

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

ANA CAROLINA SILVA MELO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO CA-50 EM
SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

MACEIÓ

2024

ANA CAROLINA SILVA MELO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO CA-50 EM
SUAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Alagoas como requisito para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Albanise Enide da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Jorge José Brito da Silva

MACEIÓ

2024

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Maria Helena Mendes Lessa – CRB-4 – 1616

M528e Melo, Ana Carolina Silva.

Estudo da influência da composição química do aço CA-50 em suas propriedades mecânicas / Ana Carolina Silva Melo. – 2024.

69 f. il. : figs. ; tabs. color.

Orientadora: Albanise Enide da Silva.

Coorientador: Jorge José Brito da Silva.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.

Bibliografia: f. 67-69.

1. Aço CA-50. 2. Composição Química. 3. Propriedades mecânicas.
I. Título.

CDU:66.0-034.14

RESUMO

O processo de produção do aço visa transformar minério de ferro ou sucata ferrosa em um material resistente e versátil. A especificação CA-50, empregada no concreto armado, é uma liga metálica amplamente aplicada na construção civil, nomeada conforme sua resistência mínima especificada de 50 kgf/mm². O objetivo deste trabalho consistiu em entender as relações entre a composição química e as propriedades mecânicas de quarenta amostras de aço CA-50 de duas usinas, vinte amostras para cada, cujas rotas produtivas nominam-se pelos termos “semi-integrada” e “integrada”, de uma mesma empresa siderúrgica renomada em seu setor por dedicar-se à produção e fornecimento de aço de alta qualidade para diversos segmentos. Para isso, realizou-se a análise de Espectrometria de Emissão Óptica (EEO), ensaio de tração, análises estatísticas de regressão linear, análise de variância (ANOVA) e correlações. A partir disso, identificou-se que os componentes C, Mg, Mn, Si, P, S, Cr, Ni, Cu, Sn, Zn, O e N têm maior interferência no produto requerido e que variações em suas proporções podem afetá-lo. No entanto, verificou-se que as diferenças entre os teores dos elementos químicos convergem para valores muito próximos de carbono equivalente. Na usina semi-integrada, a média do Limite de escoamento (LE) é de 597,25 MPa, enquanto na usina integrada é ligeiramente maior, com uma média de 615,01 MPa. Por outro lado, o Limite de Resistência (LR) médio na usina semi-integrada é de 692,28 MPa, em comparação com 721,55 MPa na usina integrada. Essa diferença quantitativa reflete diretamente na relação LR/LE, que é de 1,16 para a usina semi-integrada e 1,17 para a usina integrada. Embora a variação seja pequena, sugere uma ligeira diferença na ductilidade do material, com a usina integrada apresentando uma tendência ligeiramente maior para uma maior deformação antes da falha. Notou-se que apesar de serem de tipos diferentes, as usinas fonte da liga mantêm valores dentro dos limites estabelecidos pela norma ABNT 7480 para composição química e propriedades mecânicas, sendo a usina integrada a que detêm mais precisão às exigências, o que pode ser explicado pela origem da matéria-prima utilizada. Assim, dentro das amostras estudadas, observou-se que não há considerável influência da composição química sobre as propriedades mecânicas, e isso sugere que outros fatores podem desempenhar um papel mais significativo.

Palavras-Chave: Aço CA-50; Composição Química; Propriedades Mecânicas; Processos Produtivos.

ABSTRACT

The steel production process aims to transform iron ore or ferrous scrap into a strong and versatile material. The CA-50 specification, used in reinforced concrete, is a widely applied alloy in the construction industry, named according to its specified minimum yield strength of 50 kgf/mm². The objective of this study was to understand the relationships between the chemical composition and mechanical properties of CA-50 steel samples from two mills, one semi-integrated and the other integrated, of a renowned steel company known for its dedication to producing and supplying high-quality steel for various sectors. For this purpose, Optical Emission Spectrometry (OES) analysis, tensile testing, linear regression statistical analyses, Analysis of Variance (ANOVA), and correlations were conducted. It was identified that the components C, Mg, Mn, Si, P, S, Cr, Ni, Cu, Sn, Zn, O, and N have the greatest influence on the required product and that variations in their proportions can affect it. However, it was found that the differences in the levels of chemical elements converge to values very close to the equivalent carbon. This contributed to a better understanding of the relationship between the usual constitution of CA-50 steel and its Elongation (E), Tensile Strength (TS), Yield Strength (YS), and the ratio between these limits (YS/TS), which, in turn, assist in selection and quality control. In the semi-integrated mill, the average Yield Strength (YS) is 597.25 MPa, while in the integrated mill, it is slightly higher, with an average of 615.01 MPa. On the other hand, the average Tensile Strength (TS) in the semi-integrated mill is 692.28 MPa, compared to 721.55 MPa in the integrated mill. This quantitative difference directly reflects on the YS/TS ratio, which is 1.16 for the semi-integrated mill and 1.17 for the integrated mill. Although the variation is small, it suggests a slight difference in material ductility, with the integrated mill showing a slightly higher tendency for greater deformation before failure. It was noticed that despite being of different types, the mills supplying the alloy maintain values very close to those established by the ABNT 7480 standard for chemical composition and mechanical properties, with the integrated mill being more precise to the requirements, which can be explained by the origin of the raw material used. Thus, within the studied samples, it was observed that there is no considerable influence of chemical composition on mechanical properties, suggesting that other factors may play a more significant role.

Keywords: CA-50 Steel; Chemical Composition; Mechanical Properties; Production Processes.

AGRADECIMENTOS

Começo dizendo que fé foi o que me sustentou nos dias em que as respostas pareciam inatingíveis e os resultados incertos. Em meio ao silêncio das dúvidas, ao cansaço da persistência e à ansiedade, encontrei destemores que transcendiam o que eu não podia compreender racionalmente. De certo, Deus atendeu minhas orações e me conduziu até aqui. Sendo assim, inevitavelmente, é justo, sobretudo, dar-Lhe todas as graças.

