

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

MARIANA LAGNIER AZEVEDO

**ANÁLISE DA LUBRIFICAÇÃO NA SUPERFÍCIE E NAS PROPRIEDADES DE**  
**ARAMES DE ALTO TEOR DE CARBONO TREFILADOS**

BELO HORIZONTE

2016

MARIANA LAGNIER AZEVEDO

**ANÁLISE DA LUBRIFICAÇÃO NA SUPERFÍCIE E NAS PROPRIEDADES DE  
ARAMES DE ALTO TEOR DE CARBONO TREFILADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Coorientador: Prof. Dr. Wellington Lopes

BELO HORIZONTE

2016

MARIANA LAGNIER AZEVEDO

**ANÁLISE DA LUBRIFICAÇÃO NA SUPERFÍCIE E NAS PROPRIEDADES DE  
ARAMES DE ALTO TEOR DE CARBONO TREFILADOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>.Dra.Elaine CarballoSiqueiraCorrêa - Orientadora

---

Prof. Dr. Wellington Lopes - Coorientador

---

Prof. Dr. Leonardo Roberto Silva

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por estar sempre ao meu lado guiando-me pelos caminhos do bem.

À minha mãe e ao meu pai por me apoiar, me incentivar e me ensinar a lutar pelos meus sonhos.

Ao meu irmão de coração Carlos Vinícius Soares por mesmo de longe estar sempre me ajudando a ser uma profissional melhor.

À professora Dra. Elaine Carballo Siqueira Corrêa pelo conhecimento compartilhado, pelo apoio incondicional e pela paciência ao longo desta jornada.

Ao meu coorientador Wellington Lopes pelas explicações e conselhos .

Ao Prof. Dr. Leonardo Roberto Silva pela disponibilidade em participar deste trabalho e pela ajuda na análise dos resultados de rugosidade.

Ao Departamento de Engenharia de Materiais pela disponibilidade dos equipamentos utilizados neste trabalho.

À Belgo Bekaert Arames pela disponibilidade do material utilizado neste trabalho.

Às minhas amigas de curso Anna Luiza Vilaça e Érika Diniz por terem me ajudado e me incentivado a cada dificuldade.

“Se você pode sonhar, você pode fazer”.  
(WALT DISNEY)

## RESUMO

A trefilação de barras e arames é um processo de conformação mecânica onde a matéria prima é deformada até a obtenção do diâmetro e das propriedades mecânicas desejadas. Para que o produto final seja de boa qualidade, é preciso o controle de diversos parâmetros tanto de processo quanto geométricos. Um dos principais parâmetros irá influenciar tanto na qualidade quanto nas propriedades mecânicas do arame ou barra trefilados é a lubrificação. Neste trabalho, foram avaliados o efeitos do lubrificante no acabamento superficial do arame trefilado. Para isso, foram analisados duas condições de lubrificação diferentes através do estudo da composição química e da análise calorimétrica dos lubrificantes utilizados, além da avaliação da superfície do arame através da microscopia eletrônica de varredura e análise da rugosidade, da microdureza Vickers e das propriedades mecânica à tração do arame trefilado. Deste modo, chegou-se a conclusão que a mistura de dois tipos de sabão diferentes não influenciou na melhora das propriedades mecânicas e superficiais do arame trefilado.

Palavras-chave: Trefilação. Lubrificação. Propriedades. Superfície.

## **ABSTRACT**

The drawing of bars and wires is a metal forming process in which the raw material is deformed to obtain the diameter and mechanical properties desired. For the final product of quality, it is necessary control several parameters so as process and geometric parameters. One of the main parameters that will influence both the quality and the properties of the drawn wire or rod it is lubrication. In this paper, we evaluated the effect of the lubricant on the surface of the drawn wire. For this, we will analyze two different conditions of lubrication by studying the chemical composition and calorimetry analysis of lubricants used. In addition, the evaluation of the surface of the wire will be done by scanning electron microscopy and analysis of roughness, besides, the Vickers hardness and mechanical properties for traction of drawn wire. In conclusion, the mix of two different types of drawing soap didn't make any of the mechanical and superficial properties better of the drawn wire.

**Keywords:** Wire Drawing. Lubrication. Properties. Surface.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Arame passando pela fieira, diminuindo seu diâmetro.....	16
Figura 3.2 - Material passando pela Fieira.....	17
Figura 3.3 - Defeitos Superficiais em Arames Trefilados.....	19
Figura 3.4 - Semi ângulo da fieira.....	22
Figura 3.5 - Semi ângulo da fieira.....	23
Figura 3.6 - Relação ângulo ótimo e redução de área.....	24
Figura 3.7 - Tensões na Trefilação.....	26
Figura 3.8: Representação da deformação em uma barra ou arame trefilado.....	27
Figura 3.9 - Encruamento no material monocristalino .....	28
Figura 3.10 - Coeficiente de Atrito em função do Tempo de Fosfatização .....	30
Figura 3.11- Película de lubrificante entre o fio e a matriz.....	30
Figura 3.12 - Coeficiente de Atrito em função da Temperatura.....	32
Figura 3.13 - Lubrificação hidroestática e hidrodinâmica.....	33
Figura 4.1 - Fluxograma das principais etapas do trabalho.....	34
Figura 4.2 - Máquina de Trefilar Bekaert .....	35
Figura 4.3 - Amostras dos sabões.....	38
Figura 4.4 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios X.....	39
Figura 4.5 - Calorímetro Diferencial de Varredura.....	39
Figura 4.6– Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).....	40
Figura 4.7 - Máquina de Corte.....	40
Figura 4.8- Locais de Medição de Rugosidade nas amostras por passe.....	41
Figura 4.9 - Medidor de Rugosidade.....	42
Figura 4.10 – MicrodurômetroVickers utilizado para medição de dureza das amostras .....	42
Figura 4.11 - Amostras para Microdureza .....	43
Figura 4.12 - Esquemática das medidas de microdureza das amostras por passe de trefilação.....	43
Figura 4.13 - Máquina de Tração.....	44

Figura 5.1 - Análise térmica dos sabões de cálcio e de sódio antes de serem utilizados.....	47
Figura 5.2 - Análise térmica dos lubrificantes utilizados na trefilação - lubrificação A.....	48
Figura 5.3 - Análise térmica dos lubrificantes utilizados na trefilação - lubrificação B .....	49
Figura 5.4 - Superfície (MEV) do material após o primeiro passe de trefilação - lubrificação A.....	51
Figura 5.5 - Superfície (MEV) do material após o segundo passe de trefilação - lubrificação A.....	52
Figura 5.6 - Superfície (MEV) do material após o nono passe de trefilação - lubrificação A..	53
Figura 5.7 - Superfície (MEV) do material após o primeiro passe de trefilação - lubrificação B.....	53
Figura 5.8 - Superfície (MEV) do material após o segundo passe de trefilação - lubrificação B.....	54
Figura 5.9 - Superfície (MEV) do material após o nono passe de trefilação - lubrificação B..	55
Figura 5.10 - Superfície (MEV) do material limpo após o primeiro passe de trefilação - lubrificação A.....	56
Figura 5.11 - Superfície (MEV) do material limpo após o segundo passe de trefilação - lubrificação A.....	56
Figura 5.12 - Superfície (MEV) do material limpo após o nono passe de trefilação - lubrificação A.....	57
Figura 5.13 - Superfície (MEV) do material limpo após o primeiro passe de trefilação - lubrificação B.....	58
Figura 5.14 - Superfície (MEV) do material limpo após o segundo passe de trefilação - lubrificação B.....	58
Figura 5.15 - Superfície (MEV) do material limpo após o nono passe de trefilação - lubrificação B.....	59
Figura 5.16 - Análise das rugosidades média e total no material trefilado em um, dois e nove passes, empregando os dois tipos de lubrificação.....	62
Figura 5.17 - Distribuição de dureza Vickers ao longo da seção transversal do arame trefilado empregando a lubrificação A.....	65

Figura 5.18 - Distribuição de dureza Vickers ao longo da seção transversal do arame trefilado empregando a lubrificação B.....	66
Figura 5.19 - Comparação da distribuição de dureza Vickers ao longo da seção transversal do arame trefilado empregando os dois tipos de lubrificação.....	68
Figura 5.20 - Curvas tensão convencional x deformação convencional do material trefilado até o início da estricção em um passe, dois passes e nove passes - lubrificação A.....	69
Figura 5.21 - Curvas tensão convencional x deformação convencional do material trefilado até o início da estricção em um passe, dois passes e nove passes - lubrificação B.....	71
Figura 5.22 - Propriedades mecânicas do material trefilado após um passe, dois passes e nove passes de trefilação.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Composição Química do Aço.....	35
Tabela 4.2 - Parâmetros por Passe.....	36
Tabela 4.3 - Composição química dos sabões.....	37
Tabela 4.4 - Lubrificação avaliada no trabalho.....	38
Tabela 5.1 - Perfil de temperatura - lubrificação A .....	49
Tabela 5.2 - Perfil de temperatura - lubrificação B.....	50
Tabela 5.3 - Rugosidade total e média por passe para condição de lubrificação A.....	60
Tabela 5.4 - Rugosidade total e média por passe para condição de lubrificação B.....	61
Tabela 5.5 - Resultados de dureza obtidos com a lubrificação A .....	63
Tabela 5.6 - Resultados de dureza obtidos com a lubrificação B.....	64
Tabela 5.7 - Propriedade de tração - lubrificação A.....	72
Tabela 5.8 - Propriedade de tração - lubrificação B.....	72

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2.OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivos Gerais.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
3.1. Descrição Geral do Processo de Trefilação.....	16
3.2. Parâmetros de Processo que Influenciam na Trefilação.....	19
3.3. Parâmetros Geométricos que Influenciam na Trefilação.....	21
3.4. Deformação na Trefilação.....	25
3.5. Encruamento.....	27
3.6. Lubrificação.....	29
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.1. Descrição Geral do Trabalho.....	34
4.2. Material.....	35
4.3. Trefilação.....	35
4.4. Lubrificação na Trefilação.....	37
4.5. Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (EDX).....	38
4.6. Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC).....	39
4.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	40
4.8. Análise da Rugosidade.....	41
4.9. Ensaio de Microdureza.....	42
4.10. Ensaio de Tração.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
5.1. Caracterização dos Processos de Lubrificação.....	45
5.1.1. Análise da composição química dos lubrificantes.....	45
5.1.2. Análise do comportamento térmico dos lubrificantes.....	45
5.2. Observação da Superfície do Material sem Limpeza/com Lubrificante.....	51
5.3. Observação da Superfície do Material após Limpeza.....	55
5.4. Verificação da Rugosidade.....	59
5.5. Distribuição de Dureza.....	62
5.6. Análise das Propriedades Mecânicas à Tração.....	69

5. CONCLUSÕES.....	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76

## 1. INTRODUÇÃO

Tecnologias de fabricação de arames são de origem antiga. Existem indícios de que povos que viviam na era antes de Cristo, já utilizavam pedras naturais para passar tiras de alumínio além de utilizar tecnologias através das quais placas de metal eram tracionadas dando a entender que eles compreendiam os conceitos de múltiplos passes e de recozimento entre os passes. Porém a utilização da trefilação emergiu apenas na Idade Média, de acordo com um documento escrito em Paris onde há um relato completo do ofício (WRIGHT, 2011).

A trefilação é um processo de conformação mecânica realizado a frio, ou seja, a temperatura de trabalho é menor do que a temperatura de recristalização do material trefilado, permitindo assim, com que haja o encruamento do material. O encruamento proporciona um aumento na resistência do material com uma perda significativa da sua ductilidade (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

O desenvolvimento dos lubrificantes tem sido um aspecto essencial da história da trefilação. O primeiro processo de trefilação desenvolvido dependia da gordura animal ou de sebo. Assim, o lubrificante foi sendo desenvolvido, ampliando seu uso através de novas matérias primas como material particulado na forma de cal, carbono, alcatrão, carvão em pó, grafite etc. Aditivos que mantinham a integridade do lubrificante em temperaturas elevadas foram introduzidos posteriormente (WRIGHT, 2011).

Avanços do processamento do arame no século XX incluem itens como recozimento em linha, tratamentos térmicos, sofisticados sistemas de manipulação do material que permitiram altas velocidades de trefilação, além de uma variedade de inovações de automação e controle de processo. O melhor desempenho do processo de trefilação com o passar do tempo promoveu o desenvolvimento de novos materiais para a ferramenta como o carboneto de tungstênio e os diamantes sintéticos. O carboneto de tungstênio até hoje é o material mais utilizado em feiras devido a sua alta resistência ao desgaste e seu menor custo. Já os diamantes sintéticos, são mais utilizados para diâmetros menores (WRIGHT, 2011).

O processo de trefilação hoje consiste em passar a matéria prima metálica, chamada de fio máquina, através de uma matriz, a feira, visando diminuir o diâmetro do arame e tendo como consequência o aumento do seu comprimento. O processo tem início no apontamento do fio

máquina, que logo em seguida é inserido na fieira. Este procedimento poderá ser feito diversas vezes, passando por vários passes, que serão determinados pela quantidade de deformação que o material suporta sem que haja a formação de fraturas. Após a passagem pela matriz, o arame será enrolado em uma bobina para que ele seja devidamente refrigerado, evitando o desenvolvimento de fenômenos indesejados, como o fenômeno de envelhecimento, que poderão prejudicar as propriedades finais do arame (CETLIN; HELMAN, 2010). Como os requisitos do cliente para os aços para arame tornaram-se mais rígido existe uma grande necessidade para o desenvolvimento de novos materiais que têm elevada resistência, sem a degradação de outras propriedades, tais como a ductilidade, tenacidade, e alta resistência (HWANG et al., 2015).

Arares trefilados tem uma grande importância prática em aplicações estruturais, como cabos de suspensão, pneumáticos e molas, onde alta resistência é necessária. Durante trefilação de arames, as propriedades mecânicas do aço melhoraram substancialmente. Isto tem sido atribuído ao refinamento estrutural que ocorre durante a operação de trefilação do arame. Deste modo, na trefilação, a espessura interlamelar diminui proporcionalmente o que causa aumento adicional na resistência do aço (KUMAR et al., 2011).

Segundo Haddi, Imad e Vega (2011), no processo de trefilação de arame, a seção transversal é reduzida, forçando o material através de toda uma série de matrizes. Deve notar-se que a capacidade do processo de trefilação depende de três parâmetros principais: (i) as propriedades do material do arame, (ii) as geometrias de matriz (que é basicamente um ângulo e comprimento da fieira) e (iii) as condições de processamento tais como velocidade e atrito, na interface entre o molde e o semi-ângulo do molde e a redução na área.

Deste modo, a trefilação apesar de ser um processo relativamente simples, envolve vários parâmetros importantes tais como a devida lubrificação, a análise do esforço necessário para que haja a conformação do material sem causar defeitos ao arame e a fieira, propriedades mecânicas apropriadas a aplicação final, dentre outras (CETLIN; HELMAN, 2010). Nesse contexto, no presente trabalho foi avaliada a influencia do processo de lubrificação nas características de arames de aço de alto teor de carbono trefilados.

## **2.OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência do lubrificante na superfície e nas propriedades mecânicas do produto trefilado.

### **2.2 Objetivos Específicos**

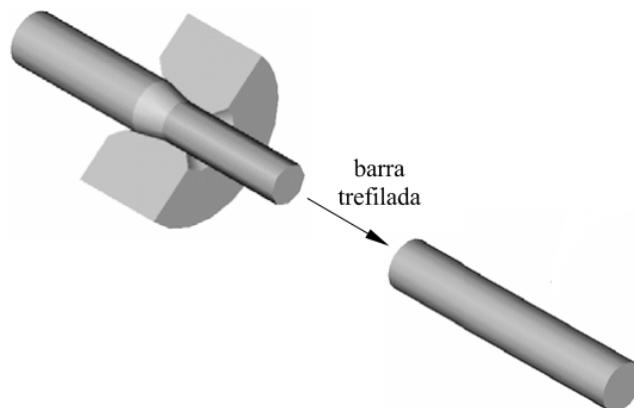
- Verificar a composição química dos sabões de lubrificação utilizados na trefilação de arames utilizando o espectrômetro de fluorescência de raios X ;
- Avaliar as temperaturas de transformação e degradação dos lubrificantes com o calorímetro diferencial de varredura;
- Por meio de microscopia eletônica de varredura, analisar a superfície do material trefilado depois de um passe, dois passes e nove passes com e sem a presença dos lubrificantes nas duas condições de lubrificação utilizadas neste trabalho;
- Avaliar a rugosidade do material trefilado em ambas as condições de lubrificação no primeiro, no segundo e no nono passe;
- Analisar a distribuição de dureza ao longo do raio do arame trefilado após um, dois e nove passes nas duas condições de lubrificação;
- Avaliar as propriedades mecânicas à tração em ambas condições de lubrificação;
- Analisar se alguma das condições de lubrificação é melhor que a outra.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Descrição Geral do Processo de Trefilação

O processo de trefilação de barras, tubos e arames é particularmente utilizado nas indústrias da construção civil, elétrica e automobilística, tendo como principal objetivo, alcançar barras ou arames de propriedades mecânicas controladas com diâmetros menores. Este processo consiste basicamente em levar uma barra ou arame pela ferramenta, onde ocorrerá a redução de sua seção com o conseqüente aumento de comprimento, como mostra a Figura 3.1 (CORRÊA, 2004). A ferramenta, chamada de fieira (Figura 3.1), possui um orifício cônico em seu centro com diâmetro decrescente o qual, depois de subseqüentes passagens, o arame passará a ter a forma desejada (BRESCIANI FILHO et al., 2011, CORRÊA, 2004). A seção transversal do arame ou da barra pode ser tanto circular quanto não circular, dependendo do projeto. O uso da trefilação como processo de conformação mecânica pode ser vantajoso em relação aos outros processos devido ao seu melhor controle dimensional, menor custo e processamento contínuo, além de poder ser utilizado em seções transversais pequenas (WRIGHT, 2011).

**Figura 3. 2 - Arame passando pela fieira, diminuindo seu diâmetro**

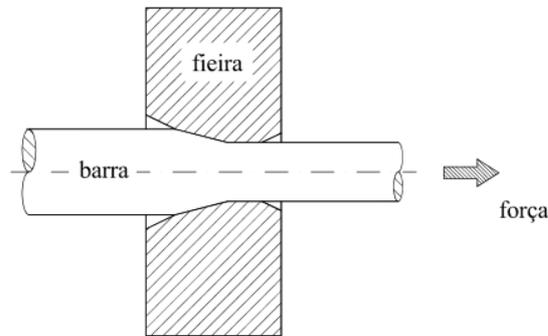


Fonte: CORRÊA, 2004.

A trefilação é um processo de conformação mecânica à frio, onde a temperatura na qual o processo ocorre é menor do que a temperatura de recristalização do material do arame (BRESCIANI FILHO et al., 2011), havendo portanto, encruamento do material trefilado, levando à mudança das suas propriedades mecânicas - aumento da resistência mecânica e

diminuição da ductilidade, conforme o diâmetro do arame ou da barra diminui (Figura 3.2) (LEE et al., 2013).

Figura 3.2 - Material passando pela Feira



Fonte: CORRÊA, 2004.

A matéria prima da trefilação pode ser proveniente da laminação a quente ou da extrusão, e é um produto que possui camadas de óxido na sua superfície que devem ser retiradas antes do começo do processo para evitar o desgaste prematuro da matriz e da formação de danos superficiais no produto final (DIETER, 1998). Existem basicamente dois tipos de decapagem, podendo ela ser química ou mecânica. Na decapagem química, o fio máquina será imerso em um banho ácido para a retirada da carepa, depois será lavado com água e, posteriormente, será banhado em uma solução com neutralizantes, que irão depender basicamente do tipo de material a ser decapado. Poderão também ser empregados, após o banho com neutralizantes, soluções contendo fosfatos, que irão formar uma rede, facilitando a aderência do sabão de lubrificação ao arame (PALMEIRA, 2005). Na decapagem mecânica, são utilizadas diversas polias posicionadas em diferente ângulos onde o fio máquina irá passar, causando a quebra da carepa mais superficial, que é extremamente dura e frágil. Logo após a retirada da camada mais externa de carepa, o fio máquina deve passar através de um sistema de escovas metálicas que irão remover as camadas de carepa mais finas e internas além de limpar os resíduos da etapa anterior. É também bastante comum utilizar lixas que irão dar o acabamento final ao fio máquina e fazer pequenas ranhuras na superfície do material que irão auxiliar no arraste do sabão lubrificante (BRUSIUS JUNIOR, 2009).

Depois da decapagem, o material é levado para ser trefilado. O atrito entre a ferramenta e o arame é um dos parâmetros mais críticos da trefilação, podendo implicar na aparição de vários defeitos superficiais no material, aumento na temperatura de trabalho e um maior desgaste da

ferramenta. Para evitar esses problemas e diminuir o esforço de trefilação, é imprescindível que haja uma lubrificação eficiente durante o processo. Os dois tipos de lubrificação mais utilizados são por via seca e por via úmida. Na lubrificação por via seca, o lubrificante pode ser uma graxa ou sabão e será arrastado junto com arame na passagem pela fieira. Já na lubrificação por via úmida, toda a matriz fica imersa no fluido lubrificante (DIETER, 1998).

A dureza desejada do material trefilado pode ser obtida por meio da modificação de alguns parâmetros de processo, como a redução por passe, que pode chegar até 50%, e da velocidade na qual a máquina opera. Além disso, podem-se fazer tratamentos térmicos dependendo do material do arame, para que as propriedades desejadas sejam atingidas (DIETER, 1998).

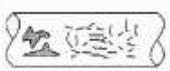
O tratamento térmico mais utilizado na trefilação de arames é o recozimento. O recozimento pode ser feito entre os passes de trefilação ou no final do processo, com o intuito de diminuir o encruamento causado pela conformação. Podem ser realizados três tipos de recozimento: 1) recozimento para alívio de tensões, onde não há mudanças significativas na microestrutura do arame; 2) recozimento de recristalização, onde há uma pronunciada mudança na microestrutura do material removendo todo o histórico de deformação que havia no arame, ou seja, eliminando o encruamento e 3) recozimento pleno, onde também há uma pronunciada mudança na microestrutura do material, envolvendo além da recristalização, a mudança de fase. Em adição ao recozimento, é muito utilizado o tratamento térmico austêmpera modificada, mais conhecido como patenteamento. O patenteamento é feito antes da trefilação para que seja obtida uma microestrutura favorável à deformação, onde o encruamento ocorra mais facilmente. Outros tratamentos térmicos como têmpera, revenimento e zincagem podem ser feitos em arames trefilados para os mais diversos fins (SCHAEFFER, 2009).

