

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

MATEUS SOTELO MENEZES

**TREFILAÇÃO A FRIO DE UM AÇO SAE 1020: EFEITOS DA VARIAÇÃO DAS
CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO NA FORÇA, ATRITO E PROPRIEDADES DO
MATERIAL**

Porto Alegre

2016

MATEUS SOTELO MENEZES

TREFILAÇÃO A FRIO DE UM AÇO SAE 1020: EFEITOS DA VARIAÇÃO DAS
CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO NA FORÇA, ATRITO E PROPRIEDADES DO
MATERIAL

Trabalho de diplomação submetido ao
Departamento de Metalurgia da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul como requisito
parcial à obtenção do título de Engenheiro
Metalurgista

Orientador: Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

Porto Alegre

2016

Menezes, Mateus Sotelo

Trefilação a frio de um aço SAE 1020: efeitos da variação das condições de lubrificação na força, atrito e propriedades do material / Mateus Sotelo Menezes. - 2016.

66 f.

Orientador: Alexandre da Silva Rocha.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Trefilação. 2. Força. 3. Atrito. 4. Siebel. 5. Sachs. I. Rocha, Alexandre da Silva, orient. II. Título.

MATEUS SOTELO MENEZES

TREFILAÇÃO A FRIO DE UM AÇO SAE 1020: EFEITOS DA VARIAÇÃO DAS
CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO NA FORÇA, ATRITO E PROPRIEDADES DO
MATERIAL

Este trabalho de diplomação foi analisado e julgado adequado para a obtenção do título de engenheiro metalurgista e aprovado em sua forma final pelo orientador e pela banca examinadora designada pelo Departamento de Metalurgia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Aprovado em: _____/_____/_____

ORIENTADOR

Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela – UFRGS

Prof. Dr. Afonso Reguly – UFRGS

Dedico este trabalho aos meus pais Mario Menezes e Maria Sotelo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais agradeço pelo amor e dedicação para comigo desde 1992. Agradeço pelo apoio moral e financeiro, por me ensinarem os valores da vida, por acreditarem em mim e por valorizarem as minhas (nossas) conquistas.

Agradeço a todos os meus familiares: avós, tios e primos, por serem a família da qual me orgulho em fazer parte e que é base de uma grande geração.

Ao meu tio Hélio Sotelo e sua família, agradeço a hospitalidade ao longo de sete semestres. Sem dúvida alguma, residir com pessoas tão especiais e perto da universidade, me fizeram uma pessoa e um aluno melhor. Ao mesmo tio, agradeço por ser referência em honra e caráter.

À minha prenda e futura fonoaudióloga Mariane Fernandes, agradeço por todo o carinho e amor, por ser fonte de calma em momentos difíceis e por motivar as minhas escolhas.

Agradeço a todos os meus amigos, sejam eles de longa data ou mais novos, por todo o apoio e parceria. Aos amigos que fiz na graduação, demonstro meu afeto pelos momentos passados e pela troca de conhecimento acadêmica.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, conceituada referência no ensino superior brasileiro, agradeço a oportunidade de fazer parte de sua história e de concluir uma graduação em um curso que tanto desejei.

A todos os professores desta universidade e, principalmente, aos integrantes do Departamento de Metalurgia, agradeço pelo profundo grau de conhecimento transmitido e pelas excelentes aulas lecionadas.

Ao orientador deste trabalho e de toda minha iniciação científica, Prof. Alexandre da Silva Rocha, agradeço pela paciência, ensinamentos e colaboração.

Agradeço aos integrantes do Grupo de Engenharia de Superfícies (GES) pertencente ao Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS pela oportunidade de aprendizado. Aos colegas da iniciação científica, mestrandos e doutorandos deste laboratório, deixo a gratidão e satisfação por todos os momentos passados e pelo conhecimento consolidado. Destaco os doutorandos Eng. Vinicius Dias, Eng.^a Carla Soares e Eng.^a Juliana Zottis, principais aliados nos trabalhos e pesquisas e grandes amigos.

À FAPERGS e CNPq, agradeço pelas bolsas de iniciação científica contempladas.

Ao doutorando Eng. Tomaz de Souza agradeço pelo apoio na realização deste trabalho e pelo fornecimento da fieira, do lubrificante e da matéria-prima para a trefilação.

Ao Instituto Federal Catarinense (IFC), Campus Luzerna, nas pessoas do Prof. Dr. Mario Wolfart Junior e do graduando Cristiano Turra, agradeço pelo espaço cedido para realização dos experimentos de trefilação e ensaios.

Ao Laboratório de Fundição (LAFUN) da UFRGS, na pessoa do Eng. Régis Amaral, agradeço pelo espaço na realização do ensaio de espectrometria.

Ao Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS, nas pessoas do Prof. Dr. Rafael Menezes Nunes e do Eng. Igor Diehl, agradeço pelo apoio na realização das medições de tensões residuais.

Agradeço a empresa Pioneiro Ecometais Industrial pela oportunidade de estágio e por todo o conhecimento adquirido.

RESUMO

O processo de conformação mecânica por trefilação apresenta estudos consolidados focados no conhecimento da operação e na melhoria dos resultados. As principais pesquisas atuais relacionadas a este processo abordam o aumento da velocidade de trefilação, o que requer maior atenção às condições de lubrificação e atrito. Entretanto, mensurar estas condições ainda é uma tarefa difícil. Sendo assim, este trabalho consiste na realização de trefilações utilizando duas condições diferentes de lubrificação e a verificação do atrito causado por cada uma. Para isto, corpos de prova de aço SAE 1020 foram trefilados com redução de 12,7% em uma máquina universal de ensaios sem utilização de qualquer lubrificação e com a adição de óleo lubrificante. A força necessária para a trefilação foi observada no equipamento e utilizada nos cálculos dos modelos teóricos de Siebel e Sachs para obtenção do coeficiente de atrito. Foram feitas caracterizações no material, como medições de rugosidade superficial, perfis de microdureza e metalografias para analisar as modificações causadas pela trefilação. Também foram realizadas medições de tensões residuais superficiais após as trefilações, a fim de verificar a influência do atrito neste parâmetro. Observou-se a elevada precisão dimensional promovida pelo processo e a melhoria do acabamento superficial do material, com reduções superiores a 70% do parâmetro Ra. Não houve alterações significativas na microdureza e na microestrutura do produto final. Para as trefilações sem utilização de lubrificação foi obtida uma média de 19,95 kN para a força e coeficientes de atrito de 0,34 e 0,40, conforme os modelos teóricos de Siebel e Sachs, respectivamente. Da mesma forma, os experimentos com utilização de óleo lubrificante apresentaram uma força média de 17,01 kN e coeficientes de atrito de 0,24 e 0,27. As medições de tensões residuais superficiais após as trefilações resultaram em valores trativos médios de 265 MPa para o experimento lubrificado e 277 MPa para o experimento sem lubrificação. O trabalho consolidou a possibilidade de realizar experimentos de trefilação em uma máquina universal de ensaios e demonstrou que estimativas dos coeficientes de atrito podem ser obtidas através de modelos teóricos, colaborando para um melhor entendimento das condições de atrito do processo.

Palavras-chave: Trefilação. Força. Atrito. Siebel. Sachs.

ABSTRACT

The drawing process presents consolidated studies focused on the knowledge of the operation and the improvement of the results. The main current researches of this process approach the increase of drawing speed, which requires greater attention to the conditions of lubrication and friction. However, measuring these conditions is still a hard job. Therefore, this work consists in the realization of drawing using two different lubrication conditions and the verification of the friction caused by each one. For this, SAE 1020 steel test specimens were drawn with a 12,7% reduction in a universal testing machine without the use of any lubrication and with the addition of lubricating oil. The force required for drawing was observed in the equipment and used in the calculation of Siebel and Sachs theoretical models to obtain the coefficient of friction. Characterizations were made in the material, such as surface roughness measurements, microhardness profiles and metallography to analyze the modifications caused by drawing. Surface residual stresses measurements were also performed after drawing, in order to verify the influence of the friction in this parameter. It was observed the high dimensional accuracy of the process and the improvement of the surface finish of the material, with reductions of more than 70% of the Ra parameter. There were no significant changes in the microhardness and microstructure in the final product. For drawing experiments without using lubrication an average of 19,95 kN was obtained for the force and friction coefficients of 0,34 and 0,40, according to the Siebel and Sachs theoretical models, respectively. Likewise, experiments using lubricating oil had an average force of 17,02 kN and friction coefficients of 0,24 and 0,27. Measurements of surface residual stresses after drawing resulted in average traction values to 265 MPa for the lubricated experiment and 277 MPa for the non-lubricated experiment. The work consolidated the possibility of conducting drawing experiments in a universal testing machine and demonstrated that estimates of the friction coefficients can be obtained by theoretical models, collaborating for a better understanding of the friction conditions of the process.

Keywords: Drawing. Force. Friction. Siebel. Sachs

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	09
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1	PROCESSO DE TREFILAÇÃO	11
2.1.1	Cálculos e teorias envolvidos	15
2.1.1.1	<i>Modelo teórico de Siebel</i>	17
2.1.1.2	<i>Modelo teórico de Sachs</i>	18
2.1.2	Ferramenta	19
2.1.3	Máquinas	24
2.2	ATRITO	25
2.2.1	Lubrificação	27
2.2.1.1	<i>Regimes de lubrificação</i>	28
2.2.1.2.	<i>Sistema de lubrificação</i>	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	CORTE E USINAGEM DAS BARRAS	37
3.2	ENSAIOS DE COMPRESSÃO E ESPECTROMETRIA	38
3.3	ENSAIOS DE MICRODUREZA VICKERS E METALOGRAFIAS	39
3.4	MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL	41
3.5	PROCESSOS DE TREFILAÇÃO	41
3.6	MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS SUPERFICIAIS	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1	CARACTERIZAÇÃO INICIAL DO MATERIAL	46
4.2	FORÇA E ATRITO	49
4.3	RUGOSIDADE SUPERFICIAL	52
4.4	MICRODUREZA	53
4.5	METALOGRAFIA	56
4.6	TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL	57
5	CONCLUSÕES	61
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1 INTRODUÇÃO

A trefilação representa um amplo campo de estudo, cujas investigações vão desde os aspectos relacionados ao próprio processo, tais como tensão de trefilação, lubrificação e características da deformação, até a análise do comportamento ou propriedades subsequentes do material trefilado (GIORGINI, 2013).

Conforme Suliga (2015), atualmente o principal foco de desenvolvimento das indústrias de trefilação é implementar novas tecnologias que permitam aumentar a velocidade deste processo de conformação mecânica. Entretanto, aumentar a velocidade do processo implica no aumento da temperatura na interface entre ferramenta e matéria-prima. Este calor gerado pode levar a uma modificação das propriedades mecânicas do material conformado, interferir nas condições de lubrificação e reduzir a vida útil da ferramenta.

Uma vez que o atrito não é um parâmetro diretamente mensurável e requer extrema atenção, diversos estudos vêm sendo realizados para permitir uma observação mais exata das condições de lubrificação, de forma que seu entendimento seja melhorado e o coeficiente de atrito possa ser estimado com maior precisão, como demonstrado nos trabalhos publicados por Felder *et al.* (2012), Hoshi *et al.* (2016) e Nanao *et al.* (2015).

O desenvolvimento de novos lubrificantes e técnicas de lubrificação também merecem destaque no cenário atual. Segundo Utsunomiya *et al.* (2013), a utilização de uma camada porosa na superfície do material a ser trefilado apresenta bons resultados e redução do coeficiente de atrito.

Como forma de mensurar os valores do coeficiente de atrito para determinada operação de trefilação, Souza *et al.* (2015) realizaram diferentes processos e, com os valores de força obtidos pelo equipamento, calculou o coeficiente de atrito para as determinadas condições envolvidas utilizando o modelo teórico de Siebel.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo determinar o coeficiente de atrito gerado em dois processos de trefilação a frio onde se diferenciam as condições de lubrificação e avaliar seus efeitos nas propriedades do material. Para isto, seis corpos de prova de aço SAE 1020 foram trefilados utilizando um dispositivo desenvolvido e devidamente acoplado a uma máquina universal de ensaios. Três

corpos de prova foram trefilados sem utilização de lubrificante e três corpos de prova foram trefilados utilizando óleo lubrificante. A força necessária para que o processo fosse realizado é registrada no sistema de aquisição de dados da máquina de ensaios e, com tal valor, foi calculado o coeficiente de atrito utilizando as equações já conhecidas propostas por Sachs e Siebel.

Juntamente com os valores de força e coeficiente de atrito para cada lubrificante, foram realizadas caracterizações no produto trefilado a fim de avaliar as modificações aplicadas pelo processo de deformação a frio. Estas caracterizações incluem medições de rugosidade superficial, perfis de microdureza, tensão residual superficial e análise metalográfica.

O desenvolvimento do trabalho iniciou-se com a revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2, onde são abordados os conceitos gerais do processo de trefilação. Nesta parte, destaca-se a ferramenta de trefilação e os modelos teóricos propostos por Sachs e Siebel. No mesmo capítulo, as definições de atrito são apresentadas, bem como as condições e materiais que permitem que ocorra lubrificação no processo.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, enfatizando o processo de trefilação, bem como os ensaios de caracterização realizados no produto antes e após a conformação mecânica.

Os capítulos 4 e 5 apresentam, respectivamente, os resultados e as conclusões do estudo, baseados na metodologia aplicada e na comparação com trabalhos publicados por outros autores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo pretende apresentar os principais conceitos referentes ao processo de conformação mecânica por trefilação, bem como o fenômeno de atrito. Para tal entendimento utilizaram-se bibliografias antigas e bem estabelecidas, assim como pesquisas que surgiram nos últimos anos relacionadas a este tema.

2.1 PROCESSO DE TREFILAÇÃO

Uma das operações de conformação mecânica mais antigas e mais importantes para a fabricação de produtos metálicos de diferentes geometrias, a trefilação caracteriza-se sempre pelo tracionamento da matéria-prima através de uma matriz que lhe confere geometria e dimensões especificadas (BUTTON, 2008).

Há indícios da realização deste processo há centenas de anos com a utilização de ferramentas simples que resultavam em produtos de baixa qualidade. Após o desenvolvimento de uma tecnologia moderna que aumentou a qualidade final do produto, a indústria de trefilação de fios-máquina, barras e perfis consagra-se como uma das mais importantes dentre os processos de conformação mecânica (JUNKER, 2014).

Na conformação mecânica de materiais, a trefilação é utilizada para a fabricação de peças que serão utilizadas na indústria automotiva, máquinas de engenharia, ferramentas e equipamentos industriais, sejam produzidas de aço, ligas de alumínio, cobre ou materiais nobres. Sua aplicação mais comum é na obtenção de eixos de diversos tipos, hastes para válvulas de bombas e amortecedores, além de arames e fios (AGOSTINHO; VILELLA; BUTTON, 2004; MONDARDO, 2012; SOARES, 2012).

O princípio básico do processo é o mesmo desde os seus primórdios, sendo realizado através de passes, consecutivos ou não, em fieiras estrategicamente posicionadas que provocam pequenas reduções de seção transversal no material. Através do controle adequado destas reduções de seção e com o uso de lubrificantes eficientes, o processo possibilita a obtenção de produtos com grande qualidade dimensional, superficial e geométrica (BUTTON, 2008).

Agostinho, Vilella e Button (2004) apresentam uma comparação entre as tolerâncias que podem ser obtidas para barras de aço laminadas a quente e barras

trefiladas a frio, demonstrando a maior precisão dimensional que é alcançada com o processo a frio, fato este que fica evidente na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação entre tolerâncias de barras laminadas a quente e barras trefiladas

Laminada a quente		Trefilada a frio	
Diâmetro (mm)	Tolerância (mm)	Diâmetro (mm)	Tolerância (mm)
5 a 14	0,8	3 a 6	0,08
15 a 18	1,0	6 a 10	0,09
20 a 24	1,1	10 a 18	0,11
25 a 30	1,2	18 a 30	0,13
32 a 40	1,4	30 a 50	0,16

Fonte: Agostinho, Vilella e Button (2004, p. 18)

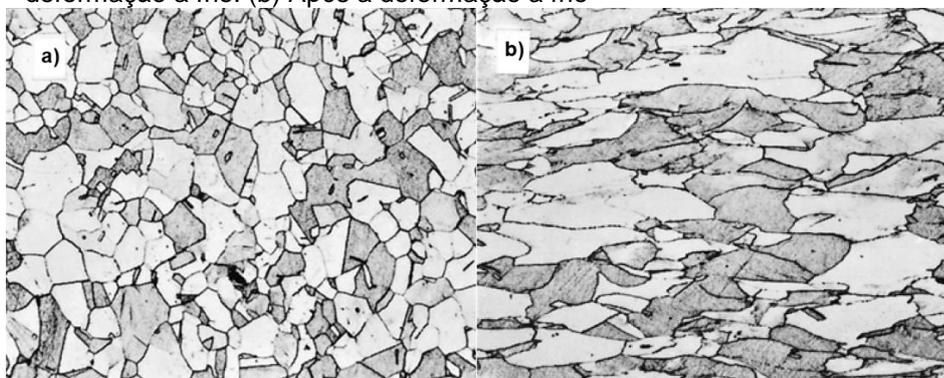
O volume de material trabalhado permanece constante durante todo o processo, característica presente nos processos de conformação mecânica. Na maioria dos casos, a trefilação é realizada em temperatura ambiente. Entretanto, seções muito grandes ou tubulares podem ser conformadas em temperaturas elevadas para reduzir o esforço atuante, sendo uma importante exceção a trefilação a morno do tungstênio para fabricação de filamentos de lâmpadas incandescentes (ASM, 1996; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009a).

Uma vez ocorrendo abaixo da temperatura de recristalização do material, o processo causa um encruamento na camada superficial do produto. A definição mais abrangente do encruamento é relacionada ao aumento de resistência mecânica devido à deformação plástica a frio, sob condições onde não estão presentes os mecanismos metalúrgicos que levam à recristalização do material metálico. A Figura 1 ilustra a diferença entre uma microestrutura recozida e encruada. Associado ao efeito do aumento de resistência mecânica pelo encruamento, há simultaneamente os problemas causados pela distorção interna do material, representada pelo afinamento e alongamento dos grãos cristalinos. Estes problemas resultam no acúmulo de tensões internas, na perda de ductilidade e na queda da resistência à corrosão (BUTTON, 2008).

No caso da trefilação de aços, a utilização de etapas de recozimento pode ser necessária após certo número de passes e antes que a operação seja continuada ou mesmo se a utilização do produto exigir características de elevada ductilidade. Este

tratamento térmico envolve o aquecimento do material até a formação de grãos de austenita, em processos conhecidos como recuperação e recristalização. Ao analisar-se o diagrama ferro-carbono, o aquecimento e encharque é realizado acima da linha Ac3 para os aços de baixo e médio carbono e acima da linha Ac1 para aços hipereutetóides, seguidos de um resfriamento lento no interior do próprio forno. O resfriamento lento permite a formação de grãos de ferrita equiaxiais e perlita grossa, microestruturas de elevada ductilidade que permitirão a aplicação de nova deformação plástica (ASM, 1996; KRAUSS, 2005).

