



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA

MARK ALISSON GONÇALVES LIMA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE REDUÇÃO A FRIO NA
MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO VERGALHÃO CA-60
PRODUZIDO COM AÇO ABNT 1010

FORTALEZA

2024

MARK ALISSON GONÇALVES LIMA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE REDUÇÃO A FRIO NA MICROESTRUTURA
E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO VERGALHÃO CA-60 PRODUZIDO COM AÇO
ABNT 1010

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica
do Centro de tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Orientador: Prof. Dr. –Ing. Jeferson Le-
andro Klug

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L699a Lima, Mark Alisson Gonçalves.

Análise da influência do nível de redução a frio na microestrutura e propriedades mecânicas do vergalhão CA-60 produzido com aço ABNT 1010 / Mark Alisson Gonçalves Lima. – 2024.
43 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Jeferson Leandro Klug.

1. Laminação a frio. 2. Aço ABNT. 3. Microestrutura. 4. Propriedades mecânicas. 5. Concreto Armado 60.
I. Título.

CDD 669

MARK ALISSON GONÇALVES LIMA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO NÍVEL DE REDUÇÃO A FRIO NA MICROESTRUTURA
E PROPRIEDADES MECÂNICAS DO VERGALHÃO CA-60 PRODUZIDO COM AÇO
ABNT 1010

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica
do Centro de tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de bacharel em Engenharia Metalúrgica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. –Ing. Jeferson Leandro Klug (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Rodrigo Freitas Guimarães
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Ceará (IFCE)

Eng. Irannildo Walter Gondim Júnior
Gerdau Caucaia

Aos meus pais, Isa e Geraldo.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Jeferson, pelo auxílio na orientação deste trabalho e em outros momentos do curso.

Às políticas sociais, que me proporcionaram estudar em uma universidade pública gratuita e de qualidade.

Ao meu pai, Geraldo, pelo esforço/persistência/paciência para me proporcionar a melhor educação possível, diante de inúmeras dificuldades. Minha mãe, Isa, por suas características de resistência, simplicidade e idoneidade para me formar enquanto ser humano. Serei eternamente grato e orgulhoso pela luta de vocês.

Aos meus irmãos Mimi, Vitão e Sophia e meus sobrinhos Ben e Ceci.

Aos meus amigos pelo companheirismo.

"Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo. Todos nós sabemos alguma coisa. Todos nós ignoramos alguma coisa. Por isso aprendemos sempre"

(Paulo Freire)

RESUMO

No âmbito da melhoria contínua na produção industrial do vergalhão CA-60, especificamente quanto ao ajuste da composição química, buscou-se analisar a influência do nível de redução a frio na microestrutura e propriedades mecânicas do CA-60 produzido com aço ABNT 1010. Para esta pesquisa, foram utilizados vergalhões de diâmetros 4,2 mm e 3,4 mm obtidos a partir da laminação a frio de um fio-máquina de 5,5 mm. As amostras foram fabricadas e disponibilizadas por uma usina semi-integrada do estado do Ceará. Foram realizados ensaios de tração e dobramento para obtenção das propriedades mecânicas. A caracterização microestrutural ocorreu por meio da mensuração do tamanho médio dos grãos na seção transversal, utilizando a técnica da interceptação linear de Heyn e o aplicativo *ImageJ*. O referido processador de imagens também foi utilizado para estimar o comprimento médio dos grãos na seção longitudinal. Os resultados dimensionais dos cristais foram analisados estatisticamente por meio do teste *t* de *Student* e o aplicativo Minitab, com intervalo de confiança de 99%. Observou-se que, na seção transversal, o aumento do grau de redução a frio ocasionou a redução do tamanho do grão que aliado ao encruamento aumentou a resistência mecânica e diminuiu a ductilidade das amostras. Além disso, notou-se maior alongamento dos grãos da seção longitudinal oriundo do maior nível de redução a frio. Dessa forma, este estudo auxiliou na validação da composição química e a temperatura de laminação a quente do fio-máquina.

Palavras-chave: laminação a frio; CA-60; aço ABNT 1010; microestrutura; propriedades mecânicas

ABSTRACT

In the context of continuous improvement in industrial production of CA-60 rebar, specifically related to adjusting the chemical composition, this study was conducted to analyze the influence of the level cold reduction on the microstructure and mechanical properties of CA-60, produced from steel ABNT 1010. In this investigation, rebars with diameters of 3.4 mm and 4.2 mm were used, and they were obtained through the cold rolling of a 5.5 mm wire rod. The samples were manufactured and made available by a semi-integrated mill in the state of Ceará. Tensile tests were conducted to determine the mechanical properties. Microstructural characterization was performed by measuring the average grain size in the cross-section using the Heyn's linear interception method and the ImageJ software. Such image processor was also employed to estimate the average grain length in the longitudinal section. The dimensional results of the crystals were statistically analyzed using the Student's t-test and the Minitab software, with a 99% confidence interval. It was observed that, in the cross-section, the increase in the degree of cold reduction led to decrease in grain size, which - combined with work hardening - resulted in increased mechanical strength and decreased ductility of the samples. Furthermore, greater grain elongation in the longitudinal section was noted due to the higher level of cold reduction.

Keywords: cold rolling; CA-60; steel ABNT 1010; microstructure; mechanical properties

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tetraedro da Ciência e Engenharia de Materiais	17
Figura 2 – Relação direta entre os quatro elementos da Ciência e Engenharia de Materiais	17
Figura 3 – Classificação e subclassificação dos sólidos	18
Figura 4 – Processo de laminação	21
Figura 5 – Ensaio de dobramento	26
Figura 6 – Fluxograma da produção dos CA's-60	28
Figura 7 – Fluxograma do procedimento experimental	29
Figura 8 – Metodologia de medição do tamanho médio de grão por amostra	31
Figura 9 – Metodologia de medição do comprimento médio de grão por amostra	32
Figura 10 – Variação do LR e LE com a redução a frio	34
Figura 11 – Variação do alongamento com a redução a frio	35
Figura 12 – Variação de propriedades mecânicas de metais deformados a frio	36
Figura 13 – Variação do tamanho médio de grão com o nível de redução a frio (%)	38
Figura 14 – Variação do comprimento médio de grão com o nível de redução a frio (%)	40
Figura 15 – Micrografias - ABNT 1010 - Seção longitudinal	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química das amostras	28
Tabela 2 – Nível de redução a frio (%) das amostras	29
Tabela 3 – Configuração e nomenclatura das amostras	30
Tabela 4 – Testes de significância - <i>t</i> de <i>Student</i>	33
Tabela 5 – Resultado dos ensaios mecânicos e a comparação com os critérios da NBR 7480	34
Tabela 6 – Tamanho médio de grão por amostra - 23,6% (4,2mm) - Seção transversal .	37
Tabela 7 – Tamanho médio de grão por amostra - 38,2% (3,4mm) - Seção transversal .	37
Tabela 8 – Teste 1 - <i>t</i> de <i>Student</i> - Tamanho médio de grão	37
Tabela 9 – Comprimento médio de grão - 23,6% (4,2mm) - Seção longitudinal	39
Tabela 10 – Comprimento médio de grão - 38,2% (3,4mm) - Seção longitudinal	39
Tabela 11 – Teste 2 - <i>t</i> de <i>Student</i> - Comprimento médio de grão	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AL	Alongamento
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CA	Concreto Armado
CL	Comprimento das Linhas
Comg	Comprimento Médio de Grão
ISO	<i>International Standards Organization</i>
LE	Limite de Escoamento
LR	Limite de Resistência
NBR	Norma Brasileira
QI	Quantidade de Interseções
SAE	<i>Society of Automobile Engineers</i>
TF	Trabalho a Frio
TM	Trabalho a Morno
Tmg	Tamanho Médio de Grão
TQ	Trabalho a Quente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Aço ABNT 1010	16
3.2	CA-60	16
3.3	Estrutura dos sólidos	16
3.3.1	<i>Tetraedro da ciência e engenharia de materiais</i>	16
3.3.2	<i>Cristalinidade</i>	18
3.3.3	<i>Grão</i>	18
3.3.3.1	<i>Contorno de grão</i>	18
3.3.3.2	<i>Forma e tamanho de grão</i>	19
3.3.3.2.1	<i>Método da Intercepção - Heyn</i>	20
3.4	Conformação plástica de metais	21
3.4.1	<i>Laminação</i>	21
3.4.2	<i>Temperatura de laminação</i>	22
3.4.2.1	<i>Laminação a Frio</i>	22
3.4.2.1.1	<i>Fenômenos estruturais na laminação a frio</i>	23
3.5	Propriedades mecânicas	24
3.5.1	<i>Ensaio de tração</i>	24
3.5.1.1	<i>Limite de Escoamento - LE</i>	25
3.5.1.2	<i>Limite de Resistência - LR</i>	25
3.5.1.3	<i>Relação elástica - LR/LE</i>	25
3.5.1.4	<i>Alongamento - AL</i>	26
3.5.2	<i>Ensaio de dobramento</i>	26
3.5.2.1	<i>Diâmetro do pino ou cutelo (mm)</i>	27
3.6	<i>ImageJ</i>	27
3.7	<i>Minitab</i>	27
4	METODOLOGIA	28

4.1	Aço ABNT 1010	28
4.2	Procedimento experimental	29
4.2.1	<i>Metalografia</i>	30
4.2.2	<i>Caracterização microestrutural</i>	30
4.2.2.1	<i>Seção transversal - Tamanho médio de grão</i>	31
4.2.2.2	<i>Seção longitudinal - Comprimento médio de grão</i>	32
4.2.3	<i>Testes de significância</i>	33
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5.1	Ensaio de tração e dobramento	34
5.1.1	<i>Caracterização microestrutural</i>	36
5.1.1.1	<i>Seção transversal - tamanho médio de grão</i>	36
5.1.1.2	<i>Seção longitudinal - comprimento médio de grão</i>	39
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	42
6.1	Sugestões de trabalhos futuros	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é o maior consumidor de produtos siderúrgicos do Brasil, com consumo aparente de 38,9% em 2023. Nesse setor, utiliza-se o aço combinado com o concreto para proporcionar elevados níveis de resiliência e ductilidade em estruturas. Dentre os aços destinados à produção de estruturas de concreto armado, o CA-60 é um vergalhão utilizado na fabricação de produtos para a indústria civil, tais como: estribos, espaçadores, telas soldadas e treliças (IAB, 2024).

