CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

CURSO DE TECNOLOGIA EM MATERIAIS

Determinação das curvas de encruamento por laminação e trefilação do cobre para fins elétricos.

Jânio Geraldo dos Santos

SÃO PAULO

2021

Jânio Geraldo dos Santos

Determinação das curvas de encruamento por laminação e trefilação do cobre para fins elétricos.

Monografia apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Materiais pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo.

Orientador: Professor M.E. Luis Fernando Maffeis Martins

SÃO PAULO

2021

Dedico essa monografia aos meus pais Maria e Geraldo, minha esposa Bruna, minha filha Helena, meus amigos e aos professores que sempre me auxiliaram durante toda essa jornada.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me dar forças e sabedoria para superar todas as dificuldades e momentos mais adversos.

Agradeço a minha esposa Bruna pelo companheirismo e compreensão nos momentos mais conturbados. Que me ajudou a focar em meus estudos e compromissos.

Agradeço aos meus pais Maria e Geraldo pela paciência e suporte.

Agradeço á Termomecanica pelo apoio e auxílio na disponibilidade de seus recursos para realizar a coleta de dados.

Enfim minha gratidão as amizades que fiz durante minha trajetória, Wellington, Samuel, Marienne, Julia, Juliana, Murilo, Camila, Fabio, Fernando e todos que estiveram ao meu lado ajudando nos estudos e principalmente nos momentos de descontração, obrigado pelas melhores risadas.

"..., mas a arte não é sobre replicar o mundo é sobre interpreta-lo e acrescentar a ele como você o enxerga."

(Carl – Detroit Become a Human)

RESUMO

A curva de encruamento é uma importante ferramenta que pode ser amplamente usada para conhecimento das propriedades dos materiais, sendo uma ferramenta essencial para o estudo e desenvolvimento de processos. A curva de encruamento visa auxiliar o planejamento de um determinado processo, possibilitando elaborar previsões das propriedades do material como alongamento e limites de resistência e escoamento, possibilitando determinar a dureza tanto em um processo ainda intermediário como e um processo de acabamento. Portanto este trabalho irá trazer um estudo sobre uma curva de encruamento construída através da redução do cobre elétrico, sendo desenvolvido na área operacional da empresa Termomecanica, toda a redução realizada pelo mesmo fio oriundo da fundição passando por processo inicial de laminação e reduções seguintes por meio de trefilação, sendo realizado em forma de dimensionando em esquema de passes. Demonstrando que ao realizar trabalho a frio as propriedades mecânicas são alteradas, aumentando conforme é realizado maior percentual de trabalho a frio, assim como foi possivel também averiguar que ao mesmo tempo que os limites de resistência e escoamento aumentavam a ductilidade diminuía. Os resultados atingiram a expectativa esperada confirmando o que foi visto na teoria, e quando comparada as curvas teóricas com a curva que foi construída praticamente pode-se ver que os valores são bem aproximados, demonstrando que os resultados obtidos com a pratica foi um sucesso.

Palavras-chave: *Cobre elétrico, encruamento, alongamento e limites de resistência e escoamento.*

ABSTRACT

The work hardening curve is an important tool that can be widely used to understand the properties of materials, being an essential tool for the study and development of processes. The work hardening curve aims to assist in the planning of a given process, making it possible to prepare forecasts of material properties such as elongation and resistance and yield limits, making it possible to determine the hardness both in an intermediate process and in a finishing process. Therefore, this work will bring a study on a work hardening curve built through the reduction of electrical copper, being developed in the operational area of the company Termomecanica, all the reduction carried out by the same wire coming from the foundry going through the initial process of lamination and subsequent reductions through of wire drawing. Demonstrating that when performing cold work, the mechanical properties are changed, increasing as a higher percentage of cold work is performed, as well as it was possible to verify that while the strength and yield limits increased, the ductility decreased. The results reached the expected expectation, confirming what was seen in the theory, and when comparing the theoretical curves with the curve that was built practically it can be seen that the values are very approximate, demonstrating that the results obtained with practice were a success.

Keywords: *Electrolytic copper, hardening, stretching and limits of resistance and flow.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **16**
1.1 Objetivo geral 17
1.2 Objetivos específicos 17
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICAS **18**
2.1 Cobre 18
2.1.1 Fundição 19
2.2 Conformação mecânica 21
2.2.1 Laminação 22
2.2.2 Trefilação 24
2.3 Propriedade mecânica dos metais 29
2.3.1 Encruamento 36
2.4 Cobre elétrico 40
3. MATERIAIS E MÉTODOS **41**
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES **51**
5. CONCLUSÕES **68**
REFERÊNCIAS **69**

Lista de Figuras

Figura 1 Vista geral do equipamento para processo Upcasting.....20
Figura 2 Vista do forno com as hastes dentro do banho de metal.....20
Figura 3 Vista dos sistemas de endireitadores, enrolando os fios de cobre no palete de madeira.....21
Figura 4 Funcionamento do processo de laminação.....22
Figura 5 Trem continuo de laminação.....23
Figura 6 Estrutura do laminador duo com cilindro regulável.....23
Figura 7 Partes de um cilindro de laminação.....24
Figura 8 Esquema do processo de trefilação.....25
Figura 9 Esquema de distribuição das zonas em uma fieira.....26
Figura 10 Construção detalhada de uma fieira.....27
Figura 11 Esquema de trefila de tubos e vergalhões.....27
Figura 12 Esquema de trefilação com sistema de tracionamento em bobina.....28
Figura 13 Processo de trefilação via úmida.....28
Figura 14 Processo de trefilação via seco.....29
Figura 15 Corpo de prova padrão com seção transversal circular para a realização do ensaio de tração.....30
Figura 16 Máquina universal de ensaio modelos de coluna dupla e modelo de coluna única.....31
Figura 17 Demonstra a curva de tensão-deformação em um comportamento típico, representando a deformação elástica e plástica, representando o ponto P e a resistência de escoamento por meio do método da pré-deformação de 0,002.....34
Figura 18 Curva de tensão-deformação até a fratura representada pelo ponto F, o limite de resistência a tração indicado pelo ponto M e demonstração da deformação sofrida no corpo de prova conforme a aplicação de força. 35
Figura 19 Representação esquemático do comportamento do material frágil e dúctil em relação a curva de tensão-deformação.....36
Figura 20 (a) Microestrutura de material policristalino antes da deformação. (b) após a deformação ocorreu um alongamento dos grãos x170.....38
Figura 21 Aumento da tensão de escoamento em função do percentual de trabalho a frio.....38

Figura 22 Aumento da tensão limite de resistência à tração em função do percentual de trabalho a frio 39
Figura 23 Diminuição do alongamento em função do percentual de trabalho a frio.. 39
Figura 24 Forno de fundição Up-cast semelhante ao utilizado no processo 42
Figura 25 Hastes com sistema de refrigeração submersas no banho de cobre representando o processo. 42
Figura 26 hastes com a matriz de grafite submerso em banho de cobre com cobertura protetiva de grafite 42
Figura 27 Representação do laminador de 3 rolos com 9 estágios 43
Figura 28 Representação da configuração dos cilindros na gaiola de laminação 43
Figura 29 Representação do sistema de entrada da 1ª gaiola, possibilitando visualizar um dos cilindros 44
Figura 30 Conjunto de anéis utilizados na trefilação representando o processo usado 45
Figura 31 Conjunto de recozimento similar a usado no maquinário 45
Figura 32 Cesto usado para alocar material acabado para envio 47
Figura 33 Máquina de tração INSTRON 4482 48
Figura 34 Microscopio ótico modelo lica DM2700M 49
Figura 35 Ø 14,40 O material apresentou uma estrutura bruta de fusão com formação de dendritas colunares, aumento de 50x, sem redução. 52
Figura 36 Ø 13,60 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 11%. 52
Figura 37 Ø 12,85 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 20%. 53
Figura 38 Ø 12,00 O O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 31%. 53
Figura 39 Ø 11,11 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 40%. 53

Figura 40 Ø 10,20 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 50% 54
Figura 41 Ø 8,00 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 69% 54
Figura 42 Ø 6,70 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 78% 54
Figura 43 Ø 5,75 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 84% 55
Figura 44 Ø 5,00 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 88% 55
Figura 45 Ø 4,42 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 1% 55
Figura 46 Ø 3,96 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 92% 56
Figura 47 Ø 3,53 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 94% 56
Figura 48 Ø 3,17 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos e uma trinca de fragilização, aumento de 50x, redução de 95% 56
Figura 49 Ø 2,80 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 96% 57
Figura 50 Ø 2,50 O O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 97% 57

Figura 51 Ø 2,23 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 98% 57
Figura 52 Ø 1,98 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 98% 58
Figura 53 Ø 1,77 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 98% 58
Figura 54 Ø 1,57 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 99% 58
Figura 55 Ø 1,40 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 99% 59
Figura 56 Ø 1,26 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 99% 59

Lista de Tabelas

Tabela 1 Ferramentas utilizadas para realizar de trefilação conforme reduções recomendadas pelo fornecedor do equipamento 46
Tabela 2 Reduções realizadas no equipamento Niehoff MM85..... 47
Tabela 3 Resultados do calculo das reduções com as respectivas áreas utilizadas nos cálculos das reduções. 50
Tabela 4 Demonstração das reduções realizadas, áreas encontradas para cada fieira utilizada 52
Tabela 5 Resultados do ensaio de resistência a tração, demonstrando as reduções realizadas com as respectivas medidas, trazendo o resultado em MPa para cada redução 60
Tabela 6 Resultados do ensaio de resistência a tração utilizando os dados do limite de escoamento, demonstrando as reduções realizadas com as respectivas medidas, trazendo o resultado em MPa para cada redução. 63
Tabela 7 Resultados com % redução / Limite de Escoamento / Limite de Resistência / Razão elástica para mostrar o comportamento da razão elástica. 65
Tabela 8 Resultados do alongamento utilizando as amostras que passaram pelo ensaio de tração, demonstrando as reduções realizadas com as respectivas medidas, trazendo o resultado de alongamento em porcentagem para cada redução. 66

Lista de Gráficos

Gráfico 1 Demonstra a curva de encruamento possuindo em um dos seus eixos o percentual de redução realizado e no outro o resultado do ensaio de tração com o resultado do limite de resistência 61
Gráfico 2 Demonstra a curva de encruamento possuindo em um dos seus eixos o percentual de redução realizado e no outro o resultado do ensaio de tração com o resultado do limite de escoamento, ... 63
Gráfico 3 O gráfico demonstrando a curva de alongamento em % conforme se aplica as reduções 66

Lista de Símbolos

σ = Tensão; [MPa]

F = Força (carga) aplicada; [N]

A_o = Área da seção inicial do corpo onde é diretamente aplicada a carga. [mm]

L_0 = Comprimento inicial [mm]

L_i = Comprimento instantâneo [mm]

ΔL = Deslocamento

$\in$ = Deformação de engenharia

AL% = Alongamento percentual (Ductilidade)

A_i = Área da seção inicial do corpo

A_f = Área da seção final do corpo

1. INTRODUÇÃO

O Cobre foi o primeiro metal a ser manufaturado pelo homem, sendo utilizado há mais de 10.000 anos para a confecção de ferramentas e substituindo a pedra, os homens localizavam o metal nativo em abundância sobre a crosta terrestre, devido a isso foi amplamente utilizado. (RODRIGUES, 2015)

Essa era foi tão importante que nomeou esse novo momento que foi denominada como a “Era do Cobre” substituindo a “Era da pedra”. Com a manufatura deste metal deu-se origem a metalurgia e a facilidade de deformação do cobre possibilitava ao homem conformar para criar inicialmente ferramentas. Ao passar dos tempos os homens fundiram a liga de bronze ao adicionar o estanho, observando que aumentava a dureza do metal e que passou a ser muito utilizado, para a confecção de armas, adornos, moedas e itens de decoração, sua relevância também foi de muita importância nomeando o novo momento da humanidade como a “Era do bronze”. (RODRIGUES, 2015)

Ao passar dos anos a humanidade foi desenvolvendo métodos para trabalhar com o cobre e gerando novas ligas para as mais diversas aplicações, a principal utilização do cobre acaba sendo como condutor elétrico devido a sua baixa resistividade e alta condutibilidade e com isso é amplamente usada para a fabricação de fios e cabos para a condução de energia elétrica.

O cobre exerce um papel muito importante na humanidade, hoje é o segundo metal não ferroso mais utilizado ficando atrás apenas do alumínio. As ligas de cobre podem ser amplamente usadas para as mais diversas aplicações, por possuir uma ótima resistência a corrosão, acaba sendo uma alternativa, onde uma peça metálica precise ficar exposta a ambientes corrosivos. (BARBOSA, 2012)

O cobre e suas ligas se fazem presentes em praticamente todos os momentos do nosso cotidiano, podendo estar visível ou embutido em algum outro objeto, fato é que esse metal é de extrema importância para o avanço e desenvolvimento da humanidade.

1.1 Objetivo geral

Determinar a curva de encruamento do cobre no processo de trefilação e laminação

1.2 Objetivos específicos

Observar que as reduções acarretam no aumento das propriedades mecânicas do material no que diz respeito aos limites de resistência e de escoamento, mas que acaba também diminuindo o alongamento conforme maior a redução exercida.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICAS

2.1 Cobre

Acredita-se que os primeiros contatos da humanidade com o cobre foi na ilha de Cyprus próximo ao lado asiático da Turquia, devido a localidade os Romanos nomearam o metal até então desconhecido como “Aes Cyprium” que significa o metal de Chipre, depois passou a ser chamado apenas de Cyprium ao decorrer do tempo mudou-se o nome para Cuprum, nome que foi responsável pelo símbolo do metal como Cu usado até hoje, o símbolo é uma alteração de um hieroglifo antigo o Ankh que simboliza a vida eterna na cultura egípcia, foi pensado neste símbolo devido ao longo período que o cobre resiste sem sofrer alterações. (BARBOSA, 2012)

Os primeiros registros da utilização do cobre foram em torno de 10.000 a.C, sendo que por volta dos 4.000 a.C o homem descobriu a fusão dos minérios e a metalurgia e com isso iniciou-se a utilização de ligas como o Bronze (Cu-Sn), este muito utilizado para a confecção de itens domésticos, decorativos, estátuas, moedas, obras de arte e até na fabricação de armas. (BARBOSA, 2012)

O cobre é um elemento químico pertencente ao grupo de materiais metais de transição, localizado na tabela periódica no grupo 11, período 4 e bloco D.

Sua aparência é de cor vermelha-alaranjado e tem estrutura cristalina cúbica de faces centradas, é encontrado sólido em temperatura ambiente, este metal apresenta boas características de ductilidade, é bem maleável, sendo um ótimo condutor térmico e elétrico, possui alta resistência a corrosão e não possui propriedades magnéticas. Devido a conseguir se ligar facilmente a outros metais consegue formar diversas ligas com grandes possibilidades de aplicação no mercado nos mais diversos segmentos. (BARBOSA, 2012)

O Cobre possui algumas características importantes para serem destacadas.

Símbolo químico: Cu

Número atômico: 29

Peso atômico: 63,54

Peso específico: 8,94 g/cm^3

Ponto de fusão: 1083ºC

Ponto de ebulição: 2595ºC

Valência: +1 e +2

Dureza: 2,5 a 3 mohs

Calor especifico (20ºC): 0,0912 cal/g/ºC

Coeficiente de dilatação térmica linear (20ºC): $16,5x10^{-6}$ cm/cm/ºC/s

Resistividade elétrica (20ºC): $1,673x10^{-6}$ omh.cm

Calor latente de fusão: 50,6 cal/g

Condutibilidade térmico (20ºC): 0,941 cal/cm^2/cm/ºC/s

2.1.1 Fundição

A fundição é o início de praticamente todos os processos de fabricação de materiais metálicos, sendo esse processo utilizado há muitos anos pelo homem. Para a realização do processo de fundição é necessário possuir o metal ao qual deseja fundir, para o caso do cobre são utilizados na maioria das vezes catodos de cobre principalmente para fundir cobre elétrico e eletrolítico, devido a necessidade da baixa quantidade de impurezas e oxigênio que podem estar presentes na composição do cobre fundido.

