLISE DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO POR CASSETES PARA A  
PRODUÇÃO DE VERGALHÕES CA-60**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

Porto Alegre

2024

GUILHERME CANDATEN XAVIER

**ANÁLISE DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO POR CASSETES PARA A  
PRODUÇÃO DE VERGALHÕES CA-60**

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

---

Orientador: Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes

---

Coordenador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

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

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Tomaz Fantin Souza – IFSUL

---

Prof. Dr. Vinicius Waechter Dias – IFRS

---

Profa. Dra. Luana De Lucca de Costa – UNISINOS

CIP - Catalogação na Publicação

Xavier, Guilherme Candaten  
ANÁLISE DO PROCESSO DE TREFILAÇÃO POR CASSETES PARA  
A PRODUÇÃO DE VERGALHÕES CA-60 / Guilherme Candaten  
Xavier. -- 2024.  
90 f.  
Orientador: Rafael Menezes Nunes.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. trefilação. 2. fios de aço. 3. camada residual.  
4. propriedades mecânicas. 5. cassetes. I. Nunes,  
Rafael Menezes, orient. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mulher e companheira Marcela Lorea, meu mais profundo agradecimento pelo apoio incondicional proporcionado durante toda a jornada deste trabalho. Sua paciência, compreensão e encorajamento foram fundamentais para superar os desafios e alcançar este marco importante em minha vida acadêmica e profissional.

À minha amada família, agradeço por estar ao meu lado me incentivando e por compreender os momentos de ausência que este projeto exigiu. Suas palavras de estímulo e afeto foram uma fonte inesgotável de força e motivação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por ser uma instituição pública, gratuita e de qualidade e viabilizar este projeto.

Ao meu estimado orientador prof. Dr. Rafael Menezes Nunes, expresso minha sincera gratidão por me guiar nesta jornada e tornar possível a realização deste sonho.

À empresa Ferros Castro Ltda., pelos recursos cedidos para a realização dos ensaios práticos e pela valorização do crescimento intelectual de seus funcionários.

## RESUMO

Os fios de aço enquadrados na categoria CA-60, de acordo com a ABNT NBR 7480, são amplamente conhecidos e comercializados no mercado da construção civil. Desde o início do século XXI, o processo de trefilação a frio para a obtenção deste produto através do emprego de dispositivos conhecidos como cassetes tem sido adotado por diversas indústrias brasileiras, favorecendo o controle e a obtenção das propriedades mecânicas exigidas na norma de referência. No entanto, a literatura disponível ainda carece de investigações mais aprofundadas acerca dos principais parâmetros e variáveis que influenciam na qualidade do produto trefilado através deste método de fabricação, particularmente no que diz respeito à utilização de diferentes tipos de sabão (lubrificante) e sua influência na camada residual de lubrificante aderida na superfície dos fios. O emprego do lubrificante tem como função principal reduzir as forças de atrito geradas na interface fio-ferramenta durante as etapas de deformação do material, contribuindo para a redução dos esforços de trefilação, aumento da vida útil do ferramental e da produtividade e melhora das propriedades mecânicas e da qualidade superficial do material. Em virtude disso, este trabalho tem como objetivo principal avaliar a eficiência da lubrificação de três lubrificantes comerciais utilizados na fabricação de fios de aço CA-60 em uma máquina de trefilação a frio multipasses. Diferentes velocidades de trefilação foram empregadas com o intuito de verificar uma possível influência desta variável nos resultados obtidos para a camada residual de lubrificante aderida na superfície dos fios. A partir da análise dos resultados, foi possível observar uma diferença significativa na camada residual de lubrificante aderida na superfície dos fios a partir da utilização dos lubrificantes A, B e C, indicando uma forte possibilidade de aprimoramento do processo ao optar-se pela utilização de um lubrificante com uma capacidade de aderência maior. Além disso, a velocidade do processo demonstrou ter uma influência positiva na camada residual de lubrificante. As propriedades mecânicas do produto trefilado para todas as condições ensaiadas foram obtidas, mas não foi possível estabelecer uma relação direta com nenhuma das variáveis estudadas.

**Palavras-chave:** trefilação; fios de aço; camada residual; propriedades mecânicas; cassetes.

## ABSTRACT

The reinforcement steel wires that fall into the CA-60 category according to the Brazilian ABNT 7480 standard are widely known and marketed in the construction industry. Since the early 21st century, the cold drawing process to obtain this product utilizing devices known as “cassettes” has been adopted by several Brazilian industries, facilitating the control and attainment of mechanical properties required by the reference standard. However, the available literature still lacks in-depth investigations into the key parameters and variables that influence the quality of the drawn product using this manufacturing method, particularly regarding the use of different types of lubricants and its influence on the residual lubricant layer adhered to the surface of the drawn wire. The use of lubricant primarily aims to reduce frictional forces generated at the wire-tool interface during material deformation stages, contributing to reduced drawing forces, increased tool life and productivity and improved mechanical properties and surface finish of the material. Therefore, this study aims to evaluate the lubrication efficiency of three different commercial lubricants tested on a multipass cold drawing machine. Different drawing speeds were employed in order to estimate the influence of this parameter in the residual lubricant layer adhered to the surface of the wires. From the analysis of the results, it was possible to observe a significant difference in the residual lubricant layer adhered to the surface of the wires following the testing of lubricants A, B, and C, indicating a strong possibility of process improvement through the selection of a lubricant with enhanced adhesive properties. Furthermore, the speed of the process seems to have a positive influence on the residual lubricant layer. The mechanical properties of the drawn product for all tested conditions were measured, but it was not possible to establish a direct relationship with any of the variables studied.

**Keywords:** drawing; reinforcement wire; residual layer; mechanical properties; cassettes.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Percentual de participação do setor de construção civil no consumo de aço no Brasil .....	14
Figura 2 – Pilares em concreto armado com detalhe da armadura de aço.....	22
Figura 3 – Bobinas de fio-máquina .....	28
Figura 4 – Processo de fabricação do fio-máquina por laminação a quente .....	29
Figura 5 – Tubo formador de espiras.....	30
Figura 6 – Processo de produção do fio-máquina por laminação a quente (parte II).....	30
Figura 7 – Esquema dos passes de trefilação mostrando a seção transversal do produto após cada passe no primeiro sistema de matriz em rolos da história, desenvolvido em 1964 por Gokyū e Ōkubo .....	32
Figura 8 – Exemplo de cassete utilizado nos processos de trefilação a frio.....	32
Figura 9 – Mancais rotativos: fixo (acima) e intercambiável (abaixo). Os rolos de metal duro são fixados aos mancais por uma porca de travamento .....	33
Figura 10 – Pino de refrigeração .....	34
Figura 11 – Perfil (seção transversal) redondo nervurado característico dos fios de aço da categoria ca-60 .....	35
Figura 12 – Sistema de lubrificação e refrigeração integrado dos cassetes.....	36
Figura 13 – Dedos basculantes na estação de partida da máquina trefiladora.....	38
Figura 14 – Conjunto de roldanas e roletes da unidade de decapagem mecânica.....	40
Figura 15 – Caixa de lubrificação.....	41
Figura 16 – Curva de Stribeck exibindo uma dependência genérica do coeficiente de atrito e da espessura da camada residual de lubrificante com o número de Hersey.....	42
Figura 17 – Exemplo de lubrificantes utilizados no processo de trefilação com cassetes .....	44
Figura 18 – Microestrutura de grãos alongados após o passe de laminação a frio.....	45
Figura 19 – Cabrestante (bloco de tração) responsável pelo tracionamento do fio durante o processo de trefilação .....	46
Figura 20 – Forças de compressão exercidas pelos rolos e força trativa exercida pelo cabrestante representadas pelas setas amarelas .....	46
Figura 21 – Trio de rolos de entrada (esquerda) e trio de rolos nervurados de saída (direita) do último passe de deformação (cassete acabador).....	47
Figura 22 – Máquina de trefilação multipasses com braços de controle articulados .....	48
Figura 23 – Detalhamento do braço de controle articulado ou “bailarina” .....	48



Figura 24 – Dispositivo de alívio de tensões .....	49
Figura 25 – Carretel de bobinamento dos fios de aço CA-60.....	51
Figura 26 – Variação da temperatura com o aumento da velocidade de trefilação .....	52
Figura 27 – Surgimento e crescimento do defeito conhecido como “pé de corvo” na superfície de fios trefilados .....	55
Figura 28 – Mapa do processo.....	56
Figura 29 – Planta da máquina de trefilação utilizada no estudo .....	58
Figura 30 – Redução do fio-máquina empregada no estudo. ....	58
Figura 31 – Fluxograma das etapas utilizadas para obtenção e posterior análise dos resultados .....	60
Figura 32 – Balança semianalítica de precisão, modelo AD 430, da fabricante Marte Científica .....	63
Figura 33 – Máquina de ensaio de tração Losenhausen com capacidade para 10.000 kgf (esquerda) e extensômetro modelo 102, da marca Dinateste (direita) .....	64
Figura 34 – Dispositivo utilizado para a realização do ensaio de dobramento .....	65
Figura 35 – Corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento: a) 4 m/s, lubrificante tipo A; b) 8 m/s, lubrificante tipo a; c) 12 m/s, lubrificante tipo a; d) 8 m/s, lubrificante tipo B; e) 8 m/s, lubrificante tipo C.....	81

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Comparativo entre os resultados encontrados para a camada residual de sabão nas diferentes condições avaliadas.....	67
Gráfico 2 –	Distribuição granulométrica do lubrificante tipo A.....	69
Gráfico 3 –	Distribuição granulométrica do lubrificante tipo B.....	70
Gráfico 4 –	Distribuição granulométrica do lubrificante tipo C.....	71
Gráfico 5 –	Análise comparativa do tamanho de grão médio e da camada residual de lubrificante obtidos para os diferentes lubrificantes testados a velocidade de 8 m/s.....	72
Gráfico 6 –	Comparativo dos valores médios encontrados para a massa linear obtida com a utilização do lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com os valores mínimos e máximos permitidos pela ABNT NBR 7480.....	74
Gráfico 7 –	Comparativo dos valores médios de tensão de escoamento dos corpos de prova trefilados com o lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480.....	75
Gráfico 8 –	Comparativo dos valores médios de tensão de resistência dos corpos de prova trefilados com o lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480.....	76
Gráfico 9 –	Comparativo dos valores médios de alongamento dos corpos de prova trefilados com o lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480.....	76
Gráfico 10 –	Comparativo dos valores médios de relação elástica dos corpos de prova trefilados com o lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480.....	77
Gráfico 11 –	Comparativo dos valores médios encontrados para a massa linear dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com os valores mínimos e máximos permitidos pela ABNT NBR 7480.....	78
Gráfico 12 –	Comparativo dos valores médios de tensão de escoamento dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480.....	79
Gráfico 13 –	Comparativo dos valores médios de tensão de resistência dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480.....	79

Gráfico 14 – Comparativo dos valores médios de alongamento dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480 .....	80
Gráfico 15 – Comparativo dos valores médios de relação elástica dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480.....	80

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 –	Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado .....	23
Tabela 2 –	Variação da massa linear permitida para os fios de aço CA-60 .....	24
Quadro 1 –	Ensaio a serem realizados para a obtenção do Certificado de Conformidade.	25
Tabela 3 –	Composição química e propriedades mecânicas do fio-máquina utilizado no estudo .....	59
Tabela 4 –	Amostras retiradas para a realização dos ensaios previstos para cada uma das condições avaliadas no estudo .....	60
Tabela 5 –	Resultados obtidos no ensaio de camada residual de sabão para as cinco condições ensaiadas .....	66
Tabela 6 –	Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo A e velocidade de trefilação de 4 m/s .....	73
Tabela 7 –	Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo A e velocidade de trefilação de 8 m/s .....	73
Tabela 8 –	Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo A e velocidade de trefilação de 12 m/s .....	73
Tabela 9 –	Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo B e velocidade de trefilação de 8 m/s.....	77
Tabela 10 –	Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo C e velocidade de trefilação de 8 m/s.....	78

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Congreto Armado
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
IA	Inteligência Artificial
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
$\ell$	Comprimento da amostra (mm)
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
LE	Limite de escoamento
LR	Limite de resistência
MSI	<i>Multi System Integration</i>
NBR	Norma Brasileira
OAC	Organismo de Avaliação da Conformidade
PIB	Produto Interno Bruto
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SBAC	Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
STELCO	<i>Steel Company of Canada</i>
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
WSA	<i>World Steel Association</i>
$\pi$	Constante Pi
$\Phi$	Valor que representa o diâmetro equivalente da seção transversal típica do fio ou da barra

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.	1 PANORAMA GERAL DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA.....	14
1.2	PRODUTOS DE AÇO DESTINADOS AO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	15
1.3	MOTIVAÇÕES PARA A PUBLICAÇÃO DO TRABALHO.....	15
1.4	OBJETIVO .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	AÇOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL .....	17
2.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	19
2.3	AÇOS CA-60.....	21
<b>2.3.1</b>	<b>A certificação do aço CA-60.....</b>	<b>24</b>
2.4	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS FIOS DE AÇO CA-60.....	26
<b>2.4.1</b>	<b>Matéria-prima para a fabricação dos fios de aço CA-60.....</b>	<b>27</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Ferramental do processo de conformação a frio através da utilização de cassetes .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Etapas do processo de fabricação.....</b>	<b>38</b>
2.4.3.1	Etapa 1: Estação de partida.....	38
2.4.3.2	Etapa 2: Decapagem mecânica.....	39
2.4.3.3	Etapa 3: Lubrificação na caixa de sabão .....	41
2.4.3.4	Etapa 4: Cassetes trefiladores e blocos de tração .....	44
2.4.3.5	Etapa 5: Dispositivo de alívio de tensões .....	48
2.4.3.6	Etapa 6: Bobinamento do carretel de fios de aço CA-60 .....	50
<b>2.4.4</b>	<b>Controle das variáveis do processo .....</b>	<b>51</b>
<b>2.4.6</b>	<b>Consequências .....</b>	<b>56</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>58</b>
3.1	ENSAIO DE CAMADA RESIDUAL DE SABÃO.....	61
3.2	GRANULOMETRIA A LASER .....	62
3.3	MASSA LINEAR E ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL.....	62
3.4	ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	64
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo, serão apresentados dados econômicos do setor siderúrgico, um breve esclarecimento acerca da importância dos produtos de aço para o setor brasileiro da construção civil, bem como as principais motivações e o objetivo central que levaram à realização desta pesquisa.

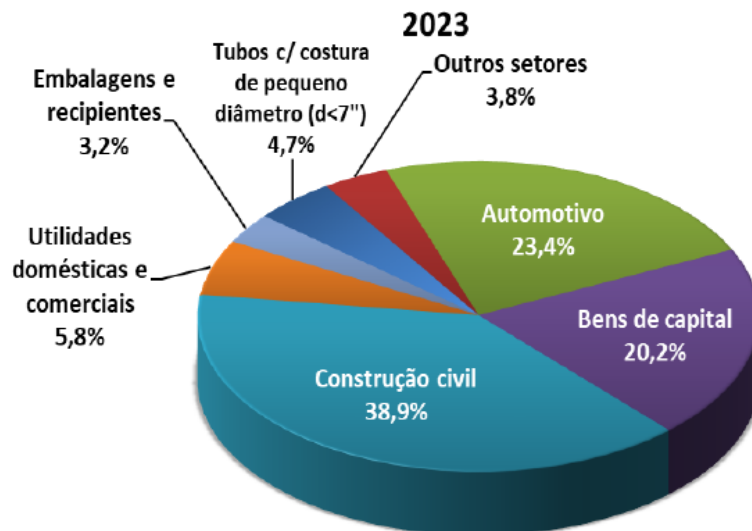
### 1.1 PANORAMA GERAL DA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA

O Brasil é o maior produtor de aço da América Latina (responsável por 54,9% da produção de aço nesta região), e o 9º maior produtor de aço bruto do mundo, com 32 milhões de toneladas de aço bruto produzidas no ano de 2023 (1,7% da produção mundial), apesar de possuir uma capacidade produtiva instalada de 51 milhões de toneladas de aço bruto por ano.

O parque produtor de aço brasileiro conta com 31 usinas, administradas por 11 grupos empresariais. O número de colaboradores da indústria do aço no Brasil no ano de 2023, incluindo o efetivo próprio total e o efetivo de terceiros era de 121.722 pessoas (Instituto Aço Brasil, 2023; World Steel Association, 2023).

O aço desempenha um papel fundamental em diversos setores da economia brasileira, especialmente no setor da construção civil, que se destaca como o principal consumidor de produtos siderúrgicos do país (Figura 1) (Instituto Aço Brasil, 2023).

Figura 1 – Percentual de participação do setor de construção civil no consumo de aço no Brasil



Fonte: Adaptado de Instituto Aço Brasil (2023).

É impossível imaginar a vida moderna sem a utilização desse material, sendo a sua produção um forte indicador do nível de desenvolvimento econômico de um país.

## 1.2 PRODUTOS DE AÇO DESTINADOS AO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os produtos de aço utilizados na construção civil, em sua grande maioria, possuem baixo teor de carbono em sua composição química, o que implica valores baixos de resistência mecânica. O trabalho a frio pode melhorar significativamente essas características, uma vez que o material sofre encruamento e não é possível observar qualquer tipo de fenômeno de recristalização nas temperaturas em que o processo é realizado. Os grãos deformados eventualmente crescem na direção da deformação principal, e a estrutura cristalina do material adquire uma orientação cristalográfica preferencial ou “textura cristalográfica”, resultando na obtenção de um produto com propriedades mecânicas direcionais. Por essa razão, os produtos de aço utilizados na construção civil são fabricados através de processos de conformação mecânica a frio, de modo a assegurar as propriedades mecânicas e as dimensões finais objetivadas (Rafiu, 2023).

A utilização de fios de aço em estruturas de concreto armado, por exemplo, oferece maior resistência à tração e flexibilidade aos elementos estruturais, elevando sua capacidade de suportar a aplicação de cargas externas e aumentando sua durabilidade (Botelho; Marchetti, 2013).

Atualmente, o processo mais comumente utilizado para a obtenção deste produto – também conhecido como trefilação a frio – emprega dispositivos denominados cassetes para conformar o material. O processo de trefilação com cassetes é bastante complexo devido às inúmeras variáveis envolvidas, como será visto adiante.

Sendo assim, é imprescindível que os fabricantes de fios de aço possuam um amplo domínio do processo, garantindo, dessa forma, o atendimento integral aos requisitos mínimos especificados para as propriedades mecânicas e demais exigências da norma técnica de referência (ABNT NBR 7480:2023).

## 1.3 MOTIVAÇÕES PARA A PUBLICAÇÃO DO TRABALHO

Devido à importância dos fios de aço para o mercado da construção civil e ao impacto econômico gerado por esse produto na economia do país, é de grande interesse, do ponto de



vista acadêmico, auxiliar no aumento da eficiência operacional e na redução de custos nas indústrias brasileiras por meio do controle das variáveis do processo, sem, no entanto, comprometer a qualidade do produto, a segurança e o bem-estar de seus usuários.

#### 1.4 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência de duas variáveis do processo produtivo na camada residual de lubrificante, propriedades mecânicas (tensão de escoamento, tensão de resistência, relação elástica, alongamento) e ensaio de dobramento de fios de aço CA-60 fabricados pelo processo de trefilação a frio com cassetes, de modo a garantir o total atendimento aos requisitos mínimos estipulados pela ABNT NBR 7480:2023. São elas: a velocidade de trefilação e a distribuição granulométrica do lubrificante.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste segundo capítulo, uma revisão bibliográfica a respeito da empregabilidade dos produtos de aços no setor de construção civil e uma discussão acerca da relação entre as suas propriedades mecânicas e composição química – o que torna estes materiais únicos e garante a sua aplicação em quase todos os canteiros de obra do mundo – são apresentadas. Além disso, são discutidos a introdução à norma ABNT NBR 7480 e à classe de aços CA-60, bem como o detalhamento de todas as etapas do processo produtivo utilizado para a obtenção deste material. Por fim, a influência de parâmetros do processo produtivo – tais como a velocidade de trefilação – na camada residual de lubrificante do produto trefilado será analisada ao final deste capítulo.

### 2.1 AÇOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Os aços consistem basicamente em ligas de ferro (Fe) e carbono (C), com este último elemento variando entre aproximadamente 0,002% e 2,1% do peso total. Outros elementos, como manganês (Mn), enxofre (S), fósforo (P) e silício (Si), também podem estar presentes como elementos residuais devido à natureza do processo de obtenção destes materiais. Além disso, outros elementos podem ser intencionalmente adicionados na formulação para conferir uma determinada propriedade.

A evolução das ligas de ferro está intimamente ligada ao desenvolvimento tecnológico. A capacidade de atingir temperaturas maiores durante o processamento e a descoberta de novas rotas de produção, bem como produtos e aplicações diferentes, contribuíram para a obtenção de novas ligas. A possibilidade de ajustar a composição química e a microestrutura, ou seja, a maneira como os átomos estão dispostos e interligados entre si no nível microscópico, torna os aços materiais extremamente versáteis, encontrando diversas aplicações nos mais variados setores da economia (Botelho; Marchetti, 2013; Cabrera; Moron; Garcia, 2024).

A partir da descoberta e do patenteamento do primeiro processo de fabricação do aço por Henry Bessemer, na metade do século XIX – durante a primeira Revolução Industrial –, o mundo presenciou um verdadeiro crescimento no emprego deste material na construção civil. Foi graças à fabricação do aço em larga escala que a construção de grandes estruturas, como a Torre Eiffel e a ponte do Forth, se tornou realidade (Mohajan, 2019).

Desde então, a indústria siderúrgica percorreu um longo caminho em termos de automação. A descoberta de novos métodos de fabricação mais eficazes fez com que a capacidade de produção do aço fosse dobrada a cada poucos anos no período entre o final do século XIX e início do século XX.

Até a década de 1970, quase toda a fabricação de produtos de aço destinados à construção civil ainda se dava de forma manual. Foi somente a partir da década de 1980 e 1990, com o surgimento de tecnologias como o CAD 3D (do inglês *Computer Aided Design*) e o MSI (do inglês *Multi System Integration*), que houve um avanço substancial na automação dos processos. A introdução da automação na fabricação de componentes estruturais de aço beneficiou a indústria em várias frentes, incluindo a segurança dos trabalhadores, a produtividade, a precisão e a qualidade final dos produtos, o desenvolvimento de novas ligas, a economia de custos e o impacto no meio ambiente. No futuro, as fábricas de produção de aço serão ainda mais integradas e contarão com o apoio de diversas tecnologias emergentes, como a IA (inteligência artificial) robótica e a manufatura aditiva (Elhouar; Terreno, 2022).

A maior parte do aço produzido no mundo é destinada ao setor de infraestrutura e construção civil. De acordo com a World Steel Association (WSA, c2023), no ano de 2022 este setor foi responsável por 52% do consumo mundial de aço.

O uso do aço na indústria da construção civil tem sido amplamente aceito por engenheiros, arquitetos e projetistas devido às suas inúmeras vantagens, tais como: elevada resistência mecânica; adaptabilidade e flexibilidade no projeto de edificações; durabilidade; reciclabilidade; baixo peso específico; baixos custos de manutenção a longo prazo, dentre outras. Outra razão que justifica a larga utilização deste material é a possibilidade de fabricação de peças pré-moldadas em concreto armado, trazendo bastante agilidade para a etapa de construção da obra.

Os aços podem ser classificados de acordo com vários sistemas de nomenclaturas diferentes. A forma mais comum de classificar os aços é por meio da análise de sua composição química. Dentro deste sistema de classificação, existe uma categoria de aços conhecida como aços ao carbono. Esta classe de aços compreende todas as ligas de ferro que possuem como principal elemento de liga o carbono. Os aços ao carbono também podem ser divididos em três subclasses: aços baixo carbono; aços médio carbono e; aços alto carbono.

Os aços ao carbono são atualmente os aços mais utilizados na indústria da construção civil, visto que suas propriedades físicas e mecânicas atendem de forma satisfatória às condições e solicitações em serviço. Além disso, esta classe de aços possui um baixo custo de fabricação em relação a outros tipos de aço disponíveis no mercado.

Ainda dentro deste sistema de classificação, encontra-se a classe dos aços inoxidáveis. Esta classe de aços possui todas as vantagens dos aços ao carbono comuns, e apresenta uma excelente resistência à corrosão conferida pela presença do cromo (Cr) em sua composição química, especialmente em ambientes marinhos em que há uma forte presença de íons corrosivos na atmosfera. Embora a classe dos aços inoxidáveis seja mais adequada para a aplicação no campo da construção civil, seu uso fica mais restrito devido ao custo elevado deste material (Botelho; Marchetti, 2013; Cabrera; Moron; Garcia, 2024).

## 2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

As propriedades mecânicas de um material podem ser definidas como as propriedades que estão relacionadas à capacidade do material em resistir a esforços mecânicos externos aplicados sobre ele, como, por exemplo: esforços trativos ou compressivos, torção, dobramento e impacto. Em linhas gerais, podemos pensar nessas propriedades como vários exemplos de “resistência mecânica”.

No entanto, o termo “resistência mecânica”, por si só, não tem muita relevância. Aço, ferro fundido, borracha e vidro são materiais que possuem uma elevada resistência mecânica, cada um à sua própria maneira. Em se tratando de aços, quando a palavra “resistência” é utilizada sozinha (como, por exemplo, em “aços de alta resistência”), quase sempre ela se refere à capacidade do metal de resistir a esforços trativos, propriedade que é mais conhecida como resistência à tração (Motalleb, 2014).

Para o setor de construção civil, os aços de maior interesse recaem principalmente sobre aqueles que possuem média e alta resistência mecânica (resistência à tração), sem, no entanto, comprometer a sua ductilidade ou outras propriedades de interesse, garantindo de forma segura o seu uso em elementos de construção sujeitos a grandes carregamentos.

Um exemplo está na fabricação de fios de aço utilizados no interior de estruturas de concreto armado. As propriedades mecânicas dos fios de aço desempenham um papel importante na vida útil desse tipo de estrutura, como, por exemplo, em arranha-céus, pontes, tubos de drenagem etc. Os fios de aço, além de aumentarem a resistência mecânica da estrutura como um todo, também ajudam a reduzir ou controlar a largura das trincas no concreto e ajudam a manter o intertravamento mecânico do agregado. As principais propriedades mecânicas<sup>1</sup> de

---

<sup>1</sup> Nomenclatura de acordo com as definições estabelecidas na ABNT NBR 6892-1:2018.

interesse em um projeto estrutural de engenharia civil são: tensão no ponto de escoamento; deformação no ponto de escoamento; resistência à tração; deformação no ponto de tração máxima; e deformação máxima na fratura. Além disso, o aço também deve apresentar excelente trabalhabilidade em operações de corte e dobra e uma boa soldabilidade para garantir a resistência ao cisalhamento de elementos estruturais como telas e treliças eletrossoldadas (Pereira, 2019; Sivakumaran, 2010).