A produção industrial de materiais metálicos, como o aço CA-60, é relevante devido à capacidade de obtenção de formas pré-definidas e controle de propriedades, principalmente mecânicas, por um custo justo. O CA-60 pode ser obtido via trefilação ou laminação a frio. Após o processamento, o material se encontra no estado encruado que é influenciado por diversos fatores, tais como: estrutura cristalina, energia de defeito de empilhamento, composição química, tamanho de grão inicial, temperatura e velocidade de deformação (BRESCIANI FILHO, 2011) (PADILHA; JUNIOR, 2005) (RIZZO, 2007).

Nesse contexto, em uma usina semi-integrada do estado do Ceará, a partir de estudos para melhorias, houve a alteração da composição química dos CA's-60 para o aço ABNT 1010. Nessa empresa, os vergalhões fabricados possuem diâmetros de 3,4 mm e 4,2 mm, obtidos a partir da laminação a frio de um fio-máquina de 5,5 mm. Assim, ocorreu a redução de 38,2% e 23,6% das bitolas. O nível de redução a frio, expresso em porcentagem, é um fator que impacta diretamente em fenômenos microestruturais, como o encruamento e alteração do formato e tamanho dos grãos.

Com o intuito de analisar os impactos dessa mudança, foram realizados ensaios de tração e dobramento para verificar se as propriedades mecânicas estão dentro dos limites aceitáveis. Além disso, visto que as propriedades mecânicas são resultantes da microestrutura, buscou-se identificar e compreender a ocorrência de fenômenos microestruturais que ocorrem na rota de fabricação.

Visto isso, este trabalho tem como objetivo analisar a influência do grau de redução a frio nos fenômenos microestruturais - especificamente nas dimensões dos grãos das seções transversais e longitudinais dos vergalhões - que impactam nas propriedades mecânicas do CA-60 produzido com aço ABNT 1010. O domínio dos fenômenos estruturais, além do aperfeiçoamento do produto, possui a capacidade de controlar qualidade e/ou reduzir custos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- Correlacionar o grau de redução a frio, microestrutura e propriedades mecânicas do CA-60 produzido com aço ABNT 1010.

2.2 Objetivos específicos

- Comparar e avaliar as propriedades mecânicas dos vergalhões CA-60 com a norma NBR 7480;
- Realizar procedimento metalográfico e obter imagens das microestruturas do aço ABNT 1010 por meio da microscopia ótica;
- Utilizar o software *ImageJ* como ferramenta computacional para mensurar características dimensionais dos grãos;
- Estimar o tamanho médio dos grãos da seção transversal aplicando a técnica da interceptação linear - Heyn;
- Estimar o comprimento médio dos grãos da seção longitudinal;
- Aplicar método estatístico para validar as medidas dos grãos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço ABNT 1010

O aço é uma liga ferro-carbono que possui outros elementos inseridos como manganês, silício, fósforo e enxofre. Conforme a composição química, os aços são classificados em baixo, médio e alto teor de carbono.

Aços de baixo carbono - como o 1010 que possui teor de 0,1%C - apresentam elevados níveis de ductilidade, conformabilidade, usinabilidade e soldabilidade. Por isso, são utilizados em diversos setores como indústria automobilística, construção civil e eletrodomésticos.

3.2 CA-60

O Concreto Armado (CA) 60 ou CA-60 é um fio de aço nervurado que é obtido por meio da trefilação ou laminação a frio de um fio-máquina e possui diâmetro nominal igual ou menor que 10 mm. As nervuras são empregadas para melhorar a aderência entre o aço e o concreto.

A numeração 60 indica que o material apresenta limite de resistência ao escoamento mínimo de 60 kgf/mm², ou seja, 600 Mpa. Por esse motivo, é conhecido pela alta resistência, proporcionando maior segurança, leveza e durabilidade das construções.

Além disso, o CA-60 é caracterizado pela excelente, resiliência, ductilidade e soldabilidade. Por isso, devido às suas propriedades, é utilizado como reforço em estruturas de concreto armado, tais como: estribos, treliças, pré-moldados e espaçadores.

A Norma Brasileira (NBR) 7480 regulamenta o aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - que inclui o CA-60. No referido documento, são descritas diversas características, por exemplo, geométricas, mássicas, mecânicas, de processamento e condições de fornecimento que o material precisa atender no território nacional (ABNT, 2022).

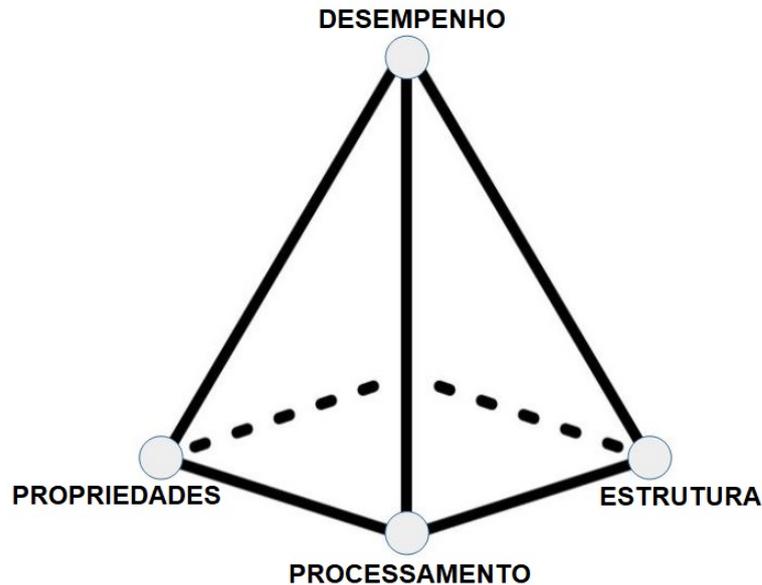
3.3 Estrutura dos sólidos

3.3.1 *Tetraedro da ciência e engenharia de materiais*

A Figura 1 expressa o clássico tetraedro da Ciência e Engenharia de Materiais em que relaciona quatro componentes interdependentes representados pelos vértices, são eles: estrutura,

propriedades, processamento e desempenho.

Figura 1 – Tetraedro da Ciência e Engenharia de Materiais



Fonte: Adaptado de (PADILHA, 1997)

Em suma, “estrutura” é a forma como os constituintes internos do material estão arranjados em níveis subatômicos, atômicos, microscópicos e/ou macroscópicos. Já o termo “propriedade” - que é resultado da estrutura - se refere à reação a um estímulo específico que lhe é submetido. Por fim, “processamento” está relacionado às condições/parâmetros de fabricação (CALLISTER Jr, 2016).

Isto posto, no planejamento de fabricação de um material, objetiva-se que este possua propriedades específicas que atendam às condições de uso, de modo que seu “desempenho” durante a aplicação é o parâmetro-alvo. Além disso, no projeto, outros fatores são considerados, tais como: segurança, durabilidade e aspectos econômicos.

O desempenho do material é consequência de suas propriedades, as quais dependem da estrutura que, por sua vez, é função do processamento. Dessa forma, constata-se a relação entre os quatro elementos na Figura 2.

Figura 2 – Relação direta entre os quatro elementos da Ciência e Engenharia de Materiais



Fonte: Adaptado de (CALLISTER Jr, 2016)

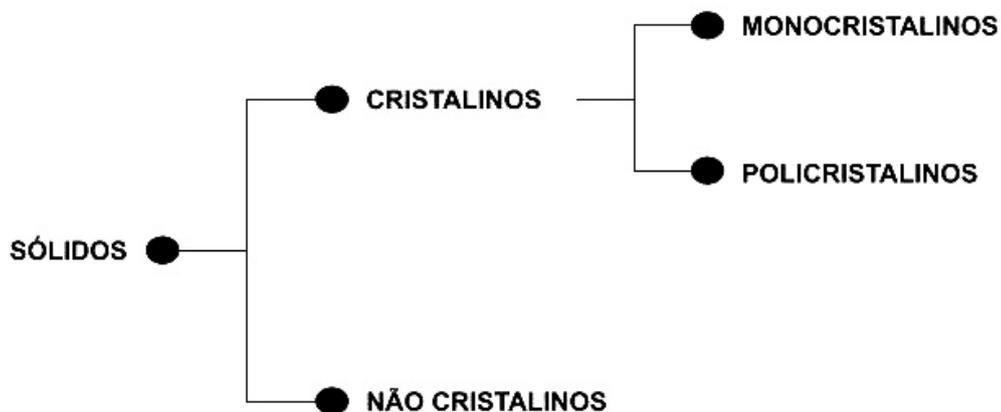
Para além disso, assim como a estrutura final do material depende do processamento, este é influenciado pela estrutura inicial. Portanto, visto que há relação direta entre estrutura-propriedades, identifica-se a interdependência entre os componentes citados, tendo o desempenho satisfatório como finalidade.

3.3.2 *Cristalinidade*

De acordo com a distribuição espacial de átomos, íons ou moléculas, classificam-se os sólidos em “cristalinos” quando ocorre repetição de longo alcance tridimensional na disposição dos constituintes na estrutura e “não-cristalinos” (ou amorfos) quando não há esse ordenamento.

No âmbito de sólidos cristalinos, denominam-se “monocristalinos” quando há periodicidade e repetição dos constituintes, por toda a estrutura, com orientação cristalográfica semelhante. Já nos “policristalinos”, os grãos possuem orientações aleatórias. Dessa forma, em suma, conforme Figura 3, os sólidos são classificados em “não cristalinos” e “cristalinos”, estes subdivididos em “monocristalinos” e “policristalinos” (CALLISTER Jr, 2016).

Figura 3 – Classificação e subclassificação dos sólidos



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.3 *Grão*

3.3.3.1 *Contorno de grão*

Os metais são, em geral, sólidos policristalinos. O contorno de grão é uma descontinuidade bidimensional que separa cristais que possuem orientações cristalográficas distintas. Essa região de transição influencia diretamente nas propriedades mecânicas.