Os catodos de cobre são colocados dentro do forno que é aquecido por indução elétrica até uma temperatura acima dos 1083ºC, após completa fusão o material pode ser solidificado utilizando diversas técnicas de fundição tudo depende da aplicação necessária para cada tipo de processo, entretanto apenas será citado o processo de Up-cast.

No processo Up-cast é colocado dentro do banho de material fundido hastes que possuem em sua ponta matrizes feitas em grafite onde é determinado o diâmetro do fio a ser fundido, para o início da puxada é utilizada um fio guia normalmente mais fino que o metal a ser fundido, esse fio guia puxa o material por dentro da haste que possui um sistema de refrigeração como uso de água, sendo necessário manter uma velocidade constante para que o material tenha tempo de solidificar dentro da haste e

que não seja gerado vazios no material oriundo do processo, o fio guia é responsável por transportar até a parte superior da máquina o fio que passaram sobre roletes que auxiliarão no processo de descida, conforme o fio vai sendo puxado chegara até o processo de endireitamento que também é responsável por realizar uma curvatura ao material auxiliando na formação de pacotes que vão sendo enrolados sobre um sistema giratório, este processo é muito produtivo e para aumentar mais a produtividade são puxados vários fios ao mesmo tempo todos seguem o mesmo fluxo. (R.SHIHAB et al., 2016)

Figura 1 Vista geral do equipamento para processo Upcasting FONTE: UPCAST®... ,2021

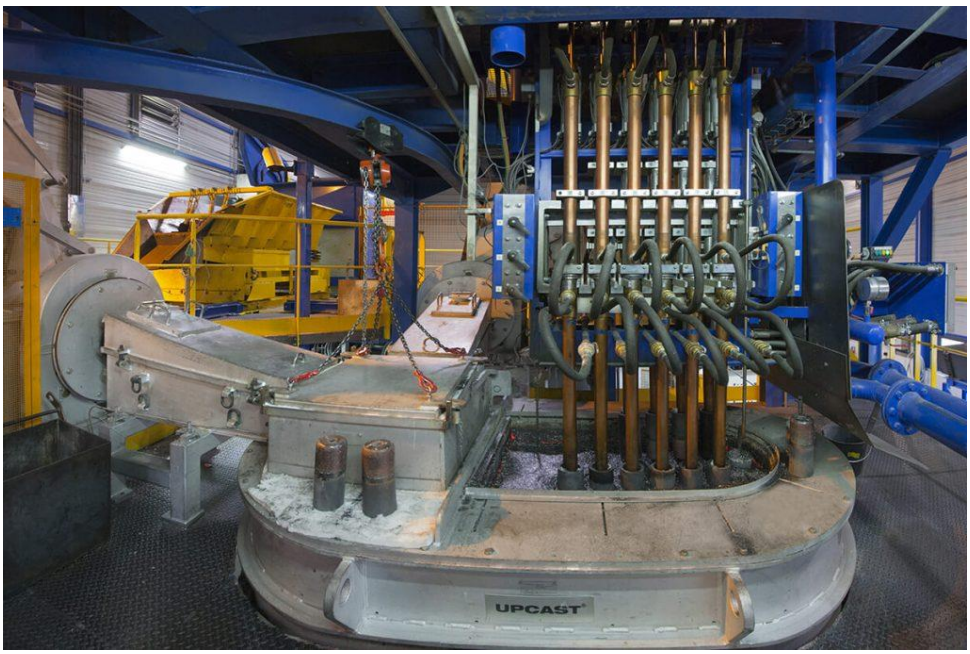

Figura 2 Vista do forno com as hastes dentro do banho de metal FONTE: UPCAST®... ,2021

Figura 3 Vista dos sistemas de endireitadores, enrolando os fios de cobre no palete de madeira
FONTE: UPCAST®... ,2021

2.2 Conformação mecânica

Os metais sempre tiveram um papel de muita importância no desenvolvimento da humanidade e novas tecnologias, muitas vezes isso deve a facilidade com que os metais podem ser conformados de maneiras muito úteis, como chapas, barras, tubos, fios dentre várias outras formas que podem ser conformados. (DIETER, 1981)

Nos processos de conformação mecânica sempre vai fazer com que o material sofra algum tipo de alteração em sua geometria ou forma devido a deformação plástica a qual o material será submetido, esta deformação se deve a forças que podem ser aplicadas por ferramentas que podem variar desde grandes cilindros até pequenas matrizes. (BRESCIANI, 1991).

Os métodos de conformação mecânica são de grande vantagem no que diz respeito ao aproveitamento do material, afinal na maioria dos processos tem menos perca de material comparado a outros processos de conformação, também uma boa vantagem é a agilidade do processo sendo também importante destacar a facilidade em se obter um controle das propriedades mecânicas assim como controle mais preciso de dimensional que exige grande precisão. (DIETER, 1981)

A conformação pode se dividir em duas linhas de processamento sendo o trabalho a frio e trabalho a quente, podemos considerar que o trabalho é a quente quando durante o processo o a temperatura do material se eleva de tal maneira durante o processo que pode causar o processo de recristalização do metal. (BRESCIANI, 1991).

O processo de trabalho a frio é realizado abaixo da temperatura de recristalização, ideal para estágio de acabamento, possibilitando um maior controle dimensional.

2.2.1 Laminação

Laminação é um processo de conformação que consiste em passar o material dentre cilindros que realizam movimentos contrário um do outro empurrando o material a fim de realizar alterações na seção transversal gerando produtos que podem ser planos como chapas ou não planos podendo fazer perfis mais complexos ou menos complexos. Normalmente o processo de laminação é repetido algumas vezes para que consiga chegar à medida desejada, este objetivo pode ser conseguido de duas maneiras ficar passando e repassando o material em um laminador simples (conforme figura 1) ou montar um trem de laminadores (conforme figura 2) fazendo com que cada cilindro trabalhe de maneira que ao fim consiga realizar a redução desejada em menos passes. (CETLIN; HELMAN, 2005)

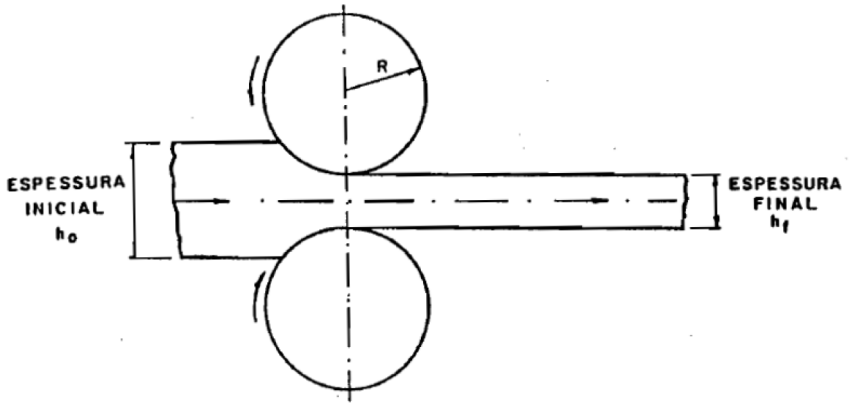

Figura 4 Funcionamento do processo de laminação FONTE: BRESCIANI, 1991

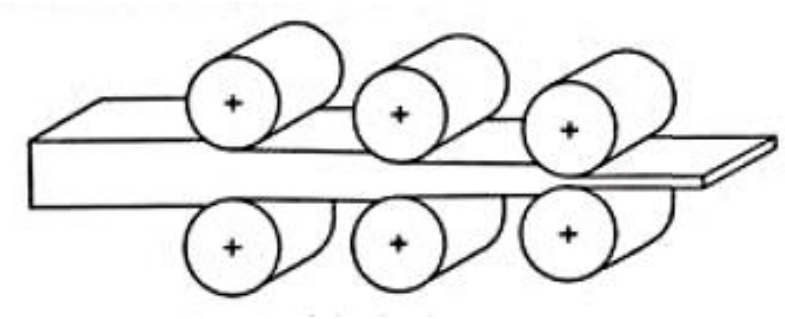

Figura 5 Trem continuo de laminação FONTE: CETLIN; HELMAN, 2005

Ao passar nos cilindros o material é prensado e sofre elevadas tensões de compressão, sendo a força de atrito responsável pela movimentação do material.

A estrutura do laminador dentre todos os tipos segue uma estrutura padronizada consistindo em uma cadeira onde serão alojados os cilindros, também possui os mancais para auxiliar na rotação, preservação do pescoço do cilindro e a evitar deformações do cilindro. Segue o esquema da estrutura: (CETLIN; HELMAN, 2005)

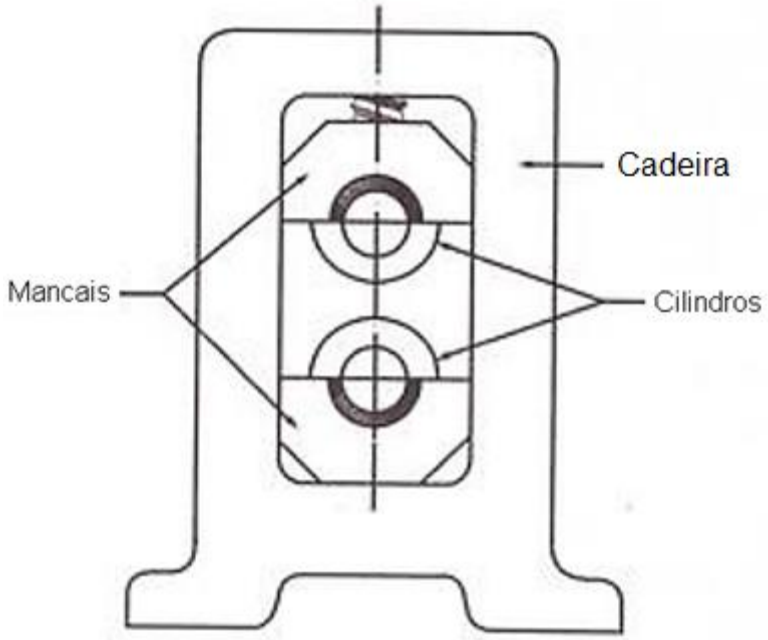

Figura 6 Estrutura do laminador duo com cilindro regulável FONTE: CETLIN; HELMAN, 2005

Os cilindros seguem uma estrutura que é composta por três partes a mesa, que é a parte responsável pelo contato com o material e que vai realizar a laminação e que pode ser feito liso ou com canais para possibilitar realizar alguma forma

geométrica, outra parte é o pescoço que serve basicamente para apoiar o cilindro nos mancais e o trevo de acionamento que vai ligado a parte mecânica do maquinário e que será responsável por passar a rotação dos motores para os cilindros para realizar o processo de laminação, os cilindros de laminação são feitos de aço fundido ou forjado. (CETLIN; HELMAN, 2005)

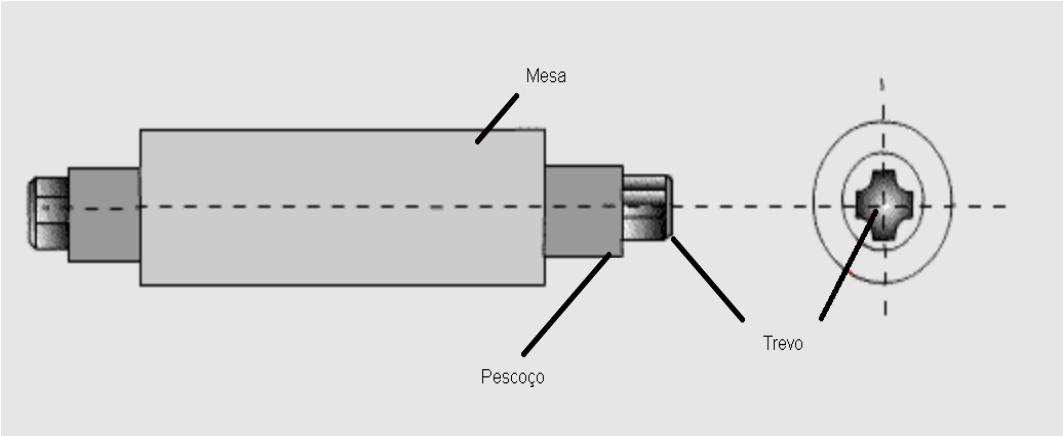

Figura 7 Partes de um cilindro de laminação FONTE: CETLIN; HELMAN, 2005

Durante o processo de laminação os cilindros irão aquecer devido ao atrito existente por causa do contato do material com o cilindro, e mediante ao aquecimento é necessário que o cilindro possua um sistema de refrigeração para garantir a preservação dos cilindros assim como garantir um controle melhor do dimensional e vida útil do cilindro. (CETLIN; HELMAN, 2005)

2.2.2 Trefilação

A trefilação é um processo que consiste em passar a matéria prima por uma matriz (fieira) que possui uma forma interna cônica sendo esse cone maior na entrada que na saída, para que o material passe por esta fieira é necessário que exista uma força de tração em direção a saída da ferramenta possibilitando assim a redução da área transversal do material e desta maneira ocorre um aumento do comprimento final, este processo exerce sobre o material uma força de compressão. (CETLIN; HELMAN, 2005)

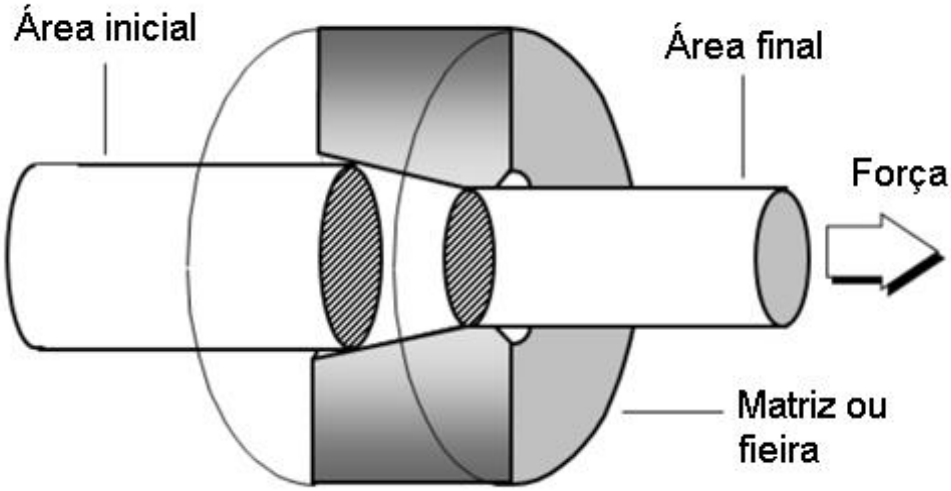

Figura 8 Esquema do processo de trefilação FONTE: VARES; REGULY, 2017, adaptado

O processo de trefilação dentre todos os outros processos de conformação mecânica é o processo que permite o maior estiramento e redução da seção transversal, possuindo uma ótima precisão no dimensional e excelente acabamento superficial que fica uniforme polida e limpa.

Na trefilação é possivel realizar um controle muito crítico das propriedades desejadas, afinal o processo de redução ajudará a chegar as propriedades desejadas, muitas vezes pode-se chegar ao desejado em um passe, entretanto algumas vezes se faz necessário realizar mais passes a fim de chegar à propriedade.

Para a realização da trefilação se faz necessário a utilização de uma fieira, fundamental para a definição do formato e dimensional de saída do material. As fieiras podem ser confeccionadas de diversos materiais tudo vai depender a qual esforço e dimensões a mesma sofrerão, as mais utilizadas são: (CETLIN; HELMAN, 2005)

- Diamante (muito usada para fio finos ou ligas duras);
- Metal duro;
- Aços especiais (Cr-Ni, Cr-Mo, Cr-W);
- Cerâmico (usado para pós de óxidos metálicos sinterizados);
- Ferro fundido branco;
- Aço de alto C revestido com Cr (Cromagem dura);
- Carbonetos sinterizados (Widia).