Em um estudo realizado por Carrillo, Lozano e Arteta (2021), as propriedades mecânicas de vergalhões comercializados na Colômbia foram avaliadas por meio de ensaios de tração e dobramento, e os resultados encontrados foram comparados com outros estudos similares já realizados em diversos outros países. A análise estatística dos dados obtidos comprovou que a maioria dos valores encontrados está de acordo com as normas e exigências técnicas locais, mostrando que há um forte controle de qualidade por trás da produção destes produtos.

Djavanroodi e Salman (2017) ensaiaram diversas amostras de diferentes fabricantes que foram coletadas e testadas para obterem-se os valores de diferentes propriedades mecânicas do aço, tais como: tensão de escoamento; tensão de tração; e alongamento. Estas propriedades foram analisadas por meio de um método estatístico para determinar o tipo de distribuição das curvas obtidas a partir dos dados coletados, e os resultados foram comparados aos valores mínimos especificados na norma internacional da American Society for Testing and Materials, ASTM A615.

Em outro estudo publicado apenas um ano depois, os mesmos autores relatam que os ensaios realizados em fios de aço utilizados na maioria dos canteiros de obras hoje em dia estão praticamente restritos a ensaios de tração e dobramento, visto que refletem o seu desempenho estrutural. Segundo os autores, inúmeros estudos estatísticos lidando especificamente com a variabilidade das propriedades mecânicas dos aços de reforço para concreto armado têm sido conduzidos recentemente, mas pouca ou quase nenhuma informação a respeito da variabilidade da composição química destes produtos está disponível hoje em dia. Sendo assim, os autores propuseram um estudo no qual amostras de vários fabricantes locais foram coletadas e testadas utilizando-se um espectrômetro para obter a composição química dos aços ensaiados. Similarmente ao estudo anterior, os resultados foram analisados a partir de um método estatístico para determinar o tipo de distribuição das curvas obtidas e comparados aos requisitos mínimos estabelecidos pela norma internacional ASTM A615. O estudo conclui que menos de 3% das amostras de aço ensaiadas não atendem aos padrões mínimos exigidos pela norma ASTM 615. Também fica claro que o valor médio obtido para a composição química não está situado no ponto médio do intervalo de dados obtidos, indicando distribuições estatísticas não

normais. Sendo assim, a composição química dos aços produzidos localmente não apresenta uma boa consistência (Djavanroodi; Salman, 2018). Alguns estudos mais antigos como os de Jibrin e Ejeh (2013) e Lim (1991) também são mencionados no artigo de Djavanroodi e Salman (2018), mas a bibliografia ainda deixa muito a desejar no que tange à variabilidade da composição química dos aços destinados a estruturas de concreto armado.

É importante salientar, no entanto, que as propriedades mecânicas finais de um aço dependem não só apenas de sua composição química e microestrutura, mas também do processo de fabricação pelo qual foi obtido. Este tópico será abordado mais adiante no item 2.4 (Callister; Rethwisch, 2020).

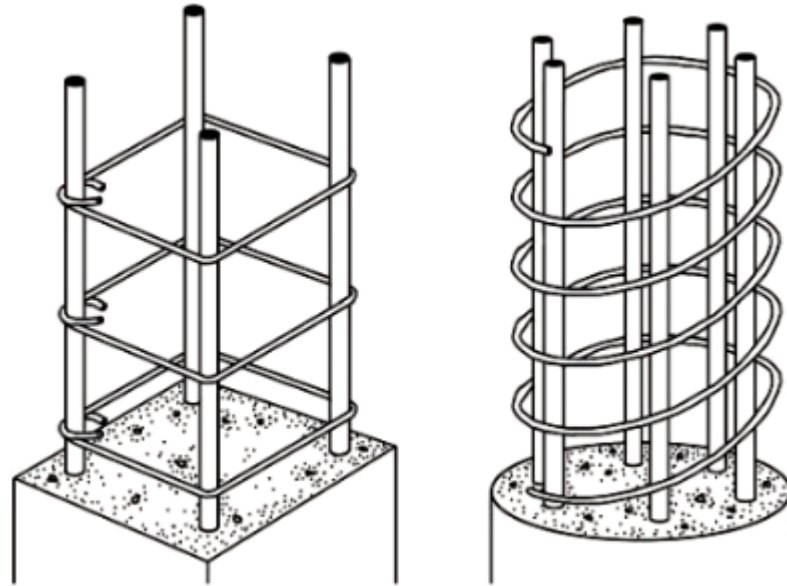
As variações de composição química na produção do aço são inevitáveis, devido às características do processo de obtenção e refino deste material. Os principais elementos de liga que têm influência nas propriedades mecânicas finais dos aços para a construção civil são o carbono (C), o manganês (Mn), o enxofre (S), o fósforo (P), o cobre (Cu) e cromo (Cr) (Basu; Shylamoni; Roshan, 2004 *apud* Djavanroodi; Salman, 2018).

O carbono é o elemento de liga que possui a maior influência na resistência mecânica do aço, sendo que há dois mecanismos de endurecimento que operam de forma concomitante: o endurecimento por solução sólida e a formação de uma segunda fase (cementita). Embora o C aumente consideravelmente a resistência mecânica (especialmente a resistência à tração) do aço, ele também diminui a ductilidade, além de reduzir a soldabilidade (Hajeri-Al, 2015 *apud* Djavanroodi; Salman, 2018).

### 2.3 AÇOS CA-60

Os aços classificados como CA-60 recebem esta designação pois apresentam uma tensão mínima de resistência ao escoamento em tração de 60 kgf/mm<sup>2</sup> ou 600 MPa, além de serem aplicados na construção de estruturas de concreto armado (CA). O concreto armado convencional nada mais é do que um material compósito formado por barras ou fios (ver a seguir) de aço de reforço (do inglês *reinforcing steel*) embutidos em uma matriz de concreto endurecido (Figura 2).

Figura 2 – Pilares em concreto armado com detalhe da armadura de aço



Fonte: Adaptado de Ochshorn (2020).

A categoria de aços CA-60 é regida por meio da norma ABNT NBR 7480 (2023), que estabelece os requisitos exigidos para encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço destinados a armaduras para estruturas de concreto armado, com ou sem revestimento superficial. De acordo com esta norma, as barras de aço são definidas como produtos de diâmetro nominal comumente igual ou superior a 6,30 mm, e que são produzidas exclusivamente pelo processo de laminação a quente, sem nenhuma deformação mecânica posterior. Já os fios de aço são definidos como produtos que normalmente possuem diâmetro igual ou inferior a 10 mm, e que são fabricados por processos de conformação mecânica a frio, como a trefilação ou a laminação do fio-máquina (ABNT, 2023; Djavanroodi; Salman, 2017).

As propriedades mecânicas dos fios de aço CA-60 utilizados nas estruturas de concreto armado podem ser controladas durante o próprio processo produtivo, mas sempre vão existir variações de um fornecedor para o outro, ou até mesmo em lotes diferentes de um mesmo fornecedor. Estas propriedades podem ser influenciadas por diversos fatores, tais como: taxa de deformação, área da seção transversal, variações na composição química do aço, dentre muitas outras. No entanto, todos os fornecedores devem obrigatoriamente realizar ensaios mecânicos para garantir que os fios de aço comercializados atendam às especificações mínimas exigidas pela norma ABNT NBR 7480 (ABNT, 2023; Djavanroodi; Salman, 2017).

Para que um aço possa ser fabricado e comercializado como sendo pertencente à classe de aços CA-60, além da tensão mínima de 600 MPa estipulada para o limite superior de resistência ao escoamento, também é necessário atender aos valores mínimos de limite de

resistência (tensão de resistência), alongamento após ruptura em  $10\Phi$  e alongamento total na força máxima. Todas estas propriedades podem ser obtidas por meio do ensaio de tração, que deverá ser conduzido de acordo com a norma ABNT NBR ISO 6892 (2018). A norma ABNT NBR 7480 também prevê outros ensaios, como o de dobramento – ABNT NBR 17005 (2021a) – e o de aderência – ABNT NBR 7477 (1982).

Os critérios de avaliação das propriedades mecânicas para a classificação das barras e fios de aço de acordo com a sua categoria (CA-25, CA-50 ou CA-60) podem ser visualizados na Tabela 1 (ABNT, 2023).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas exigíveis de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado

Categoria do aço	Valores mínimos de tração				Ensaio de dobramento		Ensaio de aderência	
	Resistência característica de escoamento $f_{yk}$ MPa	Limite de resistência $f_{st}$ MPa	Alongamento após ruptura em $10\Phi$ A %	Alongamento total na força máxima Agt %	Diâmetro do pino ou cutelo mm		Coeficiente de conformação superficial mínimo $\eta$	
					$\Phi < 20$	$\Phi \geq 20$	$\Phi < 10$	$\Phi \geq 10$
CA-25	250	1,20 $f_y$	18	-	2 $\Phi$	4 $\Phi$	1,0	1,0
CA-50	500	1,08 $f_y$	8	5	3 $\Phi$	6 $\Phi$	1,0	1,5
CA-60	600	1,05 $f_y$	5	-	5 $\Phi$	-	1,0	1,5

Fonte: Adaptado de ABNT (2023).

De acordo com a norma ABNT NBR 7480, os fios de aço CA-60 podem ou não apresentar “saliências” – comumente conhecidas como “nervuras” – em sua superfície externa. As nervuras podem ser longitudinais ou transversais e são moldadas, espaçadas e inclinadas de acordo com os requisitos e as especificações das normas adotadas localmente.

A principal razão para a impressão de tal geometria nos fios é para melhorar a sua adesão com o concreto por meio de um mecanismo de intertravamento mecânico. Frequentemente, a força de adesão entre o fio de aço e o concreto pode ser afetada por diversos fatores, como: geometria da superfície da nervura; resistência do concreto; cobertura de concreto; adesão química; condição da superfície do fio; localização dos fios durante a concretagem etc. Uma revisão bibliográfica completa a respeito dos principais artigos publicados envolvendo a variação destes parâmetros e os seus principais resultados pode ser conferida no trabalho de Leramo, Adekoya e Loto (2018). Segundo estes autores, a geometria das nervuras é o fator que possui a maior influência na força de adesão da superfície aço-concreto.



Além disso, a norma ABNT NBR 7480 também especifica uma faixa com os limites mínimo e máximo de variação da massa linear dos fios de aço CA-60 (Tabela 2), dentre outras exigências quanto às características geométricas e superficiais dos fios, condições de estocagem e de fornecimento etc.

Tabela 2 – Variação da massa linear permitida para os fios de aço CA-60

Diâmetro nominal (mm)		Massa e tolerância por unidade de comprimento		Valores nominais	
Série	Fios	Massa nominal (kg/m)	Máxima variação permitida para massa nominal	Área da seção (mm <sup>2</sup> )	Perímetro (mm)
Fina	3,4	0,071	± 6%	9,1	10,7
	3,8	0,089	± 6%	11,3	11,9
	4,2	0,109	± 6%	13,9	13,2
Média	4,6	0,130	± 6%	16,6	14,5
	5,0	0,154	± 6%	19,6	15,7
	5,5	0,187	± 6%	23,8	17,3
	6,0	0,222	± 6%	28,3	18,8
Grossa	6,4	0,253	± 6%	32,2	20,1
	7,0	0,302	± 6%	38,5	22,0
	8,0	0,395	± 6%	50,3	25,1
	9,5	0,558	± 6%	70,9	29,8
	10,0	0,617	± 6%	78,5	31,4

Fonte: Adaptado de ABNT (2023).

### 2.3.1 A certificação do aço CA-60

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), autarquia federal vinculada ao Ministério da Economia, estabeleceu e aprovou critérios e procedimentos de avaliação da conformidade de barras e fios de aço destinados a armaduras de estruturas de concreto armado por meio da publicação da Portaria n. 139 de 19 de março de 2021. Esta publicação toma como referência a normativa ABNT NBR 7480 (2007) – “Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação” (recentemente descontinuada devido à publicação da nova versão de 2023). Trata-se, portanto, de um produto que deve ser homologado e certificado de forma compulsória para que possa ser legalmente comercializado dentro do território brasileiro.

A certificação consiste em uma análise inicial e de análises periódicas do Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) e de ensaios realizados no produto a ser certificado. Este processo tem início a partir do encaminhamento de uma solicitação formal a um Organismo de Avaliação

da Conformidade (OAC). Estes organismos são entidades públicas, privadas ou mistas, de terceira parte, acreditadas pelo INMETRO, de acordo com os critérios por ele estabelecidos, para realizar os serviços de avaliação da conformidade de produtos com base nos princípios e políticas adotadas pelo Sistema Brasileiro de Avaliação da Conformidade (SBAC). Após a análise e a aprovação inicial de toda a documentação exigida, o OAC responsável, de comum acordo com o fornecedor, programa um dia para realizar a Auditoria Inicial do SGQ da empresa solicitante e a coleta de amostras para a realização dos ensaios iniciais. Aprovadas todas as etapas da avaliação inicial do processo de certificação, o OAC concede ao fabricante o Atestado de Conformidade ou Certificado de Conformidade, que é pré-condição para que a empresa possa obter o registro do produto junto ao INMETRO. O controle da manutenção do Certificado de Conformidade é realizado para constatar se as condições técnico-organizacionais que deram origem à emissão inicial deste certificado estão sendo mantidas. Sendo assim, duas vezes ao ano a empresa é submetida novamente a uma auditoria, chamada de Auditoria de Manutenção. A validade do Certificado de Conformidade emitido pelo OAC é de 3 anos, após os quais uma nova auditoria, desta vez chamada de Auditoria de Recertificação, deverá ser realizada para que a empresa possa anexar o novo Certificado de Conformidade junto ao INMETRO para obter a renovação do registro do produto. O fabricante também deve realizar a cada 30 ton de produção do mesmo lote os ensaios previstos no Quadro 1, exceto o ensaio de determinação do coeficiente de conformação superficial, que somente será realizado nas auditorias de certificação e de recertificação. O OAC deverá realizar, a cada 3 meses, para cada unidade fabril, a avaliação estatística dos resultados da inspeção contínua realizada pelo fabricante para as características mecânicas de tração, dobramento e massa linear de cada produto certificado (Brasil, 2021).

Quadro 1 – Ensaios a serem realizados para a obtenção do Certificado de Conformidade

Nº	Ensaios	Critério de atendimento
01	Verificação das características geométricas	Item 4.2 da norma ABNT NBR 7480:2007
02	Análise quanto à defeitos superficiais	Item 4.3 da norma ABNT NBR 7480:2007
03	Verificação da massa e tolerância	Item 4.4 da norma ABNT NBR 7480:2007
04	Verificação da marcação	Itens 4.6.1 e 4.6.2 da norma ABNT NBR 7480:2007
05	Propriedades mecânicas de tração	Itens 5.1 e 6.6.1 da norma ABNT NBR 7480:2007
06	Dobramento	Itens 5.2 e 6.6.2 da norma ABNT NBR 7480:2007
07	Determinação do coeficiente de conformação superficial	Item 6.6.3 da norma ABNT NBR 7480:2007
08	Verificação de conformidade metrológica	Portaria Inmetro nº 143 de 2005

Fonte: Adaptado de Brasil (2021).

De acordo com Haas (2016), os aços para concreto armado (inclui-se aqui o CA-60) podem ser fornecidos diretamente para o consumidor final de diferentes maneiras: em barras ou fios com comprimento total de 12 metros; cortado e dobrado; ou pré-armado. Este último tipo de fornecimento possui o maior nível de industrialização, pois os elementos estruturais são entregues prontos, necessitando apenas fazer pequenos ajustes *in loco* para posicionar os elementos dentro de formas antes de seguir para a etapa de concretagem.

Os aços CA-60 são amplamente difundidos e bem aceitos por grande parte do mercado consumidor brasileiro, e além das três formas de fornecimento usuais mencionadas acima, estes materiais também são utilizados para a fabricação de outros produtos voltados a aplicações na construção civil, tais como estribos, telas e treliças eletrossoldadas.

#### 2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS FIOS DE AÇO CA-60

Os aços da categoria CA-60 podem ser obtidos de diferentes maneiras, dentre as quais podemos destacar a conformação a frio de aços com baixo teor de carbono por meio do emprego de dispositivos denominados cassetes<sup>2</sup>. Este processo apresenta um rígido controle dimensional do diâmetro final do produto acabado, além de promover uma melhoria da resistência mecânica e a obtenção de boas características superficiais. Nos últimos anos, vem sendo utilizado em larga escala para a produção de fios de aço nervurados e, por isso, ainda vem sendo aperfeiçoado continuamente para atingir velocidades acima de 18 m/s (Arrais, 2019; Rocha, 2012).

Esta tecnologia visa reduzir ou até mesmo eliminar algumas das principais desvantagens dos métodos mais tradicionais, tais como: alto consumo de energia; número elevado de passes de deformação; tratamentos térmicos intermediários de recozimento; baixa velocidade do processo; baixa plasticidade do produto final; uso de lubrificantes caros, dentre outros.

A existência de deformações simultâneas na presença de forças baixas de fricção em comparação com as forças presentes no processo de trefilação tradicional (matriz fixa) tem o papel de reduzir as tensões internas e conduzir o fluxo de material uniformemente na direção principal de deformação, além de permitir uma maior redução. Isso pode reduzir o número de passes para a obtenção do produto final, diminuindo o número de microfissuras e os defeitos superficiais (Mihu *et al.*, 2016; Sas-Boca *et al.*, 2018).

---

<sup>2</sup> Cf. item 2.4.2 para uma descrição detalhada do ferramental utilizado no processo.

O processo de conformação a frio com cassetes para a fabricação de fios de aço CA-60 tem sido equivocadamente classificado de duas formas distintas na literatura: laminação e trefilação.

Diz-se laminação, pois o fio-máquina<sup>3</sup> é forçado a passar através de um conjunto de rolos que deformam plasticamente o material, por meio das tensões compressivas que são geradas durante o contato; e trefilação, pois utiliza-se de forças trativas impostas ao fio por meio de um dispositivo denominado “bloco de tração” ou “cabrestante” para forçar a passagem do material entre os rolos<sup>4</sup>. Resumidamente, existem duas forças envolvidas neste processo de deformação plástica: força de trefilação (trativa) e força de laminação (compressiva). Essas forças são fortemente influenciadas pela variação de certos parâmetros do processo, como o diâmetro inicial do fio-máquina, o coeficiente de alongamento, a superfície de contato entre os rolos e o fio-máquina, a pressão média de deformação, o coeficiente de atrito e o raio de trabalho dos rolos.

No entanto, assim como ocorre no processo de laminação, as forças de deformação responsáveis pela redução da seção transversal do fio no processo de trefilação são forças de deformação compressivas. Ou seja, esta não é uma exclusividade do processo de laminação.

Além disso, para que o processo de laminação seja considerado tecnicamente viável faz-se necessário que um parâmetro conhecido como “condição de agarre” seja atendido. Ao contrário do que ocorre no processo de trefilação, os motores elétricos acoplados aos cilindros de laminação e as forças de atrito geradas na superfície de contato entre a matéria-prima e o ferramental são os responsáveis pelo avanço do material no sentido de laminação. Esta não é uma característica do processo de fabricação dos fios de aço CA-60 com cassetes, como será visto mais adiante, pois o avanço do material no sentido do processo se dá pela ação das forças trativas impostas pelo bloco de tração. Por conseguinte, a partir deste ponto, o processo de fabricação dos fios de aço CA-60 com cassetes será referenciado exclusivamente como sendo um processo de trefilação (Putriqie Júnior, 2017).

#### **2.4.1 Matéria-prima para a fabricação dos fios de aço CA-60**

A matéria-prima para a produção dos fios de aço CA-60 é o fio-máquina (Figura 3). O fio-máquina pode ser definido como uma bobina de aço produzida através da laminação a quente de tarugos provenientes do lingotamento contínuo. As bobinas de fio-máquina são fornecidas nas mais variadas composições químicas, pesos e diâmetros, podendo variar desde

---

<sup>3</sup> Matéria-prima utilizada no processo de produção dos fios de aço CA-60 (cf. item 2.4.1).

<sup>4</sup> Cf. Figura 18 no item 2.4.3.4 para visualizar a representação das forças envolvidas no processo.

5,5 mm até 33,3 mm, além de serem fornecidas tanto em seção transversal esférica quanto em seção transversal sextavada. Utiliza-se, de forma geral, aços com baixos teores de carbono. Estes aços são preferíveis pois apresentam custos relativamente baixos e a possibilidade de obtenção de uma alta resistência mecânica a partir do encruamento do material. No entanto, também podem ser encontradas no mercado brasileiro bobinas de fio-máquina produzidas a partir de aços de médio e alto teor de carbono e de aços ligados. A norma ABNT NBR 6354 (2021b) é a responsável pelo controle dimensional deste produto, enquanto a norma ABNT NBR 6330 (2020) rege a sua qualidade superficial (Arrais, 2019; Hissanaga, 2013; Rocha, 2012).

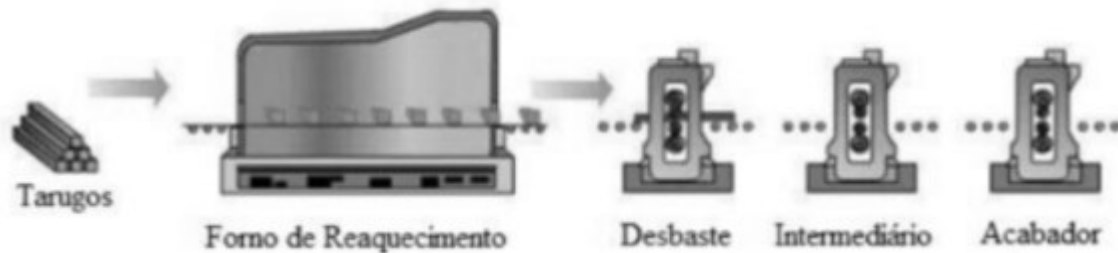
Figura 3 – Bobinas de fio-máquina



Fonte: Aço Verde do Brasil (c2023).

No processo de fabricação do fio-máquina, os tarugos de aço provenientes das aciarias (unidade da usina siderúrgica responsável pela fusão, refino e solidificação do aço) são inicialmente aquecidos a temperaturas que variam de 1000 a 1200 °C ao passar por um forno de reaquecimento, construído com materiais refratários e isolantes e aquecido por meio de substâncias combustíveis, como o gás natural ou gás liquefeito de petróleo, conforme mostrado no esquema da Figura 4. Cada bobina de fio-máquina produzida corresponde a um tarugo introduzido no laminador, com massa ligeiramente inferior devido aos despontes da cabeça e da cauda (extremidades da barra) ao longo do processo.

Figura 4 – Processo de fabricação do fio-máquina por laminação a quente



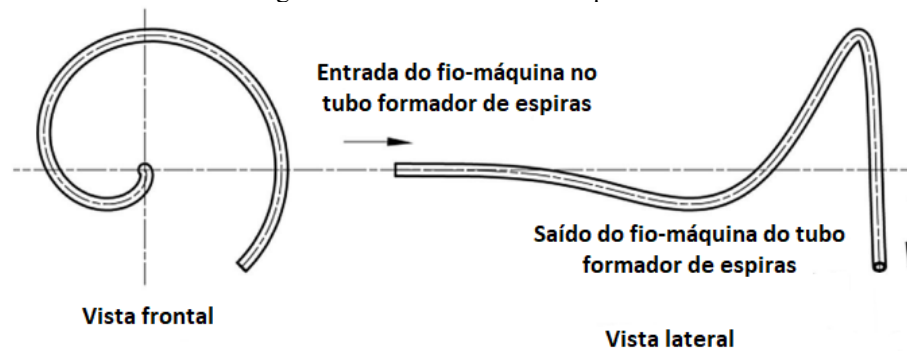
Fonte: Adaptado de Souza (2013).

O aumento da temperatura obtido no forno de reaquecimento tem a função de tornar o material suficientemente plástico para suportar as deformações que serão impostas durante as etapas de conformação mecânica, além de proporcionar a homogeneização da temperatura ao longo de sua seção transversal. O processo de conformação mecânica para a produção do fio-máquina ocorre em três etapas: trem de desbaste; trem médio ou intermediário; e bloco acabador.

Grandes reduções da seção transversal ocorrem durante a passagem do material pelo trem de desbaste, e as dimensões finais obtidas nesta etapa se equivalem para a produção de qualquer bitola a ser obtida na saída do processo. Na próxima etapa, denominada de trem médio ou intermediário, o material continua a ser comprimido pelos cilindros de laminação, diminuindo o seu diâmetro e aumentando o seu comprimento, e as diferentes regulagens para a obtenção das mais variadas bitolas de fio-máquina começam a aparecer. Na terceira e última etapa – denominada de bloco acabador – ocorre o dimensionamento final do fio-máquina através da passagem do material laminado por roletes de metal duro precisamente alinhados. No bloco acabador, a velocidade de laminação pode atingir valores tão altos quanto 90-120 m/s. É importante salientar que todo este processo acontece sem remoção de material, ou seja, a massa e o volume da peça laminada são mantidos constantes, desconsiderando-se as perdas mínimas que ocorrem devido à ocorrência de fenômenos de desgaste e corrosão.

Após sair do bloco acabador, o material passa pela zona de resfriamento, onde é imerso em caixas d'água com a função de homogeneizar e controlar a temperatura de entrada do material na próxima etapa. Na saída da zona de resfriamento, o material segue para o formador de espiras. O formador de espiras é um dispositivo composto por um tubo com formato de anzol que gira a uma velocidade compatível com a bitola que será produzida, formando uma espira circular de fio-máquina (Figura 5).

Figura 5 – Tubo formador de espiras



Fonte: Adaptado de Yao *et al.* (2019).

Em seguida, as espiras são carregadas por uma esteira que possui um sistema de ventilação forçada para resfriar e controlar a microestrutura final do fio-máquina. Este processo é conhecido como processo Stelmor® e foi desenvolvido na década de 1960 pela empresa canadense Steel Company of Canada (STELCO) e pela empresa americana Morgan Construction Company.