Dedico este trabalho ao meu núcleo familiar, pois, sem uma base tão consistente, não teria obtido tantas conquistas. À minha mãe, Josefa, por, dentre infinitas razões, inspirar, entender e apoiar minhas escolhas, o que me deu forças para ir além. Ao meu pai, Jackson, por me ensinar que apesar de a vida ser dura, podemos ser ainda mais contundentes, com persistência e coragem. Ao meu irmão, Erich, por acreditar em mim, até quando eu mesma duvidava. Ainda não sabia, mas precisava, realmente, disso.

Ressalto gratidão às minhas tias, Gisleide, Gilvânia e Cícera; aos meus avós, Vandete, Cícero e Luzia (in memoriam) e ao meu primo, Igor, por me amarem, incentivarem e admirarem genuinamente, o que fez e continua fazendo total diferença. É incontestavelmente recíproco.

Agradeço imensamente à professora Albanise, por ter aceitado me orientar e investido em mim. Por toda paciência, disponibilidade, dedicação, prontidão e sabedoria, adjetivos tais que tive o privilégio de perceber de forma tão assertiva. Agradeço também ao professor Jorge, por apostar no tema e, conseqüentemente, na minha capacidade de desenvolvê-lo. Sua gentileza sempre é de bom tom. Não poderia ter sido mais feliz ao convidá-los a me guiar nessa jornada.

Faz-se indispensável reconhecer a significância de Deidiane Soares, que para além de colega de curso, tornou-se minha irmã. Nada disso seria tão digno sem a dádiva que é a sua amizade. Obrigada por tanto.

Retribuo minha mais sincera gratidão aos demais companheiros de trajetória: Simone, Frankilin e Daniel, uma vez que a renovação de nossos laços me manteve confiante.

Expresso ainda gratidão a Leonardo George, por ter sido verdadeiramente parceiro, prestado suporte, tranquilizado, compreendido e insistido na certeza do sucesso. Sinto-me triunfante.

Não sei mensurar totalmente quão agraciada fui em poder contar com Joseval Assis, Rafael Marzullo, Ulisses Teixeira e Gustavo Boato, pela infinita generosidade, atenção, solicitude, acessibilidade, acolhimento e motivação. Reitero minha consideração pelo profissionalismo e humanidade aos quais tive a honra do contato. Sem vocês nada disso seria viável ou mesmo possível.

“Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido. Agora é hora de entender mais, para que possamos temer menos.”

(Marie Curie)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de configuração geométrica com nervuras transversais oblíquas em dois lados da barra e nervuras longitudinais	19
Figura 2 – Rota semi-integrada	22
Figura 3 – Rota integrada	22
Figura 4 – Espectros de emissão atômica da tabela periódica.....	30
Figura 5 – Gráfico típico de tensão x deformação de um ensaio de tração.....	32
Figura 6 – Fluxograma de determinação da composição química	38
Figura 7 – Espectrômetro ARL iSpark automatizado	38
Figura 8 – Máquina de teste universal Dartec	40
Figura 9 – Exemplo de ajuste do corpo de prova para medição após ruptura.....	41
Figura 10 – Fluxograma de determinação das propriedades mecânicas	42
Figura 11 – Gráficos de dispersão - composição química do aço CA-50	51
Figura 12 – Comparação do CE entre as amostras das usinas semi-integrada e integrada	53
Figura 13 – Gráficos de dispersão comparativos para as propriedades mecânicas.....	60
Figura 14 – Gráfico de dispersão linear CE x LR/LE da usina semi-integrada	62
Figura 15 – Gráfico de dispersão linear CE x LR/LE da usina integrada	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos mecânicos de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado	19
Tabela 2 – Os teores máximos em massa para análise de panela.....	26
Tabela 3 – Tolerância de composição química	27
Tabela 4 – Composição química do aço CA-50 para análise em panela nas amostras da usina semi-integrada.....	45
Tabela 5 – Composição química do aço CA-50 para análise em panela nas amostras da usina integrada	46
Tabela 6 – Abrangência estatística da composição química do aço CA-50 da usina semi-integrada	49
Tabela 7 – Abrangência estatística da composição química do aço CA-50 da usina integrada	49
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do aço CA-50 da usina semi-integrada	54
Tabela 9 – Propriedades mecânicas do aço CA-50 da usina integrada	55
Tabela 10 – Abrangência estatística das propriedades mecânicas do aço CA-50 na usina semi-integrada	56
Tabela 11 – Abrangência estatística das propriedades mecânicas do aço CA-50 na usina integrada	56
Tabela 12 – ANOVA realizada para a usina semi-integrada.....	58
Tabela 13 – ANOVA realizada para a usina integrada	58
Tabela 14 – ANOVA composição química x propriedades mecânicas da usina semi-integrada	61
Tabela 15 – ANOVA composição química x propriedades mecânicas da usina integrada	61
Tabela 16 – Estatísticas de regressão linear para a usina semi-integrada a um nível de confiança de 95%	62
Tabela 17 – Estatísticas de regressão linear para a usina integrada a um nível de confiança de 95%	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOVA	Análise de Variância
CA-50	Concreto Armado - 50 kgf/mm ²
CE	Carbono Equivalente
EEO	Espectrometria de Emissão Óptica
ex.	Exemplo
ISO	International Organization for Standardization
LE	Limite de escoamento
LR	Limite de resistência
LR/LE	Relação entre o limite de resistência e o limite de escoamento
NBR	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Alongamento
Ao	Área da seção inicial do corpo de prova
Bar	Unidade de medida para pressão
C	Carbono
cm	Unidade de medida para comprimento (Centímetro)
Cr	Cromo
Cu	Cobre
E	Constante de proporcionalidade
Fe	Ferro
FeS	Sulfeto de ferro
F_{max}	Força máxima aplicada pelo equipamento
L_0	Comprimento inicial do corpo de prova
g	Unidade de medida para massa (Grama)
kgf	Unidade de medida para força (Quilograma-força - força no patamar)
L	Comprimento final do corpo de prova
m	Unidade de medida para comprimento (Metro)
mm	Unidade de medida para comprimento (Milímetros)
Mn	Manganês
MnS	Sulfeto de manganês
Mo	Molibdênio
ms	Unidade de medida para comprimento (Milissegundos)
N	Unidade de medida para força (Newton)
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Fósforo
Pa	Unidade de medida para pressão (Pascal)
Si	Silício
Ti	Titânio
Uf	Módulo de resiliência
V	Vanádio
ε	Deformação
ε_x	Tensão aplicada na direção x

