

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

Etec TRAJANO CAMARGO

CURSO TÉCNICO EMMETALURGIA

DOUGLAS MOTA CARDOSO

LUAN GONÇALVES SANTIAGO

RUITER ANDRELHO FERREIRA LIMA

TIAGO ESTEVÃO DA COSTA GOMES

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS TAMANHOS DE GRÃOS NAS PONTAS
DE BARRAS DE AÇO SAE 1045**

LIMEIRA – SP

2022

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA

Etec TRAJANO CAMARGO

CURSO TÉCNICO EM METALURGIA

DOUGLAS MOTA CARDOSO

LUAN GONÇALVES SANTIAGO

RUI TER ANDRELHO FERREIRA LIMA

TIAGO ESTEVÃO DA COSTA GOMES

**ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DOS TAMANHOS DE GRÃOS NAS PONTAS
DE BARRAS DE AÇO SAE 1045**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Técnico em Metalurgia da Etec Trajano Camargo, orientado pelo Prof. João Augusto Montezano, como requisito parcial para obtenção do título de Técnico em Metalurgia.

LIMEIRA – SP

2022

AGRADECIMENTOS

- À família:
Agradecemos á nossa família pelo apoio e paciência durante a realização desse trabalho para nossa formação como profissionais técnicos.
- Aos professores (as), coordenadores (as):
Agradecemos à coordenação do curso e a todos os professores que acompanharam e incentivaram a conclusão desta jornada, pois foram essenciais à nossa formação como profissional e evolução pessoal.
- Aos colegas de turma:
Agradecemos a todos os alunos da nossa sala que estiveram conosco durante esta árdua tarefa e que são, sem sombra de dúvidas, parte dessa conquista.
- À empresa LABTESTE – Laboratório Metalúrgico (Prof. Edenil):
Agradecemos à empresa pelo fornecimento de análises que foram fundamentais para a realização desse projeto.

RESUMO

O projeto de trabalho de conclusão de curso técnico em Metalurgia tem como estudo e análise a influência dos tamanhos de grãos de uma ponta de barra de aço laminada. Na indústria metalúrgica, após a aquisição de uma barra de aço laminada, ocorre o descarte de sua ponta devido à forma irregular (oval), composição química diferente e sua microestrutura por conter grãos de tamanhos elevados. Seguindo esta linha de raciocínio, este projeto irá estudar a influência do tamanho dos grãos para que aconteça o descarte das pontas de uma barra de aço carbono. Para obter os resultados será analisado o aço SAE 1045 cujo tipo é mais procurado para a fabricação de peças por causa de sua estrutura mecânica. Por meio de obtenção de dois corpos de prova, sendo o primeiro na ponta da barra com 90 mm e o segundo na mesma barra sendo no meio com comprimento de 300 mm, serão realizados vários ensaios mecânicos e análises de sua composição química e de sua microestrutura.

Palavras-chave: Descarte; Ponta de barra; Microestrutura; Grãos diferentes; Aço SAE 1045.

ABSTRACT

The work project for the conclusion of a technical course in Metallurgy has as its study and analysis the influence of the grain sizes of a rolled steel bar tip. In the metallurgical industry, after the acquisition of a laminated steel bar, its tip is discarded due to its irregular shape (oval), different chemical composition and its microstructure because it contains large grain sizes. Following this line of reasoning, this project will study the influence of the size of the grains for the disposal of the ends of a carbon steel bar. To obtain the results, the SAE 1045 steel will be analyzed, whose type is most sought after for the manufacture of parts because of its mechanical structure. By obtaining two specimens, the first being at the tip of the bar with 90 mm and the second on the same bar being in the middle with a length of 300 mm, several mechanical tests and analyzes of its chemical composition and microstructure will be carried out.

Keywords: Discard; Bar tip; Microstructure; SAE 1045 steel.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	Objetivo Geral	9
1.2	Objetivos Específicos	9
1.3	Justificativa	9
1.3.1	Cronograma	10
2	REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1	Processo de Laminação	11
2.1.1	Introdução	11
2.1.2	Tipos de processo de laminação do aço	11
2.1.2.1	Laminação à quente	11
2.1.2.2	Laminação à frio	12
2.1.3	Laminadores	13
2.1.3.1	Tipos de laminadores	14
2.1.3.1.1	Laminadores duo	14
2.1.3.1.2	Laminadores trio	14
2.1.3.1.3	Laminadores quádruo	15
2.2	Aço SAE 1045	17
2.2.1	Composição química do aço SAE 1045	17
2.2.2	Tratamentos térmicos recomendados para o aço SAE 1045	18
2.2.2.1	Normalização	18
2.2.2.2	Recozimento	18
2.2.2.3	Têmpera	19
2.2.2.4	Revenido	19
2.2.3	Propriedades mecânicas do aço SAE 1045	20
2.3	Ensaio Mecânicos	20
2.3.1	Ensaio de tração	21
2.3.1.1	Gráfico tensão x deformação	21
2.3.1.1.1	Modulo de elasticidade	22
2.3.1.1.2	Deformação plástica	23
2.3.1.1.3	Limite elástico	23

2.3.1.1.4 Limite de proporcionalidade	23
2.3.1.1.5 Limite de resistência (LRT).....	23
2.3.1.1.6 Ductilidade.....	24
2.3.1.1.7 Tenacidade.....	24
2.3.1.1.8 Resiliência	25
2.3.1.1.9 Encruamento	25
2.3.1.1.10 Estricção ou empescoçamento.....	26
2.3.1.1.11 Coeficiente de Poisson	26
2.3.1.2 Máquina universal de ensaio.....	26
2.3.1.3 Procedimentos normalizados	27
2.3.2 Ensaio de dureza.....	29
2.3.2.1 Ensaio de Dureza Rockwell.....	29
2.3.2.1.1 Penetradores do ensaio Rockwell:	30
2.3.2.1.2 Método de medição Rockwell.....	31
2.3.2.1.3 Principais vantagens do ensaio de dureza Rockwell.....	31
2.3.2.2 Ensaio de Dureza Brinell.....	31
2.3.2.2.1 Padronização do ensaio	32
2.3.2.2.2 Principais vantagens do ensaio de dureza Brinell	33
2.4 Metalografia	34
2.4.1 Ensaio metalográfico	34
2.4.1.1 Corpo de prova ou amostra.....	35
2.4.1.2 Corte.....	35
2.4.1.2.1 Discos de corte.....	36
2.4.1.3 Embutimento	37
2.4.1.3.1 O embutimento a quente	38
2.4.1.4 Lixamento.....	38
2.4.1.5 Polimento	39
2.4.1.5.1 Processo de polimento.....	40
2.4.1.6 Ataque químico	40
2.4.1.6.1 Princípios do ataque químico	41
2.4.1.6.2 Método que será usado para obter o contraste da amostra	41
2.4.1.7 Microscopia	42
3 DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA	43
3.1 Obtenção das Amostras.....	43
3.1.1 Corte.....	43

3.1.2	Embutimento das amostras	46
3.1.3	Lixamento das amostras.....	49
3.1.4	Polimento das amostras	50
3.2	Exame ao microscópio sem ataque	51
3.2.1	Ataque químico na superfície das amostras.....	55
3.2.2	Análise das amostras com ataque nital 2%	56
3.3	Ensaio de dureza	59
3.4	Análise das macrografias das amostras 1, 2 e 3.....	62
3.5	Análise química.....	67
3.6	Ensaio de tração	68
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
5	CONCLUSÃO.....	72
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

As barras de aço carbono são utilizadas em diversas aplicações no setor da indústria brasileira e mundial em construções, fabricação de peças, entre outros. Tal mercadoria é bastante procurada por sua qualidade dimensional, fácil manuseio, preço satisfatório. As barras de aço carbono também podem ser feitas em diferentes tamanhos e formas como redondas, quadradas, chatas, entre outras formas.

Na indústria mecânica quando se obtêm uma barra, antes da usinagem dos tarugos para se transformar em peças, a barra na operação de serra/corte sofre um corte da ponta, este corte sofre um descarte. Esta ponta é descartada por alguns fatores, tais como diâmetro ovalizado, composição química irregular e tamanho dos grãos diferente do restante da barra.

Se não ocorrer o descarte desta ponta quando o tarugo for usinado o inserto ou ferramenta pode quebrar devido a superfície estar irregular(oval), se mesmo assim a peça for usinada, quando a peça sofrer um tratamento térmico de cementação e/ou têmpera e revenimento para melhorar suas propriedades mecânicas, não será possível ter uma microestrutura uniforme. Esta falta de uniformidade pode gerar trincas, fadigas excessivas entre outros problemas estruturais.

Para esta peça ter uma microestrutura com tamanho de grãos uniformes, deverá passar pelo processo de normalização, após isso, cementação ou outro tipo de tratamento térmico. Para seguir este procedimento, deve-se levantar alguns fatores tais como o custo do tratamento térmico de normalização, e que, este processo por envolver alta temperatura pode deformar uma peça já usinada. Por estes motivos, as indústrias adotaram o descarte da ponta de barras.

Este estudo tem como foco o porquê de o tamanho do grão da ponta da barra ser diferente do restante da barra. Para isso será necessário apontar, mesmo que superficialmente, todo o processo da fabricação do mesmo, desde a usina e sua laminação.

A seguir será realizado a análise química e microscópica da estrutura do corpo de prova, ensaio não destrutivo como dureza e ensaio destrutivo como tração.

Após a obtenção de todos os resultados dos ensaios será apresentado as possíveis causas desta anormalidade bem como possíveis meios de evitar que não ocorra esta diferença entre a extremidade e o restante da barra.

Lembrando que este estudo não possui o objetivo de neutralizar o descarte das extremidades de uma barra de aço carbono pelas indústrias e sim quantificar o quanto esta ponta deve ser descartada, gerando assim uma possível redução de custo.

1.1 Objetivo Geral

Analisar os tamanhos de grãos de uma barra de aço carbono laminada SAE 1045, sua microestrutura, procurando entender como o processo de laminação pode deixar uma barra com grãos de tamanhos diferentes em sua dimensão.

1.2 Objetivos Específicos

- Teorizar a laminação do aço carbono, composição química, propriedades mecânicas e tratamento térmico do aço SAE 1045;
- Descrever sobre o aço carbono laminado;
- Classificar as teorias pesquisadas;
- Enumerar as análises realizadas;
- Recolher os resultados obtidos;
- Compreender a influência que o grão irregular exerce sobre a extremidade da barra.

1.3 Justificativa

Devido ao tamanho dos grãos influenciar nas propriedades mecânicas de um aço carbono, empresas de variados seguimentos descartam as pontas de barras, com a justificativa de que elas possuem grãos de tamanhos elevados. Esses descartes sem padrões gera um custo, e por este motivo, veio a ideia de analisar uma barra através de vários ensaios para encontrar a possível solução para esse problema.

1.3.1 Cronograma

- Pesquisa sobre aços laminados, processos de laminação, tipos de laminadores;
- Pesquisa sobre Aço SAE 1045, composição química e seus tipos de tratamentos térmicos e propriedades mecânicas;
- Pesquisa sobre ensaios mecânicos em Aço SAE 1045;
- Preparação da amostra, análise microscopia, análise sobre os ensaios mecânicos e resultados obtidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Processo de Laminação

2.1.1 Introdução

A laminação é um processo de conformação mecânica que consiste em mudar a seção transversal de um metal, sendo responsável por refinar suas microestruturas. Esse processo tem como produtos metálicos as barras, lingotes, placas, fios ou tiras etc. A laminação é o processo de transformação mecânica de metais mais utilizado pois, apresenta alta produtividade e um controle dimensional do produto acabado que pode ser muito preciso.

O processo de laminação de aço é definido como a redução da área de seção transversal das peças de aço, por meio de rolos tracionados (cilindros de laminação). Durante o processo de laminação do aço a peça de trabalho é submetida a altas tensões de compressão, resultado do atrito entre os cilindros de laminação e a superfície da peça de trabalho que está sendo laminada. O que ocorre, de fato, é uma deformação plástica exercida pelas forças de compressão entre dois ou mais cilindros em rotação constante. Como resultado dessas forças temos a redução da espessura das peças, bem como um impacto direto em sua estrutura de grãos.

2.1.2 Tipos de processo de laminação do aço

Por influência da temperatura do material ao entrar em laminadores, o processo é dividido em duas etapas:

- Laminação à quente
- Laminação à frio

Na laminação a quente, o material é previamente aquecido até que alcance um nível de maleabilidade para que a conformação plástica das peças de trabalho aconteça. Por sua parte na laminação a frio é realizada em temperatura ambiente e, logo, com menor maleabilidade e plasticidade das peças de trabalho.

2.1.2.1 Laminação à quente

Figura 01 – Processo de laminação a quente.



Fonte: *Dustre, 2022.*

O processo de laminação a quente é um processo de transformação que se trabalha em altas temperaturas, acima da temperatura de recristalização do aço – normalmente superior a 927°C . Esse modo de trabalho possibilita uma transformação dimensional ampla, em função de o metal estar maleável quando passa entre os cilindros laminadores, podendo-se obter perfis com as dimensões desejadas, sejam eles chatos, quadrados, redondos, ou qualquer outro perfil em acordo com o que for especificado no projeto da peça de trabalho.

Os principais fatores de controle são, o controle da temperatura e o controle do tempo de aquecimento, sendo cruciais para que as peças de trabalho se apresentem nas condições ideais de laminação e transformação de suas dimensões, sem perder suas características e propriedades mecânicas essenciais. Os produtos laminados a quente são utilizados como implementos nas indústrias automotivas, rodoviárias, ferroviárias, na construção civil, em mineração etc.

2.1.2.2 Laminação à frio

Figura 02 – Laminação a frio



Fonte: Embalagem IDEAL, 2022.

O processo de laminação a frio ocorre com os produtos semiacabados, onde as peças de trabalho já passaram pelo processo de laminação a quente. A laminação a frio ocorre em temperatura ambiente, abaixo da temperatura de recristalização do material. Assim, o aço não pode ser laminado com tanta intensidade como na laminação a quente, pois ele apresenta maior resistência a deformação plástica. Dessa forma, a redução da área de seção também será menor.

2.1.3 Laminadores

Os laminadores são equipamentos que é composto de cilindros (ou rolos), mancais, uma carcaça chamada de gaiola ou quadro para fixar estas partes e um motor para fornecer potência aos cilindros e controlar a velocidade de rotação. As forças envolvidas na laminação podem facilmente atingir milhares de toneladas, portanto é necessária uma construção bastante rígida, além de motores muito potentes para fornecer a potência necessária.

Os laminadores podem ser montados isoladamente ou em grupos, formando uma sequência de vários laminadores em série – denominado de trem de laminação. Trabalham juntamente com os equipamentos auxiliares, ou seja, os empurradores, as mesas transportadoras, as tesouras, as mesas de elevação etc.

2.1.3.1 Tipos de laminadores

A máquina que executa a laminação, ou seja, o laminador abrange inúmeros tipos, dependendo cada um deles do serviço que executa, do número de cilindros existentes, etc.

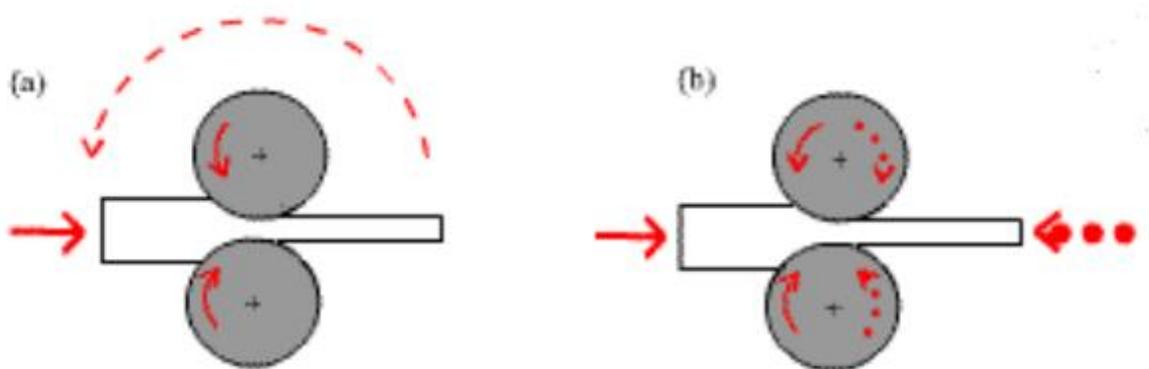
Os três principais tipos de laminadores utilizados no mercado são os:

- Laminadores duo;
- Laminadores trio;
- Laminadores quádruo.