A obtenção de uma determinada velocidade de resfriamento do fio-máquina pode ser ajustada por meio do controle dos seguintes parâmetros: temperatura do fio-máquina no formador de espiras; velocidade da mesa transportadora (incluindo a variação de velocidade ao longo de mesas com subdivisões); e porcentagem da abertura dos ventiladores no sistema de ventilação (instalados sob a mesa transportadora).

Finalmente, as espiras são compactadas em prensas automáticas e amarradas, sendo armazenadas na forma de bobinas e estando prontas para processamentos posteriores, como, por exemplo, a produção de fios de aço CA-60 através de processos como a trefilação a frio. As etapas finais do processo de laminação a quente do fio-máquina podem ser melhor visualizadas por meio da Figura 6.

Figura 6 – Processo de produção do fio-máquina por laminação a quente (parte II)



Fonte: Adaptado de Souza (2013).

Segundo Souza (2013, p. 12):

Apesar de conceitualmente simples, os processos de laminação em geral se mostram muito complexos. Como o material em laminação está em alta temperatura (por volta dos 1000 °C), se faz necessário o arrefecimento contínuo de todos os equipamentos presentes no processo. Desta forma, um sistema complexo de bombeamento e de água é necessário. Além disso, a lubrificação dos cilindros de laminação e, principalmente, do bloco acabador, é imprescindível para garantir maior vida útil aos equipamentos e precisão dimensional do produto final.

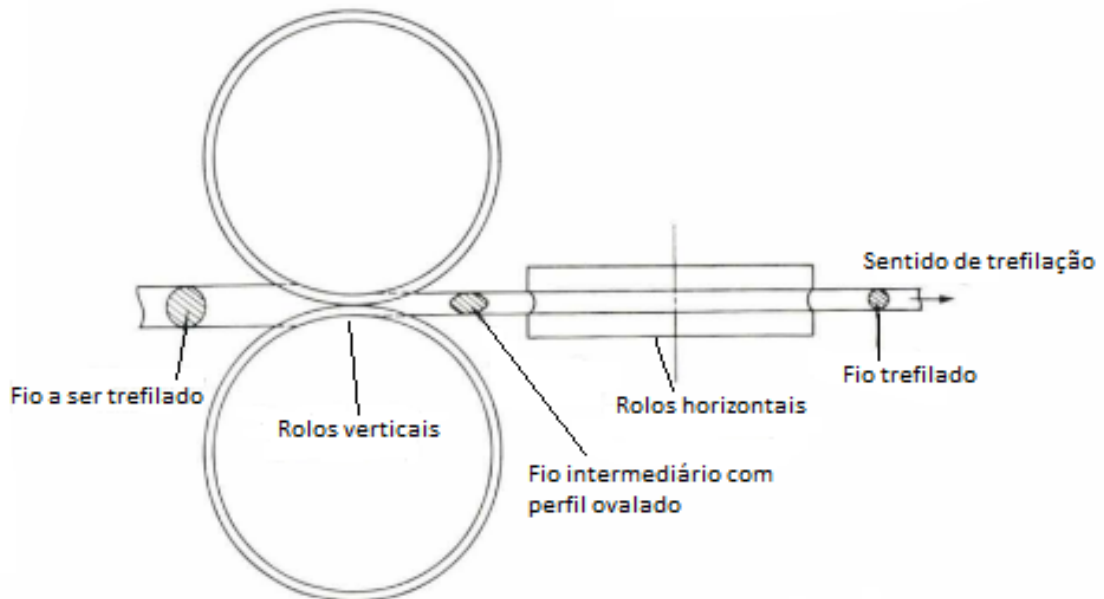
A utilização deste processo em larga escala se deve principalmente à sua alta velocidade de produção e às propriedades mecânicas homogêneas que podem ser obtidas ao longo do comprimento das bobinas de fio-máquina (França; Lima; Klug, 2015; Hissanaga, 2013; Miranda, 2021; Rocha, 2012; Souza, 2013; Yao *et al.*, 2019).

#### **2.4.2 Ferramental do processo de conformação a frio através da utilização de cassetes**

Alguns estudos têm sido reportados na literatura no que diz respeito à utilização de cassetes como alternativa à utilização das matrizes convencionais de feiras, tais como os já apresentados anteriormente no item 2.4. Esta técnica foi proposta inicialmente no início da década de 1960, quando Gokyū e Ōkubo (1964) desenvolveram o primeiro sistema de matriz de rolos da história, na tentativa de eliminar ou mitigar parte dos efeitos indesejáveis da utilização das matrizes de feira tradicionais. Este sistema era um dispositivo mecânico que consistia em dois pares de rolos: o primeiro par de rolos conferia ao fio uma seção transversal ovalada após o passe, e o segundo par de rolos a seção transversal circular final (Figura 7).



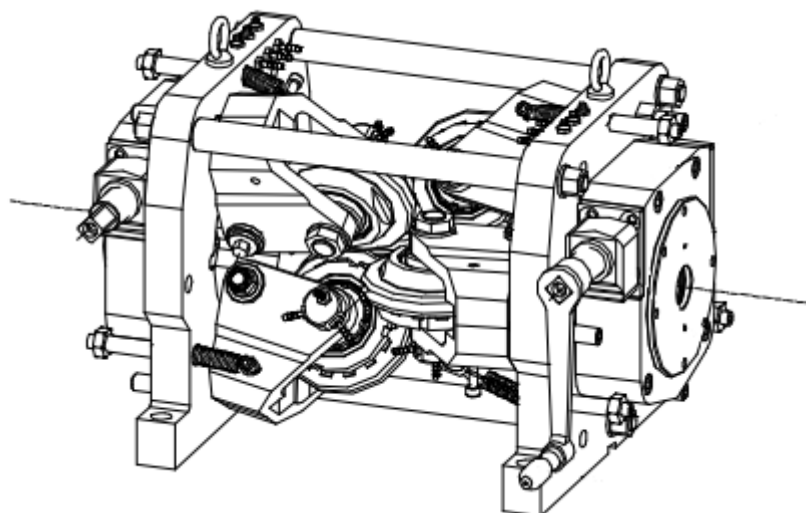
Figura 7 – Esquema dos passes de trefilação mostrando a seção transversal do produto após cada passe no primeiro sistema de matriz em rolos da história, desenvolvido em 1964 por Gokyū e Ōkubo



Fonte: Adaptado de Gokyū e Ōkubo (1964).

O termo “cassete” é utilizado para caracterizar o conjunto formado pelos rolos, mancais de rolamento, pinos de refrigeração, flanges e a carcaça de metal duro (Figura 8). Atualmente, pode-se encontrar cassetes trefiladores que apresentam de quatro a oito rolos no mercado.

Figura 8 – Exemplo de cassete utilizado nos processos de trefilação a frio



Fonte: Adaptado de ProMills (2013).

O mancal de rolamento (Figura 9) é a estrutura que conecta e suporta os rolos, e pode ser classificada em dois tipos: fixa ou intercambiável. Nos mancais fixos, não é possível ter-se acesso ao rolamento interno, evitando-se o acúmulo de poeiras que podem vir a afetar o seu desempenho no longo prazo. Esta blindagem, no entanto, inviabiliza a sua recuperação após o

fim de sua vida útil. Nos mancais intercambiáveis, é possível ter-se acesso aos rolamentos e retentores internos através de uma simples desmontagem do conjunto, e as peças gastas podem ser facilmente substituídas a qualquer momento.

Segundo Beraldi e Masiero (2012, p. 35): “Os mancais intercambiáveis normalmente apresentam um desempenho inferior quando comparado aos mancais fixos, cerca de 2/3 do rendimento”.

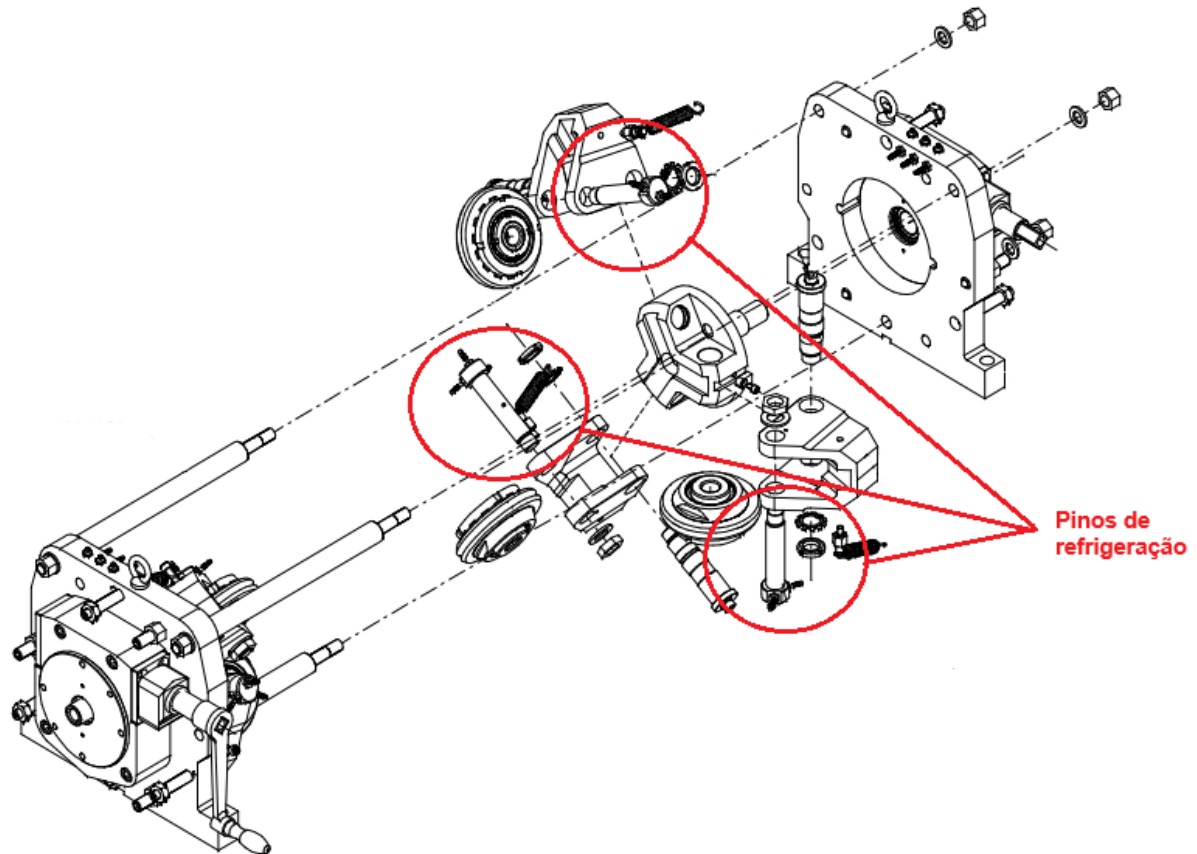
Figura 9 – Mancais rotativos: fixo (acima) e intercambiável (abaixo). Os rolos de metal duro são fixados aos mancais por uma porca de travamento



Fonte: ATOMAT (c2023).

Os mancais de rolamento e os rolos são unidos ao cassete através de peças de precisão denominadas “pinos de refrigeração”, responsáveis pelo direcionamento da refrigeração e da lubrificação do conjunto (Figura 10).

Figura 10 – Pino de refrigeração



Fonte: Adaptado de Wright (2016).

De tempos em tempos, é necessário que se faça a lubrificação dos mancais de rolamento para que não ocorra falta de graxa, o que pode levar ao travamento do mancal durante o processamento do material. De acordo com Beraldi e Masiero (2012, p. 35):

A graxa indicada por alguns fabricantes para esse tipo de trabalho é DIN 51502 KP2K-20, e a lubrificação recomendada é de oito em oito horas de trabalho, dependendo do tipo de mancal e tipo de cassette utilizado.

É de suma importância que a graxa utilizada para a lubrificação dos mancais de rolamento possua uma excelente resistência a altas temperaturas, pois o calor gerado durante o processo devido ao atrito dos rolos com o material trefilado pode afetar fortemente a viscosidade da graxa. Ainda que o sistema de refrigeração esteja em pleno funcionamento, uma vez que a graxa se tornar líquida o suficiente, a elevada velocidade de rotação dos rolos faz com que ela esguiche para fora do conjunto, reduzindo a capacidade lubrificante e contaminando o restante do equipamento.

A flange é a estrutura responsável por posicionar e dar sustentação (rigidez) aos conjuntos formados pelos pinos de refrigeração, mancais de rolamento e rolos de metal duro.

Estes conjuntos de peças são dispostos a 120° entre si nas extremidades da flange, formando a estrutura conhecida como cassette. Em alguns modelos de cassetes, a flange também tem a função de afastar e aproximar os rolos. Em cassetes desse tipo, o ajuste é realizado através de uma porca traseira que permite a movimentação do conjunto de rolos (Beraldi; Masiero, 2012).

Os rolos são produzidos a partir de um material compósito formado por pequenas partículas ou grãos de Carbetto de Tungstênio (WC) que possuem apenas alguns  $\mu\text{m}$  de diâmetro e que são responsáveis pelo aumento da dureza e da resistência ao desgaste abrasivo. Estas partículas estão envoltas em uma matriz de cobalto (Co), que, por sua vez, é responsável por conferir um aumento da tenacidade do material compósito. Essa formulação foi desenvolvida no início do século XX, na Alemanha, e possui como característica importante uma excelente resistência ao choque térmico. Sua produção envolve a compactação do pó de WC + pó de Co, junto com um ligante como a parafina. A peça é então sinterizada em temperaturas da ordem de 1400 °C para que haja a remoção do ligante e o aumento da resistência mecânica (Wright, 2016).

Cada rolo é desenvolvido de forma a atender às diferentes necessidades da indústria, levando-se em consideração o processo de fabricação utilizado e a seção transversal desejada para o produto trefilado, podendo esta ser quadrada, ovalada, redonda ou redonda nervurada – como é o caso dos fios de aço CA-60 (Figura 11) –, dentre outras (Beraldi; Masiero, 2012).

Figura 11 – Perfil (seção transversal) redondo nervurado característico dos fios de aço da categoria CA-60



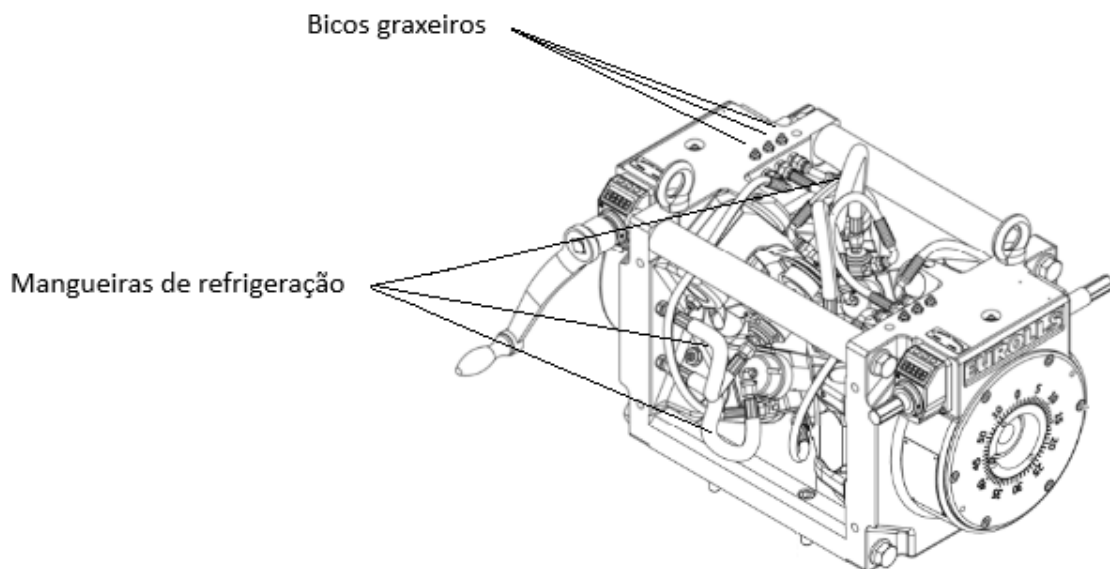
Fonte: ArcelorMittal (c2023).

Os cassetes foram desenvolvidos justamente para mitigar os efeitos indesejáveis do atrito gerado durante a passagem do fio em contato com a ferramenta (feira tradicional). Os cassetes reduzem significativamente a velocidade relativa entre a superfície do fio e a ferramenta, visto que os rolos giram livremente em torno de seu próprio eixo à medida que o fio é tracionado, ao contrário das feiras tradicionais que são fixadas na estrutura do

equipamento. Com a redução do atrito, é possível alcançar velocidades de produção muito superiores às velocidades obtidas nos processos convencionais, possibilitando, desta forma, um ganho significativo de produtividade ao optar-se pela utilização de cassetes. Além do ganho de produtividade, a redução do atrito na interface aço-ferramenta proporciona uma economia no consumo de energia durante o processo de deformação (David; Almeida; Fernandes, 2013; El-Amine; Larsson; Pejryd, 2018).

O atrito gerado devido à velocidade relativa entre a superfície do fio e a ferramenta, em conjunto com o escorregamento dos planos cristalinos do aço, contribuem para a geração de calor no processo e aceleram o desgaste da superfície dos rolos de WC, além de reduzirem a tensão limite de escoamento e de resistência do fio, fazendo com que ele se torne susceptível a quebras devido à ação das forças trativas presentes no processo. Sendo assim, a necessidade de um sistema de refrigeração capaz de extrair o calor do processo e de um sistema de lubrificação que reduza o coeficiente de atrito entre as superfícies dos rolos de WC e do fio torna-se imperativas. Os cassetes modernos possuem sistemas de lubrificação e refrigeração integrados, possibilitando, dessa forma, a substituição das feiras tradicionais (Figura 12) (Beraldi; Masiero, 2012; Enghag, 2009 *apud* Fernandes, 2018).

Figura 12 – Sistema de lubrificação e refrigeração integrado dos cassetes



Fonte: Adaptado de Eurolls (2018).

Outra grande vantagem de se realizar a trefilação com cassetes em relação à matriz de feira tradicional é a sua maior vida útil. Isso ocorre porque quando há um desgaste na matriz de feira, obrigatoriamente ela terá que ser substituída por outra feira com o mesmo diâmetro

inicial para que se possa ter a continuidade do processo. A feira desgastada poderá ser usinada e reaproveitada, porém somente para medidas de diâmetros de saída maiores que o original. Já no caso da utilização dos cassetes, quando a medida do diâmetro de saída do fio começa a aumentar devido ao desgaste da ferramenta, existe a possibilidade de se realizar uma regulagem no próprio equipamento que promove a aproximação dos rolos. Com isso, pode-se ter uma maior utilização das peças sem que haja a necessidade de substituição destas ou da paralisação da máquina para esse ajuste (Beraldi; Masiero, 2012).

A produção de fios de aço CA-60 empregando-se cassetes trefiladores parece oferecer muitas vantagens, e está crescendo o interesse da indústria por este processo, como pode ser visto pelo aumento da disponibilidade de modelos de cassetes disponíveis no mercado, que podem variar de acordo com alguns parâmetros, como: processo de trabalho; procedimentos operacionais; bitolas finais desejadas; velocidade de trefilação; altura do fio em relação à base da máquina, entre outros. Esses cassetes podem ser adaptados às máquinas trefiladoras com uma simples substituição da caixa de feira. Em algumas situações, podem ser necessárias pequenas adaptações na máquina trefiladora para que o cassete possa ser alinhado perfeitamente e fique exatamente na mesma altura que a antiga matriz de feira, de modo a possibilitar a substituição de um sistema pelo outro. Esta adaptação, no entanto, é muito simples e consiste basicamente na confecção de uma nova base para o cassete, não sendo necessárias grandes alterações no projeto original do equipamento (Beraldi; Masiero, 2012; El-Amine; Larsson; Pejryd, 2018).

Em contrapartida, o processo de trefilação com cassetes possui uma elevada complexidade devido aos seus componentes necessitarem de cuidados especiais. Os rolamentos dos rolos de WC, por exemplo, necessitam de lubrificação especial e só desempenham a sua função de forma satisfatória dentro de uma faixa estreita de temperatura. Mesmo dentro das faixas normais de temperatura da operação, os rolos podem chegar a operar entre 80 e 130°C, dependendo do tipo de máquina, da condição dos sistemas de refrigeração e lubrificação e do plano de passes de deformação utilizado. Esses e muitos outros detalhes também implicam na necessidade de uma mão de obra especializada para realizar as montagens, as regulagens, os ajustes e as manutenções nos cassetes (David; Almeida; Fernandes, 2013).

Diversos trabalhos publicados sugerem que a adoção desta tecnologia é uma alternativa interessante frente ao método tradicional. Em artigo publicado por El-Amine, Larsson e Pejryd (2018), uma revisão bibliográfica com os trabalhos mais relevantes publicados nos últimos anos – assim como seus principais resultados – é apresentada. Os autores, no entanto, esclarecem que apesar da existência de vários estudos favoráveis à utilização dos cassetes, ainda existem algumas inconsistências e resultados contraditórios na literatura.

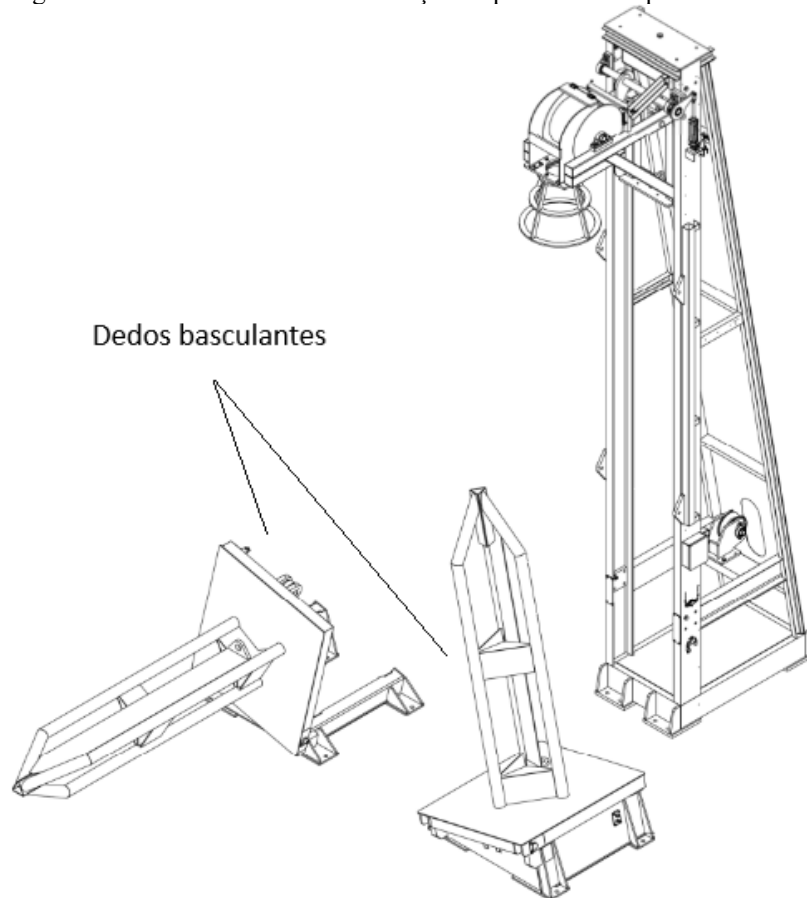
### 2.4.3 Etapas do processo de fabricação

O processo de fabricação de bobinas de fios de aço CA-60, utilizando-se cassetes trefiladores, pode ser dividido em 6 etapas, que serão apresentadas a seguir.

#### 2.4.3.1 Etapa 1: Estação de partida

Esta primeira etapa do processo consiste basicamente em alimentar a máquina com a matéria-prima (fio-máquina). A estrutura denominada de estação de *payoff* ou “estação de partida”, em tradução livre, é composta por um par de dedos basculantes (Figura 13) – responsáveis pela acomodação das bobinas de fio-máquina – e uma torre de desbobinamento vertical. Os dedos basculantes podem se flexionar em até aproximadamente 90° através da ação de um sistema hidráulico acoplado ao conjunto, e a matéria-prima é então inserida com o auxílio de sistemas de içamento de cargas, como, por exemplo, talhas elétricas ou empilhadeiras.

Figura 13 – Dedos basculantes na estação de partida da máquina trefiladora



Fonte: Adaptado de Schnell (2019).

Em seguida, o fio-máquina passa através de uma série de roldanas e roletes que ajudam a guiar o material até o início do processo.

#### 2.4.3.2 Etapa 2: Decapagem mecânica

Durante o processo de laminação a quente, as espiras de fio-máquina reagem com o oxigênio presente na atmosfera para formar óxidos superficiais, tais como a wustita ( $\text{FeO}$ ), a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Estes óxidos são extremamente duros e quebradiços, e as suas formações estão diretamente relacionadas à temperatura final do processo de laminação a quente, à temperatura de reaquecimento do tarugo, à velocidade de laminação, ao tipo de resfriamento e ao diâmetro inicial do fio-máquina. Os óxidos superficiais – também denominados de carepa – também podem evoluir naturalmente a partir de processos de corrosão eletroquímica (Fernandes, 2018).

A presença de óxidos superficiais no fio-máquina torna impraticável o processamento deste material nas máquinas de trefilação. A camada superficial de óxido (ou carepa) deve ser eliminada em função do aumento do atrito gerado com o ferramental. O atrito, na maioria das vezes, provoca efeitos indesejáveis aos processos de conformação mecânica, como, por exemplo: alteração do estado de tensões presentes durante a deformação; produção de fluxos irregulares, como detritos (limalha) de metal durante o processo de conformação, surgimento de tensões residuais no produto trefilado; influência sobre a qualidade superficial; elevações de temperatura capazes de comprometer as propriedades mecânicas do produto trefilado; aumento do desgaste do ferramental; “agarramento” do metal conformado nas ferramentas de conformação; aumento do consumo energético, com a consequente diminuição da eficiência do processo, dentre outros. Além disso, busca-se também promover a obtenção de uma superfície que retenha eficientemente o lubrificante para diminuir todos esses efeitos. Sendo assim, surge a necessidade de uma etapa de decapagem para que o material esteja preparado para sofrer as reduções necessárias (Fernandes, 2018; Pinto, 2016; Wright, 2016).