Figura 1. Diferenças na microestrutura de um metal policristalino. (a) Antes da deformação a frio. (b) Após a deformação a frio



Fonte: Callister (2007, p. 186)

A fim de minimizar os efeitos de encruamento, reduzindo as tensões internas do produto trefilado e a necessidade de etapas de recozimento, prefere-se sempre o uso de passes sucessivos de trefilação com pequenas reduções de área por passe (BUTTON, 2008).

O aumento da velocidade do processo de trefilação é o fator mais estudado na atualidade pelas indústrias que buscam aumentar a sua produtividade. O principal impacto do aumento da velocidade é a geração de calor, podendo levar a uma modificação das propriedades mecânicas do material conformado. O aumento de temperatura também pode provocar uma deterioração nas condições de lubrificação e reduzir a vida útil da ferramenta (XU, 2014).

Resultados obtidos por Pinto (2016) indicam que a velocidade de trefilação influencia o coeficiente de encruamento (n) do material, considerando a mesma redução de área. O mesmo autor também concluiu que o aumento da velocidade do processo em determinada faixa não exerceu influência sobre a rugosidade do produto final e que os maiores níveis de energia impostos pelo aumento da velocidade

evidenciam uma tendência ao aumento dos níveis de tensões residuais compressivas na superfície do arame trefilado. A presença de tensões residuais superficiais compressivas é favorável aos processamentos posteriores do material, pois inibe o crescimento e propagação de trincas.

Tensões residuais são definidas como as tensões elásticas presentes em um corpo sem a existência de carregamentos externos ou gradientes de temperatura. Todos os processos de fabricação que envolvem deformação plástica, gradientes térmicos e/ou transformações de fase produzem um componente com tensões residuais de algum grau de dimensão. O valor máximo em módulo que estas tensões podem atingir é o próprio limite de escoamento do material, sendo que acima deste valor haverá deformação plástica. As tensões residuais se sobrepõem às tensões de serviço, sendo que esta característica pode ser benéfica ou não. Se um componente com tensões residuais compressivas na superfície sofre um carregamento trativo, haverá uma subtração das tensões e um aumento do desempenho deste componente em serviço. Entretanto, quando um componente com tensões residuais trativas sofre um carregamento de tração, há uma sobrecarga local no material que pode levar a falhas inesperadas (NUNES, 2012).

Antes do processo de trefilação ser, de fato, realizado, algumas etapas de preparação da matéria-prima devem ser realizadas para assegurar o sucesso da operação. Entre estas etapas estão o apontamento e a decapagem do material. O apontamento envolve a preparação de uma das extremidades do material, reduzindo sua seção até que possa entrar na ferramenta e atravessá-la. Os procedimentos para o apontamento podem ser feitos através de usinagem, martelamento, esmerilhamento ou ataque químico (ASM, 1996).

A decapagem pode ser realizada mediante processos mecânicos ou químicos, com a mesma intenção de reduzir a oxidação formada na superfície da matéria-prima antes do processo de trefilação. A decapagem mecânica é a mais utilizada, podendo ser realizada com diferentes técnicas, como jateamento ou lixamento, e apresenta menor custo de aplicação. Em comparação, o processo de decapagem química utilizando banhos de ácido clorídrico ou sulfúrico é mais eficiente, mas necessita de maiores investimentos (GIORGINI, 2013; JUNKER, 2014).

2.1.1 Cálculos e teorias envolvidos

Para facilitar o entendimento das equações que estão na sequência deste trabalho, é importante lembrar alguns conceitos básicos das propriedades mecânicas dos materiais. As Equações 1 a 8 regem estes conceitos e estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2 – Equações básicas para a conformação mecânica

Tensão de engenharia	$\sigma = \frac{F}{A_0}$	(1)
Deformação de engenharia	$\varepsilon = \frac{A_1 - A_0}{A_0} = \frac{\Delta A}{A_0}$	(2)
Tensão verdadeira	$k_f = \frac{F}{A_i} = \sigma(1 + \varepsilon)$	(3)
Deformação verdadeira	$\varphi = \ln \frac{A_1}{A_0} = \ln(1 + \varepsilon)$	(4)
Módulo de elasticidade (módulo de Young)	$\sigma = E\varepsilon$	(5)
Critério de escoamento de Tresca	$k_f = \sigma_1 - \sigma_3$	(6)
Critério de escoamento de Von Mises	$k_f = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{1/2}$	(7)
Equação de Hollomon	$k_f = C\varphi^n$	(8)

Fonte: Callister (2007), Schaeffer (2004) e Schuler (1998)

Na tabela acima, F é a força (N), A_0 e A_1 são, respectivamente, a área inicial e a área final do material conformado (mm²) e A_i é a área instantânea deste mesmo material. As tensões normais principais no corpo são dadas por $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, C é o coeficiente de resistência (MPa), e n é o coeficiente de encruamento.

Button (2008) apresenta que, de uma forma simples, a tensão trativa necessária para conformar o material define a tensão de trefilação (σ), que

multiplicada pela área da seção transversal (A) do produto trefilado fornecerá a força de trefilação, conforme a Equação 9:

$$F = \sigma \cdot A \quad (9)$$

O valor obtido para a força de trefilação (F), juntamente com a velocidade do processo (v), definirá a potência necessária para a máquina trefiladora (Equação 10):

$$P = F \cdot v \quad (10)$$

Para os cálculos de tensões e deformações nos processos de trefilação, há métodos desenvolvidos que permitem avaliar, entre outras, as seguintes variáveis: distribuição de tensões no produto trefilado, deformação e encruamento acumulados pelos passes, esforços de trefilação, potência da máquina e dimensionamento das ferramentas. Para analisar a influência destas variáveis, há métodos específicos que podem ser teóricos ou experimentais. Os métodos experimentais apresentam a vantagem de fornecerem resultados mais próximos do observado na prática industrial, mas apresentam os inconvenientes de exigirem a execução de um grande número de experimentos e serem restritos a algumas condições de processamento (BUTTON, 2008).

Em relação aos métodos teóricos, que ainda podem ser subdivididos em métodos analíticos e métodos numéricos, sabe-se que apresentam resultados mais precisos quanto maior for a sua dificuldade de desenvolvimento. Para fins de aproximação dos resultados esperados, os métodos teóricos são suficientes para a escolha dos equipamentos de trefilação e para o dimensionamento das ferramentas (BUTTON, 2008).

Métodos teóricos numéricos são cada vez mais utilizados para estudos dos processos de conformação mecânica. Entre tais métodos, pode-se destacar o método dos elementos finitos (MEF), de alto custo e dificuldade de desenvolvimento e implantação, mas apresentando resultados detalhados e com elevada precisão (BUTTON, 2008). O próprio autor do presente trabalho de diplomação realizou alguns estudos utilizando o MEF direcionado a trefilação e analisando a variação de tensões na ferramenta ao longo do processo, conforme pode ser visto em Menezes *et al.* (2016). Rubio *et al.* (2005) também utilizaram o MEF para significativas análises do processo de trefilação.

Em relação aos métodos teóricos analíticos para o cálculo da força de trefilação, os principais estão baseados nas variáveis ângulo de fieira, coeficiente de

atrito, áreas inicial e final do material e propriedades mecânicas do mesmo. Uma vez que não há um método de determinação direta do coeficiente de atrito no processo, não é possível comparar com exatidão os modelos teóricos propostos e nem afirmar qual modelo fornece indicações mais exatas do processo (GERBASE FILHO, 1976).

A partir de 1915, estudos começaram a ser realizados para desenvolver expressões para o cálculo da força de trefilação. Sachs, em 1927, apresentou seu modelo baseado na teoria elementar da plasticidade e Siebel apresentou seu modelo desenvolvido a partir do trabalho de trefilação. Em 1940, Körber e Eichinger acrescentaram aos modelos de Sachs e Siebel mais um termo devido ao cisalhamento interno do material trefilado. A partir de então, outros autores, como Geleji e Avitzur, baseados nos modelos já existentes, formularam novas expressões para o cálculo da força de trefilação (GERBASE FILHO, 1976).

Ambas as apresentações demonstradas na sequência para os métodos teóricos de Sachs e Siebel foram baseadas no trabalho de Gerbase Filho (1976).

2.1.1.1 Modelo teórico de Siebel

Siebel baseou seu modelo teórico no cálculo do trabalho necessário de trefilação, expresso na Equação 11:

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

onde T_U é o trabalho útil, T_A é o trabalho de atrito e T_C é o trabalho interno de cisalhamento.

A parcela chamada trabalho útil caracteriza o trabalho necessário para a conformação do material. A partir do deslocamento de um elemento de forma cilíndrica no interior da fieira e utilizando o critério de escoamento de Tresca (Equação 6), o trabalho útil resulta na expressão indicada na Equação 12:

$$T_U = V \cdot K_f \cdot \varphi_A \quad (12)$$

onde V é o volume do material, K_f é a tensão de escoamento do mesmo e φ_A é a deformação verdadeira em área.

A parcela conhecida por trabalho de atrito, caracterizando o trabalho necessário para vencer o atrito entre material e fieira, é dada pela Equação 13:

$$T_A = V \cdot \frac{\mu}{\alpha} \cdot K_f \cdot \varphi_A \quad (13)$$

onde, além das mesmas variáveis já citadas, μ é o coeficiente de atrito e α é o semiângulo da fieira.

Por fim, conforme Körber e Eichinger, é necessário acrescentar uma parcela proveniente do trabalho interno de cisalhamento causado pela mudança de orientação do material dentro da fieira. Este termo é dado pela Equação 14:

$$T_C = \frac{2}{3} \cdot V \cdot K_f \cdot \frac{\alpha}{\varphi_A} \quad (14)$$

A soma das três parcelas indicadas na Equação 11 resulta na equação final para o modelo teórico de Siebel (Equação 15):

$$F = A_1 \cdot \varphi_A \cdot K_{fm} \cdot \left(1 + \frac{\mu}{\alpha} + \frac{2}{3} \frac{\alpha}{\varphi_A} \right) \quad (15)$$

Na Equação 15, o termo K_f foi substituído por K_{fm} , que é a tensão de escoamento média do material, considerada uma vez que o valor de K_f varia durante a trefilação devido ao encruamento do material. A tensão de escoamento média é dada pela Equação 16:

$$k_{fm} = \frac{k_{f0} + k_{f1}}{2} \quad (16)$$

O modelo de Siebel também nos permite calcular o que é conhecido na literatura como o ângulo ótimo de trefilação, ou seja, aquele para o qual a mínima força de trefilação é necessária. Este cálculo é baseado em reduzir ao máximo a parcela que está entre parênteses na Equação 15, resultando na Equação 17:

$$\alpha_{ótimo} = \sqrt{\frac{3}{2} \varphi \mu} \quad (17)$$

2.1.1.2 Modelo teórico de Sachs

Sachs desenvolveu seu modelo a partir da teoria elementar da plasticidade, onde, considerando um elemento de certa espessura no interior da fieira, fazendo o equilíbrio das forças no sentido axial e utilizando o critério de escoamento de Tresca (Equação 6), propôs a Equação 18:

$$F = A_1 \cdot K_{fm} \cdot \left(1 + \frac{1}{\mu \cdot \cot \alpha} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right] \quad (18)$$

onde A_1 e A_0 são, respectivamente, a área final e inicial do material trefilado, K_{fm} é a tensão de escoamento média deste mesmo material, μ é o coeficiente de atrito e α é o semiângulo da fieira.

É necessário ainda acrescentar o termo F_C proposto por Körber e Ecihinger que considera o cisalhamento interno do material. Este termo é dado pela Equação 19:

$$F_C = \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot K_{fm} \cdot \alpha \cdot A_1 \cong 0,77 \cdot K_{fm} \cdot \alpha \cdot A_1 \quad (19)$$

Sendo, finalmente, o modelo teórico proposto por Sachs expresso pela Equação 20:

$$F = A_1 \cdot K_{fm} \cdot \left\{ \left(1 + \frac{1}{\mu \cdot \cot \alpha} \right) \cdot \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_0} \right)^{\mu \cdot \cot \alpha} \right] + 0,77 \cdot \alpha \right\} \quad (20)$$

2.1.2 Ferramenta

Os esforços preponderantes na deformação são esforços de compressão exercidos pelas paredes do furo da ferramenta sobre a matéria-prima, quando de sua passagem, por efeito de um esforço de tração aplicado na direção axial do fio e de origem externa. Como o esforço externo é de tração e o esforço que provoca a deformação é de compressão, o processo de trefilação é classificado como um processo de compressão indireta (BRESCIANI FILHO *et al.*, 2011).

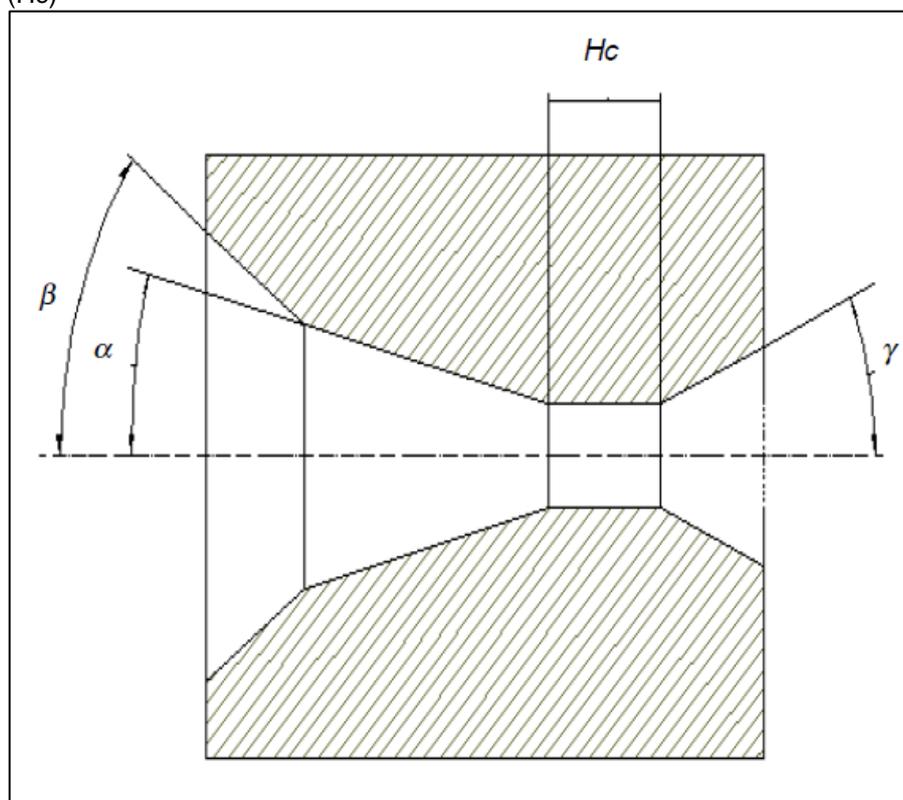
A principal ferramenta de trefilação, também chamada de matriz de trefilação ou, mais comumente, fieira, apresenta para a grande maioria dos processos uma geometria cônica com quatro regiões distintas e cuja representação pode ser visualizada na Figura 2 (ASM, 1996; BUTTON, 2008; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009a; SOARES, 2012):

- Região de entrada: representada pelo ângulo 2β , promove o guiamento da matéria-prima para dentro da fieira. Esta região tem importância fundamental na penetração do lubrificante;
- Região de trabalho: representada pelo ângulo 2α , aplica a deformação plástica no material através de compressão indireta. Se o processo não apresentar maiores problemas, é nesta região que ocorre o primeiro contato da matéria-prima com a fieira. É possivelmente a parte mais importante da ferramenta;
- Região de calibração: representada pela altura ou comprimento de calibração H_c , é responsável pela definição da geometria e das dimensões do produto trefilado. Esta região não envolve nova redução e sua importância está em definir o diâmetro final do produto. Trabalhos

publicados por Souza (2011) e Soares (2012) mostraram que esta região tem forte relação com o surgimento de tensões residuais no material trefilado;

- Região de saída: representada pelo ângulo 2γ , é a região na qual o produto sofre a recuperação elástica devido ao término dos esforços compressivos. Também apresenta a finalidade de facilitar a saída do produto da fieira e permitir a redução do desgaste que aconteceria em caso de paradas no processo ou desalinhamento da ferramenta.

Figura 2. Representação das regiões de uma ferramenta cônica de trefilação com os ângulos de entrada (β), de trabalho (α) e de saída (γ), bem como a zona de calibração (H_c)



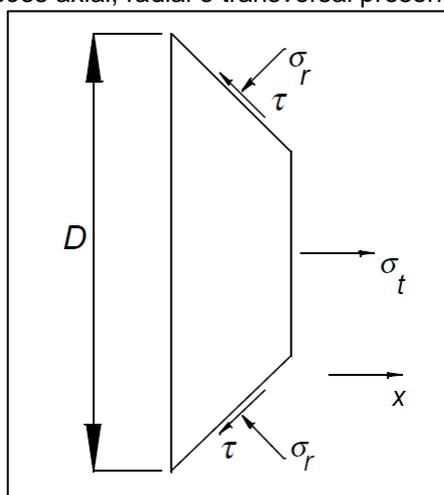
Fonte: Button (2008, p. 4)

Na região de trabalho, responsável de fato pela deformação no material, definem-se três tensões atuantes. Estas tensões são apresentadas na Figura 3, considerando uma parte do material sendo trefilado e têm as seguintes definições (BUTTON, 2008):

- Tensão trativa na direção axial devido ao tracionamento da barra;
- Tensões radiais compressivas devido à reação da parede da ferramenta ao movimento axial da matéria-prima;

- Tensões tangenciais devido ao atrito causado pelo movimento da barra em contato com a ferramenta.

Figura 3. Tensões axial, radial e transversal presentes na trefilação



Fonte: Button (2008, p. 9)

Apesar da ferramenta de geometria cônica ser a mais utilizada, outros formatos estão constantemente sendo estudados com a finalidade de melhorar o processo e o produto final. Para fieiras cônicas, além dos trabalhos já mencionados de Sachs e Siebel, Avitzur (1963) também realizou uma detalhada análise desta ferramenta. Zhao, Zhao e Wang (1995) apresentaram estudos considerando matrizes hiperbólicas e elípticas, enquanto Zhang *et al.* (2016) apresentaram estudos com fieira côncava dupla.

Visando reduzir a heterogeneidade do material trefilado e, principalmente, a redução das tensões residuais, diversos pesquisadores vêm modificando a geometria da ferramenta de trefilação. Kuboki *et al.* (2001) propuseram alterações na geometria de uma fieira cônica, dividindo a região de trabalho em duas conicidades. Coser, Souza e Rocha (2015) realizaram um estudo utilizando simulação numérica e compararam este caso com uma fieira convencional, concluindo que a fieira com região cônica dupla aplica deformações menos heterogêneas na seção transversal do material, melhorando o perfil de tensões residuais do mesmo.