A fieira possui uma geometria divididas em algumas zonas como na figura abaixo:

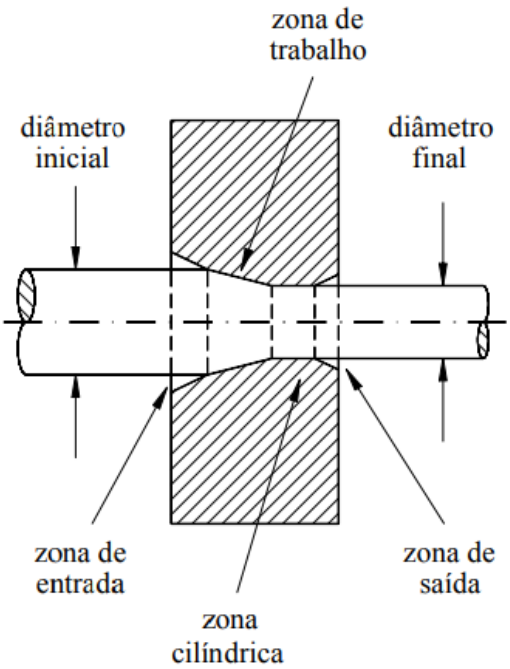

Figura 9 Esquema de distribuição das zonas em uma fieira FONTE: CORRÊA, 2004.

A zona de entrada serve para guiar o fio e permitir a penetração do lubrificante para auxiliar no processo de trefilação.

A Zona de trabalho provavelmente é a parte mais importante da ferramenta, zona responsável por realizar a compressão indireta do material.

Zona cilíndrica essa por sua vez é responsável por manter a medida e quanto mais extenso for o paralelo desta zona será mais prático para manter a medida desejada.

Zona de saída região responsável por realizar um pouco de recuperação elástica, também tendo como objetivo aliviar a saída do material.

Em sua grande maioria fieiras possuem uma estrutura básica composta com um estojo feito de metal e o núcleo referente ao material que será usado para criar o núcleo, pois com essa estrutura facilita sua utilização durante os processos, segue o esquema de montagem da fieira:

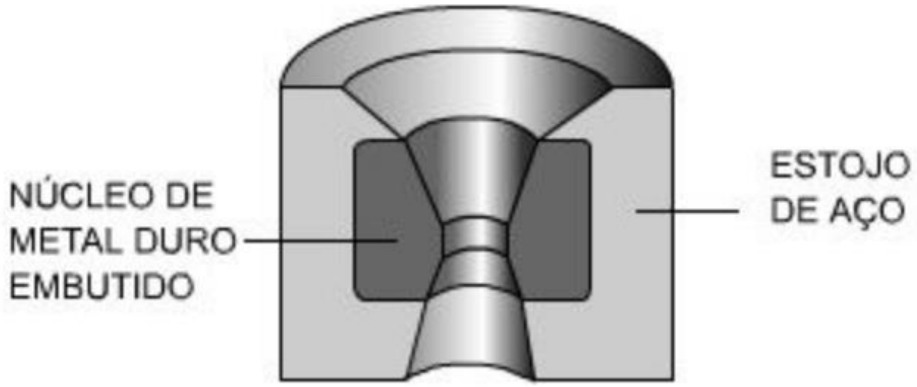

Figura 10 Construção detalhada de uma fieira FONTE: CIMM, 2018

Os equipamentos de trefilação podem variar na construção do equipamento, onde podem ter modelos que possuem tambores para auxiliar na trefilação máquinas como essas são usadas para fazer fios de diâmetros maiores e diâmetros pequenos, dependendo do diâmetro do fio a máquina precisara de um maior número de tambores para realizar a trefilação, tendo também outras máquina que fazem a trefilação puxando o material sem o auxílio de tambor essas normalmente são feitas para fazer tubos e vergalhões.

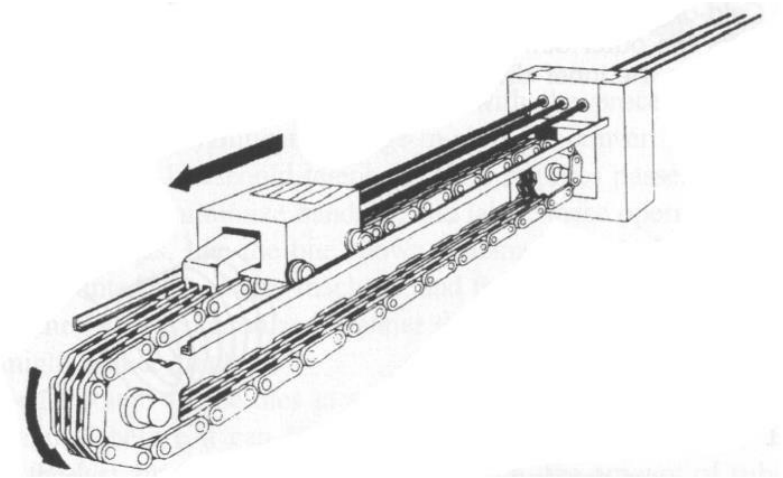

Figura 11 Esquema de trefila de tubos e vergalhões FONTE: BUTTON, 2008

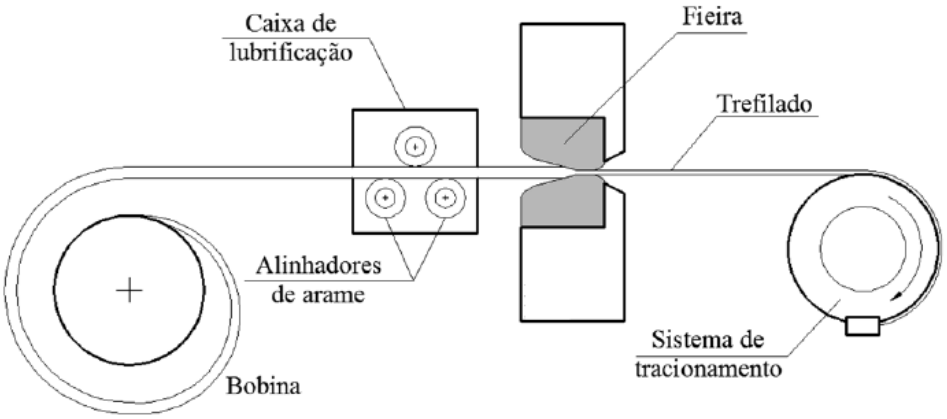

Figura 12 Esquema de trefilação com sistema de tracionamento em bobina FONTE: PINTO, 2016

Podendo o processo de trefilação ser feito por via úmida ou via seco, sendo que no processo de via úmida a fieira e o material ficam submersos no lubrificante. Em contrapartida na via úmida apenas a matéria prima fica submersa ao lubrificante normalmente estes processos possuem um porta ferramenta apropriado para conter o lubrificante antes da fieira.

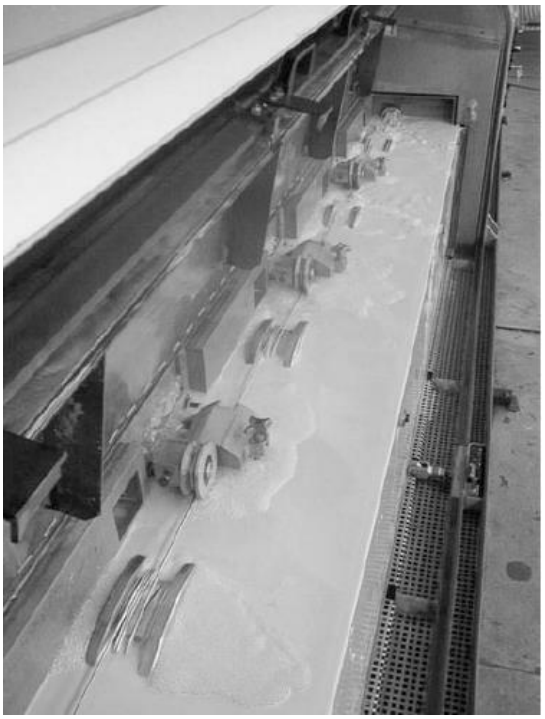

Figura 13 Processo de trefilação via úmida FONTE: GUMMERT, 2014

Figura 14 Processo de trefilação via seco FONTE: GUMMERT, 2014

2.3 Propriedade mecânica dos metais

Para cada situação é necessário conhecer as características dos materiais possibilitando projetar a utilização do material para as mais diversas aplicações, sendo assim o ensaio de tração é essencial para conhecer essas características. Sendo assim é importante conhecer o comportamento mecânico, pois o mesmo reflete uma relação entre deformação a uma carga aplicada e as propriedades mais importantes para a definição de um projeto é resistência, tenacidade, ductilidade e dureza (CALLISTER, RETHWISCH, 2016).

Então os experimentos realizados em laboratório visam sempre buscar reproduzir da maneira mais fiel as condições que o material sofrerá em serviço, um dos fatores mais relevantes a ser considerado é a carga aplicada e a duração que é aplicada, sendo que essas cargas podem ser cisalhamento, compressão ou tração (CALLISTER, RETHWISCH, 2016).

O ensaio de tração é o ensaio mais utilizado e pode ser utilizado por muitos ramos para a realização de diversos ensaios com o objetivo de obter resultados que pode auxiliar a entender o mundo dos materiais. No ensaio de tração é possivel ser caracterizado muitas propriedades mecânicas, para a realização do ensaio consiste em deformar uma amostra até a sua fratura por meio de uma carga de tração que é

aumentada gradualmente e aplicada a longo do eixo de um corpo de prova com a forma padronizada conforme imagem

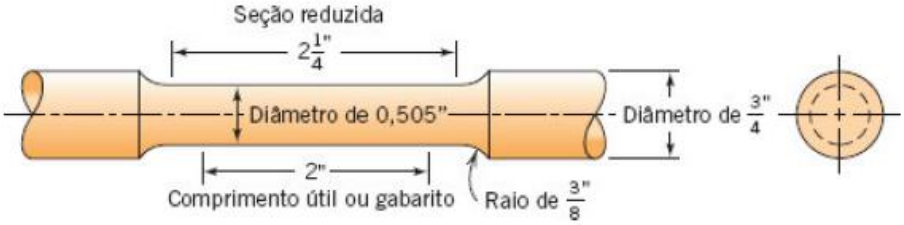

Figura 15 Corpo de prova padrão com seção transversal circular para a realização do ensaio de tração FONTE: CALLISTER, RETHWISCH, 2016

O corpo de prova possui este formato para que a deformação ocorra na região central mais estreita no corpo de prova e reduzir a possibilidade de fratura nas extremidades, sendo as seguintes medidas as padrões para a criação do corpo de prova o diâmetro padrão é de aproximadamente 0,5”(12,8mm), comprimento da região reduzida deve ser de quatro vezes o diâmetro da região, sendo o mais comum 2 ¼” (60mm), o valor utilizado para o comprimento útil mais usado é o de 2” (50mm), aliás essa região é importante para a realização do teste de alongamento para a verificação da ductilidade do material. (CALLISTER, RETHWISCH, 2016).

A máquina de tração é criada para alongar o corpo de prova preso a um dispositivo por meio de uma taxa constante e simultaneamente o equipamento possui uma carga instantânea que é aplicada, sendo possivel também obter os resultados de alongamento utilizando um extensômetro. Um ensaio de tensão-deformação normalmente leva pouco tempo para ser realizado e em sua grande maioria os corpos de prova são destruídos pelo processo e os resultados são registrados geralmente em um computador, considerado o resultado como força em função do alongamento, afim de minimizar esses fatores geométricos, a carga e o alongamento são normalizados aos parâmetros da tensão de engenharia e deformação de engenharia, expressos pelas equações a seguir. (CALLISTER, RETHWISCH, 2016).

Tensão de engenharia

$$\sigma = \frac{F}{\mathrm{Ao}} \qquad (2,3)$$

Deformação de engenharia

$$\in = \frac{Li - Lo}{Lo} = \frac{\Delta L}{Lo} \qquad (2.4)$$

Como o nome nos define na deformação de engenharia temos o comprimento L_o antes de qualquer aplicação de carga e Li é o comprimento instantâneo, não possuindo assim uma unidade de medida simplesmente é metro por metro. (CALLISTER, RETHWISCH, 2016).

O funcionamento da máquina de ensaio universal é relativamente tranquilo, a máquina possui em sua estrutura que pode ser de coluna única ou dupla, entretanto o mais usual é o de coluna dupla, a máquina possui duas travessas sendo uma móvel essa responsável por manter presa a ela a célula de carga e a garra que movimenta junto com a travessa móvel, a outra garra fica presa a travessa fixa da máquina as garras é o local onde fica alojado o corpo de prova para a realização do ensaio também possui um painel onde serão definidos os ajustes, a seguir temos uma imagem ilustrando a máquina universal de ensaio: (BIOPDI, 2020)

Figura 16 Máquina universal de ensaio modelos de coluna dupla e modelo de coluna única FONTE: BIOPDI, 2020

A máquina universal de ensaio possui dois tipos de modelos:

Hidráulico: as máquinas que possuam um sistema hidráulico utilizando uma unidade hidráulica capaz de aplicar cargas extremamente elevadas, entretanto não possui um controle de velocidade e deslocamento tão precisos. (BIOPDI, 2020)

Eletromecânico: ao contrário do sistema hidráulico, estes equipamentos possuem um sistema de servomotores que são capazes de aplicar uma carga fácil de ser controlada e mais precisa, esse tipo de sistema permite ter um controle muito melhor da velocidade e do deslocamento da travessa móvel, entretanto acaba sendo um tipo de equipamento limitada a cargas abaixo de 100 toneladas. (BIOPDI, 2020)

As máquinas de ensaio universal podem ser usadas para fazer diversos ensaios tais como:

Ensaio de tração: que consiste na aplicação de uma força de tração em um corpo de prova padronizado, proporcionando uma deformação ao material mediante ao esforço exercido, este alongamento normalmente se dá até a ruptura, sendo esse o ensaio mais utilizado em laboratório. (BIOPDI, 2020)

Ensaio de compressão: este ensaio tem como conceito analisar o comportamento do material ao ser comprimido, sendo aplicada uma carga uniaxial compressiva ao corpo de prova, diminuindo seu comprimento ou rompendo o material. (BIOPDI, 2020)

Ensaio de flexão: este ensaio consiste em aplicar uma carga de maneira crescente em uma viga que apoiada em dois pontos, a carga aplicada irá causar uma deflexão na viga, este tipo de ensaio procura trabalhar dentro do limite elástico. (BIOPDI, 2020)

Ensaio de cisalhamento: usado para determinar a resistência do material mediante as forças atuantes sobre ele, onde é provocado uma movimentação do plano em direções diferentes, essa carga é aplicada na perpendicular ao eixo longitudinal do corpo de prova. (BIOPDI, 2020)

Ensaio de dobramento: o corpo de prova é apoiado em dois pontos com distancia especifica mediante a dimensão do corpo de prova, uma barra de seção transversal constante sendo circular, tubular ou retangular é utilizada no ensaio que

consiste em dobrar o corpo de prova ocasionando uma deformação plástica. (BIOPDI, 2020)

Ensaio de embutimento: este é simples, mas de muita importância na indústria de estampagem, pois neste ensaio é visado avaliar a estampabilidade do material, onde se relaciona a estrutura da peça com suas propriedades mecânicas procurando conhecer a máxima deformação possivel sem que ocorra a ruptura. (BIOPDI, 2020)

Para este presente trabalho será tratado detalhes relacionados ao ensaio de tração, para a maioria dos materiais utilizados para projetar é de extrema importância se assegurar que na estrutura ocorra apenas deformação elástica quando sofrer a aplicação de uma tensão, pois quando um metal atinge a deformação plástica ele não consegue se recuperar.