2.1.3.1.1 Laminadores duo

O mais simples, é constituído por dois cilindros de eixo horizontais, colocados verticalmente um sobre o outro – pode ser reversível ou não. Nos duos não reversíveis (a), o sentido do giro dos cilindros não pode ser invertido e o material só pode ser laminado em um sentido. Nos reversíveis (b), a inversão da rotação dos cilindros permite que a laminação ocorra nos dois sentidos de passagem entre os rolos.

Figura 03 – Sistema do laminador do tipo duo

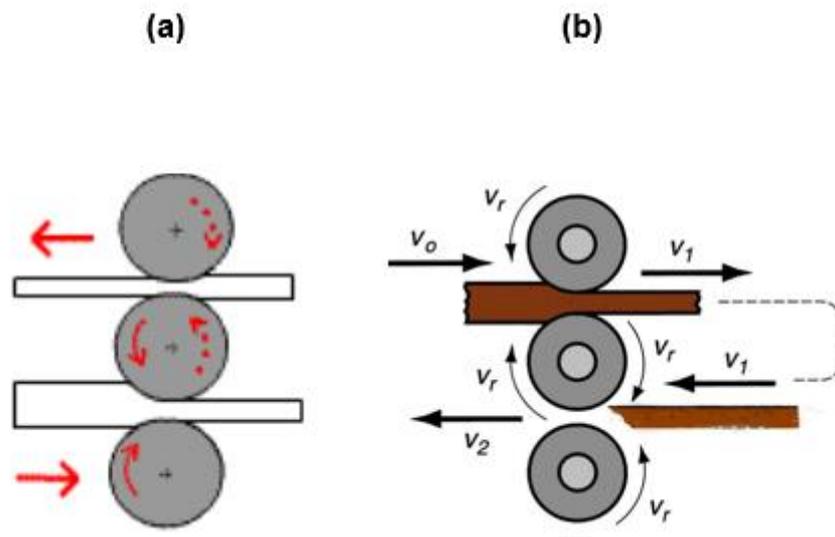


Fonte: IFSC Joinville, 2022.

2.1.3.1.2 Laminadores trio

No laminador trio, os cilindros sempre giram no mesmo sentido, porém, o material pode ser laminado nos dois sentidos, passando-o alternadamente entre o cilindro superior e o intermediário e entre o intermediário e o inferior (a). Outros modelos de laminadores trio são dotados de mesas elevatórias para passar as peças de um conjunto de cilindros a outro (b).

Figura 04 – Sistema do laminador do tipo trio

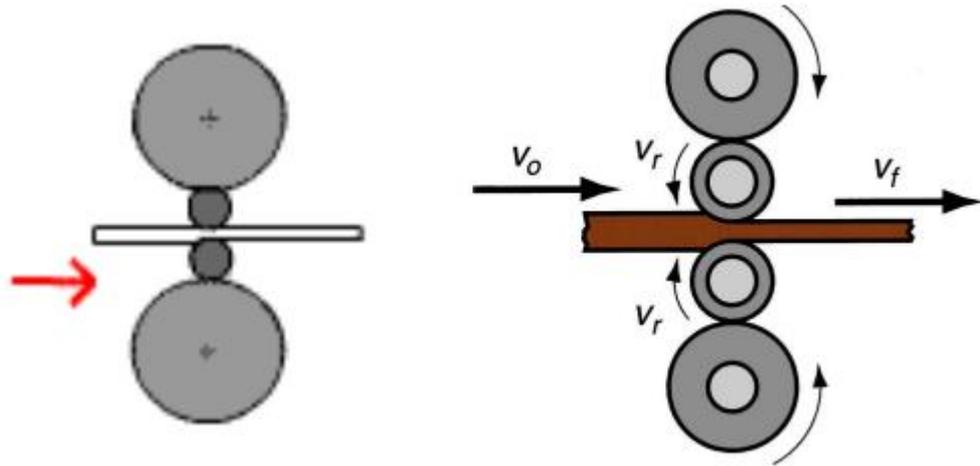


Fonte: IFSC Joinville, 2022.

2.1.3.1.3 Laminadores quádruo

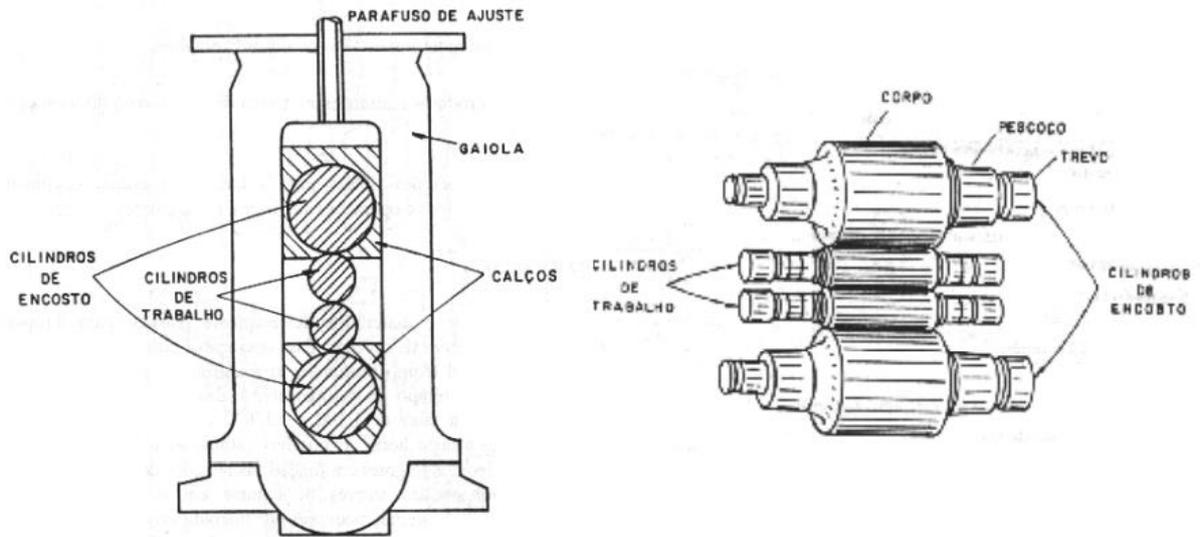
Os laminadores do tipo quádruo são mais utilizados em trabalho de pequeno diâmetro, assim tendo como produto materiais de dimensões mais finas. Eles possuem os cilindros podem fletir, e devem ser apoiados por cilindros de encosto.

Figura 05 – Sistema do laminador do tipo quádruo



Fonte: IFSC Joinville, 2022

Figura 06 – Componentes de um laminador quádruo



Fonte: IFSC Joinville, 2022

2.2 Aço SAE 1045

Figura 07 – Barras laminadas de aço SAE 1045.



Fonte: Diferro, 2022.

O aço SAE 1045 segundo a NBR 172/2000 é classificado como aço para construção mecânica ao carbono especial, aplica-se na fabricação de eixos, engrenagens, peças para a indústria mecânica em geral, implementos agrícolas e rodoviários, hastes para cilindros hidráulicos, entre outros. Esta última consideração deve-se as exigências do ensaio de impacto no estado temperado e revenido.

2.2.1 Composição química do aço SAE 1045

Tabela01

Composição química do aço SAE 1045 (porcentagem em massa).

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)
0,43 -0,50	0,60- 0,90	0,04	0,05	0,10 - 0,60

Fonte: próprio autor, 2022.

O aço SAE 1045 tem em sua composição química a presença de o carbono (C), manganês (Mn), fósforo (P), enxofre (S) e silício (Si).

2.2.2 Tratamentos térmicos recomendados para o aço SAE 1045

O tratamento térmico é uma prática comum na metalurgia, que tem como finalidade melhorar as propriedades do metal que será utilizado. Entre os aspectos melhorados estão a sua vida útil, propriedades mecânicas, melhorias na proteção contra a oxidação, entre outras características que compõem um bom metal.

Os aços de construção ao carbono geralmente são fornecidos sem tratamento térmico. Contudo para se obter melhores características para o metal, é recorrido a tratamentos térmicos convencionais, como:

- Normalização;
- Recozimento;
- Têmpera;
- Revenido.

2.2.2.1 Normalização

A normalização do aço é para quando se deseja refinar o grão do material, tendo em vista que aços com maiores grãos tendem a apresentar maior heterogeneidade de propriedades e maior fragilidade, sendo que o refina garante maior homogeneidade e maior tenacidade. No caso do aço SAE 1045 teria que aquecer entre 840 a 870 °C, manter, em média, por 20 minutos por cada centímetro de espessura do material nesta faixa de temperatura e resfriar ao ar. Resultando em uma estrutura de pequenos grãos de ferrita e perlita fina.

2.2.2.2 Recozimento

Esse tratamento térmico consiste em um material sendo exposto a temperaturas elevadas por um grande período e após isso, sendo resfriado lentamente. Geralmente esse processo é utilizado para aliviar tensões, reduzir dureza, aumentar a ductilidade e tenacidade, bem como produzir uma microestrutura específica.

O recozimento é realizado em três etapas:

- Aquecimento até a temperatura desejada;
- Manutenção ou encharque nessa temperatura;

- Resfriamento lento, normalmente em temperatura ambiente ao ar ou dentro do forno desligado.

O recozimento do aço ABNT 1045 consiste em o aquecer entre 650 e 700 °C, manter, em média, por 20 minutos por cada centímetro de espessura da peça nesta faixa de temperatura e resfriar no forno.

2.2.2.3 Têmpera

Esse tratamento consiste no aquecimento de certo material até uma temperatura de aproximadamente 800°C (completa austenitização) e em seguida resfriada bruscamente em água, óleo ou em meios de têmpera de composição química especial. O objetivo do tratamento de têmpera é obter martensita na estrutura do aço, microconstituente muito duro e frágil. Para tanto, as peças devem ser resfriadas rapidamente, para evitar a formação de ferrita, perlita, bainita, microconstituente mais moles que a martensita.

O processo para a têmpera do aço SAE 1045 consiste em aquecer entre 820 a 850 °C, manter nesta faixa de temperatura por 5 a 10 minutos por cada centímetro de espessura do material e resfriar em água.

2.2.2.4 Revenido

Após a realização da têmpera e obtenção da martensita, é realizado um aquecimento em temperaturas entre 250 e 650 °C para eliminar tensões internas e aumentar a tenacidade e ductilidade sem grandes diminuições na dureza. Após isso, é obtido a martensita revenida, que é apropriada para um número maior de aplicações. Durante o processo de revenimento, a fase martensítica supersaturada em carbono se transforma em uma microestrutura com matriz de ferrita com partículas de cementita dispersas. Essa estrutura é tão dura quanto a martensita, só que com maior tenacidade. O tamanho das partículas de cementita são fundamentais na definição das propriedades – quanto maiores, menor a dureza, mas maior a ductilidade.

Para o revenimento do aço SAE 1045 é necessário aquecer a peça entre 530 a 670 °C e permanecer nesta temperatura por no mínimo 1 hora.

2.2.3 Propriedades mecânicas do aço SAE 1045

O aço SAE 1045 é um aço carbono com médio teor de carbono em sua composição química, com resistência mecânica entre 570 e 700 MPa e dureza Brinell entre 170 e 210HB.

- Possui razoável usinabilidade e boas propriedades mecânicas na condição normalizada ou laminada;
- Resistência à tração: 585 MPa ou 84800 psi;
- Módulo elasticidade: típico do aço 1045 é de 190 GPa (27557 ksi) podendo chegar a 210GPa (30458 ksi);
- Coeficiente de Poisson: Varia entre 0,27 e 0,30;
- Alongamento base de medida de 50 mm: 16%;
- Dureza Brinell: 163 HB.

2.3 Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos são métodos utilizados para medir diversos fatores com o objetivo de entender o comportamento do material que se é utilizado. Isso é feito por meio da análise de suas propriedades mecânicas em várias condições de uso. O ensaio mecânico é muito procurado devido ao seu ótimo custo-benefício, sendo capaz de alinhar alto desempenho, com segurança e um baixo valor. Outra característica desse método é que ele pode ser destrutivo ou não destrutivo, dependendo do tipo de resultado buscado. Algumas das condições de uso mais comuns envolvem temperaturas, tipo de cargas e sua frequência de aplicação, tempo de desgaste e deformabilidade, entre outras.

Veja a seguir alguns tipos de ensaios mecânicos que serão utilizados nesta pesquisa:

- Tração: técnica destrutiva que submete o material de desejo ou produto em questão a um grande esforço de alongamento e esticamento até sua ruptura.
- Dureza: método utilizado para obter informações através do resultado da profundidade de penetração, que acontece por meio da aplicação de uma carga leve e logo seguida outra de maior intensidade.

Os ensaios mecânicos podem ser realizados em protótipos ou em corpos de prova. Sendo que os ensaios de protótipos são para a verificação do comportamento de material sob as condições de uso de objeto, se o material apresenta características adequadas a sua função. E quando o ensaio é feito em corpos de prova, os resultados são mais gerais, pois os resultados obtidos servem para testar as propriedades mecânicas do material.

2.3.1 Ensaio de tração

Para que profissionais que trabalham no desenvolvimento de um novo produto saibam se o material apresenta características de segurança e eficiência com relação a seu uso, é essencial que conheçam e tenham em mente sobre as propriedades mecânicas do material utilizado no projeto, tanto na conferência de matéria prima quanto no produto acabado.

O ensaio de tração tem grande importância, uma vez que serve para averiguação de suas propriedades, realização de análises de risco, avaliar possíveis falhas e verificar qual é o comportamento do material sob determinadas condições de trabalho.

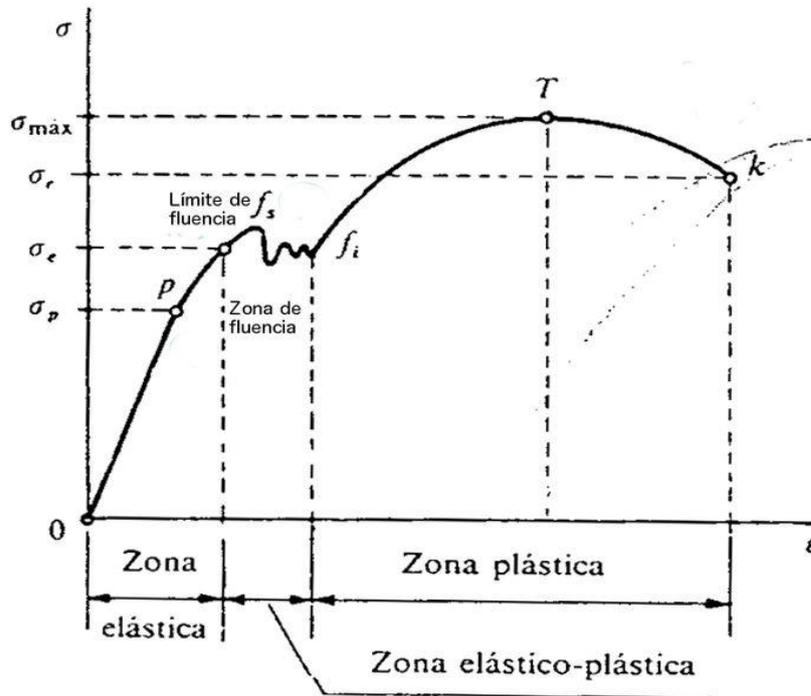
O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força de tração axial em um corpo de prova padronizado, fazendo-o ter deformação na direção do esforço, alongando o até fraturar.

Por esse ensaio é possível determinar o gráfico de tensão deformação e medir as propriedades de resistência à tração, módulo de elasticidade, tensão no escoamento, tensão na ruptura, deformação no escoamento, deformação na ruptura, entre outros aspectos.

2.3.1.1 Gráfico tensão x deformação

O ensaio de tração avalia diversas propriedades mecânicas dos materiais, através de características extraídas da análise do gráfico gerado por esse ensaio, conhecido como diagrama de tensão x deformação, sendo de mega utilidade para complementar a análise matemática envolvida no processo.

Figura 08 – Gráfico tensão x deformação:



Fonte: Wikipedia, 2022.