Considerando que nos sólidos cristalinos a conformação plástica é resultado, princi-

palmente, da propagação de discordâncias, os contornos de grão funcionam como barreiras para essa movimentação (CALLISTER Jr, 2016).

Assim, quanto maior a quantidade de contornos por área, mais obstáculos existem durante o mecanismo de deformação dos metais. Isso implica no aumento de resistência e redução da ductilidade.

Todavia, na análise de aspectos microestruturais que impactam nas propriedades mecânicas, geralmente, utiliza-se o tamanho médio de grãos - que é função da área total de contornos - como parâmetro de análise. Em resumo, quanto menor a quantidade de contornos por área, maiores são os cristais.

3.3.3.2 *Forma e tamanho de grão*

A forma e distribuição de tamanho dos grãos são fatores importantes quando se busca analisar/obter propriedades mecânicas do produto final. A metalografia quantitativa é a área responsável por essas medições (CALLISTER Jr, 2016)(COLPAERT, 2008).

Quanto à forma, nos metais, os cristais da microestrutura adquirem formatos que são determinados de acordo com as condições de nucleação e crescimento durante o resfriamento na solidificação. Assim, é possível obter grãos coquilhados, equiaxiais e/ou colunares. Os grãos equiaxiais são originados devido ao elevado número de sítios de nucleação e o crescimento ser aproximadamente igual em todas as direções (MORA *et al.*, 2010).

Após a solidificação, a forma e tamanho dos grãos são mutáveis, por exemplo, por meio de trabalho mecânico, tratamentos térmicos ou a combinação dos dois. Por isso, é comum que durante o processo de deformação plástica ocorram modificações na estrutura do material.

Quanto ao tamanho, de acordo com a equação de Hall-Petch, o diâmetro do grão é inversamente proporcional à resistência mecânica. Desse modo, por meio da variação de tamanho do grão, impacta-se na referida propriedade mecânica e, conseqüentemente, no processamento. Necessita-se, por exemplo, de menor energia para conformação plástica quando ocorre diminuição de resistência aliada ao aumento da ductilidade do material devido ao aumento de grão.

Constata-se, dessa forma, a importância da análise da influência do tamanho médio de grãos da microestrutura nas propriedades mecânicas, processamento e desempenho do material. Nesse cenário, nota-se a necessidade da aplicação de metodologias padronizadas visando estimar as características geométricas dos cristais.

Referência global na caracterização estrutural de metais, a *Society of Automobile Engineers (SAE)* define que o tamanho médio dos grãos pode ser estimado com as normas da *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. De forma manual, pela *ASTM E112*, ou semiautomática/automática, descrito na *ASTM E1382*.

A forma semiautomática aplica as mesmas regras do método manual. A diferença consiste em, semiautomaticamente, utilizar recursos tecnológicos, como computador ou mesa digitalizadora como ferramenta auxiliar (SANTANA; FARIA, 2017).

Quanto à medição, existem os métodos da comparação, planimétrico e interceptação. Sucintamente, os dois primeiros utilizam o conceito de números de grãos por unidade de área, enquanto que o da interceptação emprega a quantidade de interseções de contornos de grãos por unidade de comprimento (CALLISTER Jr, 2016).

3.3.3.2.1 Método da Interceptação - Heyn

De acordo com a norma *ASTM E112*, com a microestrutura revelada, o operador desenha linhas (ou círculos) de comprimentos (perímetros) conhecidos. Em seguida, contam-se as intersecções entre as marcações realizadas e os contornos de grãos.

Dessa forma, de acordo com a Fórmula 3.1, em cada micrografia, o Tamanho Médio de Grão (T_{mg}) é calculado pela relação entre o Comprimento das Linhas (CL) e a Quantidade de Interseções (QI). Em cada amostra deve haver, no mínimo, 50 interseções. Geralmente, T_{mg} é obtido em μm .

$$T_{mg} = \frac{CL}{QI} \quad (3.1)$$

A precisão do método é considerada como vantagem e aumenta de acordo com o número de interceptações contabilizadas. Contudo, o processo é demorado e há margem para erros do operador.

Conforme a norma, é recomendável que sejam utilizados círculos ou linhas com quatro ou mais orientações distintas em estruturas anisotrópicas. Ademais, após a marcação das linhas, pode-se proceder contabilizando o número de interceptações como alternativa, em vez das intersecções.

Intercepção é um segmento de linha que sobrepõe o grão, enquanto intersecção é um ponto de cruzamento entre a linha e o contorno de grão. O resultado final não varia entre as duas formas.

3.4 Conformação plástica de metais

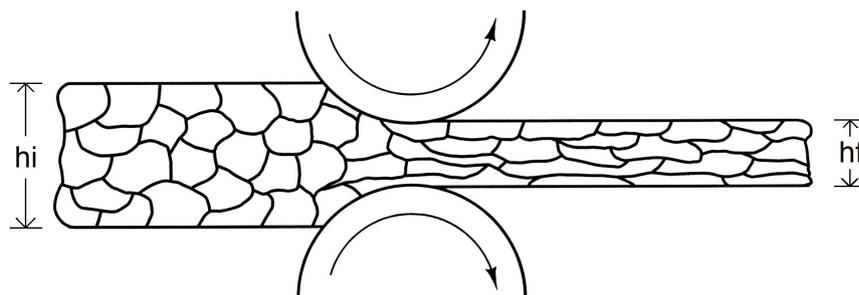
A conformação plástica de metais busca produzir materiais com características específicas quanto a propriedades mecânicas, condições superficiais e dimensões e forma. Dentre diversos processos, destacam-se a trefilação, extrusão, forjamento e laminação (BRESCIANI FILHO, 2011).

3.4.1 Laminação

Dentre os processos de conformação de metais, o mais utilizado é a laminação devido à elevada produtividade e capacidade de precisão no controle dimensional. Nesse processo, o principal objetivo é a diminuição da espessura do material (DIETER, 1981).

A diminuição da secção transversal ocorre por meio da passagem do material entre dois cilindros que giram com a mesma velocidade em sentidos opostos, conforme Figura 4. Comumente, o processo envolve uma sequência de passes nos laminadores (HELMAN; CETLIN, 2010).

Figura 4 – Processo de laminação



Fonte: Adaptado de (SHACKELFORD, 2021)

Os produtos laminados podem ser classificados - de acordo com suas características geométricas - em semi-acabados (blocos, tarugos, placas etc.) e acabados que são subdivididos em planos (chapas, tiras etc) e não-planos (barras, cantoneiras) (BRESCIANI FILHO, 2011)(HELMAN; CETLIN, 2010).

Na conformação plástica de metais, incluindo a laminação, existem fatores metalúrgi-

cos que impactam nas características de processamento e do produto final, tais como: velocidade de laminação, estrutura metalúrgica, formabilidade e temperatura de processamento (HELMAN; CETLIN, 2010).

3.4.2 Temperatura de laminação

A conformação plástica, incluindo a laminação, é classificada em Trabalho a Quente (TQ), Trabalho a Morno (TM) ou Trabalho a Frio (TF) de acordo com as alterações estruturais devido à temperatura de trabalho durante o processamento.

Na literatura clássica, diferencia-se TQ e TF por meio da temperatura de recristalização que é função, principalmente, da temperatura de fusão do material. Contudo, nessa classificação, TM não é bem representado, visto que seu conceito é recente.

Dito isso, o foco da temperatura de trabalho deve ser na peça a ser fabricada e durante todo o processamento, visto que durante a deformação plástica de metais ocorre elevada geração de calor, por exemplo, pelo atrito que é transferido, em parte, para o material, aquecendo-o (MORO; AURAS, 2007).

Visto isso, a relevância da temperatura de trabalho é baseada na influência em variáveis de processamento e custo, como na capacidade do nível de deformação plástica e demanda energética, respectivamente. Além disso, impacta nas características geométricas e mecânicas do produto final.

No âmbito da laminação, por exemplo, o TQ é mais utilizado para realização dos primeiros desbastes em que são necessárias maiores reduções de espessura. Nas etapas finais, utiliza-se, geralmente, o TF por proporcionar maior controle dimensional e aumento da resistência mecânica (DIETER, 1981).

Nesse contexto, constata-se a importância de compreender como a temperatura aliada ao processamento determina as propriedades mecânicas dos materiais devido a alterações estruturais.

3.4.2.1 Laminação a Frio

Durante a conformação plástica, cerca de 5 a 10% da energia utilizada é acumulada na rede cristalina e está associada, principalmente, à geração e interações de discordâncias. (BRESCIANI FILHO, 2011)

Dito isso, a conformação a frio é caracterizada pela energia armazenada durante o

processo de deformação não ser dissipada em fenômenos de recuperação ou recristalização. Isso ocorre abaixo da temperatura de recristalização (COLPAERT, 2008).

No TF, a resistência do material aumenta e obtém-se maior controle dimensional, proporcionando melhor acabamento superficial. Por outro lado, demanda-se maior energia para deformação. Além disso, a ductilidade e a resistência à corrosão são diminuídas (BRESCIANI FILHO, 2011).

O metal fica cada vez mais resistente quanto maior for o nível de deformação a ponto de inviabilizar grandes reduções transversais ou mesmo tornar o processo custoso devido à grande demanda de energia (BRESCIANI FILHO, 2011).

Por isso, é comum realizar tratamento térmico de recozimento entre passes de TF que, inclusive, amplia a variedade de propriedades mecânicas finais nos metais, especialmente interessante na produção de aços planos (COLPAERT, 2008).

Esse procedimento também é conhecido como recristalização estática, em que há a elevação de temperatura acima de 50% da temperatura de fusão do material entre pausas de deformações a frio com o intuito de amaciá-lo (HELMAN; CETLIN, 2010).

Na redução a frio, a deformação convencional do produto durante a compressão - admitindo deformação homogênea na espessura em que as seções transversais planas não são alteradas após a conformação plástica - é dada pela Fórmula 3.2 - h_i e h_f representam, respectivamente, a altura inicial e final do produto (Figura 4) (HELMAN; CETLIN, 2010).

$$e = \frac{h_i - h_f}{h_i} * 100 \quad (3.2)$$

3.4.2.1.1 Fenômenos estruturais na laminação a frio

Durante o TF de metais, geralmente, ocorrem transformações estruturais que impactam nas propriedades do material, tais como: alteração na forma e tamanho do grão, encruamento e aumento da densidade de discordâncias (CALLISTER Jr, 2016).