ε_y	Tensão aplicada na direção y
ε_z	Tensão aplicada na direção z
λ	Comprimento de onda
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão
σ_{esc}	Tensão de escoamento
$^{\circ}\text{C}$	Unidade de medida de temperatura

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Carbono Equivalente	27
Equação 2 – Módulo de elasticidade (ou módulo de Young).....	33
Equação 3 – Limite de Escoamento	33
Equação 4 – Limite de Resistência.....	34
Equação 5 – Resiliência.....	35
Equação 6 – Tensão de tração aplicada a uma barra metálica uniaxialmente.....	35
Equação 7 – Coeficiente de Poisson.....	35

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	16
2.1 Geral	16
2.2 Específicos	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Aço	17
3.1.1 Aço CA-50.....	17
3.2 Produção do aço CA-50.....	19
3.2.1 Refino Primário	20
3.2.2 Refino secundário	21
3.2.3 Lingotamento.....	21
3.3 Composição química do aço	23
3.3.1 Elementos de liga	23
3.3.2 Carbono Equivalente	27
3.3.3 Espectrometria de Emissão Óptica	28
3.4 Propriedades mecânicas.....	31
3.4.1 Ensaios de tração	31
3.5 Métodos estatísticos	36
4 METODOLOGIA.....	37
4.1 Seleção das amostras de aço CA-50	37
4.2 Determinação da composição química das amostras selecionadas	37
4.2.1 Preparação das amostras	39
4.2.2 Preparação dos padrões de calibração	39
4.2.3 Obtenção dos resultados	39
4.3 Determinação das propriedades mecânicas	40
4.3.1 Coleta e preparo das amostras	41
4.3.2 Realização do ensaio de tração	42
4.4 Correlação estatística entre a composição química e as propriedades mecânicas	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1 Composição química das amostras	44
5.2 Propriedades mecânicas.....	53
5.3 Determinação das correlações estatísticas.....	60

6 CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

O processo de produção do aço envolve diversos ciclos que visam transformar o minério de ferro ou a sucata ferrosa em um material resistente, versátil e amplamente utilizado na indústria. Isto envolve procedimentos como a seleção e preparação do que servirá como matéria-prima para a obtenção da liga metálica, redução, refino do ferro-gusa, obtenção do produto, tratamento térmico, acabamento e conformação inspeção e controle de qualidade.

O aço CA-50, destinado para concreto armado, é um tipo de liga metálica utilizada profusamente na construção civil. Essa nomenclatura é uma referência à sua característica de resistência mínima especificada, correspondente a 50 kgf/mm^2 . Esse tipo de material possui uma composição química particular, caracterizada preponderantemente pela presença de ferro (Fe) e carbono (C). Além desses elementos essenciais, quantidades de manganês (Mn), silício (Si), enxofre (S), fósforo (P) e muitos outros também podem estar presentes, seja associados à matéria-prima, seja adicionados para conferir determinadas propriedades.

O aço CA-50 possui propriedades mecânicas adequadas para resistir aos esforços de tração e compressão a que é submetido nos projetos de sustentação. Apresenta ótima combinação entre seus aspectos físicos, tornando-o capaz de absorver grandes deformações antes de falhar. Essas características são essenciais para garantir a segurança e a estabilidade das edificações. No entanto, a distribuição dos elementos que o compõem e a relação proporcional entre eles pode variar dependendo do processo de fabricação, das matérias-primas e técnicas utilizadas, o que pode afetar suas várias especificidades, principalmente as mecânicas. Sob essa perspectiva, compreender a relação entre a composição química e as características físicas desse tipo de material é imprescindível para otimizar seu desempenho em aplicações práticas.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo investigar e analisar como a composição química do aço CA-50 afeta suas propriedades mecânicas, buscando contribuir para o avanço do conhecimento técnico e científico nessa área. Para tanto, foram realizadas a análise química e o teste de tração, que possibilitaram a obtenção de resultados relevantes e conclusões fundamentadas.

Ao final deste estudo, esperava-se fornecer subsídios técnicos para a indústria siderúrgica e para os profissionais das engenharias, auxiliando na seleção criteriosa de materiais e na melhoria do desempenho das estruturas metálicas. Ademais, acredita-se que este estudo contribuirá para a disseminação de conhecimentos assertivos sobre a temática, estimulando novas pesquisas na área de materiais metálicos e suas aplicações.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar uma averiguação da influência da composição química do aço do tipo CA-50 em suas propriedades mecânicas, buscando compreender como variações nas proporções dos elementos químicos e outros componentes presentes nesse material, bem como impurezas, podem afetar suas características físicas como a tração e outras propriedades relevantes.

2.2 Específicos

- ❖ Realizar uma revisão bibliográfica detalhada sobre o aço CA-50, suas características, propriedades mecânicas e os elementos químicos cruciais presentes em sua composição.

- ❖ Selecionar e coletar amostras representativas de aço CA-50 para análise.