Dependendo do material a ser conformado, a redução de seção transversal por passe por atingir até cerca de 45%, sendo que acima deste valor haverá comprometimento da qualidade superficial do material. Normalmente, quanto menor a área desta seção, menor será a redução por passe. Uma pequena redução também

pode ser utilizada para aferir precisão dimensional e/ou melhorar o acabamento superficial do material. Entretanto, para estes casos, como a deformação fica localizada apenas na camada superficial do material, resultará em uma microestrutura heterogênea e as suas propriedades irão variar em função da posição da seção transversal (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009a).

O uso de uma fiação com a forma correta para um determinado diâmetro inicial da matéria-prima é muito importante para a qualidade final do produto. Se o ângulo de trabalho for muito grande, o trabalho a frio não é transmitido ao centro do material trefilado podendo provocar fraturas do tipo taça e cone. Porém, se o ângulo de trabalho for menor que o recomendado, haverá atrito excessivo no arame, possibilitando a ruptura do produto por efeitos de tensão interna (SOARES, 2012).

Para verificar o efeito do ângulo de trabalho no processo de trefilação, uma teoria moderna incorporou as variáveis significativas em uma equação que resulta em um valor conhecido como parâmetro Δ (Equação 21):

$$\Delta \cong \left(\frac{\alpha}{r}\right) [1 + (1 - r)^{1/2}]^2 \quad (21)$$

onde α é o semiângulo de trabalho em radianos e r é a redução do material dada pela Equação 22:

$$r = 1 - A_1/A_0 \quad (22)$$

Os valores para Δ variam de 2 a 3, sendo que valores elevados correspondem a pequenas reduções de seção e grandes ângulos de trabalho, enquanto pequenos valores de Δ correspondem a elevadas reduções de seção e pequenos valores do ângulo de trabalho (ASM, 1996).

Para reduzir o aparecimento de tensões residuais no produto final, torna-se necessário encontrar uma configuração ideal entre a geometria da ferramenta e a redução de seção, de forma a minimizar a aplicação de deformações não homogêneas na peça de trabalho (SOARES, 2012).

A seleção do material para uma ferramenta de trefilação a frio depende primeiramente das dimensões, composição química, forma, tolerância dimensional e quantidade de material a ser processado. Para seções circulares, fiação produzidas em diamante ou metal duro são as mais recomendadas. Em operações reduzidas ou de geometrias especiais, a utilização de alguns tipos de aço ferramenta apresenta menor custo (ASM, 1996). Segundo Giorgini (2013), ainda que mais raros, materiais

cerâmicos também vêm sendo considerados como alternativas para a fabricação de matrizes.

Na sequência são apresentados os principais materiais utilizados para a fabricação de ferramentas de trefilação:

- **FERRAMENTAS DE DIAMANTE:** a utilização deste material fica restrito, principalmente, pelas limitações do tamanho da ferramenta, devido ao alto custo necessário para a fabricação de grandes fôrças. Entretanto, o material pode superar o metal duro de 10 a 200 vezes em vida útil, o que pode tornar a operação rentável, apesar do alto custo de fabricação (ASM, 1996).
- **FERRAMENTAS DE METAL DURO:** apresentam uma melhor relação de custo para produtos de maiores seções. Os metais duros mais importantes são: carbeto de tungstênio (WC), carbeto de tântalo (TaC), carbeto de titânio (TiC) e carbeto de nióbio (NbC). As ferramentas são obtidas por etapas de fabricação que envolvem metalurgia do pó, sinterização a alta temperatura e polimento final. Após atingirem certo nível de desgaste, sem grandes danos ou quebras, estas ferramentas podem ser usinadas internamente para acomodar maiores seções de matéria-prima (ASM, 1996; BUTTON, 2008; GUMMERT, 2014).

Takada, Matsubara e Kawagishi (2013) estudaram o desgaste em ferramentas de trefilação de WC variando a sua composição química. Foram adicionados diferentes teores de TaNbC, Cr_3C_2 , VC, Co e Ni na liga de WC durante a fabricação da ferramenta e os experimentos de trefilação utilizaram arames de aço alto carbono com diâmetro de 1,2 mm. As ferramentas produzidas com WC e adição de TaNbC apresentaram os melhores resultados em relação ao desgaste, seguidas por ligas contendo Cr_3C_2 e Cr_3C_2+VC .

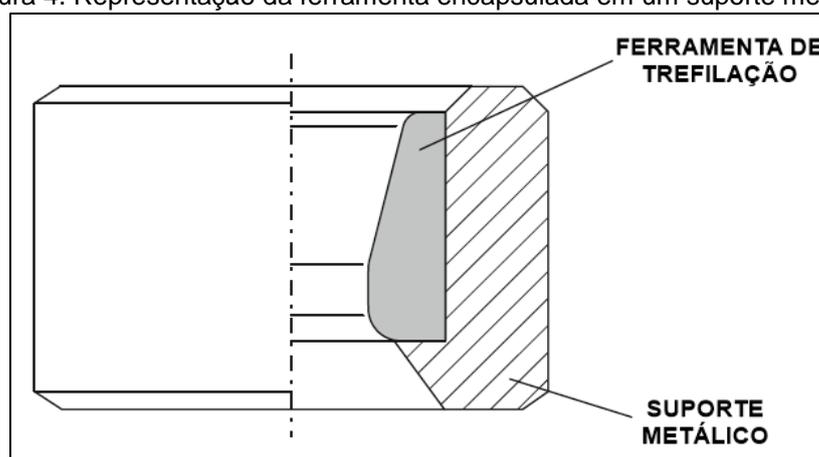
- **AÇOS FERRAMENTA:** utilizados para materiais com dureza máxima de 62 a 64 HRc e reduções de até 20%. Para maiores reduções, a dureza não deve ultrapassar valores de 58 a 60 HRc, pois há aumento significativo na taxa de desgaste da ferramenta (ASM, 1996).

Devido à baixa tenacidade e baixo coeficiente de transmissão de calor, as ferramentas de diamante ou metal duro são inseridas (encarçadas, encapsuladas) em suportes metálicos fabricados com outro material, geralmente aço ou latão, que apresentam maior condutibilidade térmica, auxiliando na retirada de calor da região

de conformação (BUTTON, 2008; KALPAKJIAN; SCHMID, 2009a). Uma representação deste encapsulamento é mostrada na Figura 4.

Na fieira, as regiões de entrada e calibração estão sujeitas a abrasão severa e alto desgaste. Os fatores que influenciam no desgaste são a velocidade de trefilação, composição química do material trefilado, temperatura do processo, redução por passe e dureza da ferramenta. O desgaste começa com o aparecimento de anéis na região de entrada da fieira. A vida da ferramenta pode ser aumentada em até 200% se for aplicado um processo de polimento quando notar-se o aparecimento destes anéis. Deseja-se também manter uniforme esta ação de desgaste, o que pode ser realizado criando-se um movimento rotativo relativo entre a fieira e o material em conformação (ASM, 1996; BUTTON, 2008).

Figura 4. Representação da ferramenta encapsulada em um suporte metálico



Fonte: Gummert (2014, p. 411)

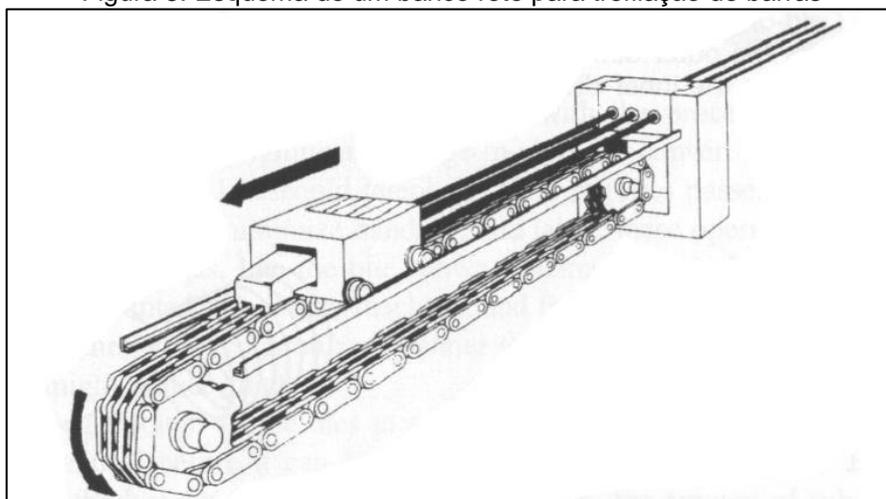
2.1.3 Máquinas

As máquinas de trefilar podem ser classificadas quanto aos diâmetros dos produtos trefilados. Para produtos de seções transversais maiores e que não podem ser bobinados, como as barras, empregam-se os denominados bancos retos de trefilação. Estas máquinas consistem de um carro que traciona os produtos trefilados por meio de garras (mordentes) e que é movimentado por um sistema hidráulico ou por meio de correntes. Para matérias-primas de dimensões menores e que podem ser bobinadas empregam-se máquinas em que o produto trefilado é enrolado em um anel tirante que o traciona através da fieira. Este método permite velocidades maiores, de

modo que os grandes comprimentos observados para esses produtos podem ser obtidos com alta produtividade (GIORGINI, 2013).

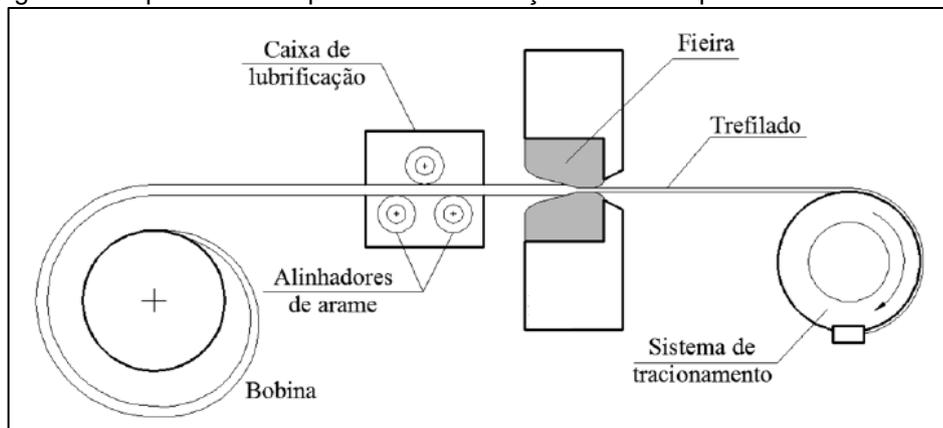
As Figuras 5 e 6 representam, respectivamente, um banco reto de trefilação e uma máquina com bobinamento.

Figura 5. Esquema de um banco reto para trefilação de barras



Fonte: Button (2008, p. 50)

Figura 6. Esquema de um processo de trefilação de fio-máquina com bobinamento



Fonte: Pinto (2016, p. 16)

2.2 ATRITO

O atrito é um fenômeno existente em todos os processos de conformação mecânica. Sempre que duas superfícies sólidas estão em contato e movimento relativo, a resistência para este movimento surge. No processo de trefilação, por exemplo, parâmetros independentes como a redução e o ângulo da matriz podem ser medidos diretamente. No entanto, o atrito não é diretamente mensurável, nem é realmente um parâmetro independente (GIORGINI, 2013).

A causa fundamental do atrito são as forças de atração entre pequenas regiões de contato entre superfícies deslizantes, originadas pela resistência ao cisalhamento destas uniões. As superfícies metálicas apresentam irregularidades microscópicas que chegam a constituir uma solda no estado sólido devido a uma deformação plástica localizada (GIORGINI, 2013).

Sendo geralmente considerado indesejável, o atrito desempenha papel bastante importante na conformação mecânica. Este parâmetro pode ser prejudicial caso alcance valores muito altos, dificultando ou mesmo impedindo o escoamento do material na região de interface e gerando uma série de outros problemas, tais como (BRITO, 2006; MONDARDO, 2012):

- Alteração dos estados de tensão necessários para a deformação;
- Elevação da temperatura do material em níveis capazes de comprometer as propriedades mecânicas;
- Aumento do desgaste do ferramental;
- Aumento do consumo de energia necessária à deformação;
- Redução da qualidade superficial da peça.

Nos processos que envolvem máquinas com partes que se movimentam, o controle do coeficiente de atrito pode ser a diferença entre uma operação aceitável e falhas catastróficas. As superfícies de um modo geral, mesmo ao serem polidas, possuem picos e vales que, ao entrarem em contato, causam resistência ao movimento. Esta resistência caracteriza o coeficiente de atrito, representado pela lei de Coulomb, indicada na Equação 23, para diferentes situações em que haja relação entre a força tangencial necessária para o movimento (F) e a força normal (N):

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (23)$$

A lei de Coulomb propõe que o coeficiente de atrito independe da velocidade de deslizamento e das áreas real e aparente de contato, sendo unicamente proporcional às forças aplicadas e às tensões desenvolvidas, e que o atrito estático é maior que o atrito dinâmico (BRITO, 2006; SOARES, 2012).

Vários ensaios são sugeridos para analisar as condições tribológicas na interface peça-ferramenta, mas a determinação do coeficiente de atrito é complicada, uma vez que, entre outros fatores, depende da pressão de contato, da expansão da área e da temperatura de interface. Um método proposto para obtenção do coeficiente

de atrito através de medições simultâneas da força de trefilação e da temperatura na ferramenta pode ser observado no trabalho de Felder *et al.* (2012).

Soares (2012) e Souza (2011), com trabalhos direcionados para avaliações de tensões residuais em processos de trefilação a frio de aços, utilizaram o parâmetro Δ para avaliar a relação do comprimento de contato da zona de deformação da ferramenta com o atrito e as tensões residuais geradas. Quanto maior o comprimento da zona de deformação, maior será o contato entre a ferramenta e a peça, o que aumenta o valor do coeficiente de atrito. Entretanto, haverá deformações mais homogêneas no material, resultando em menores tensões residuais. O contrário resultará em uma redução do coeficiente de atrito e um aumento nas tensões residuais devido às deformações heterogêneas no material.

Com a avaliação do coeficiente de atrito com o ângulo de fiação, pode-se perceber que no centro de uma barra trefilada, este coeficiente exerce maior influência nas tensões residuais para ângulos de trabalho menores, pois modifica a profundidade da deformação. Na superfície da barra, há uma influência tanto do ângulo como do coeficiente de atrito nas tensões residuais (SOARES, 2012). Para resultados de força, segundo Mondardo (2012), há maior influência quando modificados os valores de coeficiente de atrito em relação às alterações nos ângulos de trabalho.

Se as superfícies dos corpos em contato são previamente cobertas com um material de baixa resistência ao cisalhamento, o processo de atrito tenderá a localizar-se neste material, afetando parcialmente os corpos em contato. Este material adicional, que pode ser sólido, líquido ou gasoso, denomina-se lubrificante (GIORGINI, 2013).

2.2.1 Lubrificação

No início do processo de trefilação, diversos tipos de lubrificantes foram testados sem muito sucesso. No século XVII, acidentalmente, descobriu-se que a urina humana, quando aplicada ao arame de aço antes de ser trefilado, criava uma camada que lubrificava a matéria-prima e gerava uma superfície final menos irregular. Esta técnica é provavelmente o primeiro caso de sucesso do uso de lubrificantes na história do processo de trefilação. Entretanto, algo inovador era necessário para aumentar a produtividade e a qualidade de produção. Sendo assim, nos últimos 100 anos, pesquisas e experimentos vem sendo realizados para desenvolver as técnicas

de lubrificação e os lubrificantes que atualmente representam o estado da arte do processo (JUNKER, 2014).

Os equipamentos e ferramentas de trefilação, assim como os diferentes parâmetros que podem ser modificados no processo, como velocidade de trefilação, número de passes e redução por passe, resultam em materiais de diferentes características. Adicionalmente a isto, a lubrificação é um fator de extrema importância para a qualidade e o custo das operações. Sem a utilização de um sistema adequado de lubrificação é impossível a obtenção de um produto com qualidade bem definida e de maneira economicamente viável (JUNKER, 2014).

Existem diversos requisitos, às vezes contraditórios, para um lubrificante adequado ao uso em conformação mecânica. Este deve ser capaz de funcionar para um variado espectro de pressões, temperaturas e velocidades de deslizamento. Como uma das características da maioria dos processos de trabalho mecânico é a geração de uma grande quantidade de áreas superficiais novas, o lubrificante deve possuir propriedades de espalhamento e molhabilidade favoráveis. Deve também ser compatível tanto com a matriz quanto com o material da peça em relação à molhabilidade e ao ataque químico, devendo possuir boa estabilidade térmica e resistência a ataque bacteriológico e outros contaminantes de menor importância (GIORGINI, 2013).

O objetivo principal do emprego de lubrificantes é o de evitar o contato entre as superfícies da ferramenta e da peça, formando uma película estável sob as condições de processo, diminuindo o atrito e prevenindo o desgaste da matriz. Um bom lubrificante deve apresentar características tais como (BUTTON, 2008):

- Ser limpo;
- Ser facilmente aplicável;
- Ser facilmente removível;
- Não causar problemas de saúde ou ambientais.