Devido a isso é importante saber qual a tensão aplicada para que ocorra o início da deformação plástica e fim do limite elástico, para esse fenômeno é dado o nome de limite de escoamento. Em metais que possuem uma transição gradativa da deformação elástica para a plástica, desta maneira pode-se assim definir o limite de escoamento como o ponto de afastamento inicial da linearidade da curva tensão-deformação este ponto é denominado limite de proporcionalidade, ponto este que representa o início da deformação. Devido à dificuldade de mensurar a localização do ponto P observado na figura 19 por convenção é construído uma linha em paralelo a porção elástica da curva em uma pré-deformação especifica sendo normalmente de 0,002 e a tensão que intercepta essa linha com a curva de tensão-deformação é definida como limite de escoamento. (CALLISTER, RETHWISCH, 2016)

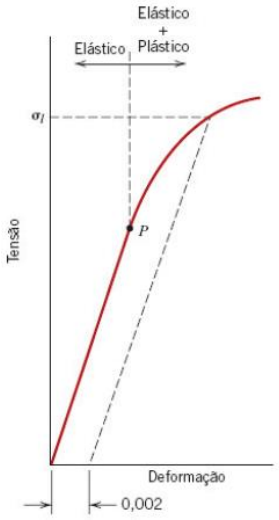

Figura 17 Demonstra a curva de tensão-deformação em um comportamento típico, representando a deformação elástica e plástica, representando o ponto P e a resistência de escoamento por meio do método da pré-deformação de 0,002 FONTE: CALLISTER, RETHWISCH, 2016

Mesmo após passar pelo limite de escoamento o material ainda irá suportar a aplicação de carga, entretanto ao passar pelo limite de escoamento o material inicia um processo de deformação plástica que é aplicado até um ponto máximo representado na figura 20 e para esse ponto é dado o nome de limite de resistência a tração que representa na curva de tensão-deformação de engenharia o ponto de máximo, até este ponto a deformação ocorre de maneira uniforme em toda a região estreita do corpo. Ao se manter a aplicação de força e passar pelo limite de resistência a tração se iniciará uma estricção no corpo de prova dentro da região estreita essa região é denominado de pescoço e toda a deformação estará presente na mesma, ocorrendo até que o corpo de prova sofra a fratura e este fenômeno demonstra a tensão no ponto de ruptura conforme é possível ver na imagem a seguir: (CALLISTER, RETHWISCH, 2016)

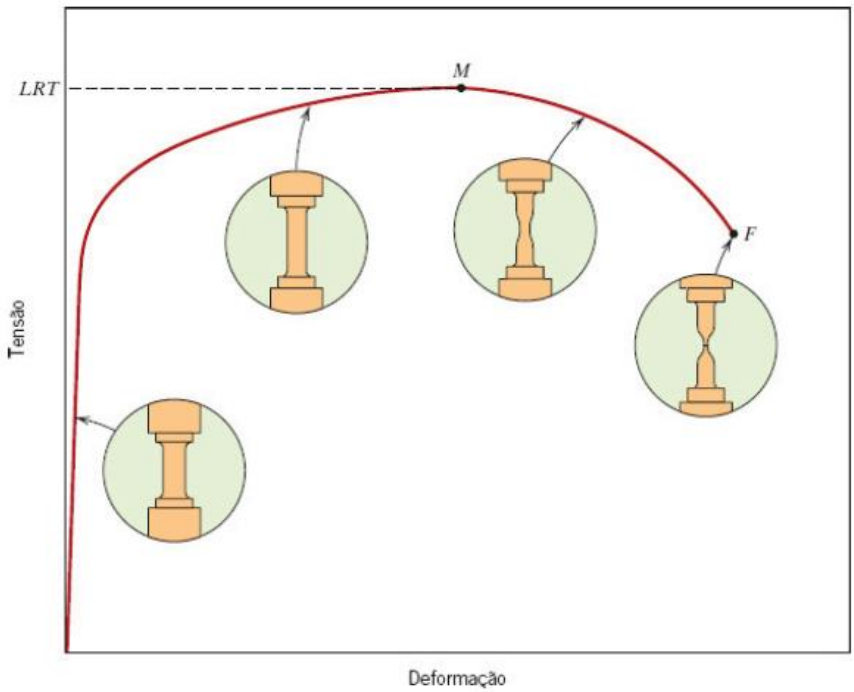

Figura 18 Curva de tensão-deformação até a fratura representada pelo ponto F, o limite de resistência a tração indicado pelo ponto M e demonstração da deformação sofrida no corpo de prova conforme a aplicação de força. FONTE: CALLISTER, RETHWISCH, 2016

Se referindo ao material ainda temos uma propriedade muito importante a ductilidade e que está também relacionado a capacidade de alongamento do material, a ductilidade é uma medida realizada para a verificação da deformação plástica até o momento da fratura, então quanto maior a deformação sofrida mais dúctil será o material. Para materiais que sofrem pouco ou nenhuma deformação denomina-se material frágil, para ilustrar melhor a diferença a figura 21 ilustra de maneira bem clara a diferença entre o material frágil e dúctil, uma maneira de representar quantitativamente a ductilidade é pelo alongamento que pode ser mensurado utilizando a formula 2.5, onde o L_f é o comprimento final após a fratura e L_o é o comprimento inicial normalmente este valor é padronizado em 2” (50mm) devido ao corpo de prova ser padrão. (CALLISTER, RETHWISCH, 2016)

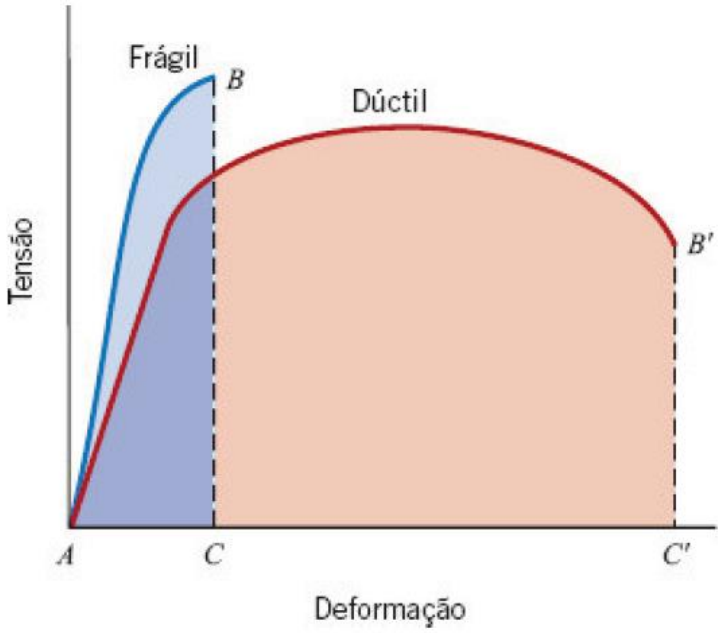

Figura 19 Representação esquemático do comportamento do material frágil e dúctil em relação a curva de tensão-deformação FONTE: CALLISTER, RETHWISCH, 2016

Alongamento percentual

$$\%AL = \frac{Lf - Lo}{Lo} \qquad (2.5)$$

Para a realização de projetos é importante ter conhecimento da ductilidade do material afim de saber quanto a estrutura irá de deformar plasticamente até o momento da fratura, para processos de conformação mecânica é mais fácil de se trabalhar com materiais dúcteis devido a seu alto grau de deformação a temperatura é um fator que pode aumentar a ductilidade do material.

2.3.1 Encruamento

O encruamento é um fenômeno que ocorre durante o trabalho a frio gerando modificações na estrutura cristalina do metal, deve-se sempre ser realizado abaixo da temperatura de recristalização. (CALLISTER, RETHWISCH, 2016).

Encruamento também é muito conhecido como endurecimento por trabalho ou trabalho a frio isso se deve ao fato de ser realizado o trabalho normalmente em

temperatura ambiente, o processo de encruamento está diretamente ligado à deformação plástica, devido a isso o fenômeno de encruamento só pode ser observado quando se exerce uma tensão acima do limite de escoamento do material (CALLISTER, RETHWISCH, 2016).

Contudo o encruamento é muito usado para aumentar as propriedades mecânicas do material, elevando os limites de resistência a tração e limite de escoamento, sendo que o aumento da resistência se dá conforme o aumento do trabalho a frio que consiste em realizar redução no material, entretanto com o aumento da propriedades devido ao encruamento também acarreta na redução da ductilidade do metal fazendo com que a cada processo de redução o material fique mais frágil suscetível a fratura, porém esta questão pode ser facilmente resolvida realizando um processo de tratamento térmico de recozimento, reduzindo as tensões que foram geradas durante o processo de trabalho a frio, podendo até recuperar o material as suas propriedades originais.

Este fenômeno do encruamento é possivel de ser explicado pela interação existente entre campos de discordâncias, sendo que conforme é realizado o trabalho a frio ocorre também um aumento na densidade de discordâncias por causa da multiplicação e formação de novas discordâncias deixando cada vez mais próximo as discordâncias entre si, existe forças de repulsão entre os campos da discordância fazendo com que exista dificuldade para a movimentação das mesmas e com isso se faz necessário um aumento na tensão para que ocorra a movimentação da discordância. (SILVA, 2017)

A microestrutura do material se altera com a realização do trabalho a frio, pois os grãos ficarão deformados e se alongam e obtendo uma orientação dos cristais preferencialmente em direção ao processo de conformação mecânica utilizado, como mostrado na figura 17 a imagem (a) observamos uma microestrutura com grãos equiaxiais sem trefilação e para auxiliar a visualizar a diferença na figura 17 imagem (b) observa-se a microestrutura do mesmo material, mas depois de sofre trabalho a frio

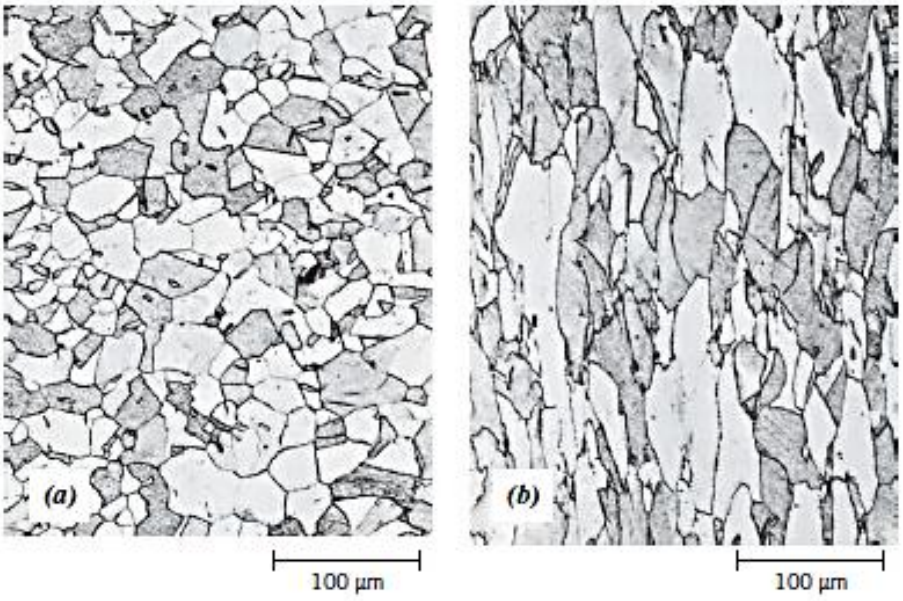

Figura 20 (a) Microestrutura de material policristalino antes da deformação. (b) após a deformação ocorreu um alongamento dos grãos x170 FONTE: CALLISTER, RETHWISCH, 2016

O aumento de resistência a tração e aumento no limite de escoamento estão diretamente ligados ao percentual de trabalho a frio, ou seja, ao sofrer processos de trabalho a frio existe o aumento das duas propriedades citadas anteriormente, em contra partida a um decréscimo na ductilidade assim como é possivel verificar nas figuras 18, 19 e 20.

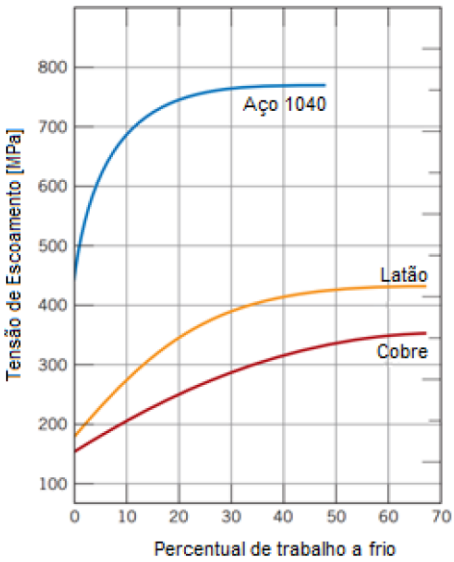

Figura 21 Aumento da tensão de escoamento em função do percentual de trabalho a frio FONTE: CALLISTER, RETHWISCH, 2016 Adaptado

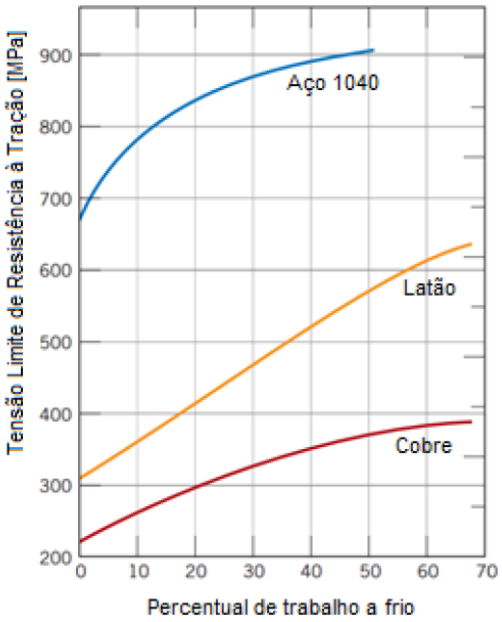

Figura 22 Aumento da tensão limite de resistência à tração em função do percentual de trabalho a frio FONTE: CALLISTER, RETHWISCH, 2016 Adaptado

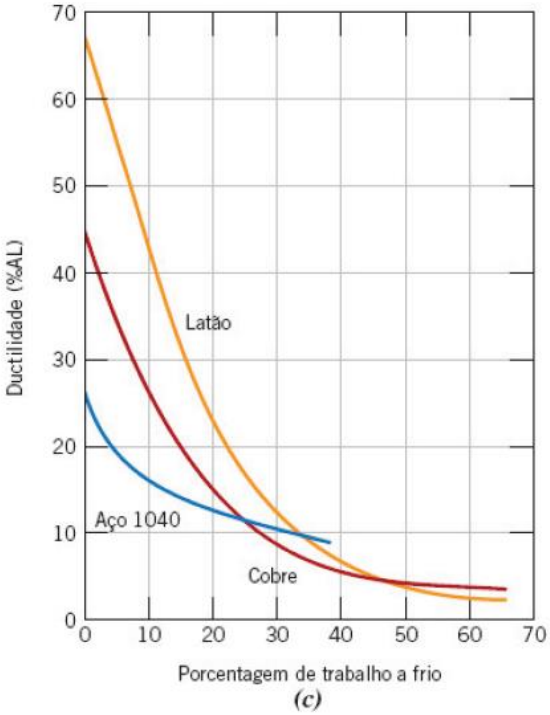

Figura 23 Diminuição do alongamento em função do percentual de trabalho a frio FONTE: CALLISTER, RETHWISCH, 2016 Adaptado

2.4 Cobre elétrico

A propriedade mais importante do cobre é com toda certeza sua capacidade elevada de condutibilidade elétrica que é inclusive referência sendo 100 % segundo International Annealed Copper Standard estando no estado recozido e puro. Possuindo uma resistividade menor que o alumínio e muito menor que o ferro considerando o mesmo estado. Apenas a prata consegue superar o cobre em sua condutibilidade elétrica, entretanto devido ao seu custo muito elevado acaba sendo inviável seu uso em escala industrial em comparação ao uso do cobre na indústria. (BARBOSA, 2012)

Para que não seja considerado uma liga o cobre deve ter ao menos na sua composição 99,3% em peso de cobre considerando também o teor de prata que pode estar incluso nativo do minério. (BARBOSA, 2012)

O cobre elétrico é muito usado comercialmente para a confecção de cabos condutores de energia, fios esmaltados, transformadores, motores geradores, bobinas e o principal uso é para realizar o processo de eletro soldagem o ramo de produtos de enlatados, como latas de alimentos, tinta, latas de aerossol, galões e baldes metálicos. Estes materiais são fornecidos em vários diâmetros diferentes e dentro de cestos de papelão como é possivel ver na figura 32

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico será responsável por descrever os métodos utilizados para a realização deste trabalho, também trará os materiais utilizados para que fosse possível realizar todo o processo.

Todo material utilizado e infraestrutura foi disponibilizado pela empresa Termomecanica, local também onde foram realizados todos os experimentos e ensaios assim como as análises dos dados obtidos.