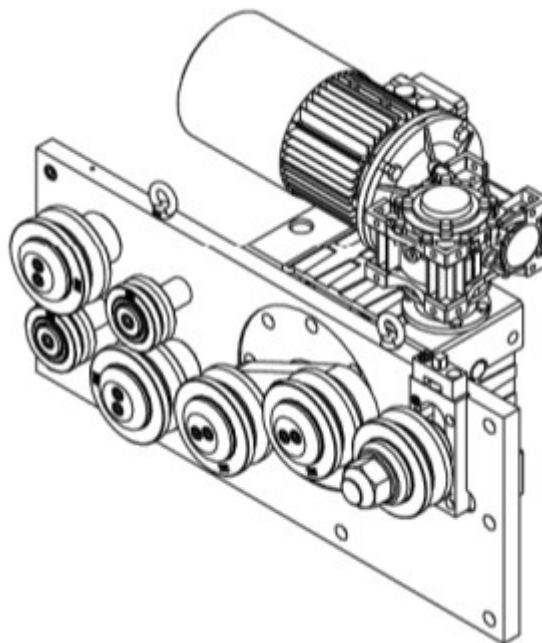
Existem basicamente dois tipos de decapagem: a mecânica e a química. A decapagem química consiste na utilização de soluções ácidas para a dissolução dos óxidos presentes na superfície do fio-máquina, mas tem caído cada vez mais em desuso devido ao surgimento de novas legislações ambientais e aos altos custos impostos pelo tratamento dos resíduos (efluentes) gerados no processo. Os ácidos utilizados neste processo precisam ser neutralizados antes de serem descartados na natureza, e os íons ferrosos dissolvidos devem ser removidos por meio de um tratamento de floculação. Os custos associados à construção de estações de tratamento de



efluentes robustas para o correto tratamento desse resíduo dificultam a competitividade das indústrias que optam por este processo de decapagem (Pereira, 2019; Silva, 2011).

A decapagem mecânica pode se dar através da flexão alternada em roldanas e roletes, jateamento de granalhas de aço e lixas e/ou escovas rotativas. A decapagem mecânica por flexão alternada é o processo mais utilizado atualmente pela indústria. A bobina do fio-máquina atravessa um conjunto de roldanas e/ou roletes horizontais e verticais, zigzagueando entre eles e rompendo a carepa superficial de elevada dureza por meio da ação dos esforços de flexão alternados em direções diferentes (Figura 14). Os resíduos são armazenados em uma caixa coletora para que sejam descartados de forma apropriada posteriormente. A escolha do diâmetro das roldanas e dos roletes é de extrema importância para garantir que haja deformação plástica suficiente nas fibras superficiais do fio-máquina, de modo a romper a camada de óxidos, variando de acordo com o diâmetro do fio-máquina que está sendo trefilado (Fernandes, 2018; Ferreira, 2010 *apud* Pereira, 2019).

Figura 14 – Conjunto de roldanas e roletes da unidade de decapagem mecânica



Fonte: Adaptado de Schnell (2019).

A decapagem por escovas ou lixas rotativas é um processo abrasivo complementar à decapagem por flexão alternada. Os particulados de óxido de ferro gerados durante a decapagem por flexão alternada podem continuar aderidos à superfície do fio-máquina após a passagem pelas roldanas e/ou roletes de flexão, mesmo com o uso de ventiladores de sucção. Dessa forma, a utilização de escovas ou lixas rotativas ajuda a eliminar essas partículas de óxido que permanecem no fio após a passagem pelo sistema de decapagem mecânica por flexão alternada e, conseqüentemente, as transformam em um particulado mais refinado (Fernandes, 2018).

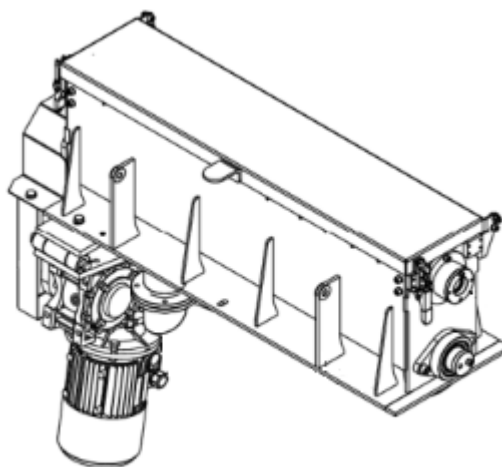
### 2.4.3.3 Etapa 3: Lubrificação na caixa de sabão

Com o intuito de reduzir o atrito e, conseqüentemente, o esforço necessário para deformar o material, é imprescindível que uma boa condição de lubrificação seja garantida durante o processo. O uso do lubrificante facilita o deslizamento do fio entre as roldanas, rolos, cabrestantes, e demais componentes mecânicos da máquina de trefilação, aumentando a vida útil do ferramental.

O lubrificante utilizado no processo de trefilação a frio é armazenado em um recipiente conhecido como caixa de lubrificação (Figura 15), que é atravessado pelo fio-máquina decapado antes de prosseguir para a etapa de deformação. Durante a passagem do fio pela caixa de lubrificação, pode ocorrer a formação de um espaço vazio (túnel) ao redor de sua superfície, prejudicando o arraste do lubrificante. Este fenômeno é conhecido como tunelamento (Azevedo, 2016).

Para contornar este tipo de situação, são utilizados dispositivos de agitação mecânica helicoidais, que têm a função de misturar e homogeneizar o pó, evitando-se que se formem aglomerados densos de material, a exemplo do que acontece com outras substâncias (sais) higroscópicas, como o sal de cozinha (NaCl). O uso destes dispositivos é de extrema importância, especialmente nos primeiros passes de trefilação e nos processos que têm o fio-máquina decapado mecanicamente como material de entrada, que possui superfície irregular e excesso de defeitos superficiais, características que contribuem para o surgimento de forças de atrito no processo.

Figura 15 – Caixa de lubrificação



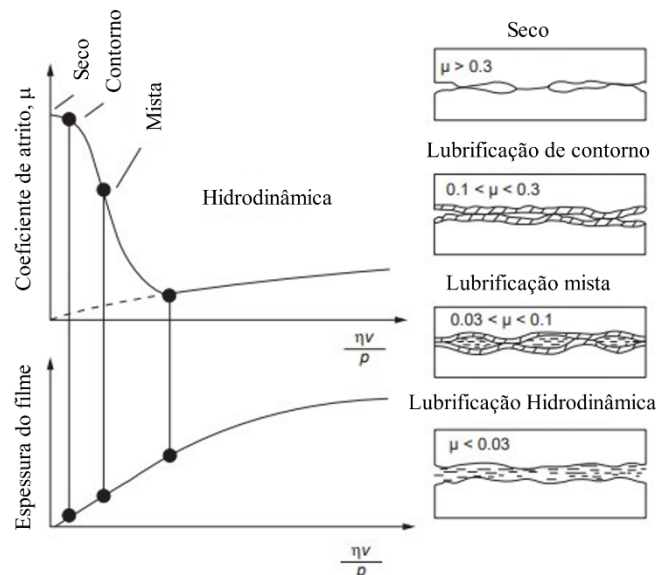
Fonte: Adaptado de Schnell (2019).

Devido à redução da velocidade relativa entre o fio-máquina e o ferramental em relação ao processo de trefilação convencional, apenas uma pequena quantidade de sabão (lubrificante) é requerida no processo de trefilação, empregando-se cassetes. Geralmente, esta etapa ocorre somente antes do primeiro passe de deformação, não sendo necessário lubrificar o fio-máquina novamente nas etapas de deformação posteriores (Enghag, 2009 *apud* Fernandes, 2018).

Os lubrificantes utilizados no processo de trefilação de aços com baixo teor de carbono geralmente tratam-se de partículas sólidas, produzidas a partir de sabões à base de cálcio (Ca) ou sódio (Na) que são misturadas com outros aditivos. Durante a operação de trefilação, a pressão e o calor fazem com que o sabão assuma uma consistência pastosa e, sendo assim, forma-se uma fina camada plástica de lubrificante entre a superfície do fio e a superfície dos rolos de WC. Os lubrificantes líquidos não são adequados para trefilar os fios de aço CA-60, pois as altas pressões e temperaturas envolvidas no processo fazem com que este tipo de lubrificante se degrade, evitando-se que ele cumpra o seu papel de reduzir as forças de atrito à medida que o fio avança através da ferramenta (Larsson; Jansson; Karlsson, 2019; Prisco, 2018).

As curvas de Stribeck demonstram que a espessura da camada de lubrificante e o coeficiente de atrito do sistema são funções do número de Hersey (Figura 16) (Ngaile; Lowrie, 2017).

Figura 16 – Curva de Stribeck exibindo uma dependência genérica do coeficiente de atrito e da espessura da camada residual de lubrificante com o número de Hersey



Fonte: Adaptado de Ngaile e Lowrie (2017).

No gráfico da parte inferior da Figura 16, pode-se perceber que a espessura da camada residual de sabão aumenta à medida que o número de Hersey ( $\eta v/P$ ) também aumenta, em que

“ $\eta$ ” é a viscosidade do sabão e “ $v$ ” e “ $P$ ” são a velocidade relativa da interface (velocidade de trefilação) e pressão da matriz de conformação, respectivamente. Em um determinado intervalo para os valores ( $\eta v/P$ ), a espessura da camada residual de sabão aumenta rapidamente e, portanto, uma alteração significativa no desempenho do lubrificante em uma determinada faixa de velocidades de trefilação pode ser esperada.

Na parte superior da Figura 16, pode ser observada uma expressiva redução do coeficiente de atrito a partir da obtenção da condição de lubrificação hidrodinâmica. A separação completa das superfícies reduz bastante o desgaste do ferramental e a incidência de possíveis quebras por aderência do material à superfície da ferramenta. No entanto, uma das desvantagens do regime de lubrificação hidrodinâmica é o aumento da rugosidade da superfície do produto, que impede a criação de uma superfície brilhante. Todavia, este efeito pode ser desprezado para a produção dos fios de aço CA-60 destinados a armaduras de concreto armado (Ngaile; Lowrie, 2017).

Finalmente, no que diz respeito à relação  $\eta v/P$ , deve-se notar que a pressão da matriz tem um efeito deletério na espessura da camada residual de lubrificante e, conseqüentemente, no coeficiente de atrito do sistema, que aumenta à medida que a espessura da camada residual de lubrificante diminui. Por esta razão, a variável “ $P$ ” está no denominador da fórmula do número de Hersey, haja vista que valores altos para o número de Hersey estão associados a camadas residuais de lubrificante de espessuras relativamente grandes e, portanto, a regimes de lubrificação mais favoráveis. Apesar disso, a pressão da matriz também tem um efeito indireto na relação  $\eta v/P$ , pois possui uma relação exponencial com a viscosidade do lubrificante. Ademais, um aumento da temperatura associado ao aumento da velocidade de trefilação também pode diminuir a viscosidade  $\eta$  do lubrificante, e esta diminuição pode compensar pelo menos uma parte do efeito de um dado aumento em  $v$ , de modo que o aumento global em  $\eta v/P$  é reduzido (Lowrie; Ngaile, 2016; Ngaile; Lowrie, 2017; Wright, 2016).

Figura 17 – Exemplo de lubrificantes utilizados no processo de trefilação com cassetes



Fonte: CONDAT (2024).

Segundo Sousa, Rosa Filho e Moura (2013), a formação da camada de sabão necessária a uma boa lubrificação depende em grande parte de suas propriedades físicas e químicas. Os autores avaliaram a eficiência de diferentes lubrificantes e diferentes condições operacionais através da análise de quatro parâmetros: temperatura antes e depois da lubrificação; percentual de redução antes da lubrificação; posição da caixa secundária e tipo de sabão utilizado; e residual de sabão sobre o fio ( $\text{g}/\text{m}^2$ ).

A granulometria do sabão é outro parâmetro que afeta a eficiência dos lubrificantes. De acordo com Prisco, Santana Martinez e Kabayama (2020), os lubrificantes em pó com granulometria grosseira prejudicam a formação de uma camada de lubrificação contínua ao longo de toda a superfície do fio, dando origem a pontos localizados de delaminação da camada de revestimento lubrificante. Conforme o tamanho das partículas de pó é reduzido, a formação de uma camada de lubrificante ao longo de toda a extensão da superfície é facilitada, evitando-se assim um local de “contato seco” entre o fio e a ferramenta (Byon *et al.*, 2011 *apud* Prisco; Santana Martinez; Kabayama, 2020).

#### 2.4.3.4 Etapa 4: Cassetes trefiladores e blocos de tração

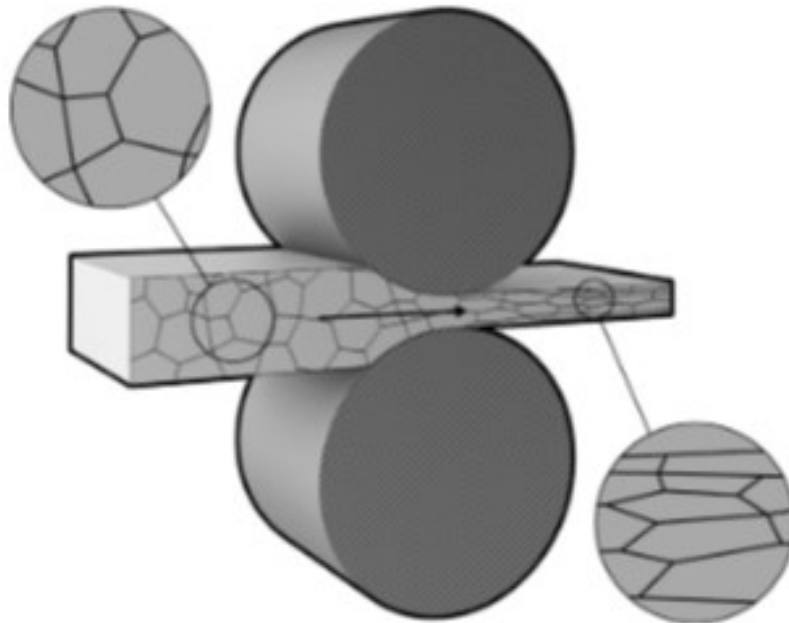
Nesta etapa ocorre a deformação do material propriamente dita. O material passa através do conjunto de rolos de WC e tem a sua seção transversal reduzida e o seu comprimento aumentado.

Como o processo de deformação ocorre a frio, ou seja, abaixo da temperatura de recristalização do material, este é encruado e tem as suas propriedades de resistência mecânica aumentadas e a sua ductilidade reduzida. Existe a possibilidade, em alguns casos, da realização de tratamentos térmicos intermediários entre os passes de deformação para restaurar a

ductilidade e viabilizar a continuidade do processo ou a obtenção do produto final sem que haja a quebra prematura do material (Pereira, 2019).

Os metais que sofrem grandes quantidades de deformações tendem a desenvolver uma “textura cristalográfica”, ou seja, uma orientação espacial preferencial dos grãos que compõem a microestrutura, em que certos planos cristalográficos tendem a se alinhar com a direção de máxima deformação. Os aços baixo carbono, constituídos essencialmente por grãos poligonais de ferrita, são um ótimo exemplo disso. O processo de trefilação a frio com cassetes promove o alongamento dos grãos, de modo similar ao que ocorre nos processos de laminação a frio (Figura 18). Quanto maior a redução de área no passe, mais alongados ficam os grãos (Souza, 2013).

Figura 18 – Microestrutura de grãos alongados após o passe de laminação a frio

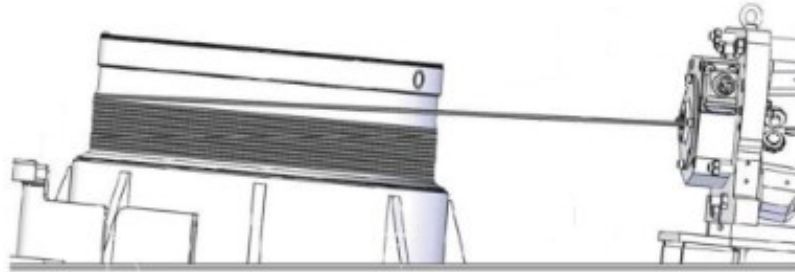


Fonte: Adaptado de Manufacturing Guide (c2023).

O fio-máquina é conduzido através dos rolos de WC por meio da ação do cabrestante (Figura 19), dispositivo responsável pela tração do material. Este dispositivo está acoplado a um motor elétrico e gira livremente em torno de seu próprio eixo. O cabrestante (mais conhecido como bloco de tração) também tem a função de refrigerar o fio, dissipando o calor gerado pelo atrito com o ferramental durante o processo. A parte interna dos blocos é percorrida com água refrigerada por meio de um sistema de tubulação interligado a uma torre de resfriamento. Quanto maior o número de espiras do fio em contato com o bloco, melhor será a troca térmica. A Figura 20 mostra, esquematicamente, a força de deformação trativa

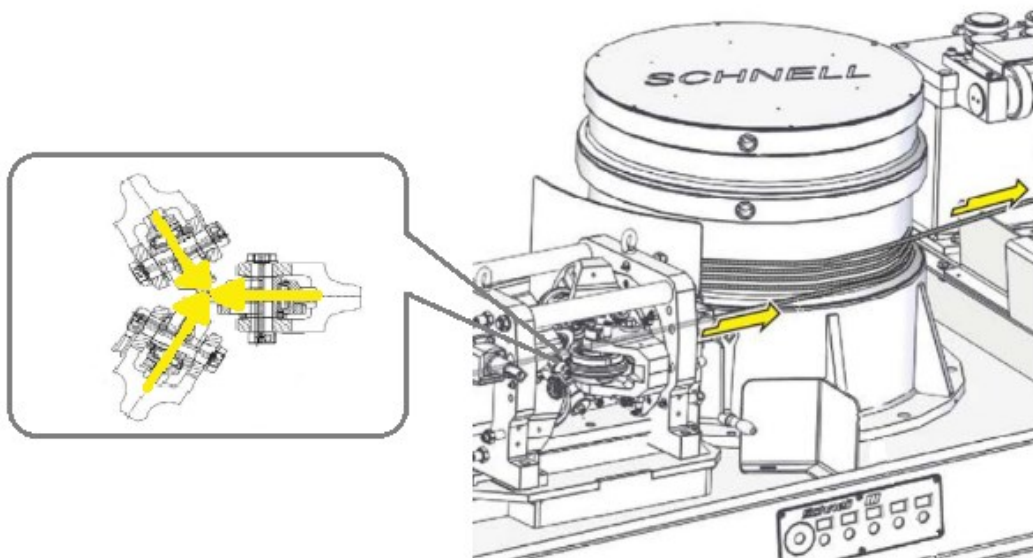
dos fios exercida pelos blocos de tração e a força de deformação compressiva exercida pelos rolos de WC.

Figura 19 – Cabrestante (bloco de tração) responsável pelo tracionamento do fio durante o processo de trefilação



Fonte: Adaptado de Schnell (2019).

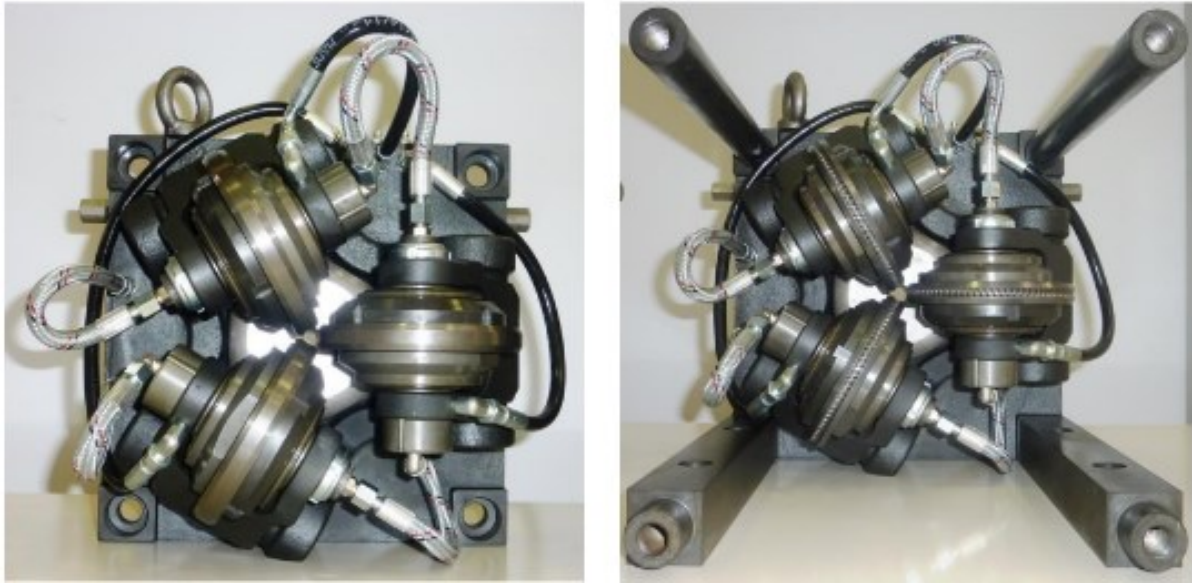
Figura 20 – Forças de compressão exercidas pelos rolos e força trativa exercida pelo cabrestante representadas pelas setas amarelas



Fonte: Adaptado de Schnell (2019).

Conforme visto anteriormente, no processo de fabricação dos fios de aço CA-60 pode ser utilizado mais de um conjunto de cassetes trefiladores, sendo sempre o último cassete o responsável pela impressão da nervura no produto (Figura 21). Para cada cassete da máquina, há também um bloco de tração correspondente.

Figura 21 – Trio de rolos de entrada (esquerda) e trio de rolos nervurados de saída (direita) do último passe de deformação (cassete acabador)



Fonte: Adaptado de ProMills (2013).

O controle da velocidade de um bloco se estrutura em função da velocidade do bloco ligeiramente anterior, ou então da velocidade de desbobinamento do fio-máquina (caso este seja o primeiro bloco) e também da redução do diâmetro no passe. De acordo com a Lei da Constância de Volumens, como a deformação nos processos de conformação mecânica é muito grande, pode-se considerar que o volume do material permanece constante durante a deformação. Sendo assim, à medida que o material é tracionado na direção de deformação principal, sua seção transversal é reduzida. Isso implica em um aumento da velocidade do fio em relação aos passes de deformação anteriores, de modo que o fluxo de material se mantenha constante em todos os pontos do processo.

Caso um dos blocos esteja muito mais rápido que o bloco ligeiramente anterior a ele, haverá tracionamento excessivo do fio, podendo resultar no seu rompimento. Por outro lado, caso um dos blocos esteja muito mais lento que o bloco ligeiramente anterior a ele, poderá haver acúmulo de material entre os dois blocos.

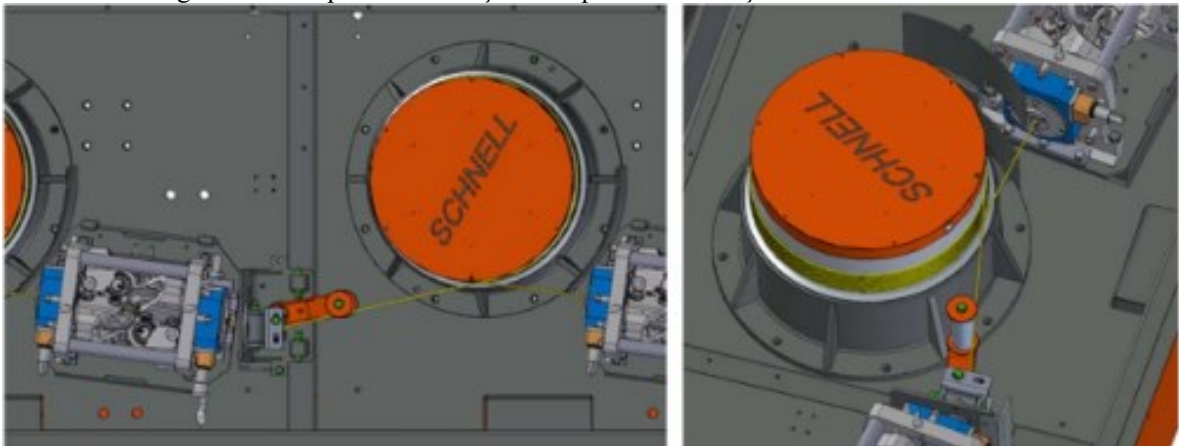
O desgaste abrasivo dos rolos ao longo do tempo pode alterar as dimensões de saída do fio-máquina após cada passe de deformação. A consequente variação da velocidade do fio, caso não seja controlada, pode impedir a continuidade do processo se os rolos não forem substituídos ou não tiverem o seu espaçamento ajustado de modo a permitir o escoamento da mesma quantidade de material projetada quando da determinação da velocidade dos blocos.

Para controlar a relação entre a velocidade dos diferentes blocos, foram desenvolvidas máquinas cumulativas nas quais o aumento ou a redução do número de espiras em cada bloco



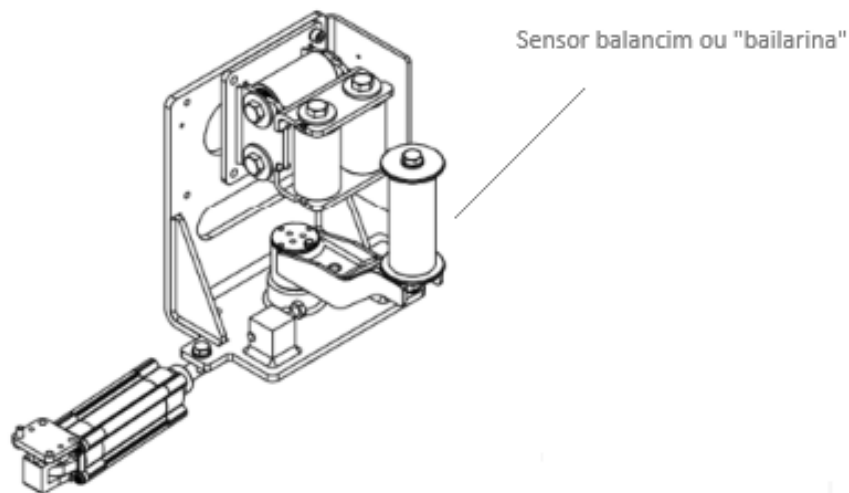
sinalizava ao operador a necessidade ou não de se ajustar a velocidade. Mais recentemente, máquinas não cumulativas com braços de controle ou “bailarinas” entre os blocos foram desenvolvidas. O sentido do fio nessas máquinas durante o processo de deformação é sempre horizontal, e o controle da velocidade dos blocos é feito por meio de sensoriamento, no qual os braços articulados ou “bailarinas” controlam o tracionamento do material (Figuras 22 e 23) (Fernandes, 2018).