- ❖ Realizar a análise química de Espectrometria de Emissão Óptica das amostras para determinar a composição química, identificando as proporções dos elementos predominantes e de eventuais impurezas.

- ❖ Realizar ensaio mecânico de tração, nas amostras de aço CA-50, seguindo as normas técnicas aplicáveis.

- ❖ Analisar os resultados dos ensaios mecânicos, comparando as diferentes composições químicas das amostras e identificando as relações entre a composição química e as propriedades mecânicas do aço CA-50.

- ❖ Realizar análises estatísticas de regressão linear, análise de variância (ANOVA) e correlações dos dados obtidos, utilizando técnicas adequadas para identificar correlações significativas entre os elementos químicos presentes e as propriedades mecânicas avaliadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Aço

O aço é uma liga metálica extensivamente utilizada em diversas áreas da indústria e abrangentemente da construção civil. De acordo com Askeleand (2008), trata-se de uma combinação entre ferro e carbono, predominantemente, mas que também pode conter pequenas quantidades de alguns elementos mais, como manganês, silício, enxofre, fósforo, entre outros. Em suas observações, Ashby (2007) denota que a combinação de certos elementos confere ao aço suas propriedades mecânicas e características específicas, complementa ainda que as mais imprescindíveis destas são resistência mecânica; maleabilidade; ductilidade; durabilidade; condutividade elétrica e térmica; versatilidade e reciclabilidade.

3.1.1 Aço CA-50

O aço CA-50 é uma classe de aço destinado a aplicações em concreto armado, sendo, portanto, bastante empregado no desenvolvimento de obras civis. Muitas indústrias classificam esse material após a adoção das diretrizes estabelecidas pela norma técnica brasileira NBR 7480, de 2022, que especifica as propriedades mecânicas, os requisitos para fabricação e identificação nessa conjuntura.

Consoante às proposições realizadas por Nunes (2009), a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) definiu o tipo CA-50 como um aço para concreto armado de ótima resistência e alta aderência. Essa classificação se deve às suas características mecânicas específicas, que o tornam adequado para reforçar estruturas de concreto e garantir sua resistência e durabilidade.

Uma vez que evidenciada a vasta aplicabilidade de aço CA-50 em projetos que contam com vigas, pilares, lajes, fundações, entre outras aplicações estruturais, essa importância é ressaltada ao validar que a escolha do tipo e classe de aço para concreto armado deve ser feita de acordo com as especificações do projeto, levando em consideração os requisitos de resistência, durabilidade e segurança necessários para a estrutura em questão.

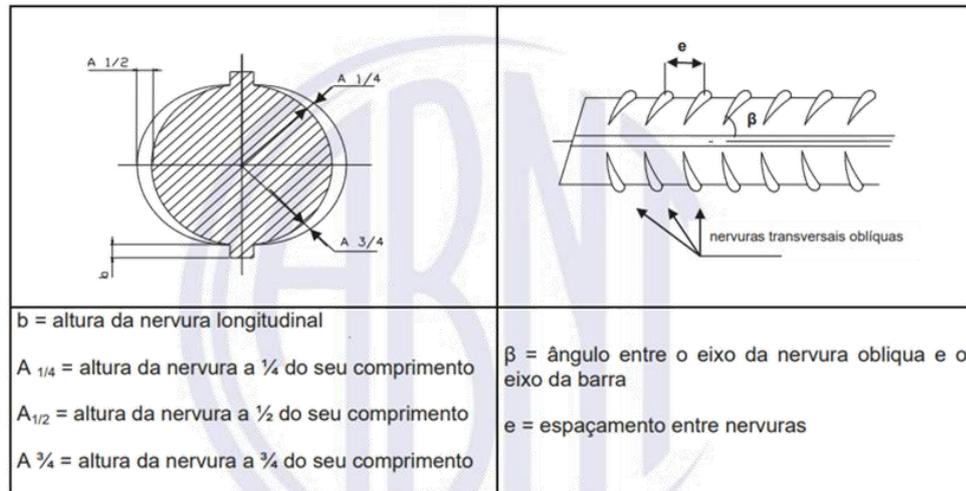
Nesse sentido, compreende-se e reforça-se a necessidade de adesão da NBR 7480, uma vez que se torna crucial para padronizar a qualidade, garantir a segurança e assegurar a conformidade com requisitos técnicos. A norma 7480, desenvolvida pela ABNT, estabelece critérios mínimos, promovendo a compatibilidade internacional, facilitando o comércio e

reduzindo riscos. Além disso, tal adoção contribui para a confiabilidade dos materiais, a salvaguarda no setor da construção civil e estimula a melhoria contínua, acompanhando avanços tecnológicos e práticas industriais atualizadas.

De acordo com a norma ABNT 7480, é requisitada uniformidade nas características geométricas das barras e dos fios de aço. Dessa forma, a categoria CA-50 é determinada com base nos critérios estabelecidos abaixo:

- ❖ As barras da categoria CA-50 devem ser providas de nervuras transversais oblíquas, conforme exemplificado na Figura 1.
- ❖ Os eixos das nervuras transversais oblíquas devem formar, com a direção do eixo da barra, um ângulo entre 45° e 75° .
- ❖ As barras devem ter pelo menos duas nervuras longitudinais, contínuas e diametralmente opostas, que impeçam o giro da barra dentro do concreto.
- ❖ Para diâmetros nominais maiores ou iguais a 10,0 mm, a altura média das nervuras transversais oblíquas deve ser igual ou superior a 4 % do diâmetro nominal, e para diâmetros nominais inferiores a 10,0 mm, esta altura deve ser igual ou superior a 2 % do diâmetro nominal.
- ❖ O espaçamento médio das nervuras transversais oblíquas, medido ao longo de uma mesma geratriz, deve estar entre 50 % e 80 % do diâmetro nominal.
- ❖ A projeção das nervuras transversais oblíquas na seção transversal deve abranger pelo menos 85 % do perímetro nominal da seção transversal da barra.
- ❖ Quando a nervura transversal tocar o friso/nervura longitudinal, o requisito anterior deve ser considerado atendido.
- ❖ Outras configurações geométricas de barras nervuradas diferentes da exemplificada na Figura 1 podem ser utilizadas, desde que atendam ao segundo e terceiro disposto nesta sequência e ao coeficiente de conformação superficial mínimo estabelecido na Tabela 1.