A partir das medidas de cargas e os respectivos alongamentos, constrói-se o gráfico de tensão x deformação, a qual mostra essa relação para diversos tipos de metais. Com análises desses gráficos é possível fazer o levantamento de inúmeras informações que serão apresentadas a seguir:

- Resistência à tração (σ_u);
- Limite de escoamento (σ_e);
- Módulo de elasticidade (E);
- Módulo de resiliência (U_r);
- Módulo de tenacidade (U_t);
- Ductilidade;
- Coeficiente de encruamento (n);
- Coeficiente de resistência (k).

2.3.1.1.1 Modulo de elasticidade

ele fornece uma indicação da rigidez do material assim dependendo das forças de ligações Inter atômicas, o que explica seu comportamento inversamente proporcional à temperatura. É determinado pelo quociente da tensão convencional pela

deformação convencional ou alongamento específico na região linear do diagrama tensão deformação, dada por:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{P \cdot l_0}{S_0 \cdot \Delta l} \quad (1)$$

Onde

- E = módulo de elasticidade (Pa);
- σ = tensão aplicada;
- ε = deformação.

2.3.1.1.2 Deformação plástica

À medida que o material continua sofrendo deformação além do regime elástico, a tensão não é mais proporcional à deformação e com isso a lei de Hooke não será mais obedecida, ocasionando em uma deformação permanente e irrecuperável denominada deformação plástica. Para a maioria dos materiais metálicos, a transição do comportamento elástico para o plástico é gradual, ocorrendo uma curvatura no ponto de surgimento da deformação plástica, a qual aumenta mais rapidamente com a elevação de tensão.

2.3.1.1.3 Limite elástico

O limite de elasticidade de um material seria quando o mesmo atingisse a tensão máxima que ela possa suportar sem sofrer deformações permanentes após o término e retirada da carga externa. Ou seja, o material retorna ao seu estado normal elástico depois de sofrer uma deformação dentro de seu limite elástico.

2.3.1.1.4 Limite de proporcionalidade

Esse é o limite ao qual o material não apresenta mais linearidade, a tensão aplicada não é mais proporcional ao alongamento.

2.3.1.1.5 Limite de resistência (LRT)

O limite de resistência à tração é o que corresponde à tensão máxima que pode ser sustentada por uma estrutura sofrendo o processo de tração. Após o escoamento a tensão necessária para continuar o processo de deformação plástica em materiais metálicos aumenta até alcançar um valor máximo e a partir desse ponto a tensão

diminui até a fratura do material. Isso ocorre por causa da rápida diminuição da seção resistente do corpo de prova ao se ultrapassar a tensão máxima, sendo apresentada pela seguinte equação:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (2)$$

Onde:

- F = força (carga) aplicada em uma direção ortogonal à seção reta;
- A_0 = área da seção do corpo de prova antes da aplicação da força.

2.3.1.1.6 Ductilidade

Representa uma medida do grau de deformação plástica que o material suportou até a fratura. Um material que experimenta uma deformação plástica muito pequena ou mesmo nenhuma quando da sua fratura é chamado de frágil. A ductilidade pode ser expressa quantitativamente tanto pelo alongamento percentual como pela redução de área percentual. Pode-se obter o alongamento percentual AL% calculando pela seguinte maneira:

$$AL\% = \left(\frac{L_f - L_0}{L_0} \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

- L_f = comprimento da porção útil do corpo de prova no momento da fratura;
- L_0 = o comprimento útil original.

Um conhecimento da ductilidade dos materiais é importante, pois dá uma indicação do grau segundo o qual uma estrutura irá se deformar plasticamente antes de fraturar, além de informar o grau específico de deformação permissível durante operações de fabricação.

2.3.1.1.7 Tenacidade

A tenacidade representa a capacidade que o material tem em absorver energia até a sua fratura. É quantificada pelo módulo de tenacidade, onde a energia absorvida por unidade de volume, desde o início até a fratura da amostra no ensaio de tração. Uma

forma de avaliar a tenacidade em um ensaio de tração é considerar a área total da curva tensão-deformação tanto de um material frágil quanto de um material dúctil.

Para a determinação dos valores do cálculo da área da curva usam-se as seguintes expressões:

Material dúctil:

$$U_t = \frac{\sigma_e \sigma_u}{2} \varepsilon_f \quad (4)$$

Material frágil:

$$U_t = \frac{2}{3} \sigma_u \varepsilon_f \quad (5)$$

(Ambos requerem a conversão: $N * m/m^3$).

2.3.1.1.8 Resiliência

A resiliência é definida como a capacidade de um material absorver energia quando é deformado elasticamente, e após o descarregamento recuperar essa energia. Os materiais resilientes são aqueles que possuem limites de escoamento elevados e módulos de elasticidade pequenos, normalmente ligas onde são utilizadas na fabricação de molas.

Pode ser representada pela seguinte equação:

$$U_f = \frac{(\sigma_{esc}^2)}{2\varepsilon} \quad (6)$$

Onde:

- U_f = Módulo de resiliência;
- σ_{esc} = tensão de escoamento.

2.3.1.1.9 Encruamento

O encruamento é um fenômeno modificativo da estrutura dos metais, em que a deformação plástica causará o endurecimento e aumento de resistência do metal. O encruamento de um metal pode ser definido então como sendo o seu endurecimento por deformação plástica.

2.3.1.1.10 Estricção ou empescoçamento

Pode ser considerado como uma “formação de pescoço” ou “estiramento” que ocorre quando o aumento da dureza por encruamento é menor que a tensão aplicada, o que resulta em uma grande deformação no material. Fica localizado na região em uma seção reduzida em que grande parte da deformação se concentra.

2.3.1.1.11 Coeficiente de Poisson

O coeficiente de Poisson mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção de aplicação da carga uniaxial. Os valores de ν para diversos metais estão entre 0,25 e 0,35 e no máximo 0,50. O coeficiente de Poisson é definido então como sendo o valor positivo ν que satisfaz a relação:

$$\nu = -\left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}\right) = -\left(\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}\right) \quad (7)$$

Onde ε é representado a extensão lateral ou transversal, e a extensão segundo a direção do esforço uniaxial aplicado.

2.3.1.2 Máquina universal de ensaio

Figura 09 – Estrutura do equipamento para ensaio de tração.



Fonte: Biopdi, 2022.

O ensaio de tração pode ser realizado em uma máquina universal de ensaio, que permite realizar diversos tipos de ensaios mecânicos.

Essas máquinas utilizadas para o ensaio podem ser hidráulicas ou eletromecânicas, sendo que a eletromecânica é baseada em um motor elétrico que permite maior controle sobre variação de velocidade e deslocamento da travessa móvel.

Para traçar o gráfico de tensão deformação, a força aplicada é medida instantaneamente utilizando uma célula de carga, enquanto o alongamento é medido através do encoder do equipamento ou por extensômetros.

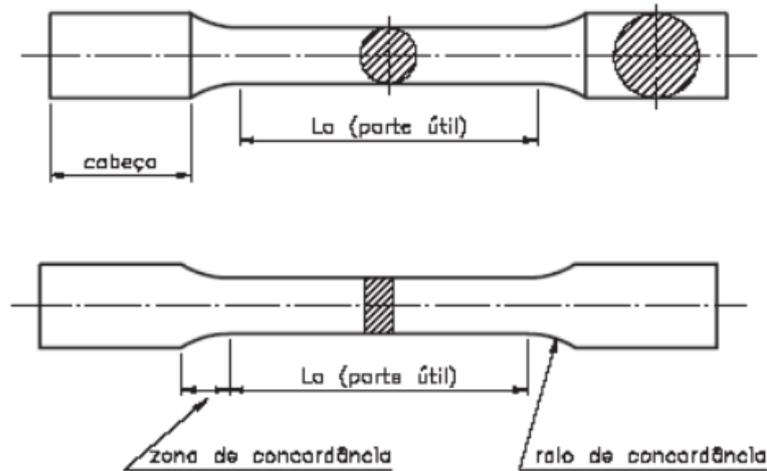
O equipamento possui um software que permite o controle e ajuste dos parâmetros e funções bem como permite a visualização dos resultados do ensaio permitindo a geração de relatórios que podem ser salvos em um computador conectado ao equipamento para posterior análise.

2.3.1.3 Procedimentos normalizados

Para realização do ensaio coloca-se adequadamente o corpo de prova preso às garras, ajustando manualmente a altura da barra tracionada, de modo que as garras estejam alinhadas e que não haja nenhuma força atuando na célula de descarga. Define-se no software o método no qual será realizado o ensaio (tração), as dimensões do corpo de prova, velocidade do ensaio e de retorno, os limites de operação do equipamento, a forma de apresentação dos resultados, entre outros. O ensaio termina quando o material se rompe.

Corpo de prova: O comprimento e formato do corpo de prova, a velocidade de aplicação da carga e as imprecisões dos ensaios afetam diretamente nos resultados obtidos. A fim de tornar os ensaios reproduzíveis, normas técnicas que garantem a padronização das dimensões e formatos dos corpos de prova são utilizadas, como ASTM E8M e ABNTMB.

Figura 10 – corpo de prova para ensaios de tração.



Fonte: USP, 2022.

A forma e dimensões do corpo de prova variam de acordo com a rigidez do material ensaiado, com a capacidade da máquina e com a geometria do produto acabado de onde foi retirado, de modo a garantir que ocorra a fratura na região útil do corpo de prova para poder validar o ensaio.

As propriedades mecânicas do material são medidas na parte útil do corpo de prova (região L_0) e as regiões extremas que são fixadas nas garras da máquina, são conhecidas como cabeças (D). As cabeças devem ter seção maior do que a parte útil para que a ruptura do corpo de prova não ocorra nelas e suas dimensões e formas dependem do tipo de fixação da máquina.

Em geral, corpos de prova apresentam seção transversal circular quando produzidos por fundição ou torneados a partir de um produto acabado cilíndrico, mas também podem apresentar seção transversal retangular quando retirados de chapas, nesse caso, deve-se atentar para a direção que o corpo de prova será retirado, pois chapas laminadas apresentam propriedades mecânicas anisotrópicas.

Assim, em função do corpo de prova é possível determinar informações tanto do comportamento mecânico do material, quanto do processo de fabricação, como laminação, injeção, fundição ou de juntas soldadas.

2.3.2 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza é mais um que é utilizado para avaliar a resistência mecânica de um material. A dureza é frequentemente inserida na especificação de diversos tipos de materiais na indústria. O objetivo geral desse ensaio é determinar a capacidade de um material resistir a cargas de compressão pontuais e conhecer a resistência mecânica aproximada de um material.

Também, através deste ensaio, pode-se analisar o resultado de um possível tratamento térmico que determinado material sofreu, além de conseguir qualificar e mensurar a resistência ao desgaste por abrasão e por erosão. Com essas informações, conclui-se que o ensaio pode ser utilizado para identificar materiais e comparar diferentes amostras.

Vale lembrar que não é somente em materiais metálicos que são realizados os ensaios de dureza, mas também em materiais cerâmicos e poliméricos.

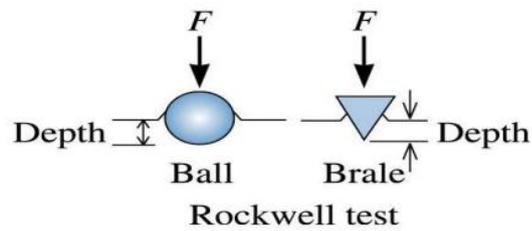
Existem diferentes métodos para a realização deste ensaio, dentre os mais usados estão:

- Dureza Rockwell;
- Dureza Brinell.

2.3.2.1 Ensaio de Dureza Rockwell

O ensaio de dureza Rockwell é um dos ensaios mais utilizados na indústria para determinar a dureza de um material. Para realizá-lo, é o operador por escolher entre dois tipos de penetradores: uma esfera de aço endurecida, ou um cone feito de diamante.

Figura 11 – Penetradores do ensaio de dureza Rockwell.



Fonte: USP, 2022.

2.3.2.1.1 Penetradores do ensaio Rockwell:

- Esferas de aços endurecidas com \varnothing : 1/16, 1/8, 1/4 e 1/2 pol;
- Penetradores cônicos de diamante (brale) usados para materiais mais duros.

O penetrador escolhido resultará em uma leitura diferente. Outra escolha que o operador deve fazer é qual o tipo de ensaio será feito, já que existem o comum e o superficial. Essa escolha se baseia nas condições do corpo de prova. Sua massa deve ser de no mínimo 10 kg para ser feito um ensaio comum, e menor que 3 kg para que se escolha um ensaio do tipo superficial.

Além dessa condição relacionada a massa do CP, sua espessura também deve ser pelo menos 10 vezes maior que a da profundidade de impressão, e o espaçamento de impressão entre o centro da impressão e a borda do CP deve ser 3 vezes maior que o diâmetro da impressão.

O objetivo principal nesse ensaio é adentrar no material que está sob teste com um dos penetradores escolhidos. O penetrador exerce uma força contra a superfície do corpo de prova (CP) em duas etapas. Primeiramente, uma pré-carga é aplicada, obtendo-se um contato físico mais firme entre a amostra e o penetrador. Em seguida, utiliza-se uma carga maior, aumentando sua força de maneira sucessiva, resultando em um aumento da penetração. A diferença entre a profundidade de aplicação da carga inicial e final, é o que nos dará o valor da dureza de Rockwell (HR).

2.3.2.1.2 Método de medição Rockwell

Índice (HR) é determinado pela diferença na profundidade de penetração da pré-carga seguida de uma carga principal. Sendo:

Ensaio Rockwell:

- Pré-carga = 10 kgf;
- Principal = 60,100 e 150 kgf.

Ensaio Rockwell Superficial:

- Pré-carga = 3 kgf;
- Principal = 15,30 e 45 kgf.

Tabela 02 - Indicações de aplicação do ensaio de dureza Rockwell

Escala	Penetrador	Carga Maior (Kgf)	Aplicação
A	Cone diamante 120°	50	Chapa de aço, metal duro etc.
B	Esfera de aço 1/16"	90	Cobre, ligas de alumínio, aços de baixo carbono etc.
C	Cone diamante 120°	140	Ferro fundido, aços endurecidos mais usados etc.

Fonte: Próprio autor, 2022.

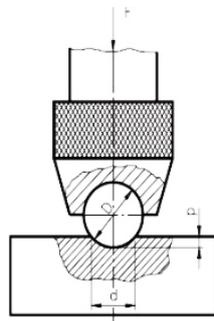
2.3.2.1.3 Principais vantagens do ensaio de dureza Rockwell

Uma das principais vantagens é a rapidez no processo de teste e a leitura imediata do valor da dureza, além da possibilidade do controle do tempo do ensaio, mas que deve ser levado em consideração na hora de avaliar os resultados. Caso o operador siga todas as especificações e normas, não haverá problemas na execução.

2.3.2.2 Ensaio de Dureza Brinell

O ensaio de dureza Brinell se assemelha muito ao Rockwell, com algumas pequenas diferenças. Se no ensaio anterior, o operador poderia escolher entre dois penetradores, nesse existe apenas um, a esfera de aço endurecida (ou de carbeto de tungstênio). Uma outra diferença é que não há uma pré-carga e nem uma carga principal, o ensaio Brinell faz uso apenas de uma carga padrão, com aumentos sucessivos e com tempo de ensaio que varia de 10 a 30s.

Figura 12 - Penetrador do ensaio de dureza Brinell.



Penetrador esférico ϕ : 1,2 ,5 ou 10 mm

Cargas: entre 500 e 3000 kg

Tempo: entre 10 e 30 s

$$HB = \frac{F}{A_c}$$

$$HB = \frac{F}{\pi Dp}$$

Um símbolo de seta verde L-shaped aponta do primeiro denominador (A_c) para o segundo (πDp), indicando a substituição da área de contato pela área da impressão.

Fonte: USP,2022.

Para a condução do ensaio, o operador precisa que o acabamento da superfície do corpo de prova esteja muito bem-feito. Com isso, o operador aproxima o corpo de prova da carga e aplica a força necessária. Após o período determinado, com o auxílio de um microscópio especial de baixo aumento, o diâmetro da impressão é determinado e convertido para o número de Brinell (HB).

2.3.2.2.1 Padronização do ensaio

Para padronizar o ensaio, foram fixados valores de fatores de carga de acordo com a dureza e o material selecionado.

Tabela 03 - Padrão para materiais usados no ensaio de tração

F/D²	DUREZA	MATERIAIS
30	90 A 415 HB	AÇOS E FERROS FUNDIDOS
10	30 A 140 HB	COBRE, ALUMÍNIO E SUAS LIGAS MAIS DURAS
5	15 A 70 HB	LIGAS ANTIFRICÇÃO, COBRE, ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Fonte: Próprio autor, 2022.