Figura 22 – Máquina de trefilação multipasses com braços de controle articulados



Fonte: Adaptado de Schnell (2019).

Figura 23 – Detalhamento do braço de controle articulado ou “bailarina”



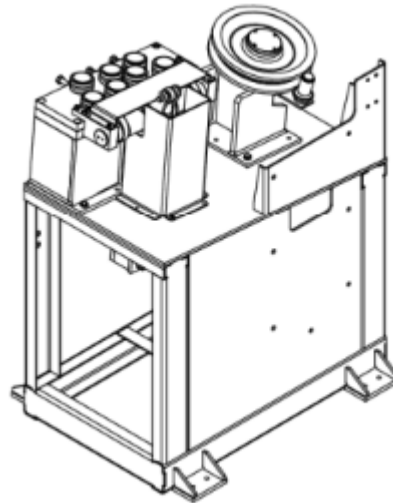
Fonte: Adaptado de Schnell (2019).

#### 2.4.3.5 Etapa 5: Dispositivo de alívio de tensões

A fim de garantir o valor mínimo de 1,05 para a relação elástica (LR/LE) exigido pela norma ABNT NBR 7480, na saída do equipamento existe ainda um dispositivo de alívio de tensões (Figura 24) capaz de reduzir a tensão limite de escoamento e a tensão limite de

resistência do material, logo após os fios de aço CA-60 passarem por todos os blocos de deformação. Este dispositivo foi desenvolvido com base no princípio do efeito Bauschinger, no qual um conjunto de roldanas aplica esforços cíclicos de flexão sobre o fio trefilado, causando um rearranjo das discordâncias e restaurando a ductilidade de fios submetidos a altas taxas de deformação a frio. Apesar de o efeito Bauschinger ser considerado deletério para as propriedades mecânicas dos materiais na maioria dos casos, nesse contexto, especificamente, pode-se obter bons resultados a partir de sua aplicação controlada.

Figura 24 – Dispositivo de alívio de tensões



Fonte: Adaptado de Schnell (2019).

Este simples dispositivo tem a capacidade de contornar a necessidade de tratamentos térmicos de alívio de tensões, que demandam bastante tempo e energia, além de apresentar um impacto ambiental significativo devido à queima de combustíveis fósseis como o gás natural, ou à utilização de chumbo líquido como fonte de energia térmica para aquecer o fio (Enghag, 2009 *apud* David *et al.*, 2023).

Em estudo realizado por Vasconcelos e David (2021), um fio de aço ASTM A1040 classe 1006, de diâmetro 1,29 mm, foi submetido ao processamento em um dispositivo de alívio de tensões. Os resultados exibiram uma redução expressiva de 13,5% (-114,4MPa) da tensão limite de escoamento e de 5,1% (-46,9MPa) da tensão limite de resistência à tração do material trefilado. A relação elástica e o alongamento também tiveram um aumento substancial, 10,2% e 40,1%, respectivamente.

Leonardo Marmentin (2016) também avaliou a influência do efeito Bauschinger na tensão limite de escoamento de um material ABNT 1013 trefilado a frio. A distância entre as roldanas do dispositivo de alívio de tensões empregado foi variada, e os corpos de prova retirados foram

submetidos a um ensaio de tração uniaxial para a obtenção das propriedades mecânicas do material. Os resultados comprovaram a capacidade do dispositivo de alterar (reduzir), mecanicamente, após os passes de redução, a tensão limite de escoamento do produto trefilado.

Apesar de os fios de aço CA-60 serem processados “a frio”, uma quantidade considerável de energia em forma de calor é gerada a partir das deformações impostas sobre o material durante o seu processamento. Estas temperaturas podem chegar a valores tão altos quanto 184 °C para aços com baixo teor de carbono, mesmo com sistemas de refrigeração embarcados. Este aumento de temperatura pode se tornar um problema à medida que provoca um fenômeno conhecido por envelhecimento estático, que está relacionado com a precipitação de átomos intersticiais ao redor das discordâncias. Essa atmosfera de átomos de soluto promove a ancoragem do movimento relativo das discordâncias, também conhecida como “atmosfera de Cottrell”, em homenagem à descoberta de A. H. Cottrell e B. A. Bilby em 1949, levando a um aumento da tensão limite de escoamento (Cardoso; Silva, 2015).

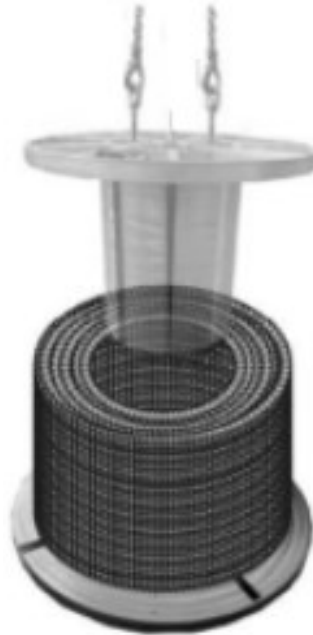
David *et al.* (2016) estudaram o efeito do envelhecimento estático a 100 °C em aços com baixo teor de carbono (ASTM 1013) e aços microligados com Ni (ASTM A913), variando-se o tempo de encharcamento de 5 a 60 minutos. Os resultados mostraram um aumento da tensão limite de escoamento dos materiais na ordem de 2,1% a 5,1%.

Sendo assim, é de fundamental importância que a temperatura de resfriamento dos blocos de tração (cabrestantes) seja constantemente monitorada a fim de garantir uma troca térmica eficiente entre estes dispositivos e os fios de aço CA-60 que estão sendo processados, evitando-se fenômenos indesejados, como o envelhecimento estático durante o período de estocagem, que pode afetar a ductilidade (relação LR/LE) do material, além de aumentar a vida útil do ferramental. Além disso, a vazão do fluido dentro do sistema também pode afetar a eficiência da troca térmica. Portanto, é fundamental atender às exigências e requisitos informados pelo fabricante do equipamento e monitorar estes parâmetros de modo a assegurar um maior controle sobre o processo e a qualidade do produto trefilado.

#### 2.4.3.6 Etapa 6: Bobinamento do carretel de fios de aço CA-60

Após ter passado por todos os passes de deformação nos cassetes trefiladores, os fios de aço CA-60 nervurados são bobinados novamente em uma estrutura metálica conhecida como carretel (Figura 25) para que possam ser comercializados ou processados novamente para a produção de outros produtos destinados à construção civil, tais como os mencionados ao final do item 2.3.1.

Figura 25 – Carretel de bobinamento dos fios de aço CA-60



Fonte: Adaptado de Schnell (2019).

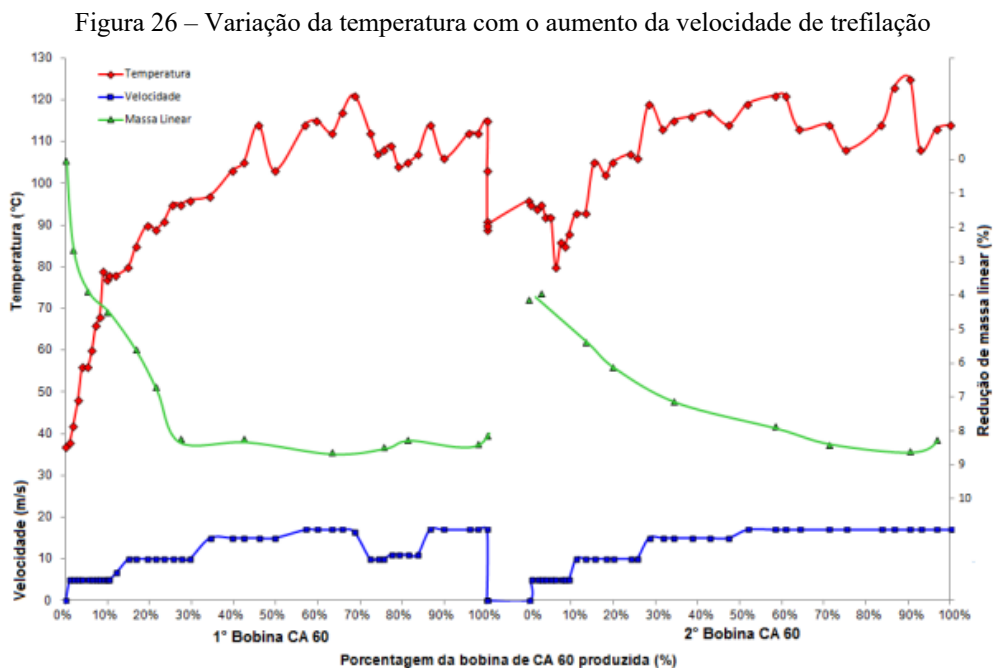
O carretel ocupa até duas vezes menos espaço do que as bobinas convencionais, que são produzidas por processos similares a este, porém com um sistema de bobinamento diferente. O carretel sai do equipamento a uma temperatura de aproximadamente 80-100 °C, sendo necessário aguardar um certo tempo para poder manuseá-lo. Após sair do equipamento, a bobina de aço produzida é cintada (amarrada) por meio do uso de um equipamento de alimentação pneumática que tensiona e sela uma fita de aço laqueada ao redor da bobina em quatro pontos distintos, dispostos a 90° entre si, evitando-se desta forma que as espiras da bobina “se abram” durante o período de armazenagem devido à falta de tensionamento e à ação gravitacional, dificultando ou até mesmo inviabilizando o seu processamento nas etapas posteriores de transformação.

#### **2.4.4 Controle das variáveis do processo**

O aumento da velocidade nos processos de trefilação acarreta um aumento da temperatura do fio devido à quebra do lubrificante e do aumento dos esforços de atrito e da deformação do material, o que pode resultar em alterações microestruturais e variação das propriedades mecânicas. O aumento da velocidade também reduz a eficiência de troca térmica com o bloco de tração (cabrestante), devido ao menor tempo de contato entre o bloco e o fio (Bornstrom; Viklund, 2022).

Segundo estudo realizado por Ferreira (2020), foi identificado que a temperatura de um fio de aço ABNT 1005 estava acima de 80 °C em diversos passes ao longo do processo de trefilação, temperatura acima da recomendada pelo fabricante do sabão utilizado. Este fato foi diretamente associado à baixa vazão de água nos blocos de tração (cabrestantes) devido à corrosão da tubulação e ao entupimento de mangueiras. O time de manutenção da fábrica atuou de forma a melhorar a vazão da linha para atender às especificações técnicas do fabricante da máquina e, após a intervenção, percebeu-se que as altas temperatura afetaram a aderência do sabão no fio, haja vista que na condição inicial a camada residual de sabão medida foi de 1,66 g/m<sup>2</sup> e, após a intervenção do time de manutenção, este valor saltou para 2,98 g/m<sup>2</sup>, um aumento de 79,5% em comparação com a condição anterior.

Em outro estudo realizado por David, Freitas e Fernandes (2013), foi relatada a existência de uma variação de temperatura dos componentes da máquina de trefilar desde o momento de início da produção até o momento em que é atingida a velocidade nominal do processo (Figura 26), sendo esta variação de temperatura suficiente para dilatar os rolos de WC e alterar a geometria e o diâmetro de saída esperados do produto.



Fonte: David, Almeida e Fernandes (2013, p. 78).

Os autores determinaram a correlação, por meio de modelos estatísticos, da variação da massa linear com a velocidade de trefilação e com a temperatura dos rolos do cassette na produção de fios nervurados de aço CA-60 4,2 mm. De acordo com os resultados obtidos, a temperatura dos rolos dos cassetes apresentou-se como a variável que mais impacta na

variabilidade da massa linear, devido ao fato de provocar a dilatação destes. A Equação (I) abaixo foi sugerida para descrever o fenômeno de relação entre as variáveis:

$$R_{ml} = 0,0004T^2 - 0,0266T + 0,06878 \text{ (I)}$$

Onde:

$R_{ml}$  = Redução da massa linear (%);

$T$  = Temperatura dos rolos (°C).

O estudo conclui que é de fundamental importância manter os rolos dos cassetes a temperaturas baixas e estáveis, possibilitando, desta forma, reduzir significativamente a variabilidade da massa linear na produção dos aços CA-60, dada a forte correlação apresentada por estas variáveis. Outra conclusão importante do trabalho é que o interrompimento do sistema de refrigeração dos cassetes durante o tempo de *setup* para a produção de uma nova bobina mantém a temperatura dos cassetes aquecida, evitando-se variações de temperatura.

O processo de trefilação dos aços CA-60 necessita de um forte controle e monitoramento dos parâmetros do processo, a fim de garantir a faixa de massa linear regulamentada pela norma NBR 7480 (ABNT, 2023), pois trata-se de materiais que terão aplicação direta na construção civil, e em hipótese alguma podem ser comercializados fora das tolerâncias estabelecidas. A massa linear tem efeito direto sobre a carga máxima que um componente estrutural de concreto armado suporta em serviço. Caso a estrutura seja pobremente dimensionada, falhas prematuras que levam a perdas materiais irreparáveis e colocam em risco a vida de muitas pessoas poderão acontecer. Sendo assim, estas alterações na geometria e na massa linear dos produtos trefilados são consideradas problemas graves de qualidade, e podem inclusive inviabilizar a aplicação e a comercialização destes produtos no mercado.

Lee, Lee e Kim (2010) também destacam que o aumento excessivo da temperatura do fio em função do aumento da velocidade de trefilação não só aumenta a possibilidade de ruptura, como também diminui a ductilidade do produto trefilado devido ao fenômeno de envelhecimento por deformação.

É importante mencionar, no entanto, que a ruptura do fio durante o processo depende também de outros fatores, como a taxa de deformação e a resistência mecânica do fio-máquina (Jandrić *et al.*, 2019; Wright, 2016).

Além disso, He *et al.* (2011) destacam que o aumento da temperatura dos rolos com o aumento da velocidade de trefilação pode fazer com que o fluido lubrificante se decomponha e perca a sua eficiência lubrificante e refrigerante.

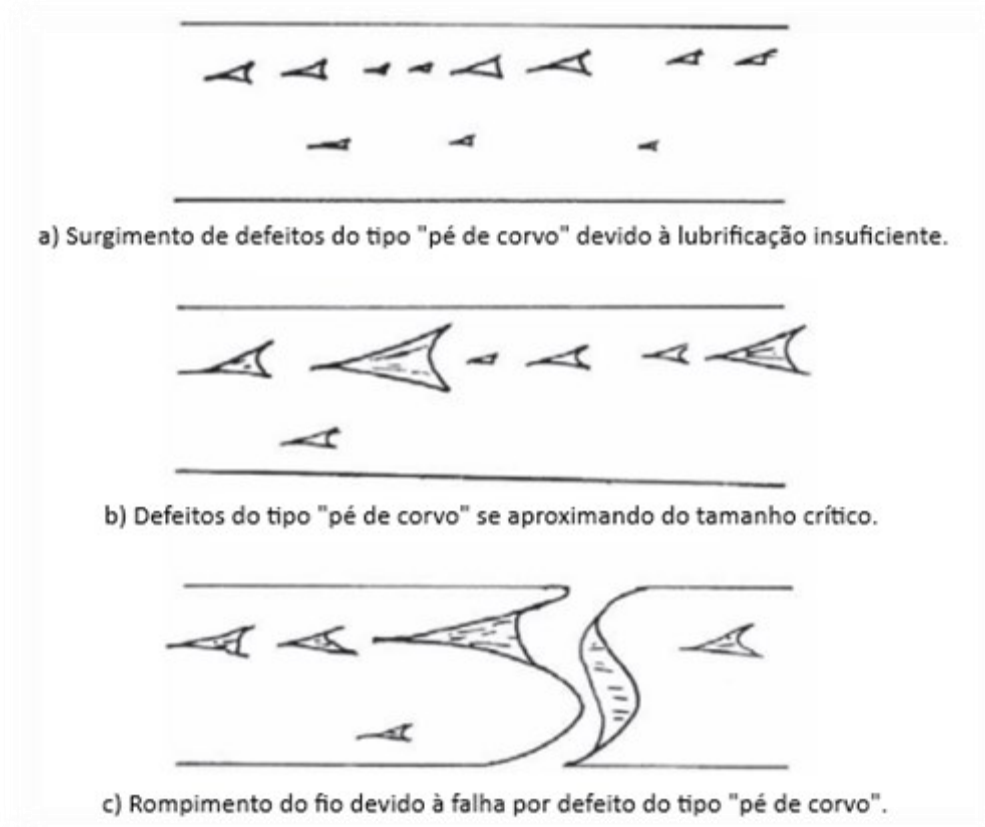
Roveda (2018) estudou a influência do comprimento do paralelo na trefilação convencional com matriz de fieiras, e os resultados de seu estudo demonstram que a condição que obteve a maior camada residual de sabão no fio trefilado também foi a condição que exigiu o menor esforço de trefilação e obteve a melhor capacidade produtiva dentre as condições avaliadas.

Suliga (2015) realizou um estudo acerca do processo de trefilação convencional de fios de aço com alto teor de carbono (0,79%), com redução de diâmetro de 5,50 mm para 1,70 mm em 12 passes, em que foi observado que o aumento da velocidade afeta a aderência do sabão. A velocidade na trefilação foi alterada de 5 m/s para 20 m/s, resultando em uma redução de 34% de lubrificante aderido na superfície do fio.

De acordo com Fernandes (2018), o principal defeito oriundo dos processos de trefilação é causado pela falta de lubrificação, em que a fina camada de lubrificante na interface fio-ferramenta é descontinuada momentaneamente, promovendo uma adesão entre as superfícies devido às altas pressões envolvidas no processo. Nestas circunstâncias, as tensões cisalhantes desenvolvidas localmente acarretam o surgimento de microfissuras na superfície do material.

Durante a deformação subsequente, esta microfissura pode crescer, trazendo consequências indesejáveis aos processos de trefilação. O fio pode romper-se caso a fissura atinja um tamanho crítico; entretanto, caso não haja a ruptura total do fio, o material carregará a falha para os processos subsequentes. Este defeito também é conhecido como “pé de corvo”, devido às suas semelhanças físicas com as marcas deixadas pela pegada deste animal (Figura 27).

Figura 27 – Surgimento e crescimento do defeito conhecido como “pé de corvo” na superfície de fios trefilados



Fonte: Adaptado de Wright (2016).

Estes defeitos também podem ter como causa defeitos já existentes no tarugo antes da laminação a quente, defeitos no fio-máquina gerados no processo de laminação a quente e defeitos superficiais no fio-máquina causados por negligência do operador durante a movimentação logística no pátio ou estoque de matérias-primas, dentre outros. As roldanas e/ou roletes que guiam e endireitam o fio durante o processo também podem imprimir na superfície do material suas falhas de desgaste, deslocamento, arranhões etc., contribuindo para o surgimento de defeitos do tipo “pé de corvo”.

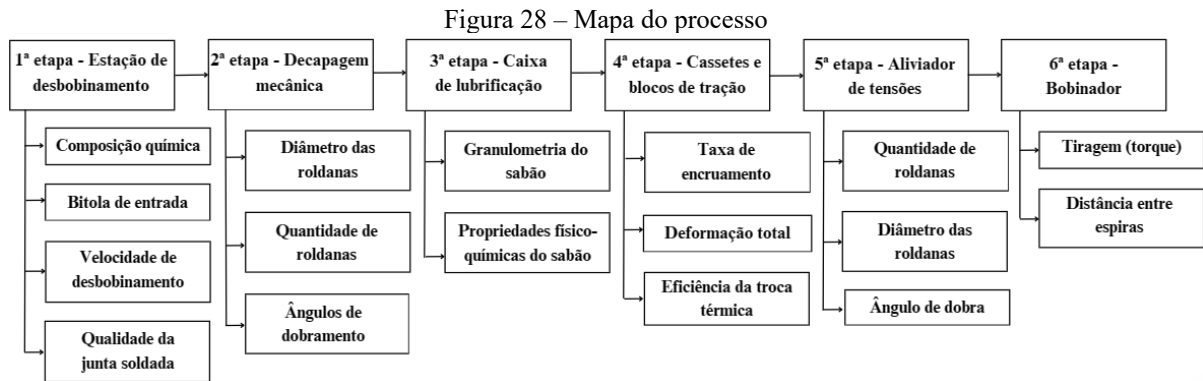
No entanto, quaisquer que sejam as causas que levaram ao surgimento do defeito superficial, seus efeitos deletérios na qualidade do produto final trefilado são incontestáveis. De acordo com Wright (2016), as propriedades mecânicas do material, tais como o alongamento e a resistência à resistência em tração, são quase sempre comprometidas. Além disso, há uma grande redução do tempo de vida em fadiga do material, uma vez que a fração de tempo que seria gasta na etapa de nucleação da trinca já foi antecipada.

Dessa forma, pode-se concluir que o monitoramento das propriedades mecânicas, massa linear e camada residual de lubrificante nos fios de aço CA-60 em função das características do



equipamento e das condições (parâmetros) operacionais, torna-se fundamental para a obtenção de um produto trefilado com excelente qualidade.

A Figura 28 abaixo mostra um fluxograma com o resumo de todas as variáveis do processo que possuem influência (positiva ou negativa) na qualidade final do produto trefilado.



Fonte: Elaboração própria.

#### 2.4.6 Consequências

A gestão da produção dentro de uma indústria não se limita somente a aspectos puramente técnicos do processo. Gerir uma organização voltada para a produção industrial representa levar em consideração uma trama complexa de fatores que inclui os aspectos mercadológicos, os aspectos técnicos da produção, aspectos relacionados à logística, à relação com os clientes e fornecedores, e aos compromissos com o meio ambiente e a comunidade (Felício, 2012).

No entanto, em qualquer segmento industrial, quando um produto não atende às especificações de qualidade e é refugado ou reprocessado, além do desperdício da matéria-prima utilizada, muitos outros recursos são perdidos, como mão de obra empregada, tempo gasto e espaço de armazenamento. Por conseguinte, o custo de produção e, conseqüentemente, o preço do produto para o consumidor final aumentam (Barros; Teixeira; Gontijo, 2018).

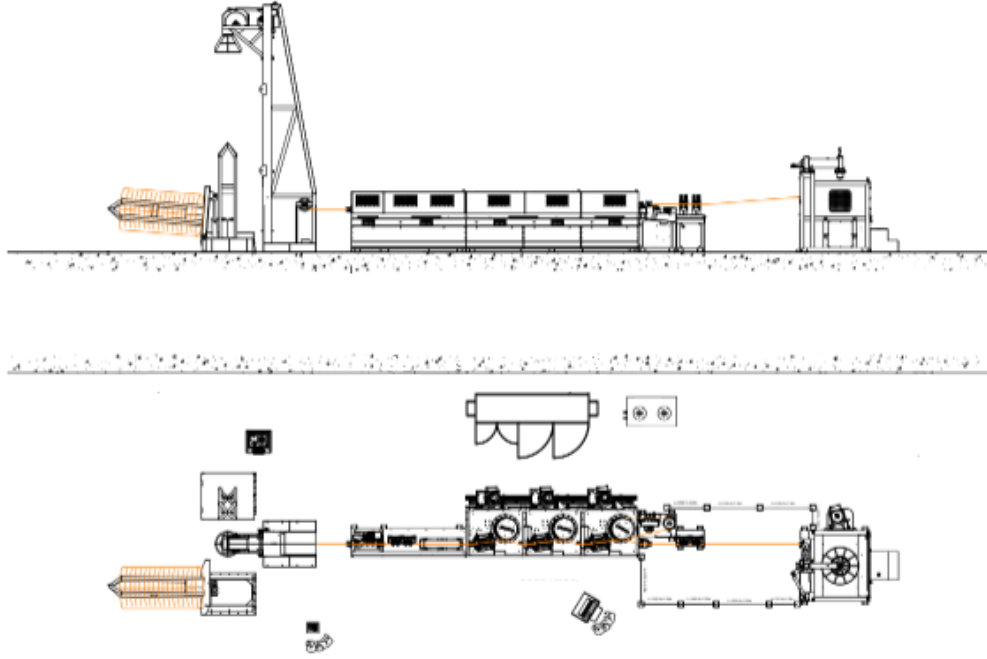
Sendo assim, a correta seleção dos parâmetros de processamento e de outros fatores de influência no processo busca promover as melhores condições de trabalho possíveis para que se obtenham produtos trefilados com características e propriedades mecânicas e metalúrgicas adequadas, que atendam aos requisitos específicos da norma do produto. Por outro lado, as altas velocidades (leia-se: aumento de produtividade) e os pequenos esforços de trefilação (leia-se: menor consumo de energia) tornam-se fatores importantes a serem considerados na balança, pois garantem a manutenção da competitividade da empresa no mercado (Pinto, 2016).

O efeito da velocidade de processamento na camada residual de lubrificante e nas propriedades mecânicas dos produtos trefilados ainda não foi objeto de investigações mais aprofundadas, particularmente no que diz respeito aos processos que empregam cassetes para obtenção do produto trefilado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O método de processamento empregado no estudo em questão é a trefilação por cassetes para a produção dos fios de aço CA-60. O equipamento utilizado foi uma máquina multipasses modelo Coldrive 3MV 3.4-10 V1 da fabricante italiana Schnell (Figura 29).

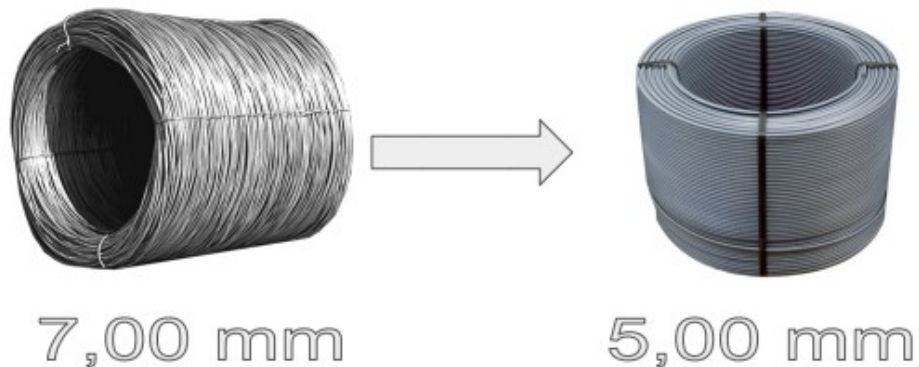
Figura 29 – Planta da máquina de trefilação utilizada no estudo



Fonte: Adaptado de Schnell (2020).