De acordo com a Figura 4, antes do TF na laminação, os cristais possuem formato aproximadamente equiaxiais. Após a conformação, ocorre um alongamento dos grãos na direção de deformação. Dessa forma, o material adquire anisotropia. Ademais, o tamanho dos cristais pode ser alterado.

Além disso, ocorre o fenômeno de encruamento que envolve o aumento da densidade de discordância e de suas interações entre si e com outros obstáculos (como contornos de grão),

formando emaranhados que funcionam como barreiras para a movimentação de discordâncias (MORO; AURAS, 2007).

Por último, o aumento da densidade de discordâncias acontece durante a deformação devido, principalmente, à multiplicação das discordâncias já existentes e concentradores de tensão (como riscos) que originam novas discordâncias (CALLISTER Jr, 2016).

3.5 Propriedades mecânicas

Na fabricação de metais, objetivam-se características, previamente projetadas, de acordo com a aplicação do material. Nesse contexto, as propriedades mecânicas desempenham função importante no comportamento do material de resistir a esforços específicos durante sua aplicação.

As propriedades mecânicas são obtidas por meio de ensaios que exercem função importante no controle de qualidade de produtos rotineiramente fabricados e no desenvolvimento de novos materiais.

No caso do CA-60, segundo a norma ABNT NBR 7480, os fornecedores devem disponibilizar um certificado de qualidade que, dentre inúmeras informações, contenham os valores de determinadas características mecânicas, são elas: Limite de escoamento (LE), Limite de Resistência (LR), relação LR/LE, Alongamento (AL) e resultado do ensaio de dobramento.

Os dados de LE, LR e AL são obtidos por meio do ensaio de tração. Além dos relatados, mas não obrigatório no referido certificado, tem-se o coeficiente de conformação superficial que é descoberto por meio do ensaio de aderência. Ademais, como teste complementar, quando solicitado pelo comprador, pode-se executar o ensaio de fadiga.

Em resumo, visando a caracterização mecânica do CA-60, utilizam-se os ensaios de tração, dobramento, aderência e fadiga. Destes, os dois primeiros são os principais usados no dia a dia e, por isso, serão abordados, junto com as propriedades mecânicas obtidas que devem constar no certificado de qualidade.

3.5.1 Ensaio de tração

O teste de tração é o principal ensaio utilizado para obtenção das propriedades mecânicas, tais como: limite de resistência à tração, limite de escoamento, alongamento, limite de ruptura, módulo de elasticidade, módulo de resiliência, módulo de tenacidade e coeficiente de

encruamento.

Essas características mecânicas são obtidas e, geralmente, representadas por meio do gráfico tensão-deformação que é gerado do ensaio que, basicamente, baseia-se na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo de prova até a ruptura.

O teste de tração é considerado um ensaio destrutivo devido a inutilização parcial ou total da amostra. Além disso, caracteriza-se como estático por causa da baixa velocidade da carga aplicada. O ensaio possui vantagens como identificação de inúmeras propriedades mecânicas, além da facilidade e rapidez de execução.

As diretrizes do ensaio variam de acordo com a norma utilizada. No teste para o CA-60, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 7480 aponta como referência as normas da *International Standards Organization* (ISO): ABNT NBR ISO 6892-1 e ABNT NBR ISO 15630-1.

3.5.1.1 Limite de Escoamento - LE

Limite ou tensão de escoamento é o ponto que delimita o fim da região elástica e o início da fase plástica. Esse valor é particularmente importante em aplicações em que a deformação permanente não pode ocorrer. Por isso, utiliza-se como parâmetro de resistência do material. No caso do CA-60, segundo a norma ABNT NBR 7480, o valor mínimo de resistência ao escoamento deve ser de 600 Mpa (SOUZA, 1982).

3.5.1.2 Limite de Resistência - LR

É a tensão máxima que o material suporta sem haver fratura interna ou externa. Após esse ponto, ocorre diminuição da secção transversal (estricção) da peça. No caso do CA-60, segundo a norma ABNT NBR 7480, o valor de limite de resistência deve ser igual ou superior a $1,05 \cdot LE$ e, obrigatoriamente, maior que 660 Mpa.

3.5.1.3 Relação elástica - LR/LE

É a relação entre LR e LE. Associa-se este parâmetro à ductilidade, de forma que o aumento desse valor repercute na melhoria da conformabilidade do material. Contudo, a maior importância deste parâmetro é como critério de segurança. No caso do CA-60, segundo a norma ABNT NBR 7480, o valor mínimo dessa operação deve ser igual ou superior a 1,05 (OLIVEIRA

et al., 2022).

3.5.1.4 Alongamento - AL

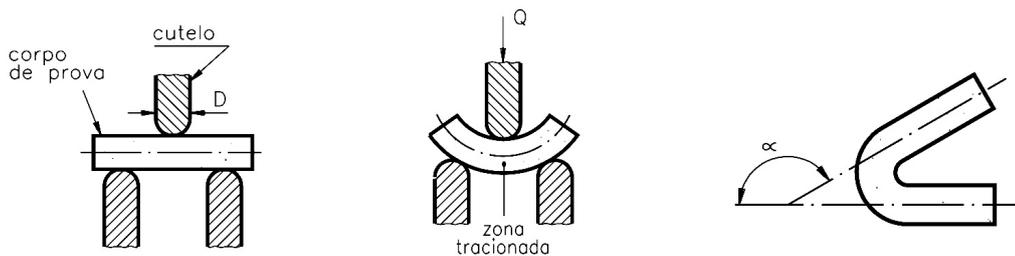
É a quantificação do nível de deformação plástica e é utilizado como parâmetro para mensurar a ductilidade. Quanto maior o alongamento, mais dúctil é a amostra. No caso do CA-60, segundo a norma ABNT NBR 7480, pode-se verificar essa propriedade de duas maneiras, pelo alongamento após a ruptura do corpo de prova ou alongamento total na força máxima do teste. Na prática, o primeiro é mais utilizado.

3.5.2 Ensaio de dobramento

Esse ensaio fornece, qualitativamente, indicação da ductilidade do material, particularmente importante na análise de barras e fios da construção civil, visto que é necessário que o material possua mínima capacidade de suportar dobramentos (SOUZA, 1982).

O ensaio consiste em dobrar um corpo de prova de eixo retilíneo e seção circular (maciça ou tubular), retangular ou quadrada, assentado em dois apoios afastados a uma distância especificada, de acordo com o tamanho do corpo de prova, por meio de um cutelo, que aplica um esforço perpendicular ao eixo do corpo de prova, até que seja atingido um ângulo desejado. Figura 5 (COZACIUC *et al.*, 1997)

Figura 5 – Ensaio de dobramento



Fonte: (COZACIUC *et al.*, 1997)

A severidade do ensaio é determinada pelo diâmetro do cutelo e pelo ângulo que, geralmente, é 90°, 120° ou 180°. Após o ensaio, analisa-se a zona deformada a olho nu como método de inspeção. O material é aprovado se não houver defeitos, tais como: trincas, fissuras, rompimentos ou fendas (SOUZA, 1982) (COZACIUC *et al.*, 1997).

As diretrizes do ensaio variam de acordo com a norma utilizada. No teste para o CA-60, a ABNT NBR 7480 - que referencia a ABNT NBR 17005 - afirma que o ângulo de dobramento deve ser de 180°.

3.5.2.1 Diâmetro do pino ou cutelo (mm)

Como visto, o diâmetro do cutelo é um dos principais indicativos da rigorosidade do teste e é selecionado de acordo com a resistência do aço e com a espessura do corpo de prova. Quanto mais resistente é o material, maior o diâmetro do cutelo e, conseqüentemente, menos severo é o ensaio (SOUZA, 1982) (COZACIUC *et al.*, 1997).

No caso do CA-60, segundo a norma ABNT NBR 7480, o diâmetro do cutelo deve ser de 5mm e o material é aprovado se não houver fissuras ou rupturas na zona tracionada do corpo de prova.

3.6 *ImageJ*

O *ImageJ* é um programa de processamento e análises de imagens desenvolvido em linguagem Java por Wayne Rasband no National Institute of Mental Health, USA. O aplicativo é capaz de exibir, editar, analisar, processar, salvar e imprimir imagens de 8, 16 e 32 bits, além de suportar extensões como JPEG, TIFF/TIF, GIF, BMP, DICOM, PGM e FITS (FERREIRA; RASBAND, 2010-2012).

Devido possuir código aberto e domínio público, é possível qualquer pessoa inspecionar, modificar e aprimorar as ferramentas do aplicativo que pode ser empregado em sistemas operacionais Windows, MacOs e Linux, em 32 ou 64 bits. Por isso, devido à notória versatilidade, utiliza-se o *ImageJ* em diversas áreas de conhecimento, tais como: médicas, biológicas e ciência dos materiais.

3.7 *Minitab*

O Minitab é um programa de análise estatística de dados. O aplicativo foi desenvolvido na universidade estadual da Pensilvânia, em 1972, com o objetivo de auxiliar no ensino de estatística aos estudantes.

Atualmente, além de instituições de ensino, está presente em empresas privadas devido à capacidade de ser utilizado, por exemplo, no controle de processos visando à melhoria contínua. Com exceção do período de teste gratuito, o acesso ao aplicativo é pago.

4 METODOLOGIA

Os ensaios de tração e dobramento foram realizados na usina siderúrgica. Desta forma, quanto à caracterização mecânica, este trabalho se restringiu à análise dos dados cedidos. Posteriormente, foram disponibilizadas amostras, do mesmo lote dos ensaios citados, para a realização da caracterização microestrutural.

4.1 Aço ABNT 1010

As amostras disponibilizadas para este trabalho pertencem à categoria de aço ABNT 1010 e, como citado, ao mesmo lote de produção. Dessa forma, houve garantia da uniformidade da composição química, expresso na Tabela 1.