2.2.1.1 Regimes de lubrificação

Button (2008) define os regimes de lubrificação descritos a seguir, associados à espessura do filme de lubrificante existente entre as superfícies:

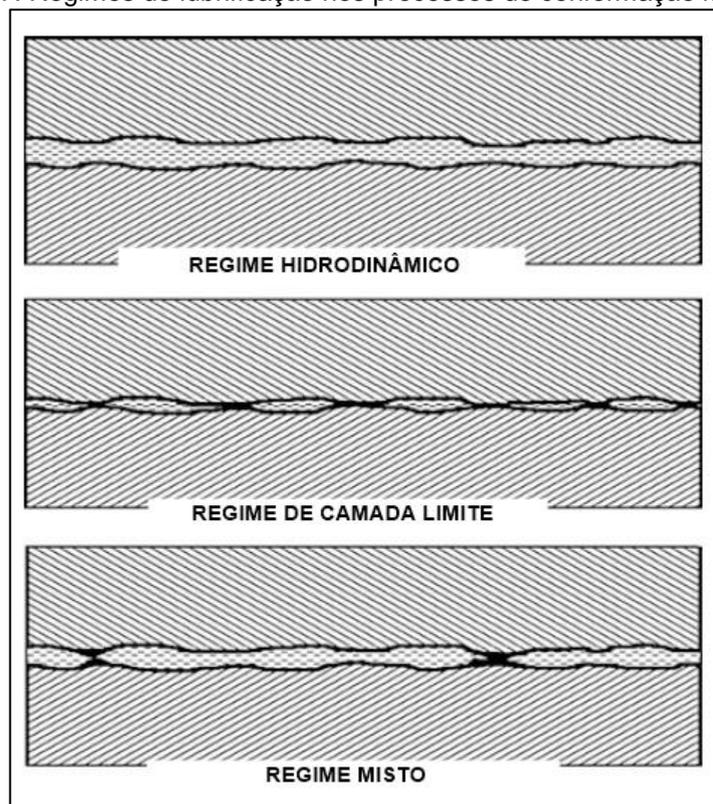
- Regime de filme espesso, onde as superfícies são totalmente separadas por um filme muitas vezes superior às rugosidades envolvidas e ao tamanho molecular do lubrificante empregado. Assim, o lubrificante pode ser estudado como um meio contínuo entre superfícies lisas e o coeficiente de atrito é pouco útil, com valores medidos inferiores a 0,05. Como as superfícies estão separadas pelo filme, seu desgaste inexistente;
- Regime de filme fino, onde a espessura do filme apresenta-se entre três a dez vezes o valor da rugosidade superficial média das superfícies. A espessura do filme é sempre maior que o tamanho molecular do lubrificante e, desta forma, a interação entre as saliências é responsável por uma pequena parcela da carga atuante na interface. Nos regimes de filme fino e espesso, que caracterizam a lubrificação hidrodinâmica, a rugosidade da ferramenta tem pouca influência sobre a rugosidade do produto;
- Regime de camada limite, onde o filme que separa a superfície apresenta espessuras da ordem de algumas vezes o tamanho molecular do lubrificante. A definição de um coeficiente de atrito é razoável neste regime e, sob condições ideais de processo, obtêm-se coeficientes da ordem de 0,1. Já sob condições severas de processo, onde o fornecimento de lubrificante é dificultado, os coeficientes podem atingir valores superiores a 0,4;
- Regime de lubrificação mista, onde a espessura do filme é menor que três vezes o valor da rugosidade média das superfícies. Se o lubrificante é escolhido corretamente, ele formará finíssimas películas aderentes que, apesar da reduzida espessura, podem prevenir o contato metálico direto. Os coeficientes de atrito podem variar de valores abaixo de 0,05 a valores acima de 0,4.

Junker (2014) simplifica estes regimes e apresenta apenas três, conforme pode ser visualizado na Figura 7. De uma forma geral, diz que há lubrificação hidrodinâmica quando há separação total entre os corpos, independente da espessura do filme. Para os outros regimes, vale a mesma explicação já relatada anteriormente, considerando que as características microscópicas de picos e vales estão presentes tanto na matéria-prima quanto na ferramenta. O regime de lubrificação mista ocorre para a maioria dos processos de conformação mecânica e a presença do lubrificante

reduz a abrasão quando os picos dos materiais metálicos entram em contato, eliminando o chamado desgaste abrasivo.

Uma das formas conhecidas de intensificar o processo de trefilação e não permitir mudanças nas propriedades do material é a utilização de lubrificação hidrodinâmica, criando condições de completa separação entre as superfícies do material e da ferramenta. Tal condição se torna cada vez mais necessária, já que atualmente a principal direção de desenvolvimento das plantas de trefilação está na implementação de tecnologia para promover altas velocidades de conformação em aços de alto carbono, o que causa um intenso aquecimento da superfície do material, alterando as condições de lubrificação e as propriedades do produto final (SULIGA, 2015).

Figura 7. Regimes de lubrificação nos processos de conformação mecânica



Fonte: Junker (2014, p. 1980)

Kalpakjian e Schmid (2009a) classificam em três os métodos básicos para a lubrificação na trefilação:

- Trefilação por via úmida (Figura 8), onde a fieira e a matéria-prima estão completamente imersas no lubrificante;

- Trefilação a seco (Figura 9), onde a superfície da matéria-prima é coberta com lubrificante através de sua passagem em uma caixa apropriada;
- Revestimento metálico, onde a matéria-prima é coberta com um metal leve, como cobre ou estanho, que irá atuar como um lubrificante sólido.

Figura 8. Processo de trefilação por via úmida



Fonte: Gummert (2014, p. 419)

Figura 9. Processo de trefilação a seco



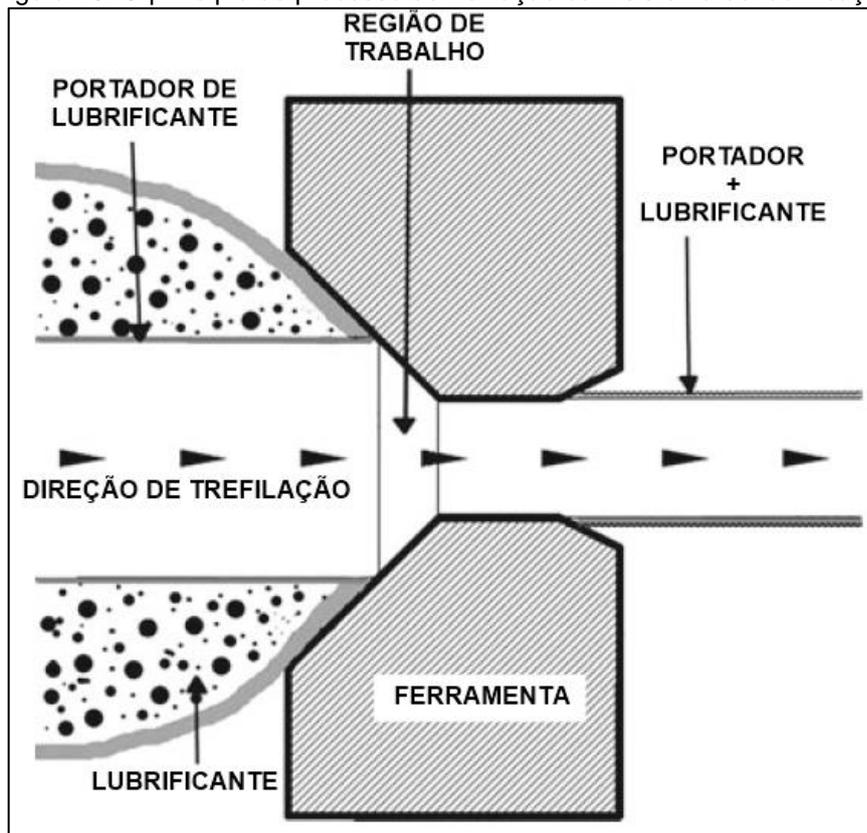
Fonte: Gummert (2014, p. 415)

2.2.1.2 Sistema de lubrificação

O pré-tratamento do material, além dos processos de apontamento e decapagem, consiste na aplicação de um portador de lubrificante (também chamado

de pré-lubrificante) na superfície da matéria-prima. Ambos os produtos, portador de lubrificante e o lubrificante em si, caracterizam o sistema de lubrificação, o qual é específico para cada processo (JUNKER, 2014). A aplicação deste sistema de lubrificação é mostrada na Figura 10 juntamente com o princípio básico do processo de trefilação.

Figura 10. O princípio do processo de trefilação com sistema de lubrificação



Fonte: Junker (2014, p. 1980)

Os agentes portadores de lubrificantes mais comuns e utilizados nos processos modernos de trefilação são (JUNKER, 2014):

- Cal: termo geral para substâncias inorgânicas contendo cálcio, onde predominam os carbonatos (CaCO_3), óxidos (CaO) e hidróxidos (Ca(OH)_2). Uma suspensão aquosa contendo de 3 a 5% de Ca(OH)_2 é utilizada em um processo que deve ser bem controlado através do tamanho das partículas insolúveis e da agitação do banho. Neste processo, o fio-máquina é mergulhado em um banho de cal cuja temperatura deve estar entre 70 e 90°C e, após, passa por um processo de secagem, seguindo para a caixa de lubrificação e ferramenta de trefilação. O resultado é um revestimento

seco composto por partículas de cal que aderem à superfície do material, caracterizando o portador de lubrificante.

- **Bórax:** procedimento similar ao descrito para a cal, com a diferença de que o borato de sódio é solúvel em água. A temperatura do banho fica normalmente entre 80 e 90°C, sendo que tal parâmetro deve ser bem regulado pois altera a formação molecular dos compostos.
- **Sais inorgânicos:** utilização limitada a processos de trefilação de aços inoxidáveis, pois resulta em um revestimento de alta dureza e incompressibilidade. Além disso, pode gerar sérios problemas de corrosão devido a presença de cloreto de sódio (NaCl). Outros sais presentes podem ser o sulfato de sódio (Na₂SO₄) ou silicato de sódio (Na₂O₃Si). Todos os compostos são solúveis em água e o procedimento de aplicação é similar ao uso do bórax. O agente é dissolvido em água cuja temperatura deve estar entre 60 e 90°C, o material é mergulhado na solução e secado na sequência.
- **Banho fosfatado:** técnica baseada na reação química entre a superfície do material e o correspondente agente de fosfatação. Em comparação aos processos anteriores, apresenta um maior custo de aplicação, mas em geral é muito efetiva na redução do atrito durante a trefilação, já que há formação de uma camada superficial ligada quimicamente ao material. O processo de fosfatação ocorre entre 70 e 75°C e a camada resultante não deve exceder 20 µm de espessura.

A eficiência do lubrificante está relacionada à sua capacidade de formar uma película estável sob as condições de processo, prevenindo o contato entre as superfícies. A escolha correta deste material é uma das grandes dificuldades existentes e deve ser baseada nos diferentes parâmetros do processo e nos fatores econômicos aliados (MONDARDO, 2012).

Entre os principais materiais utilizados como lubrificantes para os processos de trefilação estão:

- **ESTEARATOS:** durante os trabalhos nas últimas décadas, sabões em pó (estearatos) para trefilação foram considerados os melhores tipos de lubrificantes para a maioria dos processos, aliando os aspectos técnicos e econômicos. A fabricação destes pós inclui técnicas especiais de secagem, controle de granulometria e aditivos, permitindo obter um sabão de alta

qualidade para operações avançadas de trefilação (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009b; JUNKER, 2014).

Alguns parâmetros químicos e físicos caracterizam a natureza do pó e determinam a sua aplicabilidade: tipo do sabão, solubilidade em água, ponto de fusão, estabilidade térmica, quantidade e tipo de aditivos, tamanho e distribuição granulométrica das partículas e dureza das partículas. Os estearatos à base de cálcio ou sódio combinam todos os critérios necessários para os processos de trefilação e são, portanto, os mais utilizados (JUNKER, 2014).

Os estearatos de cálcio são insolúveis em água e recomendados para processos de grande redução de seção ou em casos onde uma boa proteção contra a corrosão é necessária, como em aços para construção mecânica. Os arames utilizados para a produção de pregos e parafusos são frequentemente lubrificados com estearatos de cálcio, uma vez que a própria quantidade de resíduos sobre a superfície ao final do processo irá colaborar para o processo de prensagem que segue (DRESEL, 2014; JUNKER, 2014). Em relação aos estearatos de sódio, por apresentarem solubilidade em água, são normalmente utilizados quando a superfície final do material precisa estar livre de resíduos. Este tipo de sabão também apresenta um melhor comportamento em temperaturas elevadas, permitindo atingir velocidades de trefilação superiores a 60 m/s (DRESEL, 2014; JUNKER, 2014).

Uma combinação de ambos os tipos de sabão pode apresentar melhores resultados para determinadas aplicações, devido ao fato de conciliarem suas vantagens e compensarem suas desvantagens. Adicionalmente aos estearatos, alguns aditivos podem ser utilizados para melhorar a lubrificação, tais como: grafita (C), dissulfeto de molibdênio (MoS_2), bicarbonato de sódio (NaHCO_3) e dióxido de titânio (TiO_2) (JUNKER, 2014).

- **ÓLEOS:** na trefilação de aços, a principal aplicação de óleo como lubrificante é para aços inoxidáveis ou aços ao carbono onde a redução não ultrapasse 10%, desde que o resíduo resultante não atrapalhe etapas posteriores do processo, como o recozimento. Em alguns casos, o resíduo pode ser benéfico e colaborar para as próximas etapas, como prensagem a frio ou

quando certa proteção contra a corrosão é requerida (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009b; JUNKER, 2014).

Os óleos para trefilação geralmente consistem em um óleo mineral refinado utilizado como base líquida e uma combinação de aditivos antioxidantes e anticorrosivos. A viscosidade do óleo também determina a qualidade da lubrificação do processo. Uma alta viscosidade normalmente oferece uma melhor lubrificação, mas pode causar problemas de resfriamento, uma vez que a transferência de calor fica limitada devida ao baixo movimento relativo entre as moléculas do lubrificante. Portanto, quanto maior a redução de seção desejada, maior deve ser a viscosidade do óleo utilizado. Como regra adicional, quanto menor o diâmetro do material conformado, menor deve ser a viscosidade. Normalmente, a viscosidade dos óleos utilizados fica na faixa entre 50 e 500 mm²/s a 40°C (GUMMERT, 2014; JUNKER, 2014).

- PASTAS: representam uma combinação de componentes líquidos e sólidos misturados durante o processo de fabricação para obter uma suspensão que deve ser estável pelo menos até certo período de tempo, caracterizando a sua vida útil. A base destes lubrificantes pode ser um óleo mineral com ou sem aditivos ou um sistema aquoso contendo sólidos insolúveis, como estearatos. Entretanto, na indústria de trefilação de aços, o número de aplicações deste tipo de lubrificante é limitado e, portanto, são raramente utilizados (GUMMERT, 2014; JUNKER, 2014).

Pastas à base de óleo mineral podem ser utilizadas, principalmente, nos casos em que apenas o óleo não tem resistência suficiente para uma elevada redução de seção. Em alguns casos, as pastas são preferidas devido a sua maior vida útil comparada aos óleos, resultando em um menor custo relativo. Em relação às pastas de base aquosa, são utilizadas para processos mais amenos e quando uma boa limpeza final do produto é exigida, não deixando qualquer resíduo visível na superfície do material (JUNKER, 2014).

Utsunomiya *et al.* (2013) apresentam com sucesso a utilização de uma camada porosa na superfície do material a ser trefilado, de forma que tal camada colabora para a redução do coeficiente de atrito do processo. A técnica consiste em aquecer arames polidos de aço, sob condições controladas de tempo e temperatura, promovendo uma oxidação superficial no material. Em seguida, a atmosfera é

substituída por hidrogênio puro, causando uma reação química que irá transformar a camada oxidada em uma camada porosa com 8 a 9 μm de espessura. Os experimentos de trefilação foram realizados utilizando diferentes óleos lubrificantes e comparando os processos com e sem a camada porosa. A retenção de certa quantidade de óleo nos poros formados colabora na lubrificação da interface conforme a deformação ocorre.

Como a trefilação é um processo altamente dinâmico, não é possível observar a interface de lubrificação entre a ferramenta e o material, sendo que a maioria dos estudos do processo apresentam observações *ex-situ* para entender a lubrificação. Trabalhos publicados por Hoshi *et al.* (2016) e Nanao *et al.* (2015) demonstram que a observação *in-situ* do filme de lubrificação é possível utilizando técnicas de luz fluorescente. Entretanto, este método apenas permite medir a espessura da camada lubrificante formada. Os trabalhos utilizam uma técnica conhecida por Micro Espectroscopia de Absorção no Infravermelho por Transformada de Fourier (*Micro-FTIR*), observando diretamente o filme lubrificante durante a trefilação e o analisando quimicamente. Os autores utilizaram uma fieira de diamante devidamente adaptada para trefilar uma liga de latão (65%Cu + 35%Zn), reduzindo seu diâmetro de 300 para 290 μm , com variação de lubrificantes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia aplicada para a realização do estudo, desde as operações iniciais de corte da matéria-prima até os processos de trefilação e as caracterizações finais.

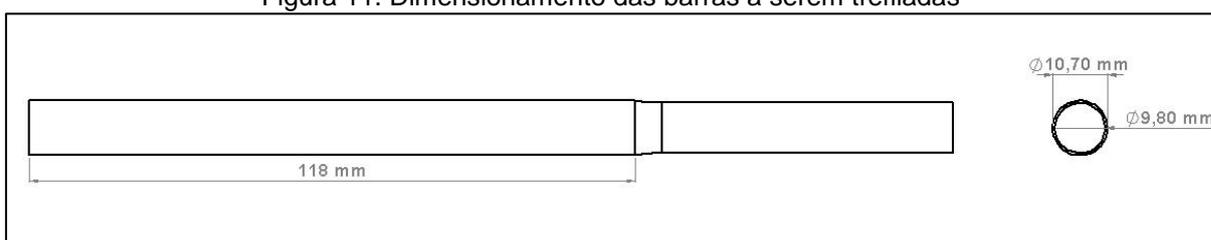
3.1 CORTE E USINAGEM DAS BARRAS

O material utilizado para os processos de trefilação foi fornecido pela Aços Favorit Distribuidora LTDA, identificado como um aço para construção mecânica da classe SAE 1020 no estado laminado e recozido. É um aço de boa forjabilidade e soldabilidade e baixa resistência mecânica.

Conforme recebido, o material media 12,70 mm de diâmetro e 1200,0 mm de comprimento. Sendo assim, foram cortados sete corpos de prova medindo 180,0 mm de comprimento que seguiram para usinagem de desbaste em torno mecânico. Esta usinagem reduziu o diâmetro do material para 10,70 mm, conforme o planejamento deste trabalho. Seis destes corpos de prova foram utilizados nos experimentos de trefilação, enquanto o sétimo corpo de prova ficou reservado para realização dos ensaios de compressão e caracterização do material.

Os corpos de prova a serem trefilados passaram por operações de apontamento em uma de suas extremidades. Para isso, as barras foram lixadas em um comprimento de 62,0 mm e até que o diâmetro atingisse valores próximos a 9,80 mm. Tais valores são necessários para permitir a passagem de quantidade suficiente do material pela fieira, garantindo que a garra de tração segure firmemente a barra e que o processo de trefilação ocorra com segurança. A Figura 11 apresenta as dimensões das barras apontadas a serem utilizadas nos experimentos de trefilação.

Figura 11. Dimensionamento das barras a serem trefiladas



Fonte: próprio autor

3.2 ENSAIOS DE COMPRESSÃO E ESPECTROMETRIA

Para caracterizar o material quanto as suas propriedades mecânicas e obter a curva de escoamento, ensaios de compressão foram realizados conforme orienta a norma ASTM E9-09. Sendo assim, uma barra medindo $\Phi 10,70 \times 180,0$ mm foi usinada em torno mecânico até que seu diâmetro atingisse 10,00 mm. A partir desta barra foram cortados três corpos de prova medindo 15 mm de comprimento. A Figura 12 apresenta o dimensionamento e uma imagem real dos corpos de prova para o ensaio de compressão. Um de cada vez, os corpos de prova foram comprimidos em uma máquina universal de ensaios EMIC com capacidade de 100 kN instalada no Laboratório de Ensaios Mecânicos e Metalúrgicos (LABEMM) do Instituto Federal Catarinense (IFC), Campus Luzerna. Para corte dos materiais utilizou-se as cortadoras metalográficas TECLAGO CM100 e CM40 também de propriedade do LABEMM.