Neste estudo foram utilizados três cassetes dispostos em série para a redução do fio-máquina 7,00 mm SAE 1010 para a fabricação dos fios de aço CA-60 5,00 mm nervurados.

Figura 30 – Redução do fio-máquina empregada no estudo.



Fonte: Elaboração própria.

O material foi processado em três velocidades diferentes: 4 m/s; 8 m/s; e 12 m/s. Além disso, três lubrificantes comerciais diferentes foram testados para a velocidade de 8 m/s. A composição química dos diferentes lubrificantes testados consiste basicamente em uma base de hidróxido de cálcio com a adição de aditivos não informados pelo fabricante. Além dos aditivos empregados, as propriedades físicas dos lubrificantes, tais como o tamanho médio das partículas, também os tornam diferentes.

A composição química aproximada e algumas propriedades mecânicas do fio-máquina utilizado no estudo podem ser conferidas na Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química e propriedades mecânicas do fio-máquina utilizado no estudo

<b>C</b> %	<b>Si</b> %	<b>Mn</b> %	<b>S</b> %	<b>P</b> %	<b>Cu</b> %	<b>N<sub>2</sub></b> ppm	<b>LR</b> MPa	<b>Alongamento</b> %
0,11	0,09	0,44	0,023	0,023	0,13	47	446,01	29,70

Fonte: Elaboração própria (dados fornecidos pelo fabricante).

Para cada velocidade estudada foram retirados cinco corpos de prova com aproximadamente 20 cm de comprimento para a realização do ensaio de camada residual de lubrificante, três corpos de prova com aproximadamente 40 cm de comprimento para a realização do ensaio de tração e um corpo de prova com aproximadamente 40 cm para a realização do ensaio de dobramento.

Todos os corpos de prova foram retirados das regiões medianas das bobinas trefiladas, de modo a evitar possíveis interferências da rampa de aceleração/desaceleração na velocidade de processamento do material trefilado em regiões próximas às extremidades (início e/ou fim) das bobinas.

A Tabela 4 apresenta um resumo do tipo de matéria-prima e do lubrificante utilizados, da velocidade do processo e da quantidade de amostras retiradas para os ensaios previstos para cada uma das condições avaliadas.

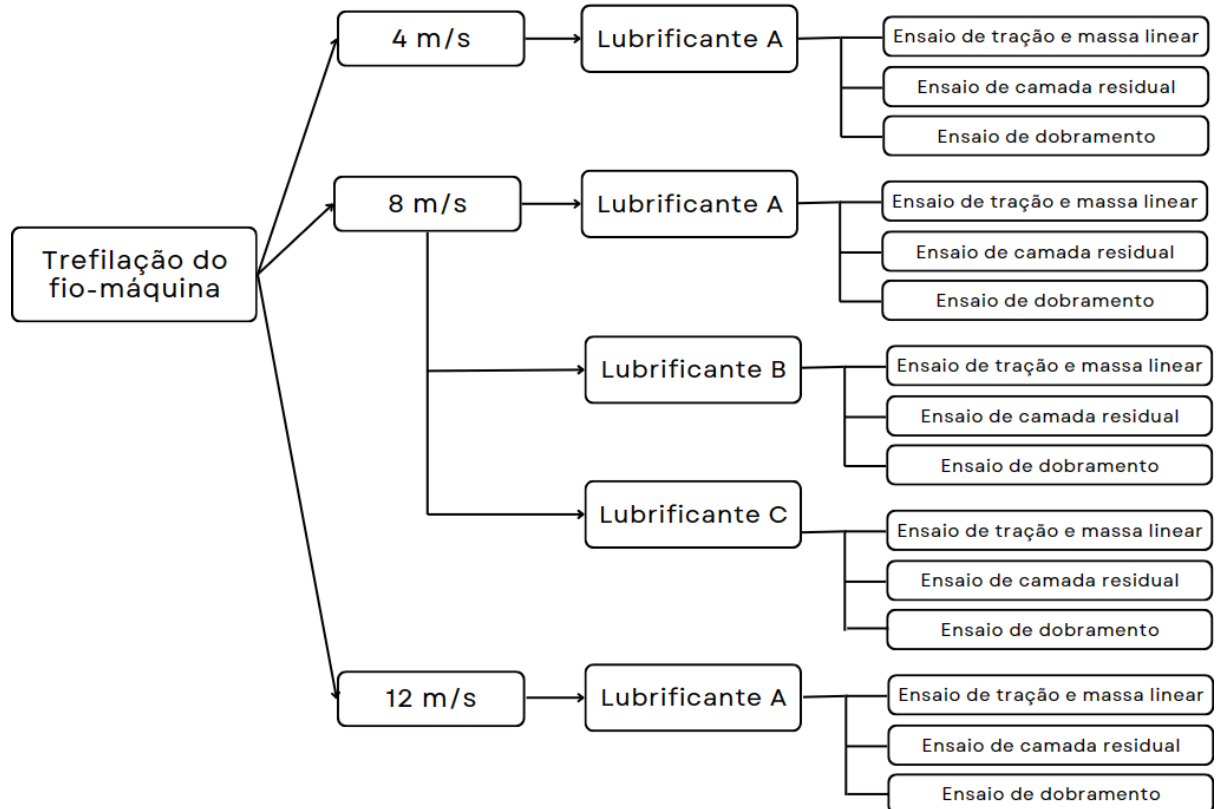
Tabela 4 – Amostras retiradas para a realização dos ensaios previstos para cada uma das condições avaliadas no estudo

Matéria-prima e parâmetros de processo					Ensaio realizado e número de amostras retiradas		
Diâmetro de entrada (mm)	Diâmetro de saída (mm)	Tipo de Material	Lubrificante utilizado	Velocidade de trefilação (m/s)	Ensaio de tração	Ensaio de dobramento	Camada residual
7,00	5,00	SAE 1010	Tipo A	4	3	1	5
7,00	5,00	SAE 1010	Tipo A	8	3	1	5
7,00	5,00	SAE 1010	Tipo A	12	3	1	5
7,00	5,00	SAE 1010	Tipo B	8	3	1	5
7,00	5,00	SAE 1010	Tipo C	8	3	1	5

Fonte: Elaboração própria (dados fornecidos pelo fabricante).

O fluxograma apresentado na Figura 31 é um resumo de todas as etapas utilizadas na metodologia empregada neste estudo para a obtenção e a análise dos resultados encontrados<sup>5</sup>.

Figura 31 – Fluxograma das etapas utilizadas para obtenção e posterior análise dos resultados



Fonte: Elaboração própria.

<sup>5</sup> As amostras para o ensaio de granulometria a laser foram retiradas no momento da troca do lubrificante na caixa de lubrificação.

### 3.1 ENSAIO DE CAMADA RESIDUAL DE SABÃO

O ensaio de camada residual de sabão foi realizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Este ensaio tem como objetivo obter o valor da camada residual de sabão ( $\text{g/m}^2$ ) nos fios de aço CA-60 trefilados a diferentes velocidades.

Primeiramente, todas as amostras foram pesadas em uma balança analítica marca Ohaus, modelo Explorer, com resolução de 0,1mg. Cada uma das amostras foi pesada quatro vezes, e em seguida uma média aritmética simples foi realizada a fim de se obter o valor final da medida de sua massa. Em seguida, as amostras foram limpas por um período de seis minutos em um aparelho de ultrassom utilizando-se álcool etílico como meio e agente de limpeza.

Após isso, as amostras foram levadas para uma estufa aquecida a  $60\text{ }^\circ\text{C}$  por um período de 1 hora, a fim de remover (evaporar) o solvente utilizado anteriormente.

As amostras limpas e secas foram novamente pesadas na balança por quatro vezes, e a média aritmética simples dos resultados foi calculada.

Finalmente, a Equação (II) abaixo foi utilizada para a obtenção do valor da camada residual de sabão nas superfícies das amostras ensaiadas:

$$P = \frac{(M_i - M_f)}{A_s} \quad (\text{II})$$

Onde:

P = Camada residual de sabão ( $\text{g/m}^2$ );

$M_i$  = Massa inicial da amostra contaminada (g);

$M_f$  = Massa final da amostra limpa e seca (g);

$A_s$  = Área da superfície lateral da amostra ( $\text{m}^2$ ).

A fim de calcular a área da superfície lateral ( $A_s$ ), a amostra foi considerada como sendo um cilindro reto. Para esta finalidade, a Equação (III) abaixo foi utilizada:

$$A_s = (\Phi \times \pi \times \ell) \quad (\text{III})$$

Onde:

$\Phi$  = Diâmetro nominal da amostra (mm);

$\pi$  = Constante Pi;

$\ell$  = Comprimento da amostra (mm).

### 3.2 GRANULOMETRIA A LASER

Os três lubrificantes comerciais testados também foram submetidos a um ensaio de granulometria a laser a fim de verificar a distribuição granulométrica e o tamanho de grão médio, e correlacionar estes dados com os valores encontrados para a camada residual de sabão em cada uma das condições ensaiadas.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em um granulômetro a laser modelo 1064 da marca CILAS.

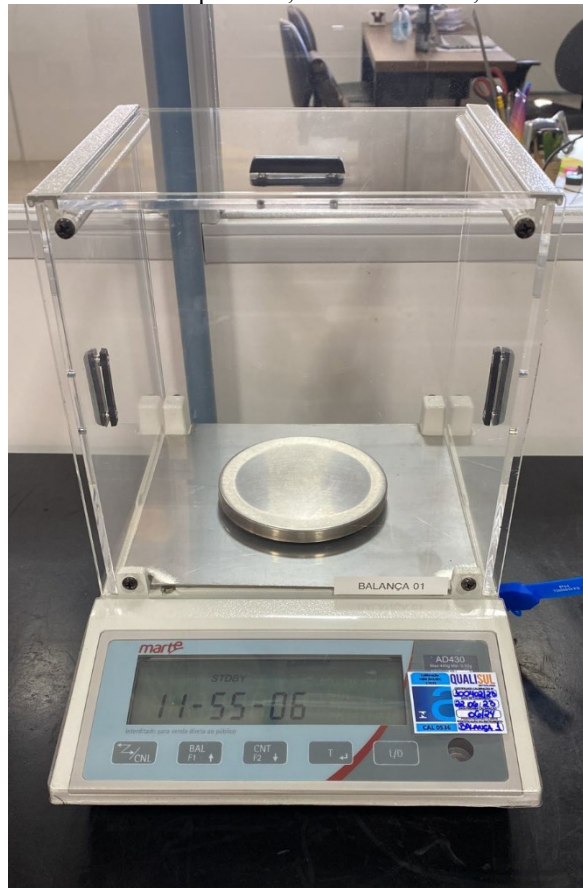
O princípio da granulometria a laser é a análise do padrão de difração de luz, que é produzido quando as partículas são expostas a um feixe de luz monocromática. A análise granulométrica a laser, também conhecida como difração a laser, é uma técnica que permite medir o tamanho de partículas entre 0,02 e 2000  $\mu\text{m}$ . O processo é realizado da seguinte forma: a amostra é dispersa no ar ou em um meio líquido; o raio laser passa através do meio de dispersão e é difratado pelas partículas; por fim, o padrão de luz de difração é medido e correlacionado com a distribuição de tamanho das partículas (Malvern Panalytical, 2024).

### 3.3 MASSA LINEAR E ENSAIO DE TRAÇÃO UNIAXIAL

Para a realização do ensaio de tração, todas as amostras foram cuidadosamente endireitadas com o auxílio de um torno (morsa) de bancada, a fim de garantir a uniaxialidade do estado de tensões durante a execução do ensaio. As amostras endireitadas tiveram o seu comprimento medido por meio de uma escala metálica graduada de 500 mm, modelo 182-307, da fabricante Mitutoyo.

Em seguida, as amostras foram pesadas em uma balança semianalítica de precisão, modelo AD 430, da fabricante Marte Científica, com precisão de 0,001 g (Figura 32).

Figura 32 – Balança semianalítica de precisão, modelo AD 430, da fabricante Marte Científica



Fonte: Acervo do autor.

Finalmente, a Equação (IV) abaixo foi empregada para obter a massa linear dos fios ensaiados:

$$Ml = \frac{m}{c} \text{ (IV)}$$

Onde:

Ml = Massa linear do fio (kg/m);

m = Massa obtida na balança (kg);

c = Comprimento da amostra endireitada (m).

Após ter sua massa linear calculada, as amostras foram marcadas a intervalos espaçados de  $10 \cdot \Phi$  com o auxílio de um paquímetro digital, modelo 100.178BL, da marca Digimess, para a obtenção do alongamento percentual após a ruptura do corpo de prova.

Os ensaios de tração foram realizados na unidade industrial da Ferros Castro, conforme norma ABNT NBR 6892-1 (2013).



O equipamento utilizado foi uma máquina de ensaios eletro-hidráulica da fabricante Losenhausen, com capacidade para até 10.000 kgf, equipada com um extensômetro eletrônico e um *software* (*Testview*) para a leitura e a aquisição de dados da fabricante Dinateste (Figura 33).

Figura 33 – Máquina de ensaio de tração Losenhausen com capacidade para 10.000 kgf (esquerda) e extensômetro modelo 102, da marca Dinateste (direita)



Fonte: Acervo do autor.

O ensaio permitiu, além da obtenção do resultado de alongamento percentual, os valores da tensão limite de resistência (ou simplesmente LR), da tensão limite de escoamento (ou simplesmente LE) e da relação elástica do material, sendo esta última a razão entre a tensão limite de resistência e a tensão limite de escoamento (LR/LE). Os resultados obtidos foram comparados com os valores mínimos estipulados pela norma de referência: NBR 7480 (ABNT, 2023).

### 3.4 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento foi realizado na unidade industrial da Ferros Castro, com o auxílio de um dispositivo de fabricação própria (Figura 34). A base desse procedimento foi a

norma ABNT NBR 17005 (2021a). O diâmetro do pino de dobra e os critérios de aceitação/rejeição do ensaio estão relacionados à norma específica do produto (ABNT, 2023).

Figura 34 – Dispositivo utilizado para a realização do ensaio de dobramento



Fonte: Acervo do autor.

Após a realização do ensaio, todas as amostras foram analisadas quanto à ocorrência de rupturas ou presença de fissuras superficiais na região da dobra (zona tracionada) com o auxílio de uma luminária e uma lupa de aumento para melhor visualização.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados e resultados obtidos no ensaio de camada residual de sabão para os diferentes lubrificantes testados podem ser visualizados na Tabela 5, a seguir<sup>6</sup>.

Tabela 5 – Resultados obtidos no ensaio de camada residual de sabão para as cinco condições ensaiadas

Lubrificante	Velocidade	Amostra	Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Massa inicial (P <sub>1</sub> ) (g)	Massa final (P <sub>2</sub> ) (g)	S (m <sup>2</sup> )	(P <sub>1</sub> - P <sub>2</sub> ) (g)	((P <sub>1</sub> - P <sub>2</sub> )/S) (g/m <sup>2</sup> )	Média (g/m <sup>2</sup> )
Tipo A	4 m/s	1	193,65	5,00	28,9307	28,9247	0,030403	0,0060	0,198	0,151
		2	196,86	5,00	29,2248	29,2170	0,030907	0,0079	0,254	
		3	192,70	5,00	28,5622	28,5567	0,030254	0,0055	0,181	
		4	201,12	5,00	29,6730	29,6703	0,031576	0,0026	0,083	
		5	196,92	5,00	29,1544	29,1532	0,030916	0,0012	0,040	
Tipo A	8 m/s	1	192,18	5,00	28,5497	28,5486	0,030172	0,0011	0,037	0,193
		2	195,76	5,00	28,5114	28,5082	0,030734	0,0032	0,105	
		3	191,77	5,00	27,9989	27,9955	0,030108	0,0034	0,112	
		4	200,24	5,00	29,0481	29,0444	0,031438	0,0037	0,116	
		5	194,94	5,00	28,5361	28,5179	0,030606	0,0182	0,595	
Tipo A	12 m/s	1	200,67	5,00	29,3895	29,3861	0,031505	0,0035	0,110	0,264
		2	201,65	5,00	29,6539	29,6503	0,031659	0,0036	0,114	
		3	198,85	5,00	29,3021	29,2844	0,031219	0,0177	0,567	
		4	-	-	-	-	-	-	-	
		5	-	-	-	-	-	-	-	
Tipo B	8 m/s	1	195,23	5,00	28,7647	28,7621	0,030651	0,0026	0,083	0,090
		2	196,45	5,00	28,9727	28,9659	0,030843	0,0069	0,222	
		3	194,56	5,00	28,5758	28,5749	0,030546	0,0009	0,028	
		4	204,15	5,00	29,9987	29,9970	0,032052	0,0016	0,051	
		5	197,55	5,00	29,1719	29,1698	0,031015	0,0021	0,068	
Tipo C	8 m/s	1	200,76	5,00	29,3449	29,3431	0,031519	0,0018	0,056	0,263
		2	202,47	5,00	29,6262	29,6103	0,031788	0,0159	0,500	
		3	199,89	5,00	29,3207	29,3108	0,031383	0,0099	0,316	
		4	199,78	5,00	29,3490	29,3397	0,031365	0,0093	0,296	
		5	193,51	5,00	28,2804	28,2760	0,030381	0,0045	0,146	

Fonte: Elaboração própria.

Os valores encontrados para a camada residual de sabão nas amostras ensaiadas neste estudo diferem bastante dos demais valores encontrados na literatura consultada. Por exemplo, a média dos valores encontrados para a camada residual de sabão obtida com a utilização de três diferentes tipos de lubrificantes empregados na produção dos vergalhões CA-60 de 4,20 e

<sup>6</sup> Para o ensaio das amostras contendo o lubrificante do tipo A na velocidade de 12 m/s foram realizadas somente três medições em decorrência da perda de duas amostras.

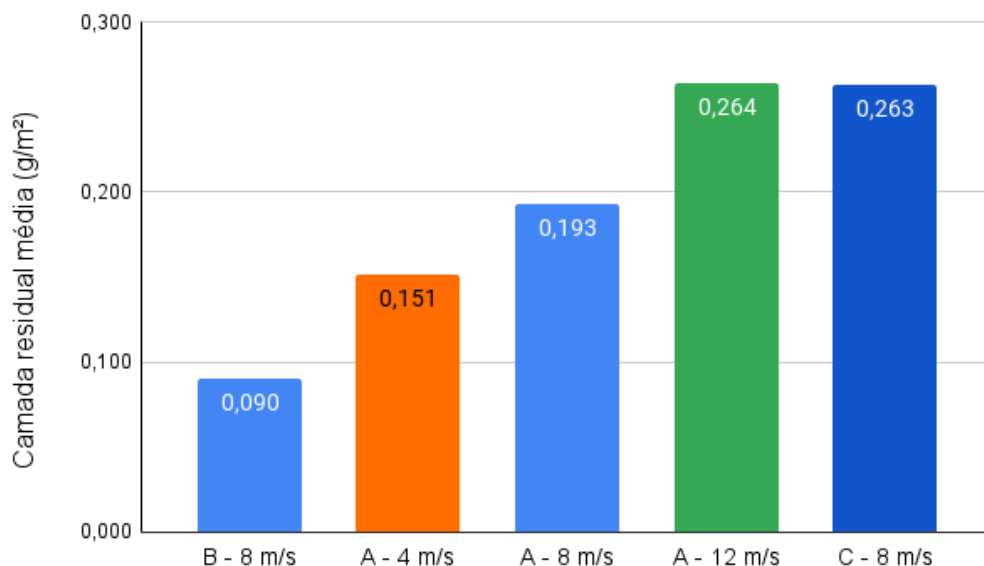
5,00 mm variaram de 1,11g/m<sup>2</sup> a 4,66 g/m<sup>2</sup> no estudo realizado por Sousa, Rosa Filho e Moura (2013).

Já os valores encontrados para a camada residual de sabão de um aço 1005 trefilado para a produção de bitolas finas (1,15 a 1,65 mm) variaram de 1,66 a 2,98 g/m<sup>2</sup> em um estudo realizado por Ferreira (2020).

No entanto, é importante observar que o processo de fabricação ou a metodologia empregada para a obtenção da camada residual de sabão destes estudos diferem significativamente do apresentado no estudo em questão. A opção pela utilização de diferentes solventes químicos para remoção da camada residual de sabão, por exemplo, pode estar associada a essa variação nos resultados. Além disso, o comprimento dos corpos de prova, os equipamentos e os instrumentos de medição utilizados, a fórmula para cálculo do valor da camada residual em g/m<sup>2</sup>, dentre outros fatores, também podem ter contribuído para essas discrepâncias.

No Gráfico 1, é apresentado um comparativo entre os valores médios para a camada residual de sabão encontrados para cada uma das condições avaliadas.

Gráfico 1 – Comparativo entre os resultados encontrados para a camada residual de sabão nas diferentes condições avaliadas



Fonte: Elaboração própria.

Muitos estudos demonstram que o aumento na temperatura nos processos de trefilação piora as condições de lubrificação do sistema, pois causa uma diminuição da viscosidade e pode inclusive levar à decomposição térmica do lubrificante (Ferreira, 2020; He et al., 2011; Suliga, 2014, 2015; Prisco; Santana Martinez; Kabayama, 2020; Suliga; Jabłońska; Hawryluk, 2019).

No entanto, como pôde ser observado para o lubrificante do tipo A, houve um aumento do valor médio obtido para a camada residual de sabão com o aumento da velocidade do processo. Sendo assim, é possível que o aumento da velocidade do processo não tenha sido grande o suficiente para degradar o sabão após a realização dos ensaios deste estudo.

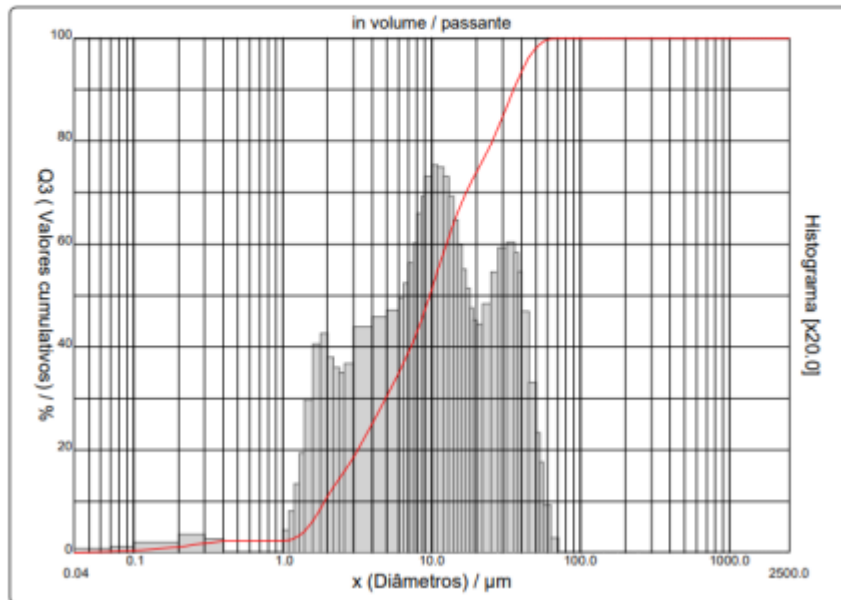
Sob outra perspectiva, as altas velocidades do processo podem afetar positivamente as condições de lubrificação do sistema, pois o calor gerado no processo tem influência nas propriedades reológicas do lubrificante e favorece a obtenção daquilo que é conhecido como uma condição hidrodinâmica de lubrificação (termo mais utilizado para lubrificantes líquidos/úmidos) ou simplesmente lubrificação por “filme grosso” (lubrificantes secos), além de aumentar a reatividade química entre o material que está sendo deformado e o lubrificante utilizado no processo (Ngaile; Lowrie, 2017; Wright, 2016).

A principal motivação para o aumento da velocidade do processo é, sem dúvidas, o aumento da produtividade. Por meio de um controle de temperatura eficaz, é possível se obter velocidades muito altas, uma vez que se pode esperar que a espessura da camada residual de lubrificante aumente com o uso de lubrificantes adequados, pois a maioria dos lubrificantes comerciais é projetada para a utilização em altas velocidades (Wright, 2016).

Quando comparamos os três diferentes tipos de lubrificantes testados na mesma velocidade (8 m/s), nota-se bastante diferença nos resultados encontrados. Em um estudo realizado por Byon *et al.* (2011) – mencionado anteriormente – sobre o efeito da lubrificação no processo de trefilação, os autores afirmam que os lubrificantes sólidos podem ter diferentes tamanhos de partículas. Segundo os autores, quanto maior for o tamanho das partículas, menor será a adesão do lubrificante à superfície do fio. Sendo assim, foi realizado um ensaio de granulometria a laser com o intuito de identificar uma possível influência deste parâmetro nos diferentes resultados da camada residual de sabão encontrados para os três diferentes tipos de lubrificantes testados. Os resultados do ensaio de granulometria a laser podem ser visualizados nos Gráficos 2, 3 e 4 a seguir.

Gráfico 2 – Distribuição granulométrica do lubrificante tipo A

Tipo de lubrificante	Diâmetro	$\mu\text{m}$
Tipo B	A 10%	1,92
	A 50%	9,72
	A 90%	35,62
	Médio	14,39

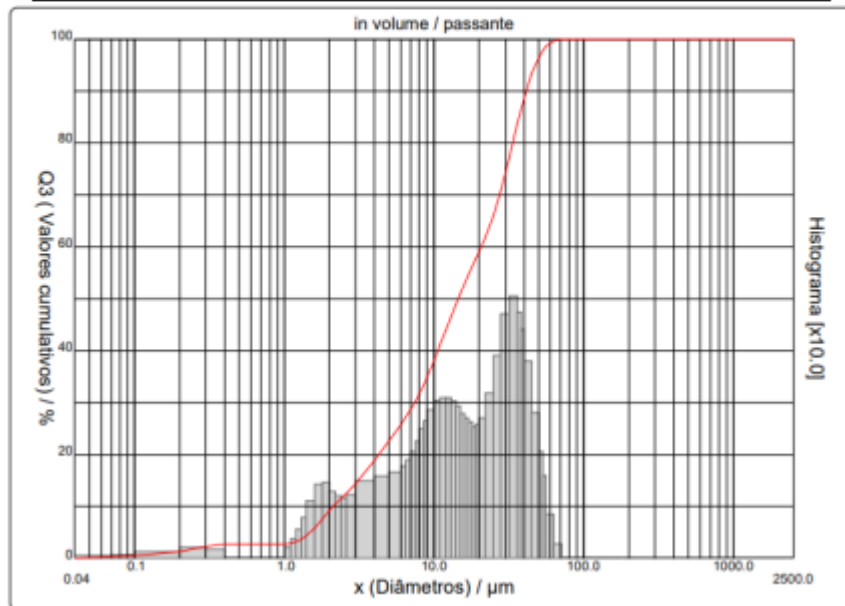


Fonte: Acervo do autor.