Uma das características consideradas importantes para o material a ser trefilado é uma relativamente alta conformabilidade, uma vez que a fabricação da maior parte desses produtos requer uma grande quantidade de deformação. Para arames feitos de aço, também deseja-se eliminar o tratamento térmico, tal como recozimento, têmpera e revenimento, o que pode reduzir o custo de fabricação e encurtar um ciclo do processo. Entretanto, os aços carbono convencionais, que são comercialmente usados para produção de fio-máquina, têm algumas limitações em fornecer a resistência desejada. Por exemplo, os aços martensíticos temperados, que são amplamente utilizados para elementos de fixação, como molas, são vulneráveis em alto grau de resistência, principalmente devido à sua estrutura cúbica corpo centrado. A maior parte dos aços para arame convencionais, por outro lado, precisa de recozimento e têmpera e

revenimento para formar uma forma final desejado e conferir resistência mecânica no nível desejado (HWANG et al., 2015).

Por fim, o acabamento do produto final exige atenção, já que existem vários tipos de defeitos que podem ser formados na superfície do arame, tais como trincas transversais, balanças, arranhões. Além disso, as fissuras internas e defeitos na superfície de arames e barras trefiladas induzem a problemas como quedas na produtividade e qualidade, como mostrado na Figura 3.3. Mesmo micro defeitos sobre a superfície dos arames podem levar a fissuras e, em última análise, à ruptura do produto, devido à aplicação repetitiva de esforços. Por conseguinte, existe a possibilidade de que mesmo uma imperfeição de dimensões reduzidas irá causar um defeito fatal em um produto (SHINOHARA; YOSHIDA, 2005).

**Figura 3.3 - Defeitos Superficiais em Arames Trefilados**

	Descascamento		Carepa
	Fissuras Transversais		Oxidação
	Queimado		Perda por Sobreposição
	Arranhado		Marca de Escorregamento

Fonte: SHINOHARA; YOSHIDA, 2005 (adaptado).

Considerando a possibilidade da ocorrência das imperfeições mostradas na Figura 3.3, a estratégia de lubrificação adotada deve ser definida na fase de concepção do produto. A geometria do produto determinada pelas especificações do cliente, os materiais envolvidos e as tensões superficiais na operação de conformação são os principais fatores que influenciam a escolha dos sistemas lubrificantes a serem utilizados. Uma vez que a estratégia de lubrificação tenha sido definida, o nível de desempenho deve ser mantido para garantir um processo regular (DUBOIS et al., 2001).

### **3.2. Parâmetros de Processo que Influenciam na Trefilação**

Na teoria, qualquer material metálico que possa ser deformado pode ser trefilado, sendo que a análise do processo é independente da forma e do material do produto final. Porém, as

tecnologias individuais para os principais materiais trefilados comercialmente envolvem muitos parâmetros (WRIGHT, 2011). A influência desses parâmetros sobre a conformação do arame ou da barra deve ser analisada de tal maneira que se deve alcançar produtos com as propriedades mecânicas desejadas, porém sem a presença de defeitos superficiais e com uma maior uniformidade tanto na sua microestrutura quanto nas suas dimensões finais. Além disso, deve-se conduzir o processo com velocidades mais elevadas, visando uma maior produtividade; além de menores forças de trefilação (PALMEIRA, 2005).

Considerando inicialmente variáveis de processo, alterações na temperatura e na velocidade de operação podem modificar as propriedades mecânicas do material, sendo que a segunda variável mencionada influencia a primeira. No entanto, verificar os efeitos desses parâmetros durante o processo pode ser complicado devido às altas velocidades de processamento, pequenas dimensões dos materiais trefilados e do processo acontecer em grande parte em um recipiente fechado (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

O material a ser trefilado deve ter homogeneidade estrutural, porém isso não garante que o produto final seja isento de defeitos. Para evitar que a uniformidade da estrutura seja afetada e para que não haja transformações de fase indesejadas é necessário um maior controle da temperatura (BRESCIANI FILHO et al., 2011). Segundo El-domiaty e Kassab (1997), a maior parte do trabalho mecânico na zona plástica durante o processo de trefilação é convertida em calor. A magnitude e a distribuição de temperatura no processo de trefilação depende da temperatura inicial do material e da fieira, da geração de calor devido à deformação plástica e a fricção na interface e da transferência de calor entre o material deformado, a fieira e o meio ambiente, considerando o lubrificante empregado e o ar. A temperatura máxima é atingida perto da interface arame-fieira por causa do fenômeno de deformação plástica e atrito máximo (HADDI; IMAD; VEGA, 2011). Assim, o aumento da temperatura é diretamente relacionado ao trabalho por unidade de volume trefilada. Ao sair da fieira, a barra ou arame sai com uma temperatura maior devido ao atrito, sendo este gradiente de temperatura maior na superfície do material do que no seu centro (WRIGHT, 2011).

O atrito é um dos fenômenos que ocorrem na trefilação que merecem certo cuidado. O movimento do material passando pela fieira pode provocar o desgaste da fieira, defeitos superficiais, aumentar a temperatura do processo e fazer com que seja necessário um esforço maior para que o material seja trefilado. Por isso, o uso de lubrificantes é extremamente

importante na trefilação. Os agentes lubrificantes, além de evitar defeitos no arame, diminuir o esforço de conformação e o desgaste da ferramenta, irão agir como refrigerantes, evitando uma elevação acentuada da temperatura durante a trefilação (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Atualmente, a utilização máquinas de trefilação de multipasses, operação chamada de linha contínua, permite que o processo de trefilação de arames possa ser realizado em velocidades de até 30 metros por segundo (m / s) no último passe. No entanto, como mostra a prática, arames de aço de alto carbono, quando trefilados a velocidades altas, nem sempre satisfazem os requisitos das normas que especificam as propriedades do arame (MUSKALSKI, 2014).

A velocidade de trefilação depende do material, bem como a redução da área. A gama prática de velocidade de trefilação varia de 1 a 2,5 m/s para seções transversais maiores, tanto como para 100 m/s para seções menores. Para velocidades elevadas de trefilação, o calor gerado não tem tempo suficiente para dissipar e um aumento substancial na temperatura ocorre, o que tem um efeito prejudicial sobre a qualidade do produto (EL-DOMIATY; KASSAB, 1997; CETLIN; HELMAN, 2010). Em adição a esse fato, o aumento da velocidade também pode influenciar na estabilidade e no desempenho do lubrificante. A camada de lubrificante que fica na interface do material tem que ter certa espessura para que seu desempenho fique dentro do esperado. Ao aumentar a velocidade, ocorre um aumento da viscosidade do lubrificante e uma conseqüente elevação da espessura da camada lubrificante sobre o arame. Essa camada mais espessa pode formar uma barreira em torno do arame, impedindo que o lubrificante chegue até o mesmo, diminuindo a lubrificação (WRIGHT, 2011).

Por fim, o aumento da velocidade de trefilação pode alterar outras condições do processo, ou seja, a força de trefilação, e a taxa de deformação do arame, assim como ele influencia nas propriedades do arame trefilado (MUSKALSKI, 2014).

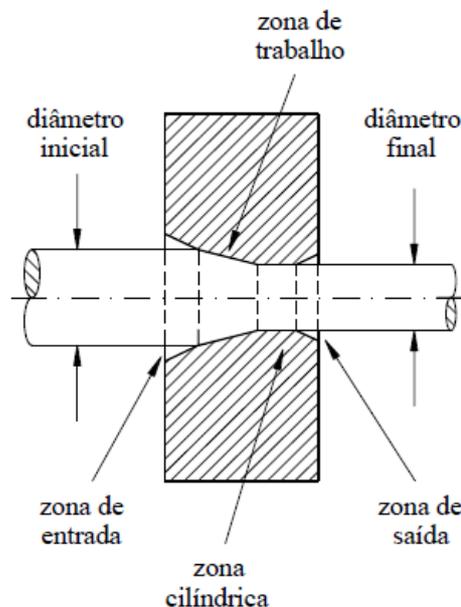
### **3.3. Parâmetros Geométricos que Influenciam na Trefilação**

A ferramenta utilizada para trefilar um material é chamada feira e ela tem uma grande influência no processo. O formato da feira é cônico e possui uma leve inclinação, para que, ao encontrar em contato com a matriz, o material deslize, tentando minimizar ao máximo a abrasão do mesmo. A geometria cônica da feira também facilita o processo de lubrificação, já

que esse processo é influenciado pelo tamanho da área por onde o material entra na matriz e também pela área de contato matriz/metal (WRIGHT, 2011).

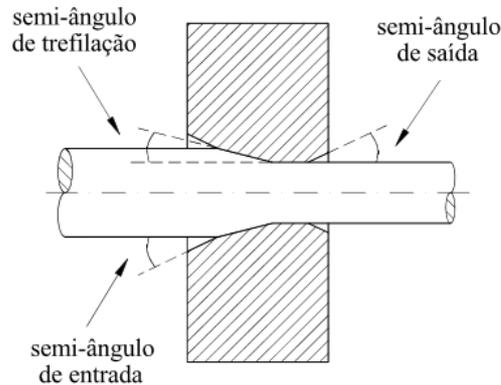
A geometria da feira de trefilação está associada às principais características do processo: redução de área e semi-ângulo de trefilação  $\alpha$ , como mostrado nas Figuras 3.4 e 3.5 e na Equação 3.1 (CORRÊA, 2004). Essa matriz possui quatro regiões: zonas de entrada, de trabalho, cilíndrica e de saída. Primeiramente tem-se o cone de entrada, que é por onde o arame entra na feira e tem como principal objetivo guiar o material permitindo também a entrada do lubrificante, diminuindo o atrito entre a matriz e o material (BRESCIANI FILHO et al., 2011). A zona de trabalho é o local onde ocorre a deformação plástica. No caso de barras e arames, o fluxo imposto é convergido sobre o material de maneira que o faça passar pelo cone de trabalho com um ângulo  $\alpha$ . Nota-se que  $\alpha$  é o ângulo entre a parede da matriz e a linha central do desenho, chamado de semi ângulo (WRIGHT, 2011). Após passar pelo cone de trabalho, o arame irá passar pelo cilindro de calibração ou o paralelo, onde as dimensões do material serão ajustadas. E, por fim, o cone de saída, onde o arame sairá deformado com as dimensões desejadas.

Figura 3.4 - Semi ângulo da feira



Fonte: CORRÊA, 2004.

**Figura 3.5 - Semi ângulo da fieira**



Fonte: CORRÊA, 2004.

$$r = \frac{A_i - A_f}{A_i} \quad \text{ou} \quad r = 1 - \frac{d_f^2}{d_i^2} \quad 3.1$$

onde  $A_i$  e  $A_f$  são as áreas da seção transversal da barra antes e após a trefilação, e  $d_i$  e  $d_f$  são os diâmetros inicial e final da mesma.

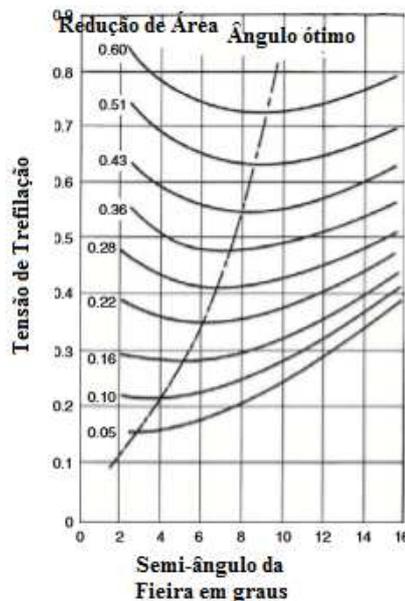
O semi ângulo é extremamente importante, pois, ele que irá determinar como será aplicado o esforço de compressão no material que ocasionará na sua deformação (BRESCIANI FILHO et al., 2011). O valor do semi ângulo possui um valor ótimo tal que favoreça uma maior redução de área com uma força específica, assim como mostra o gráfico da Figura 3.6. Deste modo, a força aplicada sobre o material irá provocar uma tensão que não poderá superar a tensão de escoamento, restringindo assim a redução máxima que o material pode sofrer (SCHAEFFER, 2009).

Segundo Haddi, Imad e Vega (2011), um aumento na redução ou um decréscimo na semi-ângulo da fieira ou coeficiente de atrito induz a uma maior homogeneização da deformação do material. Uma avaliação do efeito do semi-ângulo da fieira nas propriedades mecânicas finais do trefilado em passes simples e múltiplos mostrou que o atrito não tem em influência sobre o alongamento uniforme, que seria basicamente uma função do semi- ângulo e da redução na área.

No processo de trefilação, quando ocorre o estiramento, atuam uma força de tração e uma força de pressão, a partir da fieira, que combinam-se para fazer com que o material se estenda e reduza a área da seção transversal, durante a sua passagem através da fieira. Devido a este

efeito combinado, a força de tração ou força de trefilação pode ser menor do que a força que faria com que o material esticasse, formando o pescoço, e quebrar ao passar pela fieira. Por outro lado, se uma redução muito grande da área da seção transversal é feita na fieira, a força pode arrebentar do arame. Na prática comercial, a redução da área de uma única passagem é raramente superior a 30 ou 35%, e é frequentemente muito mais baixa (WRIGHT, 2011).

**Figura 3.6 - Relação ângulo ótimo e redução de área**



Fonte: WRIGHT, 2011 (adaptado).

A geometria cônica com baixos semi-ângulos pode facilitar a lubrificação na entrada da matriz. Existe a perspectiva de que pode-se ter melhor lubrificação com o aumento da pressão do lubrificante na entrada do molde. Fieiras de pressão oferecem uma maneira eficiente de aumentar consideravelmente a pressão do lubrificante na entrada do material na matriz (WRIGHT, 2011). Essas fieiras são colocadas antes das fieiras de trefilação, com um diâmetro cerca de 10% maior do que a matriz que irá trefilar o material, promovendo uma pressão no sabão, fazendo assim, com que ele chegue mais viscoso na região da conformação (BRUSIUS JUNIOR, 2009).

O material da matriz deve ser duro o suficiente para ter uma taxa de desgaste aceitável, resistente, deve permitir altas velocidades de trabalho e aguentar altas reduções de seção. Além disso, ele deve ser econômico em termos do valor de serviço básico do material e custo de fabrico da matriz. Por isso, a fieira é feita geralmente com uma carcaça de aço e com o núcleo de carbeto de tungstênio (widia) ou de diamante sintético. A ferramenta de widia pode

ser feita através da combinação do carboneto de tungstênio em pó com pó de cobalto para formar uma estrutura com uma percentagem elevada de volume de carboneto de tungstênio ligado com uma quantidade muito menor de matriz de cobalto. O material resultante é genericamente referido como o carboneto, embora seja realmente um material compósito. A dureza varia de 600HV a 1000HV (WRIGHT, 2011). As feiras feitas de diamante sintético são utilizadas principalmente para diâmetros pequenos e são vantajosas pela sua maior durabilidade, porém são mais caras e sua fabricação necessita o conhecimento de tecnologias sofisticadas.

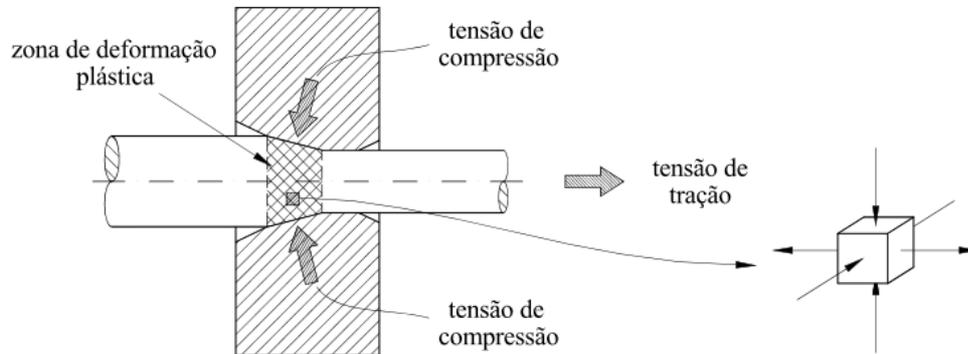
### **3.4. Deformação na Trefilação**

No processo de conformação mecânica é extremamente importante um rígido controle para que as propriedades mecânicas desejadas sejam obtidas. Deste modo, é preciso controle do encruamento do material, da temperatura e da taxa de deformação. Os processos de conformação mecânica podem ser classificados quanto ao tipo de esforço aplicado sendo eles processo de compressão indireta, processos de compressão direta, processos do tipo trativo, processos de dobramento e processos de cisalhamento (DIETER, 1998). O processo de trefilação é classificado com de compressão indireta já que o material sofre o escoamento devido a combinação das forças trativas e compressivas, como mostrado na Figura 3.7 (CORRÊA, 2004).

Para a conformação mecânica de qualquer material é necessária a avaliação da trabalhabilidade desse material, já que ela está relacionada com a capacidade que um material pode ser deformado sem que ocorra o aparecimento de trincas no mesmo. A trabalhabilidade ou conformabilidade de um material não depende somente das características do material, mas também das características do processo de conformação tais como a velocidade, temperatura, atrito e taxa de deformação (DIETER, 1998).

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

Figura 3.7 - Tensões na Trefilação



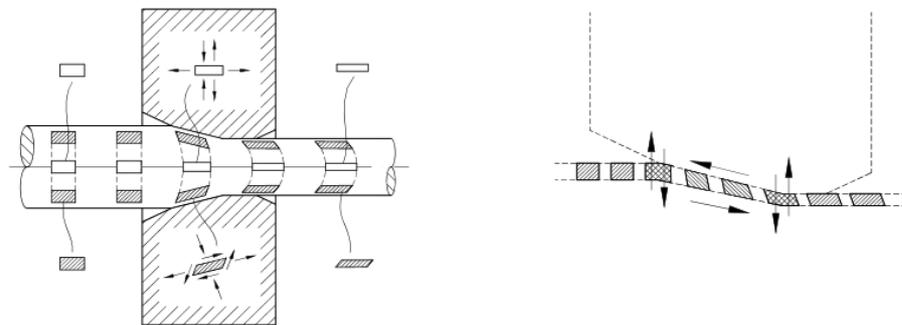
Fonte: CORRÊA, 2004.

Qualquer corpo pode sofrer deformação se estiver sob o esforço de uma ou mais forças até certo limite sem que ele rompa (DIETER, 1998). Esta deformação pode ser denominada elástica ou plástica. Na deformação elástica o material sofre um retorno elástico, ou seja, a deformação não é permanente, além de ser diretamente proporcional ao esforço aplicado. Já na deformação plástica, o material é permanentemente deformado. A transição entre os dois tipos de deformação ocorre quando o valor da tensão de cisalhamento é máximo e ela depende basicamente das condições do material, da temperatura e da velocidade. O limite de deformação máximo vai aumentar se ocorre esforço de compressão juntamente com o de tração, já que as tensões de compressão provocam a ruptura do material depois do que as tensões de tração. A temperatura também provoca o aumento do limite de deformação máxima. Ao contrário da temperatura e das tensões de compressão, o aumento da velocidade diminui o limite de deformação máxima, pois, faz com que o material tenha maior tendência a uma ruptura frágil (SCHAEFFER, 2009).

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

A deformação na trefilação ocorre de tal maneira que, devido a geometria da fieira, na entrada e na saída da matriz, o material é cisalhado, porém, em direções distintas. Esse processo de cisalhamento dá origem à chamada deformação redundante que, não contribui para alterações dimensionais do material, mas modifica seu comportamento durante e após a operação (CORRÊA, 2004) O fenômeno é mais acentuado nas regiões próximas à superfície do material, levando a possibilidade de ocorrência de uma distribuição de propriedades mecânicas heterogênea ao longo da seção transversal. Na Figura 3.8 é mostrada uma representação da deformação ao longo da seção transversal de uma barra ou arame trefilados considerando elementos dispostos próximo à superfície do arame e elementos dispostos próximos à linha central.

**Figura 3.8: Representação da deformação em uma barra ou arame trefilado**



Fonte: CORRÊA,2004.

### 3.5. Encruamento

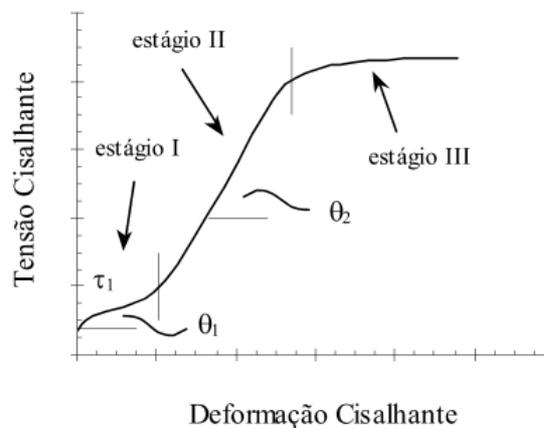
Denomina-se encruamento o aumento resistência mecânica com a deformação plástica a frio. Este fenômeno é provocado devido ao impedimento da movimentação das discordâncias através da rede cristalina, uma vez que essas interagem umas com as outras e com outras barreiras à movimentação, como partículas de precipitados ou átomos de soluto. Apesar de o endurecimento devido a interação de discordâncias ser uma questão dificilmente explicada, sabe-se que a quantidade de discordâncias aumenta a medida que o material é deformado (DIETER, 1998).

Existem vários fatores que podem influenciar o encruamento de um metal, tais como estrutura cristalina, pureza, orientação cristalográfica e temperatura. O encruamento dos monocristais

pode ser mostrado através da curva de escoamento mostrada na Figura 3.9, que vai ser basicamente dividida em três estágios (CORRÊA, 2004).

No primeiro estágio o material sofre um pequeno encruamento. Esta região é chamada de deslizamento fácil, onde o deslizamento das discordâncias ocorre por longas distâncias, pois, não há nenhuma barreira para evitar sua movimentação. No segundo estágio há um aumento rápido do encruamento uma vez que com o aumento da deformação, as linhas de deslizamento vão encontrando cada vez mais rápido barreiras que irão impedir sua movimentação. Neste estágio também ocorre o emaranhamento das discordâncias devido às irregularidades formadas como consequência do deslizamento ocorrer simultaneamente em vários sistemas (CORRÊA, 2004). Por fim, no terceiro estágio o encruamento começa a decair devida a recuperação dinâmica, onde as discordâncias que no estágio anterior estavam empilhadas, agora começam a se libertar (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

**Figura 3.9 - Encruamento no material monocristalino**



Fonte: CORRÊA, 2004.