O diâmetro da esfera é determinado em função da espessura do corpo de prova utilizado para o ensaio. A seguir é mostrado os principais fatores de carga utilizados e suas faixas de dureza e indicações.

Tabela 04 - Valores de carga inicial em relação ao diâmetro da esfera.

DIÂMETRO DA ESFERA (mm)	F (kgf) = 30 D ²	F (kgf) = 10 D ²	F (kgf) = 5 D ²	F (kgf) = 2,5 D ²
10	3.000	1.000	500	250
5	750	250	125	62,5
2,5	187,5	62,5	31,25	15,625

Fonte: USP, 2022.

Podemos dizer que essa maneira de execução desse ensaio é mais analógica. Atualmente, existem métodos ainda mais rápidos de medição, que se baseiam em um sistema de varredura óptica, que, uma câmera posicionada sobre a impressão transmite os dados para um software, que determina o diâmetro e calcula o número HB.

O mecanismo de medição é calculado na seguinte maneira:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (8)$$

Sendo:

- D = diâmetro da esfera;
- d = diâmetro da impressão

2.3.2.2.2 Principais vantagens do ensaio de dureza Brinell

Uma das principais vantagens desse método é a maior área que a esfera atinge na amostra, resultando em uma medição mais precisa, considerando possíveis estruturas policristalinas e heterogeneidade do material, ou seja, possibilita que seja feita a medição de metais que não possuam a estrutura interna uniforme. Além disso, sua operação é extremamente simples.

Entretanto, como qualquer ensaio, existem limitações que inviabilizam certos resultados, como por exemplo, pode ser medido apenas 500 HB, se não a esfera penetradora por ser danificada. Outra limitação, é que existe a recuperação elástica do material quando a esfera é retirada, o que causa maiores imprecisões na hora do cálculo se o material for mais duro. Por fim, não é possível realizar os testes em CP com superfícies cilíndricas, já que ocorrerá um escoamento lateral do material, comprometendo o ensaio.

Tabela 05 - Seleção do tipo de ensaio de dureza.

Material	Tipo de Ensaio			
	Rockwell	Vickers	Knoop	Brinell
Aços macios, ligas de cobre, ligas de alumínio, ferro fundido maleável	●	●	●	●
Aços, ferros fundidos duros, ferro perlítico maleável, titânio, aço c/ endurecimento profundo	●	●	●	●
Metal duro, aços de pouca espessura, aço com endurecimento superficial	●	●	●	
Aços de pouca espessura, aço c/ endurecimento de média profundidade, ferro perlítico maleável	●	●	●	
Ferro fundido, alumínio, ligas de magnésio, metais macios	●	●	●	●
Ligas recozidas de cobre, chapas finas de metal macio	●	●	●	
Bronze fosforoso, berílio, cobre, alumínio, zinco, chumbo	●	●	●	●
Metais macios e outros materiais finos e macios	●	●	●	
Estanho	●	●	●	
Alumínio	●	●	●	●
Zinco	●	●	●	●
Pinturas e revestimentos orgânicos			●	
Borracha dura	●			
Plásticos	●	●	●	

Fonte: USP, 2022.

2.4 Metalografia

O controle de qualidade de um produto metalúrgico pode ser estrutural e dimensional. O segundo preocupa-se em controlar as dimensões físicas de um determinado produto, denominado Metrologia.

O primeiro preocupa-se com o material que forma a peça, sua composição, propriedade, estrutura, aplicação etc. Pode ser:

- Físico;
- Químico;
- Metalográfico.

2.4.1 Ensaio metalográfico

Procura relacionar a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções e outros. Pode ser:

- **Ensaio Macrográfico ou Macrografia**
Examina-se a olho nu ou com pouca ampliação (até 50X) o aspecto de uma superfície após devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impureza e ao processo de fabricação, qualidade de solda profundidade de tratamentos térmicos entre outras características.
- **Ensaio Micrográfico ou Micrografia**
Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, onde se pode observar as fases presentes e identificar a granulação do material (Tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade, e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões.

2.4.1.1 Corpo de prova ou amostra

Parte do material ou produto com forma e dimensões específica da superfície a ser analisada, podendo este ser embutida ou não.

2.4.1.2 Corte

Às vezes é necessário particionar o corpo de prova para obterem-se amostras que servirão para análise metalográfica. O equipamento utilizado para o corte conhecido como “cut-off”, ou cortadora metalográfica, com discos abrasivos intensamente refrigerados (evitando deformações devido ao aquecimento) a relativas baixas rotações é largamente utilizado nos laboratórios metalográficos.

2.4.1.2.1 Discos de corte

Figura 13 – Disco abrasivo



Fonte: Telstar, 2022.

Consistem em discos abrasivos finos (normalmente de alumina ou óxido de silicato), agregados com borracha ou outro aglomerante qualquer. Quando utilizados com ligas “moles” (como alumínio, cobre bronze. Etc.) os discos se tornam prematuramente empastados, devendo ser retirados a camada mais externa dos discos evitando diminuição do rendimento reduzido devido a uma série de fatores.

A escolha e localização da seção a ser estudada dependem da forma da peça e dos dados que se deseja obter ou analisar. Em geral, é efetuado o corte longitudinal ou o corte transversal na amostra.

O corte longitudinal permite verificar:

- Se a peça é fundida, forjada ou laminada;
- Se a peça foi estampada ou torneada;
- A solda de barras
- A extensão de tratamentos térmicos superficiais etc.

O corte transversal permite verificar:

- A natureza do material;
- A homogeneidade;
- A forma e dimensões das dendrites;
- A profundidade de têmperas etc.

O seccionamento da amostra deve ser efetuado de tal maneira que não complique as operações subsequentes. Entre os métodos de corte o que mais se adapta para o

ensaio metalográfico é o corte por abrasão a úmido. Neste caso, os discos de corte são classificados quanto à dureza dos grãos abrasivos.

De uma maneira geral, para materiais moles de baixo carbono, utilizam-se discos duros e para materiais duros, utilizam-se discos moles. Para ferros fundidos e aços até 0,45%C utiliza-se o disco 3045 (30 a 45 HRC). Aço com tratamentos térmicos e dureza superficial usa-se o disco 4560 (45 a 62 HRC).

2.4.1.3 Embutimento

O embutimento da amostra é realizado para facilitar o manuseio de peças pequenas, evitarem a danificação da lixa ou do pano de polimento, abaulamento da superfície, que traz sérias dificuldades ao observador. O embutimento consiste em circundar a amostra com um material adequado, formando um corpo único. Como comentado anteriormente, o embutimento pode ser a frio e a quente, dependendo das circunstâncias e da amostra a ser embutida.

O embutimento é de grande importância para o ensaio metalográfico, pois além de facilitar o manuseio de peças pequenas, evita que amostras com arestas rasguem a lixa ou o pano de polimento; bem como o abaulamento durante o polimento. Existem dois tipos de embutimento:

- Corpo de prova embutido a quente

No embutimento a quente, a amostra a ser analisada é colocada em uma prensa de embutimento com uma resina, sendo que o mais comumente utilizado é a baquelite de baixo custo e dureza relativamente alta.

É o corpo de prova cujas dimensões da superfície a analisar são suficientemente grandes a ponto de não ser necessário o embutimento.

Figura 14 - Máquina embutidora usada em processos de embutimento



Fonte: Próprio autor, 2022.

2.4.1.3.1 O embutimento a quente

Quando a amostra é embutida em materiais termoplásticos por meio de prensas, utilizando-se pressão e aquecimento para efetuar a polimerização. O método consiste em colocar o corpo de prova com a face que se quer analisar em contato com o êmbolo inferior da máquina de embutimento. Após apertar o êmbolo, coloca-se a resina na câmara de embutimento pressionando-a por um determinado tempo, de acordo com o plástico utilizado.

2.4.1.4 Lixamento

Devido ao grau de perfeição requerida no acabamento de uma amostra metalográfica idealmente preparada, é essencial que cada etapa da preparação seja executada cautelosamente, é um dos processos mais demorados da preparação de amostras metalográficas. O lixamento é uma operação que tem por objetivo eliminar riscos e marcas mais profundas da superfície dando um acabamento a esta superfície, preparando-a para o polimento.

Existem dois processos de lixamento:

- manual (úmido ou seco);

- automático.

A técnica de lixamento manual consiste em se lixar a amostra sucessivamente com lixas de granulometria cada vez menor, mudando-se de direção (90°) em cada lixa subsequente até desaparecerem os traços da lixa anterior.

A sequência mais adequada de lixas para o trabalho metalográfico com aços é 100, 220, 320, 400, 600 e 1200 (Pode haver variações). A granulometria é relatada em números. Quanto mais baixo o número mais grosso será a lixa, ou seja, maior os grãos abrasivos. Geralmente, para os trabalhos metalográficos as lixas utilizadas têm como grão abrasivo o óxido de alumínio, em casos especiais, são utilizados o diamante e o carvão de boro.

Para se conseguir um lixamento eficaz é necessário o uso adequado da técnica de lixamento, pois de acordo com a natureza da amostra, a pressão de trabalho e a velocidade de lixamento, surgem deformações plásticas em toda a superfície por amassamento e aumento de temperatura. Esses fatores podem dar uma imagem falseada da amostra, por isso devem-se ter os seguintes cuidados:

- Escolha adequada do material de lixamento em relação à amostra e ao tipo de exame final (o que se quer analisar);
- A superfície deve estar rigorosamente limpa, isenta de líquidos e graxas que possam provocar reações químicas na superfície;
- Riscos profundos que surgirem durante o lixamento deve ser eliminado por novo lixamento;
- Metais diferentes não devem ser lixados com a utilização da mesma lixa. Além do lixamento como preparo da amostra para posterior polimento, existe o esmerilhamento ou “Lapping”, que faz uso de grãos abrasivos soltos rolando livremente entre o seu suporte e a superfície da amostra.

2.4.1.5 Polimento

O polimento visa um acabamento superficial polido isento de marcas, utiliza para este fim abrasivos como pasta de diamante ou alumina. Antes de realizar o polimento deve-se fazer uma limpeza na superfície da amostra, de modo a deixá-la isenta de traços

abrasivos, solventes, poeiras e outros. A operação de limpeza pode ser feita simplesmente por lavagem com água, porém, aconselha-se usar líquidos de baixo ponto de ebulição (álcool etílico, fréon líquido etc.) para que a secagem seja rápida.

Existem cinco processos para a obtenção de uma superfície polida isenta de riscos que são:

- Processo mecânico;
- Processo semiautomático em sequência;
- Processo eletrolítico;
- Processo mecânico-eletrolítico;
- Polimento químico.

Certos cuidados devem ser observados no polimento de amostras, tais como:

- A superfície deve estar rigorosamente limpa;
- A escolha adequada do material do polimento;
- Evitar polimentos demorados;
- Nunca polir amostras diferentes sobre o mesmo pano de polimento (por causa da diferença de dureza entre elas, um pequeno cavaco da amostra mais dura irá riscar a mais macia);
- Evitar fricção excessiva;
- Evitar pressão excessiva sobre a amostra. (aplicar um pouco mais que o próprio peso da amostra).

2.4.1.5.1 Processo de polimento.

É quando o polimento é realizado através de uma Politriz. Pode ser manual, quando a amostra é trabalhada manualmente no disco de polimento e automática quando as amostras são lixadas em dispositivos especiais e polidas sob a ação de cargas variáveis.

2.4.1.6 Ataque químico

Seu objetivo é permitir a identificação (visualização) dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura. Um reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo. O reagente causará a corrosão da superfície. Os reagentes são escolhidos em função do material e dos constituintes macroestruturais que se deseja contrastar na análise metalográfico microscópica.

2.4.1.6.1 Princípios do ataque químico

Alguns grãos e fases serão mais atacados pelo reagente que outros. Isso faz com que cada grão e fase reflita a luz de maneira diferente de seus vizinhos. Isso realça os contornos e grão e dá diferentes tonalidades às fases permitindo sua identificação delas no microscópio.

Antes de a amostra sofrer o ataque, ela deve estar perfeitamente limpa e seca, por isso utilizam-se líquidos de baixo ponto de ebulição como o álcool, éter, etc., os quais são posteriormente secados rapidamente através de um jato de ar quente fornecido por uma ventoinha elétrica ou secador.

Uma amostra lixada e polida está pronta para o exame macro ou microscópico desde o sistema óptico empregado ou da amostra propriamente dita que os seus elementos estruturais possam ser distinguidos uns dos outros, através da diferenciação de cor, relevo, falhas estruturais como trincas, poros etc. Ao incidir a luz sobre a superfície metálica polida há uma reflexão uniforme, de modo que se faz necessário um contraste para distinguirem-se os detalhes de sua estrutura. Tal contraste é obtido por meio do ataque, o qual pode ser efetuado através de mudanças

2.4.1.6.2 Método que será usado para obter o contraste da amostra

A superfície da amostra, quando atacada por reagentes específicos, sofre uma série de transformações eletroquímicas baseadas no processo de óxido-redução, cujo aumento do contraste se deve às diferenças de potencial eletroquímico.

São formadas células locais onde os constituintes quimicamente pobres atuam como um ânodo, reagindo com o meio de ataque de maneira mais intensa que os mais nobres. Para o ataque químico são usadas soluções aquosas ou alcoólicas de ácidos, bases e sais, bem como sais fundidos e vapores.

O contraste varia em função da composição química, temperatura e tempo. Pode ser dividido em:

- Macroataque;
- Microataque.

Macroataque: Evidencia a macroestrutura, o qual pode ser observado a olho nu ou através de uma lupa de baixo aumento.

Microataque: Evidencia a estrutura íntima do material em estudo, podendo esta ser observada através de um microscópio metalográfico. Após o ataque químico a amostra deve ser rigorosamente limpa, para remover os resíduos do processo, através da lavagem em água destilada, álcool ou acetona, e posteriormente seca através de jato de ar quente.

2.4.1.7 Microscopia

A microscopia consiste na observação e avaliação da estrutura microscópica de uma amostra, após todos os processos anteriores serem realizados corretamente.

Essa operação é realizada com o uso de um microscópio óptico de reflexão, equipamento óptico que serve para a análise da superfície da amostra através da reflexão da luz na superfície contrastada quimicamente ou através de luz polarizada. Permite o registro fotográfico da amostra no corpo de prova. esse aparelho é composto pelas seguintes partes:

- Elementos mecânicos: Compõe-se de um conjunto de peças mecânicas de precisão com finalidade de posicionamento, deslocamento e focalização da amostra.
- Elementos ópticos: Conhecendo-se os fundamentos ópticos do aparelho, pode-se aproveitar o Máximo de suas possibilidades.
- Iluminador: É composta da lâmpada a fonte luminosa, duto de iluminação e do condensador pode ser embutido ou externo.
- Acessórios: Os principais são retículos, telas de projeção e dispositivos fotográficos, cuja finalidade é comparar e registrar os detalhes e peculiaridades dos Microconstituente de uma estrutura.

3 DESENVOLVIMENTO E METODOLOGIA

3.1 Obtenção das Amostras

3.1.1 Corte

As amostras foram obtidas por meio de dois cortes sendo o primeiro na ponta da barra de aço ABNT 1045 de 90 mm de comprimento e 41,5 mm de diâmetro, a segunda no meio da mesma barra com 300 mm para ensaio de tração.

Figura 15 – Primeira amostra da barra adquirida



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 16 – segunda amostra da barra adquirida



Fonte: Próprio autor, 2022.

O corte das amostras foi efetuado em uma cortadora metalográfica.

Durante a operação de corte, deve-se ter o máximo de cuidado para não modificar a estrutura da amostra. O corte nunca deve ser contínuo, de modo que não ocorra excessivo aquecimento (acima de 100° C) por falta de penetração do refrigerante. Deve-se evitar a rebarba no final do corte para que não dificulte o embutimento, daí a necessidade de usar o disco adequado conforme o material a ser cortado.