Para a lubrificação do ensaio utilizou-se o desmoldante sintético FORJ 300 produzido pela Holld Meyer do Brasil. A velocidade do ensaio foi de 2 mm/s em temperatura ambiente e, portanto, a velocidade de deformação é de $0,1333 \text{ s}^{-1}$. O sistema de aquisição de dados do equipamento registra os valores de força e deslocamento do ensaio, permitindo a obtenção da curva tensão verdadeira x deformação verdadeira necessária para a caracterização do aço em questão.

Figura 12. Dimensionamento e corpos de prova reais utilizados no ensaio de compressão



Fonte: próprio autor

A partir de um dos corpos de prova comprimidos realizou-se um ensaio de espectrometria de emissão óptica para obtenção da composição química do material.

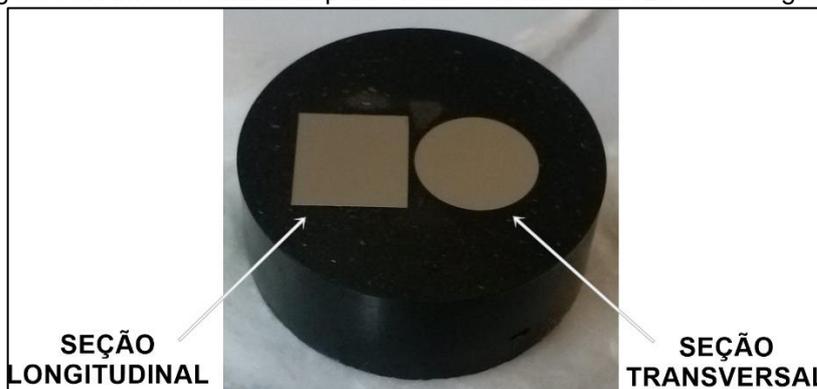
Este ensaio foi realizado no equipamento Bruker Q2 ION pertencente ao Laboratório de Fundição (LAFUN) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.3 ENSAIOS DE MICRODUREZA VICKERS E METALOGRAFIAS

Foram realizados ensaios de microdureza no material antes e após o processo de trefilação. Para ambos os casos, cortaram-se corpos de prova medindo 10,0 mm de comprimento e mantendo-se o diâmetro nominal. Através de operações de fresamento na direção longitudinal do corpo de prova, cortou-se metade do seu diâmetro, resultando em um semicilindro. Para as análises metalográficas, além de também utilizar o material detalhado acima, cortou-se corpos de prova medindo 5,0 mm de comprimento que foram embutidos na sua seção transversal.

As operações de embutimento a quente utilizaram baquelite e foram feitas nas embutidoras metalográficas TECLAGO EM30D e EM40D pertencentes ao LABEMM. Para cada ensaio foram embutidos juntamente os corpos de prova cortados na direção longitudinal e transversal, facilitando o manuseio posterior. A Figura 13 mostra uma amostra embutida.

Figura 13. Amostra embutida para ensaios de microdureza e metalografias



Fonte: próprio autor

Seguindo a preparação do material, fez-se o lixamento manual de cada corpo de prova embutido. Foram utilizadas lixas de granulometria 220, 320, 400, 600 e 1200. Após o lixamento, as amostras foram polidas nas politrizes metalográficas TECLAGO PLO2 E pertencentes ao LABEMM com utilização de pastas de diamante de 6 e 1 μm .

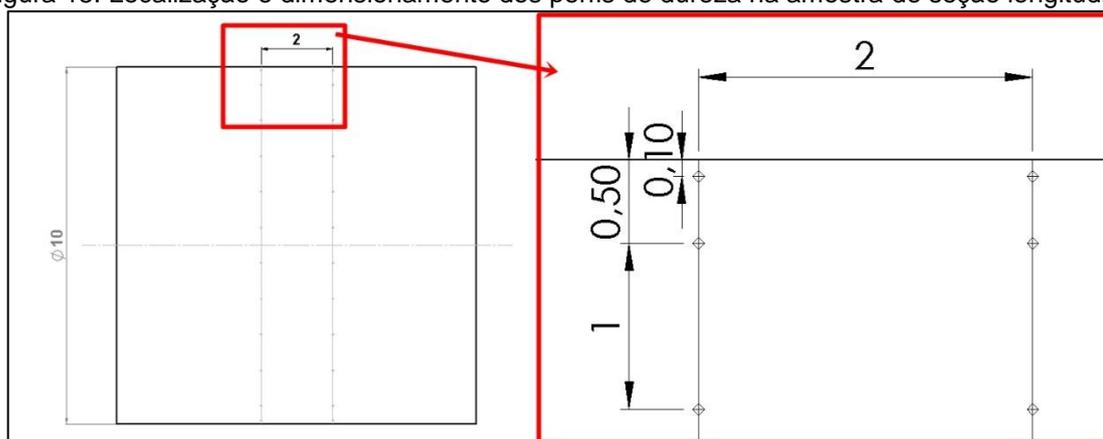
Após lixamento e polimento, os ensaios de microdureza foram realizados no microdurômetro EQUILAM MHV-2000Z instalado no LABEMM (Figura 14). Em cada amostra longitudinal foram medidos dois perfis de microdureza (perfil A e perfil B), distantes 2 mm entre cada e centralizados na amostra. As distâncias entre cada indentação em um mesmo perfil foram diferentes e podem ser visualizadas na Figura 15. A carga utilizada no equipamento foi de 0,300 kg (2,942 N) e o tempo de cada indentação foi de 10 s.

Figura 14. Microdurômetro utilizado no trabalho e tela de informações do equipamento



Fonte: próprio autor

Figura 15. Localização e dimensionamento dos perfis de dureza na amostra de seção longitudinal



Fonte: próprio autor

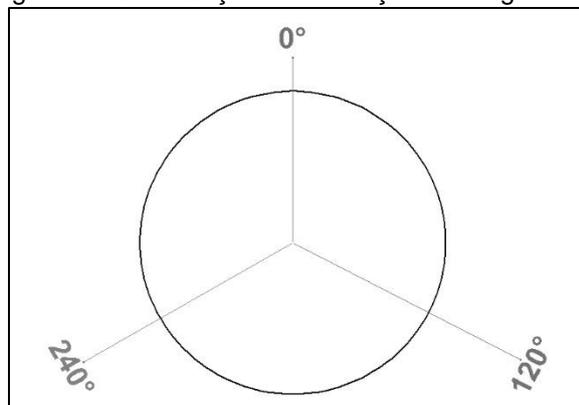
As análises metalográficas foram realizadas após os ensaios de microdureza e, para tanto, foi necessário o ataque químico do corpo de prova. Este foi feito utilizando-se uma solução de Nital 2% (2% HNO₃ + 98% álcool etílico) e

imersando a amostra por alguns segundos na solução. Após o ataque químico os corpos de prova foram analisados no microscópio óptico OPTIKA B1000 instalado no LABEMM e imagens da microestrutura do material foram capturadas para análises posteriores.

3.4 MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE SUPERFICIAL

Os ensaios para averiguar as condições de rugosidade superficial foram feitos diretamente nas barras antes e após a trefilação, utilizando-se um rugosímetro TIME TR200 de propriedade do LABEMM. Foram realizadas três medições em cada barra, a 20 mm de uma das extremidades e abrangendo o seu diâmetro nas posições 0° , 120° e 240° , como pode ser melhor visualizado na Figura 16. Procurou-se utilizar a distância de 120° entre cada medição de forma a abranger todo o perímetro da barra, sendo que estes valores angulares não apresentam qualquer relação com o restante dos experimentos ou caracterizações.

Figura 16. Localização das medições de rugosidade

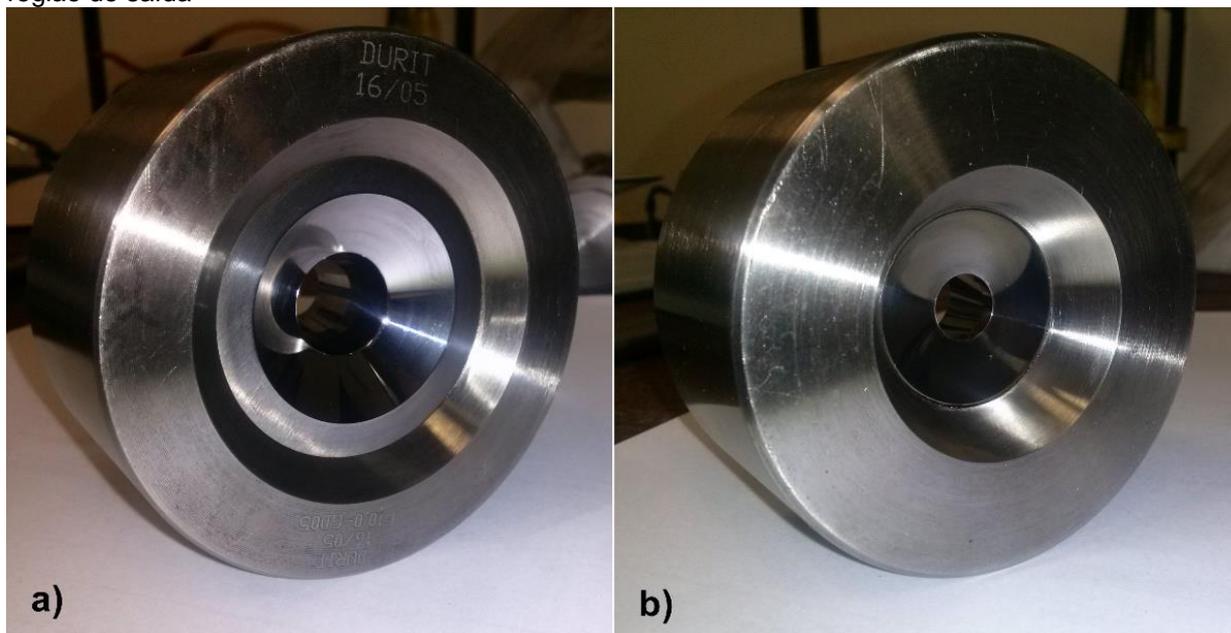


Fonte: próprio autor

3.5 PROCESSOS DE TREFILAÇÃO

Para a realização das trefilações, a ferramenta visualizada na Figura 17 foi utilizada. Esta ferramenta consiste em um núcleo de metal duro ($94,5\%WC + 5,5\%Co$) e carcaça de aço AISI 4340, acoplados por interferência. As dimensões do núcleo da ferramenta são apresentadas na Tabela 3. Em sua totalidade (núcleo e carcaça), a ferramenta apresenta diâmetro de 74,7 mm e comprimento de 39,0 mm, com massa de 1,36 kg.

Figura 17. Ferramenta (fieira) utilizada para a trefilação. (a) Vista da região de entrada. (b) Vista da região de saída



Fonte: próprio autor

Tabela 3 – Dimensões do núcleo da fieira

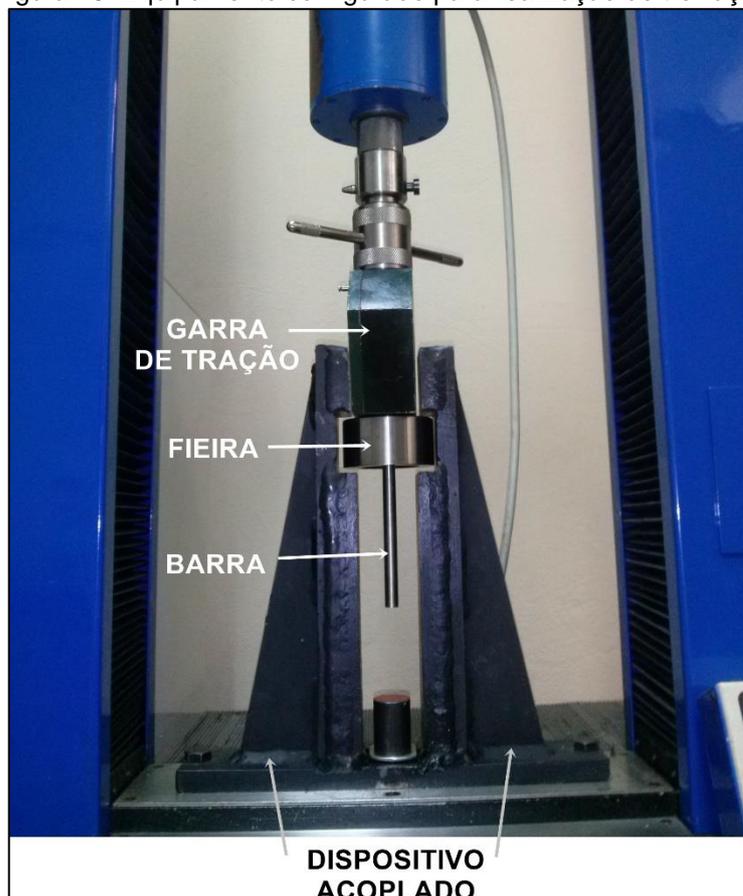
Região de entrada	
Semiângulo (β)	60°
Comprimento	5,0 mm
Região de trabalho	
Semiângulo (α)	10°
Comprimento	14,7 mm
Região de calibração	
Diâmetro	10,00 mm
Comprimento	2,5 mm
Região de saída	
Semiângulo (γ)	78°
Comprimento	1,8 mm

Fonte: Durit Brasil LTDA

O processo de trefilação foi realizado na máquina universal de ensaios EMIC instalada no LABEMM-IFC, Campus Luzerna. Para permitir que a trefilação ocorra neste equipamento, utilizou-se um dispositivo desenvolvido na própria instituição que, acoplado à EMIC, permite o encaixe e a fixação da fieira enquanto o material é tracionado e trefilado. Este dispositivo foi criado para um projeto de doutorado que atualmente está em andamento. A Figura 18 apresenta a máquina de

ensaios EMIC e o dispositivo acoplado, estando o equipamento configurado para iniciar um processo de trefilação.

Figura 18. Equipamento configurado para realização de trefilação



Fonte: próprio autor

No módulo tração do equipamento e a uma velocidade de 100 mm/min, a garra superior traciona a barra por dentro da fieira, causando a deformação esperada. O sistema faz a aplicação de forças crescentes de tração de maneira contínua até a realização de todo o processo. Estas forças são registradas no sistema de aquisição da máquina em função do tempo e deslocamento e a força máxima aplicada será utilizada para calcular o coeficiente de atrito através dos modelos teóricos de Sachs e Siebel.

O trabalho consiste na realização dos experimentos de trefilação mediante duas situações de lubrificação. A primeira situação não envolve o uso de lubrificantes, enquanto a segunda situação utiliza o lubrificante AGEMIX CIL-668, um óleo desenvolvido para este tipo de processo. Estas situações distintas permitem analisar as características de cada processo, como a força necessária para trefilar, o

coeficiente de atrito resultante e as condições superficiais finais do material conformado. Quando da realização das trefilações com lubrificação, as barras foram imersas no lubrificante antes da realização do processo e certa quantidade de lubrificante foi colocada no núcleo da fieira, a fim de garantir a condição de lubrificação esperada.

Conforme mencionado no Capítulo 2, a principal aplicação de óleo como lubrificante na trefilação é em casos onde a redução de seção não ultrapassa 10%. Apesar deste fato, a utilização do óleo lubrificante neste trabalho foi considerada uma vez que a redução aplicada é de 12,7% e a velocidade do processo é baixa, não gerando calor excessivo durante o trabalho. Como a aplicação do lubrificante foi feita diretamente na superfície do material a ser conformado, sem adições prévias de qualquer portador de lubrificante, o óleo pode ser considerado de fácil aderência ao produto. Este fato também foi considerado na escolha do tipo de lubrificante a ser utilizado, uma vez que os estearatos, por exemplo, apresentariam maior dificuldade de aplicação no experimento de trefilação que é realizado verticalmente.

3.6 MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS SUPERFICIAIS

Uma das formas de medição de tensões residuais em um material policristalino consiste na técnica de difração de raios-X, que considera as alterações na distância entre os planos cristalográficos do material geradas pela deformação elástica associada às tensões residuais. A amostra é irradiada e os raios-X são difratados pelos planos cristalográficos logo abaixo da superfície (5 a 10 μm). Um detector é movimentado ao redor do corpo de prova, encontrando diferentes intensidades de raios-X difratados. Utilizando-se a lei de Bragg é possível medir com precisão os espaçamentos do retículo cristalino e analisar a deformação na direção do vetor de difração. Este ensaio não exige a preparação prévia do corpo de prova e o tamanho deste fica limitado ao tamanho do porta-amostras do equipamento utilizado (NUNES, 2012; SCURACCHIO, 2012).

Sendo assim, as análises de tensões residuais superficiais foram realizadas apenas nos materiais trefilados e na direção axial, através da técnica de difração de raios-X e utilizando o equipamento GE Seifert Charon XRD M do Grupo de Ensaio Não-Destrutivos (GEND) do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da

UFRGS. A Tabela 4 apresenta os principais parâmetros ajustados no software que conduz o ensaio.

O corpo de prova utilizado nestes ensaios foi cortado da ponta final da barra trefilada até um comprimento de 60 mm, sendo que as medições de difração de raios-X foram realizadas exatamente na metade deste valor e utilizando o método $\text{sen}^2\psi$. Realizaram-se quatro medições na superfície de cada barra em ângulos arbitrados de 0° , 90° , 180° e 270° . É importante ressaltar que não há nenhuma relação destes ângulos com a ferramenta ou com a posição da barra durante a trefilação. Entende-se que a quantidade de medições realizadas em cada barra não é suficiente para caracterizar completamente o estado de tensões residuais no material, mas permite idealizar o comportamento destas tensões. Da mesma forma, como não foi realizada uma caracterização do comportamento das tensões antes dos processos de trefilação, este trabalho não permite verificar a variação deste parâmetro com a deformação aplicada.