Os planos de deslizamento atuam perto dos contornos de grão, deste modo, a dureza será maior nesta região do que no interior do grão. Assim, quanto menor for o grão, maior será o efeito do deslizamento dentro do mesmo, por isso, grãos mais finos sofrerão maior encruamento do que os grãos grosseiros (DIETER, 1998).

### 3.6. Lubrificação

Um dos fenômenos mais importantes e críticos na trefilação é o atrito. O atrito entre o material e a fieira é muito elevado e, conseqüentemente, a qualidade da superfície do arame pode deteriorar durante o processo de conformação (BYON et al., 2010).

Ao passar pela fieira, o material pode causar o desgaste prematuro da ferramenta, fazer com que haja um aumento considerável na temperatura de trabalho, aumentar o esforço necessário para causar a sua deformação, além de levar a defeitos superficiais no próprio arame se não houver a lubrificação correta durante esse processo (PALMEIRA, 2005).

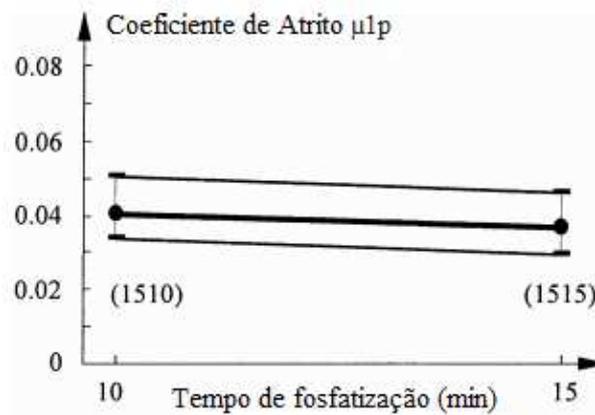
Para evitar tanto o desgaste da fieira quanto do arame, utiliza-se materiais com baixa resistência ao cisalhamento chamados de lubrificantes (CETLIN; HELMAN, 2010). O lubrificante tem de separar as superfícies de atrito e aderir fortemente a elas, mesmo sob alta pressão. Não pode coagular, desintegrar-se ou separar em camadas. O lubrificante deve minimizar o desgaste do canal de trefilação, não deve constituir um perigo para o pessoal de operação, e deve ser barato (TRUKHANOVICH; LEDNEVA, 2009).

O sabão de cálcio ou de sódio é utilizado no processo de lubrificação de trefilação seco. Estes podem ser estearatos ou misturas de sais de ácidos graxos com uma predominância de estearatos. Lubrificantes à base de estearato são caracterizados por um ponto de fusão mais elevado, o que é importante para as condições mais rigorosas de trefilação: redução de área elevada; umidade grande; trefilação do arame de aço de alto carbono e utilização de substratos de lubrificante simples, em vez de revestimentos duplos (nesse caso, por exemplo, o uso de bórax em vez da combinação fosfato + bórax ou cobre + bórax) (TRUKHANOVICH; LEDNEVA, 2009).

Segundo Byon et al. (2010), para minimizar o atrito no processo de conformação a frio, um material não-metálico é aplicado sobre a superfície do material, como um revestimento lubrificante, antes de entrar no processo de trefilação. O material para o revestimento lubrificante hoje amplamente utilizado é o fosfato, que é um composto químico e contém fósforo. Testes que simularam as condições de contato na trefilação mostraram que o aumento

do tempo de fosfatização causou a diminuição do coeficiente de atrito, como mostrado na Figura 3.10 (DUBOIS et al., 2001).

**Figura 3.10 - Coeficiente de Atrito em função do Tempo de Fosfatização**

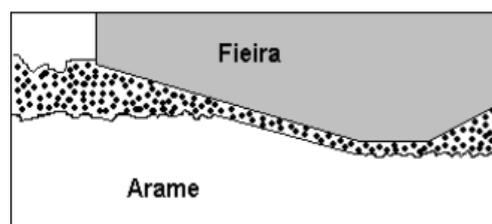


Fonte: Dubois et al., 2001 (adaptado).

No entanto, o revestimento feito de fosfato pode tornar-se fino, de acordo com a escolha do nível de redução do material, geometria da fieira e dependendo se o processo de trefilação é à seco ou não. Deste modo, utiliza-se um lubrificante adicional, como o sabão de trefilação, que geralmente é adicionado para proteger o revestimento de fosfato durante a trefilação do arame (BYON et al. 2010).

Em certos lubrificantes pode ser desenvolvido um filme de lubrificante, assim como pode ser observado na Figura 3.11, especialmente se a pressão do lubrificante na entrada da matriz é reforçada por meio de dispositivos de melhoria de pressão, como a fieira de pressão (WRIGHT, 2011). A espessura filme aumenta linearmente de acordo com o aumento da folga entre matriz e arame com base no semi- ângulo (NANAO et al., 2015).

**Figura 3.11- Película de lubrificante entre o fio e a matriz**



Fonte: BRUSIUS JUNIOR, 2009 (adaptado)..

Deste modo, a escolha do tipo de lubrificante deve levar em conta as condições críticas do processo para haver a formação da película de lubrificante que irá reduzir o atrito e promover a refrigeração do arame (PALMEIRA, 2005). Graças ao deslocamento da densidade de elétrons para os átomos de oxigênio, um momento dipolar acentuado é formado. Isso explica a atividade de superfície de ácidos graxos e seus sais, bem como a sua aderência à superfície do arame. A presença de uma cadeia de hidrocarboneto longa nas moléculas dos sais de ácidos graxos permite a formação de uma camada lubrificante de confiança entre o arame e a zona de trabalho da fieira (TRUKHANOVICH; LEDNEVA, 2009).

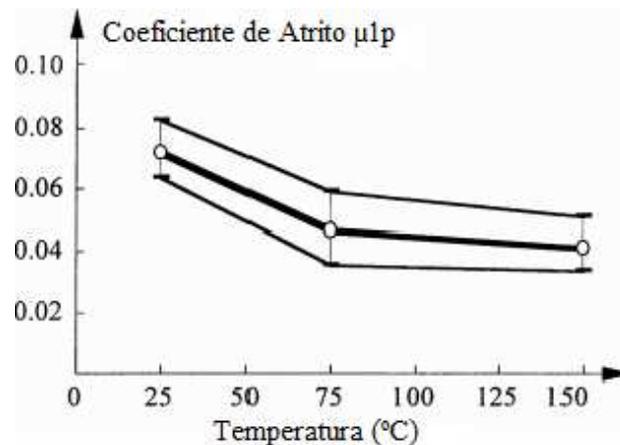
Por isso, o lubrificante deve ter as seguintes características: resistência às temperaturas de trabalho na trefilação; garantia de que não haja o contato entre a fieira e a barra ou arame, formando uma película entre eles; propiciar produto final com um bom acabamento e resistência às pressões de deformação (PALMEIRA, 2005). Assim, a massa molecular dos ácidos graxos usados na fabricação de lubrificantes deve ser tão grande quanto possível, uma vez que esta melhora as propriedades lubrificantes, além disso, vários aditivos são introduzidos nos sais de ácidos graxos para melhorar as características anti-atrito, anti arranhão, anti-desgaste e propriedades anticorrosivas dos lubrificantes. Além disso, aditivos (cal, vários sais, giz etc.) são adicionados no lubrificante, de modo a melhorar a separação das superfícies da fieira e do arame (TRUKHANOVICH; LEDNEVA, 2009).

Existem basicamente duas categorias de lubrificantes: os sólidos e os líquidos, sendo que na trefilação os lubrificantes sólidos são mais utilizados. Os lubrificantes sólidos podem ser encontrados na forma de sabão em pó, feitos principalmente de cal, talco e mica, por exemplo, e podem conter alguns aditivos como fosfatos e enxofre (BRUSIUS JUNIOR, 2009).

Uma lubrificação eficiente depende principalmente da espessura da camada de lubrificante formada entre o arame e a fieira. Deste modo, um controle de parâmetros como a temperatura e a velocidade do processo são extremamente importantes para determinar a viscosidade do lubrificante, bem como a rugosidade do trefilado, que irá determinar o arraste do lubrificante durante o processo (PALMEIRA, 2005). O controle destes parâmetros pode ser exemplificado com Felder e Levrau (2011), que explicam que os óleos com aditivos poliméricos e os sabões metálicos, tais como o de sódio e de cálcio estearatos são materiais pseudoplásticos, que tem sua viscosidade estimada a partir dos resultados experimentais. A viscosidade destes

lubrificantes diminui exponencialmente com a velocidade de entrada do material na fieira. Este resultado se deve ao aquecimento sabão durante o aumento de pressão ao entrar na fieira. O ponto de fusão é uma característica importante do lubrificante. A baixas temperaturas, o lubrificante coagula, e a sua penetração para a fonte de deformação é interrompida. Como resultado, o metal torna-se brilhante na trefilação; arranhões e cortes superficiais são formados; e a ruptura do arame é possível (TRUKHANOVICH; LEDNEVA, 2009). Por outro lado, segundo Dubois et al. (2001), o coeficiente de atrito diminuiu 0,071-0,04 quando a temperatura aumentou 25-150 °C, como mostrado na Figura 3.12. Esta redução significativa foi devida ao amolecimento ou até de fusão do estearatos de sódio e zinco, cujo efeito é limitar o atrito no cisalhamento e diminuir o coeficiente de atrito, e, não melhorar a lubrificação na fricção. A alteração da inclinação da curva de 75-150 °C pode ser explicada pela desidratação da camada de fosfato que leva a uma diminuição da ligação de camada de fosfato.

Figura 3.12 - Coeficiente de Atrito em função da Temperatura



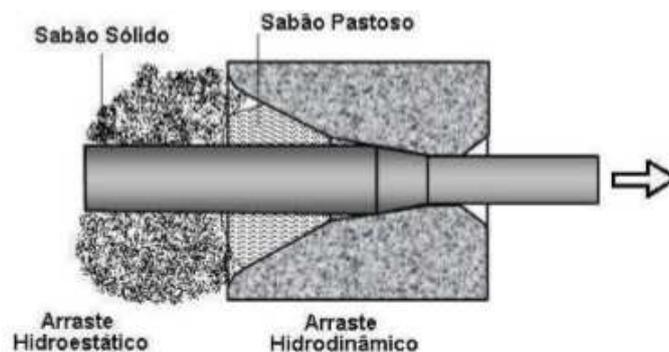
Fonte: Dubois et al., 2001 (adaptado).

Então, para manter uma boa lubrificação do processo, é necessário que haja um arraste eficiente do sabão. Este arraste pode ocorrer principalmente de duas formas: hidroestática e hidrodinâmica, como pode ser observado na Figura 3.13. No arraste hidroestático, é melhor obter menor tamanho do grão de lubrificante já que, quanto maior a rugosidade do arame e maior a velocidade do processo, melhor será o arraste do sabão. A forma e superfície dos grânulos de lubrificante irão afetar a sua mobilidade. Grânulos mais arredondados com uma superfície lisa são mais móveis, com melhora no fluxo de lubrificante correspondente. A superfície dos grânulos é determinada pelo seu método de produção e será diferente para

diferentes lubrificantes. A ocorrência de mobilidade de lubrificante insuficiente também pode ser devido ao aumento do teor de umidade. Nesse caso, o limite para o teor de umidade é normalmente de 3% e, em muitas situações, 1% (TRUKHANOVICH; LEDNEVA, 2009). Mobilidade de lubrificante deficiente é a causa mais comum de lubrificação ineficaz devido ao efeito de túnel, que é a formação de um espaço oco (túnel) em torno do arame.

O pó com partículas irregulares é melhor capturado pelo arame na trefilação. Deste modo, são utilizados misturadores onde o lubrificante é colocado fazendo assim com que ele não se aglomere. No arraste hidrodinâmico, procura-se utilizar lubrificantes que possuem maior viscosidade, pois, estes promovem um melhor arraste, intensificando a lubrificação. Neste caso, são utilizados lubrificantes de cálcio, já que eles possuem maior viscosidades do que os lubrificantes de sódio (BRUSIUS JUNIOR, 2009). A partir dos resultados de estudos teóricos, percebeu-se a diminuição do coeficiente de atrito no processo de estiramento em condições de lubrificação hidrodinâmica, o que resultou numa diminuição da deformação redundante na superfície do material em aproximadamente 8,5% em comparação com os arames convencionalmente trefilados. Este, por sua vez, resultou em um aumento na deformação homogênea como reflexo da diminuição no valor de deformação efetiva por aproximadamente 2,0% na camada da superfície e o seu aumento por aproximadamente 2,1% no eixo material (MUSKALSKI, 2014). No entanto, há o inconveniente neste caso. Devido ao seu melhor arraste, o lubrificante de cálcio deixa muitos resíduos no produto trefilado, o que promove a queda de qualidade do produto. Para tentar evitar este problema, os lubrificantes de cálcio são mais utilizados nos primeiros passes onde a temperatura e a velocidade de trabalho são menores e os lubrificantes de sódio são utilizado nos últimos passes para dar melhor acabamento ao produto trefilado (BRUSIUS JUNIOR, 2009).

**Figura 3.13 - Lubrificação hidroestática e hidrodinâmica**



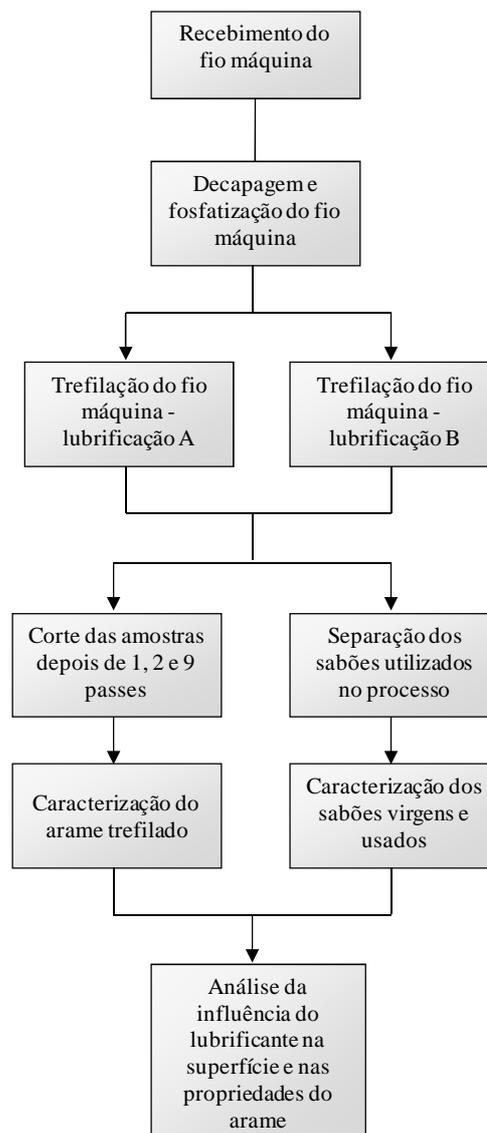
Fonte: BRUSIUS JUNIOR, 2009.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Descrição Geral do Trabalho

O presente trabalho consistiu na análise do efeito de dois tipos de lubrificação, um usando uma mistura de sabões de cálcio e sódio e em outro utilizando apenas sabão de sódio, sobre a superfície e as propriedades mecânicas de um arame de aço AISI 1080 trefilado em um passe, em dois passes e em nove passes. Na Figura 4.1 é apresentado um fluxograma das principais etapas do trabalho.

Figura 4.1 - Fluxograma das principais etapas do trabalho



Fonte: Autor.

## 4.2. Material

O aço utilizado neste trabalho, AISI 1080, possui alto teor de carbono e é utilizado na fabricação de cordoalhas para concreto protendido, amplamente utilizadas na construção de pontes e viadutos. A composição química deste aço está mostrada na Tabela 4.1, conforme as especificações fornecidas pelo fabricante.

**Tabela 4.1 - Composição Química do Aço em peso (%)**

Aço	S	C	Mn	P	Si	Al	Cr	Cu	Ni	Mo	N2
BL82	0,012 máx	0,810- 0,850	0,750- 0,900	0,015 máx	0,200- 0,350	0,000 5 máx	0,180- 0,270	0,050 máx	0,100 máx	0,050 máx	0,008 máx

Fonte: Arcelor Mittal, 2016.

## 4.3. Trefilação

O material utilizado na trefilação, o fio máquina, antes de ser trefilado, foi decapado quimicamente em banho de ácido clorídrico, mergulhado em água para a retirada do excesso de ácido e, posteriormente, banhado em uma solução de fosfato. Após este processo, o fio máquina foi trefilado em uma máquina da marca Bekaert modelo Houxin. Esta máquina, mostrada na Figura 4.2, possui nove passes de trefilação, tendo a capacidade de trefilar arames entre 15,00 mm e 3,00 mm de diâmetro. Além disso, sua velocidade máxima de trefilação chega a mais de 500 metros por minuto, dependendo do tipo de aço e da porcentagem de redução de área utilizada.

**Figura 4.2 - Máquina de Trefilar Bekaert**



Fonte: Autor.

Neste experimento, o arame utilizado foi trefilado em nove passes a uma velocidade de 480 m/min. Conforme o padrão seguido pela empresa, o percentual da redução é feito de forma decrescente do segundo ao último passe, com o percentual máximo de redução de 25% e o mínimo de 10%. O primeiro passe é uma exceção desta regra, pois precisa ter um percentual de redução menor devido à concepção da máquina, que por não possuir misturador de sabão e nem fieira de pressão, a lubrificação do arame fica dificultada. Assim, tem-se que utilizar recursos como nível de redução de área mais baixo para que a temperatura não fique muito elevada e melhore a lubrificação.

Além disso, a partir do segundo passe, foram utilizadas fieiras de pressão, que são fieiras com um diâmetro de entrada  $d_e$  cerca de 8% maior do que as fieiras usuais de trefilação, usadas para melhorar a lubrificação do arame. Na Tabela 4.2, estão representados os parâmetros de produção - diâmetro de saída da fieira/do material  $d_f$ , diâmetro inicial do material a cada passe  $d_i$ , redução de área %  $r$ , diâmetro de entrada da fieira de pressão  $d_e$ , e semi-ângulo da fieira  $\alpha$  utilizados neste trabalho.

**Tabela 4.2 - Parâmetros por passe**

	1° Passe	2° Passe	3° Passe	4° Passe	5° Passe	6° Passe	7° Passe	8° Passe	9° Passe
$d_f$ (mm)	9,70	8,60	7,62	6,80	6,10	5,50	5,00	4,60	4,27
$d_i$ (mm)	10,50	9,70	8,60	7,62	6,80	6,10	5,50	5,00	4,60
% $r$	14,7%	21,5%	21,4%	20,4%	19,5%	18,7%	17,36%	15,36%	15,04%
$d_e$ (mm)	-	10,67	9,29	8,23	7,34	6,59	5,94	5,40	4,97
$\alpha$	6°	6°	6°	6°	6°	4,5°	4,5°	4,5°	4,5°

Fonte: Autor.

As amostras empregadas para análise no presente trabalho foram retiradas do primeiro, do segundo e do nono passes, depois de já terem sido produzidos mais de quatro carretéis de arame, para que nenhum problema relacionado ao processo de produção pudesse interferir nos resultados. Foram retiradas quatro amostras de cada passe para fazer os testes de tração, a análise da superfície do material por microscopia eletrônica de varredura, a avaliação da distribuição da microdureza e a análise da rugosidade.

#### 4.4. Lubrificação na Trefilação

Foram utilizados dois tipos de lubrificantes: o primeiro é o sabão de lubrificação para trefilação Chemetall Gardolube DP9051, também chamado de "sabão de cálcio", devido ao elevado teor de cálcio em sua composição química. O segundo é o sabão de lubrificação para trefilação Chemetall Gardolube DP9009, podendo ser chamado de "sabão de sódio", devido à alta concentração de sódio em relação à quantidade de cálcio na sua composição química. A composição química de ambos os sabões está detalhada na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Composição química dos sabões em peso (%)**

	Ácidos Graxos	Bórax	Ca	Mo	Na	S	Si
<b>Sabão de Sódio</b>	82,5	9,21	0,21	<0,02	8,60	0,02	0,03
<b>Sabão de Cálcio</b>	27,2	0,07	28,70	<0,02	1,58	4,71	0,19

Fonte: Belgo Bekaert, 2016.

A lubrificação do arame utilizado neste trabalho foi feita de dois modos. O primeiro teste, chamado no presente trabalho de lubrificação A, foi feito utilizando uma mistura de 50% de sabão de sódio e 50% de sabão de cálcio no primeiro passe, 100% de sabão de cálcio no segundo passe e 100% de sabão de sódio nos demais passes. Para outros produtos com a redução de área total menor, existe o padrão de utilizar nos três primeiros passes apenas o sabão de cálcio e nos passes restantes apenas sabão de sódio. Como na concepção da máquina não existem misturadores de sabão, foi misturado o sabão de cálcio com o sabão de sódio para que não houvesse a formação de túneis em volta do arame. Sabe-se que o sabão de cálcio é mais propenso à aglomeração. Dessa forma, esse sabão deve ser constantemente movimentado para que as porções aglomeradas não prejudiquem a lubrificação. Nos demais passes foram utilizados o sabão de sódio devido ao alto custo do sabão de cálcio e à necessidade do arame sair mais limpo da trefilação, já que em alguns casos, o arame precisa ir para o cliente o mais limpo possível.

O segundo teste, denominado como lubrificação B, foi realizado utilizando o sabão de sódio em todos os nove passes. Esta condição foi escolhida para testar uma simplificação do

processo, evitando a confusão dos operadores, além do sabão de sódio apresentar custo inferior ao do sabão de cálcio. As amostras dos sabões estão mostradas na Figura 4.3.

**Figura 4.3 - Amostras dos sabões**



Fonte: Autor.

Na Tabela 4.4 são exibidos de forma simplificada os dois tipos de lubrificação avaliados nesse trabalho.

**Tabela 4.4 - Lubrificação avaliada no trabalho**

	1º Passe	2º Passe	3º ao 9º Passes
Lubrificação A	50% sabão de sódio + 50% sabão de cálcio	100% sabão de cálcio	100% sabão de sódio
Lubrificação B	100% sabão de sódio	100% sabão de sódio	100% sabão de sódio

Fonte: Autor.

#### 4.5. Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (EDX)

O objetivo de realizar o ensaio com o espectrômetro de fluorescência de raios X foi verificar a composição química dos sabões no estado inicial utilizados neste trabalho. Para isso, as amostras de sabão de cálcio e de sódio foram colocadas em um espectrômetro da marca Shimadzu modelo 720, mostrado na Figura 4.4, utilizando o ar como atmosfera.