Para a realização dos trabalhos o material escolhido foi o cobre elétrico, que é usado para a linha de fio lata com a seguinte composição: Cobre: 99,95%, Prata: 0,009%, Fósforo: 0,0013%, Oxigênio: 2ppm

O material foi fundido na própria empresa utilizando um processo de fundição chamado Upcast, o forno é abastecido com catodos de cobre e o processo para a realização da fundição se dá por indução eletromagnética.

Dando início ao processo, o cobre é pescado por hastes que ficam submersas ao banho de cobre, as hastes possuem uma matriz de grafite conforme ilustrado pela figura 26 e que são responsáveis por definir o dimensional do material de saída e possuem um sistema de resfriamento por água conforme ilustrado na figura 25 para realizar a solidificação do metal. Para iniciar a puxada do vergalhão de cobre é utilizado uma guia para puxar dentro do forno o cobre líquido que, ao entrar na haste, já começa a se solidificar, precisando ter uma velocidade de puxada específica para possibilitar o processo de solidificação.

Este processo é realizado puxando o metal liquido para cima passando pelas hastes se solidificando e sendo guiado para polias superiores para realizar o processo de descida do vergalhão para os endireitadores que guiam o fio para as polias que fazem o controle de metragem que já foi fundido conforme ilustrado na figura 24. Este material vai sendo depositado sobre discos enroladores que possuem um sistema de rotação para que seja possivel realizar um processo que permite enrolar o material conforme ilustrado na figura 24, ao chegar na quantidade desejada esse vergalhão é cortado, retirado e um novo processo se inicia, o pacote formado especificamente para esse processo é de vergalhão com 14,40mm de diâmetro conforme ilustrado na figura 24, este material é encaminhado para o equipamento de laminação 3 rolos.

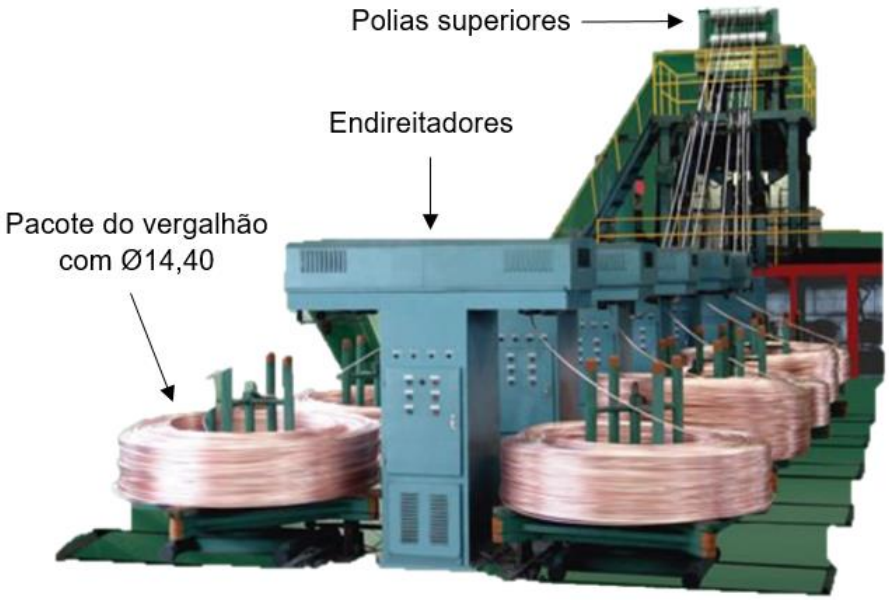

Figura 24 Forno de fundição Up-cast semelhante ao utilizado no processo FONTE: MÁQUINA..., 2020

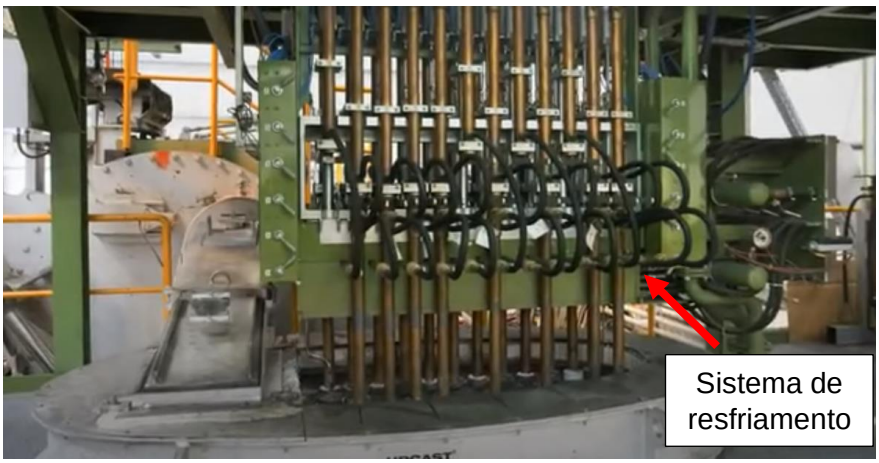

Figura 25 Hastes com sistema de refrigeração submersas no banho de cobre representando o processo FONTE: UPCAST..., 2010

Figura 26 hastes com a matriz de grafite submerso em banho de cobre com cobertura protetiva de grafite FONTE: UPCAST..., 2010

No processamento seguinte o material é encaminhado para o equipamento laminador de 3 rolos conforme ilustrado na figura 27 um equipamento fabricado na empresa Termomecanica que possui 9 gaiolas de laminação, sendo que cada gaiola possui 3 cilindros dispostos a 120ºC um do outro conforme ilustrado na imagem 28, para cada jogo de cilindro das gaiolas existe um canal com medida especifica para a realização da laminação do vergalhão e permitir que o material de saída após passar pelas nove gaiolas permaneça ainda redondo, sendo que o laminador não possui reversão.

Figura 27 Representação do laminador de 3 rolos com 9 estágios FONTE: AUTOR

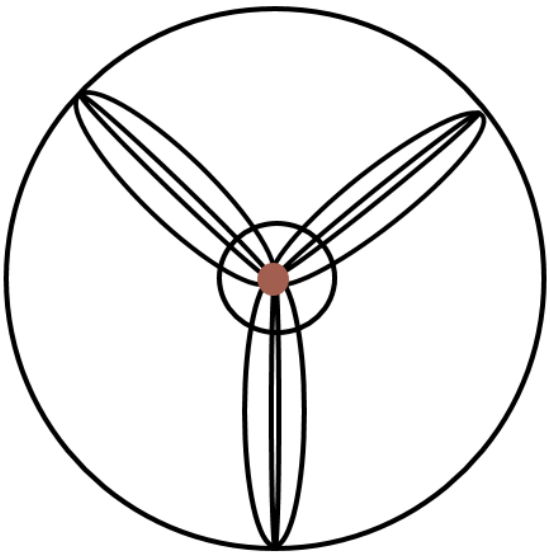

Figura 28 Representação da configuração dos cilindros na gaiola de laminação FONTE: AUTOR

Neste processo o material entra com Ø14,40 e é colocado diretamente na primeira gaiola de cilindros conforme ilustrado na figura 29 e por meio dos comandos o material é laminado sendo puxado pelo próprio cilindro e empurrado para a próxima gaiola, a laminação é realizada a frio e todo processo possui lubrificação por óleo mineral devido a compressão realizada e atrito gerado o material acaba sofrendo baixo aquecimento, o material sai com Ø8.00mm e é enrolado em um carretel onde posteriormente é desmontado para que o material forme um pacote para o próximo estágio do processo que segue-se na trefila Niehoff MM85.

Figura 29 Representação do sistema de entrada da 1ª gaiola, possibilitando visualizar um dos cilindros FONTE: AUTOR

Nesta etapa é utilizado a máquina de trefilação Niehoff MM85 que possui um sistema de trefilação múltipla conforme ilustrado na figura 30 e para o processo foram utilizados 15 passos a máquina possui também um sistema de recozimento integrado conforme ilustrado na imagem 31.

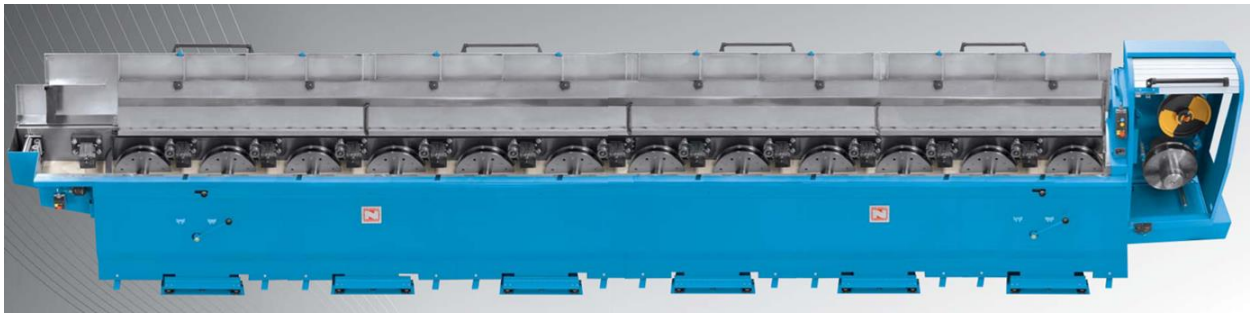

Figura 30 Conjunto de anéis utilizados na trefilação representando o processo usado FONTE: NIEHOFF..., 2016

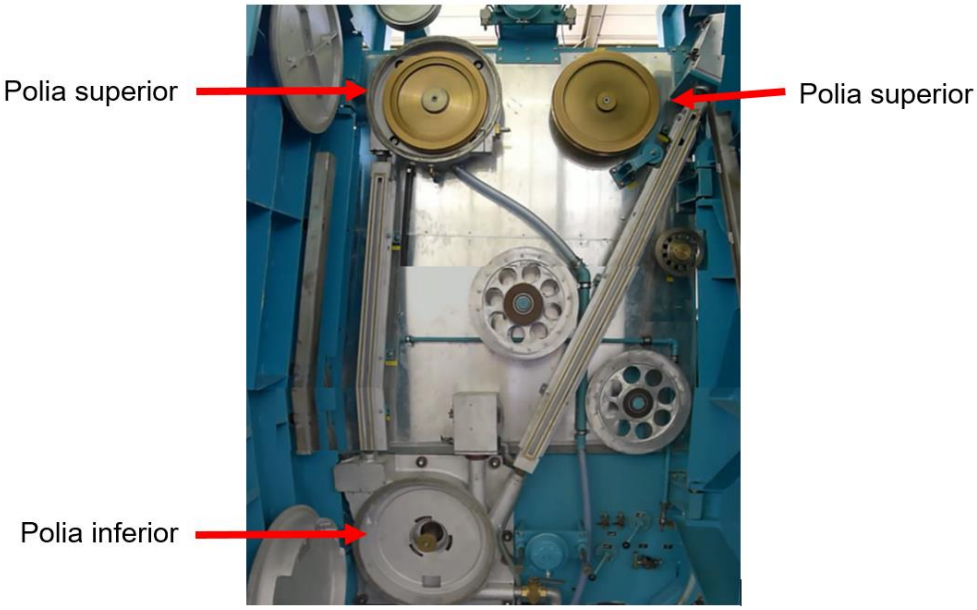

Figura 31 Conjunto de recozimento similar a usado no maquinário FONTE: NIEHOFF..., 2016

No processo de trefilação são utilizadas fieiras de diamantes com passos pré definidos pelo fornecedor da máquina conforme visto na tabela 1, para auxiliar o processo a trefilação ocorre por via úmida o lubrificante utilizado é o óleo solúvel, após a trefilação o fio passa pelo processo de recozimento elétrico em que o fio passa pelas polias de contato inferior e superior conforme ilustrado na figura 31, então a tensão elétrica aplicada é regulado pelo painel de comando sendo possivel alterar a tensão definindo o valor do fator de recozimento, sendo que o fator de recozimento é tabelado conforme recomendação do fornecedor e para a definição dos fatores é levado em consideração a velocidade e tensão aplicada, garantindo que ao passar pelo percurso

o fio será recozido de forma uniforme para atingir as propriedades desejadas, ao fim do recozimento o fio passa pelo enrolador de fios automático WF sendo depositado diretamente em cestos de papelão conforme ilustrado na figura 32, onde já estão prontos para ir para o cliente final.

Ø mm	Área mm^2
6,70	35,3
5,75	25,9
5,00	19,6
4,42	15,3
3,96	12,3
3,53	9,79
3,17	7,89
2,80	6,16
2,50	4,91
2,23	3,91
1,98	3,08
1,77	2,46
1,57	1,94
1,40	1,54
1,26	1,25

Tabela 1 Ferramentas utilizadas para realizar de trefilação conforme reduções recomendadas pelo fornecedor do equipamento FONTE: AUTOR

Figura 32 Cesto usado para alocar material acabado para envio FONTE: VÍDEO..., 2019

Foram coletadas pontas de todos os processos, a amostra do fundido com o Ø14,00mm foi retirada antes do material ser processado pelo laminador, a amostra do laminado com Ø8,00mm devido a não possuir reversão foi retirada após a última gaiola, as amostras do material trefilado com os diâmetros (6,70 – 5,75 – 5,00 – 4,42 – 3,96 – 3,53 – 3,17 – 2,80 – 2,50 – 2,23 – 1,98 – 1,77 – 1,57 – 1,40 e 1,26) foram retiradas durante o processo de setup do equipamento após cada ferramenta, devido ao percentual de redução do laminador ser de 69% para fins de obter melhores dados foram realizadas posteriormente outras reduções no equipamento de trefilação MM85, sendo as seguintes reduções demonstradas na tabela 2:

Reduções (%)	Amostra	
	Ø	Área mm^2
11	13,60	145,3
20	12,85	129,7
31	12,00	113,1
40	11,11	96,94
50	10,20	81,71

Tabela 2 Reduções realizadas no equipamento Niehoff MM85 FONTE: AUTOR

Após todas as amostras coletadas foram encaminhadas ao laboratório para a os testes para a realização deste trabalho.

Os testes foram feitos seguindo a Norma ASTME8/E8M, utilizando o equipamento Instron 4482 (Máquina de ensaio universal) conforme ilustrado na figura 33.

Para a realização do ensaio de tração as amostras foram cortadas com o comprimento de 250mm presas a garra da máquina de tração e foram submetidas a tensão até a ruptura, onde foi possivel obter os dados da tensão de escoamento e de resistência, posteriormente as amostras a porcentagem de alongamento.

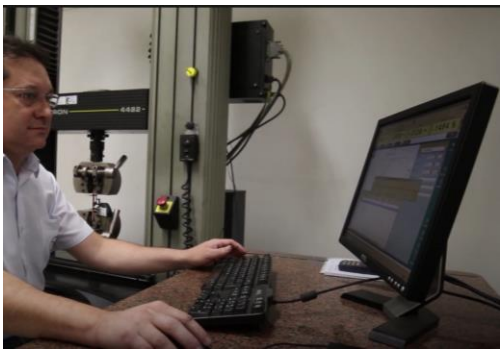

Figura 33 Máquina de tração INSTRON 4482 FONTE: VÍDEO..., 2019

No caso para obter o alongamento foi realizado com uma marcação na amostra antes do ensaio de tração e após a ruptura do material as duas partes das amostras foram unidas para a medição para fazer o cálculo do alongamento.

A metalografia foi realizada com o auxílio do microscópio ótico modelo Leica DM2700 M conforme ilustrado na figura 34, para melhor estabilidade e visualização as amostras foram cortadas e embutidas em baquelite, depois lixadas usando as lixas de granulação 150, 220, 320, 400, 600 e 1000, polidas utilizando pasta de oxido de cromo e o ataque químico das amostras foram realizadas utilizando uma solução com 60ml de etanol, 6ml de ácido clorídrico (HCl) e 5g de cloreto de ferro ($FeCl_3$), estando assim prontas para serem analisadas no microscópico.