De acordo com os dados apresentados no Gráfico 2, o diâmetro médio das partículas encontrado para o lubrificante tipo A foi de 14,39  $\mu\text{m}$ . Cerca de 10% das partículas analisadas apresentaram diâmetro igual ou inferior a 1,92  $\mu\text{m}$ , cerca de 50% das partículas analisadas apresentaram diâmetro igual ou inferior a 9,72  $\mu\text{m}$  e cerca de 90% das partículas analisadas apresentaram diâmetro igual ou inferior a 35,62  $\mu\text{m}$ .

Gráfico 3 – Distribuição granulométrica do lubrificante tipo B

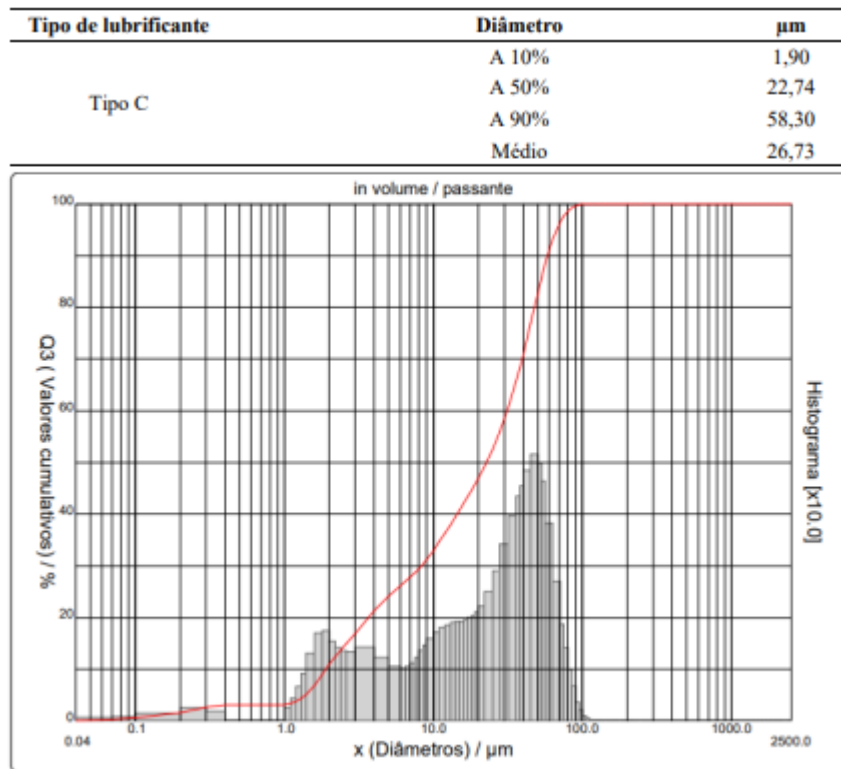
Tipo de lubrificante	Diâmetro	$\mu\text{m}$
Tipo A	A 10%	2,12
	A 50%	14,51
	A 90%	41,39
	Médio	19,03



Fonte: Acervo do autor.

De acordo com os dados apresentados no Gráfico 3, o diâmetro médio das partículas encontrado para o lubrificante tipo B foi de 19,03  $\mu\text{m}$ . Cerca de 10% das partículas analisadas apresentaram diâmetro igual ou inferior a 2,12  $\mu\text{m}$ , cerca de 50% das partículas analisadas apresentaram diâmetro igual ou inferior a 14,51  $\mu\text{m}$  e cerca de 90% das partículas analisadas apresentaram diâmetro igual ou inferior a 41,39  $\mu\text{m}$ .

Gráfico 4 – Distribuição granulométrica do lubrificante tipo C



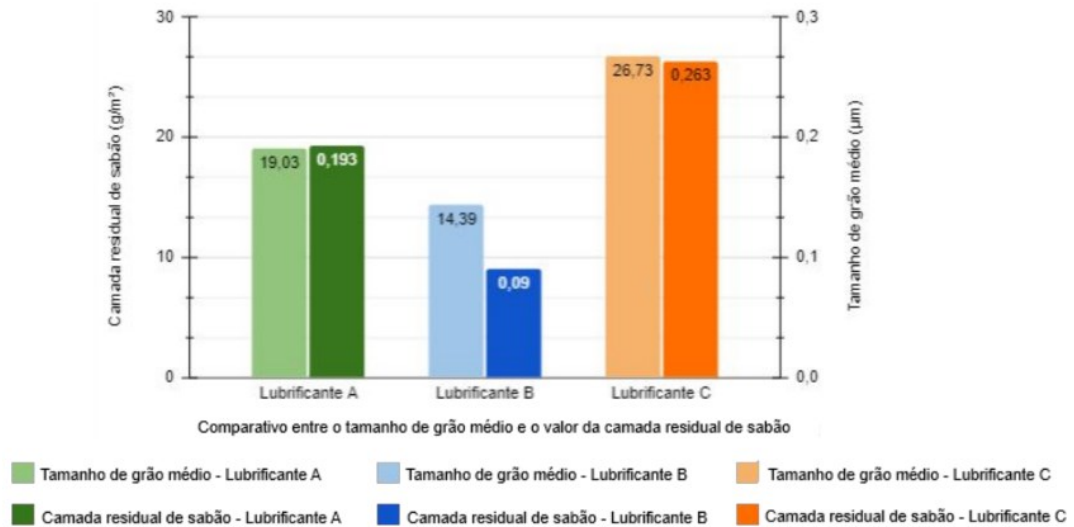
Fonte: Elaboração própria.

De acordo com os dados apresentados no Gráfico 4, o diâmetro médio das partículas encontrado para o lubrificante tipo C foi de 26,73  $\mu\text{m}$ . Cerca de 10% das partículas analisadas apresentaram diâmetro igual ou inferior a 1,90  $\mu\text{m}$ , cerca de 50% das partículas analisadas apresentaram diâmetro igual ou inferior a 22,74  $\mu\text{m}$  e cerca de 90% das partículas analisadas apresentaram diâmetro igual ou inferior a 58,30  $\mu\text{m}$ .

Analisando-se os resultados dos três diferentes lubrificantes testados para a mesma condição (velocidade) de processamento, pode-se perceber que o lubrificante tipo B apresentou o menor tamanho de grão médio (14,39  $\mu\text{m}$ ) e a menor camada residual de sabão (0,090  $\text{g}/\text{m}^2$ ). De forma análoga, o lubrificante tipo C apresentou o maior tamanho de grão médio (26,73  $\mu\text{m}$ ) e a maior camada residual de sabão (0,263  $\text{g}/\text{m}^2$ ). Estes resultados podem ser melhor visualizados através da análise do Gráfico 5 a seguir.



Gráfico 5 – Análise comparativa do tamanho de grão médio e da camada residual de lubrificante obtidos para os diferentes lubrificantes testados a velocidade de 8 m/s



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados obtidos no ensaio de granulometria a laser novamente contrariam a fundamentação teórica e os demais resultados evidenciados na literatura, que afirmam que sabões com granulometria menor favorecem o arraste do lubrificante na superfície do fio trefilado e aumentam a camada residual de lubrificante ( $\text{g/m}^2$ ). As partículas dos lubrificantes sólidos de granulometria maior podem não conseguir penetrar efetivamente nas irregularidades microscópicas da superfície do fio, levando a uma lubrificação inadequada (insuficiente) e ao aumento do atrito e da temperatura do processo (Byon *et al.*, 2011 *apud* Prisco; Santana Martinez; Kabayama, 2020; Ferreira; Marchi; Felisberto, 2007; Sousa; Rosa Filho; Moura, 2013).

Por outro lado, se as partículas forem muito pequenas elas poderão se aglomerar, formando partículas maiores que resultam em uma distribuição não uniforme da camada de lubrificante ao longo da superfície do fio e na formação de camadas mais espessas em áreas específicas. Além disso, partículas menores tendem a contribuir para a ocorrência do fenômeno de tunelamento, que prejudica o arraste e diminui a camada residual de lubrificante encontrada nos fios trefilados (Fernandes, 2018).

O resultado da massa linear dos fios de aço CA-60 ensaiados para cada uma das velocidades de trefilação empregadas no estudo utilizando-se o lubrificante tipo A, bem como os resultados das propriedades mecânicas avaliadas (alongamento percentual, tensão de escoamento, tensão de resistência e relação elástica, podem ser visualizados nas Tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 – Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo A e velocidade de trefilação de 4 m/s

Tipo de lubrificante	Velocidade do processo (m/s)	Número da amostra	Massa linear (kg/m)	Alongamento percentual	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de resistência (MPa)	Relação elástica
Tipo A	4	01	0,150	7,20	696,93	757,81	1,09
Tipo A	4	02	0,150	8,18	702,45	754,88	1,07
Tipo A	4	03	0,149	6,52	707,48	760,40	1,07
<b>Média:</b>			~ 0,150	7,30	~ 702,29	~ 757,70	~ 1,08

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 7 – Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo A e velocidade de trefilação de 8 m/s

Tipo de lubrificante	Velocidade do processo (m/s)	Número da amostra	Massa linear (kg/m)	Alongamento percentual	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de resistência (MPa)	Relação elástica
Tipo A	8	01	0,147	5,16	725,63	763,74	1,05
Tipo A	8	02	0,148	7,54	720,68	762,30	1,06
Tipo A	8	03	0,147	6,74	704,27	762,92	1,08
<b>Média:</b>			~0,147	6,48	716,86	762,99	~1,06

Fonte: Elaboração própria.

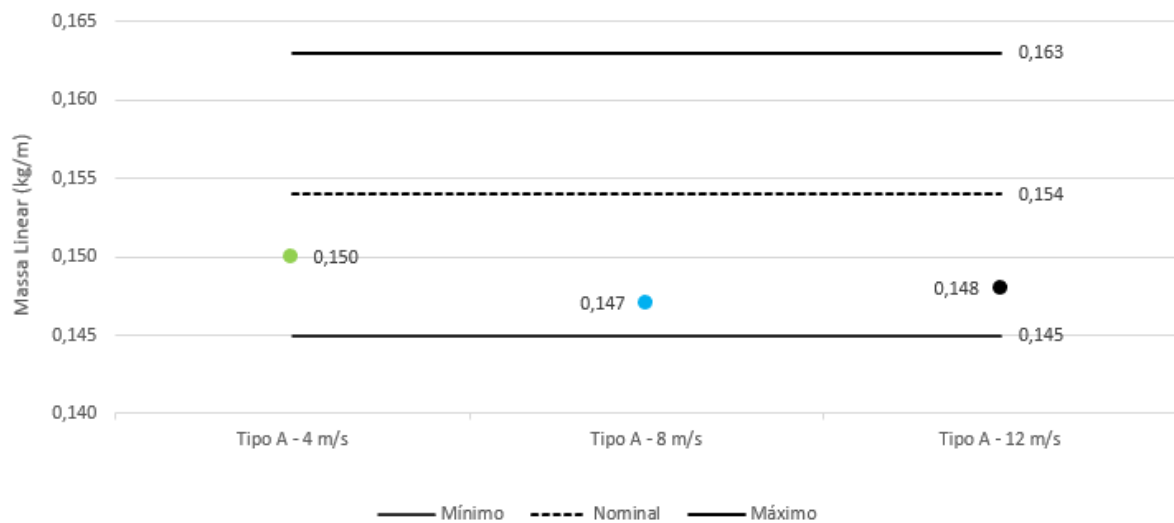
Tabela 8 – Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo A e velocidade de trefilação de 12 m/s

Tipo de lubrificante	Velocidade do processo (m/s)	Número da amostra	Massa linear (kg/m)	Alongamento percentual	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de resistência (MPa)	Relação elástica
Tipo A	12	01	0,148	5,84	692,97	746,07	1,08
Tipo A	12	02	0,148	7,74	720,13	759,43	1,05
Tipo A	12	03	0,148	8,56	717,36	761,68	1,06
<b>Média:</b>			0,148	7,38	710,15	755,73	~ 1,06

Fonte: Elaboração própria.

Os valores médios encontrados para a massa linear dos corpos de prova ensaiados com o lubrificante do tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s não apresentaram variações significativas entre si. Todos os valores estão dentro da faixa de tolerância ( $\pm 6\%$ ) prevista na ABNT NBR 7480. Isto pode ser melhor visualizado através do Gráfico 6, onde pode-se facilmente perceber que os valores médios encontrados para as diferentes condições avaliadas se encontram situados entre os limites mínimo e máximo permitido pela norma.

Gráfico 6 – Comparativo dos valores médios encontrados para a massa linear obtida com a utilização do lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com os valores mínimos e máximos permitidos pela ABNT NBR 7480



Fonte: Elaboração própria.

A massa linear das três condições avaliadas não demonstrou uma variação expressiva pois possivelmente a máquina de trefilação não teve tempo suficiente para aquecer e dilatar os rolos (David; Almeida; Fernandes, 2013; Lee; Lee; Kim, 2010).

Existem alguns estudos já publicados na literatura que avaliam a influência da velocidade do processo nas propriedades mecânicas dos aços trefilados, sendo que a maioria deles apresenta resultados que demonstram uma relação direta entre estas variáveis.

Suliga (2011) investigou a influência da velocidade do processo na tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência, relação elástica e alongamento percentual de aços com alto teor de carbono, evidenciando o aumento da resistência mecânica e a diminuição da ductilidade com o aumento da velocidade do processo.

Similarmente, Çetinarslan e Güzey (2013) concluem que a velocidade de trefilação tem um efeito significativo nas propriedades de tração (tensão limite de escoamento e tensão limite de resistência) de fios de aço com baixo teor de carbono. Uma velocidade alta, segundo os autores, contribui para o aumento das propriedades de resistência, ao mesmo tempo que o alongamento após a ruptura diminui.

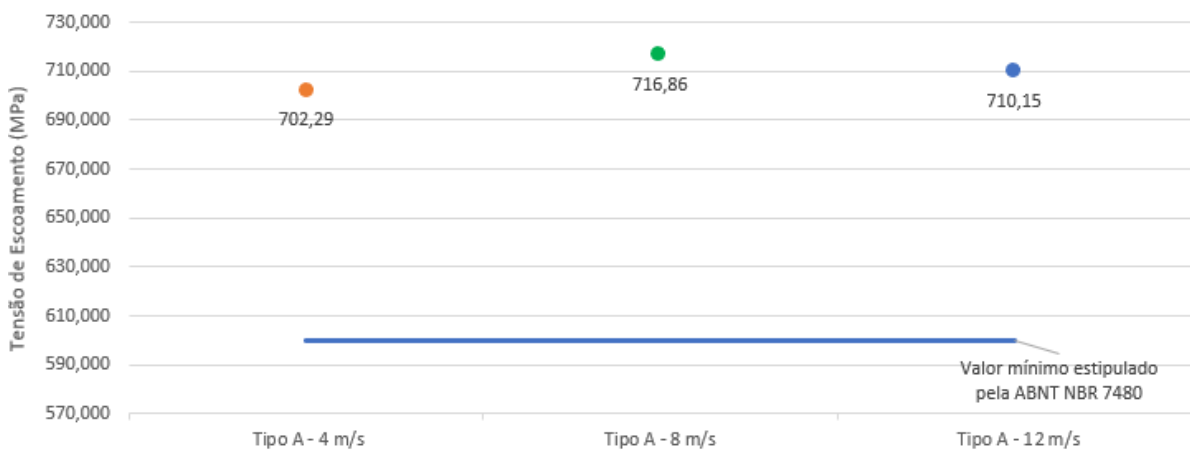
Mais recentemente, Arrais demonstrou por meio de seu estudo o aumento da tensão limite de escoamento e da tensão limite resistência de um aço com baixo teor de carbono (SAE 1013) utilizado para a produção de fios de aço CA-60 a partir do aumento da velocidade de trefilação (Arrais, 2019).

Gawali, Sharma e Khare (2018) também observaram um aumento da tensão limite de resistência com o aumento da velocidade de trefilação, porém para aços com alto teor de carbono.

Por outro lado, trabalhos como o de Brito (2018) apresentam resultados divergentes em relação aos estudos apresentados anteriormente, evidenciando a inexistência de uma relação direta entre a velocidade de processamento e as propriedades mecânicas finais obtidas no material trefilado.

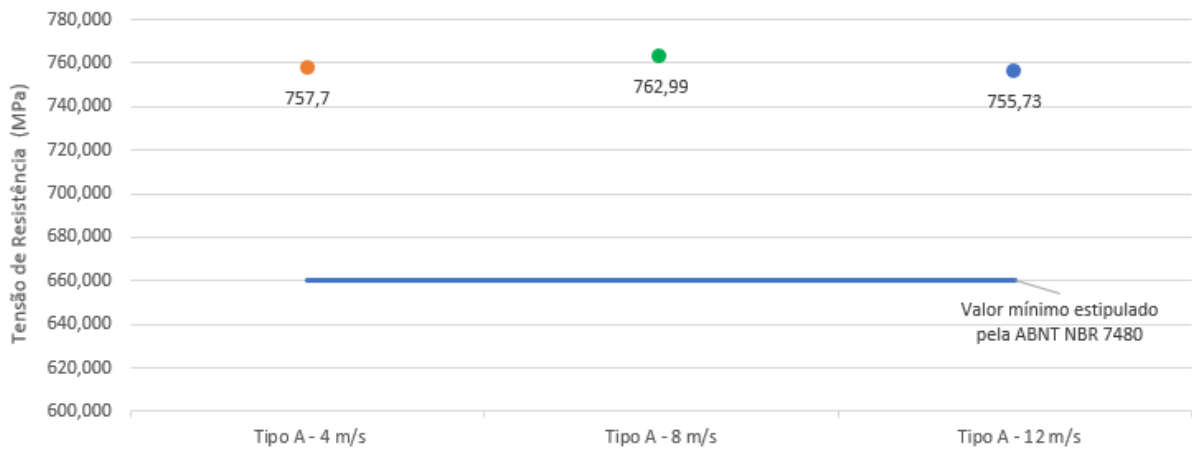
Esta afirmação pode ser corroborada pelos resultados encontrados neste trabalho, pois o aumento da velocidade do processo nas três diferentes condições ensaiadas para o lubrificante do tipo A parece não ter uma influência significativa nas propriedades mecânicas do produto trefilado, haja vista que as médias dos resultados encontrados para a tensão de escoamento, tensão de resistência, alongamento percentual e relação elástica foram muito próximas (Gráficos 7, 8 e 9).

Gráfico 7 – Comparativo dos valores médios de tensão de escoamento dos corpos de prova trefilados com o lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480



Fonte: Elaboração própria.

Gráfico 8 – Comparativo dos valores médios de tensão de resistência dos corpos de prova trefilados com o lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480



Fonte: Elaboração própria.

Em um primeiro momento, a tensão de escoamento e a tensão de resistência aumentaram com o incremento da velocidade do processo de 4 para 8 m/s. Em seguida, quando a velocidade do processo foi novamente aumentada de 8 para 12 m/s, a tensão de escoamento e a tensão de resistência diminuíram.

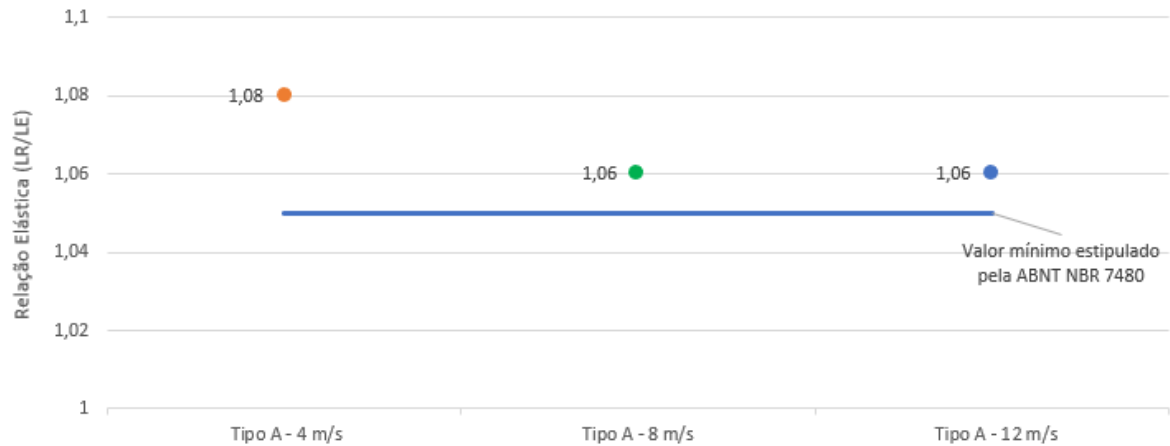
Gráfico 9 – Comparativo dos valores médios de alongamento dos corpos de prova trefilados com o lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480



Fonte: Elaboração própria.

Em um primeiro momento, o alongamento diminuiu com o incremento da velocidade do processo de 4 para 8 m/s. Em seguida, quando a velocidade do processo foi novamente aumentada de 8 para 12 m/s, o alongamento aumentou.

Gráfico 10 – Comparativo dos valores médios de relação elástica dos corpos de prova trefilados com o lubrificante tipo A nas velocidades de 4, 8 e 12 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480



Fonte: Elaboração própria.

A relação elástica diminuiu, e em seguida manteve-se estável, com o aumento da velocidade do processo de 4 m/s para 8 m/s e de 8 m/s para 12 m/s, respectivamente.

Esta análise está parcialmente coerente com a afirmação de Lee, Lee e Kim (2010) de que o material passa por um processo de envelhecimento estático e tem a sua ductibilidade comprometida à medida que se aumenta a velocidade do processo e, conseqüentemente, a temperatura final do material trefilado. Todas essas variações, no entanto, foram muito pequenas.

O resultado da massa linear dos fios de aço CA-60 ensaiados na velocidade de 8 m/s para os demais lubrificantes empregados no estudo (lubrificantes tipo B e C), bem como o resultado das propriedades mecânicas avaliadas (alongamento percentual, tensão de escoamento, tensão de resistência e relação elástica) podem ser visualizados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 – Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo B e velocidade de trefilação de 8 m/s

Tipo de lubrificante	Velocidade do processo (m/s)	Número da amostra	Massa linear (kg/m)	Alongamento percentual	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de resistência (MPa)	Relação elástica
Tipo B	8	01	0,148	6,70	720,39	762,61	1,06
Tipo B	8	02	0,148	8,46	719,74	754,19	1,05
Tipo B	8	03	0,147	7,42	704,70	746,78	1,06
<b>Média:</b>			~ 0,148	7,53	714,94	754,53	~ 1,06

Fonte: Elaboração própria.

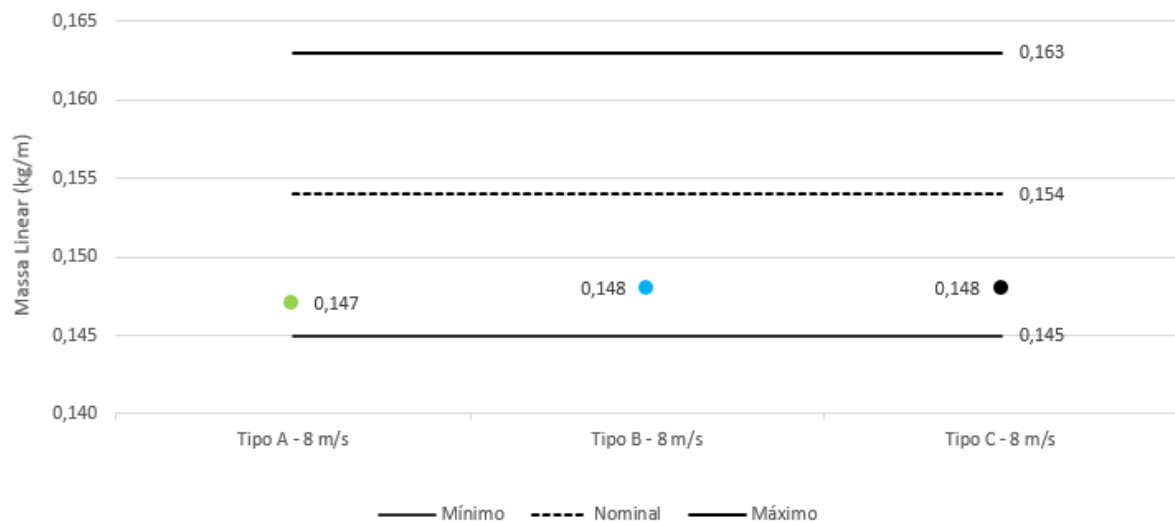
Tabela 10 – Resultados obtidos no ensaio de tração para as amostras ensaiadas com o lubrificante do tipo C e velocidade de trefilação de 8 m/s

Tipo de lubrificante	Velocidade do processo (m/s)	Número da amostra	Massa linear (kg/m)	Alongamento percentual	Tensão de escoamento (MPa)	Tensão de resistência (MPa)	Relação elástica
Tipo C	8	01	0,148	8,04	713,45	763,71	1,07
Tipo C	8	02	0,147	7,40	716,00	761,28	1,06
Tipo C	8	03	0,148	7,12	724,93	762,30	1,05
<b>Média:</b>			~ 0,148	7,52	718,13	762,43	1,06

Fonte: Elaboração própria.

Os valores médios encontrados para a massa linear dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes do tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s não apresentaram variações significativas entre si. Todos os valores estão dentro da faixa de tolerância (+/- 6%) prevista na ABNT NBR 7480. Isto pode ser melhor visualizado através do Gráfico 11, onde pode-se facilmente perceber que os valores médios encontrados para as diferentes condições avaliadas se encontram situados entre os limites mínimo e máximo permitido pela norma.

Gráfico 11 – Comparativo dos valores médios encontrados para a massa linear dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com os valores mínimos e máximos permitidos pela ABNT NBR 7480



Fonte: Elaboração própria.