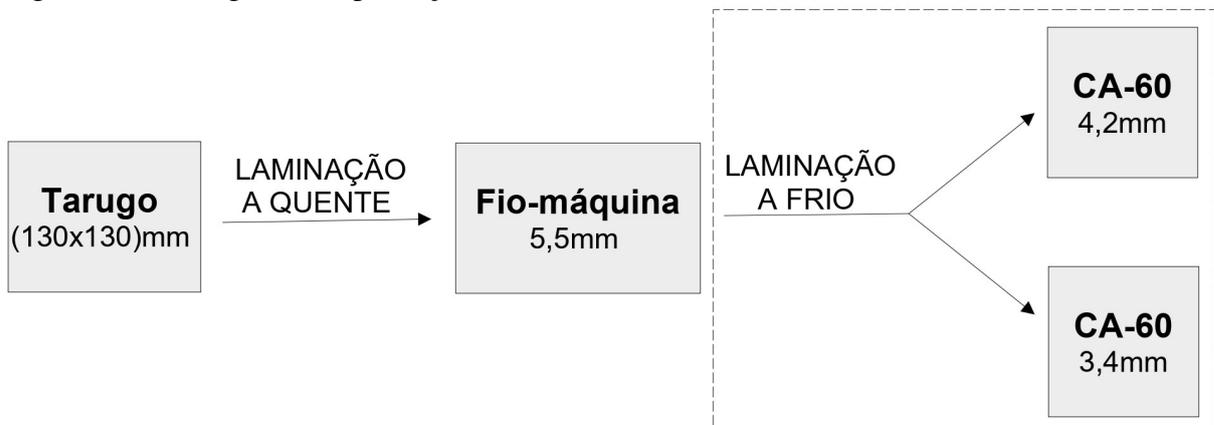
Tabela 1 – Composição química das amostras

Amostra	C	Mn	Si	S	P	Cu
38,2% (3,4mm)	0,1071	0,5402	0,1343	0,0360	0,0161	0,2493
23,6% (4,2mm)	0,1018	0,5482	0,1361	0,0320	0,0199	0,2640

Fonte: Setor de controle da qualidade da usina siderúrgica

De acordo com a área tracejada da Figura 6, os corpos-de-prova analisados foram fabricados por meio da laminação a frio e possuem dois diâmetros distintos: 3,4 mm e 4,2 mm. A matéria-prima para obtenção dos referidos vergalhões é o fio máquina de 5,5 mm que foi produzido via laminação a quente a partir de um tarugo quadrangular.

Figura 6 – Fluxograma da produção dos CA's-60



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir desse momento, é conveniente converter os diâmetros em níveis de redução a frio, expressos em %, visto que é o parâmetro de análise. Dessa forma, aplicou-se a fórmula 3.2 para a obtenção dos resultados da Tabela 2:

Tabela 2 – Nível de redução a frio (%) das amostras

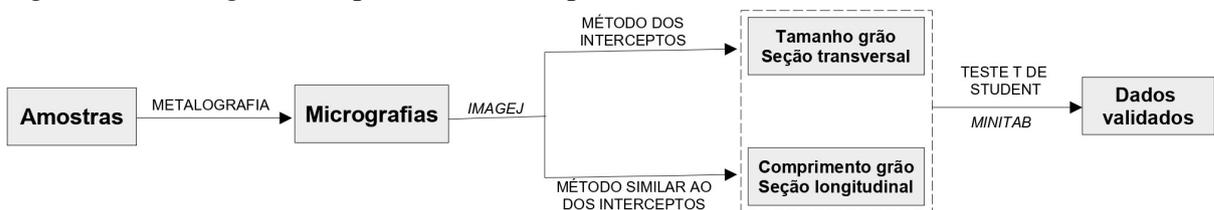
Diâmetro inicial (mm)	Diâmetro final (mm)	Redução a frio (%)
5,5	4,2	23,6
	3,4	38,2

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Procedimento experimental

A caracterização microestrutural se concentrou em dados dimensionais dos cristais. Para isso, de acordo com a Figura 7, as amostras foram tratadas metalograficamente para obtenção das micrografias. Posteriormente, com auxílio do aplicativo *ImageJ* e dos métodos adequados, as dimensões de interesse dos grãos foram obtidas, as quais foram validadas por meio do teste de significância *t* de *Student* e do aplicativo *Minitab*.

Figura 7 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto à amostragem visando à caracterização microestrutural, utilizaram-se três amostras por seção para cada nível de redução a frio, Tabela 3. Dessa forma, 12 corpos-de-prova foram submetidos ao tratamento metalográfico, identificados de A até L. Posteriormente, no processamento de imagens visando dimensionar os grãos, utilizaram-se 3 micrografias para cada amostra. Logo, totalizaram 36 imagens, identificadas por meio de um número (1 a 3) precedido de letra maiúscula (A a L).

Tabela 3 – Configuração e nomenclatura das amostras

Redução a frio (%)	Metalografia		Micrografias
	Seção trans.	Seção long.	
23,6	A	-	A1,A2,A3
	B	-	B1,B2,B3
	C	-	C1,C2,C3
	-	G	G1,G2,G3
	-	H	H1,H2,H3
	-	I	I1,I2,I3
38,2	D	-	D1,D2,D3
	E	-	E1,E2,E3
	F	-	F1,FF2,F3
	-	J	J1,J2,J3
	-	K	K1,K2,K3
	-	L	L1,L2,L3

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Metalografia

As amostras foram cortadas manualmente com auxílio de um arco de serra. Posteriormente, embutidas a quente com resina fenólica (baquelite) por meio da Embutidora Metalográfica Arotec PRE 30Mi. O lixamento foi executado com lixas de granulometrias 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh - rotacionando as amostras 90° em cada mudança de lixa.

Em seguida, o polimento foi executado com alumina em suspensão de 3µm e 1µm. Tanto o polimento quanto o lixamento foram realizados na Politriz/Lixadeira Metalográfica Arotec Aropol 2V-PU. Imediatamente, realizou-se o ataque químico por imersão com o reagente Nital 2%.

Por fim, as microestruturas foram visualizadas, analisadas e registradas em aumento de 500x no Microscópio Metalúrgico de Luz Refletida LED Olympus BX41M. As imagens obtidas foram encaminhadas para o processamento e análise no *ImageJ*.

4.2.2 Caracterização microestrutural

Após o tratamento metalográfico, buscou-se analisar a seção transversal com ênfase no Tmg, estimado por meio do método da interceptação linear de Heyn e do aplicativo *ImageJ*. Posteriormente, também com auxílio do referido aplicativo, investigou-se a seção longitudinal com foco no Comprimento Médio de Grão (Cmg).

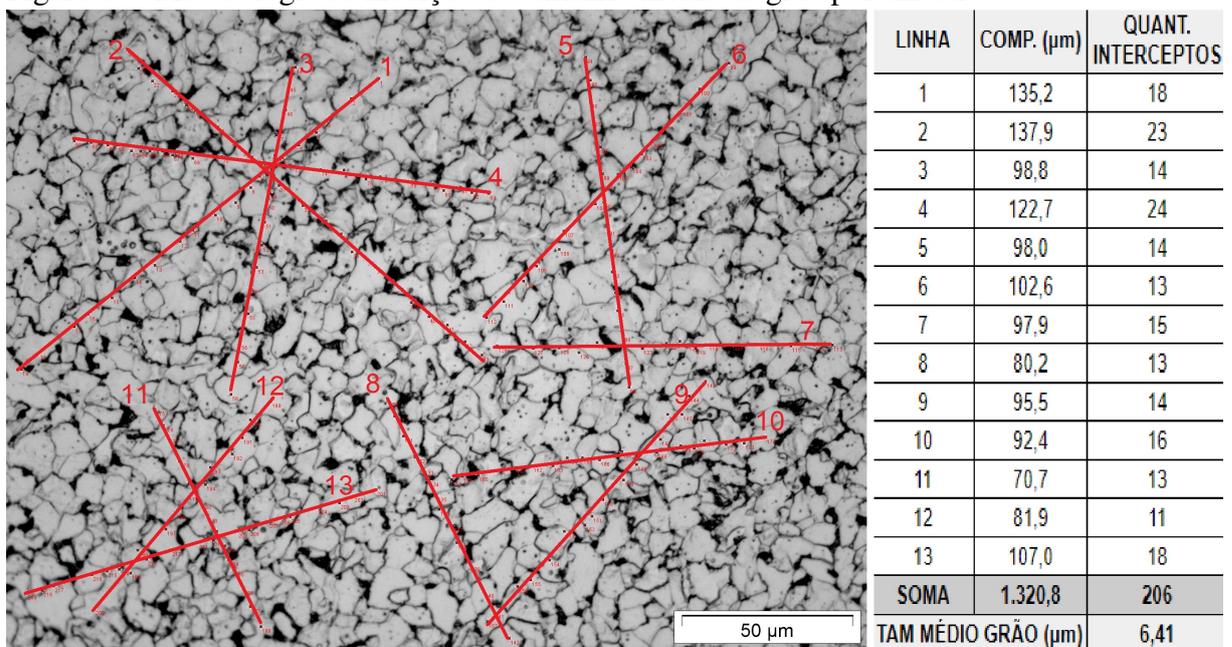
4.2.2.1 Seção transversal - Tamanho médio de grão

Utilizou-se o método da interceptação linear de Heyn aliado ao aplicativo *ImageJ* com o intuito de mensurar o tamanho médio dos grãos. Logo, empregou-se a metodologia semi automática devido ao auxílio do processador de imagens, operado manualmente.

Primeiramente, com o intuito de melhorar a identificação de detalhes da estrutura, o contraste e brilho foram aumentados. Em seguida, calibrou-se o *ImageJ* com auxílio da escala gráfica presente na micrografia.

Foram marcadas 13 linhas dispersas em cada micrografia com diferentes orientações, de acordo com a Figura 8. A partir da norma ASTM E112, adotou-se essa metodologia como boa prática, embora a estrutura não possua anisotropia.