**Figura 4.4 - Espectrômetro de Fluorescência de Raios X**



Fonte: Autor.

#### **4.6. Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC)**

A análise por calorimetria diferencial de varredura (DSC) foi realizada em um equipamento da marca Shimadzu modelo 60, como mostra a Figura 4.5. Para fazer o DSC foram medidas 10 miligramas dos dois tipos de sabão não utilizados previamente. Posteriormente, as amostras foram colocadas no equipamento e aquecidas até 300°C a uma taxa de 10°C por minuto em uma atmosfera de nitrogênio. Além disso, foram feitas análises dos sabões (ou mistura, se for o caso do primeiro passe da lubrificação A) já utilizados no processo. Deste modo, novamente foram medidas 10 miligramas dos sabões utilizados em cada passe analisado neste trabalho (primeiro, segundo e nono passes). Os parâmetros dos experimentos foram similares àqueles dos sabões não utilizados previamente. Estas análises foram realizadas para avaliar possíveis transformações/degradações dos sabões associadas ao eventual aquecimento durante a trefilação.

**Figura 4.5 - Calorímetro Diferencial de Varredura**



Fonte: Autor.

#### 4.7. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi conduzida em um microscópio eletrônico Shimadzu modelo SSX-150, mostrado na Figura 4.6. Nesse caso, foram realizadas dois tipos de avaliações da superfície dos arames trefilados, empregando elétrons retroespalhados: uma com as amostras ainda com a presença dos lubrificantes e outra com as amostras após a sua limpeza. Em ambos os casos foram registradas imagens com duas ampliações diferentes, uma duas vezes maior do que a outra, em uma mesma região.

**Figura 4.6– Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).**



Fonte: Autor.

As amostras foram retiradas dos primeiro, segundo e nono passes depois de já terem sido produzidos mais de quatro carretéis de arame. As amostras retiradas para a microscopia eletrônica de varredura mediam 15 mm de comprimento. O material foi cortado na máquina de corte Struers Discotom-2 Autofeed, mostrada na Figura 4.7. Cuidado especial foi conduzido para não danificar das barras a superfície durante o corte, as amostras foram embrulhadas em papel para que não houvesse a retirada da camada de sabão no corte.

**Figura 4.7 - Máquina de Corte**



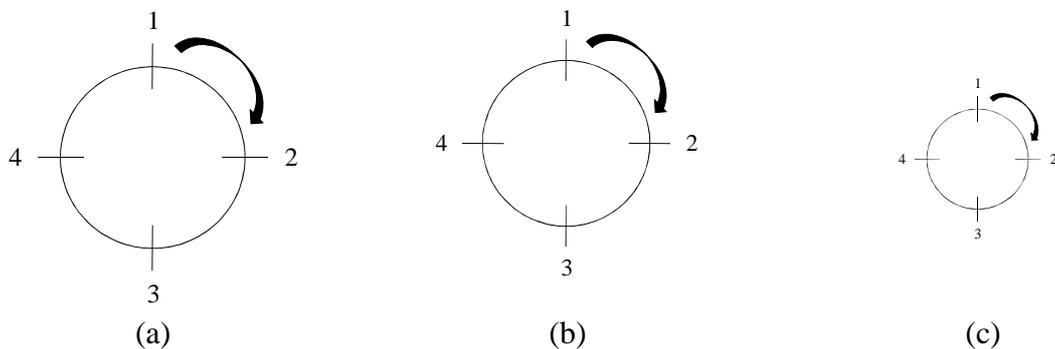
Fonte: Autor.

#### 4.8. Análise da Rugosidade

A rugosidade foi analisada por meio da obtenção da rugosidade média ( $R_a$ ) e da rugosidade total ( $R_t$ ) da superfície do arame. A rugosidade média representa a média da altura dos picos e dos vales em relação a linha média, ou seja, é uma média aritmética dos valores de rugosidade da superfície. Este parâmetro é amplamente utilizado no meio industrial, já que ele mostra uma condição que afeta a aparência e a conformabilidade do material. O parâmetro  $R_t$  informa o pico mais alto e o vale mais baixo da amostra (FERNANDES, 2009).

Para a medição da rugosidade, cada uma das amostras foi colocada em um prisma em "v" para que elas não se movimentassem durante a medição. Foram feitas quatro medidas, onde a partir da primeira medida, as amostras foram rotacionadas  $90^\circ$  no sentido horário, como mostrado na Figura 4.8 e o cut off utilizado foi de 0,8.

**Figura 4.8- Locais de Medição de Rugosidade nas amostras por passe**



(a) Medição de rugosidade com um passe, (b) com dois passes e (c) com nove passes

Fonte: Autor.

O medidor de rugosidade utilizado foi da marca Mitutoyo, modelo SJ-301, como mostra a Figura 4.9. As amostras utilizadas para realizar a rugosidade foram as mesmas utilizadas na microscopia eletrônica de varredura após a sua limpeza.

**Figura 4.9 - Rugosímetro portátil**



Fonte: Autor.

#### **4.9. Ensaio de Microdureza**

Para avaliação da dureza das amostras, foi utilizado um microdurômetro Vickers da marca Shimadzu modelo HMV 2T E, mostrado na Figura 4.10

**Figura 4.10 – Microdurômetro Vickers utilizado para medição de dureza das amostras.**



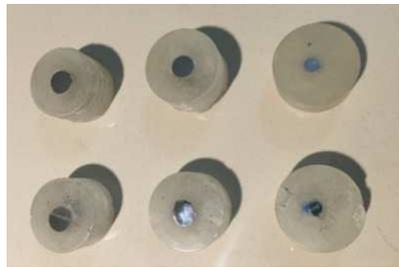
Fonte: Autor.

As medições foram realizadas em amostras preparadas por meio de embutimento a frio com acrílico autopolimerizável, lixamento com lixas variadas de carbeto de silício ou de óxido de alumínio (#120, #240, #320, #400, #600) e polimento com pasta de diamante (9 $\mu$ m e 3 $\mu$ m). Na Figura 4.11 são apresentadas as amostras após embutimento. Antes do embutimento, as

amostras foram cortadas de modo semelhante às amostras utilizadas para a microscopia eletrônica de varredura porém, com cada amostra contendo cerca de 20 mm de comprimento.

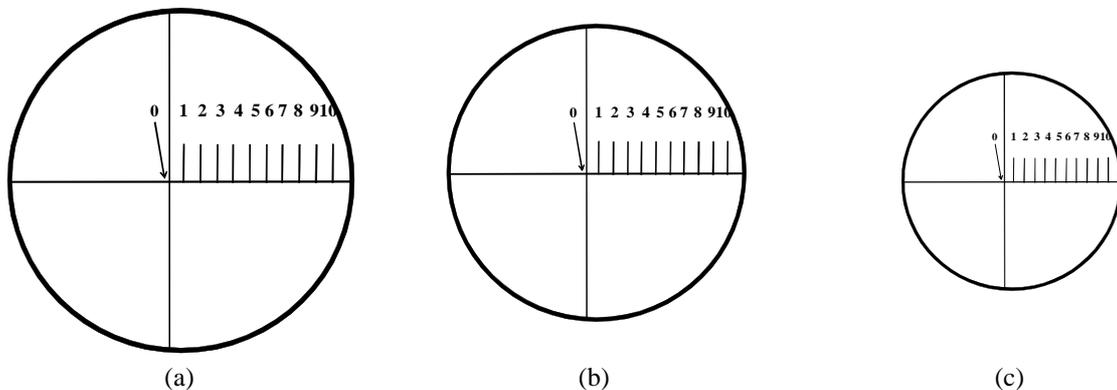
Os ensaios foram realizados utilizando carga de 200 gramas e tempo de aplicação de 15 s. Foram realizadas 10 medições em cada amostra, sendo que a distância entre os pontos do primeiro passe era de 0,49 mm, a distância entre os pontos do segundo passe era de 0,43 mm e a distância entre os pontos do nono passe era de 0,21 mm. Deste modo, foram construídos gráficos da dureza Vickers em função da posição mostrada na Figura 4.12

**Figura 4.11 - Amostras para Microdureza**



Fonte: Autor.

**Figura 4.12 - Esquemática das medidas de microdureza das amostras por passe de trefilação**



(a) Posição para as medidas de microdureza do primeiro passe com espaçamento de 0,49 mm (b) Posição para as medidas de microdureza do segundo passe com espaçamento de 0,43 mm e (c) Posição para as medidas de microdureza do nonoo passe com espaçamento de 0,21 mm

Fonte: Autor.

#### **4.10. Ensaio de Tração**

Os ensaios de tração foram realizado em amostras de 300 milímetros após os três passes analisados neste trabalho, em uma máquina universal da marca Tinius Olsen modelo Super L,

mostrada na Figura 4.13, de capacidade de 150 a 3.000 kN. O ensaio foi realizado até o rompimento das amostras e a partir dele foram obtidos a curva tensão - deformação convencional, o limite de resistência, o limite de escoamento e o alongamento total do material.

**Figura 4.13 - Máquina de Tração**



Fonte: Autor.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Caracterização dos Processos de Lubrificação**

#### **5.1.1. Análise da composição química dos lubrificantes**

A composição química dos lubrificantes foi analisada através do espectrômetro de fluorescência de raios X. A partir dos resultados obtidos foram construídas duas tabelas com os elementos encontrados nos dois tipos de sabão utilizados neste trabalho.

A composição química do sabão de sódio. Apesar do sabão ser de sódio, podemos observar um alto teor de cálcio presente na composição deste sabão. Outros elementos como enxofre, zinco e cobre também estão presentes, porém em quantidades menores. Como este tipo de análise tem uma limitação de não detectar carbono, componentes que possuem esse elemento não aparecem no resultado. O sódio, devido ao seu número atômico, não pode ser detectado por essa técnica.

O cálcio é o elemento que está mais presente neste sabão, porém outros elementos como enxofre, ferro, potássio, estrôncio e térbio. A composição química do sabão de sódio e de cálcio são diferentes tanto na porcentagem de cada elemento quanto nos tipos de elemento presentes em cada sabão. A composição química tem uma grande influência no comportamento do lubrificante na trefilação, por isso, a presença desses elementos diferentes deve influenciar no processo.

#### **5.1.2. Análise do comportamento térmico dos lubrificantes**

O comportamento térmico dos lubrificantes foi analisado através da calorimetria diferencial de varredura (DSC). O principal objetivo desta análise foi verificar se a elevação nas temperaturas durante a deformação na trefilação leva a alguma transformação de fase ou deterioração do sabão, o que poderia sugerir a uma má lubrificação. Os resultados são mostrados na forma de gráficos da energia absorvida ou liberada em forma de calor em mW x a temperatura em °C. É uma convenção que os resultados negativos, ou seja, abaixo de zero no gráfico, sejam devidos à absorção de calor e os resultados acima de zero são resultados da liberação de calor, sendo assim, exotérmicos. As reações endotérmicas são chamadas deste

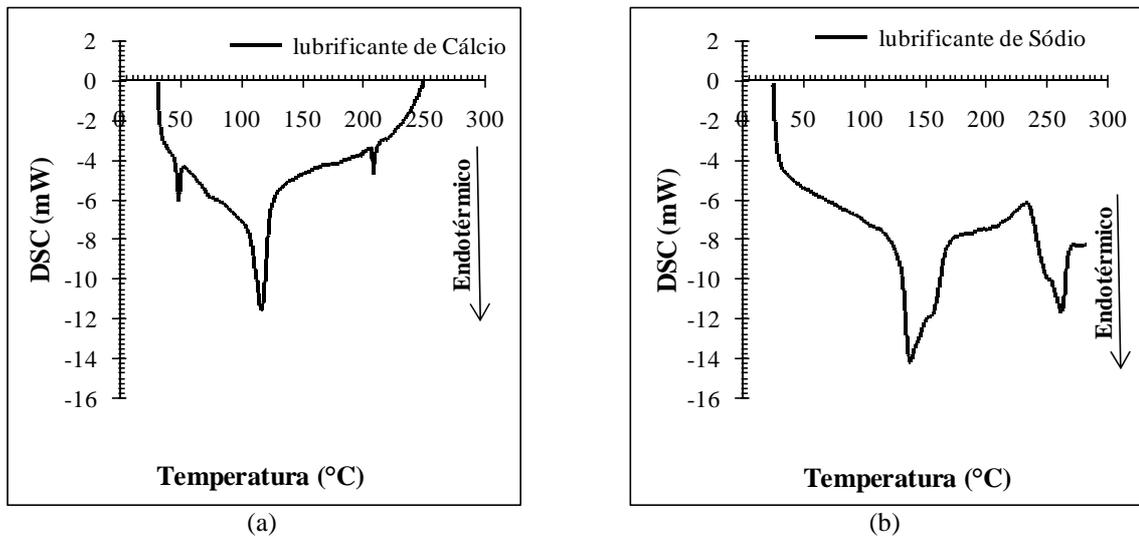
modo pois o material utiliza o calor absorvido como energia para quebrar as moléculas. Já nas reações exotérmicas, a energia é liberada em forma de calor para que aconteça a reação.

Deste modo, em um primeiro momento, o DSC foi feito em duas amostras de sabão (uma de cada tipo de sabão) retirados diretamente da embalagem, para analisar as condições iniciais do processo de lubrificação. A Figura 5.1 mostra os gráficos obtidos com os resultados do DSC. No gráfico (a), resultados do lubrificante a base de cálcio, pode-se observar três picos em temperaturas bem distintas, na faixa de 50, 130 e 220°C. A curva dos resultados começa na faixa da temperatura ambiente e vai até os 250°C e, o máximo de calor absorvido foi por volta dos 12 mW. Já no gráfico (b), onde estão representados os resultados do lubrificante de sódio, podem ser observados picos distintos, o maior na faixa de temperatura dos 140°C e o segundo por volta dos 250°C. A absorção de calor neste caso começa na faixa da temperatura ambiente e termina perto dos 280°C. A maior absorção de calor foi de 14 mW.

No caso do lubrificante a base de cálcio, os três picos do gráfico representam reações endotérmicas, onde os dois picos menores podem ter surgido devido algum histórico de aquecimento na fabricação do material ou a algum tipo de elemento químico presente no sabão. O maior pico pode indicar o início da fusão do sabão e o decaimento da curva após este pico, pode ser um sinal da degradação do material.

Analisando o gráfico do lubrificante a base de sódio, também ocorrem apenas reações endotérmicas. Neste caso, acredita-se que os dois picos representam a degradação do material, porém, devido a sujeiras e elementos que degradam em temperaturas diferentes, aparecem dois picos de absorção de calor.

**Figura 5.1 - Análise térmica dos sabões de cálcio e de sódio antes de serem utilizados**



(a) Sabão a base de cálcio e (b) sabão a base de sódio.

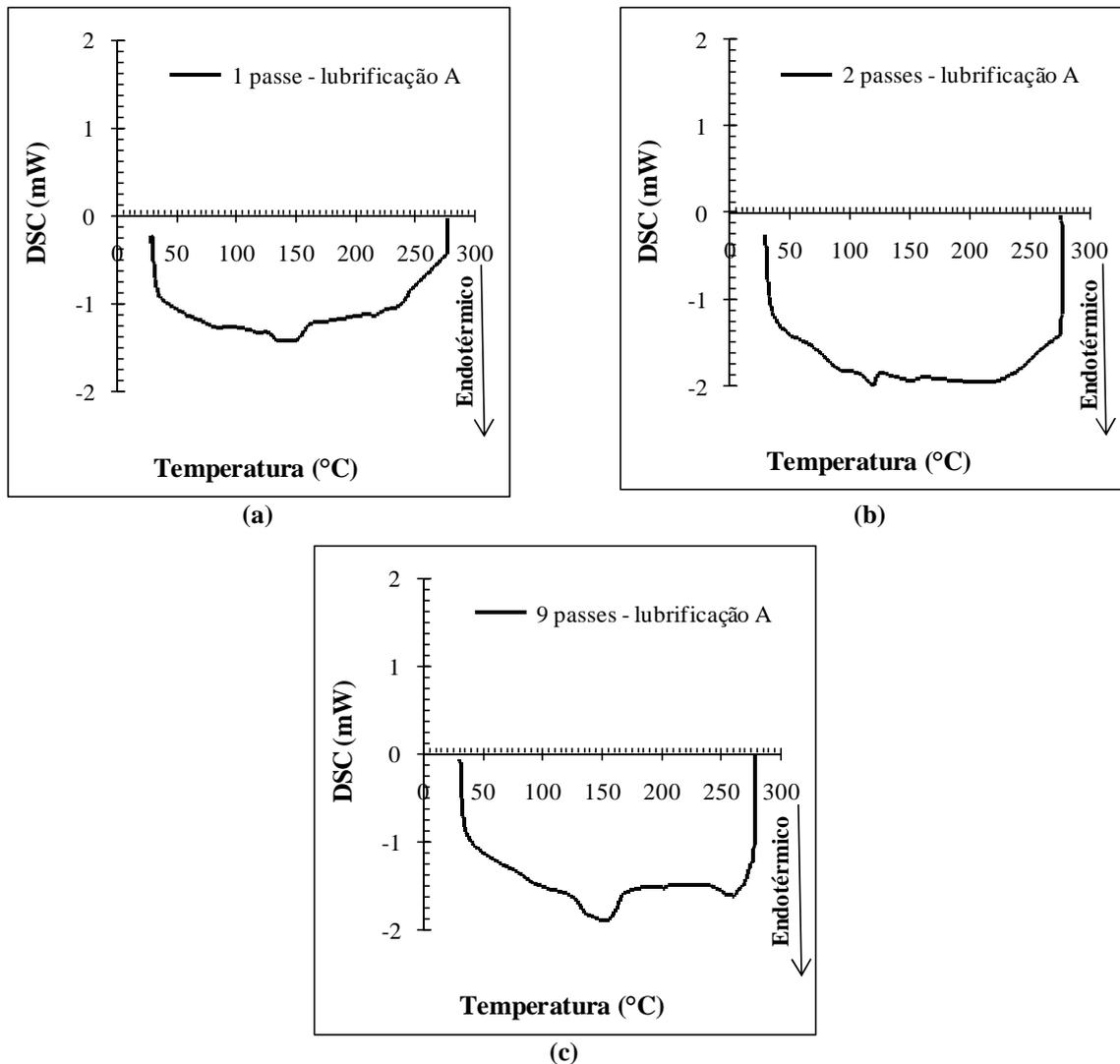
Fonte: Autor.

Após a análise dos sabões puros, foram feitas as análises térmicas dos sabões utilizados em cada um dos três passes de trefilação avaliados no trabalho. Deste modo, as amostras dos sabões já utilizados em cada condição de lubrificação foram enviadas para fazer o DSC.

A Figura 5.2 representa os resultados obtidos do aquecimento das amostras de cada passe na condição de lubrificação A. No gráfico (a) foram representados os resultados da amostra retirada do primeiro passe de trefilação, no gráfico (b) do segundo passe de trefilação e no gráfico (c) do nono passe de trefilação.

No primeiro passe de trefilação, pode-se observar que a temperatura mínima foi perto da temperatura ambiente e a máxima foi por volta dos 270°C. A absorção de calor máxima não passou dos 1,5 mW. No gráfico (b), no segundo passe de trefilação, houve um aumento da absorção de calor máxima para perto dos 2 mW, porém, a faixa de temperatura de absorção de calor permaneceu a mesma. Neste caso, pode-se observar um pequeno pico e um decaimento brusco da absorção de calor, contrário do que ocorreu no gráfico (a) onde a absorção de calor foi caindo gradualmente. No nono passe, gráfico (c), na mesma faixa de temperatura ocorreu uma absorção máxima de calor intermediária, por volta dos 1,8 mW. Pode-se observar dois picos de absorção de calor, com o decaimento da absorção ocorrendo bruscamente na faixa dos 270°C.

Figura 5.2 - Análise térmica dos lubrificantes utilizados na trefilação - lubrificação A



(a) Lubrificante utilizado no primeiro passe de trefilação, (b) lubrificante utilizado no segundo passe de trefilação e (c) lubrificante utilizado no nono passe de trefilação.

Fonte: Autor.

A Tabela 5.1 mostra o perfil de temperatura, na condição de lubrificação A, de cada passe na saída do arame da fieira e logo antes do arame entrar na próxima fieira, ou no caso do nono passe, na entrada da bobina. Observa-se que as temperaturas do arame neste caso chegam próximas as temperaturas de degradação do lubrificante em todos os passes.

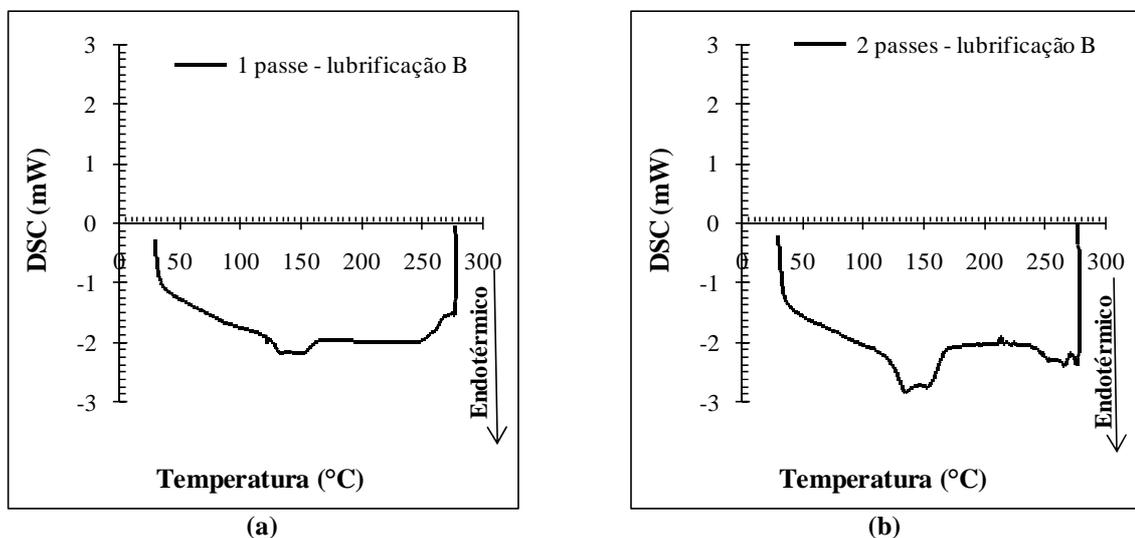
**Tabela 5.1 - Perfil de Temperatura por Passe - lubrificação A**

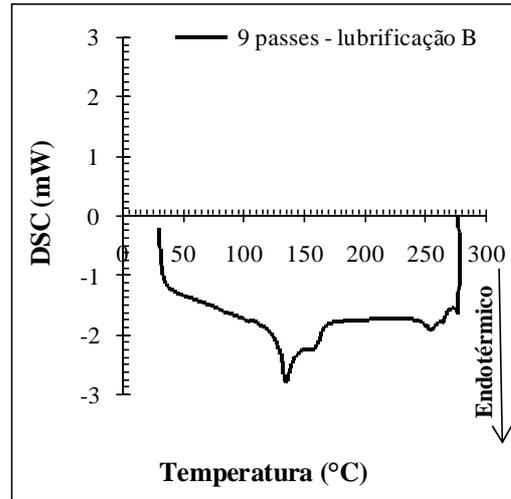
	1 Passe	2 Passes	9 Passes
Temperatura de saída da fieira (°C)	78	124	135
Temperatura de entrada da fieira (°C)	48	67	60

Fonte: Autor.