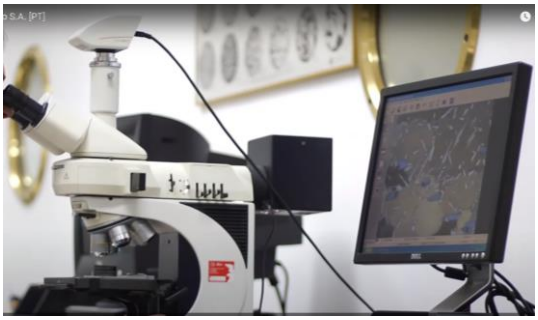

Figura 34 Microscopio ótico modelo lica DM2700M FONTE: VÍDEO..., 2019

Para a realização do calculo das reduções todas as amostras foram dimensionadas utilizando um micrometro digital com resolução de 0,001mm. Após a realização do dimensionamento das amostras foram realizados os cálculos das áreas respectivas a cada amostra coletada, o cálculo da redução foi realizado considerando sempre como área inicial a amostra com o Ø14,00mm, desta forma a redução foi calculado utilizando a formula matemática a seguir:

$$\% = \frac{Ai - Af}{Ai} \; x \; 100$$

Após todos os cálculos realizados foi possivel obter a tabela 3 em que os dados foram organizados para facilitar a visualização dos resultados de todos os cálculos

Reduções (%)	Amostra	
	Ø	Área mm^2
0	14,4	162,86
11	13,6	145,27
20	12,8	129,69
31	12,0	113,10
40	11,1	96,94
50	10,2	81,71
69	8,00	50,27
78	6,70	35,26
84	5,75	25,97
88	5,00	19,64

91	4,42	15,34
92	3,96	12,32
94	3,53	9,79
95	3,17	7,89
96	2,80	6,16
97	2,50	4,91
98	2,23	3,91
98	1,98	3,08
98	1,77	2,46
99	1,57	1,94
99	1,40	1,54
99	1,26	1,25

Tabela 3 Resultados do calculo das reduções com as respectivas áreas utilizadas nos cálculos das reduções. FONTE: AUTOR

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico será responsável por apresentar e discutir os resultados obtidos para compreender como as reduções no fio de cobre acabam alterando suas características e propriedades.

Para a realização da curva de encruamento os materiais não passaram pelo sistema de recozimento para que não ocorresse interferência na interpretação dos dados obtidos, sendo assim todas as amostras estavam com o encruamento obtidos mediante as reduções realizadas pelos processos de laminação e trefilação conforme pode ser visto na tabela 4.

Reduções (%)	Amostra		Condição da amostra
	Ø	Área mm^2	
0	14,4	162,86	Fundida
11	13,6	145,27	Trefilada
20	12,8	129,69	Trefilada
31	12,0	113,10	Trefilada
40	11,1	96,94	Trefilada
50	10,2	81,71	Trefilada
69	8,00	50,27	Laminada
78	6,70	35,26	Trefilada
84	5,75	25,97	Trefilada
88	5,00	19,64	Trefilada
91	4,42	15,34	Trefilada
92	3,96	12,32	Trefilada
94	3,53	9,79	Trefilada
95	3,17	7,89	Trefilada
96	2,80	6,16	Trefilada
97	2,50	4,91	Trefilada
98	2,23	3,91	Trefilada
98	1,98	3,08	Trefilada

98	1,77	2,46	Trefilada
99	1,57	1,94	Trefilada
99	1,40	1,54	Trefilada
99	1,26	1,25	Trefilada

Tabela 4 Demonstração das reduções realizadas, áreas encontradas para cada fieira utilizada
FONTE: AUTOR

Foram capturadas as micrografias de cada etapa de redução para que fosse possivel verificar o avanço do encruamento por meio de análise metalográfica durante todo o processo.

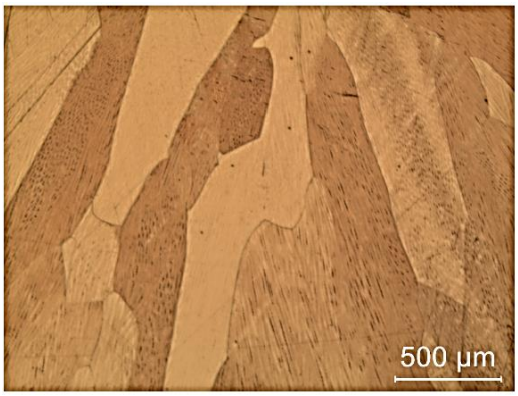

Figura 35 Ø 14,40 O material apresentou uma estrutura bruta de fusão com formação de dendritas colunares, aumento de 50x, sem redução. FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

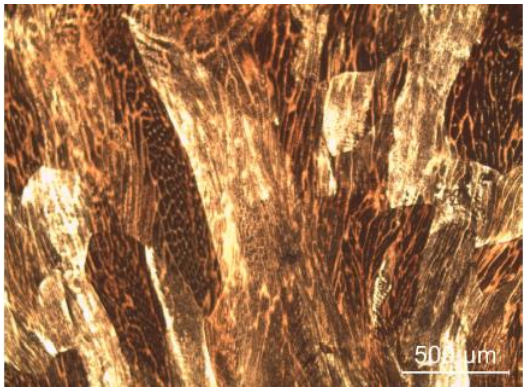

Figura 36 Ø 13,60 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 11%. FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

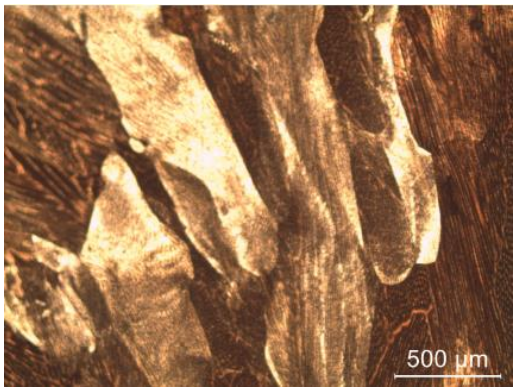

Figura 37 Ø 12,85 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 20%. FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

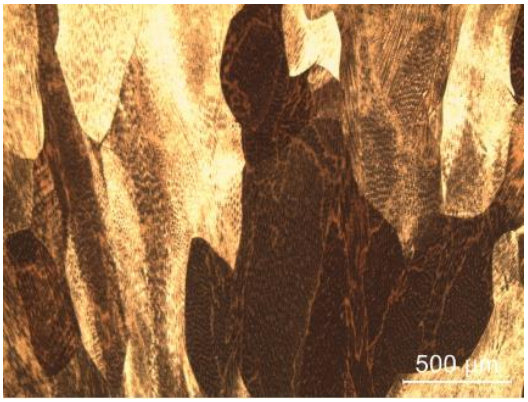

Figura 38 Ø 12,00 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 31%. FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

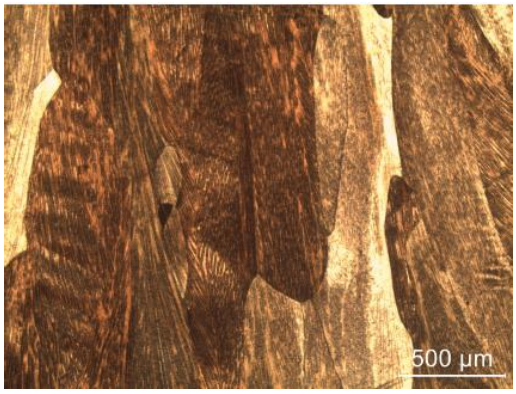

Figura 39 Ø 11,11 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 40%. FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

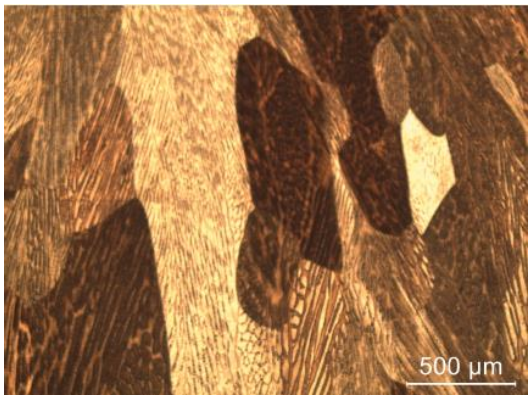

Figura 40 Ø 10,20 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 50% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

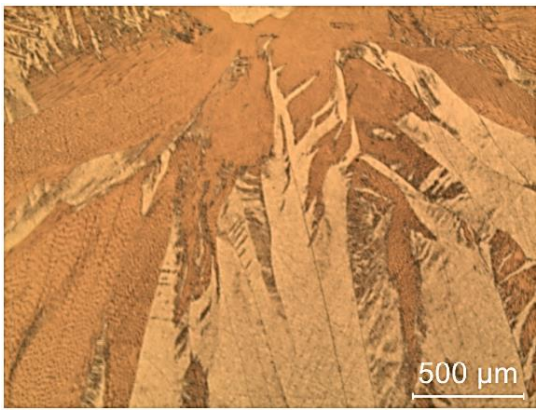

Figura 41 Ø 8,00 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 69% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

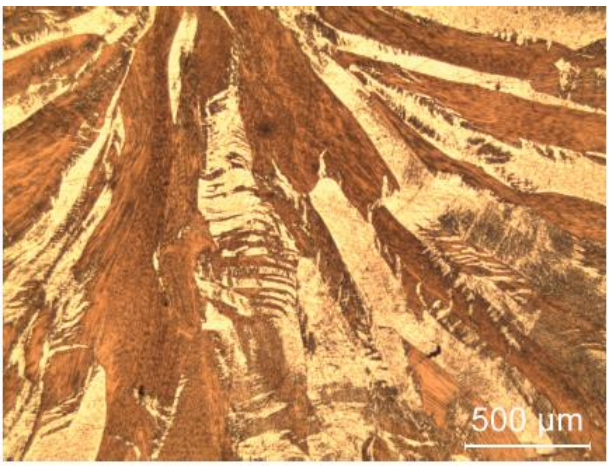

Figura 42 Ø 6,70 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 78% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

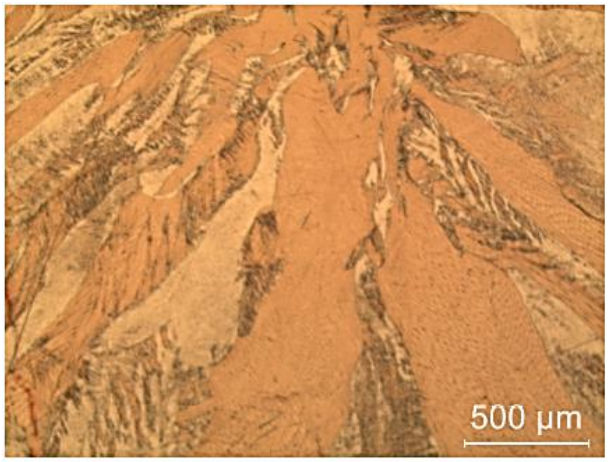

Figura 43 Ø 5,75 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 84% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

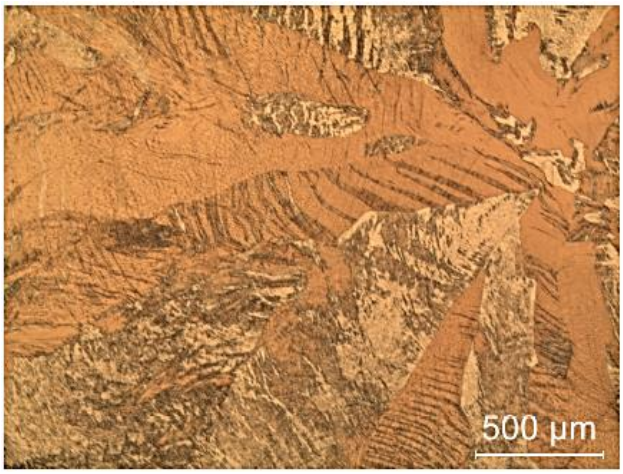

Figura 44 Ø 5,00 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 88% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

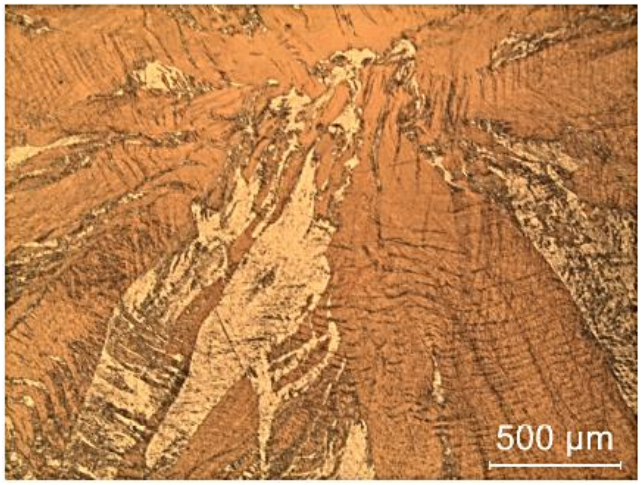

Figura 45 Ø 4,42 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 91% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

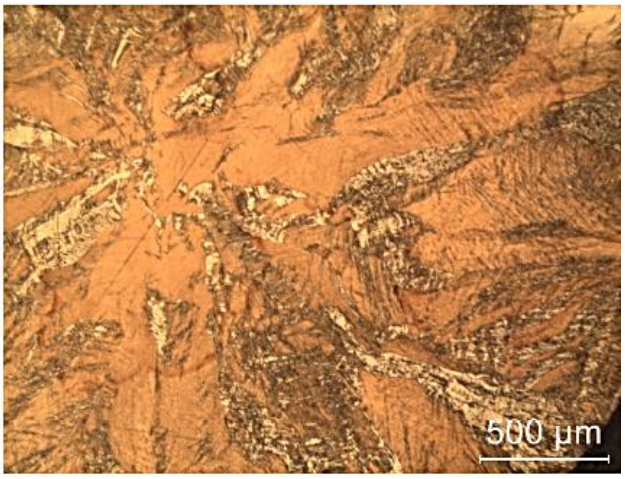

Figura 46 Ø 3,96 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 92% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

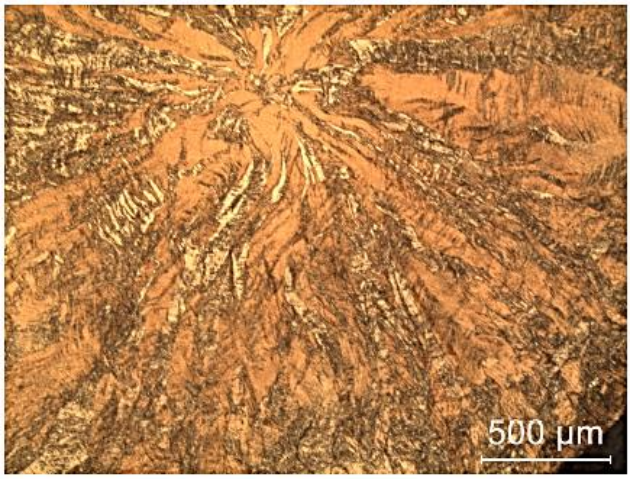

Figura 47 Ø 3,53 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 94% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

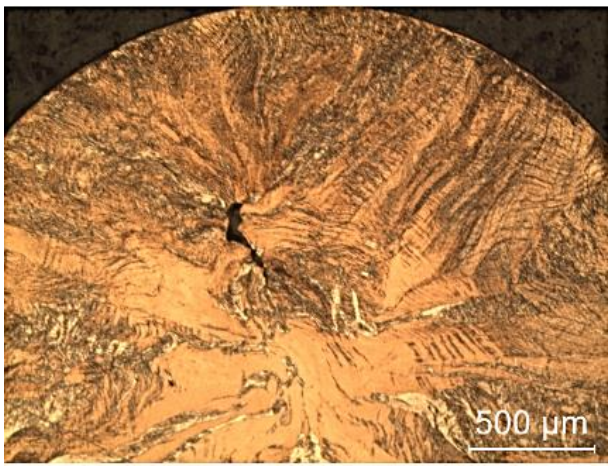

Figura 48 Ø 3,17 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos e uma trinca de fragilização, aumento de 50x, redução de 95% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