Procedimentos para o corte:

- Colocar a amostra no centro da mesa de fixação. O centro da mesa também é o centro do disco.
- Fixar firmemente o corpo de prova com ambas às morsas;
- Após ter se certificado da correta fixação do corpo de prova, posicionar o protetor acrílico do disco;
- Verificar se o disco se encontra em sua posição de descanso, sem tocar na amostra;
- Ligar o motor de acionamento do disco. Isto faz com que a bomba de fluido de corte também seja ligada; (no caso de equipamentos automáticos).
- Verificar se a amostra está sendo resfriada pelo fluido de corte.
- Aplicar uma carga moderada do disco sobre o corpo de prova (evitando solavancos que podem romper o disco de corte) até que o corpo de prova esteja cortado;
- Retornar o disco a sua posição de descanso e desligar o motor.
- Soltar o corpo de prova da mesa de fixação;
- Efetuar a limpeza do equipamento.

Figura 17 – Cortadora metalográfica utilizada para o corte



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 18 – Posicionando o disco para o corte



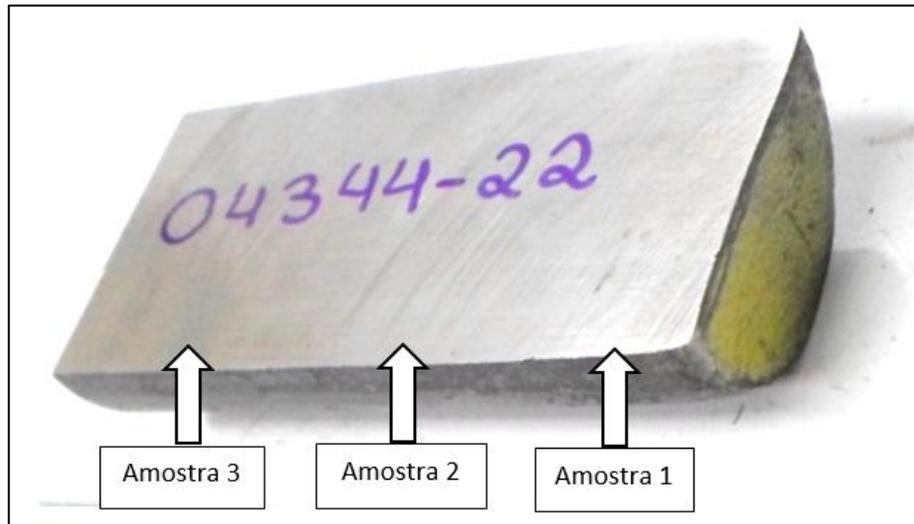
Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 19 – Amostra cortada.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 20 – Amostras sendo indicadas.



Fonte: Relatório de ensaio LABTESTE, 2022

3.1.2 Embutimento das amostras

Após o corte, as partes retiradas da ponta da barra de aço passaram pelo processo de embutimento. O embutimento foi realizado em baquelite, em uma embutidora chegando a uma temperatura de 160°C. Em cada amostra havia duas partes da ponta da barra: superfície (S) e núcleo (N).

Procedimento do embutimento:

- Posicionar o embolo da prensa de embutimento de modo que a face fique completamente visível;
- Borrifar desmoldante no embolo inferior (para a Baquelite não ficar presa ao embolo);
- Colocar a amostra com a face que se quer analisar para baixo (em contato com o embolo);
- Baixar o embolo lentamente;
- Colocar a resina (baquelite) (3 a 5 medidas, 10 a 30 gramas);
- Borrifar desmoldante no embolo superior;
- Colocar o embolo superior;
- Colocar a tampa;
- Apertar a tecla Partida;
- Manter a pressão durante o processo entre 125 e 150 (Kgf/mm²);
- Esperar a prensa de embutimento se desligar (No caso de ser automática) se não for automática o tempo de aquecimento é em torno de 10 minutos e o tempo de resfriamento em torno de 5 minutos;

- Abrir a válvula de pressão;
- Remover a tampa da prensa;
- Fechar a válvula de pressão;
- Erguer o embolo até ser possível pegar o corpo de prova;
- Retirar o corpo de prova da prensa de embutimento (Pegue com um papel, pois pode estar quente);
- Efetuar a limpeza do equipamento.

Figura 21 – Amostra sendo embutida.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 22 – Embutidora utilizada para análise das amostras.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 23 – Amostra embutida.



Fonte: Próprio autor, 2022.

3.1.3 Lixamento das amostras

As amostras foram lixadas em uma lixadeira metalográfica com lixas 220, 320, 400, 600 e 1200.

Procedimentos para o lixamento:

- Verificar se há todas as lixas necessárias para a preparação da amostra Metalográfica;
- Verificar se há água;
- Fazer um ponto de referência na amostra;
- Começar o lixamento de desgaste;
- Lixar até que só restem os riscos da última lixa utilizada;
- Gire 90° e vá para a próxima lixa;
- Repetir passos 5 e 6 até chegar à lixa de granulometria 1200.

Figura 24 – Lixas utilizadas na preparação.



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 25 – Politriz Lixadeira Metalográfica.



Fonte: Próprio autor, 2022.

3.1.4 Polimento das amostras

As superfícies das amostras foram polidas em alumina ($1\mu\text{m}$), com pano e em uma politriz metalográfica.

Procedimentos para o polimento:

- Verificar se o pano da Politriz é adequado para o tipo de abrangente e se encontra em condições de uso;
- Verificar se o pano de polimento está limpo;
- Verificar se o motor está funcionando corretamente;
- Ligar a água (bem pouco);
- Se for polir com alumina coloque a mesma sobre o pano de polimento e abra a água (bem pouco) para a lubrificação e eliminação de impurezas, se for polir com pasta de diamante espalhe a mesma sobre o pano e lubrifique com álcool;

- Segurar a amostra levemente em cima do pano de polimento, se recomenda movimentar a amostra o no sentido inverso ao do movimento do pano, mas para iniciantes recomenda-se apenas segurar a amostra em cima do pano para não riscar.

Figura 26– Amostra polida.



Fonte: Próprio autor, 2022

3.2 Exame ao microscópio sem ataque

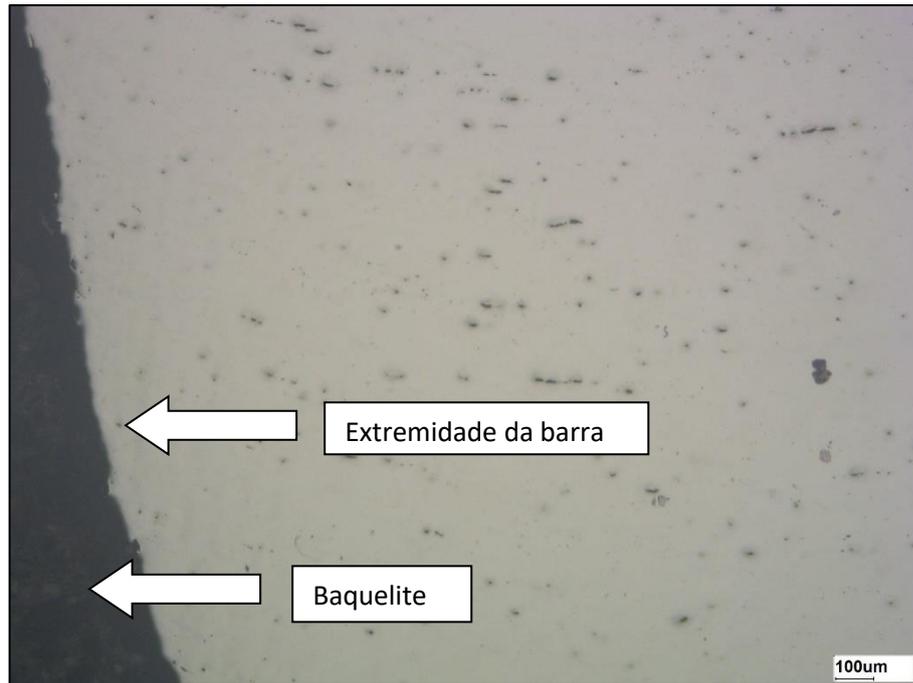
Antes do ataque químico com nital 2%, é analisado as inclusões globulares não-metálicas, grafita, trincas, porosidades etc.

Figura 27 – Amostra sendo analisada em laboratório.



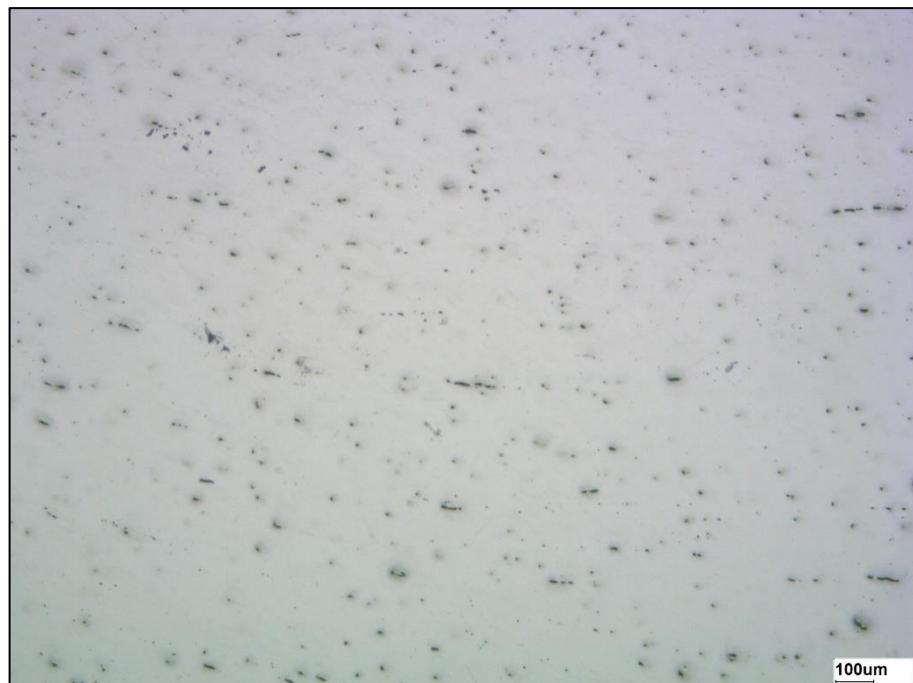
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 28 – Amostra 1 sem ataque (superfície) em 50X



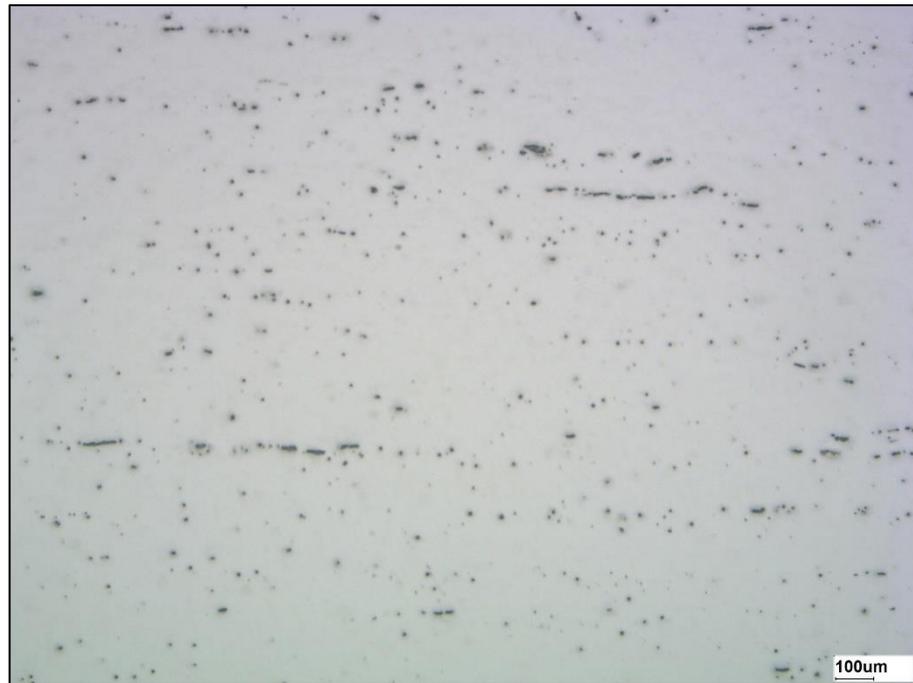
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 29 – Amostra 1 sem ataque (núcleo) em 50X



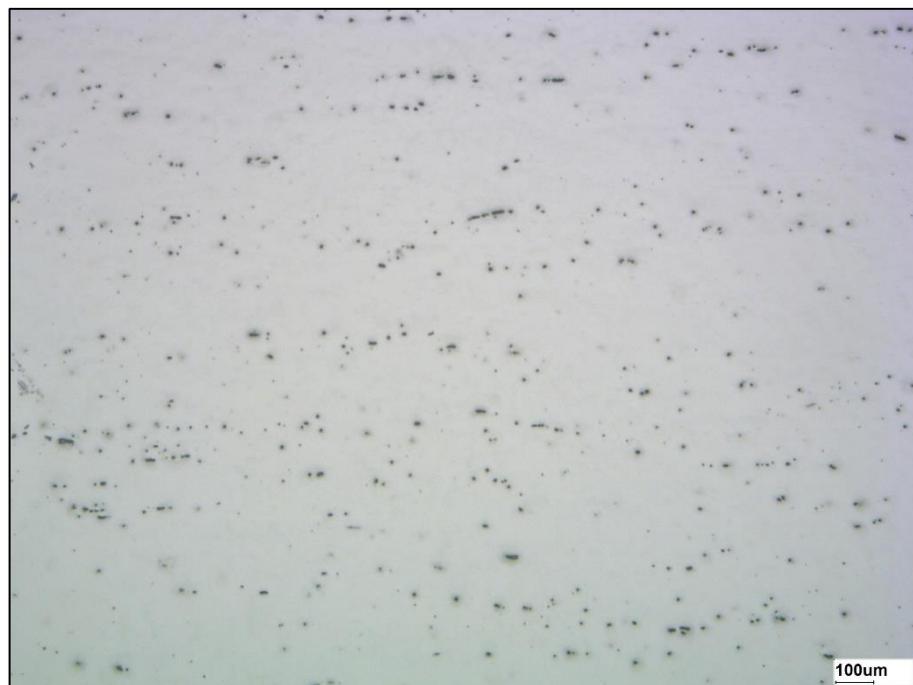
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 30 – Amostra 2 sem ataque (superfície) em 50X



Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 31 – Amostra 2 sem ataque (núcleo) em 50X



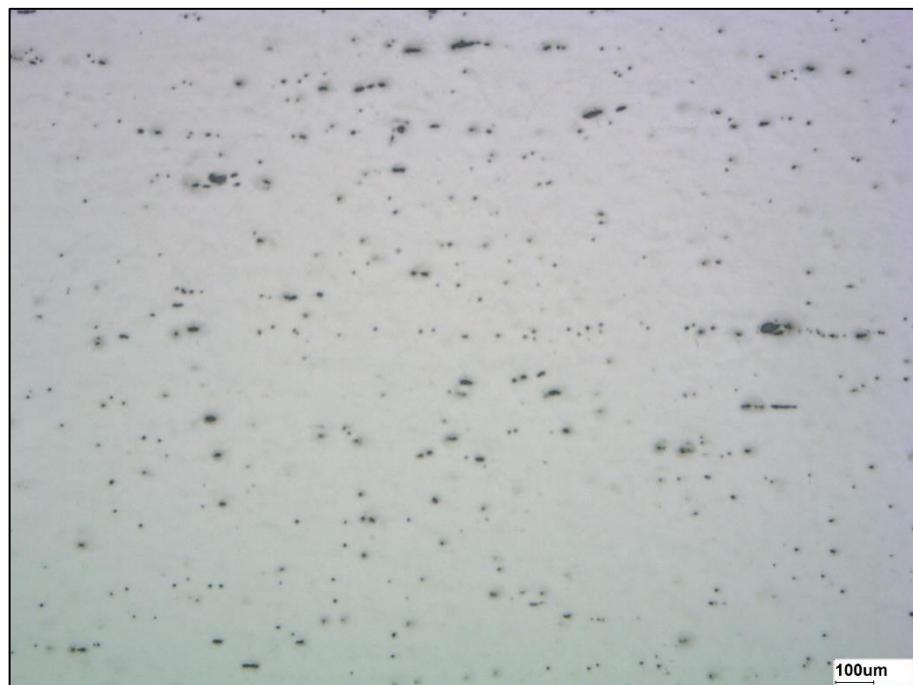
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 32 – Amostra 3 sem ataque (superfície) em 50X



Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 33 – Amostra 3 sem ataque (núcleo) em 50X



Fonte: Próprio autor, 2022

Nesta análise foram encontradas nas amostras 1, 2 e 3 inclusões não metálicas de sulfeto de Manganês, nível 2, série fina e óxidos nível 3 série fina.