Figura 1: Exemplo de configuração geométrica com nervuras transversais oblíquas em dois lados da barra e nervuras longitudinais



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022)

Tabela 1: Requisitos mecânicos de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado

Categoria do aço	Valores mínimos de tração				Ensaio de dobramento ^g		Ensaio de aderência	
	Resistência característica de escoamento ^a f_{yk} MPa ^e	Limite de resistência ^b f_{st} MPa ^e	Alongamento após ruptura em 10ϕ ^c A %	Alongamento total na força máxima ^d A_{gt} %	Diâmetro do pino ou cutelo mm		Coeficiente de conformação superficial mínimo η	
					$\phi < 20$	$\phi \geq 20$	$\phi < 10 \text{ mm}$	$\phi \geq 10 \text{ mm}$
CA-25	250	$1,20 f_y$	18	–	2ϕ	4ϕ	1,0	1,0
CA-50	500	$1,10 f_y$	8	5	3ϕ	6ϕ	1,0	1,5
CA-60	600	$1,05 f_y$ ^f	5	–	5ϕ	–	1,0	1,5

^a Valor característico do limite superior de escoamento f_{yk} obtido a partir do LE ou δ_e da ABNT NBR ISO 6892-1.

^b O mesmo que resistência convencional à ruptura ou resistência convencional à tração (LR ou δ_t da ABNT NBR ISO 6892-1).

^c ϕ é o diâmetro nominal, conforme 3.5.

^d O alongamento deve ser verificado por meio do critério de alongamento após ruptura (A) ou alongamento total na força máxima (A_{gt}).

^e Para efeitos práticos de aplicação desta Norma, pode-se admitir $1 \text{ MPa} = 0,1 \text{ kgf/mm}^2$.

^f f_{st} mínimo de 660 MPa.

^g O ensaio de dobramento deve ser feito a 180° conforme a ABNT NBR 17005.

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022)

3.2 Produção do aço CA-50

A fabricação do aço representa um processo intrincado e vital na indústria siderúrgica. Caldas (2011) realiza uma análise acerca de duas rotas tecnológicas na siderurgia brasileira com foco na eficiência energética e afirma ser comum que o mercado produtivo dê destaque a duas

diferentes rotas tecnológicas possíveis para preparação da liga, sendo elas chamadas de: Usinas Integradas e Usinas Semi-integradas (ou Mini-Usinas).

Vaz (2011), ao dissertar sobre a quantificação das perdas de ferro metálico em escórias de forno elétrico a arco, explica que quando integradas, as usinas caracterizam-se pelo uso direto do minério de ferro, que passa por altos-fornos, onde é combinado com carvão coque e calcário. Esse processo resulta na obtenção de ferro-gusa, que, por sua vez, é refinado em conversores ou fornos elétricos, adicionando-se outros componentes para ajustar a composição química, eliminar impurezas e finalmente originar o aço. Vaz (2011) continua a distinção entre as rotas frisando que, quando semi-integradas, as usinas geralmente envolvem um processo de fabricação de aço que inclui a utilização de sucata de ferro ou outros materiais além do minério de ferro e coque. O ponto de distinção ocorre na etapa de obtenção do ferro-gusa. Nesse caso, há uma combinação deste, proveniente do alto-forno, com sucata de aço ou ferro. Esse material composto é então fundido e submetido a tratamentos térmicos para atingir as propriedades mecânicas desejadas, seguido por ajustes na composição química conforme necessário. Essa rota introduz uma abordagem mais sustentável e reciclável.

Tendo em vista as considerações pontuadas por Caldas (2011), é possível, então, compreender que essas informações indicam que a escolha entre as usinas de produção pode depender das características específicas da fabricação de aço, da disponibilidade de matérias-primas e das preferências econômicas e ambientais da empresa envolvida no processo.

À luz das análises sobre os processos de preparação de matérias-primas siderúrgicas, Takano (2007) torna simples o entendimento de que um dos parâmetros extremamente relevantes da cadeia produtiva do aço é a composição química da liga. Para atender às proporções requisitadas por norma, a aciaria – instalação industrial onde ocorre o processo de fabricação do produto a partir do ferro-gusa, em alto-forno, resultando em um material com alto teor de carbono e outras impurezas – subdivide-se em refino primário, refino secundário e lingotamento.

3.2.1 Refino Primário

Malynowskyj e Leandro (2007) explicam que o processo começa com a produção de ferro-gusa em um reator químico, nominado alto-forno. Nesse reator, minério de ferro, coque (carvão metalúrgico) e calcário são carregados. A combustão do coque gera calor, que reduz o minério a ferro líquido. O resultado é o ferro-gusa, que contém elevados teores de carbono, impurezas e elementos indesejados. Nesta fase, também são produzidos subprodutos como

escória.

Segundo Malynowskyj e Leandro (2007), esse primeiro refino é comumente conduzido em batelada por meio da utilização de aciaria a oxigênio ou aciaria elétrica, processos realizados, respectivamente, em convertedores LD (Linz-Donawitz) e fornos elétricos a arco. As principais reações desse estágio incluem descarburização, dessiliciação, desfosforação e dessulfuração.