Tabela 4 – Parâmetros de software do equipamento de raios-X

Elemento do tubo de raios-X	Cr
Comprimento de onda $k\alpha$	2,2897 Å
Tensão do tubo	30 kV
Corrente	50 mA
Detector usado	Meteor 1D
Ângulos utilizados	$[-60^\circ \text{ até } +60^\circ]$, $\psi = 13$
Tempo de escaneamento	20 s
Passo	0,2°
Tempo de ensaio	Uma medição em uma direção (longit.) ≈ 10 min
Pico de difração utilizado	$\{2\ 1\ 1\}$ $\{h\ k\ l\}$ $2\text{-}\theta$: $[156,08^\circ]$
Variação do ângulo de difração	$[147^\circ\text{-}166^\circ]$

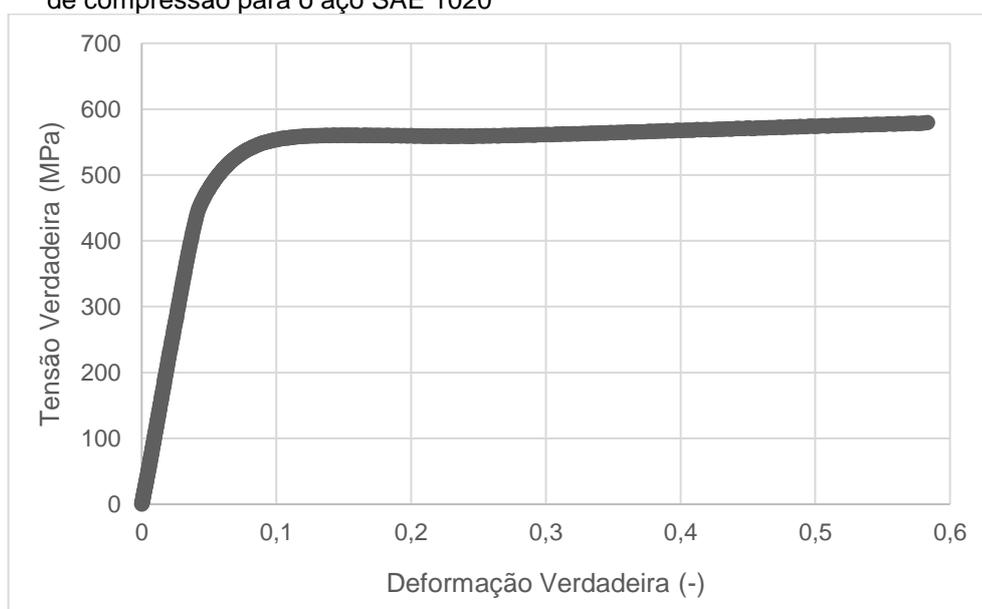
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a apresentação dos resultados, este capítulo foi dividido em seis partes principais. A primeira parte consiste nos resultados da caracterização inicial do material, isto é, conforme recebido. Nesta seção incluem-se os ensaios de compressão para obtenção da curva de escoamento, espectrometria, medições de microdureza e metalografias. As partes em sequência abordam os resultados de todos os experimentos e ensaios realizados. Para as medições de rugosidade superficial, microdurezas e tensões residuais, cada barra trefilada foi estudada individualmente. Um valor médio das forças de trefilação foi utilizado para o cálculo do coeficiente de atrito através dos modelos teóricos, uma vez que o objetivo geral é observar a variação deste coeficiente com as condições de lubrificação.

4.1 CARACTERIZAÇÃO INICIAL DO MATERIAL

Dos ensaios de compressão realizados obteve-se a curva tensão verdadeira (k_f) x deformação verdadeira (φ) mostrada na Figura 19.

Figura 19. Curva tensão verdadeira (k_f) X deformação verdadeira (φ) obtida por ensaios de compressão para o aço SAE 1020



Fonte: próprio autor

A partir de um estudo destes ensaios de compressão e com a linearização da parte plástica da curva foi possível obter a tensão de escoamento (kf_0) e a equação de Hollomon (Equação 8) para o material em questão:

$$kf_0 = 440 \text{ MPa}$$

$$kf = 591,15 \times \varphi^{0.433}$$

Os valores acima serão utilizados nos cálculos que envolvem os modelos teóricos de Siebel e Sachs para obter os coeficientes de atrito dos experimentos realizados. Os números obtidos são válidos apenas para o material em questão, sendo que os coeficientes de resistência (C) e de encruamento (n) são dependentes do material e variam com a aplicação de tratamentos térmicos e deformações, por exemplo. Um baixo valor para n também significa uma menor tendência ao encruamento frente a uma determinada deformação plástica aplicada.

Através de ensaio de espectrometria de emissão óptica, a composição química mostrada na Tabela 5 foi encontrada para o aço SAE 1020 utilizado neste trabalho. A tabela apresenta uma comparação com os valores regidos pela norma, sendo que a soma de todos os elementos que não foram destacados equivale a menos que 0,090% da composição total da liga.

Tabela 5 – Composição química do aço SAE 1020 (% em massa)

	C	Mn	Si	P	S
Norma SAE 1020	0,18-0,23	0,30-0,60	0,15-0,35	<0,030	<0,050
Espectrometria	0,208	0,376	0,058	0,020	<0,010

Fonte: Aços Favorit Distribuidora LTDA

Como os valores dos diâmetros inicial e final do material são conhecidos, a deformação verdadeira e a redução, bem como o parâmetro Δ , podem ser calculados com facilidade através das Equações 4, 22 e 21, respectivamente. Sendo assim, a deformação verdadeira para o processo em questão é dada por:

$$\varphi = \ln \frac{A_1}{A_0} = \ln \frac{10,00^2}{10,70^2} = -0,135$$

e a redução por:

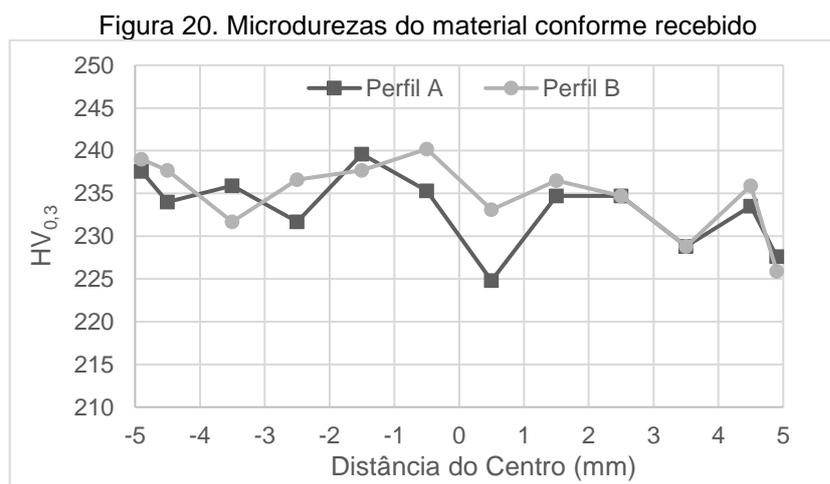
$$r = 1 - A_1/A_0 = 1 - 10,00^2/10,70^2 = 0,127$$

Para o cálculo do parâmetro Δ , temos que $\alpha = 10^\circ \cong 0,175 \text{ rad}$ e, portanto:

$$\Delta \cong \left(\frac{0,175}{0,127} \right) [1 + (1 - 0,127)^{1/2}]^2 \cong 5,161$$

O valor obtido para o parâmetro Δ pode ser considerado alto e corresponde à pequena redução de seção aplicada e ao valor do ângulo de trabalho. O comprimento da região de trabalho de 14,7 mm aliado ao ângulo de 10° levam a um certo contato entre a ferramenta e a peça que pode resultar em pequeno aumento do coeficiente de atrito. Entretanto, isto permite que ocorram deformações mais homogêneas na microestrutura do material, o que poderia resultar em baixos níveis de tensões residuais.

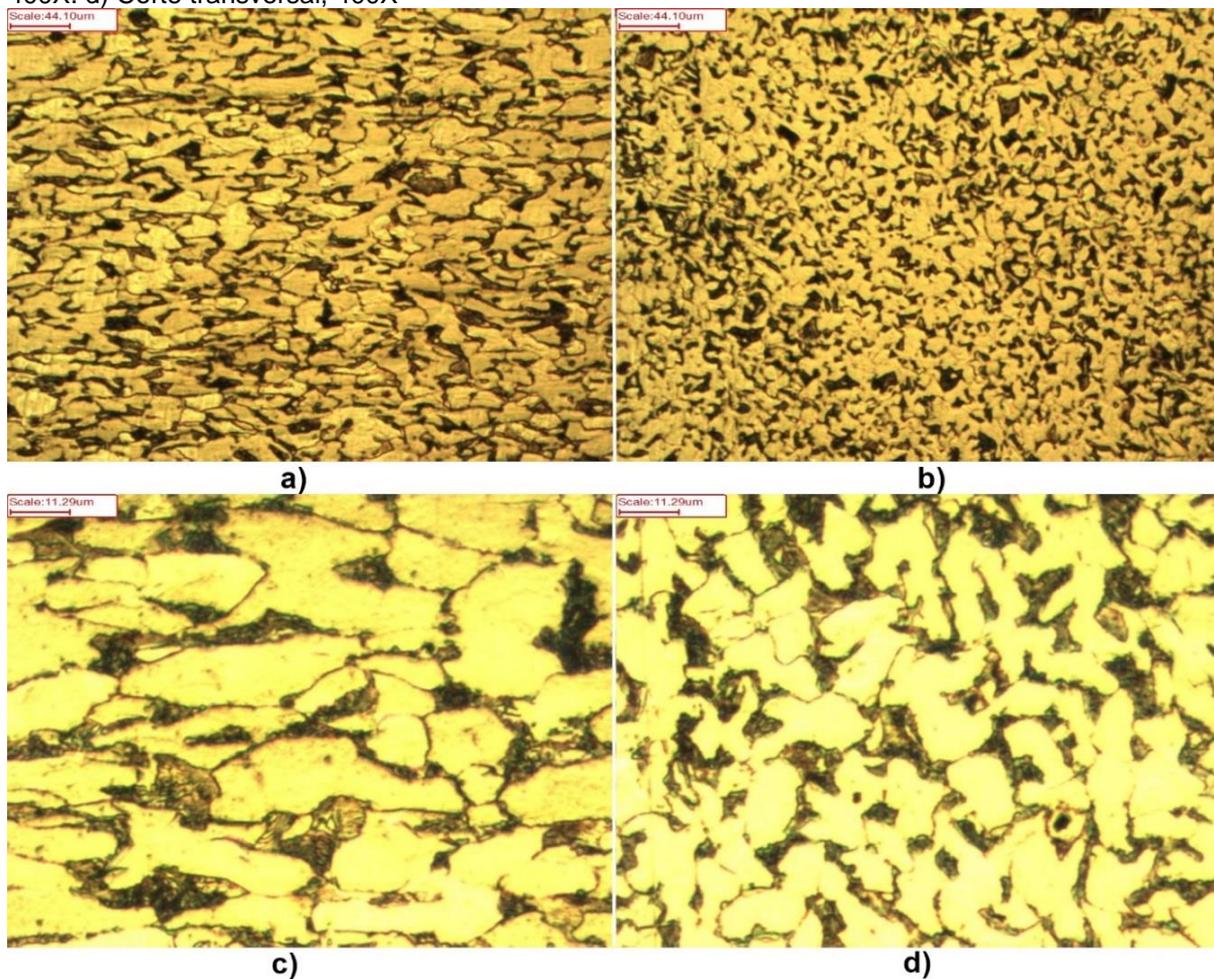
A partir do material conforme recebido, uma medição da microdureza foi realizada em um corpo de prova cortado, embutido e preparado. A Figura 20 apresenta os perfis obtidos através deste ensaio.



Fonte: próprio autor

A caracterização metalográfica inicial do aço utilizado também foi realizada e pode ser observada na Figura 21. Através das metalografias é possível verificar que há uma direção preferencial dos grãos no corte longitudinal, indicando provavelmente uma operação de laminação a quente realizada previamente nestas barras. Entende-se que para uma amostra que deveria estar totalmente recozida, esta direção preferencial não poderia ser observada com tanta clareza. Além disso, os valores obtidos pela curva tensão verdadeira x deformação verdadeira, bem como os valores de microdureza, são superiores àqueles esperados para um aço baixo carbono sem aplicação de deformação e/ou tratamento térmico. Portanto, é possível concluir que este aço não estava nas condições esperadas para o trabalho e tais fatores podem comprometer a qualidade desejada do resultado final.

Figura 21. Microestrutura do aço SAE 1020 conforme recebido, composto de ferrita (fase clara) e perlita (fase escura). a) Corte longitudinal, 100X. b) Corte transversal, 100X. c) Corte longitudinal, 400X. d) Corte transversal, 400X



Fonte: próprio autor

4.2 FORÇA E ATRITO

Corpos de prova de diâmetro 10,70 mm e comprimento útil de 118,0 mm foram trefilados na máquina universal de ensaios EMIC em temperatura ambiente e a uma velocidade de 100 mm/min. Em três experimentos não foi utilizada nenhuma lubrificação na interface peça-ferramenta, enquanto em outros três experimentos utilizou-se o lubrificante AGEMIX CIL-668.

Medições realizadas com paquímetro digital após a realização dos experimentos comprovaram a dimensão precisa da fieira quanto a área de seção. Em relação ao comprimento, as barras passaram a medir 197,10 mm, um aumento de 9,5%. O aspecto final da superfície do material é liso e brilhante, conforme pode ser observado na Figura 22. Os experimentos lubrificados deixaram certa quantidade de óleo aderida à superfície, sendo de fácil limpeza.

Figura 22. Corpos de prova trefilados sem lubrificação



Fonte: próprio autor

Para os experimentos sem lubrificação, a força necessária para a trefilação teve um valor médio de 19,95 kN conforme os cálculos e os valores retornados pelo sistema de aquisição de dados da EMIC. Com este valor, mais os valores pertinentes ao material e ângulo de trabalho da ferramenta, podem-se aplicar os cálculos utilizando as Equações 15 e 20, modelos teóricos de Siebel e Sachs respectivamente, e obter os valores de coeficiente de atrito para a operação. Com a Equação 10, obtemos a potência média fornecida pelo equipamento, sendo esta de 0,05 hp ou 33,3 W.

Conforme o modelo teórico de Siebel, baseado no cálculo do trabalho necessário de trefilação e de mais fácil aplicação matemática, o valor do coeficiente de atrito para os experimentos sem lubrificação é 0,34. Segundo o modelo de Sachs, desenvolvido a partir da teoria elementar da plasticidade, μ é 0,40. Esta diferença de aproximadamente 15% entre os valores obtidos reforça que os modelos teóricos são úteis para uma estimativa do processo como um todo, mas não podem ser considerados precisos na definição de um único parâmetro. Sachs e Siebel utilizaram de diferentes variáveis para compor as suas equações e, sendo assim, é normal que certa discordância de resultados seja obtida em uma comparação.

Com os valores resultantes é possível verificar que a falta de qualquer meio lubrificante entre a barra sendo trefilada e a ferramenta permite valores elevados de coeficiente de atrito, da ordem de 0,4. A força de trefilação é diretamente afetada pela elevação do coeficiente de atrito, uma vez que as forças necessárias para a compressão radial do material serão aumentadas e, conseqüentemente, aumentará a força necessária para tracionar a barra. Portanto, entende-se que o valor médio da força de trefilação de aproximadamente 20 kN pode ser considerado normal dentro das condições do experimento.

Em relação aos experimentos lubrificados, a força de trefilação teve um valor médio de 17,01 kN. Através do modelo teórico de Siebel (Equação 15) foi calculado o valor do coeficiente de atrito para o experimento lubrificado, sendo este de 0,24. Pela Equação 20, isto é, o modelo teórico de Sachs, o valor do coeficiente de atrito para esta operação é de 0,27. Há uma diferença de aproximadamente 8% nos resultados encontrados pelos modelos teóricos para a condição lubrificada, sendo esta inferior àquela encontrada para o experimento não lubrificado. A Equação 10 permite o cálculo da potência média fornecida pelo equipamento, resultando em 0,04 hp ou 28,4 W.

Os valores dos coeficientes de atrito na condição lubrificada são menores do que os encontrados para as trefilações sem lubrificação, conforme esperado. O óleo lubrificante aplicado na superfície do material e no núcleo da fiação formou certa película que, por vezes, impediu o contato direto entre os materiais metálicos. Tal fenômeno pode ser definido como um regime de lubrificação mista, conforme definido por Button (2008) e Junker (2014), onde a espessura do filme formado não foi suficiente para impedir completamente o contato entre picos e vales, mas permitiu a redução deste atrito. Entretanto, valores superiores a 0,2 para coeficientes de atrito em processos de trefilação a frio ainda são considerados elevados, podendo levar a falhas comprometedoras em processos contínuos. A pequena quantidade de lubrificante utilizado, bem como a ausência de um mecanismo que o forçasse a permanecer na interface de deformação, podem ter sido fatores fundamentais para a observação desta faixa de valores.

O simples fato de realizar os experimentos de trefilação na posição vertical já contribui para uma redução na capacidade de lubrificação do sistema. Acredita-se que ao repetir o experimento de igual maneira, mas em posição horizontal, ocorra uma diminuição nos valores do coeficiente de atrito. Se o lubrificante é forçado a

permanecer na zona de deformação, como é o caso da trefilação por via úmida, melhores ainda serão os resultados obtidos em relação à redução do atrito.

4.3 RUGOSIDADE SUPERFICIAL

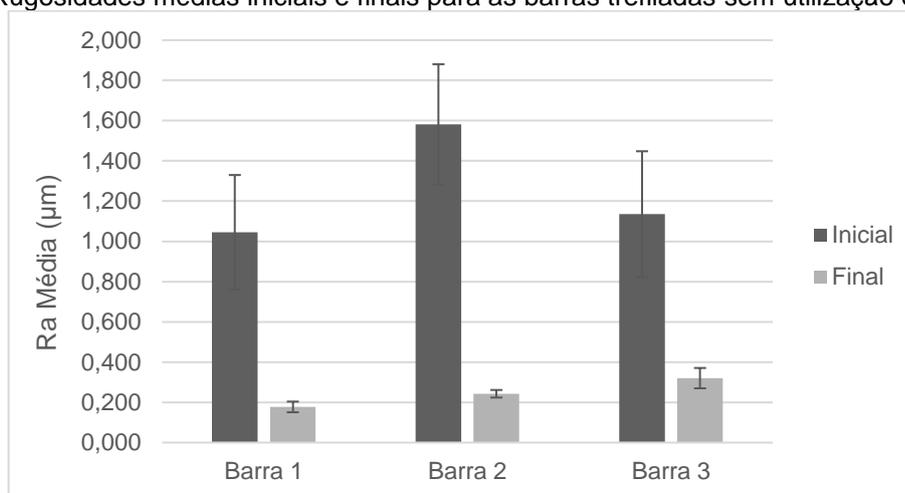
Das medições de rugosidade feitas nas três direções (0° , 120° e 240°), foi feita uma média para cada barra. As médias de rugosidade superficial inicial e final das barras trefiladas sem lubrificação e com lubrificação são apresentadas, respectivamente, nas Figuras 23 e 24.

Em relação aos experimentos sem lubrificação, as barras 1 e 2 apresentaram reduções de rugosidade superiores a 80%, enquanto a barra 3 teve redução de 71,8% na sua condição superficial. A rugosidade final média de $0,177 \mu\text{m}$ da barra 1 foi a menor encontrada neste estudo, o que evidencia que a lubrificação não necessariamente tem relação com a qualidade do acabamento superficial do produto trefilado.

Ao analisar os resultados para os experimentos lubrificados, é interessante notar, comparando-se as três trefilações, que a barra que apresentou maior rugosidade inicial continuou apresentando maior rugosidade final (barra 5), embora este valor tenha sofrido redução de 80%. As barras 4 e 6 apresentaram reduções de rugosidade superiores a 70%.