3.2.1 Ataque químico na superfície das amostras

O ataque químico foi realizado em uma solução de nital 2% composta de ácido nítrico e álcool etílico para a lustração completa da superfície das amostras. Assim teríamos a melhor visão possível na hora da micrografia.

Figura 34 – Produtos utilizados para a produção do nital 2%



Fonte: Próprio autor, 2022.

Figura 35 – Realização do ataque das amostras



Fonte: Próprio autor, 2022.

3.2.2 Análise das amostras com ataque nital 2%

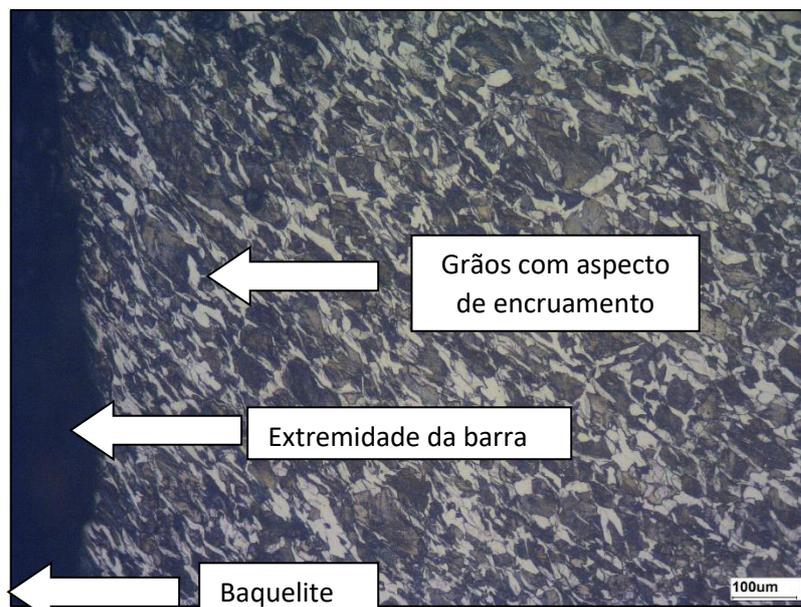
Após o ataque com nital 2% são analisados no microscópio ótico a perlita, ferrita, e defeitos que são visíveis apenas na análise microscopia.

Figura 36 – Amostra sendo analisada em laboratório



Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 37 – Amostra 1 com ataque (superfície) em 100X



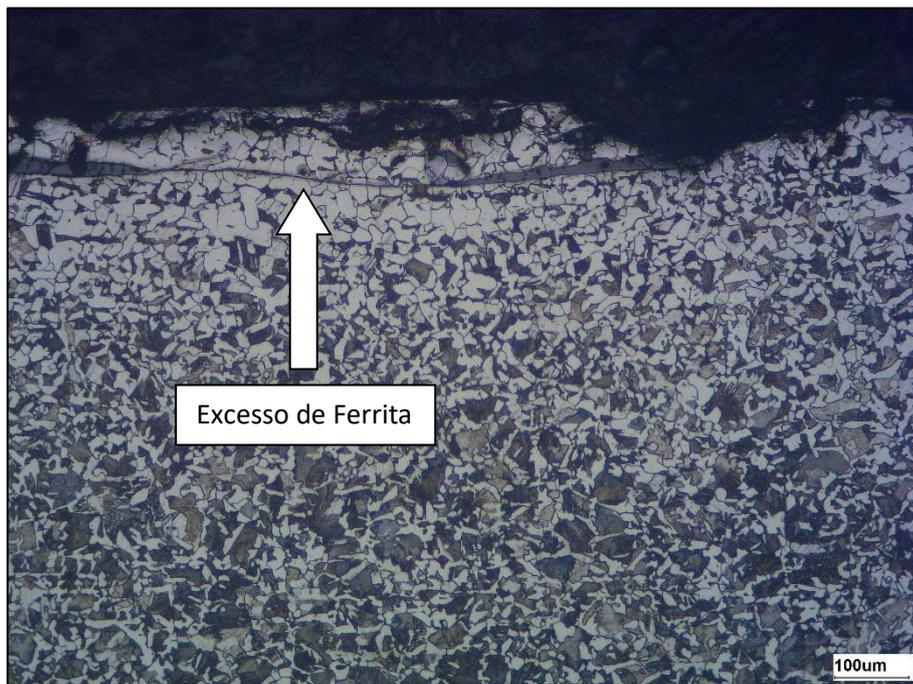
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 38 – Amostra 1 com ataque (núcleo) em 100X



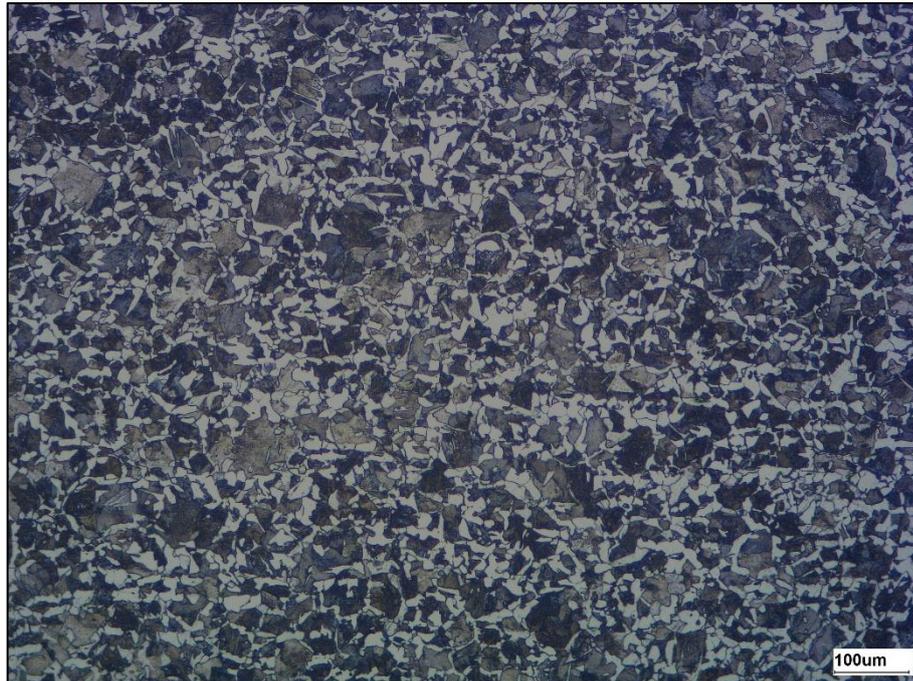
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 39 – Amostra 2 com ataque (superfície) em 100X



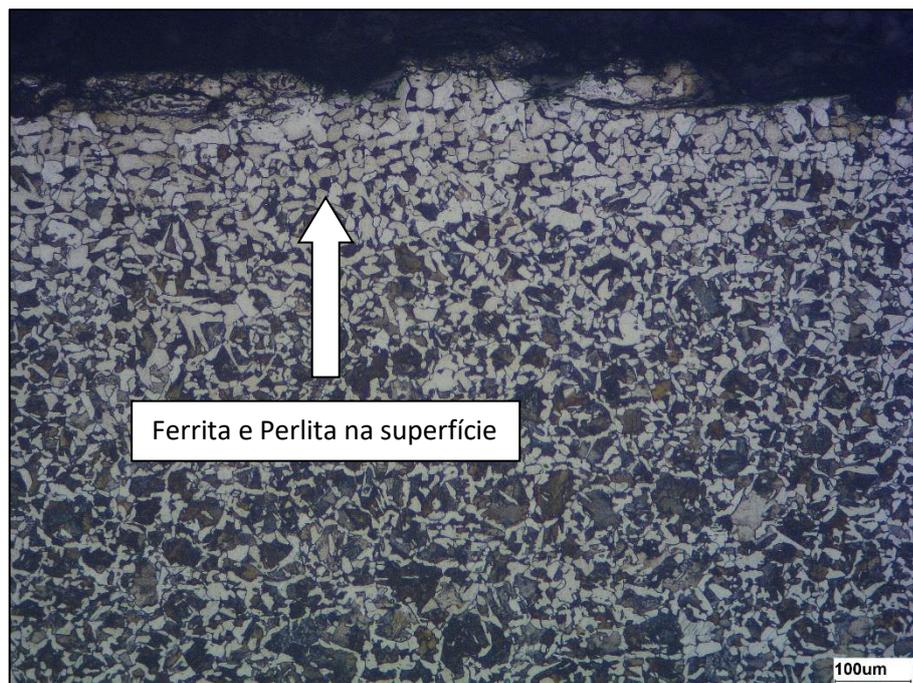
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 40 – Amostra 2 com ataque (núcleo) em 100X



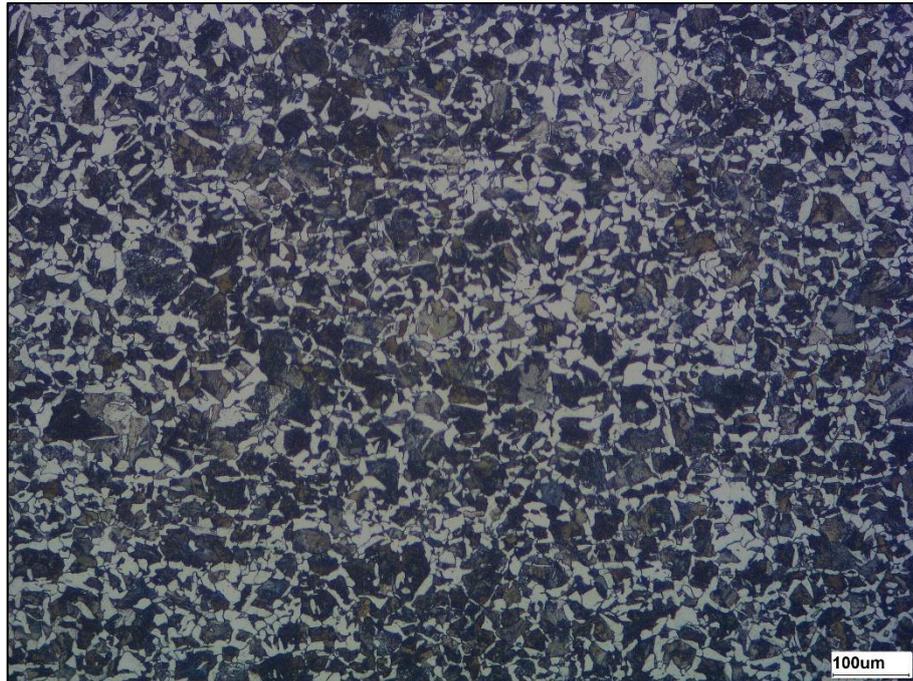
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 41 – Amostra 3 com ataque (superfície) em 100X



Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 42 – Amostra 3 com ataque (núcleo) em 100X

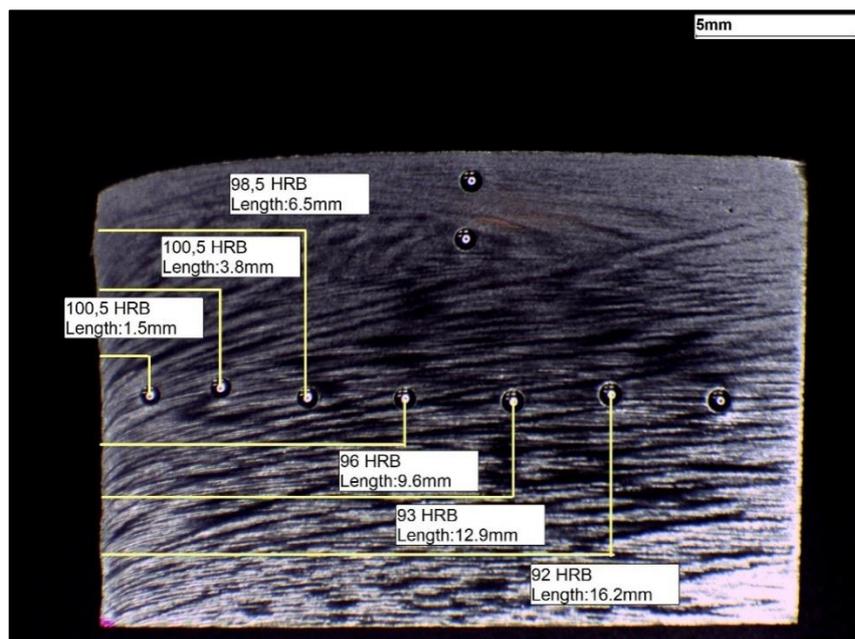


Fonte: Próprio autor, 2022

3.3 Ensaio de dureza

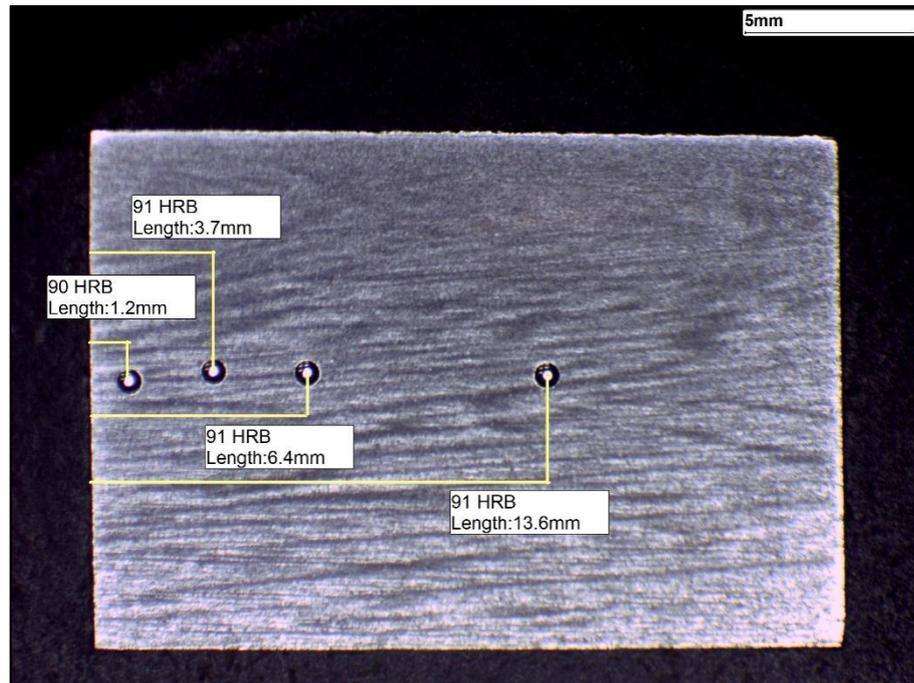
Após a análise da microestrutura, as Amostras 1, 2 e 3 foram submetidas ao ensaio de dureza. Este ensaio tem como objetivo apontar a diferença da dureza da extremidade e seu restante da ponta. Todos os pontos foram realizados em HRB.

Figura 43 – Amostra 1 com ataque de Picral (superfície) em 5X



Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 44 – Amostra 2 com ataque de Picral (superfície) em 5X



Fonte: Próprio autor, 2022

Tabela 6 – Ensaio de dureza

Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
Distância (mm)	Dureza (HRB)	Distância (mm)	Dureza (HRB)	Distância (mm)	Dureza (HRB)
1,50	100,50	23,20	90,00	-	91,00
3,80	100,50	25,70	91,00	-	91,00
6,50	98,50	28,40	91,00	-	91,00
9,60	96,00	35,60	91,00	-	91,00
12,90	93,00	-	-	-	91,00
16,20	92,00	-	-	-	91,00

Fonte: Próprio autor, 2022

A distância mencionada acima na Amostra 1 (Figura 42) é referente a ponta da barra (extremidade) enquanto a Amostra 2 (Figura 43) é referente ao corte entre o final da Amostra 1 e o início do corte da Amostra 2.

Na figura 44 é apresentado o certificado de qualidade do fornecedor, onde é destacado os resultados das propriedades químicas, físicas e mecânicas do lote da amostra analisada. Como destacado em vermelho a dureza encontrada e certificada

é 198 HB, convertendo temos 93 HRB, onde usamos como parâmetro para comparar com os resultados de dureza encontrados nas amostras analisadas.

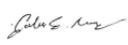
Figura 45 – Certificado da barra laminada analisada.