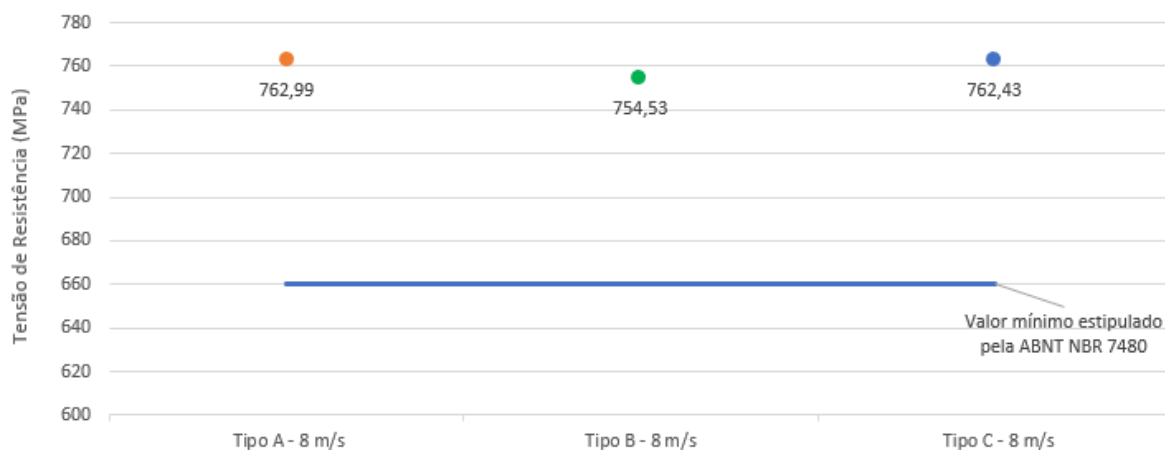
Por meio da comparação dos valores médios encontrados para os diferentes lubrificantes testados na condição de 8 m/s, pode-se afirmar que o lubrificante não influencia nas propriedades mecânicas do produto trefilado, haja vista que todos os resultados encontrados para os parâmetros avaliados foram muito similares (Gráficos 12, 13, 14 e 15).

Gráfico 12 – Comparativo dos valores médios de tensão de escoamento dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480



Fonte: Elaboração própria.

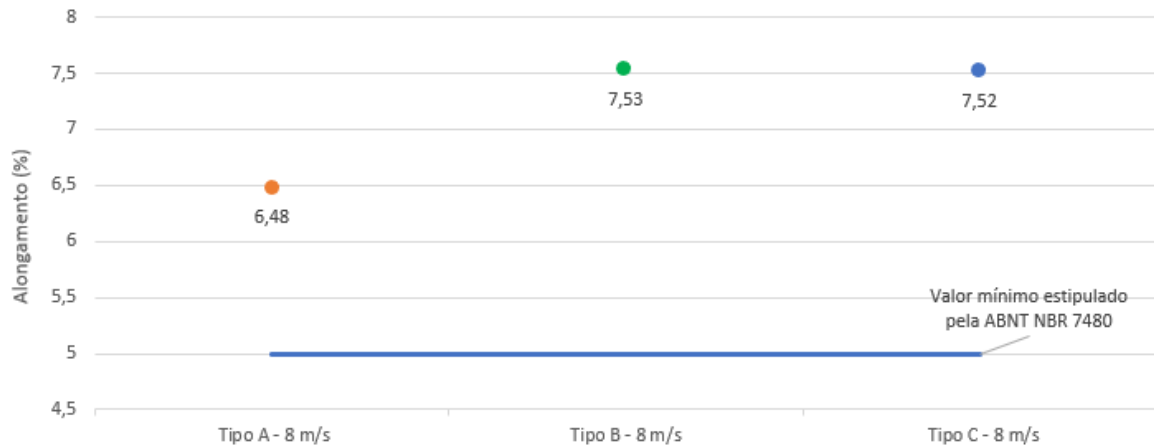
Gráfico 13 – Comparativo dos valores médios de tensão de resistência dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480



Fonte: Elaboração própria.



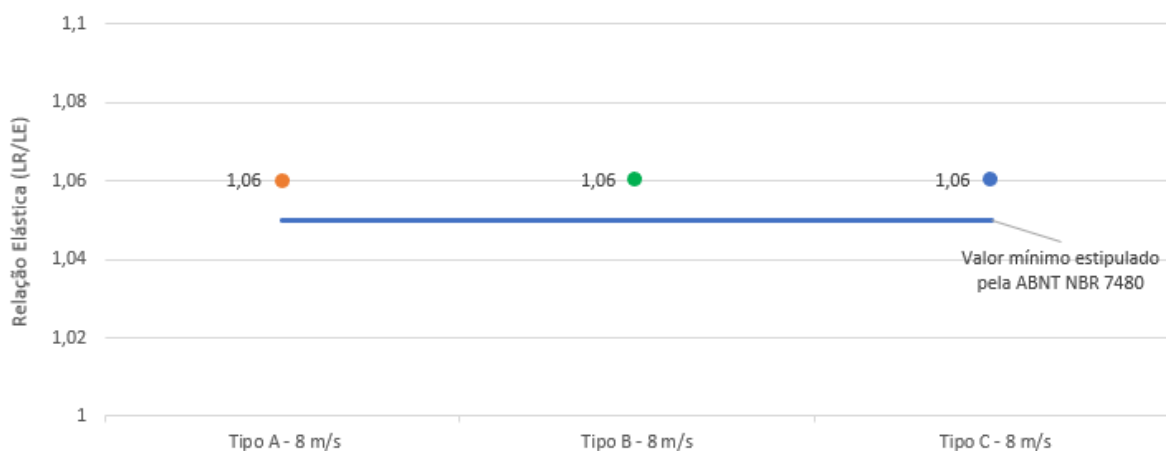
Gráfico 14 – Comparativo dos valores médios de alongamento dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480



Fonte: Elaboração própria.

Embora o valor encontrado para o alongamento dos corpos de prova trefilados com o lubrificante do tipo A na velocidade de 8 m/s seja consideravelmente menor do que os valores encontrados para os corpos de prova trefilados nesta mesma velocidade com os lubrificantes do tipo B e C, não é possível concluir nada a respeito de uma possível influência do tipo (natureza física ou química) de lubrificante utilizado no alongamento, visto que as tensões de escoamento e de resistência encontradas para as demais condições avaliadas foram muito próximas e que o procedimento experimental para a obtenção deste parâmetro possui inúmeras incertezas de medição associadas ao fator humano, o que pode levar a pequenas variações (desvios) dos resultados encontrados.

Gráfico 15 – Comparativo dos valores médios de relação elástica dos corpos de prova trefilados com os lubrificantes tipo A, B e C na velocidade de 8 m/s com o valor mínimo permitido pela ABNT NBR 7480



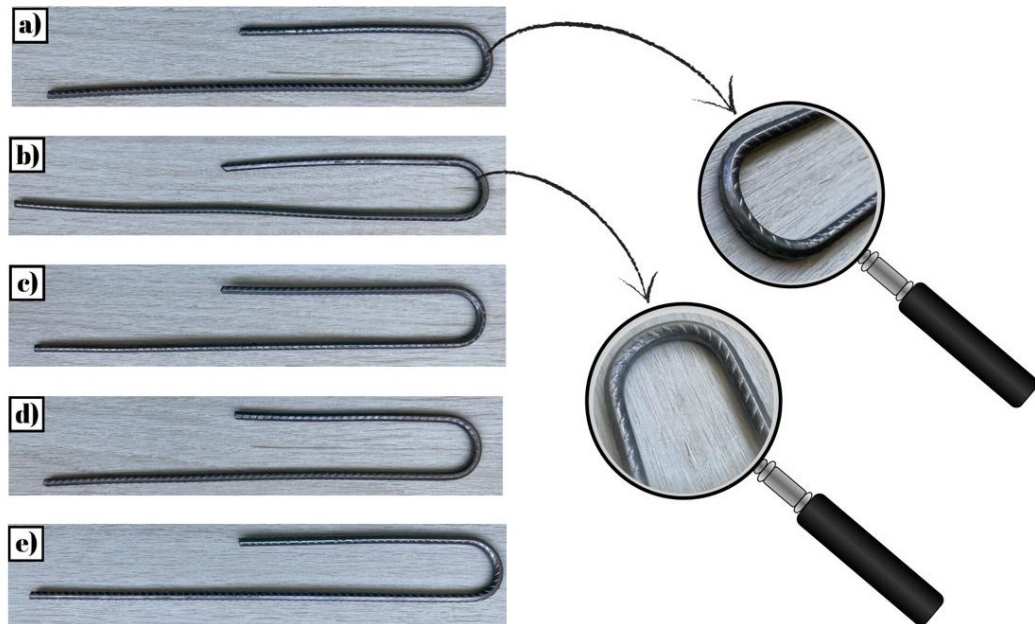
Fonte: Elaboração própria.

A média dos valores obtidos para a relação elástica dos corpos de prova ensaiados na velocidade de 8 m/s foi igual para todos os lubrificantes testados, comprovando a inexistência de uma relação entre essas variáveis.

No entanto, como foi visto anteriormente, o tipo de lubrificante utilizado possui uma forte influência na camada residual, o que pode resultar em um menor atrito do sistema, redução do desgaste e aumento da vida útil do ferramental, redução de custos, melhora da resistência à oxidação do material trefilado, entre outros.

O resultado das amostras submetidas ao ensaio de dobramento nas diferentes condições avaliadas pode ser visualizado na Figuras 35.

Figura 35 – Corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento: a) 4 m/s, lubrificante tipo A; b) 8 m/s, lubrificante tipo A; c) 12 m/s, lubrificante tipo A; d) 8 m/s, lubrificante tipo B; e) 8 m/s, lubrificante tipo C



Fonte: Acervo do autor.

Nenhuma das amostras avaliadas apresentou qualquer tipo de defeito de fissuração ou trinca na região da dobra. O ensaio de dobramento é um ensaio qualitativo bastante simples, utilizado no dia a dia da indústria para simular as condições reais dos canteiros de obras. Sendo assim, não é possível afirmar através dos resultados obtidos que o tipo de lubrificante utilizado ou a velocidade do processo possuem qualquer influência na capacidade de dobra dos fios de aço CA-60 nas diferentes condições avaliadas.

## 5 CONCLUSÕES

As análises realizadas a partir dos resultados obtidos foram conduzidas de modo a atender integralmente aos objetivos propostos no primeiro capítulo. As principais conclusões obtidas neste trabalho podem ser relacionadas da seguinte forma:

- À medida que a velocidade de trefilação foi aumentada, observou-se um incremento no valor da camada residual de lubrificante encontrada na superfície dos fios trefilados com o mesmo tipo de lubrificante (tipo A). Para a velocidade de 4 m/s, o valor obtido foi de 0,151 g/m<sup>2</sup>; para 8 m/s, registrou-se 0,193 g/m<sup>2</sup>; e para 12 m/s, o valor alcançou 0,264 g/m<sup>2</sup>.
- Não houve influência suficiente da velocidade de trefilação nas propriedades mecânicas analisadas do material empregado neste estudo;
- Para a mesma velocidade de trefilação (8 m/s), a utilização de diferentes tipos de lubrificantes demonstrou a existência de uma forte dependência entre o valor da camada residual de lubrificante e o tipo de lubrificante empregado;
- A granulometria dos diferentes lubrificantes testados na velocidade de 8 m/s exerceu uma influência significativa na camada residual dos fios trefilados, tendo em vista que o tamanho de grão médio obtido para os lubrificantes do tipo A, B e C foi de 14,39 µm, 19,03 µm e 26,73 µm, e o valor de camada residual obtido foi de 0,090 g/m<sup>2</sup>, 0,193 g/m<sup>2</sup> e 0,263 g/m<sup>2</sup>, respectivamente.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. **ABNT NBR 17005**: Método de ensaio de dobramento de barras e fios de aço destinados às armaduras para concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.
- ABNT. **ABNT NBR 6330**: Fio-máquina de aço-carbono, de uso geral, destinado à trefilação e laminação a frio – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- ABNT. **ABNT NBR 6354**: Fio-máquina de aço-carbono destinado à trefilação e laminação a frio – Dimensões e tolerâncias. Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.
- ABNT. **ABNT NBR 7477**: Determinação do coeficiente de conformação superficial de barras e fios de aço destinados a armaduras de concreto armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.
- ABNT. **ABNT NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ABNT. **ABNT NBR 7480**: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.
- ABNT. **ABNT NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos – ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ABNT. **ABNT NBR ISO 6892-1**: Materiais metálicos – ensaio de tração. Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- AÇO VERDE DO BRASIL. Fio-máquina. **AVB**, Açailândia, c2023. Disponível em: <https://avb.com.br/fio-maquina/>. Acesso em: 10 set. 2023.
- ARCELORMITTAL. Vergalhão ArcelorMittal CA 60 Nervurado. **ArcelorMittal**, São Paulo, c2023. Disponível em: <https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/construcao-civil/vergalhao-arcelormittal-ca-60-nervurado>. Acesso em: 10 set. 2023.
- ARRAIS, D. F. **Influência da velocidade de laminação e trefilação nas propriedades mecânicas e na microestrutura de um aço SAE 1013 na produção de vergalhão CA 60**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- ATOMAT GROUP. Suportes rotativos. **ATOMAT**, Piracicaba, c2023. Disponível em: <https://atomat.com.br/suportes-rotativos/>. Acesso em: 18 set. 2023.
- AZEVEDO, M. L. **Análise da lubrificação na superfície e nas propriedades de arames de alto teor de carbono trefilados**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- BARROS, R. A.; TEIXEIRA, F. S.; GONTIJO, T. S. Case study in a wire drawing: proposal to reduce the loss of greater representativity. **Electronic Journal of Management & System**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 88-96, 2018.

BERALDI, R. S.; MASIERO, P. A trefilação com o uso de cassetes laminadores e suas vantagens em relação ao processo tradicional utilizando fieiras. *In: SEMINÁRIO DE TREFILAÇÃO: ARAMES, BARRAS E TUBOS DE METAIS FERROSOS E NÃO-FERROSOS*, 3., 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABM, 2012. p. 30-37.

BORNSTROM, A. L.; VIKLUND, F. **The influence of drawing speed on steel wire surface quality**. 2022. Degree Project (Master of Science) – Örebro Universitet, Örebro, 2022.

BOTELHO, M. H.; MARCHETTI, O. **Concreto armado: eu te amo**. 7. ed. Brasil: Blucher, 2013.

BRASIL. **Portaria Inmetro n. 139 de 19 de março de 2021**. Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Barras e Fios de Aço destinados a Armaduras para Estruturas de Concreto Armado – Consolidado. Brasília, DF: INMETRO, 2021.

BRITO, E. C. **Avaliação dos efeitos dos parâmetros de laminação a frio nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço SAE 1013 para produção do vergalhão CA 60**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

BYON, S. M. *et al.* Effect of coating material and lubricant on forming force and surface defects in wire drawing process. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, [s. l.], v. 21, p. 104-110, 2011.

CABRERA, C.; MORON, C.; GARCIA, A. Learning process of the steel use in building engineering students. **American Journal of Educational Research**, [s. l.], v. 2, n. 6, p. 366-371, 2024.

CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 10. ed. Barueri: LTC, 2020.

CARDOSO, C. G. L.; SILVA, G. A. Resfriamento do vergalhão CA 60 no processo de laminação a frio. *In: SEMINÁRIO DE TREFILAÇÃO*, 6., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABM, 2015. p. 1-7.

CARRILLO, J.; LOZANO, H.; ARTETA, C. Mechanical properties of steel reinforcing bars for concrete structures in central Colombia. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 33, p. 1-18, 2021.

ÇETINARSLAN, C. S.; GÜZEY, A. Tensile properties of cold-drawn low-carbon steel wires under different process parameters. **Materials and Technologies**, [s. l.], v. 47, n. 2, p. 245-252, 2013.

DAVID, F. F. *et al.* Static Aging Behavior of microalloyed wire steel and carbon wire steel. **Materials Science Forum**, [s. l.], v. 869, p. 435-440, 2016.

DAVID, F. F. *et al.* The Bauschinger effect magnitude control in ultra-low carbon steel wires. **Materials Research**, São Carlos, v. 26, p. 1-9, 2023.

DAVID, F. F.; ALMEIDA, P. F. F.; FERNANDES, L. S. Análise da variabilidade da massa linear ao longo da produção de fios de CA-60 em laminadores a frio. *In: SEMINÁRIO DE TREFILAÇÃO*, 4., 2013, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2013. p. 74-82.

DJAVANROODI, F.; SALMAN, A. Variability of chemical analysis of reinforcing bar produced in Saudi Arabia. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 348, p. 1-11, 2018.

DJAVANROODI, F.; SALMAN, A. Variability of mechanical properties and weight for reinforcing bar produced in Saudi Arabia. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 230, p. 1-6, 2017.

EL-AMINE, K.; LARSSON, J.; PEJRYD, L. Experimental comparison of roller die and conventional wire drawing. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 257, p. 7-14, 2018.

ELHOUAR, S.; TERRENO, S. Leveraging advances in automation to benefit the construction industry in the structural steel sector. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 1218, 1-7, 2022.

EUROLLS. **CASSETE DE ROLOS – Tipo CB – E20C-00000010 & E20C-000000086 - versão BK Rev. 0 - 2018**: Manual de Uso e Manutenção. Itaquaquecetuba: Eurolls, 2018.

FELÍCIO, E. **Estudo da implementação de conceito da produção enxuta para redução de resíduos em uma manufatura do ramo siderúrgico**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

FERNANDES, L. S. **Redução do excesso da camada de zinco em linha de galvanização de arames**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

FERREIRA, H. C.; MARCHI, L.; FELISBERTO, R. Trefilação de aço alto teor de carbono: considerações sobre características do fio-máquina e parâmetros de processo como garantia de boa performance. *In: CONGRESSO ANUAL DA ABM*, 62., 2007, Vitória. **Anais [...]**. Vitória: ABM, 2007. p. 243-253.

FERREIRA, M. M. F. **Avaliação das causas de rupturas de arames no processo de trefilação do aço equivalente ao ABNT 1005 na unidade industrial da Arcelormittal em Juiz de Fora MG**. 2020. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

FRANÇA, J. R. O.; LIMA, A. C. M.; KLUG, J. L. Desenvolvimento do tratamento térmico do vergalhão CA50 em rolo pelo processo Stelmor. *In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO*, 52., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABM, 2015. p. 596-603.

GAWALI, P.; SHARMA, S. C.; KHARE, A. Variation in properties due to speed in cold wire drawing. **International Journal of Engineering Development and Research**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 481-486, 2018.

GOKYŪ, I.; ŌKUBO, T. Studies on the Roller Die. **Tetsu-to-Hagané Overseas**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 44-52, 1964.

HAAS, J. G. **Estudo de viabilidade para empresa de pré-armação com base em Lajeado: estudos dos perfis de consumo do aço**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Univates, Lajeado, 2016.

HE, Y. *et al.* Processing limit maps for the stable deformation of dieless drawing. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 330-337, 2011.

HISSANAGA, B. M. M. S. **Variáveis do processo termomecânico que influenciam na relação elástica do vergalhão CA-60**. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Dados do setor. **Instituto Aço Brasil**, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/dados-do-setor/>. Acesso em: 9 set. 2023.

JANDRLIĆ, I. *et al.* Effect of deformation rate on low carbon steels mechanical properties. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 461, p. 1-7, 2019.

JIBRIN, M. U.; EJEH, S. P. Chemical composition of reinforcing steel bars in the Nigerian construction industry. **International Journal of Civil & Environmental Engineering**, [s. l.], v. 13, p. 1-7, 2013.

LARSSON, J.; JANSSON, A.; KARLSSON, P. Monitoring and evaluation of the wire drawing process using thermal imaging. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 101, p. 2121-2134, 2019.

LEE, S.-K.; LEE, S.-B.; KIM, B.-M; Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72wt % C steel wire. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 210, n. 5, p. 776-783, 2010.

LERAMO, R. O.; ADEKOYA, L. O.; LOTO, C. A. evaluation of surface geometries and physical properties of concrete reinforcement steel rods rolled in Nigeria. **Case Studies in Construction Materials**, [s. l.], v. 8, p. 150-159, 2018.

LIM, W. T. **Statistical Analysis of Reinforcing Steel Properties**. 1991. Thesis (Master of Engineering in Mechanical Engineering) – University of Canterbury, Christchurch, 1991.

LOWRIE, J.; NGAILE, G. Analytical modeling of hydrodynamic lubrication in a multiple-reduction drawing die. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 5, p. 707-723, 2016.

MALVERN PANALYTICAL. **Difração laser (LD, Laser diffraction)**. 2024. Disponível em: <https://www.malvernpanalytical.com/br/products/technology/light-scattering/laser-diffraction>. Acesso em: 1 nov. 2024.

MANUFACTURING GUIDE. Cold rolling of sheets. **Manufacturing Guide**, Stockholm, c2023. Disponível em: [www.manufacturingguide.com/en/cold-rolling-sheets](http://www.manufacturingguide.com/en/cold-rolling-sheets). Acesso em: 10 set. 2023.

MARMENTINI, L. **Estudo do efeito Bauschinger em um arame trefilado CA60 4,20mm para utilização em concreto armado**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MIHU, A. M. *et al.* The influence of process parameters on non-conventional technology in drawing cassette roller die (Part 1). **Procedia Technology**, [s. l.], v. 22, p. 28-33, 2016.

MIRANDA, W. P. **Envelhecimento natural pós-deformação a frio dos aços SAE 1010 e 1012 na produção do vergalhão CA-60 reto**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

MOHAJAN, H. K. The First Industrial Revolution: Creation of a New Global Human Era. **Journal of Social Sciences and Humanities**, Jitra, v. 5, n. 4, p. 377-387, 2019.

MOTALLEB, A. **Improvement of mechanical properties of low carbon steel for manufacturing of spindle of jute spinning mill**. 2014. Dissertation (Doctorate) – Dhaka University of Engineering and Technology, Gazipur, 2014.

NGAILE, G.; LOWRIE, J. Lubrication and wear in drawing operations. *In*: TOTTEN, G. E. (ed.). **ASM Handbook**. Cleveland: ASM International, 2017. p. 768-783. (Friction, Lubrication, and Wear Technology, v. 18).

OCHSHORN, J. **Structural elements for architects and builders**. 3. edição. [S. l.]: Independently Published, 2020.

PEREIRA, P. G. N. **A evolução da microestrutura, propriedades mecânicas e textura cristalográfica na fabricação do vergalhão CA-60**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PINTO, D. F. **Velocidade de trefilação e seu efeito no encruamento e no acabamento superficial de um aço SAE 1008**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

PRISCO, U. Strain hardening of carbon steel during wire drawing. **Materials Research**, São Carlos, v. 21, n. 3, p. 1-5, 2018.

PRISCO, U.; SANTANA MARTINEZ, G. A.; KABAYAMA, L. K. Effect of die pressure on the lubricating regimes achieved in wire drawing. **Production Engineering**, [s. l.], v. 14, p. 667-676, 2020.

PROMILLS. **Manual do fabricante**. Udine: ProMills, 2013.

PUTRIQUE JÚNIOR, D. L. **Projeto de laminador de bancada**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.



ROCHA, F. A. C. **Desenvolvimento de um sistema de ventilação forçado para secar o fio-máquina na laminação a frio de vergalhões**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ROVEDA, D. L. **Influência do comprimento do paralelo de uma feira na trefilação de arame**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.

RAFIU, R. **Examination of microstructure of cold rolled steel steel**. Khulna: Khulna University of Engineering and Technology, 2023.

SAS-BOCA, I. M. *et al.* Severe reduction in section of copper wire using the technology of wire cold cassette roller dies. **Procedia Manufacturing**, [s. l.], v. 22, p. 73-78, 2018.

SCHNELL. **Manual do fabricante**. Jaraguá do Sul: Schnell, 2019.

SILVA, T. F. **Efeito dos parâmetros de trefilação nas propriedades mecânicas e microestruturais do aço SAE 1015 trefilado**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SIVAKUMARAN, K. S. Role of yield-to-tensile strength ratio in the design of steel structures. *In: JANSTO, S. G.; PATEL, J. (ed.). Niobium Bearing Structural Steels*. Pittsburgh: The Minerals, Metals & Materials Society, 2010. p. 63-76.

SOUSA, L. J.; ROSA FILHO, D. J.; MOURA, E. A. B. Aumento da camada de sabão no arame trefilado para produção de CA60. *In: SEMINÁRIO DE TREFILAÇÃO*, 4., 2013, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABM, 2013. p. 41-52.

SOUZA, J. F. **Estudo para diminuição do grau de redução por passe na laminação a frio de um fio de aço baixo carbono**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

SULIGA, M. The analysis of the high speed wire drawing process of high carbon steel wires under hydrodynamic lubrication conditions. **Archives of Metallurgy and Materials**, [s. l.], v. 60, n. 1, p. 403-408, 2015.

SULIGA, M. The analysis of the mechanical properties of high carbon steel wires after multipass high speed drawing process in conventional and hydrodynamic dies. **Archives of Metallurgy and Materials**, [s. l.], v. 59, n. 2, p. 681-685, 2014.

SULIGA, M. The influence of the high drawing speed on mechanical-technological properties of high carbon steel wires. **Archives of Metallurgy and Materials**, [s. l.], v. 56, n. 3, p. 823-828, 2011.

SULIGA, M.; JABŁOŃSKA, M.; HAWRYLUK, M. The effect of the length of the drawing die sizing portion on the energy and force parameters of the medium-carbon steel wire drawing process. **Archives of Metallurgy and Materials**, [s. l.], v. 64, n. 4, p. 1353-1359, 2019.

VASCONCELOS, L. M. C.; DAVID, F. F. Aplicação do efeito Bauschinger em arame baixo teor de carbono microlaminado a frio. *In*: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO IFMG, 9., 2021, *online*. **Anais** [...]. [S. l.]: IFMG, 2021.

WORLD STEEL ASSOCIATION. Data. **World Steel Association**, Brussels, c2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/>. Acesso em: 9 set. 2023.

WORLD STEEL ASSOCIATION. World Steel in Figures 2023. **World Steel Association**, Brussels, 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/>. Acesso em: 9 set. 2023.

WRIGHT, R. **Wire technology**: process engineering and metallurgy. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016.

YAO, S. *et al.* Force analysis and curve design for laying pipe in loop laying head of wire rod mills. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 32, p. 1-17, 2019.