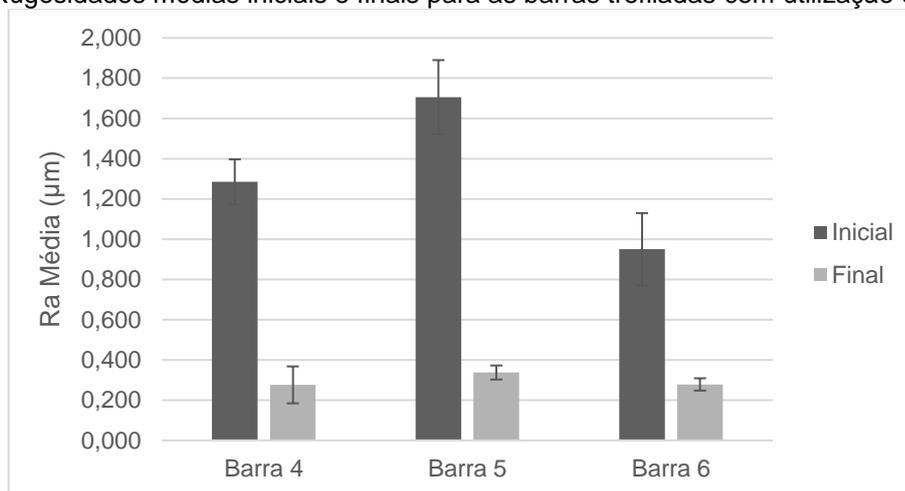
Todos os valores de rugosidade final ficaram abaixo de $0,350 \mu\text{m}$, sejam as trefilações realizadas com ou sem lubrificação. Como citado anteriormente, o fato de haver lubrificação na interface de trabalho não levou a uma maior redução de rugosidade superficial do material. Podemos afirmar, no caso específico deste estudo e considerando os parâmetros envolvidos, que apenas a característica de alto grau de acabamento superficial do núcleo da fieira é responsável pela definição da qualidade superficial final do produto trefilado.

Figura 23. Rugosidades médias iniciais e finais para as barras trefiladas sem utilização de lubrificante



Fonte: próprio autor

Figura 24. Rugosidades médias iniciais e finais para as barras trefiladas com utilização de lubrificante



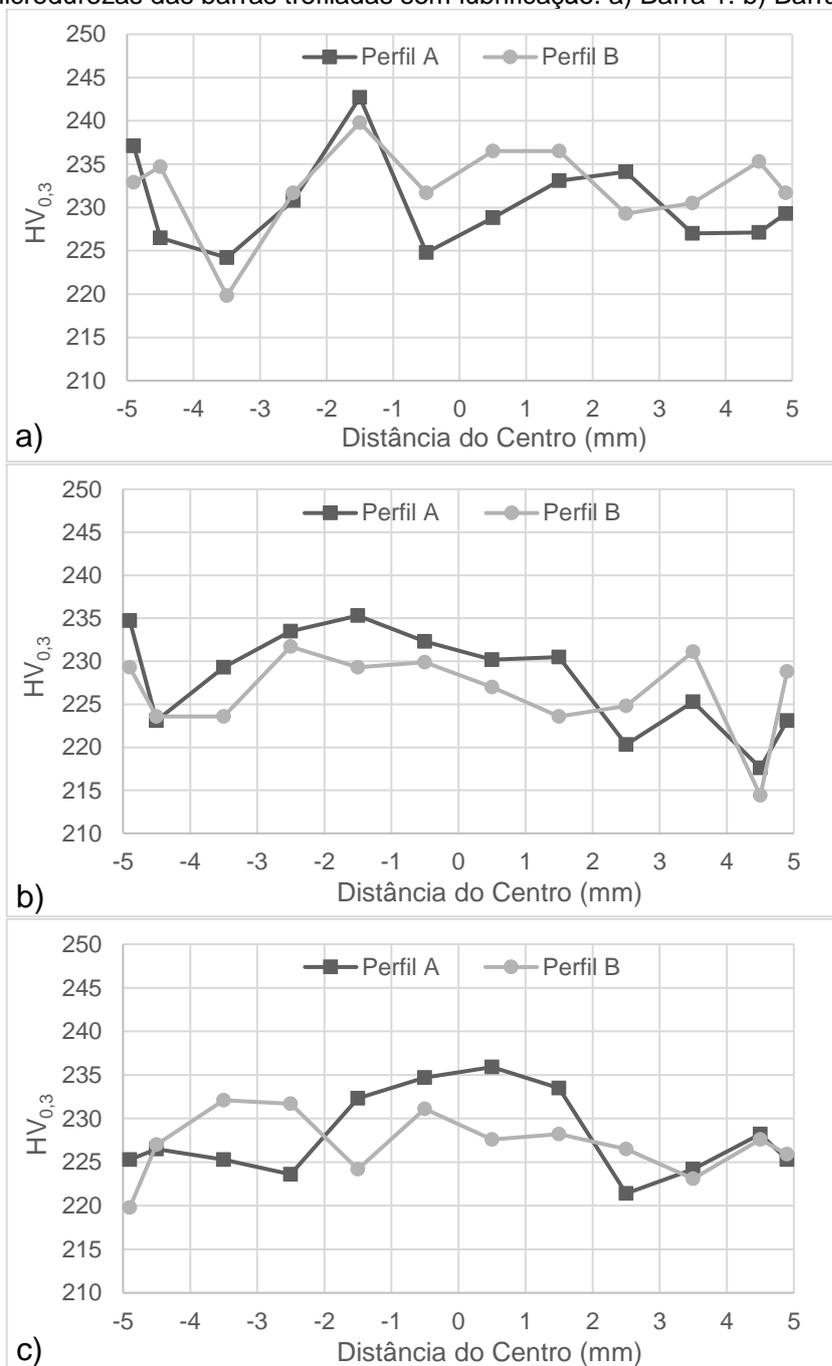
Fonte: próprio autor

4.4 MICRODUREZA

As medições de microdureza Vickers foram realizadas com carga de 0,300 kg e, para os experimentos sem utilização de lubrificantes, não apresentaram variabilidade considerável entre os valores superficiais e centrais das barras trefiladas, conforme mostra a Figura 25. O eixo das abscissas considera como ponto zero o centro do material analisado e as distâncias laterais correspondem aos valores reais a partir do ponto zero, em mm. A baixa redução de área aplicada por estes experimentos (12,7%) leva a um baixo nível de encruamento na superfície do produto trefilado, o que pode explicar o não aparecimento de maiores níveis de dureza superficiais. Outro motivo para o não endurecimento observado é o fato do material não estar em uma condição plena de recozimento, o que dificulta a verificação de um

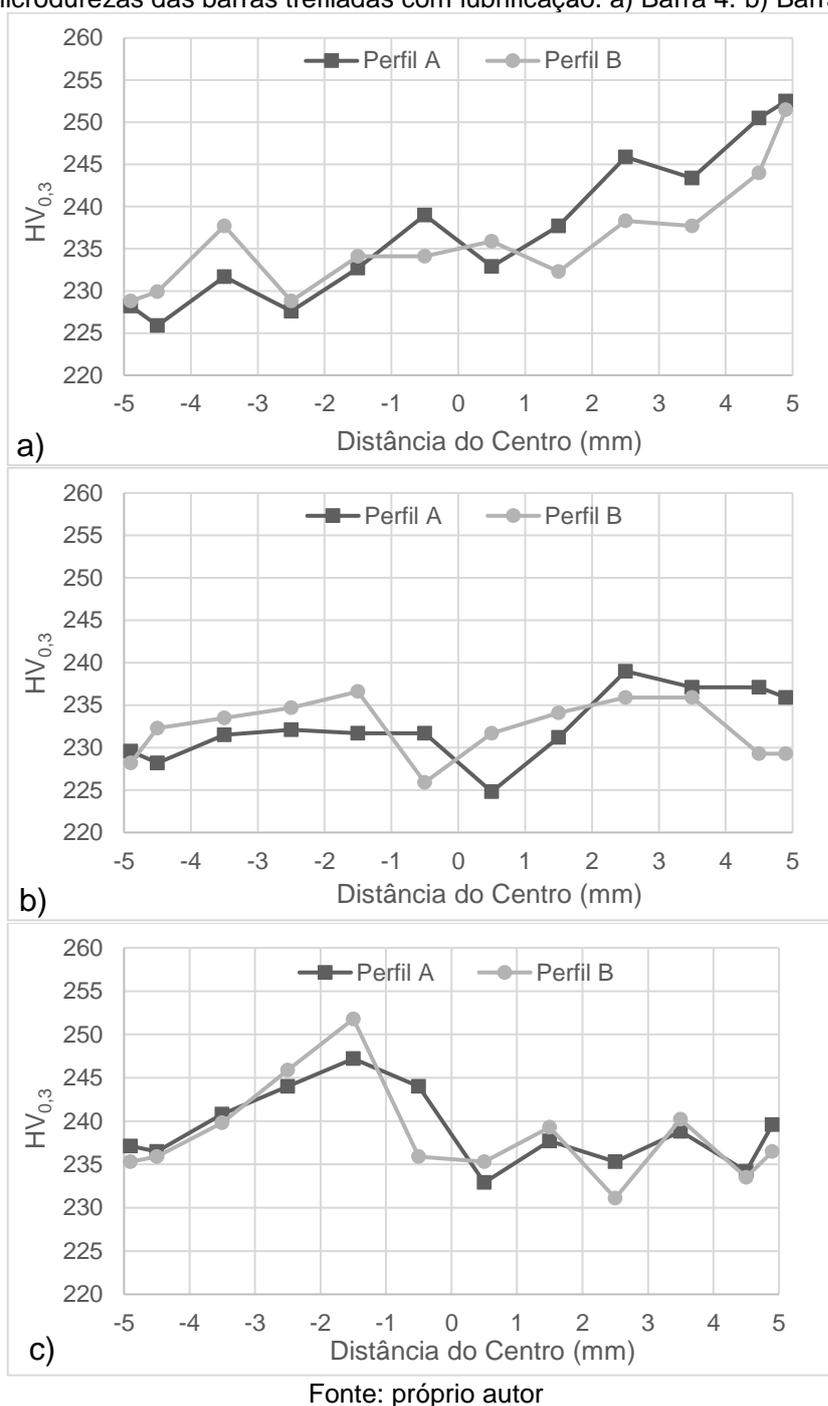
gradiente de deformação. Considerando-se todos os valores de microdureza, não se observaram diferenças superiores a 23 HV_{0,3} entre mínimos e máximos, caracterizando a permanência de uma microestrutura similar àquela do material inicial.

Figura 25. Microdurezas das barras trefiladas sem lubrificação. a) Barra 1. b) Barra 2. c) Barra 3



Fonte: próprio autor

Figura 26. Microdurezas das barras trefiladas com lubrificação. a) Barra 4. b) Barra 5. c) Barra 6

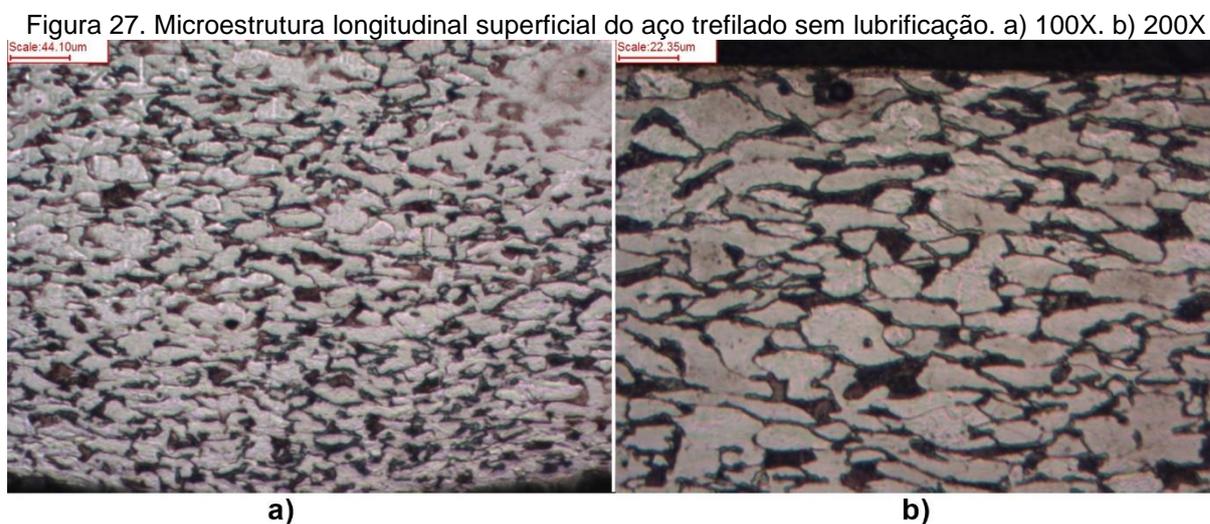


A Figura 26 apresenta os resultados para as barras 4, 5 e 6 trefiladas com utilização de lubrificante. Com uma diferença máxima de 27 $HV_{0,3}$ entre os menores e os maiores valores gerais encontrados, esta condição também evidencia que não houve um aumento significativo de dureza no material e, portanto, baixo nível de encruamento superficial. Entretanto, a barra 4 apresenta um perfil que tende ao endurecimento superficial em um dos lados do material, com valores próximos a 228 $HV_{0,3}$ em um extremo e 252 $HV_{0,3}$ no outro extremo. Este resultado pode ser explicado

por um desalinhamento ocorrido entre a barra sendo conformada e a fieira, provocando uma maior aplicação de esforços de compressão em uma determinada região do material. Apesar de pequena, esta diferença de valores juntamente com o perfil visualizado na Figura 26a é a maior evidência de endurecimento superficial observada neste trabalho.

4.5 METALOGRAFIA

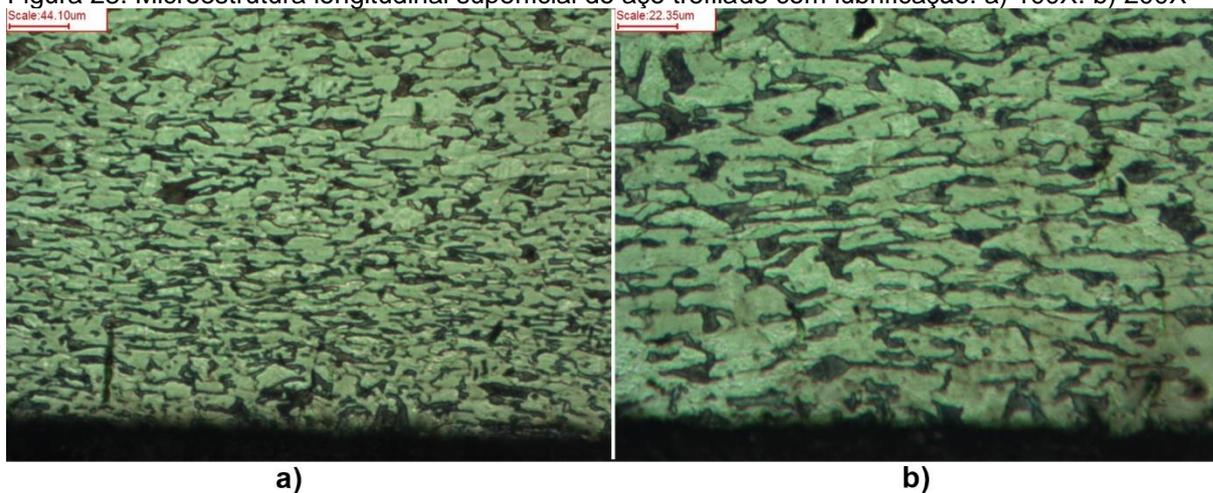
A Figura 27 apresenta as micrografias do material trefilado sem utilização de lubrificante. É possível observar na parte inferior da visualização em 100X (Figura 27a) que houve certo nível de encruamento superficial, pois houve redução no tamanho dos grãos do material na comparação com a parte superior da imagem. Ao aproximarmos ainda mais a visualização da microestrutura na superfície, como é o caso da Figura 27b, a diferença no tamanho de grão se torna praticamente indistinta. Isto ocorre principalmente devido à baixa redução de área aplicada neste experimento de trefilação, resultando em uma pequena área encruada.



Fonte: próprio autor

A Figura 28 apresenta as imagens microscópicas da superfície de deformação do material trefilado com lubrificação. Da mesma forma anterior, uma vez que o lubrificante tem pouco ou nenhum efeito na microestrutura final do material para as condições dos experimentos realizados neste trabalho, pode-se observar a redução do tamanho de grão próximo à superfície do material (partes inferiores das imagens) em comparação com as zonas mais distantes.

Figura 28. Microestrutura longitudinal superficial do aço trefilado com lubrificação. a) 100X. b) 200X

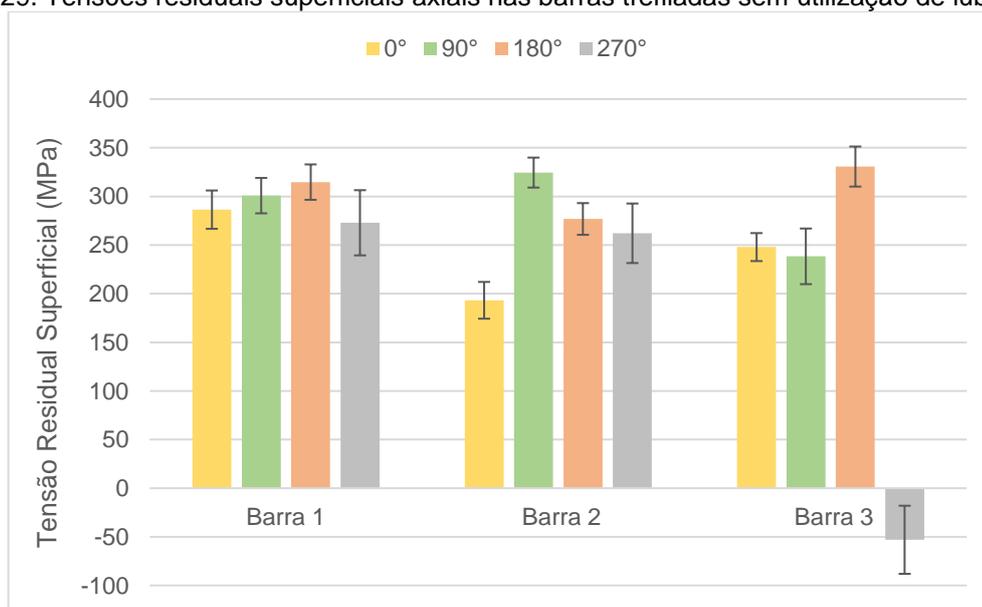


Fonte: próprio autor

4.6 TENSÃO RESIDUAL SUPERFICIAL

O último ensaio realizado consiste na caracterização do comportamento das tensões residuais superficiais no material trefilado. As medições angulares foram realizadas em pontos arbitrários da amostra e devem ser entendidas apenas como uma análise final do material, uma vez que não foram realizados ensaios prévios à realização do processo. A Figura 29 apresenta os resultados obtidos pelo método de difração de raios-X para as três barras trefiladas sem lubrificação.