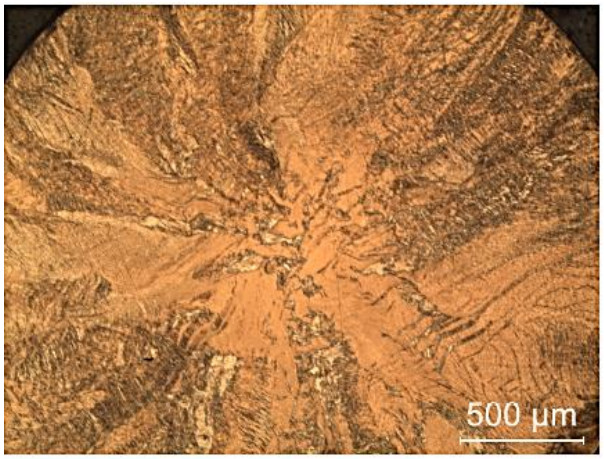

Figura 49 Ø 2,80 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 96% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

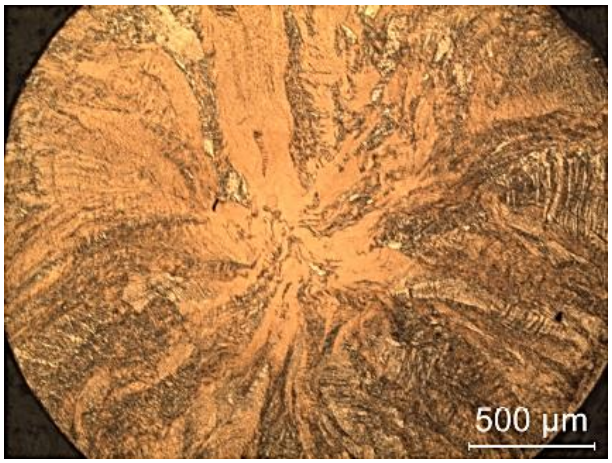

Figura 50 Ø 2,50 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 97% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

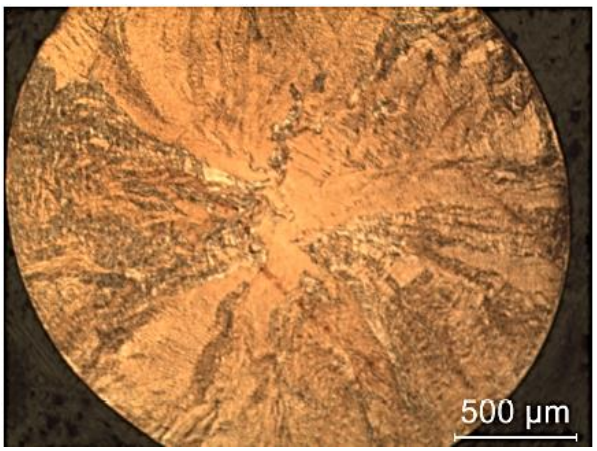

Figura 51 Ø 2,23 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 98% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

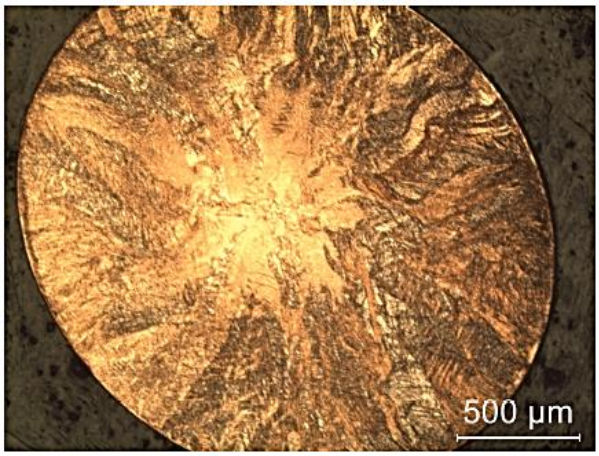

Figura 52 Ø 1,98 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 98% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

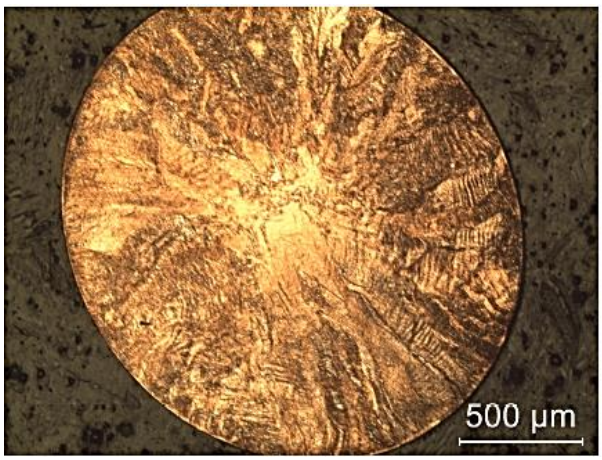

Figura 53 Ø 1,77 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 98% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

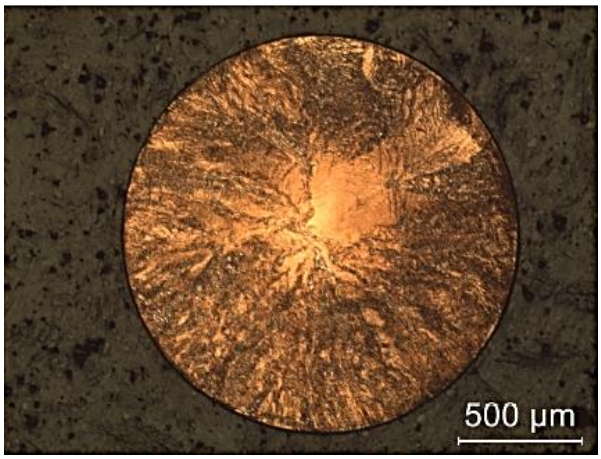

Figura 54 Ø 1,57 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 99% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

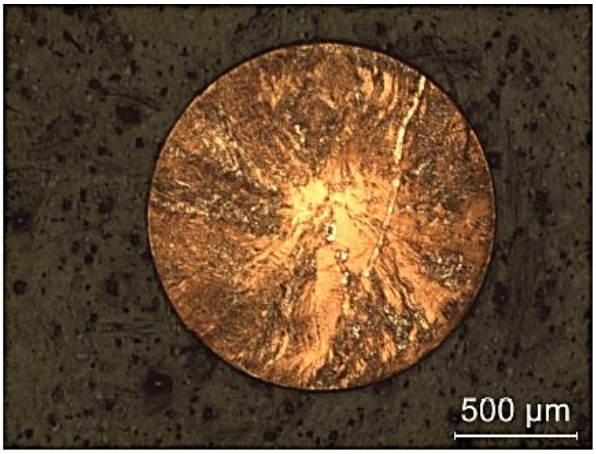

Figura 55 Ø 1,40 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 99% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

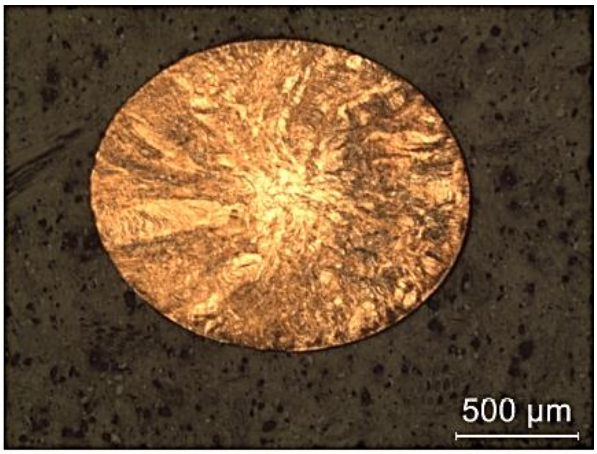

Figura 56 Ø 1,26 O material apresentou minimização crescente do estado bruto de fusão decorrente ao passe e presença de linhas de deslizamentos, aumento de 50x, redução de 99% FONTE: Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Ensaios

Após o ensaio de tração foi possivel obter todos os resultados necessários para a criação das curvas de encruamento baseado tanto no limite de resistência e escoamento.

Segue os dados do limite de resistência: A tabela 5 apresenta os valores de limite de resistência obtidos para cada amostra ensaiada.

Ensaio de Resistência a Tração			
Reduções (%)	Amostra		Limite de Resistência (MPa)
	Ø	Área mm^2	
0	14,40	162,86	180
11	13,60	145,27	234
20	12,85	129,69	255
31	12,00	113,10	286
40	11,11	96,94	323
50	10,20	81,71	344
69	8,00	50,27	351
78	6,70	35,26	368
84	5,75	25,97	379
88	5,00	19,64	387
91	4,42	15,34	389
92	3,96	12,32	391
94	3,53	9,79	401
95	3,17	7,89	406
96	2,80	6,16	410
97	2,50	4,91	415
98	2,23	3,91	416
98	1,98	3,08	429
98	1,77	2,46	438
99	1,57	1,94	438
99	1,40	1,54	452
99	1,26	1,25	462

Tabela 5 Resultados do ensaio de resistência a tração, demonstrando as reduções realizadas com as respectivas medidas, trazendo o resultado em MPa para cada redução FONTE: AUTOR

Diante das metalografias é possivel verificar o avanço microestrutural do material observando que conforme acontece a redução do diâmetro as linhas de

deslizamento aumentam em direção ao centro do fio demonstrando sinais que o fio está ficando a cada passo mais encruado e conforme aumenta-se o encruamento também existe o aumento dos limites de resistência, escoamento e diminuição do alongamento.

Mesmo diante da trinca na estrutura do fio com o Ø 3,17mm, não ocorreu nenhuma alteração aos testes realizados, pois o defeito encontrava-se apenas no pedaço da amostra que foi realizada a metalografia, sendo assim é possivel confiar no dado coletado desta amostra.

Mediante aos dados é possivel construir o gráfico para visualizar a curva de encruamento, sendo visível com a curva mostrar que quanto maior o porcentual de redução maior é o limite de resistência.

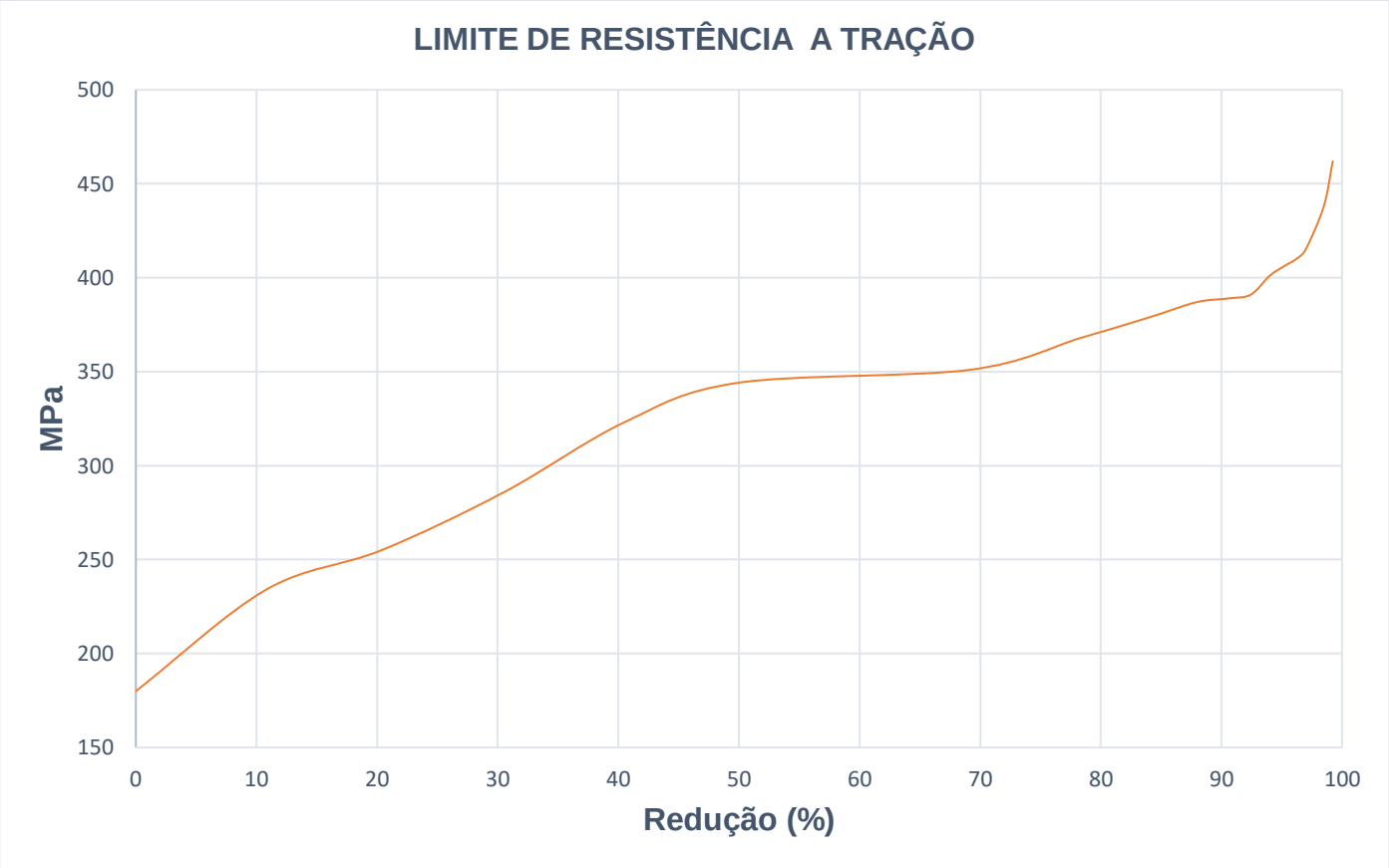

Gráfico 1 Demonstra a curva de encruamento possuindo em um dos seus eixos o percentual de redução realizado e no outro o resultado do ensaio de tração com o resultado do limite de resistência
FONTE: AUTOR

Como esperado a curva de encruamento seguiu em uma curva crescente no limite de resistência a tração, mostrando que conforme o material passa por processo de redução ocasiona o aumento das propriedades mecânicas, sendo neste caso especificamente a resistência a tração.

Na tabela 6 são apresentados os resultados de limite de escoamento obtidos nos ensaios de tração.