Figura 8 – Metodologia de medição do tamanho médio de grão por amostra



Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme a referida norma, cada extremidade de linha quando presente no interior do grão foi contabilizada como $\frac{1}{2}$. Em seguida, as linhas tiveram os comprimentos mensurados em μm e a quantidade de interceptos contabilizados. Por fim, calculou-se o T_{mg} por meio da Fórmula 3.1 e auxílio de planilha eletrônica. (ASTM, 2021)

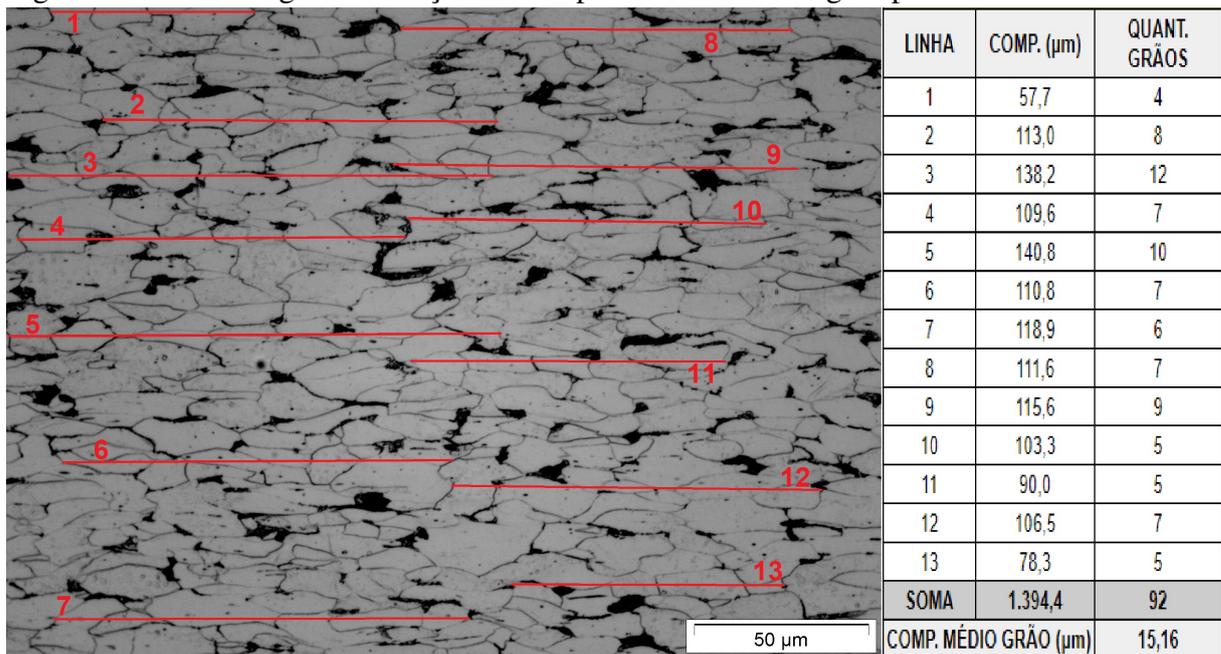
4.2.2.2 Seção longitudinal - Comprimento médio de grão

Utilizou-se raciocínio semelhante ao do método da interceptação linear de Heyn aliada ao aplicativo *ImageJ* com o intuito de mensurar o comprimento médio dos grãos. Devido à mudança da aplicabilidade do método, essa variação não é normatizada.

Nesse caso, a diferença consistiu em mensurar o tamanho dos grãos somente na direção de laminação, em que os grãos estão alongados. Dessa forma, objetivou-se estimar o comprimento médio dos cristais.

O processamento das micrografias aconteceu de forma semelhante à seção transversal, com contraste e brilho elevados, seguidos da calibração do aplicativo. Posteriormente, 13 linhas foram marcadas em cada micrografia com orientações semelhantes, paralelas à direção de laminação, conforme Figura 9.

Figura 9 – Metodologia de medição do comprimento médio de grão por amostra



Fonte: Elaborado pelo autor

Em suma, mensurou-se o comprimento médio dos grãos pela relação entre os somatórios dos comprimentos das linhas e a quantidade de grãos interceptados. Para isso, utilizou-se planilha eletrônica.

4.2.3 Testes de significância

Com o intuito de verificar se os valores de T_{mg} 's e C_{mg} 's para os diferentes níveis de reduções são estatisticamente iguais, dois testes t de *Student* foram realizados por meio do aplicativo Minitab, de acordo com a Tabela 4. Para isso, utilizaram-se as mensurações das 36 micrografias (Tabela 3).

Tabela 4 – Testes de significância - t de *Student*

Teste	Hipótese H_0	Se Valor-p > 0,01
1	T_{mg} 's iguais	H_0 é verdade
2	C_{mg} 's iguais	H_0 é verdade

Fonte: Elaborado pelo autor.

No teste 1, considerou-se que H_0 é a hipótese testada de que os tamanhos médios de grãos são iguais. De forma semelhante, no teste 2, H_0 também foi a condição de nulidade para verificar se os comprimentos médios de grãos são iguais. O nível de significância utilizado para os dois testes foi de 1%.

Basicamente, a hipótese H_0 é verdadeira se o "Valor-p" for maior que 0,01, calculado pelo aplicativo, significando que os valores comparados são estatisticamente iguais. Caso contrário, rejeita-se a hipótese e é possível afirmar que existe diferença significativa entre os resultados das amostras (DE OLIVEIRA, 2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaios de tração e dobramento

Os resultados dos ensaios de tração disponibilizados estão esquematizados na Tabela 5. Embora a empresa possua critérios próprios de aceitabilidade, utilizou-se a NBR 7480 como referência para comparações.

Tabela 5 – Resultado dos ensaios mecânicos e a comparação com os critérios da NBR 7480

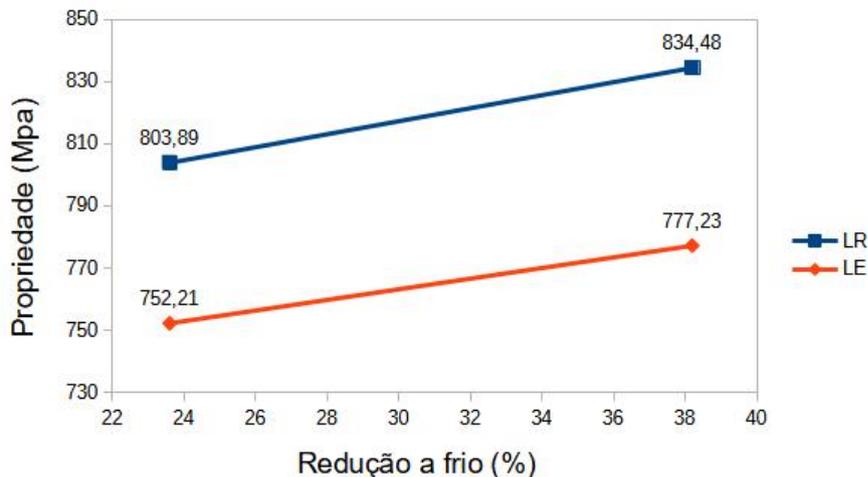
	23,6% (4,2mm)	38,2% (3,4mm)	MÍNIMO (NBR)
LIMITE DE ESCOAMENTO - LE (Mpa)	752,21	777,23	600
LIMITE DE RESISTÊNCIA - LR (Mpa)	803,89	834,48	660
LR/LE	1,07	1,07	1,05
ALONGAMENTO (%)	10,85	5,09	5
DOBRAMENTO	OK	OK	OK

Fonte: Fornecedor

De acordo com os dados apresentados, identifica-se que os dois materiais foram aprovados quando comparados aos critérios mínimos estabelecidos na norma NBR 7480. Como mencionado, a nomenclatura “CA-60” é caracterizada pelo material possuir LE de, no mínimo, 600 Mpa. O menor valor de LE obtido - 752,21 Mpa - é cerca de 25% maior que o critério.

Além disso, observa-se, na Figura 10, que o maior nível de redução - 38,2% - obteve maior média de LE: 777,23 Mpa. Isso significa que o material é mais resistente ao início da conformação plástica, atributo desejável para que não ocorra escoamento durante a aplicação.

Figura 10 – Variação do LR e LE com a redução a frio



Fonte: Elaborado pelo autor

Semelhantemente, o maior nível de redução a frio - 38,2% - obteve maior LR: 834,48Mpa. Dessa forma, é possível inferir que, após o início da deformação plástica, este material possui maior capacidade máxima de resistência antes da ocorrência de fratura interna ou externa.

O aumento da resistência mecânica após a deformação a frio - expressos por LE e LR - é, dentre outros fatores, devido ao encruamento, caracterizado pelo aumento expressivo de defeitos cristalinos puntiformes e de discordâncias por unidade de volume (PADILHA; JUNIOR, 2005).

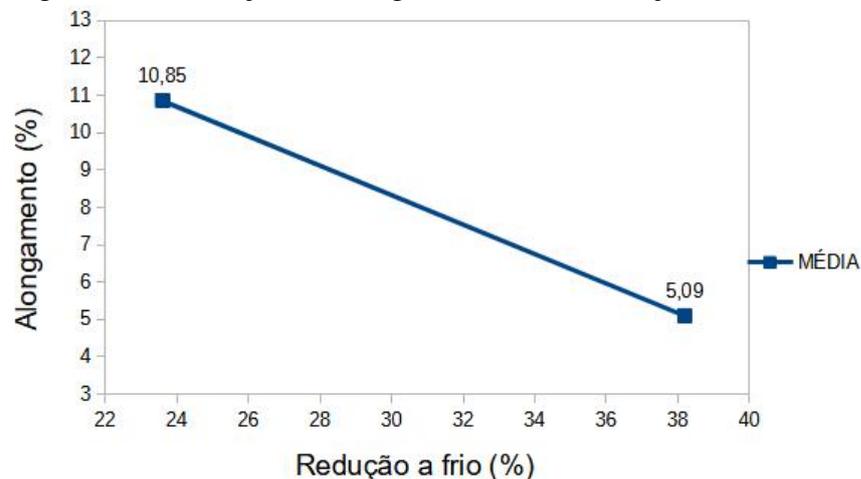
Esse aumento da densidade de discordâncias ocasiona maior interação entre elas e outros obstáculos, dificultando a mobilidade do mecanismo de deformação plástica. Dessa forma, a resistência mecânica aumenta de acordo com o nível de redução.