GERDAU

GERDAU AÇOS LONGOS S.A.
 AV. JOAO XXIII, 6777
 RIO DE JANEIRO, RIO DE JANEIRO - CEP 23565-235
 BRASIL / (21)24146000

CERTIFICADO DE QUALIDADE
MILL TEST / QUALITY CERTIFICATE

CLIENTE / CUSTOMER				DATA / DATE				PRODUTO / PRODUCT											
NOTA FISCAL				PEDIDO CLIENTE / CUSTOMER ORDER				ORDEM DE VENDA / SALES ORDER											
BITOLA / SIZE		LOTE / HEAT		QTD / QUANT		C %		Mn %		Si %		S %		P %		Dureza HB			
1.5/8		2711166004		1,247 T		0,47		0,63		0,18		0,006		0,026		198			
PROPRIEDADE MECANICA / MECHANICAL PROPERTIES Dureza - Durezza BRINELL Durezza - Hardness BRINELL								OBSERVAÇÕES / OBSERVATIONS As propriedades físicas, químicas e mecânicas descritas no Certificado de Qualidade são garantidas no estado em que o material é fornecido. Qualquer transformação que o material venha a sofrer em terceiros pode alterar significativamente tais propriedades								RESPONSÁVEL PELA QUALIDADE QUALITY ASSURANCE  GABRIEL EVANGELISTA MEDEIROS CREA/RJ 2009150571			

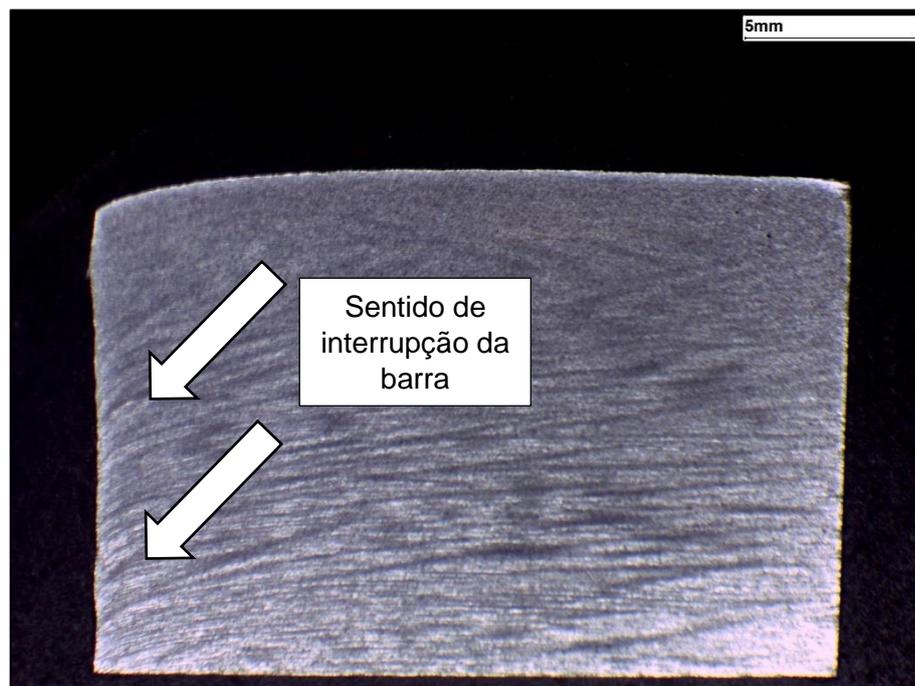
Dureza
HB
198

Fonte: Próprio autor, 2022

3.4 Análise das macrografias das amostras 1, 2 e 3.

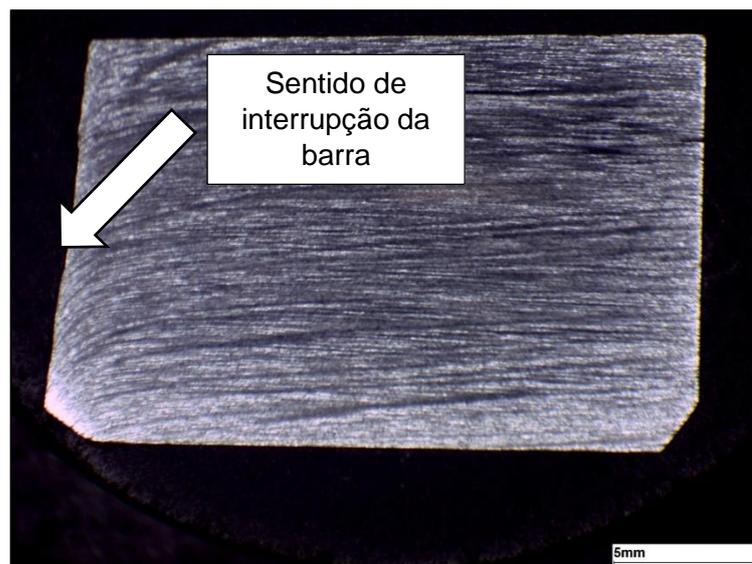
As amostras foram submetidas a análise macrográfica para analisar o sentido da interrupção da barra e verificar possíveis defeitos.

Figura 46 – Macrografia da amostra 1 com ataque em Picral (superfície) em 5X



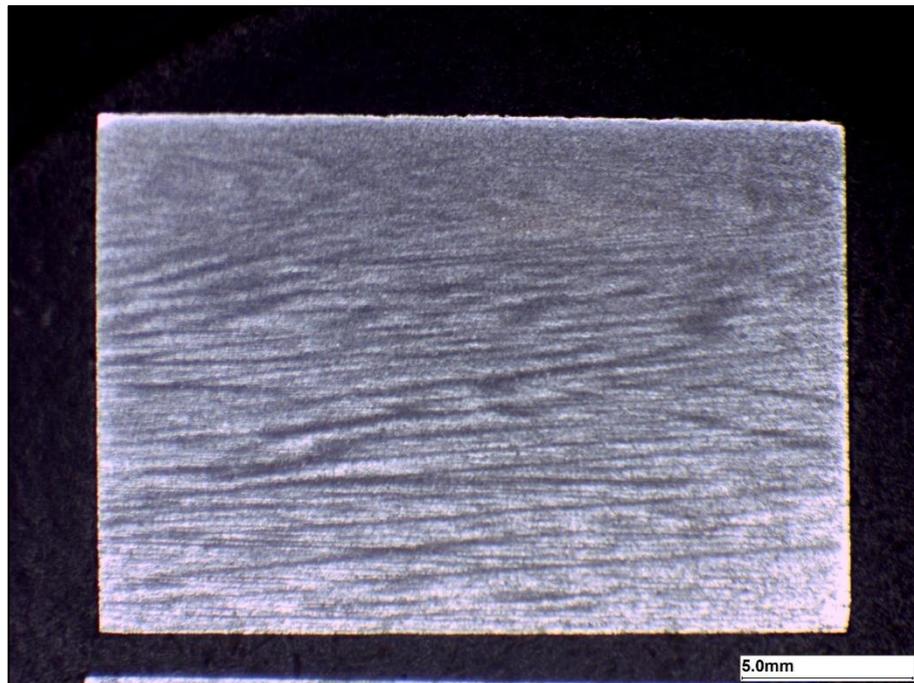
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 47 – Macrografia da amostra 1 com ataque em Picral (núcleo) em 5X



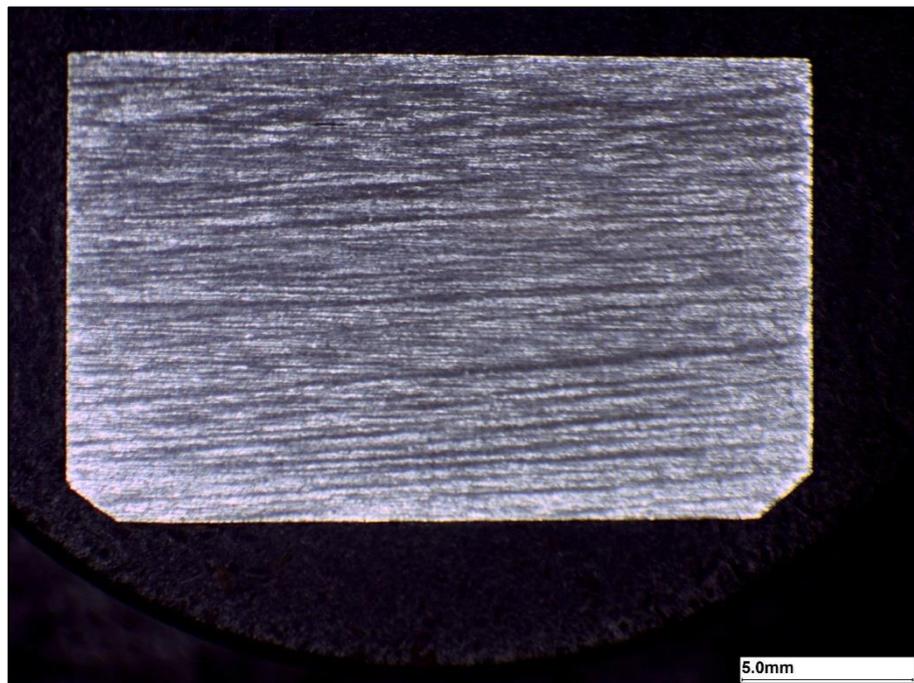
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 48 – Macrografia da amostra 2 com ataque em Picral (superfície) em 5X



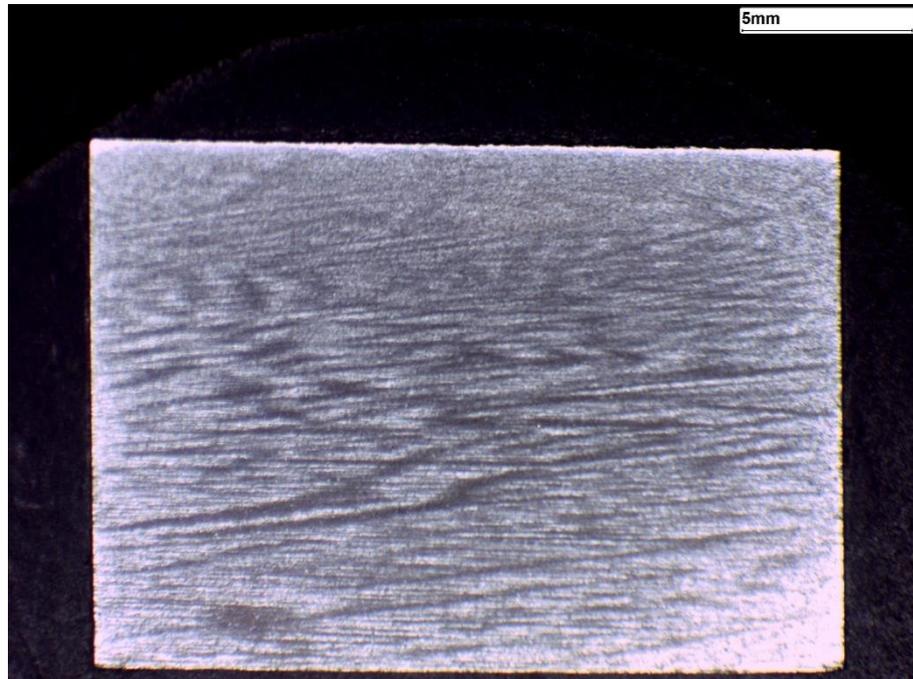
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 49 – Macrografia da amostra 2 com ataque em Picral (núcleo) em 5X



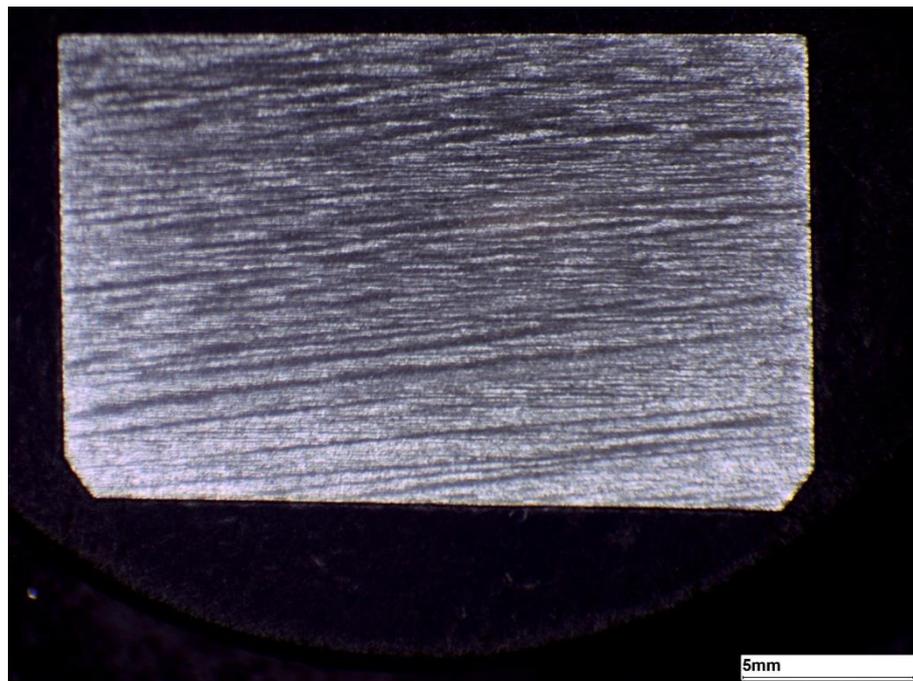
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 50 – Macrografia da amostra 3 com ataque em Picral (superfície) em 5X



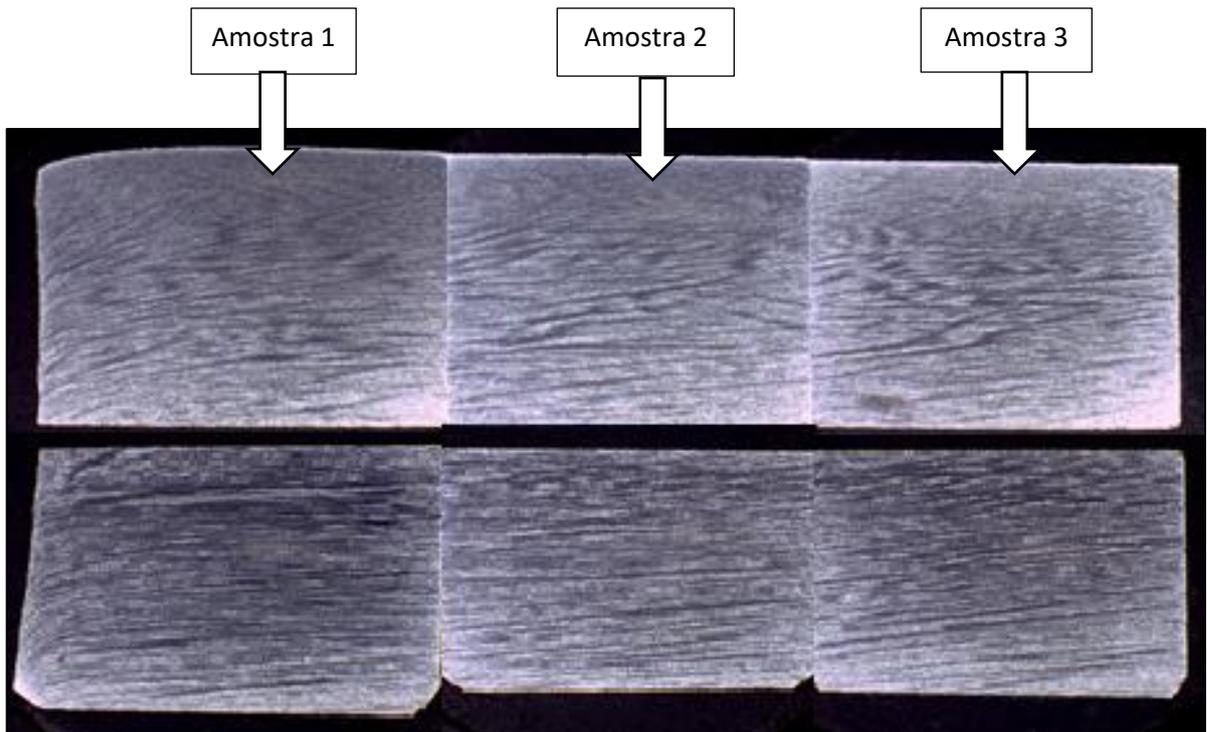
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 51 – Macrografia da amostra 3 com ataque em Picral (núcleo) em 5X