3.2.2 Refino Secundário

Bolota (2007) expressa com clareza que nessa etapa o ferro-gusa é transferido para a aciaria. Esta fase é fundamental para ajustar a composição química e melhorar a qualidade do aço. O autor revela que existem diversos equipamentos adequados para a alocação do metal fundido, contudo, enfatiza que fornos panela ou cadinhos são, frequentemente, os mais utilizados para a realização de operações como desgaseificação, ajuste do teor de elementos de liga, eliminação de resíduos indesejáveis, ajuste do teor de carbono e controle de temperatura.

A desgaseificação remove gases indesejáveis como oxigênio e hidrogênio. O ajuste de composição envolve adições controladas de ligas metálicas para atingir as propriedades de referência.

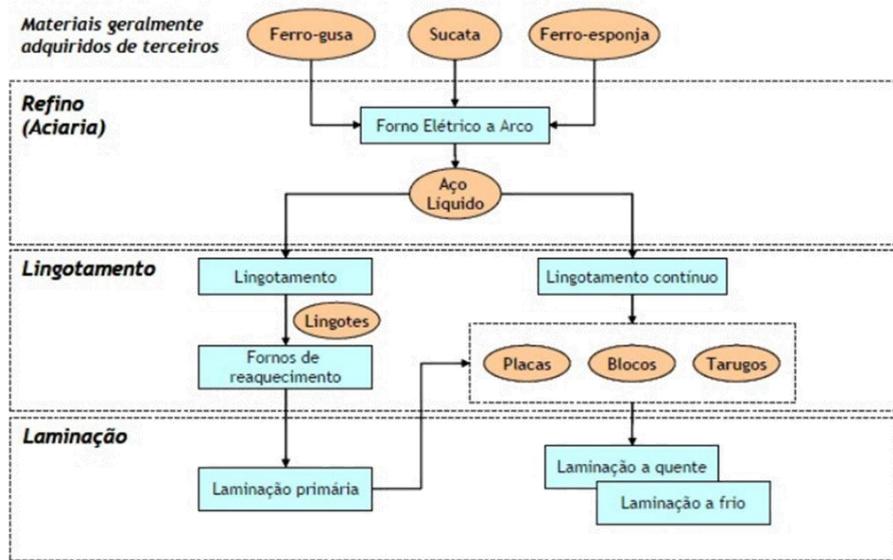
3.2.3 Lingotamento

Após o refino secundário, o aço é despejado em moldes para solidificação, formando lingotes. Este processo é conhecido como lingotamento contínuo ou convencional, dependendo da tecnologia utilizada. Em suas proposições acerca do lingotamento contínuo, Faco (2007) afirma que o aço é solidificado enquanto é continuamente despejado, resultando em lingotes longos. Esse método é eficiente e comum na indústria moderna. Já o segundo tipo de lingotamento, o convencional, Silva (2011) discute que o aço é despejado em moldes individuais, separando os lingotes, após solidificação, são removidos para processamento adicional.

É imprescindível conhecer-se as composições químicas da sucata ferrosa e do minério de ferro, matérias-primas cruciais na fabricação do aço, visto que apresentam diferenças significativas. Enquanto a sucata é caracterizada por ser constituída de modo diversificado, o minério de ferro possui uma formulação mais estável. O desafio reside na necessidade de ajustar cada combinação para atender às especificações reiteradas. Durante o processo na aciaria, são

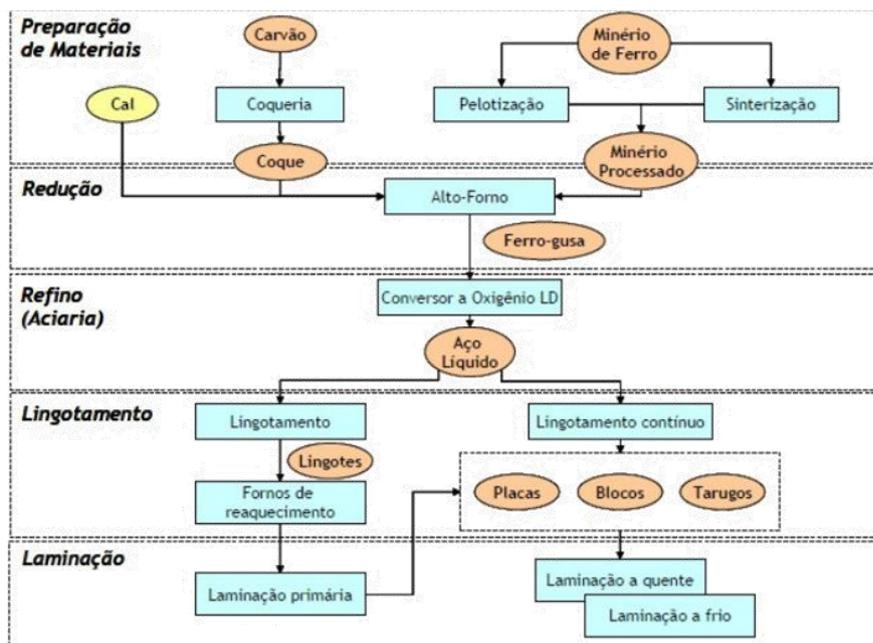
realizados ajustes precisos nos teores de elementos deletérios, como enxofre, fósforo, silício e manganês, assegurando a obtenção de um produto com propriedades mecânicas e químicas ideais. Esse processo de refinamento é essencial para superar as variações inerentes às matérias-primas, garantindo a consistência na qualidade do aço produzido. Para ilustrar as diferenças entre usinas integradas e semi-integradas, apresentam-se a Figura 2 e a Figura 3:

Figura 2: Rota semi-integrada



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2009)

Figura 3: Rota integrada



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2009)

3.3 Composição química do aço

Malynowskyj (2007) define o aço como uma liga metálica de ferro-carbono que contém geralmente de 0,002% a 2,0% do peso em carbono, além de outros elementos de liga nas mais variadas quantidades. O autor complementa ainda que os aços-carbono possuem em sua composição apenas quantidades limitadas de determinados elementos.