Visto isso, o encruamento é um fenômeno que resulta no endurecimento de materiais devido à conformação plástica a frio. Dessa forma, considera-se esse mecanismo relevante no âmbito industrial, visto que, é possível alterar as propriedades mecânicas dos metais (HISSANAGA, 2013).

A relação elástica LR/LE foi de 1,07 para os dois materiais. É desejável que este valor não seja muito elevado. Por isso, é comum que haja controle de qualidade nas empresas que estabelecem, também, limite máximo.

Quanto ao alongamento, Figura 11, o menor nível de redução a frio - 23,6% - obteve maior média: 10,85%. Logo, relaciona-se à maior ductilidade, ou seja, na maior capacidade de deformação plástica antes da fratura durante a aplicação.

Figura 11 – Variação do alongamento com a redução a frio

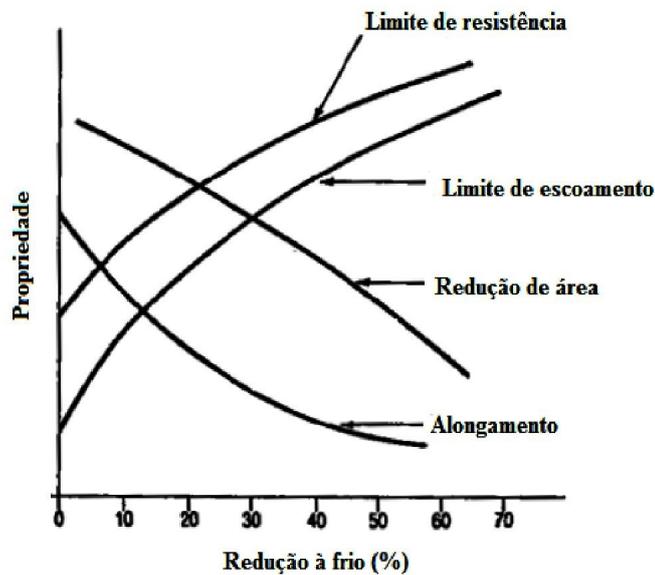


Fonte: Elaborado pelo autor

No ensaio de dobramento, o resultado é qualitativo e também está associado à ductilidade. Os dois materiais, após o ensaio, foram inspecionados visualmente e não foram identificados defeitos.

Portanto, os resultados estão em consonância com a literatura, Figura 12, visto que, a deformação a frio promove o aumento de resistência mecânica - LR e LE - e, comumente, a diminuição da ductilidade - %AL. (COLPAERT, 2008).

Figura 12 – Variação de propriedades mecânicas de metais deformados a frio



Fonte: (SILVA; MEI, 2010)

Ressalva-se que há um limite máximo de aumento de resistência a partir de determinado grau de redução a frio. Nesse ponto, ocorre, principalmente, estabilização da densidade de discordâncias devido à multiplicação e aniquilação das mesmas possuírem mesma ordem de grandeza. Esse fenômeno é denominado saturação. (ESTIVAL *et al.*, 2023)

Além disso, destaca-se que a resistência à corrosão do aço carbono diminui com o aumento do nível de deformação plástica a frio devido ao acúmulo de energia interna no material, proveniente do encruamento. (RIZZO, 2007)

5.1.1 Caracterização microestrutural

5.1.1.1 Seção transversal - tamanho médio de grão

A Tabela 6 e 7 explicitam a compilação dos dados e os resultados dos Tmg's das 9 micrografias analisadas de cada nível de redução a frio.

Tabela 6 – Tamanho médio de grão por amostra - 23,6% (4,2mm)
- Seção transversal

MICROGRAFIA	COMP. TOTAL LINHAS (μm)	QUANT. TOTAL INTERCEPTOS	TAM. MÉDIO GRÃO (μm)
A1	1.335,51	217	6,15
A2	1.293,31	217	5,96
A3	1.320,81	206	6,41
B1	1.189,51	211	5,64
B2	1.144,61	194	5,90
B3	1.105,33	175	6,32
C1	1.134,67	190	5,97
C2	1.266,45	201	6,30
C3	1.054,98	181	5,83

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Tamanho médio de grão por amostra - 38,2% (3,4mm)
- Seção transversal

MICROGRAFIA	COMP. TOTAL LINHAS (μm)	QUANT. TOTAL INTERCEPTOS	TAM. MÉDIO GRÃO (μm)
D1	855,13	168	5,09
D2	801,68	178	4,50
D3	759,75	165	4,60
E1	909,96	200	4,55
E2	844,77	175	4,83
E3	784,66	153	5,13
F1	935,50	184	5,08
F2	913,55	189	4,83
F3	981,35	209	4,70

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado do teste t de *Student* empregando o aplicativo Minitab está descrito na Tabela 8. Como o "Valor-p" obtido foi de 0,000, ou seja, menor que 0,01, é possível afirmar que os tamanhos médios de grãos são estatisticamente diferentes quando ocorre variação de nível de redução a frio.

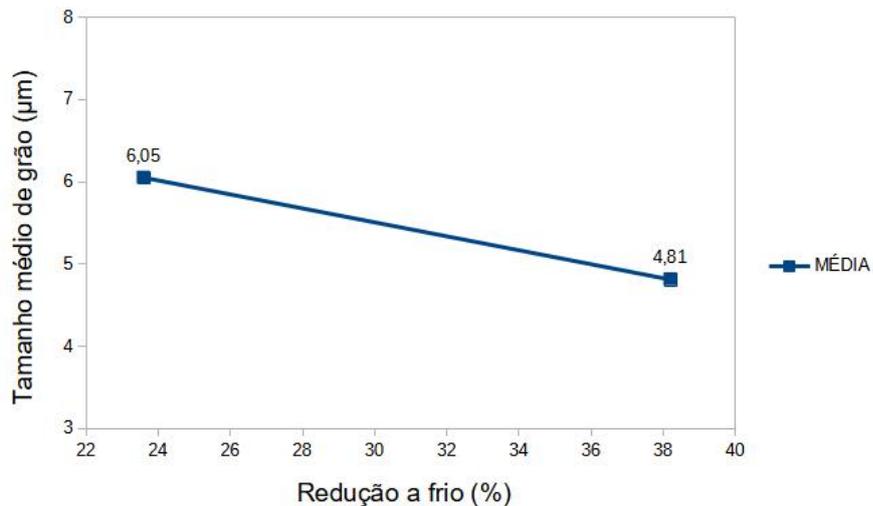
Tabela 8 – Teste 1 - t de *Student* - Tamanho médio de grão

Amostra	Média (μm)	Desvio Padrão	Valor-p
38,2% (3,4mm)	4,81	0,24	0,000
23,6% (4,2mm)	6,05	0,26	

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 13, o Tmg do menor (23,6%) e maior (38,2%) grau de deformação foi de, respectivamente, 6,05 μm e 4,81 μm . Logo, o aumento do nível de redução a frio ocasiona a diminuição do tamanho médio de grão. Assim, o tamanho do grão final é função do grau de deformação (CHUBENKO *et al.*, 2023).

Figura 13 – Variação do tamanho médio de grão com o nível de redução a frio (%)



Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, é possível afirmar que a redução a frio ocasiona o aumento da área de contornos de grão por unidade de volume, caracterizando mais obstáculos no mecanismo de deformação plástica. Isso ocorre devido aos contornos funcionarem como obstáculos no mecanismo de deformação plástica. Com isso, o reticulado adjacente aos contornos é, em média, mais distorcido que o centro dos cristais (PADILHA; JUNIOR, 2005) (REED-HILL, 1982).

Dessa forma, o menor tamanho de grão favorece a potencialização do fenômeno do encruamento. Assim, a movimentação das discordâncias é dificultada devido à maior interação entre elas e outras barreiras, como os contornos de grãos. Logo, nota-se que o tamanho de grão influencia na resistência à deformação plástica.

Visto isso, por meio dos resultados da Figura 13 e da Tabela 11, afirma-se que o aumento do grau de redução a frio impacta na redução do tamanho médio dos grãos e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas dos metais.

Quanto à metodologia aplicada, embora a norma ASTM E112 não especifique a ampliação da micrografia para aplicação do método de Heyn, notou-se que esta não deve ser pequena (por exemplo, 50x) pois a visualização da microestrutura é prejudicada. Dessa forma, indica-se magnificação igual ou acima de 200x.

Além disso, observou-se, por meio do microscópio, que o método de ataque deve ser eficiente para que todos os contornos de grãos sejam revelados. Caso contrário, a visualização parcial acarreta em menor precisão da estimativa do tamanho do grão.

5.1.1.2 Seção longitudinal - comprimento médio de grão

A Tabela 9 e 10 demonstram a compilação dos dados e os resultados dos Cmg's das 9 micrografias analisadas de cada nível de redução a frio.

Tabela 9 – Comprimento médio de grão - 23,6% (4,2mm) - Seção longitudinal

MICROGRAFIA	COMP. TOTAL LINHAS (μm)	QUANT. TOTAL INTERCEPTOS	COMP. MÉDIO GRÃO (μm)
G1	1.145,64	79	14,50
G2	1.087,07	70	15,53
G3	1.018,70	66	15,43
H1	1.167,17	76	15,36
H2	1.401,81	96	14,60
H3	1.244,15	75	16,59
I1	1.099,31	73	15,06
I2	1.264,68	81	15,61
I3	1.394,39	92	15,16

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10 – Comprimento médio de grão - 38,2% (3,4mm) - Seção longitudinal

MICROGRAFIA	COMP. TOTAL LINHAS (μm)	QUANT. TOTAL INTERCEPTOS	COMP. MÉDIO GRÃO (μm)
J1	904,83	52	17,40
J2	1.068,77	56	19,09
J3	954,91	53	18,02
K1	1.073,28	56	19,17
K2	1.099,21	57	19,28
K3	1.027,09	55	18,67
L1	832,10	48	17,34
L2	888,39	50	17,77
L3	1.112,76	57	19,52

Fonte: Elaborado pelo autor

O resultado do teste t de *Student* empregando o aplicativo Minitab está descrito na Tabela 11. Como o "Valor-p" obtido foi de 0,000, ou seja, menor que 0,01, é possível afirmar que os comprimentos médios de grãos são estatisticamente diferentes quando ocorre variação de nível de redução a frio.