Figura 29. Tensões residuais superficiais axiais nas barras trefiladas sem utilização de lubrificação

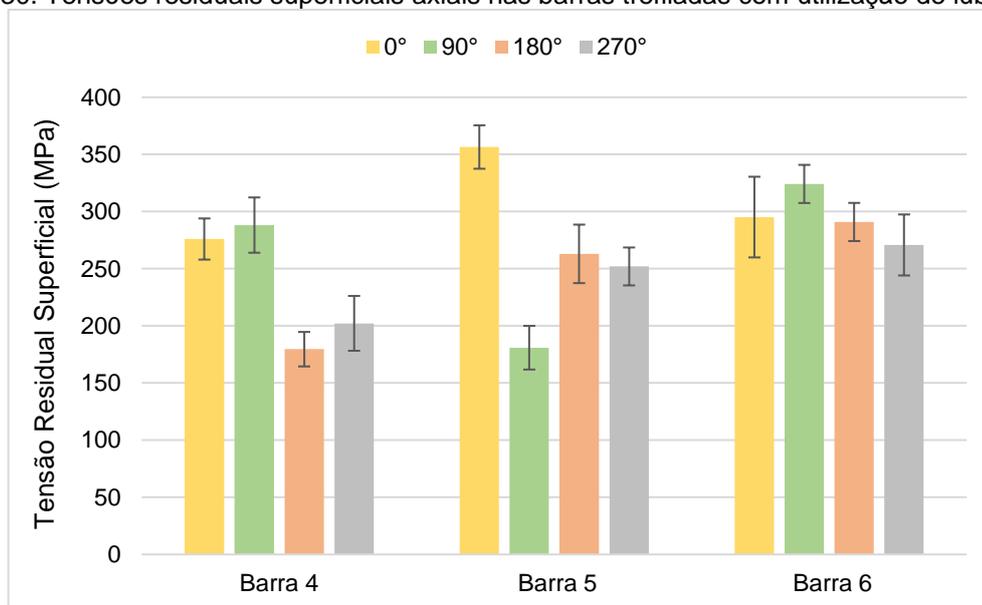


Fonte: próprio autor

Com exceção de uma das medições realizadas na barra 3 (posição de 270°), todas as outras apresentam um comportamento trativo de tensões residuais. O aparecimento de tensão residual compressiva na superfície do material trefilado não era esperado e pode ser associado à ocorrência de algum dano na barra, como os atos de derrubar ou arranhar a superfície. Logo, o maior valor encontrado foi de 331 MPa na barra 3, enquanto o menor valor encontrado, excluindo-se a posição com valor compressivo, foi de 193 MPa na barra 2. A barra 1 apresentou a menor variabilidade de resultados na comparação com as demais.

A Figura 30 apresenta a caracterização das tensões residuais superficiais para as três barras trefiladas com lubrificação.

Figura 30. Tensões residuais superficiais axiais nas barras trefiladas com utilização de lubrificação

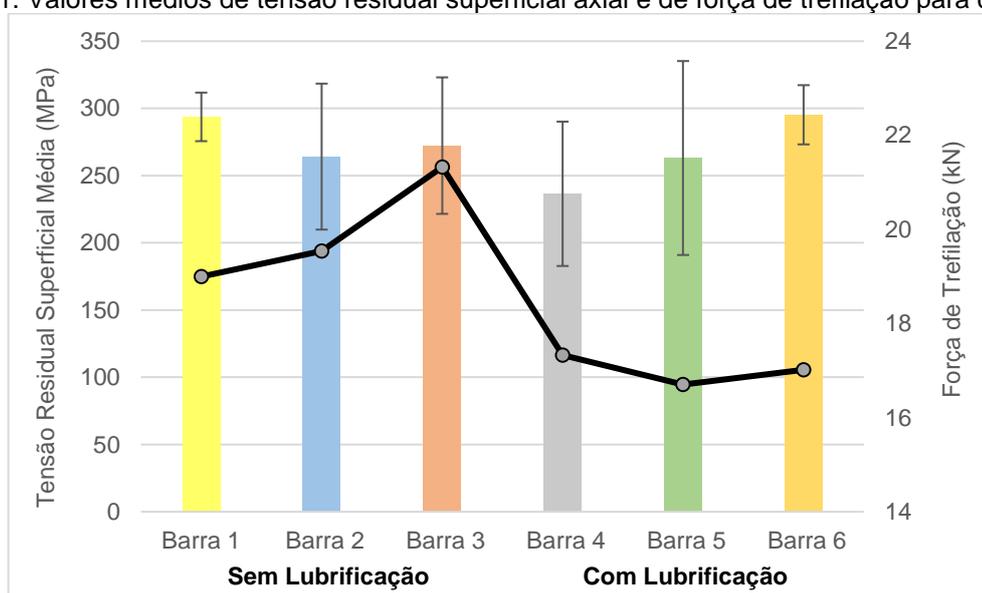


Fonte: próprio autor

Conforme esperado, há um comportamento trativo em todas as medições. A barra 4 apresenta o menor valor encontrado, sendo este de 180 MPa. O maior valor de tensão residual trativa é de 357 MPa, observado na barra 5. A barra 6 apresenta os resultados de menor variabilidade. Não é possível estimar, de acordo com os parâmetros utilizados neste trabalho, o motivo pelo qual a barra 6 apresenta resultados de menor desvio padrão ou por que a barra 5 mostrou valores com diferença de 176 MPa entre ângulos. Sendo assim, a caracterização das tensões residuais superficiais cumpre seu papel de demonstrar o comportamento destas tensões e permitir que se tenha uma ideia da faixa de valores estabelecida.

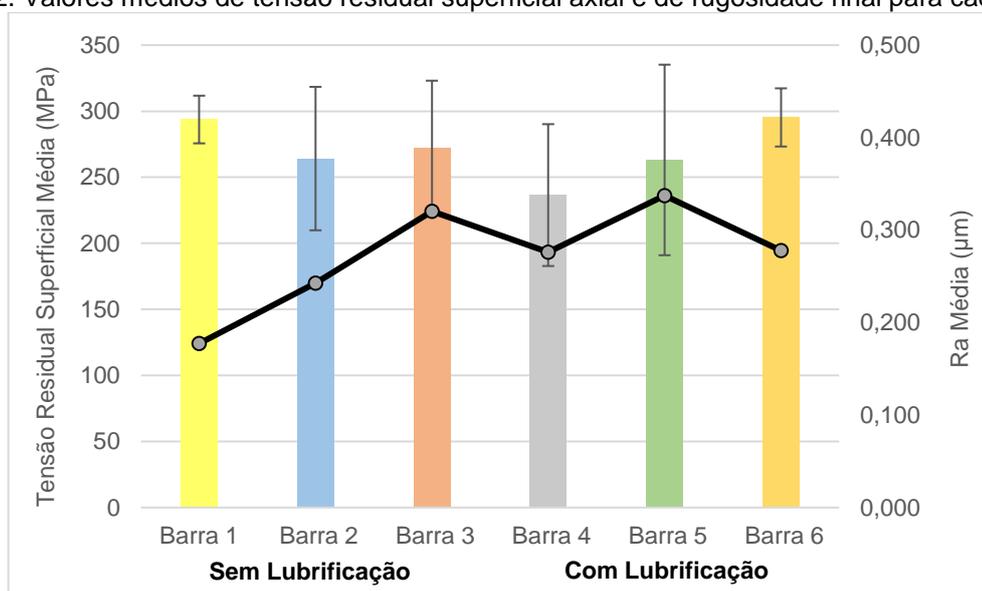
Por fim, as Figura 31 e 32 consistem em uma comparação geral dos valores médios de tensão residual para cada barra trefilada, relacionando-os com os resultados de força de trefilação e de rugosidade superficial final, respectivamente. O cálculo da média das tensões residuais considera as quatro posições de medição em cada corpo de prova, sendo que para a barra 3 não foi considerado o valor compressivo encontrado. Em ambas as figuras, as colunas e barras de desvio padrão estão relacionadas ao eixo esquerdo e a linha com marcadores está relacionada ao eixo direito.

Figura 31. Valores médios de tensão residual superficial axial e de força de trefilação para cada barra



Fonte: próprio autor

Figura 32. Valores médios de tensão residual superficial axial e de rugosidade final para cada barra



Fonte: próprio autor

Em uma primeira análise, observa-se que não há uma relação entre os valores de tensões residuais encontrados e as condições de lubrificação do processo. A Figura 31 demonstra que os resultados não permitem observar a influência da força de trefilação nos valores de tensões residuais superficiais. Como o coeficiente de atrito está diretamente ligado à força necessária para a trefilação, tal parâmetro também não pode ser relacionado aos resultados de tensão residual. Da mesma forma, a Figura 32 apresenta que as condições de rugosidade superficial final do material não influenciam nos valores das tensões residuais.

Conforme simulações numéricas realizadas por Soares *et al.* (2013), o comportamento das tensões residuais superficiais varia com o coeficiente de atrito do processo, sendo que os menores valores de tensões trativas foram obtidos para os maiores valores de coeficiente de atrito. Uma vez que os valores de atrito utilizados nas simulações desenvolvidas por estes autores são inferiores aos encontrados no presente trabalho e considerando ainda os vários outros parâmetros relacionados, não se pode esperar que os resultados apresentem uma concordância entre os estudos.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou um dos mais importantes processos de conformação mecânica e a influência do atrito nos resultados finais. Dos objetivos do estudo e das discussões realizadas, têm-se que:

- a) A rugosidade superficial dos corpos de prova foi reduzida em, pelo menos, 70% após a realização do processo de trefilação;
- b) Não houve alteração significativa entre os valores de microdureza superficial e central das amostras, sendo que as máximas diferenças encontradas entre as medições foram inferiores a 30 HV_{0,3}.
- c) A deformação superficial ficou pouco visível através das metalografias, devido ao estado prévio de encruamento do material;
- d) As forças de trefilação experimentais foram adequadas para o cálculo do atrito, sendo que as maiores forças foram observadas no experimento sem lubrificação, com média de 19,95 kN;
- e) Foi possível estimar os coeficientes de atrito utilizando os modelos teóricos de Siebel e Sachs. Conforme Siebel, estes valores são de 0,34 para o experimento sem lubrificação e 0,24 para o experimento lubrificado. A teoria de Sachs apresenta os valores de 0,40 e 0,27, respectivamente;
- f) As tensões residuais superficiais encontradas caracterizam um comportamento trativo na superfície das barras trefiladas e não apresentam relações com as condições de lubrificação, com a força de trefilação ou com a rugosidade superficial final do material.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se nos resultados apresentados e na experiência adquirida ao longo deste trabalho, o autor apresenta as seguintes ideias para a continuidade e enriquecimento da pesquisa:

- Variar o material trefilado e suas condições;
- Utilizar outros lubrificantes, como estearatos, para avaliar os coeficientes de atrito resultantes;
- Variar os parâmetros do experimento, como velocidade de trefilação e redução de área, para também avaliar as mudanças nas condições de atrito e nas tensões residuais;
- Utilizar a teoria elementar da plasticidade (TEP) e comparar com os resultados dos modelos teóricos;
- Realizar simulações numéricas para comparar com os experimentos físicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, Oswaldo Luis; VILELLA, Ronaldo Castro; BUTTON, Sérgio Tonini. **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. Campinas: UNICAMP, 2004.

ASM. Wire, Rod, and Tube Drawing. In: _____. ASM Handbook, Volume 14, **Forming and Forging**. 4th ed. [S. I.]: ASM, 1996. p. 715-731.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E9-09**: Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature. West Conshohocken, 2009.

AVITZUR, Betzalel. Analysis of wire drawing and extrusion through conical dies of small cone angle. **Journal of Engineering for Industry**, p. 89-95, feb. 1963.

BRESCIANI FILHO, Ettore *et al.* Trefilação. In: _____. **Conformação Plástica dos Metais**. 6 ed. São Paulo: EPUSP, 2011. cap. 4, p 48-60. Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/CONFORMACAOPLASTICADOSMETAIS.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2016.

BRITO, Alberto Moreira Guerreiro. **Análise teórico-experimental dos processos de expansão, redução e inversão de extremidades de tubos de parede fina em matriz**. 2006. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2006.

BUTTON, Sérgio Tonini. **Trefilação**. Belo Horizonte: REDEMAT-UFOP, 2008.

CALLISTER Jr., Willian D. Mechanical Properties of Metals. In: _____. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. 7th ed. [S. I.]: John Wiley & Sons, 2007. cap. 6, p. 137-160.

COSER, Tiago Brun; SOUZA, Tomaz Fantin de; ROCHA, Alexandre da Silva. Avaliação numérica da influência da geometria do ferramental na geração de tensões residuais durante o processo de trefilação de barras de aço. **Revista Matéria**, v. 20, n, 4, p. 819-831, 2015.

DRESEL, Wilfried. Lubricating Greases. In: MANG, Theo (Ed.). **Encyclopedia of Lubricants and Lubrication**. Weinheim: Springer, 2014. v. 1, p. 1076-1096.

FELDER, E. *et al.* Identification of the work of plastic deformation and the friction shear stress in wire drawing. **Wear**, v. 286-287, p. 27-34, 2012

GERBASE FILHO, José. **Método de medição de força de trefilação de arames: avaliação da variação do coeficiente de atrito em trefilação de arames de aço**. 1976. 64 f. Tese (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Porto Alegre, 1976.

GIORGINI, Danielle Granha. **Otimização do processo de trefilação através da proposição de um modelo de previsão da força de trefilação adequado às condições reais da V & M do Brasil**. 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Belo Horizonte, 2013.

GUMMERT, Hermann-J. Drawing. In: MANG, Theo (Ed.). **Encyclopedia of Lubricants and Lubrication**. Weinheim: Springer, 2014. v. 1, p. 392-420.

HOSHI, Yasushi *et al.* In situ observation of lubricant film in a diamond die for wire drawing by Micro-FTIR. **Tribology Online**, v. 11, n. 2, p. 88-93, 2016.

JUNKER, Friedhelm. Steel Wire, Bar, and Profile Drawing Lubrication. In: MANG, Theo (Ed.). **Encyclopedia of Lubricants and Lubrication**. Weinheim: Springer, 2014. v. 1, p. 1978-1988.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. Metal Extrusion and Drawing Processes and Equipment. In: _____. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6th ed. [S. l.]: Pearson, 2009a. cap. 15, p. 373-378.

KALPAKJIAN, Serope; SCHMID, Steven R. Surface Roughness and Measurement; Friction, Wear, and Lubrication. In: _____. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6th ed. [S. l.]: Pearson, 2009b. cap. 33, p. 951-972.

KRAUSS, George. Normalizing, Annealing, and Spheroidizing Treatments; Ferrite/Pearlite Microstructures in Medium-Carbon Steels. In: _____. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. 1st ed. [S. l.]: ASM, 2005. cap. 13, p. 252-253.

KUBOKI, T. *et al.* Effect of die geometry on residual stress level present after bar drawing. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 28, n. 1, p. 65-71, 2001.

MENEZES, Mateus Sotelo *et al.* Análise de uma ferramenta de trefilação a frio através do método de elementos finitos. In: SEMINÁRIO DE TREFILAÇÃO – ARAMES, BARRAS E TUBOS DE METAIS FERROSOS E NÃO FERROSOS, 7., 2016, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABM, 2016. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/anais>>. Acesso em: 09 out. 2016.

MONDARDO, Milena Macarini. **Análise de parâmetros do processo de trefilação de barras cilíndricas de aço AISI 1045 via simulação numérica computacional**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2012.

NANAO, Hidetaka *et al.* Direct observation of lubricant components between wire and diamond die for wire drawing with a Micro-FTIR. **Tribol Lett**, v. 60, n. 12, 2015.

NUNES, Rafael Menezes. **Estudo de distorção de barras cilíndricas de aço ABNT 1045 em uma rota de fabricação envolvendo trefilação combinada e têmpera por indução**. 2012. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2012.

PINTO, Daniel Fraga. **Velocidade de trefilação e seu efeito no encruamento e acabamento superficial de um aço SAE 1008**. 2016. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2016.

RUBIO, E. M. *et al.* Calculation of the forward tension in drawing processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 162-163, p. 551-557, 2005.

SCHAEFFER, Lirio. Conceitos Básicos. In: _____. **Conformação Mecânica**. 2 ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. cap. 2, p. 15-47.

SCHULER. Basic principles of metal forming. In: _____. **Metal Forming Handbook**. Berlin: Springer, 1998. cap. 2, p. 25-31.

SCURACCHIO, Bruno Geoffroy. **Tensões residuais induzidas por shot-peening e durabilidade de molas em lâmina**. 2012. 130 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo, 2012.

SOARES, Carla Adriana Theis. **Análise das tensões residuais no processo de trefilação considerando os efeitos de anisotropia**. 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2012.

SOARES, Carla A. T. *et al.* Influência do ângulo e do coeficiente de atrito nas tensões residuais geradas na trefilação de barras de aço AISI 1045. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 9, n. 2, p 54-62, 2013.

SOUZA, Tomaz Fantin de. **Simulações computacionais para análise e minimização das tensões residuais no processo de trefilação**. 2011. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2011.

SOUZA, Tomaz Fantin de *et al.* Trefilação de aços baixo carbono através de máquina universal de ensaios. In: SEMINÁRIO DE TREFILAÇÃO – ARAMES, BARRAS E TUBOS DE METAIS FERROSOS E NÃO FERROSOS, 6., 2015, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** São Paulo: ABM, 2015. Disponível em: <<http://www.abmbrasil.com.br/anais>>. Acesso em: 16 out. 2016.

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**, v. 60, n. 1, p 403-408, 2015.

TAKADA, Masayuki; MATSUBARA, Hideaki; KAWAGISHI, Yoshihiro. Wear of cemented carbide dies for steel cord wire drawing. **Materials Transactions**, v. 54, n. 10, p. 2011-2017, 2013.

UTSUNOMIYA, Hiroshi *et al.* Lubrication using porous surface layer for cold drawing of steel wire. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 62, p. 235-238, 2013.

XU, Yinglei. Effect of drawing processes on wire breaking in steel wire production. **Advanced Materials Research**, v. 941-944, p. 1667-1670, 2014.

ZHANG, Shun Hu *et al.* Upper bound analysis of wire drawing through a twin parabolic die. **Meccanica**, v. 51, n. 9, p. 2099-2110, jan. 2016.

ZHAO, Dewen; ZHAO, Hongjin; WANG, Guodong; Curvilinear integral of the velocity field of drawing and extrusion through elliptic die profile. **Transactions of NFSoc**, v. 5, n. 3, p 79-83, sep. 1995.