Na Figura 5.3, foram analisados os resultados obtidos dos sabões da condição de lubrificação B. No gráfico (a) foram representados os resultados da amostra retirada do primeiro passe de trefilação, no gráfico (b) do segundo passe de trefilação e no gráfico (c) do nono passe de trefilação.

Analisando o primeiro passe de trefilação no gráfico (a), a absorção de calor máxima chegou perto dos 2,3 mW. No gráfico (b), segundo passe de trefilação, houve um aumento, não tão expressivo, da absorção de calor máxima para perto dos 2,6 mW. No nono passe, gráfico (c), a absorção máxima de calor foi a maior dentre os três passes, por volta dos 3,0 mW. Podem ser vistos dois picos de absorção de calor assim como no segundo passe. Em todos os gráficos, pode-se observar o decaimento da absorção ocorrendo bruscamente na faixa dos 270°C, sendo a faixa de temperatura da absorção de calor ocorre entre a temperatura ambiente e os 270°C.

**Figura 5.3 - Análise térmica dos lubrificantes utilizados na trefilação - lubrificação B**



(c)

(a) Lubrificante utilizado no primeiro passe de trefilação, (b) lubrificante utilizado no segundo passe de trefilação e (c) lubrificante utilizado no nono passe de trefilação.

Fonte: Autor.

Na tabela 5.2 é mostrado o perfil de temperatura do arame na condição de lubrificação B. Neste caso, percebe-se que as temperaturas mais elevadas encontram-se mais distantes das temperaturas de degradação observadas nos gráficos obtidos por DSC.

**Tabela 5.2 - Perfil de temperatura - lubrificação B**

	1 Passe	2 Passes	9 Passes
Temperatura de saída da fieira (°C)	75	129	134
Temperatura de entrada da fieira (°C)	48	52	64

Fonte: Autor

Apesar da absorção de calor ter sido maior no caso da lubrificação B, no primeiro passe nas duas condições, o comportamento da absorção de calor foi próximo na condição de lubrificação A e na B. Devido a presença do sabão de cálcio na condição de lubrificação A, os picos de absorção de energia não ficaram tão visíveis como na condição de lubrificação B. Também devido a presença do sabão de cálcio, os valores de absorção de energia na lubrificação B foram maiores do que na lubrificação A, mesmo no nono passe. Nesse caso, não foi colocado o sabão de cálcio na condição de lubrificação A. No entanto, está presente

um pouco deste sabão já que o arame o leva relativamente aderido em sua superfície, misturando, em menor quantidade, com o sabão de sódio. Os picos em diferentes temperaturas na condição de lubrificação B podem ser devido a presença de impurezas e elementos com pontos de fusão diferentes.

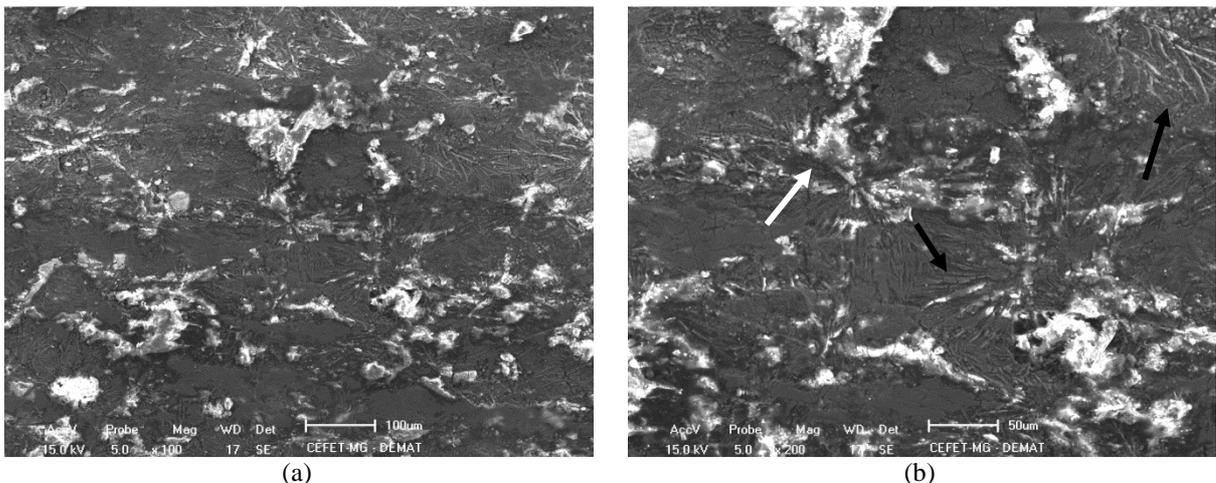
Por fim, a condição de lubrificação B tem uma capacidade maior de absorção de energia na forma de calor do que a condição de lubrificação A. Pode-se concluir isso devido a maior clareza dos picos de degradação do sabão e maiores valores de absorção de calor.

## 5.2. Observação da Superfície do Material sem Limpeza/com Lubrificante

Para analisar a superfície do arame trefilado foram feitas imagens com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) de cada passe para os dois tipos de lubrificação, com duas ampliações distintas de cada região observada.

A Figura 5.4 mostra as imagens da microscopia eletrônica de varredura do material retirado após o primeiro passe de trefilação, sobre a condição de lubrificação A. As imagens evidenciam as redes formadas pelo fosfato (indicado com setas pretas) em que o fio máquina foi banhado antes da trefilação. Pode-se observar também uma parte do sabão agarrado às redes de fosfato (exemplificado com setas brancas).

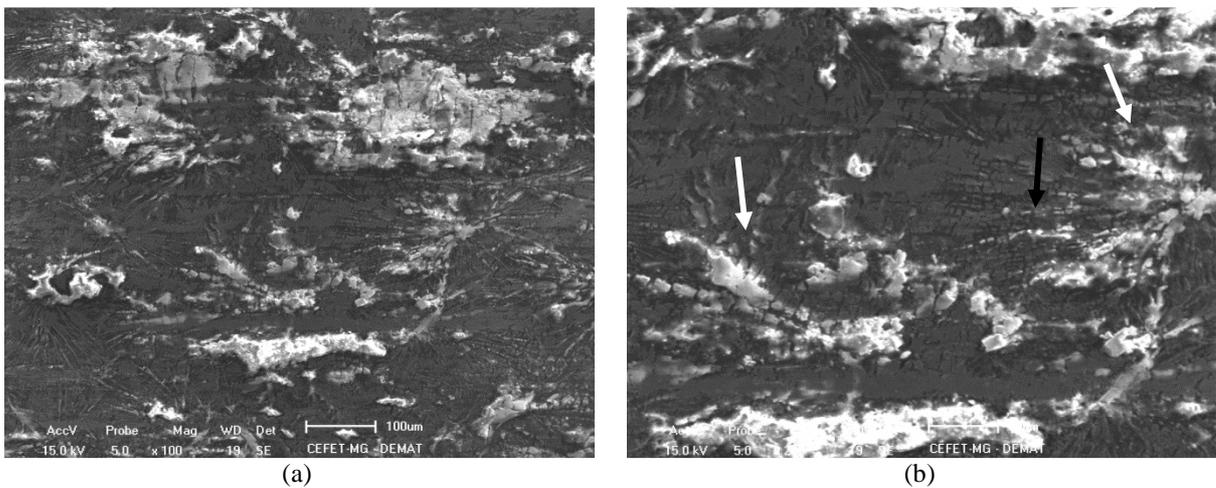
**Figura 5.4 - Superfície (MEV) do material após o primeiro passe de trefilação - lubrificação A.**



(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.  
Fonte: Autor.

Nas imagens da Figura 5.5, a superfície do material pode ser vista na condição de lubrificação A após o segundo passe de trefilação em duas ampliações diferentes. Como é possível observar, ainda consegue-se ver as redes de fosfato (setas pretas). Porém, neste caso, nelas estão impregnadas uma maior quantidade de sabão do que no passe anterior (setas brancas). Como neste passe usou-se apenas o sabão de cálcio, e, sabendo-se que este tem um maior arraste, pode-se inferir que a presença da maior quantidade de sabão nas redes de fosfato é devido a utilização deste sabão.

**Figura 5.5 - Superfície (MEV) do material após o segundo passe de trefilação - lubrificação A.**

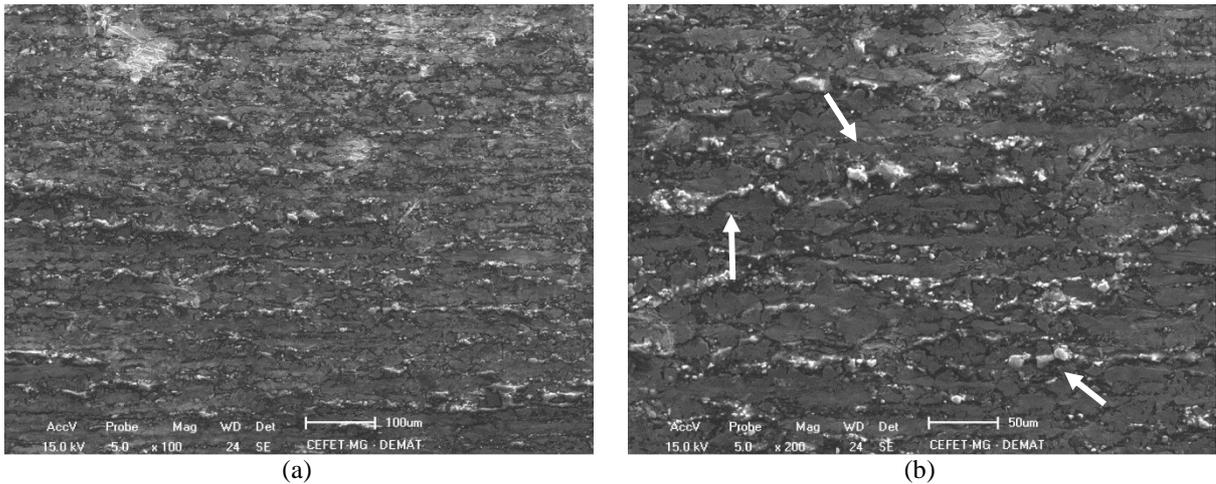


(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

Na Figura 5.6 são exibidas as imagens de duas ampliações distintas da mesma área da superfície do material trefilado no nono passe na condição de lubrificação A. As imagens mostram que há presença de sabão aderido à superfície do material (setas brancas), porém, não consegue-se observar a presença das redes de fosfato. Além disso, uma parte do sabão que está na superfície da amostra está aglomerado longitudinalmente na amostra. Neste estágio da trefilação, não consegue-se mais ver as redes de fosfato na superfície do arame devido ao número de passes e a redução de área pela qual o material já passou. Assim, acredita-se que o atrito ao longo do processo, a presença de fieira de pressão e a temperatura do arame, fizeram com que o sabão ficasse pressionado na superfície do material inteiro formando uma película lubrificante. O excesso de sabão na superfície do arame está acumulado longitudinalmente no sentido da trefilação.

**Figura 5.6 - Superfície (MEV) do material após o nono passe de trefilação - lubrificação A.**

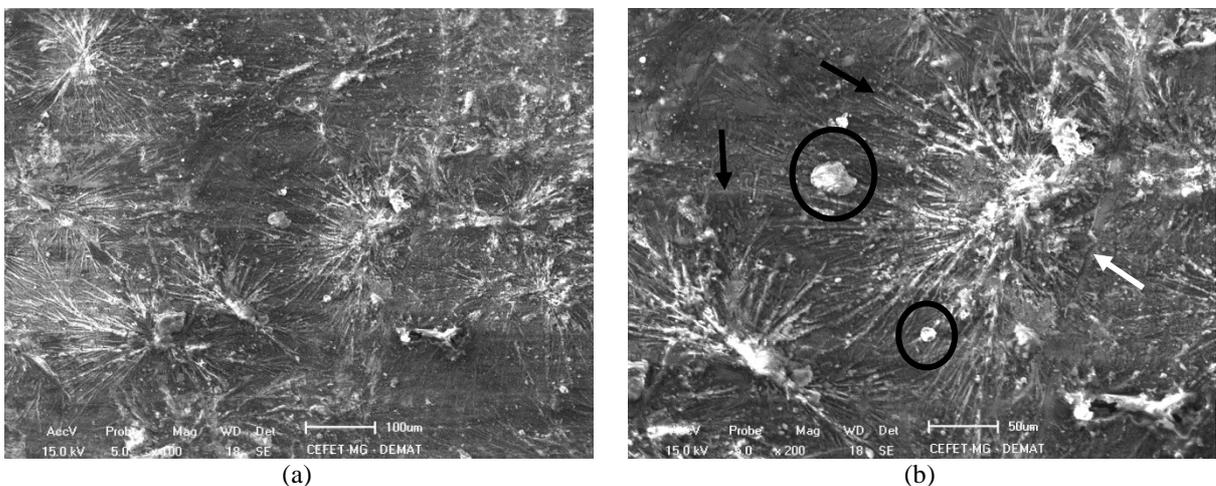


(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

A Figura 5.7 mostra as imagens da microscopia eletrônica de varredura do material retirado após o primeiro passe de trefilação, sobre a condição de lubrificação B com duas ampliações diferentes. Pode-se ver nas imagens as redes formadas pelo fosfato (setas pretas) e parte do sabão aderido as redes de fosfato (setas brancas). É possível também observar a presença de algumas pedras de sabão (exemplo circulado). Devido à falta de misturadores de sabão no primeiro passe e a presença de umidade, tem-se uma dificuldade de lubrificação e ocorre a aglomeração de sabão, formando pedras, podendo virar até um tubo em torno do arame dificultando a lubrificação do mesmo.

**Figura 5.7 - Superfície (MEV) do material após o primeiro passe de trefilação - lubrificação B.**

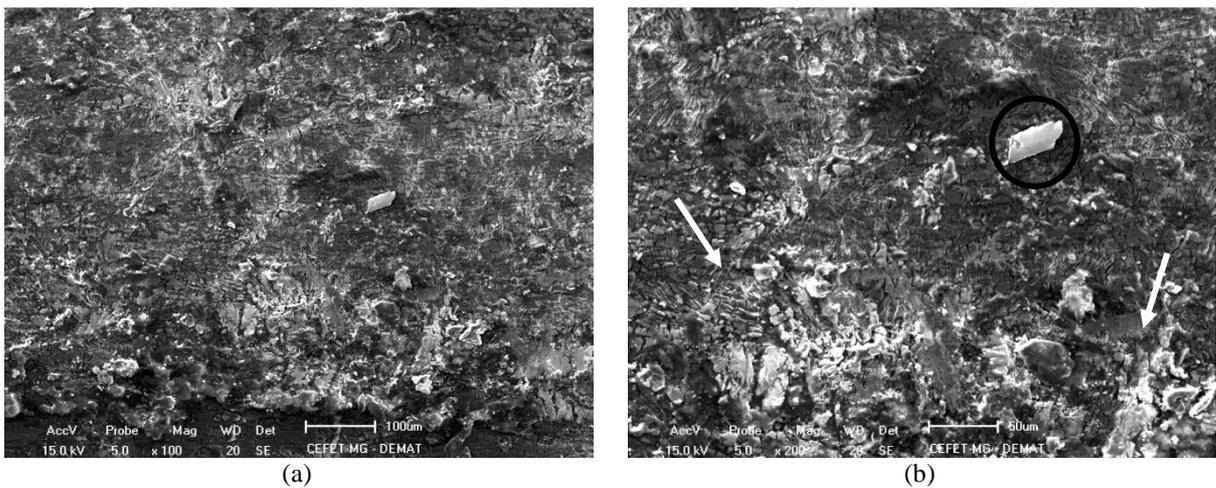


(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

Na Figura 5.8, pode-se ver as imagens do material trefilado no segundo passe sobre a condição de lubrificação B. As imagens mostram duas ampliações diferentes da mesma área com uma quantidade alta de sabão aderido à superfície do arame, tampando até as redes de fosfato (setas brancas). Ainda tem-se a presença de aglomerações de sabão. A superfície do arame está toda coberta pelo sabão aderido devido ao tipo de sabão usado. As aglomerações de sabão neste caso (exemplo circulado), podem ser devido a presença de umidade no sabão utilizado.

**Figura 5.8 - Superfície (MEV) do material após o segundo passe de trefilação - lubrificação B.**

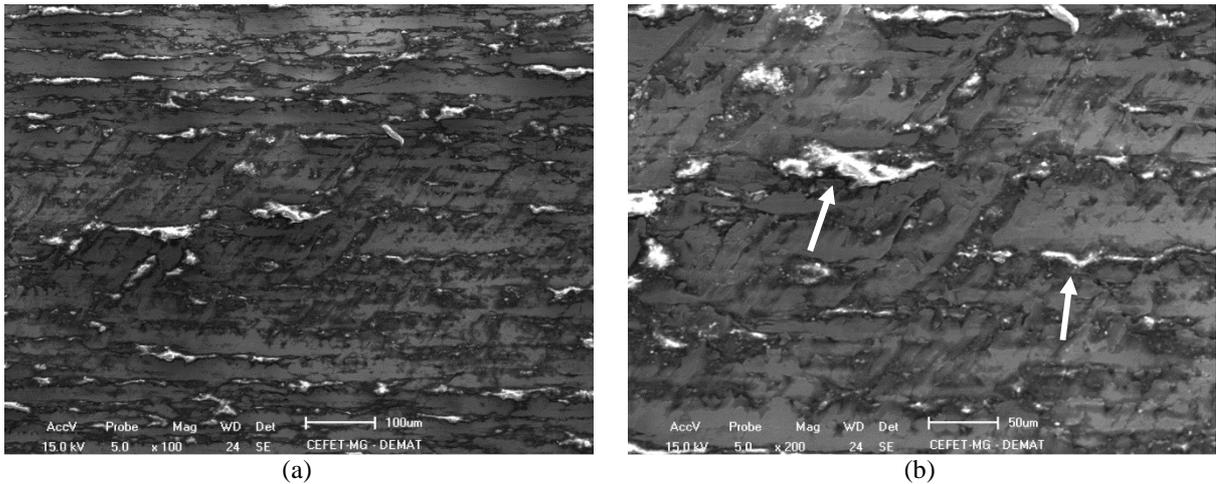


(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

Observando a Figura 5.9, as imagens do material trefilado após o nono passe, utilizando a condição de lubrificação B, as duas ampliações distintas possuem várias aglomerações longitudinais dispersas na superfície do arame (setas brancas). Essas aglomerações presentes no sentido de trefilação mostram que a adesão do sabão a superfície do arame depende da presença das redes de fosfato, que no último passe não estão mais presentes em grandes quantidades. Isso faz com que o arame, em geral, tenha um melhor acabamento superficial.

**Figura 5.9 - Superfície (MEV) do material após o nono passe de trefilação - lubrificação B.**



(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

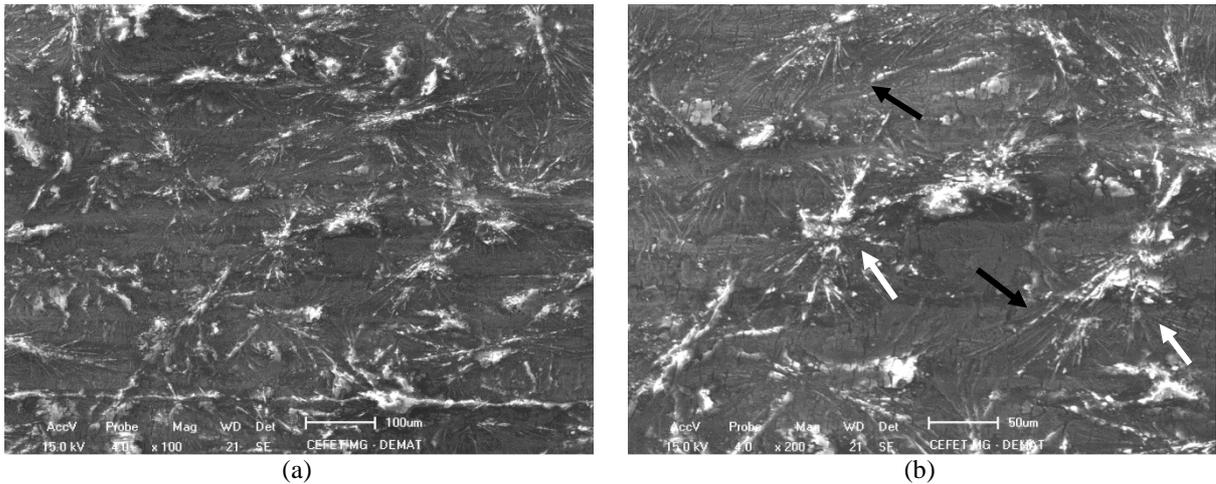
Fonte: Autor.

Após a análise das imagens de ambas as condições de lubrificação, pode-se observar que na condição de lubrificação A o sabão de trefilação ficou mais aderido ao arame do que na condição de lubrificação B em todos os passes analisados. Na condição de lubrificação B pode-se observar melhor as redes de fosfato presentes no arame. Esse resultado deve-se ao sabão de cálcio que, por ter maior potencial de arraste, adere melhor as redes de fosfato do que o sabão de sódio.

### 5.3. Observação da Superfície do Material após Limpeza

A observação da superfície do material foi feita após sua limpeza com água corrente e sabão e as imagens foram obtidas através da microscopia eletrônica de varredura com duas ampliações distintas da mesma área. A Figura 5.10, mostra a superfície do material limpo após o primeiro passe de trefilação na condição de lubrificação A. As imagens mostram as redes de fosfato com sabão de trefilação aderido (setas pretas). As redes não saíram com a lavagem das amostras porém, a quantidade de sabão aderido à superfície do arame diminuiu (setas brancas).