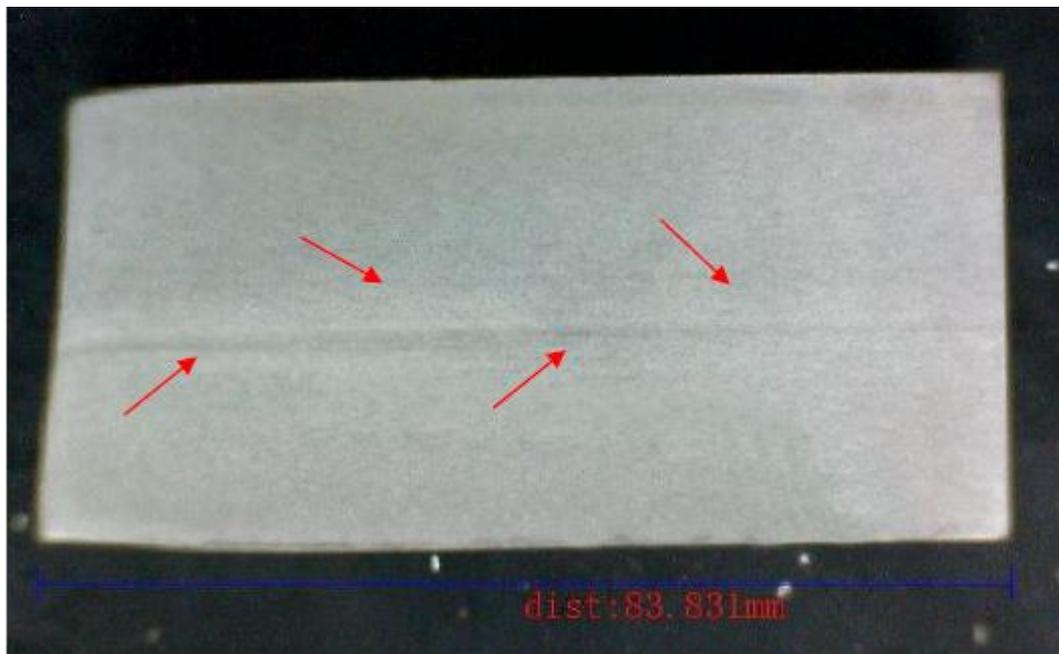
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 52 – Macrografia das amostras 1, 2 e 3 com ataque em Picral em 5X



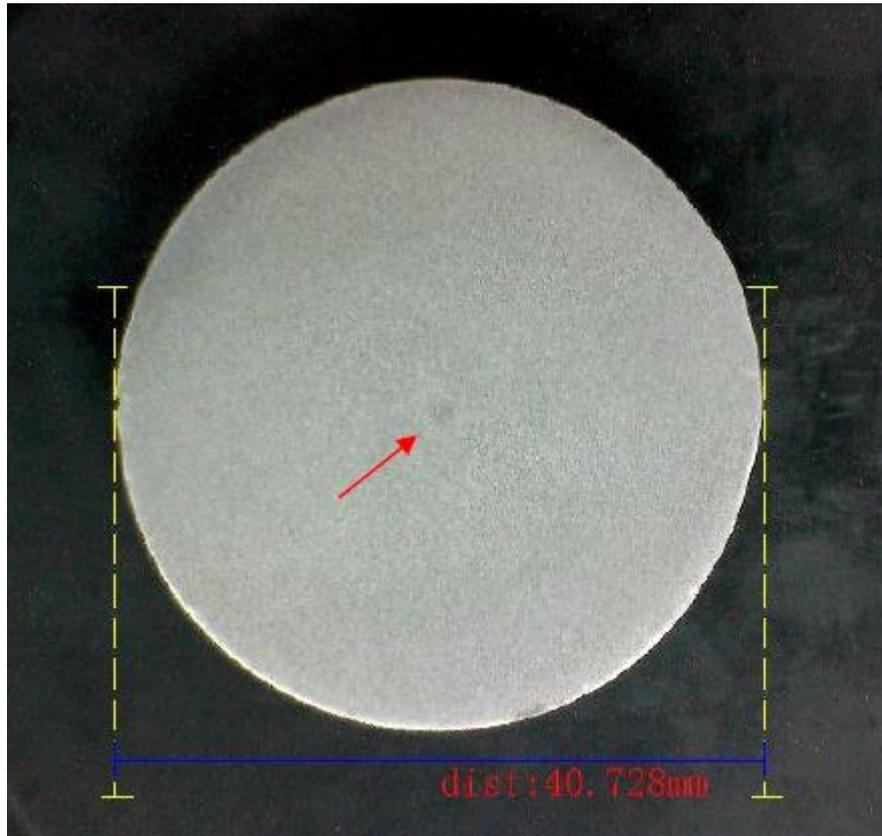
Fonte: Próprio autor, 2022

Figura 53 – Macrografia da amostra da ponta com ataque em Nital 10%



Fonte: LABTESTE, 2022

Figura 54 – Macrografia da amostra do centro da barra com ataque em Nital 10%



Fonte: LABTESTE, 2022

Seção analisada, após preparação metalográfica e ataque químico. Nota-se a presença de segregação no centro da barra (linha escura), indicada pelas setas vermelhas. Ataque Nital 10%.

O local para a realização do ensaio foi o Laboratório de Ensaio Metalográficos do LABTESTE.

3.5 Análise química

Análise química focada na identificação dos elementos químicos da amostra.

Figura 55 – Resultado da análise química.

Elementos	C Carbono	Si Silício	Mn Manganês	P Fósforo	S Enxofre	Cr Cromo	Mo Molibdênio	Ni Níquel	Al Alumínio	Co Cobalto
Concentração média obtida (%)	0,44	0,22	0,73	0,025	0,016	0,061	0,009	0,050	0,002	0,008
Especificação	0,43-0,50	---	0,60-0,90	0,040 Máximo	0,050 Máximo	0,20 Máximo	0,06 Máximo	0,25 Máximo	---	---
Incerteza expandida, U*	± 0,0211	± 0,0238	± 0,0456	± 0,002	± 0,0081	± 0,0061	± 0,0006	± 0,0041	---	± 0,0009
Elementos	Cu Cobre	Nb Nióbio	Ti Titânio	V Vanádio	W Tungstênio	Pb Chumbo	Sn Estanho	B Boro	Mg Magnésio	Fe Ferro
Concentração média obtida (%)	0,19	0,003	0,001	ND	0,006	0,002	0,013	ND	NA	98,2
Especificação	0,35 Máximo	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Incerteza expandida, U*	± 0,0014	± 0,0008	± 0,0009	---	± 0,003	± 0,0008	± 0,0004	---	---	± 0,0349

ND – Não Detectado NA – Não Analisado Rest. – Restante --- - Não Aplicável

Fonte: LABTESTE, 2022

Figura 56 – Região analisada.



Fonte: Próprio autor, 2022

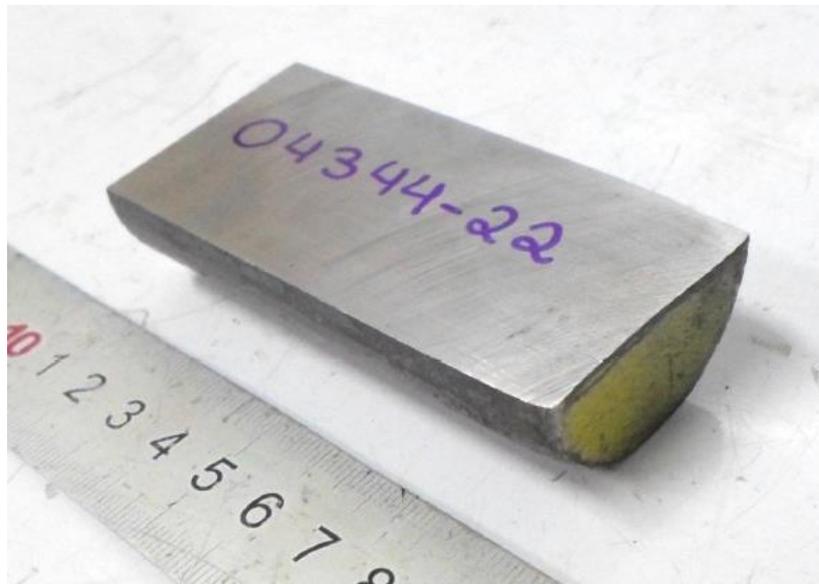
Análise realizada em espectrômetro de emissão óptica modelo ESPECTROMAXX. O material apresenta composição química típica de um aço carbono **SAE 1045 – SAE J403 JUN 2014**.

O local utilizado para realização da análise foi o Laboratório de Análise Química do LABTESTE.

3.6 Ensaio de tração

Este ensaio mecânico teve como objetivo comparar as diferenças das propriedades mecânicas da extremidade (ponta) da barra e o centro (meio) da mesma. Para este ensaio foram utilizados dois corpos de provas, a primeira sendo identificado como ponta, e a segunda como meio.

Figura 57 – Amostra denominada como ponta da barra.



Fonte: LABTESTE, 2022

Figura 58 – Amostra denominada como meio da barra.



Fonte: LABTESTE, 2022

Figura 59 – Resultados obtidos na ponta da barra.

Antes da Ruptura			Após Ruptura		Propriedades			
Largura [mm]	Espessura ou Diâmetro Inicial [mm]	Comprimento Inicial [mm]	Diâmetro Final [mm]	Comprimento Final [mm]	Limite de Resistência [M Pa]	Limite de escoamento [M Pa]	Aalongamento [%]	Redução de Área [%]
---	8,80	35,00	6,40	43,40	688	391	24,0	47,1
Incerteza expandida, U*					± 2,7	± 2,02	± 0,15	± 0,11
Propriedades especificadas					---	---	---	---
--- = Não Aplicável ou Não Especificado								

Fonte: LABTESTE, 2022

Figura 60 – Resultados obtidos no meio da barra.

Antes da Ruptura			Após Ruptura		Propriedades			
Largura [mm]	Espessura ou Diâmetro Inicial [mm]	Comprimento Inicial [mm]	Diâmetro Final [mm]	Comprimento Final [mm]	Limite de Resistência [M Pa]	Limite de escoamento [M Pa]	Aalongamento [%]	Redução de Área [%]
---	8,80	35,00	6,60	42,40	731	394	21,1	43,8
Incerteza expandida, U*					± 2,9	± 2,04	± 0,15	± 0,11
Propriedades especificadas					---	---	---	---
--- = Não Aplicável ou Não Especificado								

Fonte: LABTESTE, 2022

Figura 61 – Amostras após o ensaio de tração.



Fonte: Próprio autor, 2022

O corpo de prova e o ensaio mecânico foram preparados e realizados conforme a Norma ASTM A 370:2019, realizado na máquina de ensaios EMIC DL20000.

O local utilizado para realização do ensaio foi o Laboratório de Ensaio Mecânicos do LABTESTE.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise das propriedades mecânicas e microestrutura de uma barra de aço SAE 1045, onde identificamos possíveis anomalias em sua extremidade. Além disso, também permitiu uma pesquisa mais aprimorada para obter dados mais consistentes sobre as etapas do processo de laminação, e acima de tudo como o processo de interrupção ou corte ainda na usina pode influenciar a microestrutura e propriedade mecânica na extremidade da barra onde classificamos como ponta.

Ao realizar a análise da microestrutura identificamos grãos com aspecto de encruamento, como mostra na Figura 36.

No ensaio de dureza, foram realizados pontos de dureza partindo do início da barra, mostrado na Figura 42, onde foram identificados pontos de dureza acima do especificado pelo certificado de qualidade da usina que é de 198 HB convertendo temos 93 HRB. Conforme a Tabela 6 apontamos que até a distância de 12,90 mm a dureza da região com grãos encruados está com pontos acima do especificado, após esta distância, a dureza de 93 HRB cai até 91 HRB se mantendo nas amostras seguintes. O ponto de maior dureza foi de 100,50 HRB na distância de 1,50 mm.

Na análise macrográfica foram identificados presença de segregação no centro da barra conforme Figuras 52 e 53.

Pelo ensaio de tração identificamos que as propriedades mecânicas da ponta quanto o meio da barra possuem diferenças. Porém esta diferença não influencia no descarte pelo motivo de que não há uma especificação de limite de resistência e limite de escoamento pelo fabricante.

5 CONCLUSÃO

Utilizando os resultados obtidos e usando como referência os grãos encruados e a dureza, podemos afirmar que para esta barra seu descarte pode ser de 16,20 mm, onde sua dureza é de 92 HRB. Lembrando que para chegar a este resultado usamos apenas a barra em específico, para outro lote, tipo de laminação, e ou composição química é necessário repetir todos os processos de ensaios e análises.

Para ter um descarte mais consciente da ponta da barra devemos realizar uma análise apurada de sua microestrutura e suas propriedades mecânicas, como sugestão a usina deve anexar ao certificado além de suas informações primordiais a distância de corte ideal da ponta a ser descartada. Caso não seja viável para o fornecedor, a empresa que usa barras laminadas deve analisar cada lote recebido e assim buscar um padrão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMIR ROHDE. Regis. **Metalografia – preparação de amostras**. Disponível em: < https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4313798/mod_resource/content/1/APOSTILA_METALOGRAFIA.pdf > 2010. Acesso em: 20 junho 2022.

BIOPDI. **Ensaio de tração**. Disponível em: < <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/> > 2022. Acesso em: 20 junho 2022.

CIMM. **Laminação – introdução – fundamentos**. Disponível em: < https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6475-laminacao-introducao-fundamentos > 2022. Acesso em: 20 junho 2022.

EDISCIPLINAS USP. **Ensaio de dureza**. Disponível em: < <https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/> > 2022. Acesso em: 20 junho 2022.

FUNDIÇÃO MARTINELLI. **Aplicações e Propriedades de Produtos da Linha de Aço 1045**. Disponível em: < <https://fundicaomartinelli.com.br/produto/aplicacoes-e-propriedades-aco/#:~:text=Propriedades%20Mec%C3%A2nicas,na%20condi%C3%A7%C3%A3o%20normalizada%20ou%20laminada> > 2022. Acesso em: 20 de junho 2022.

ITENSP. **Ensaio mecânicos**. Disponível em: < <https://www.itensp.com.br/ensaios-mecanicos#:~:text=Os%20ensaios%20mec%C3%A2nicos%20s%C3%A3o%20m%C3%A9todos,em%20v%C3%A1rias%20condi%C3%A7%C3%B5es%20de%20uso> > 2022. Acesso em: 20 junho 2022.

JOINVILLE.IFSC.EDU. **Conformação mecânica**. Disponível em: < [http://www.joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Tecnologia de Fabricacao/Aula%205%20 %20Lamina%C3%A7%C3%A3o.pdf](http://www.joinville.ifsc.edu.br/~valterv/Tecnologia_de_Fabricacao/Aula%205%20%20Lamina%C3%A7%C3%A3o.pdf) > 2022. Acesso em: 20 junho 2022.

MATERIAIS JÚNIOR. **Tratamentos Térmicos: quais os principais e para que servem?**. Disponível em: < https://materiaisjr.com.br/tratamentos-termicos/?gclid=CjwKCAiAprGRBhBgEiwANJEY7F4zJ1_cRitp-i4xxbjEufh5Kpx1FAZjkSTrt3rdEX5g5aqcCNhkJxoCOyIQAvD_BwE > 2019. Acesso em 20 de junho de 2022.

O.F. TERRA RUCKERT, Cassius. **Ensaio mecânicos dos materiais – tração**. Disponível em:< [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/217019/mod_resource/content/1/Ensaio%20 de%20Tra%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/217019/mod_resource/content/1/Ensaio%20de%20Tra%C3%A7%C3%A3o.pdf) > 2022. Acesso em: 20 junho 2022.

SANTOS, J.E. **Relatório de ensaios**. LABTESTE – Análises e Ensaio de Materiais Metálicos Ltda. 2022.

SPILLERE. **Processo de laminação do aço**. Disponível em: < [https://www.spillere.com.br/processo-de-laminacao-de-aco/#:~:text=O%20Processo%20de%20Lamina%C3%A7%C3%A3o%20de,para%20 cada%20tipo%20de%20produto](https://www.spillere.com.br/processo-de-laminacao-de-aco/#:~:text=O%20Processo%20de%20Lamina%C3%A7%C3%A3o%20de,para%20cada%20tipo%20de%20produto) > 2022. Acesso em: 20 junho 2022.