Outros elementos existem apenas em quantidades residuais. A quantidade de carbono presente indica sua classificação: os baixo-carbonos possuem no máximo 0,30% de carbono; os médio-carbonos possuem de 0,30% a 0,60%; e os alto-carbonos possuem de 0,60% a 1,00% (MALYNOWSKYJ, 2007).

A partir disso, concebe-se que a composição química é um parâmetro de extrema relevância durante o processo de produção do aço. Chiaverini (1982) propõe que a combinação de certos elementos em proporções específicas permite a produção de uma larga variedade de aços com diferentes propriedades e aplicações, tornando-os materiais extremamente versáteis.

3.3.1 Elementos de liga

Associando o encadeamento de estudos realizados por Colpaert (2008), Mendes (2015) e Queiroz Neto (2011), os elementos mais distintos que podem ser encontrados na composição química do aço são:

❖ **Carbono (C):** Indispensável para o processo de endurecimento do aço, sua presença, em teores elevados até cerca de 0,85%, está diretamente associada ao aumento da dureza e resistência à tração do material. Todavia, essa elevação no teor de carbono também acarreta uma diminuição na ductilidade e na soldabilidade da liga. Em se tratando da têmpera, destaca-se o papel essencial do carbono nesse tratamento térmico, sendo considerado crucial na composição do aço e, portanto, é adicionado em diferentes proporções para determinar as características específicas do produto de interesse. A variação no teor de carbono torna-se significativa, com aços de baixo carbono contendo menos de 0,1%, enquanto aços de alto carbono podem atingir cerca de 2,1%.

❖ **Manganês (Mn):** A presença de uma quantidade mais elevada de manganês possibilita alcançar uma resistência específica com teores de carbono mais baixos, refinando os grãos e

elevando os limites de escoamento e resistência do aço. Para mais, esse elemento age como desoxidante, sendo adicionado para melhorar a resistência, dureza e tenacidade. Sua função principal envolve a formação do sulfeto de manganês (MnS), que impede a criação do sulfeto de ferro (FeS). A presença do MnS é importante para evitar a fragilização do aço, principalmente quando se tratam de altas temperaturas. Os teores típicos de manganês nos aços geralmente giram em torno de 0,5%.

❖ **Cromo (Cr):** Encarrega-se de várias funções fundamentais na melhoria das propriedades do aço. Este elemento aprimora a resistência à corrosão, através da formação de uma fina camada de óxido de cromo, o que, por sua vez, é conhecido como passivação, ou seja, confere proteção ao material contra esses processos. Ademais, o cromo contribui para a resistência mecânica do aço e o aumento de sua dureza, especialmente em condições de temperaturas muito elevadas. Já em aços inoxidáveis, verifica-se como componente essencial, conferindo-lhes a necessária resistência à corrosão e a capacidade de manter suas propriedades em ambientes agressivos.

❖ **Molibdênio (Mo):** Este elemento é frequentemente adicionado ao aço para aprimorar suas propriedades em múltiplas áreas. Desempenha um papel crucial ao melhorar a resistência à temperatura, especialmente em condições em que esta se torna elevada. Além disso, o molibidênio exerce uma influência significativa no aumento da temperabilidade do material, pois facilita a formação de estruturas mais duras durante o tratamento térmico. Para o caso de aços de baixa liga, destaca-se sua capacidade de minimizar a fragilidade durante o revenimento, conferindo maior tenacidade ao produto.

❖ **Níquel (Ni):** Este é um elemento de que aumenta a temperabilidade do aço, permitindo a formação de estruturas mais duras durante a têmpera. Em concentrações mais elevadas de carbono, o níquel retém a austenita, impedindo a completa transformação em martensita durante o tratamento térmico e favorecendo a formação de bainita. Ainda cita-se sua contribuição para a melhoria da soldabilidade, aumentando a tenacidade, especialmente em baixas temperaturas, e reduz a fragilidade durante o revenido, principalmente em aços com teores mais altos de manganês. Em aços inoxidáveis, a adição de níquel pode também melhorar a resistência à corrosão, especialmente quando combinado com cromo.

❖ **Cobre (Cu):** Quando adicionado como elemento de liga, o cobre oferece benefícios como o

aumento da resistência à corrosão atmosférica, bem como contribui para a melhoria da resistência mecânica e da condutividade térmica do aço. Este elemento pode ter efeitos positivos na usinabilidade e na soldabilidade do material, tornando-o mais maleável e facilitando processos como a conformação e a soldagem. Salienta-se seu papel na estabilização da austenita, o que é relevante em aços inoxidáveis e em certos tratamentos térmicos.

❖ **Vanádio (V):** O vanádio também exerce certas funções basilares, como, por exemplo, no processo de tratamento térmico do aço. Ele é conhecido por aumentar a temperabilidade do material, permitindo a formação de estruturas mais duras durante a têmpera. Isso resulta, portanto, em uma maior capacidade do produto de manter suas propriedades mecânicas mesmo após tratamentos térmicos rigorosos. Além de tudo, auxilia durante a formação de carbonetos de vanádio, que são compostos duros e estáveis. Esses carbonetos participam da resistência ao desgaste e na melhoria da tenacidade do aço, tornando-o mais adequado para aplicações que exigem durabilidade em ambientes extremos.

❖ **Silício (Si):** Quando adicionado como elemento de liga, o silício age como desoxidante durante o processo de fabricação, removendo o oxigênio presente no aço. Isso contribui para a qualidade do produto, impedindo a formação de inclusões não metálicas e melhorando a sua homogeneidade, além de influenciar na resistência mecânica e na dureza do aço. Sua presença pode fortalecer o material, tornando-o mais resistente e capaz de suportar cargas e condições adversas. Em aços de baixa liga, o silício é muitas vezes utilizado para aumentar a temperabilidade, facilitando a formação de estruturas mais duras durante o tratamento térmico.