**Figura 5.10 - Superfície (MEV) do material limpo após o primeiro passe de trefilação - lubrificação A.**

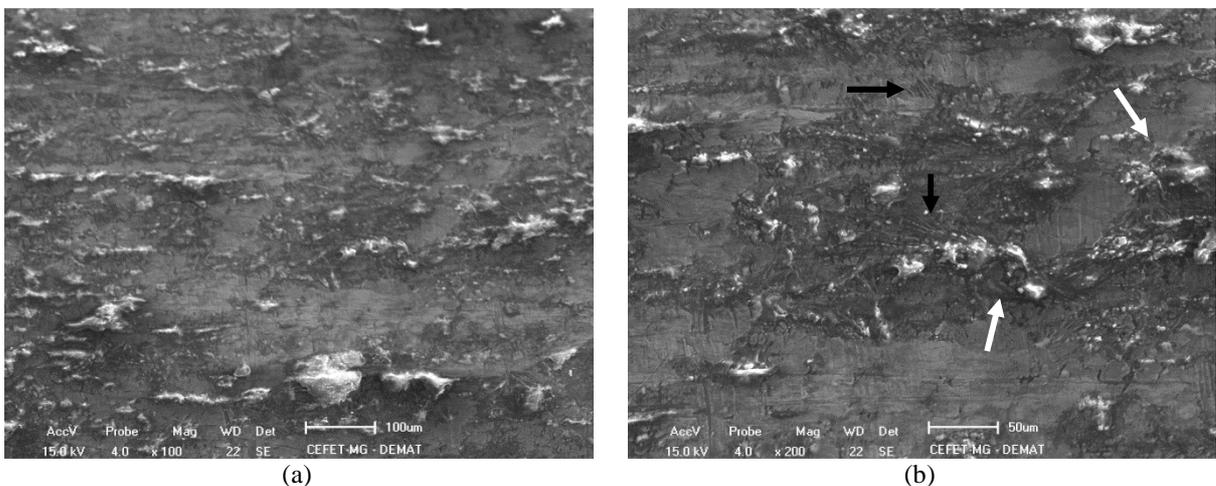


(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

A Figura 5.11 mostra a imagem da superfície do material trefilado após o segundo passe na condição de lubrificação A. Pode-se observar neste caso, algumas aglomerações de sabão mais dispersas na superfície do arame (setas brancas) e na ampliação maior, consegue-se observar ainda a presença das redes de fosfato (setas pretas). O sabão já estava mais aderido na superfície do arame, por isso, não foi possível removê-lo por inteiro. Ao comparar com a imagem desta mesma condição antes de limpar a amostra, não é possível observar a presença das redes de fosfato na mesma quantidade do material sujo, além de uma menor quantidade de sabão aderido á superfície do arame.

**Figura 5.11 - Superfície (MEV) do material limpo após o segundo passe de trefilação - lubrificação A.**

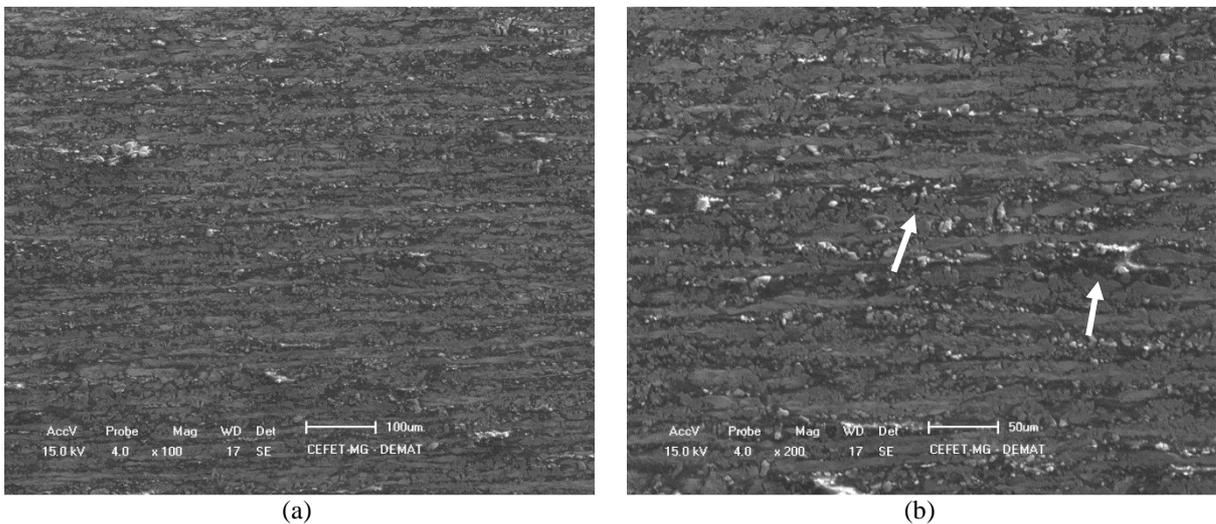


(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

Na Figura 5.12 pode-se ver as imagens do material após o nono passe de trefilação na condição de lubrificação A. Nas imagens, é possível ver o material limpo em duas ampliações. O arame está com a sua superfície quase que inteiramente coberta pelo sabão de trefilação (setas brancas). Como pode-se observar, quase não se nota a presença de protuberâncias formadas de sabão na superfície do material, como existia na amostra antes de ser limpa. Portanto, o excesso de sabão deve ter sido lavado do arame, e o sabão restante está bem aderido à superfície do arame.

**Figura 5.12 - Superfície (MEV) do material limpo após o nono passe de trefilação - lubrificação A.**

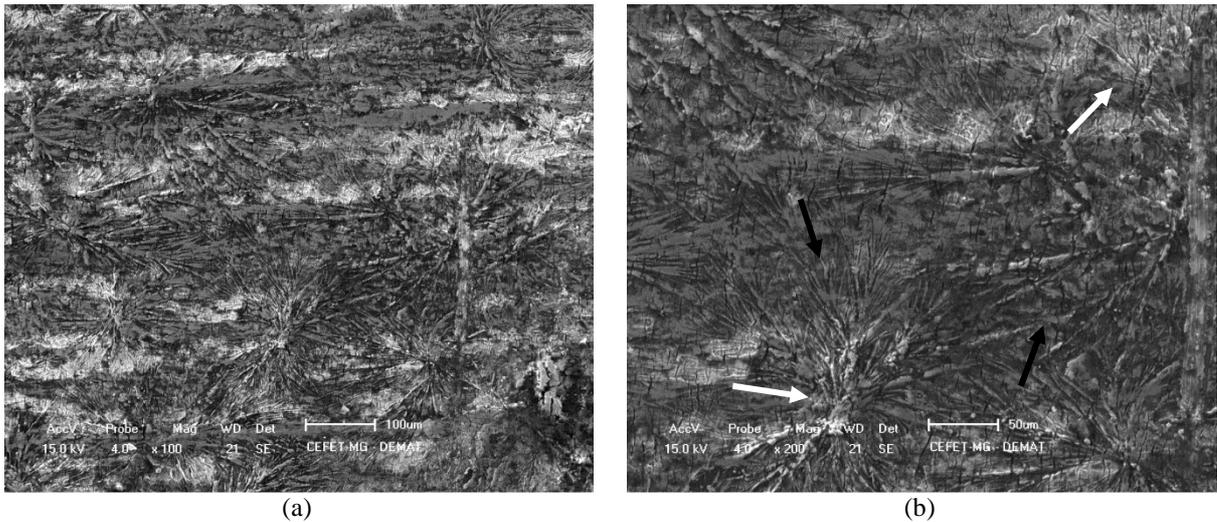


(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

Na condição de lubrificação B, a superfície do material limpo após o primeiro passe é mostrada na Figura 5.13. Neste caso, as redes de fosfato ficaram cobertas com o sabão que ficou aderido na superfície do arame (setas pretas). Além disso, também existem marcas longitudinais, no sentido da trefilação do arame (setas brancas). Se compararmos esta imagem com a imagem feita antes da lavagem da amostra, observa-se que o excesso de sabão foi retirado e que sobrou apenas o sabão que ficou preso nas redes de fosfato e na superfície do arame e, as marcas longitudinais são o sabão que foi arrastado ao longo da seção transversal do arame.

**Figura 5.13 - Superfície (MEV) do material limpo após o primeiro passe de trefilação - lubrificação B.**

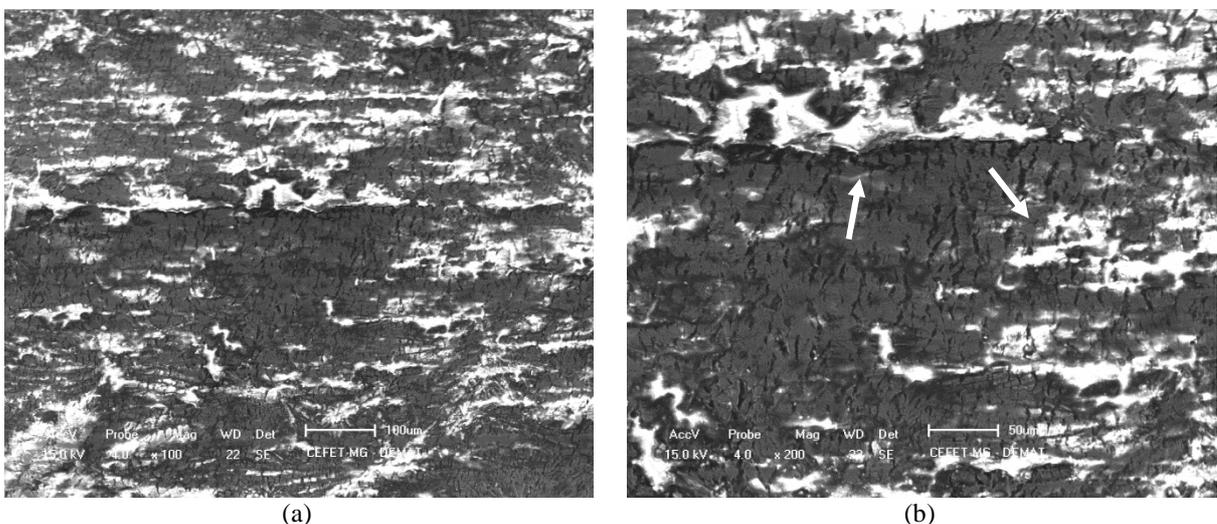


(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

O material que foi retirado após o segundo passe de trefilação da condição de lubrificação B foi limpo e as imagens obtidas dessa condição estão mostradas na Figura 5.14. Nesta imagem o sabão está aglomerado em algumas regiões (setas brancas) e que não consegue-se perceber a presença das redes de fosfato presentes no arame e, excesso de sabão foi retirado com a lavagem da amostra. Deste modo, a amostra limpa possui menos sabão do que a amostra antes da limpeza e que devido a aglomeração do sabão em certas regiões, e não percebe-se mais a presença das redes de fosfato.

**Figura 5.14 - Superfície (MEV) do material limpo após o segundo passe de trefilação - lubrificação B.**

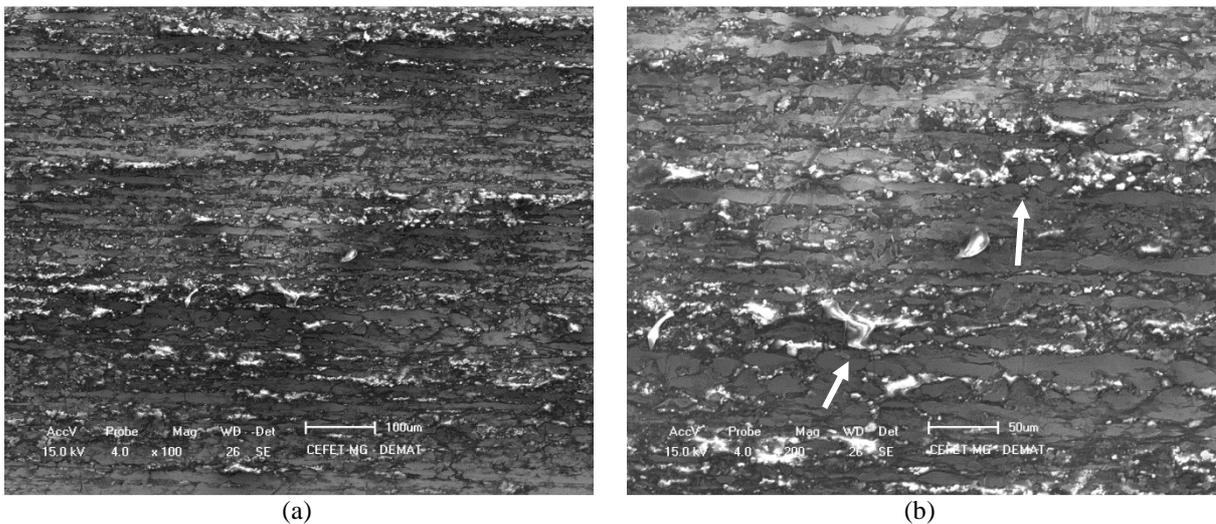


(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

A Figura 5.15, que mostra o material depois do nono passe e limpo na condição de lubrificação B. Os pequenos aglomerados de sabão na superfície do material trefilado no sentido longitudinal da amostra (setas brancas) estão bem visíveis. Apesar de ter lavado a amostra, o sabão não foi retirado por completo, se compararmos com a amostra antes de lavar, o que indica que ele está bem aderido á superfície da amostra.

**Figura 5.15 - Superfície (MEV) do material limpo após o nono passe de trefilação - lubrificação B.**



(a) Ampliação 1 (b) Ampliação duas vezes maior.

Fonte: Autor.

Analisando as imagens do MEV pode-se observar que após a lavagem das amostras, o sabão ficou melhor aderido ao arame na condição de lubrificação B do que na condição de lubrificação A. Na condição de lubrificação A, antes da lavagem das amostras, os lubrificantes estavam em maior quantidade na superfície do arame. Porém, após a lavagem das amostras, percebe-se que o lubrificante utilizado na condição B ficou melhor aderido a superfície do arame, já que ele não se desgarrou mesmo com o esforço.

#### 5.4. Medição da Rugosidade

A medição da rugosidade foi feita nas amostras de cada passe (um, dois e nove passes) e nas condições de lubrificação A e B. A Tabela 5.3 mostra os valores de rugosidade média ( $R_a$ ) e rugosidade total ( $R_t$ ) medidas em  $\mu\text{m}$  em quatro pontos diferentes de cada amostra. Após a

medição, foi feita a média dos valores de rugosidade média e rugosidade total de cada passe e seu respectivo desvio padrão, para analisar a eficácia e possíveis erros de medição.

Analisando a Tabela 5.3, o valor da rugosidade média de três das quatro medidas tiveram os valores próximos, sendo assim o desvio padrão destas medidas foi relativamente baixo. Já as medidas de rugosidade total, houve uma dispersão maior dos valores, o que fez com que o desvio padrão neste caso fosse maior do que nas medidas de rugosidade média.

Quanto menor for o valor de rugosidade, melhor o acabamento superficial do material, portanto, um melhor acabamento superficial foi observado na amostra retirada após nove passes de trefilação. Este valor já era esperado, pois, no nono passe a redução de área é menor, devido ao procedimento adotado na trefilação, e a lubrificação, em geral, é melhor, já que o sabão já está bem aderido na superfície do material. Devido ao atrito entre o material e a matriz, a fiação pode sofrer um desgaste em algum ponto, podendo causar alguma diferença entre a superfície do arame que passou pelo ponto de desgaste e o restante da superfície do arame, o que poderia explicar a grande diferença entre algumas medidas de rugosidade. Os valores de  $R_t$  são maiores já que ele pega o valor do pico mais alto e do vale mais profundo e  $R_a$  faz uma média entre todos os valores medidos.

**Tabela 5.3 - Rugosidade total e média por passe para condição de lubrificação A**

<b>Lubrificação A</b>							
Parâmetro		Medida1	Medida2	Medida3	Medida4	Média	Desvio Padrão
1 Passe	Ra $\mu\text{m}$	0,6	1,39	0,82	1,0	0,95	$\pm 0,33$
	Rt $\mu\text{m}$	4,97	11,51	7,96	10,07	8,63	$\pm 2,84$
2 Passes	Ra $\mu\text{m}$	0,94	1,05	0,9	1,56	1,11	$\pm 0,31$
	Rt $\mu\text{m}$	7,42	7,16	13,48	8,37	9,11	$\pm 2,96$
9 Passes	Ra $\mu\text{m}$	0,47	0,34	0,76	0,6	0,54	$\pm 0,18$
	Rt $\mu\text{m}$	3,29	7,84	8,11	4,22	5,87	$\pm 2,47$

Fonte: Autor.

Os valores de rugosidade média e rugosidade total por passe na condição de lubrificação B estão explicitadas na Tabela 5.4 . Assim como na condição de lubrificação A, os valores de rugosidade média de três dos quatro locais que foi medida, estão muito próximos. Os valores de rugosidade total apresentam uma dispersão menor do que a observada na condição de

lubrificação A. Devido a esses dois fatores, o desvio padrão neste caso apresenta valores menores, apesar de ainda serem considerados elevados.

Os menores valores de rugosidade foram encontrados no nono passe, mostrando que este possui um melhor acabamento superficial, como já era esperado. Os valores de  $R_t$  e  $R_a$  são ligeiramente melhores do que os valores medidos sob a condição de lubrificação A, porém não apresentam diferenças expressivas.

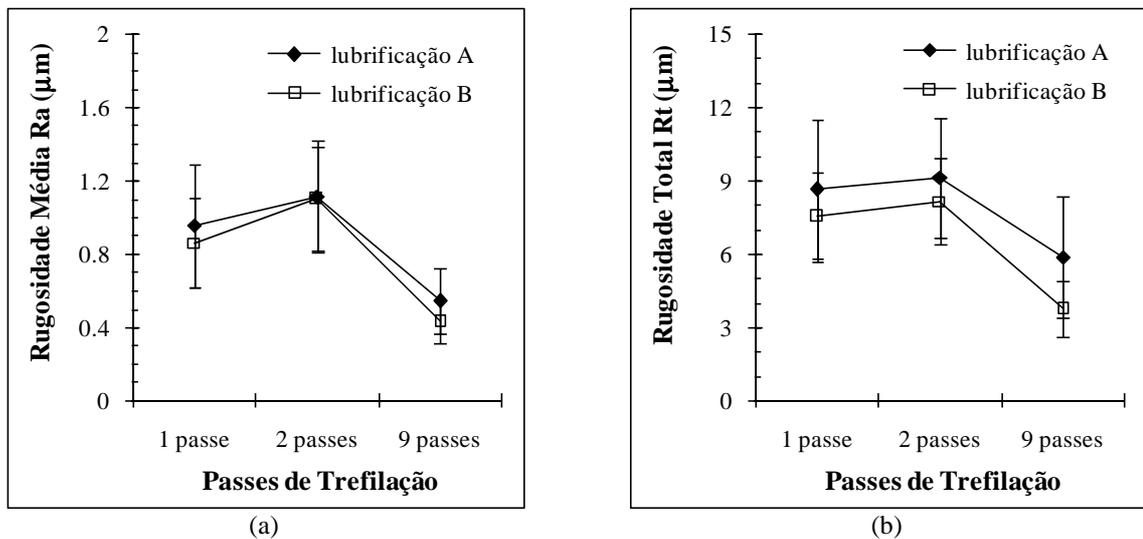
**Tabela 5.4 - Rugosidade total e média por passe para condição de lubrificação B**

Lubrificação B							
Parâmetro		Medida1	Medida2	Medida3	Medida4	Média	Desvio Padrão
1 Passe	Ra $\mu\text{m}$	1,21	0,76	0,8	0,65	0,86	$\pm 0,25$
	Rt $\mu\text{m}$	9,74	8,15	6,63	5,59	7,53	$\pm 1,81$
2 Passes	Ra $\mu\text{m}$	0,98	1,52	0,92	0,96	1,10	$\pm 0,28$
	Rt $\mu\text{m}$	6,89	10,76	7,2	7,74	8,15	$\pm 1,78$
9 Passes	Ra $\mu\text{m}$	0,42	0,6	0,37	0,34	0,43	$\pm 0,12$
	Rt $\mu\text{m}$	3,19	5,39	2,77	3,73	3,77	$\pm 1,15$

Fonte: Autor.

A partir das tabelas apresentadas acima, foram construídos dois gráficos que estão representados na Figura 5.16. O gráfico (a) mostra a rugosidade média x passe de trefilação para as condições de lubrificação A e B e seus respectivos desvios padrão. A condição de lubrificação A apresenta os maiores valores de rugosidade média para o primeiro e nono passe, porém no segundo passe os valores são próximos, o que fez com que a curva da lubrificação A e B se sobrepusessem. O gráfico (b) mostra a rugosidade total x passe de trefilação. Neste gráfico também é possível observar que a lubrificação A possui os maiores valores de rugosidade total, entretanto neste caso, isso ocorre em todos os passes de trefilação. Observa-se em como ambos os casos a lubrificação B obteve menores valores de rugosidade média e total, era esperado que nesta condição o arame estaria com melhor acabamento superficial, no entanto, as linhas de desvio padrão estão sobrepostas. Deste modo, cada medição possui erro, tanto para mais quanto para menos, onde os valores poderiam coincidir. Então não é possível afirmar que uma das condições de lubrificação apresentou melhor valor de rugosidade, tanto a média quanto total, melhor do que a outra.

**Figura 5.16 - Análise das rugosidades média e total no material trefilado em um, dois e nove passes, empregando os dois tipos de lubrificação.**



(a) Rugosidade média Ra e (b) Rugosidade total Rt.

Fonte: Autor.

### 5.5. Distribuição de Dureza

A dureza Vickers foi medida nas amostras de cada passe de cada uma das condições de lubrificação. Os resultados obtidos foram colocados nas tabelas a seguir. Os resultados foram separados de acordo com o passe de trefilação e pela posição onde foi medida a dureza na amostra. Além da dureza, a tabela também apresenta a distância do centro da amostra que cada uma das posições onde a dureza foi medida representa. A dureza Vickers é o resultado da média de quatro medições obtidas na amostra. O desvio padrão de cada dureza foi calculado, com a exceção do desvio padrão da posição 0, pois, esta medida foi única, feita de padrão para o restante das medidas.