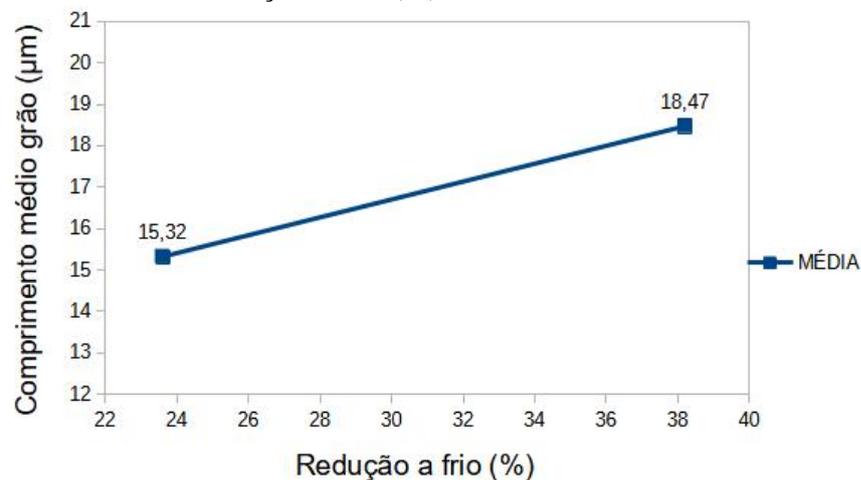
Tabela 11 – Teste 2 - t de *Student* - Comprimento médio de grão

Amostra	Média (μm)	Desvio Padrão	Valor-p
38,2% (3,4mm)	18,47	0,85	0,000
23,6% (4,2mm)	15,32	0,62	

Fonte: Elaborado pelo autor.

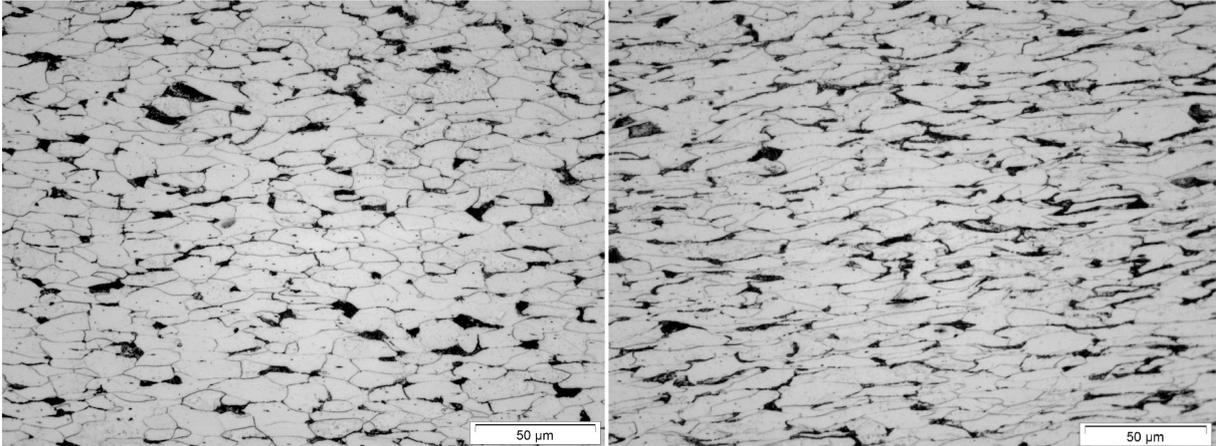
De acordo com a Figura 14, o Cmg do menor (23,6%) e maior (38,2%) nível de redução a frio foi de, respectivamente, $15,32\mu\text{m}$ e $18,47\mu\text{m}$. Dessa forma, é possível afirmar que o aumento da redução a frio ocasiona maior alongamento dos grãos. Corrobora-se essa afirmação por meio da Figura 15. À esquerda, a micrografia da amostra de 23,6% de redução e, à direita, de 38,2%.

Figura 14 – Variação do comprimento médio de grão com o nível de redução a frio (%)



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Micrografias - ABNT 1010 - Seção longitudinal



Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso, na Figura 15, observa-se o alongamento dos cristais na direção principal de deformação, ou seja, paralela à laminação. Dessa forma, a anisotropia é introduzida no material devido ao trabalho a frio (RIZZO, 2007).

O alongamento dos cristais acontece devido ao mecanismo de tendência à deformação homogênea. Conforme o tamanho de grão diminui, o alongamento aumenta (DIETER, 1981).

Ademais, observou-se que os contornos de grão se tornam mais alongados e compactos com o aumento do grau de deformação ao ponto da visualização dos contornos de grãos ser prejudicada (ESTIVAL *et al.*, 2023).

Ressalva-se que os grãos de um policristal, quando submetidos à deformação plástica, adquirem orientação preferencial ou textura. Contudo, a presença de textura não pode ser deduzida apenas pelo formato dos cristais (PADILHA; JUNIOR, 2005).

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

- O aumento do grau de redução a frio ocasiona a elevação do LE e do LR e diminuição da ductilidade;
- O aumento do grau de redução a frio altera as propriedades mecânicas do aço SAE 1010 devido, entre outros fatores, ao fenômeno de redução do tamanho médio de grão;
- O alongamento dos cristais na direção de laminação foi observado e, identificado que, seu valor é tanto maior quanto for o nível de redução a frio;
- O aplicativo *ImageJ* se demonstrou acessível, eficaz e intuitivo para auxiliar na mensuração de características dimensionais dos grãos.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Mensurar tamanho de grão do fio-máquina e comparar com os valores dos CA's produzidos a partir dele;
- Realizar a técnica EBSD para identificar a presença de textura cristalográfica na seção longitudinal;
- Realizar a técnica DRX para mensurar o aumento da densidade de discordâncias e do nível de tensões residuais, visando relacionar os resultados com o grau de redução a frio;

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 7480**: Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado — requisitos. Rio de Janeiro, 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112**: Standard test methods for determining average grain size. West Conshohocken, PA, USA, 2021.
- BRESCIANI FILHO, E. **Conformação plástica dos metais**. 6ª. ed. Campinas, SP: São Paulo: EPUSP, 2011.
- CALLISTER Jr, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CHUBENKO, V. A.; SAVELIEV, S. G.; KHINOTSKA, A. A.; KONDRATENKO, M. M. Y. T. P. Influence of deformation degree on grains size and borders between them in metal alloys during cold rolling of sheets. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1254, 2023.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª. ed. São Paulo: Blucher, 2008.
- COZACIUC, I.; SILVA, L. R. d.; TOGNI, M. A. **Telecurso 2000 profissionalizante - Mecânica - Ensaio de materiais**. São Paulo: Globo, 1997.
- DE OLIVEIRA, M. **ESTATÍSTICA BÁSICA: planejamento e otimização de experimentos**. 2017. Disponível em: <<https://www2.ufjf.br/quimica/files/2017/03/Estat%20b%C3%a1stica-B%20a1sica.pdf>>. Acesso em: 12 jul. de 2024.
- DIETER, G. E. **Metalurgia mecânica**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.
- ESTIVAL, R. O.; OLIVEIRA, A. S. d.; HAYAMA, A. d. O. F. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO GRAU DE DEFORMAÇÃO NO COMPORTAMENTO DO AÇO SAE 1010 RECOZIDO**. 2023. Disponível em: <<https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/3550/2725>>. Acesso em: 16 jul 2024.
- FERREIRA, T.; RASBAND, W. **ImageJ User Guide**. 2010–2012. Disponível em: <imagej.nih.gov/ij/docs/guide/>. Acesso em: 20 jul. 2023.
- HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Materiais**. 2ª. ed. São Paulo: Artiber, 2010.
- HISSANAGA, B. M. M. d. S. **VARIÁVEIS DO PROCESSO TERMOMECÂNICO QUE INFLUENCIAM NA RELAÇÃO ELÁSTICA DO VERGALHÃO CA-60**. Dissertação (Mestrado) — CURSO DE MESTRADO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2013.
- IAB. **INSTITUTO AÇO BRASIL: MERCADO BRASILEIRO DE AÇO**. 2024. Disponível em: <https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2024/08/MBA_Edicao-2024.pdf>. Acesso em: 31 ago 2024.
- MORA, N. D.; LUCAS, J. F. R.; MARAN, M. A. **Apostila de materiais elétricos - solidificação e soluções sólidas**. 2010. Disponível em: <<http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downmateriais/materiaiscap6.pdf>>. Acesso em: 11 jun 2024.

MORO, N.; AURAS, A. P. **CONFORMAÇÃO MECÂNICA I – Generalidades, Laminação e Forjamento**. 2007. Disponível em: <https://norbertocefetsc.pro.br/elm/wpcontent/uploads/2014/09/pfb_conformacaoi.pdf>. Acesso em: 13 abr 2024.

OLIVEIRA, V. T. d.; OLIVEIRA, J. d. C. P. T. d.; JUNIOR, J. M. M.; MATTOS, L. A.; CARVALHO, R. d. S. Avaliação microestrutural e das propriedades mecânicas do aço if, laminado a frio e recozido. **Valore**, 2022.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. São Paulo: HEMUS, 1997.

PADILHA, A. F.; JUNIOR, F. S. **Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura**. 3ª. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

REED-HILL, R. E. **Princípios de Metalurgia Física**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1982.

RIZZO, E. M. d. S. **Processos de laminação dos aços: uma introdução**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

SANTANA, D. d. A.; FARIA, G. L. d. Comparação entre métodos padronizados e novas metodologias para estimar o tamanho de grãos em materiais metálicos. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, 2017.

SHACKELFORD, J. **INTRODUCTION TO MATERIALS SCIENCE FOR ENGINEERS**. 9ª. ed. [S.l.]: Pearson, 2021.

SILVA, A. L. V. d. C.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3ª. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

SOUZA, S. A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos**. 5ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1982.