Limite de Escoamento			
Reduções (%)	Amostra		Limite de escoamento (MPa)
	Ø	Área mm^2	
0	14,40	162,86	127
11	13,60	145,27	229
20	12,85	129,69	249
31	12,00	113,10	279
40	11,11	96,94	312
50	10,20	81,71	330
69	8,00	50,27	346
78	6,70	35,26	363
84	5,75	25,97	373
88	5,00	19,64	374
91	4,42	15,34	382
92	3,96	12,32	384
94	3,53	9,79	386
95	3,17	7,89	401
96	2,80	6,16	405
97	2,50	4,91	410
98	2,23	3,91	411
98	1,98	3,08	424
98	1,77	2,46	433
99	1,57	1,94	433

99	1,40	1,54	448
99	1,26	1,25	458

Tabela 6 Resultados do ensaio de resistência a tração utilizando os dados do limite de escoamento, demonstrando as reduções realizadas com as respectivas medidas, trazendo o resultado em MPa para cada redução. FONTE AUTOR

Com o auxílio dos dados obtidos foi gerado um gráfico para verificar a curva em uma crescente conforme o aumento em porcentagem da redução vai acontecendo

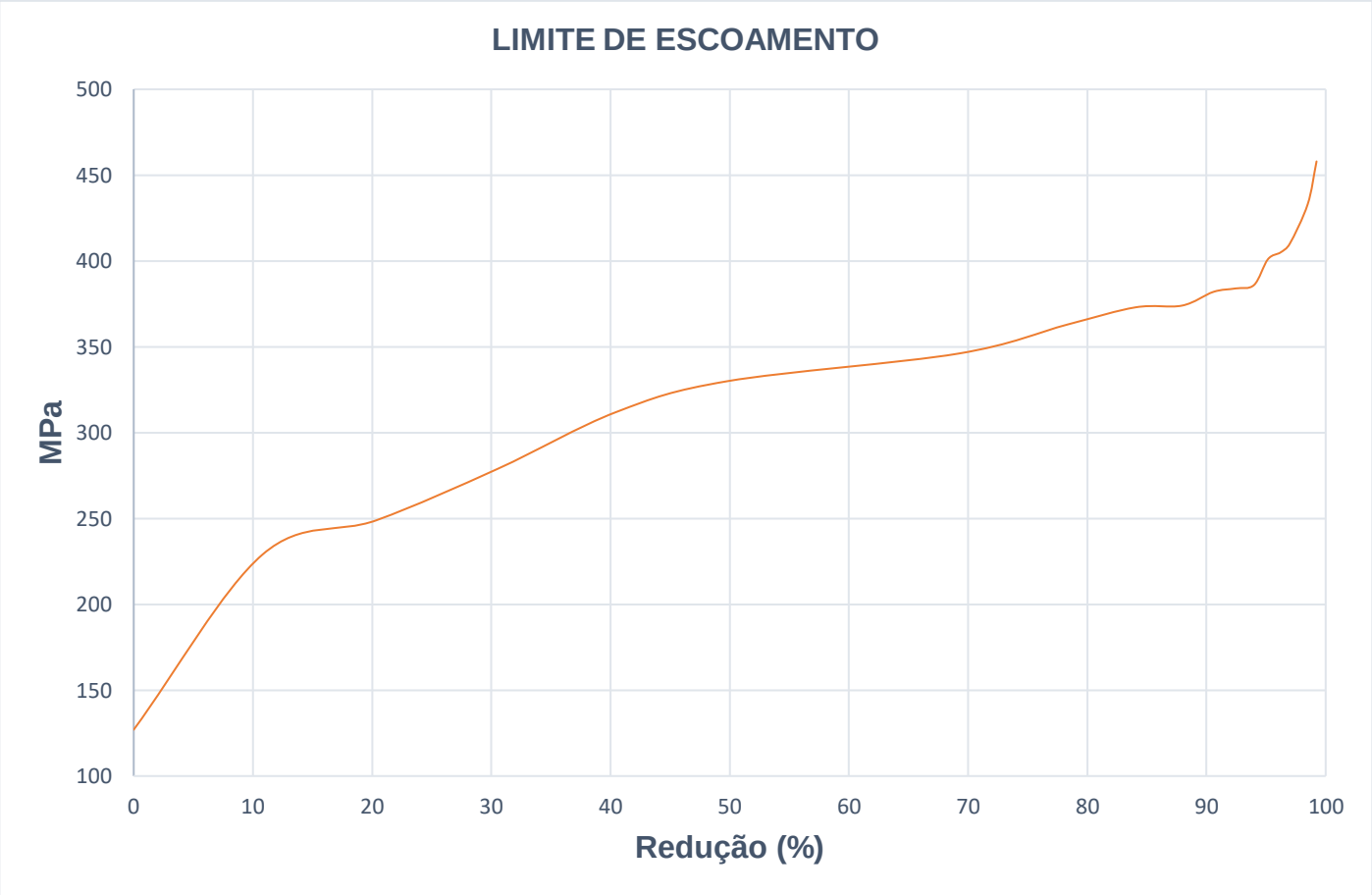

Gráfico 2 Demonstra a curva de encruamento possuindo em um dos seus eixos o percentual de redução realizado e no outro o resultado do ensaio de tração com o resultado do limite de escoamento, FONTE: AUTOR

Para a confecção de projetos as propriedades mecânicas são muito importantes, entretanto o limite de escoamento pode ser considerado dentre todas uma das mais importantes, pois para os projetos em sua grande maioria o material

não deve sofrer nenhum tipo de deformação plástica, com isso a importância de conhecer o limite de escoamento do material.

A tabela 7 a seguir demonstra os valores da razão elástica.

Ensaio de Resistência a Tração			
Reduções (%)	Limite de Escoamento (Mpa)	Limite de Resistência (Mpa)	Razão elástica
0	127	180	0,71
11	229	234	0,98
20	249	255	0,98
31	279	286	0,98
40	312	323	0,97
50	330	344	0,96
69	346	351	0,99
78	363	368	0,99
84	373	379	0,98
88	374	387	0,97
91	382	389	0,98
92	384	391	0,98
94	386	401	0,96
95	401	406	0,99
96	405	410	0,99
97	410	415	0,99
98	411	416	0,99
98	424	429	0,99
98	433	438	0,99
99	433	438	0,99

99	448	452	0,99
99	458	462	0,99

Tabela 7 Resultados com % redução / Limite de Escoamento / Limite de Resistência / Razão elástica para mostrar o comportamento da razão elástica. FONTE:AUTOR

Pode-se observar que os limites de escoamento são muito próximos do limite de resistência à medida em que a taxa de redução de área aumenta (ou em que o encruamento aumenta), a razão elástica do material se aproxima de 1, onde a razão elástica é a relação LE/LR e para esse caso daria para considerar até que o limite de são praticamente iguais.

Outro dado que também foi possivel ser coletado foi o alongamento sofrido com o material para cada redução sofrida, podemos dizer que algumas propriedades mecânicas são o inverso das outras assim podemos verificar aqui que ao ocorrer o aumento do limite de escoamento e de resistência tivemos uma diminuição do alongamento como demonstrado na tabela 8 nos dados a seguir:

Alongamento			
Reduções (%)	Amostra		Resultado (%)
	Ø	Área mm^2	
0	14,40	162,86	33,6
11	13,60	145,27	8,00
20	12,85	129,69	6,00
31	12,00	113,10	5,00
40	11,11	96,94	4,00
50	10,20	81,71	4,00
69	8,00	50,27	4,00
78	6,70	35,26	2,80
84	5,75	25,97	2,80
88	5,00	19,64	2,80
91	4,42	15,34	2,00
92	3,96	12,32	2,00
94	3,53	9,79	1,60

95	3,17	7,89	1,60
96	2,80	6,16	1,60
97	2,50	4,91	1,40
98	2,23	3,91	1,20
98	1,98	3,08	1,20
98	1,77	2,46	1,00
99	1,57	1,94	1,00
99	1,40	1,54	0,80
99	1,26	1,25	0,40

Tabela 8 Resultados do alongamento utilizando as amostras que passaram pelo ensaio de tração, demonstrando as reduções realizadas com as respectivas medidas, trazendo o resultado de alongamento em porcentagem para cada redução. FONTE: AUTOR

Com o propósito de facilitar os dados foi gerado o seguinte gráfico.

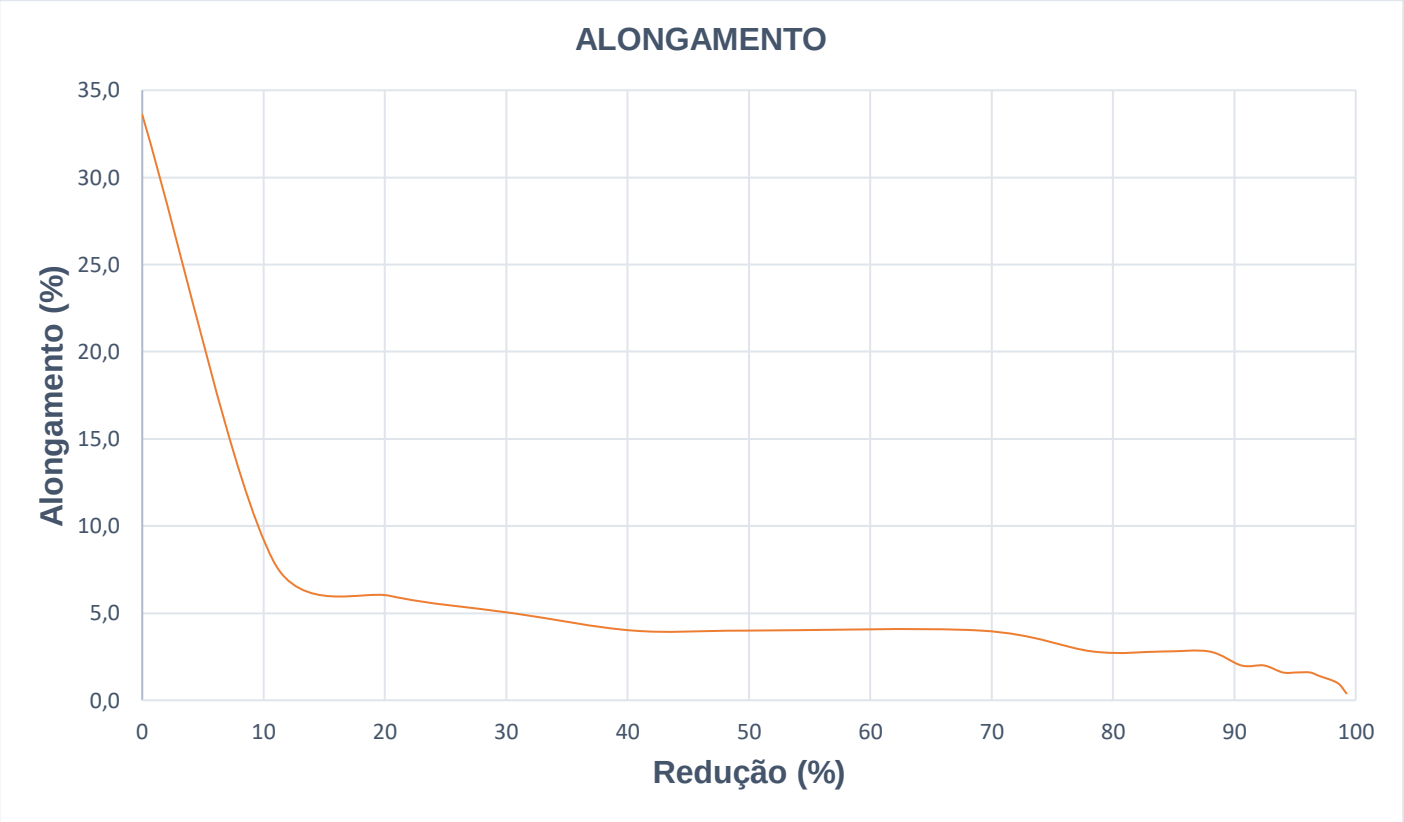

Gráfico 3 O gráfico demonstrando a curva de alongamento em % conforme se aplica as reduções FONTE: AUTOR

Assim como o esperado conforme foram ocorrendo as reduções foram ocorrendo perdas na porcentagem de alongamento, demonstrando assim que essa

propriedade segue na direção contraria ao das outras propriedades citadas neste presente trabalho.

Essas curvas se tornam importantes para os desenvolvimentos de produtos e projetos, pois pode ocorrer a necessidade de atingir uma característica especifica para uma aplicação ou até mesmo para tentar entender algum tipo de problema de processo.

5. CONCLUSÕES

Mediante a todo conteúdo apresentado para a elaboração do presente trabalho, todo o material bibliográfico lido e resultados obtidos, foi possivel verificar que o comportamento do cobre aos processos de redução sofridos tanto por laminação como trefilação atingiram o resultado esperado, onde a curva de encruamento que foi construída através dos dados obtidos seguiu como previsto uma crescente quando levado em conta os limites tanto de resistência a tração como o de escoamento e seguindo um caminho contrário a curva de alongamento seguiu em uma decrescente quando maior a redução realizada.

Demonstrando que ao realizar trabalho a frio as propriedades mecânicas são alteradas, aonde foi aumentando conforme era realizado maior percentual de trabalho a frio no fio de cobre, assim como foi possivel também averiguar que ao mesmo tempo que os limites de resistência e escoamento aumentavam a ductilidade diminuía, como foi visto pelo gráfico de alongamento onde a curva foi decrescendo, comprovando a perca considerável de ductilidade que o cobre foi tendo conforme foi aumentando o percentual de redução.

Os resultados atingiram a expectativa esperada, confirmando o que foi visto na curva teórica criada no livro do Callister, sendo assim ao fazer uma comparação entre as curvas teóricas e a curva que foi construída no presente trabalho pode-se verificar a coerência dos valores, demonstrando que os resultados obtidos com a pratica foi um sucesso.

Diante do trabalho executado também foi possivel confirmar que o cobre possui um alto grau de encruamento permitindo grandes reduções facilitando em muito processos de conformação mecânica, para que exista aplicação para esses materiais eles precisam passar por processos de recozimento em que existirá uma recuperação da microestrutura, com o uso da curva obtida com os dados pode-se realizar previsões das propriedades do material mediante a processos para confecção de algum fio, também se torna possível elaborar processos de fabricação para obter propriedades especificas.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Cássio. COBRE: História do Cobre. Universidade Federal do Rio de Janeiro. p.21 [S. l.], 2012. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/56486035/cobre.pdf?1525401008=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCOBRE.pdf&Expires=1622130912&Signature=FEom0DXopRXKYYyvLH8ORnaEVVBWJopq7-qwkmymm5YgJ4S3y9OHRVadgUcHO3iTntDiKQSsK6d6HVP6SBGE~kTI2RYxhTvlB-lbaP2nuhCYiOPQedyUBZOE~ouBDB-ygyUecgUznepN358dfAWAJ49X0o01sET4O~RPoX4LVFHf7WSRZIeUdFLmSyJ83lOgRSthNeH1kN4RUa1aFSCOqHNKfsFMn16UH3HJFqvP5-7OaG2nAd7AGisjxSp-yMb91UFIwXJ1FbTASbsgRplk0t0-ZcVdsZKmNPkbQ8HbCn~pIzPjugFtdNe~7dhTaU0i-W4zflXwVm2QW4yyIUwoXw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 26 mar. 2021.

BIOPDI. Ensaio de tração. BIOPDI. SÃO PAULO. Disponível em: https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/#:~:text=O%20ensaio%20de%20tra%C3%A7%C3%A3o%20consiste,at%C3%A9%20fraturar%20(Figura%201).. Acesso em: 12 mai. 2021.

BRESCIANI Filho, E. e outros. Conformação Plástica dos Metais 4ed, Editora da UNICAMP, 1991.

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

CALLISTER, W.D.; RETHWISCH, D. G. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 9. ed. Rio de Janeiro, LTC 2016.

CETLIN, P. R.; HELMAN, H. Fundamentos da Conformação. São Paulo: Artliber Editora, 2005

CORRÊA, E. C. .S. Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio. 2004. 233f. Tese (Doutorado) – Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DIETER, G.E. Metalurgia Mecânica 2ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

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

MÁQUINA De Upcasting. [*S. l.*], 2 jun. 2021. Disponível em: http://pt.belltronicsa.com/metal-smelting-equipment/upcasting-machine.html. Acesso em: 5 maio 2021.

NIEHOFF MM 85 test run without material. [*S. l.*: *s. n.*], 2016. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=fuKaapf4Us8. Acesso em: 1 abr. 2021.

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

R.SHIHAB, Nabil; A. ENAB, Tawakol; M. GALAL, Ahmed; S. GATAS, Magdy. Effect of Grain Size on Orange Peel in Oxygen Free Copper Wire Produced by Upcast. International Journal of Scientific & Engineering Research, India, ano 2016, v. 7, p. 1271-1275, 24 set. 2016.

RODRIGUES, ALESSANDRO ROGÉRIO DE MORAES. MELHORIA NO PROCESSO DE TREFILAÇÃO DE COBRE: ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA METALURGICA. 2013. 30 f. Dissertação (MBA - Gestão de qualidade) - Universidade Federal do Pará, Pará, 2015.

SILVA, Bruno Arruda. IMPLEMENTAÇÃO DE MÉTODO NUMÉRICO MULTIDIMENSIONAL PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DE ENCRUAMENTO DE MATERIAIS DÚCTEIS POR ENSAIO DE TRAÇÃO. 2017. 84 f.

PROJETO DE GRADUAÇÃO (ENGENHARIA MECANICA) - Universidade de Brasília, [S. l.], 2017.

UPCAST forno duplo. [*S. l.*: *s. n.*], 2010. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=fuKaapf4Us8. Acesso em: 13 maio 2021.

UPCAST® Technology The original upward casting method: UPCAST® Process. [S. l.], 2021. Disponível em: https://upcast.com/upcast-continuous-casting-technology/. Acesso em: 23 ago. 2021.

VARES, João; REGULY, Afonso. ESTUDO SOBRE A CONDIÇÃO DE TREFILABILIDADE DE AÇO MÉDIO CARBONO PRODUZIDO EM ACIARIA ELÉTRICA *. ABM Week, São Paulo, n. 54, p. 386-396, 6 out. 2017.

VÍDEO INSTITUCIONAL TERMOMECANICA [PT]. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=CiVvK9I0JRg. Acesso em: 2 mar. 2021.