Na condição de lubrificação A, foram obtidos os resultados de dureza Vickers média mostrados na Tabela 5.5. No primeiro passe os valores de dureza estão na faixa de 378 HV a 432 HV e o desvio padrão de cada posição pode chegar até 22 HV, o que é um valor relativamente alto. No segundo passe, muitos dos valores de dureza obtidos foram menores do que no primeiro passe, porém os desvios padrão foram muito maiores do que os obtidos no primeiro passe. Já no nono passe, os valores de dureza foram maiores do que em todos os passes, assim como seus desvios padrão.

É de se esperar que a dureza obtida no último passe seja a maior e do primeiro seja menor. Isso se deve ao encruamento do material, que vai aumentando quanto mais o material vai sendo conformado. Neste caso, esta teoria se consolidou, porém no segundo passe, esta regra não foi obedecida. Os menores valores de dureza no segundo passe é explicado pela falta de homogeneidade do material. Isso se comprova quando os valores de dureza por posição são observados: os valores tem um desvio padrão muito grande para um curto espaço de distância. A não homogeneidade do material faz com que ele se deforme de forma diferente em cada região, fazendo com que umas partes tenham maior encruamento do que em outras, explicando assim a diferença nos valores de dureza. Essa heterogeneidade de propriedades está relacionada às condições de trefilação, como redução de área por passe e semi-ângulo de fiação (CORRÊA, 2004).

**Tabela 5.5 - Resultados de dureza obtidos com a lubrificação A**

Posição	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 Passe											
Distância do Centro (mm)	0	0,49	0,98	1,47	1,96	2,45	2,94	3,43	3,92	4,41	4,9
Dureza Vickers (HV)	420	378	418	418	414	418	421	417	432	424	417
Desvio Padrão	-	±13	±22	±12	±5	±4	±6	±3	±20	±11	±1
2 Passes											
Distância do Centro (mm)	0	0.43	0.86	1.29	1.72	2.15	2.58	3.01	3.44	3.87	4.3
Dureza Vickers (HV)	376	374	408	423	438	423	424	395	403	400	437
Desvio Padrão	-	±25	±9	±14	±36	±16	±25	±29	±29	±26	±31
9 Passes											
Distância do Centro (mm)	0	0.21	0.42	0.63	0.84	1.05	1.26	1.47	1.68	1.89	2.1
Dureza Vickers (HV)	521	484	525	529	532	516	520	493	520	510	502
Desvio Padrão	-	±21	±13	±6	±23	±10	±37	±20	±19	±28	±15

Fonte: Autor.

Os resultados de dureza na condição de lubrificação B estão apresentados na Tabela 5.6. Os valores de dureza do primeiro passe são menores do que os obtidos e os valores com nove

passes de trefilação são os maiores. Como dito anteriormente, o encruamento do material cresce de acordo com que ele é deformado, como no nono passe ele já foi deformado pelo menos oito vezes antes, ele está mais encruado, ou seja, sua dureza é maior. Neste caso, o material está mais homogêneo, já que os desvios padrão em todos os casos possuem valores menores, ou seja, os valores de dureza estão variando menos.

**Tabela 5.6 - Resultados de dureza obtidos com a lubrificação B**

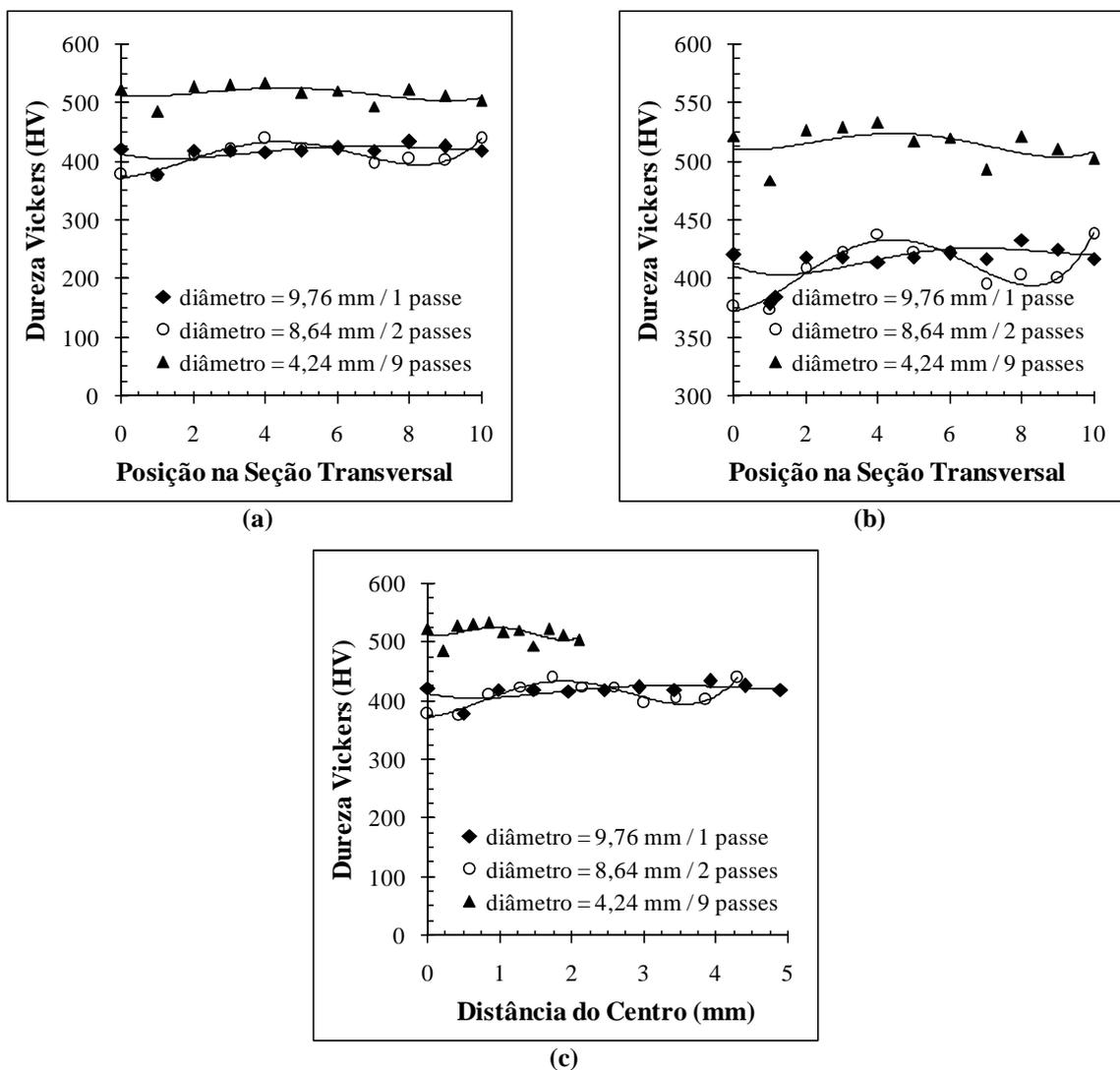
Posição	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 Passe											
Distância do Centro (mm)	0	0.47	0.94	1.41	1.88	2.35	2.82	3.29	3.76	4.23	4.7
Dureza Vickers (HV)	407	430	425	446	447	446	430	450	441	424	394
Desvio Padrão	0	±19	±22	±16	±13	±18	±9	±6	±21	±19	±3
2 Passes											
Distância do Centro (mm)	0	0.43	0.86	1.29	1.72	2.15	2.58	3.01	3.44	3.87	4.3
Dureza Vickers (HV)	440	450	449	462	435	429	450	453	442	463	460
Desvio Padrão	0	±7	±16	±7	±19	±9	±9	±12	±24	±26	±17
9 Passes											
Distância do Centro (mm)	0	0.21	0.42	0.63	0.84	1.05	1.26	1.47	1.68	1.89	2.1
Dureza Vickers (HV)	593	535	548	552	551	527	552	550	554	536	551
Desvio Padrão	0	±8	±25	±17	±9	±23	±11	±15	±35	±8	±7

Fonte: Autor.

A distribuição da dureza Vickers está representada na Figura 5.17. Os gráficos (a) e (b) foram construídos pela dureza Vickers x a posição na seção transversal do arame trefilado, na condição de lubrificação A. Já o gráfico (c) foi feita a relação da dureza Vickers com a distância em que a medição estava do centro. A distribuição de dureza de acordo com a posição mostrada no gráfico (a) pode ser visto melhor no gráfico (b) que mostra em detalhes os resultados obtidos. Em ambos os gráficos pode-se observar que a dureza do arame no nono passe é maior do que as durezas obtidas no primeiro e segundo passes. Além disso, a dureza do nono passe varia menos do que nos demais passes. Já a dureza do primeiro e do segundo

passes, intercalam entre os maiores valores de dureza, mas, como pode-se ver no gráfico (b), a distribuição de dureza do segundo passe é menos homogênea, variando os valores entre 374 HV a 478 HV. No gráfico (c) a distribuição de dureza foi feita de acordo com a distância da medida do centro da amostra até o mais perto possível da sua superfície, ou seja, mais perto do raio da amostra, para demonstrar a que distância cada posição na seção transversal equivale, sendo assim, os valores de dureza são os mesmos do que os obtidos nos gráficos (a) e (b).

**Figura 5.17 - Distribuição de dureza Vickers ao longo da seção transversal do arame trefilado empregando a lubrificação A.**

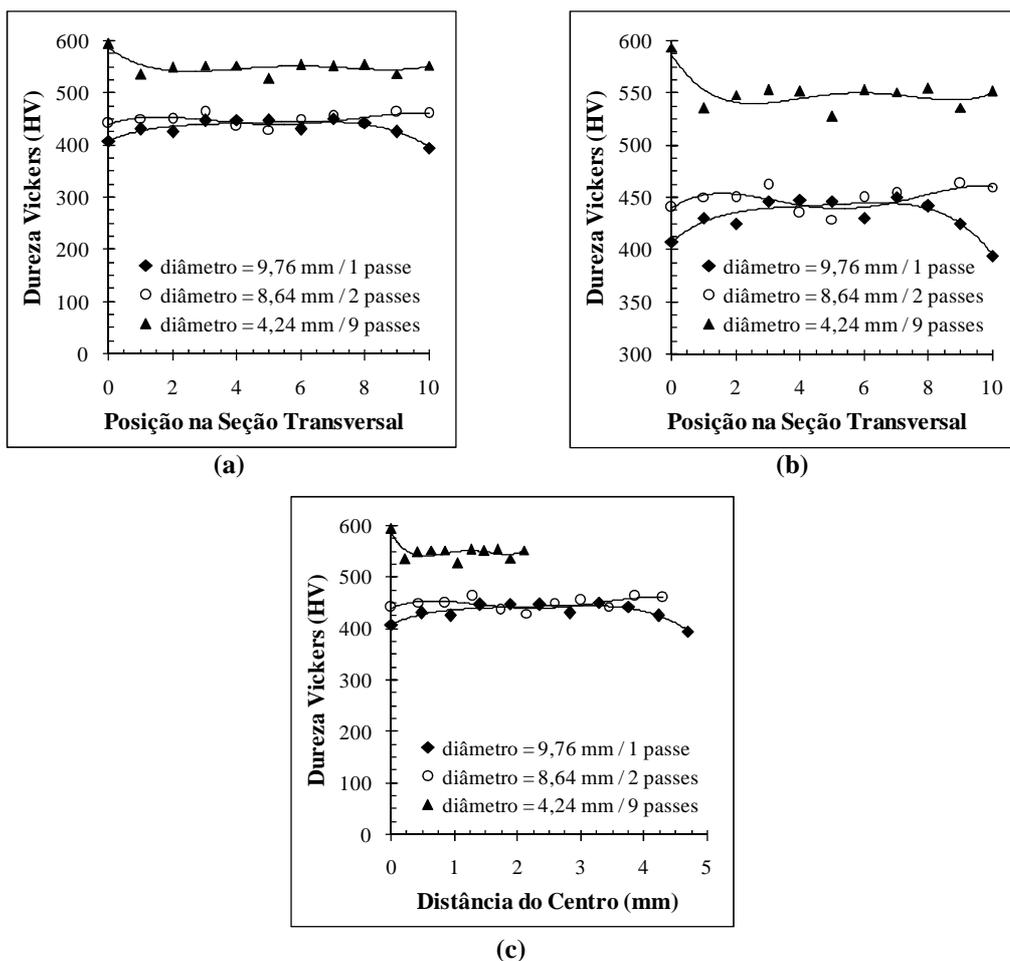


(a) distribuição considerando a posição ao logo da seção transversal, (b) detalhe e (c) distribuição considerando a posição real ao longo do raio do arame trefilado (mm).

Fonte: Autor.

Na Figura 5.18, os gráficos (a) e (b) foram construídos pela dureza Vickers x a posição na seção transversal do arame trefilado, na condição de lubrificação B. Já o gráfico (c) foi feita a relação da dureza Vickers com a distância em que a medição estava do centro, também na condição de lubrificação B. Nos gráficos (a) e (b) pode-se observar que a dureza do arame no nono passe é maior do que as durezas obtidas no primeiro e segundo passes, assim como na condição de lubrificação A. Apesar de parecer que possuem pouca variação dos valores, ao observar o gráfico (b) percebe-se uma grande variação na distribuição de dureza. Os valores de dureza observados são maiores do que na condição de lubrificação A. No gráfico (c) a distribuição de dureza foi feita de acordo com a distância da medida do centro da amostra até o mais perto possível da sua superfície, os valores de dureza são os mesmos porém são mostrados de acordo com a distância medida em milímetros.

**Figura 5.18 - Distribuição de dureza Vickers ao longo da seção transversal do arame trefilado empregando a lubrificação B**



(a) distribuição considerando a posição ao longo da seção transversal, (b) detalhe e (c) distribuição considerando a posição real ao longo do raio do arame trefilado (mm).

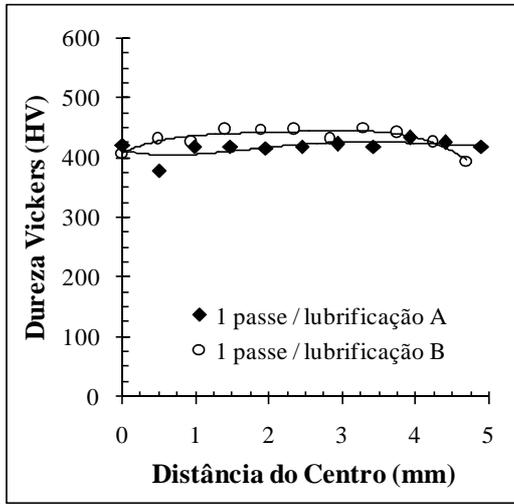
Fonte: Autor.

A distribuição da dureza também foi comparada entre as condições de lubrificação. Na Figura 5.19 estão representados os gráficos da distribuição de dureza Vickers x distância do centro da amostra, para os dois lubrificantes. Cada um dos gráficos mostra a comparação da dureza usando cada condição de lubrificação por passe. No gráfico (a) e (b) são representadas as distribuições da dureza para o primeiro passe, no gráfico (c) e (d) a distribuições de dureza foi feita para segundo passe e no gráfico (e) e (f) pode-se observar as distribuições de dureza para o nono passe.

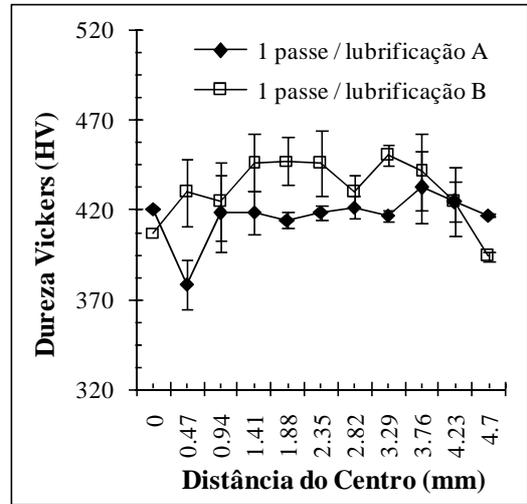
Analisando o gráfico (a) pode-se observar que a dureza dos arames utilizando o lubrificante A e o lubrificante B está dentro da faixa de 380 HV a 450 HV. A condição de lubrificação A tem a distribuição de dureza mais uniforme do que na B, porém os maiores valores de dureza encontrados foram da condição de lubrificação B. O gráfico (c), apresenta maiores valores de dureza do que os encontrados para o primeiro passe, apesar da distribuição da dureza pela amostra não ser tão homogênea quanto no gráfico (a). Além disso, a condição de lubrificação B ainda apresenta maiores valores de dureza do que a condição A. O gráfico (e), com os valores de dureza para o arame trefilado depois de nove passes, tem os mais altos valores de dureza podendo chegar até 600 HV. A condição de lubrificação B continuou apresentando valores de dureza maiores do que a condição de lubrificação A. Os gráficos (b), (d) e (f) apresentam os valores da distribuição de dureza para cada passe, porém, com os valores de desvio padrão.

Baseando que o material com maior nível de deformação e, portanto, mais encruado é o da amostra retirada depois do nono passe de trefilação, os seus valores de dureza deveriam ser os maiores, o que podemos comprovar analisando o gráfico (e). A partir da mesma linha de raciocínio, o segundo passe deveria apresentar valores intermediários e o primeiro passe os menores valores dentre os passes analisados. Isso é o que acontece nos gráficos (a) e (c). Analisando os gráficos a seguir era esperado que a condição de lubrificação B poderia levar a melhores valores de dureza, porém, levando em consideração o desvio padrão das medições, percebe-se que os valores são muito próximos para concluir qual condição levaria realmente a uma melhor distribuição de dureza.

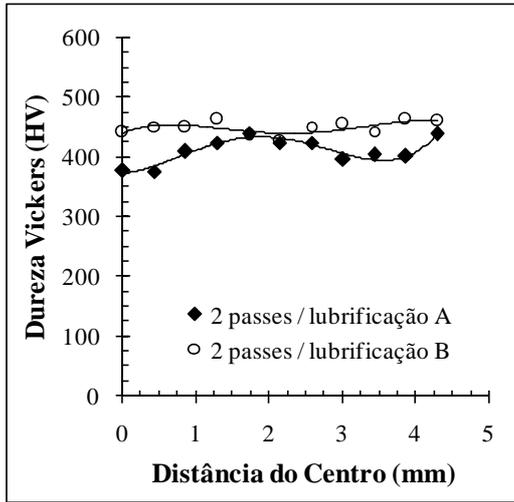
Figura 5.19 - Comparação da distribuição de dureza Vickers ao longo da seção transversal do arame trefilado empregando os dois tipos de lubrificação.



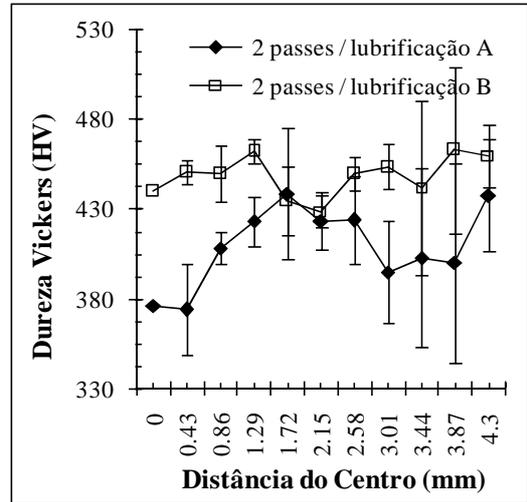
(a)



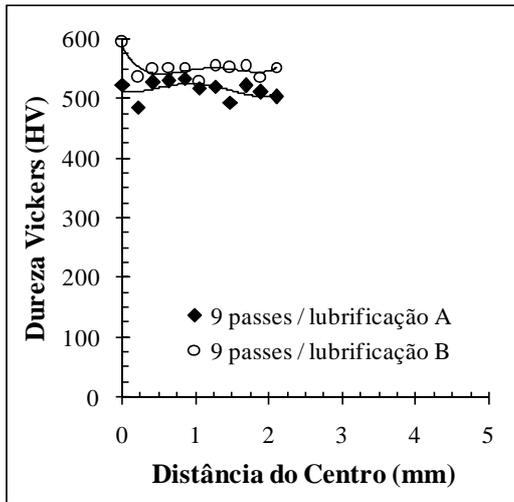
(b)



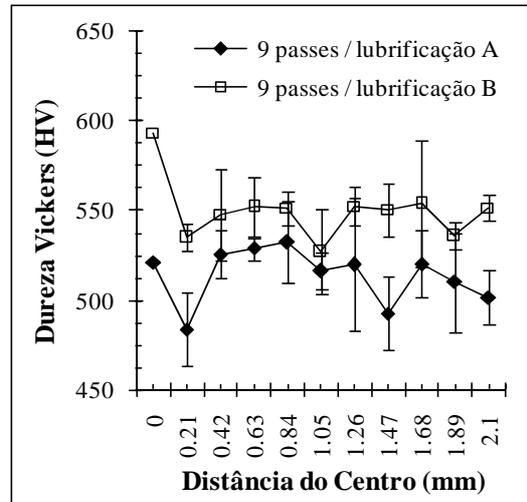
(c)



(d)



(e)



(f)

(a) e (b) d = 9,76 mm / 1 passe, (c) e (d) d = 8,64 mm / 2 passes e (e) e (f) d = 4,24 mm / 9 passes.

Fonte: Autor.

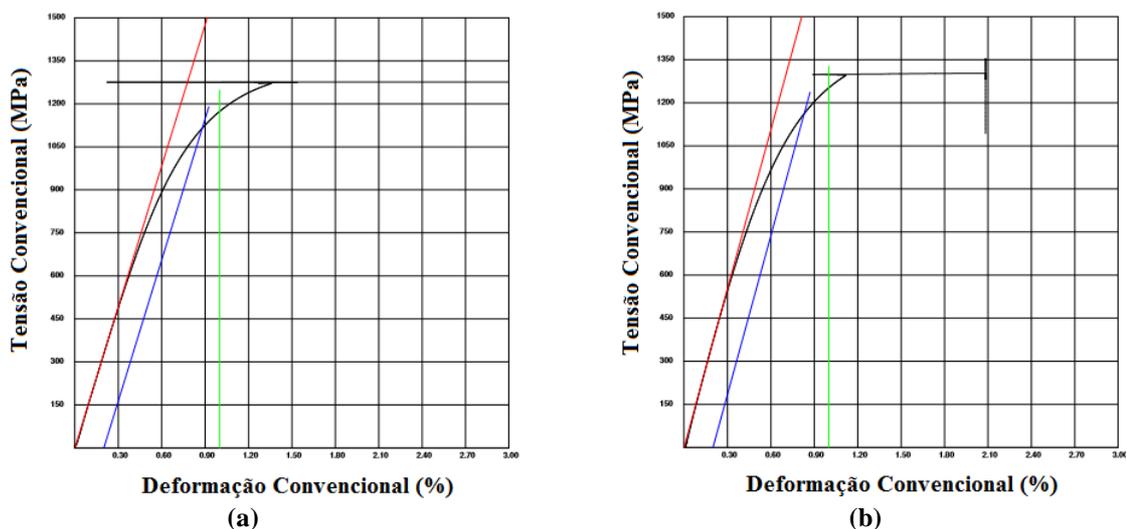
## 5.6. Análise das Propriedades Mecânicas à Tração

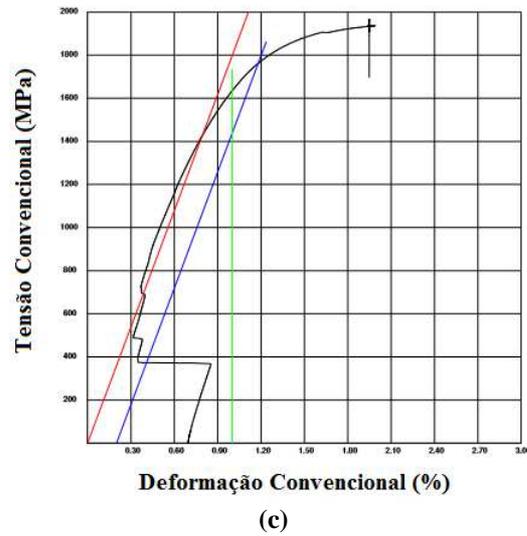
As propriedades mecânicas à tração foram obtidas por meio do ensaio de tração realizado logo após a trefilação das amostras em uma máquina de tração na própria empresa.

As curvas de tensão convencional x deformação convencional de cada passe analisado neste trabalho na condição de lubrificação A estão mostradas na Figura 5.20. No gráfico (a) foi representada a curva dos resultados do primeiro passe de trefilação, no (b) a curva dos resultados do segundo passe e no gráfico (c) a curva dos resultados do nono passe.

No gráfico (a), a tensão convencional máxima está por volta de 1300 MPa e em comparação com os outros passes, houve uma menor deformação, por volta de 1,50%. No gráfico (b) a curva apresentada tem a tensão convencional máxima num valor próximo ao do primeiro bloco, porém, a área de estrição é maior no segundo passe. Já a deformação máxima foi por volta dos 2,0%. Analisando o gráfico (c), tem-se que o valor de tensão convencional máxima foi perto dos 2000 MPa, o maior valor dentre os três passes analisados. A deformação máxima foi menor do que no segundo passe, perto de 1,8%.

**Figura 5.20 - Curvas tensão convencional x deformação convencional do material trefilado até o início da estrição em um passe, dois passes e nove passes - lubrificação A**





(a) um passe, (b) dois passes e (c) nove passes de trefilação

Fonte: Autor.

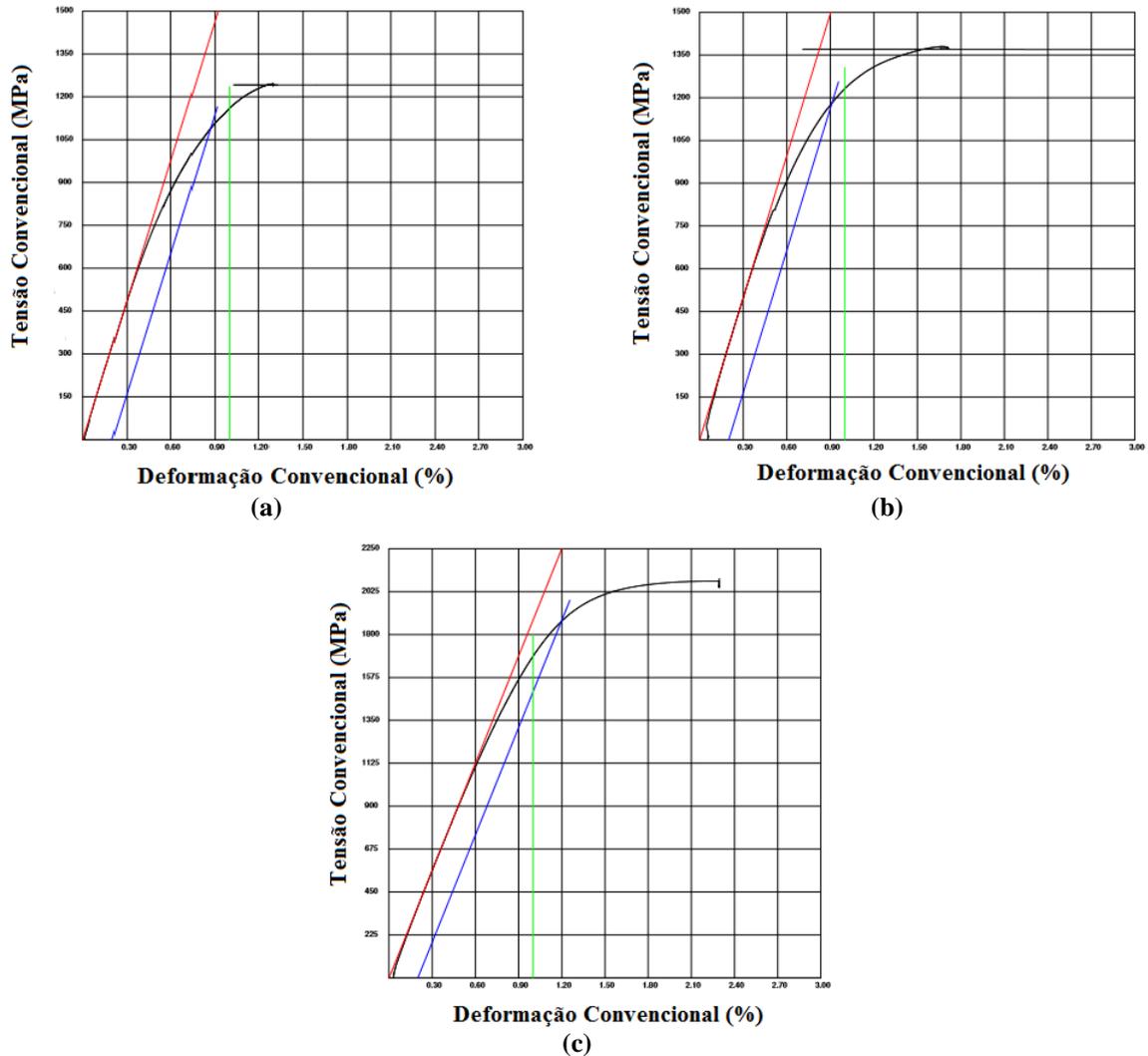
A Figura 5.21 mostra as curvas de tensão convencional x deformação convencional de cada passe analisado na condição de lubrificação B. No gráfico (a) foi representada a curva dos resultados do primeiro passe de trefilação, no (b) a curva dos resultados do segundo passe e no gráfico (c) a curva dos resultados do nono passe.

No gráfico (a), a tensão convencional máxima está por volta de 1250 MPa e uma deformação máxima por volta de 1,30%. Já no gráfico (b) a curva apresentada tem a tensão convencional máxima maior do que o valor do primeiro bloco, e a deformação máxima foi por volta dos 1,6%. Analisando o gráfico (c), o valor de tensão convencional máxima foi perto dos 2030 MPa, o maior valor dentre os três passes analisados, e também, a maior deformação máxima, perto de 1,6%.

A partir dos gráficos obtidos no ensaio de tração foram construídas duas tabelas com os principais dados para as condições de lubrificação A e B por passe. Foram retirados os dados de limite de resistência, que corresponde à tensão máxima que uma estrutura sobre tração irá suportar; o limite de escoamento a 0,2%, é a medida de tensão na curva tensão x deformação a medida que ela se inclina na região plástica; e o alongamento total, que vai medir o grau de deformação plástica foi suportado até o material sofrer a fratura. A medida do limite de resistência do material é importante para saber o máximo de tensão que o material vai aguentar sem romper. Já o limite de escoamento é necessário para saber onde começa o escoamento do material, pois, o material pode não funcionar corretamente ao mudar

permanentemente. O alongamento total é importante para detectar se o material é dúctil ou frágil, ou seja, se o material consegue se deformar plasticamente em grandes ou pequenas quantidades.

**Figura 5.21 - Curvas tensão convencional x deformação convencional do material trefilado até o início da estricção em um passe, dois passes e nove passes - lubrificação B**



(a) um passe, (b) dois passes e (c) nove passes de trefilação

Fonte: Autor.

Estão apresentados na Tabela 5.7 o limite de resistência, o limite de escoamento e o alongamento total das amostras trefiladas sob a condição de lubrificação A. Os limites de resistência e de escoamento aumentam conforme o número de passes pelo qual a amostra foi submetida aumenta. Porém, os valores do primeiro e do segundo passe são muito próximos e

os valores obtidos para o nono passe de trefilação são muito maiores do que os demais. O alongamento total tem um decréscimo bem significativo no último passe.

**Tabela 5.7 - Propriedade mecânica à tração - lubrificação A**

Lubrificação A			
	1 Passe	2 Passes	9 Passes
Limite de Resistência (MPa)	1332	1397	1966
Limite de escoamento 0,2% (MPa)	1115	1162	1762
Alongamento Total (%)	3,3	4,0	1,9

Fonte: Autor.

A Tabela 5.8 apresenta o limite de resistência, o limite de escoamento e o alongamento total das amostras trefiladas sob a condição de lubrificação B. Os limites de resistência e de escoamento aumentam com o número de passes. O alongamento total tem um comportamento contrário ao limite de resistência e do limite de escoamento, ele possui uma queda brusca de valores entre o primeiro e segundo passe, e, continua decrescendo até o nono passe.

**Tabela 5.8 - Propriedade mecânica à de tração - lubrificação B**

Lubrificação B			
	1 Passe	2 Passes	9 Passes
Limite de Resistência (MPa)	1267	1384	2092
Limite de Escoamento 0,2% (MPa)	1089	1181	1868
Alongamento Total (%)	12,0	4,0	3,0

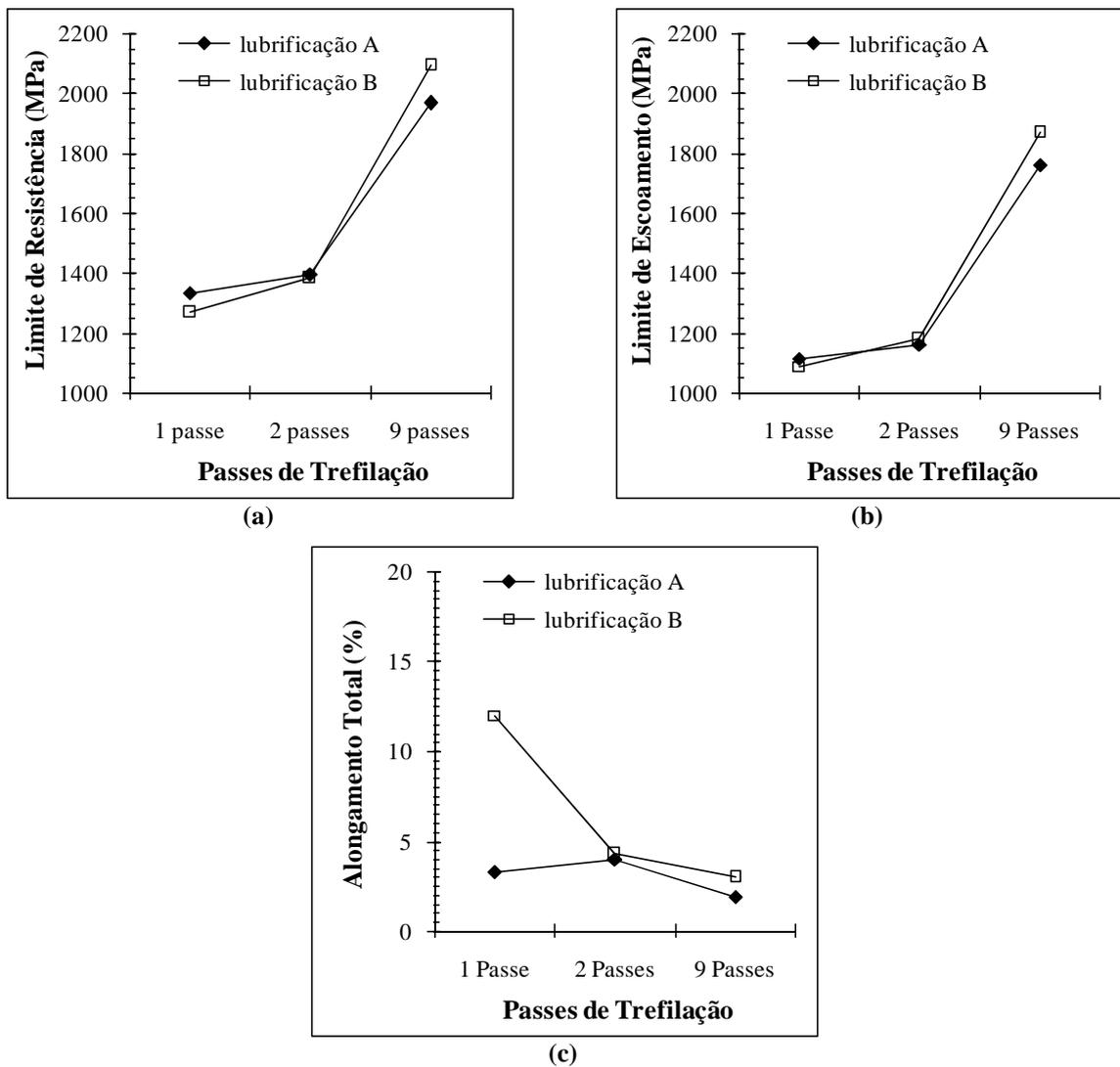
Fonte: Autor.

A partir das tabelas acima, foram construídos os gráficos da Figura 5.22. Os gráficos representam o limite de resistência, o limite de escoamento e o alongamento total por passe de trefilação comparando as condições de lubrificação A e B.

No gráfico (a) está representado o limite de resistência nas duas condições de lubrificação aumentam conforme o número de passes aumenta. Pode-se observar também que os valores de ambas as lubrificações de intercalam, e, no segundo passe até se sobrepõem. No gráfico limite de escoamento x passes de trefilação, gráfico (b), os valores para as duas condições de lubrificação são bem parecidos, e, assim como no limite de resistência, aumentam conforme o número de passes aumenta. Por outro lado, no gráfico (c), o alongamento total diminui

conforme o número de passes aumenta e os valores entre as duas condições de lubrificação são bem distintos. Como já era de se esperar, com o aumento da conformação do material, há também um aumento da dureza e da sua resistência, devido ao encruamento do material, porém, ele perde ductilidade, o que explica o decréscimo nos valores de alongamento total.

**Figura 5.22 - Propriedades mecânicas do material trefilado após um passe, dois passes e nove passes de trefilação.**



(a) limite de resistência, (b) limite de escoamento e (c) alongamento total.

Fonte: Autor.

## 5. CONCLUSÕES

A composição química dos sabões analisada através do EDX mostrou a presença de elementos químicos que não haviam sido descritos na composição fornecida pelo fabricante. Estes elementos estão presentes em quantidades significativas e em cada sabão foram encontrados a presença de diferentes elementos. Além disso, percebe-se que esta técnica não foi adequada para a análise da composição química dos sabões já que não são detectados elementos com o número atômico menor ou igual a 11, que é o caso do sódio.

A análise térmica feita com o DSC nos sabões de lubrificação sem usar permitiu observar que o sabão de cálcio absorve menos calor do que o de sódio, na mesma faixa de temperatura, ou seja, a intensidade de calor necessária para degradar o sabão de cálcio é menor do que a intensidade de calor necessária para degradar o sabão de sódio. Do mesmo modo pode-se avaliar os sabões utilizados na trefilação em cada uma das condições de lubrificação. A lubrificação A, que possui uma porcentagem de sabão de cálcio, absorve menos calor do que a condição de lubrificação B. Pode-se inferir que isso acontece devido à presença do cálcio na condição de lubrificação A e a presença de diferentes elementos químicos em ambos os sabões, o que deve interferir na absorção de calor de cada um dos sabões.

No MEV observa-se qualitativamente em ambas as condições de lubrificação um aumento do sabão aderido na superfície do arame com a elevação do número de passes, porém, na condição de lubrificação A isso ocorre com uma intensidade maior do que na B. Contudo, ao limpar as amostras, observa-se que na condição de lubrificação B o sabão não ficou apenas superficialmente aderido ao arame, resistindo a limpeza das amostras.

Analisando a rugosidade do material, em todos os passes e nas duas condições de lubrificação, pode-se observar valores próximos de rugosidade média e rugosidade total nas condições de lubrificação A e B. Portanto, não podem ser tiradas conclusões de qual das duas condições de lubrificação levaria a uma rugosidade melhor. Apesar disso, é clara a diferença entre a rugosidade obtida por passe. O último passe possui a menor rugosidade, o que implica o melhor acabamento superficial, como já era esperado.

A distribuição de dureza foi feita por passe e em cada uma das condições de lubrificação. Pode-se observar a ocorrência de distribuição heterogênea ao longo da seção transversal do

material para as duas condições. A medida que o número de passes foi elevado, em geral, foi observado a elevação nos valores de dureza, fenômeno típico do encruamento do material.

As propriedades mecânicas à tração como o limite de resistência e limite de escoamento, para as duas condições de lubrificação, aumentaram com o aumento do número de passes pelo qual o arame passou. O alongamento total do material diminuiu conforme o número de passes foi aumentando para as duas condições de lubrificação. Porém a condição de lubrificação B obteve um aumento mais expressivo dos limites de resistência e de escoamento. O alongamento total caiu bruscamente do primeiro para o segundo passe, mas, do segundo para o nono passe ele não teve uma queda tão expressiva na condição de lubrificação B, diferentemente do que acontece na condição de lubrificação A.

Analisando os resultados obtidos, o efeito da mistura do sabão de cálcio ao sabão de sódio na condição de lubrificação A não foi tão expressiva para a melhora do acabamento superficial e das propriedades analisadas do material. Portanto, a utilização da lubrificação B, utilizando apenas um tipo de sabão, atenderia, a princípio, as expectativas de lubrificação.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRESCIANI FILHO, Ettore; BENTO DA SILVA, I.; FERREIRA BATALHA, G.; TONINI BUTTON, S. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011. 258 p.

BRUSIUS JUNIOR, W. **Análise da lubrificação seca para trefilação e proposta de padronização de lubrificantes para arame médio Carbono**. 2009. 33 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BYON, S. M.; LEE, S. J.; LEE, D.W.; LEE, Y.H.; LEE, Y.. Effect of coating material and lubricant on forming force and surface defects in wire drawing process. **Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China**, Busan, p.104-110, 10 set. 2010.

CETLIN, P.R.; HELMAN, H. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2010. 260 p.

CORRÊA, E. C. S. **Aspctos do encruamento dos metais previamente deformados a frio**. 2004. 233 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

DIETER, G.E. **Metalurgia mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1998. 660 p. Traduzido por Antonio Sergio de Sousa e Silva, M.Sc., Luiz Henrique de Almeida, M.Sc., Paulo Emílio Valadão de Miranda, M.Sc.

DUBOIS, A.; LAZZAROTTO, L.; DUBAR, L.; OUDIN, J.. A multi-step lubricant evaluation strategy for wire drawing–extrusion–cold heading sequence. **Wear**, Valenciennes, p.1-11, 31 jul. 2001

EL-DOMIATY, A.; KASSAB, S. Z.. Temperature rise in wire-drawing. **Journal Of Materials Processing Technology**, Safat, p.72-83, 16 jun. 1997

FELDER, E; LEVRAU, C. Analysis of the lubrication by a pseudoplastic fluid: Application to wire drawing. **Tribology International**, Paris, p.1-5, 24 fev. 2011.

FERNANDES, F. H. **Avaliação da alteração de cor e rugosidade média superficial de resinas acrílicas usadas em base de próteses após imersão em desinfetantes químicos e bebidas**. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Odontologia, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2009.

HADDI, A.; IMAD, A.; VEGA, G.. Analysis of temperature and speed effects on the drawing stress for improving the wire drawing process. **Materials And Design**, Lille, p.1-6, 12 abr. 2011.

HWANG, J.K.; YI, I.C.; SON, I.H.; YOO, J.Y.; KIM, B.; ZARGARAM, A.; KIM, N.J.. Microstructural evolution and deformation behavior of twinning-induced plasticity (TWIP) steel during wire drawing. **Materials Science & Engineering A**, Pohang, p.1-12, 16 jul. 2015

KUMAR, P.; GURAO, N. P.; HALDAR, A.; SUWAS, S.. Progressive changes in the microstructure and texture in pearlitic steel during wire drawing. **Isij International**, Bangalore, v. 51, n. 4, p.679-684, 13 jan. 2011.

LEE, J. W.. BAEK, H.M.; HWANG, S.H.; SON, I.H.; BAE, C.M.; IM, Y.M. et al. The effect of the multi-pass non-circular drawing sequence on mechanical properties and microstructure evolution of low-carbon steel. **Materials & Design**, [s.l.], v. 55, p.898-904, nov. 2013. Elsevier BV.

MUSKALSKI, Z.. Selected problems from the high-carbon steel wire drawing theory and technology. **Archives Of Metallurgy and Materials**, Moscou, v. 49, p.1-9, 2014.

NANAO, H.; HOSHI Y.; SHIZUKU, T.; TAKIWATARI, K.; MORI S.. Direct observation of lubricant components between wire and diamond die for wire drawing with a micro-FTIR. **Science+business Media**, New York, p.1-6, 10 set. 2015.

PALMEIRA, A. A. **Processos de fabricação IV: capítulo 5: processos de trefilação**. Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2005.

SCHAEFFER, L. **Conformação mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre Editora, 2009. 167 p.

SHINOHARA, T.; YOSHIDA, K.. Deformation analysis of surface flaws in stainless steel wire drawing. **Journal Of Materials Processing Technology**, Hiratsuka, p.579-584, 2005.

TRUKHANOVICH, A. A.; LEDNEVA, A. A.. Lubricants for dry wire drawing. **Steel In Translation**, Zhlobin, v. 39, n. 6, p.510-511, 2009.

WRIGHT, Roger N.. **Wire technology: process engineering and metallurg**. Burlington: Elsevier Inc., 2011. 337 p.