❖ **Fósforo (P):** Geralmente é considerado um elemento indesejado em teores elevados. Em pequenas quantidades, pode contribuir para a resistência e a dureza do aço. No entanto, em concentrações mais altas, pode causar problemas significativos. Altos teores de fósforo no aço podem levar à fragilização, tornando o material mais quebradiço e suscetível a fraturas, principalmente quando empregado em baixas temperaturas. Além de que interfere na soldabilidade do aço, tornando-o menos adequado para aplicações pontuais de soldagem.

❖ **Enxofre (S):** Encontrar enxofre no produto pode significar efeitos benéficos ou malefícios cuja quantidade determinará adjunta às condições específicas de produção. Em pequenas quantidades (0,05% em massa para a análise de panela), pode atuar como um elemento de

usinagem, facilitando a produção e o trabalho mecânico do material. Sua presença ajuda a melhorar a maquinabilidade, tornando o aço mais fácil de ser cortado, perfurado ou moldado. Porém, em concentrações mais elevadas, o enxofre pode ter efeitos adversos, especialmente na qualidade do aço. Teores excessivos levam à formação de inclusões não metálicas, como sulfetos, que podem comprometer a integridade do material, resultando em fragilidade e propensão a rupturas.

A NBR 7480:2022 estabelece limites de composição química como requisitos para soldabilidade do aço em estudo, esses valores são apresentados a seguir, Tabela 2, com a finalidade de definir teores máximos em massa para análise de panela, que se refere ao processo de monitoramento e controle das condições dentro do forno panela durante a fusão e processamento de metal fundido.

Tabela 2: Os teores máximos em massa para análise de panela

Elemento	Teor (%)
Carbono (C)	0,35
Manganês (Mn)	1,5
Fósforo (P)	0,05
Enxofre (S)	0,05
Silício (Si)	0,5

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022), adaptada

A norma brasileira referida conclui os requisitos para composição química do aço determinando que:

❖ Se necessária a adição de outros elementos, além dos indicados na Tabela 2, com o objetivo de atender aos requisitos de propriedade mecânica, o produtor fica livre para selecionar os demais elementos. Normalmente são utilizados vanádio (V), nióbio (Nb), titânio (Ti), cobre (Cu), Níquel (Ni), cromo (Cr) e molibdênio (Mo).

❖ Quando necessário, pode ser realizada uma análise química de verificação no produto final (vergalhão), devendo esta ser representativa para a corrida original do produto. No entanto, são admitidas variações nos teores máximos estabelecidos na Tabela 2 nos resultados obtidos, devido às condições de realização desta verificação. As tolerâncias admitidas para o produto final estão estabelecidas na Tabela 3.

O carbono equivalente (CE), quando calculado a partir da análise química do produto final, tem a sua tolerância em + 0,04%.

Tabela 3: Tolerância de composição química

Elemento	Teor (%)
Carbono (C)	+ 0,03
Manganês (Mn)	+ 0,06
Fósforo (P)	+ 0,008
Enxofre (S)	+ 0,008
Silício (Si)	+ 0,05

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022), adaptada

A partir de pesquisas realizadas por Souza (1989), depreende-se que a composição química do aço varia conforme cada especificação do material e, conseqüentemente, de suas aplicações. Contudo, sua base constitui-se predominantemente de ferro, com a adição de pequenas quantidades de outros elementos de liga para melhorar suas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e químicas.

3.3.2 Carbono Equivalente

Além das limitações de composição química observadas anteriormente, a ABNT, acerca da especificação do aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado, estabelece ainda que a análise de panela, do refino secundário, deve apresentar um carbono equivalente igual ou menor a 0,55%, que deve ser calculado pela Equação 1:

$$CE = \%C + \left(\% \frac{Mn}{6} \right) + \left(\% \frac{Cr + Mo + V}{5} \right) + \left(\% \frac{Cu + Ni}{15} \right) \quad (1)$$

Onde:

%C é a porcentagem de carbono no aço;

%Mn é a porcentagem de manganês no aço;

%Cr é a porcentagem de cromo no aço;

%Mo é a porcentagem de molibdênio no aço;

%V é a porcentagem de vanádio no aço;

% Cu é a porcentagem de cobre no aço;

%Ni é a porcentagem de níquel no aço.

O Carbono Equivalente (CE), segundo Nunes (2009), é um parâmetro importante usado na metalurgia para avaliar e comparar a soldabilidade e a suscetibilidade à formação de trincas a frio em aços. Esse valor é calculado a partir da composição química da liga, considerando principalmente a quantidade de carbono e outros elementos de liga presentes.

Dessa maneira, define-se que o Carbono Equivalente é particularmente relevante em aços de alta resistência, que normalmente contêm uma variedade de elementos de liga. Após o apontamento por Nunes (2009), verifica-se que a presença desses elementos pode afetar a estrutura e as propriedades do aço, bem como sua capacidade de ser soldado. Seguindo a linha de pensamento de Yi (2006), compreende-se que a soldabilidade, no que lhe concerne, refere-se à facilidade com que o aço pode ser unido a outros materiais por meio de processos de soldagem. A fim de estabelecer critérios que garantam que os vergalhões tenham a soldabilidade adequada e atendam aos requisitos de resistência e segurança, criaram-se normas que asseguram um padrão de rigorosidade necessário para circulação do produto. Dessa forma, o desenvolvimento deste trabalho seguirá a norma técnica da ABNT NBR 7480, “Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado – Requisitos”, de 2022, que define um valor máximo de carbono equivalente a ser atendido, correspondendo a 0,55% em termos de peso.

Em suas abordagens, Nunes (2009) explicita que quanto maior o valor do Carbono Equivalente, maior a tendência à formação de trincas durante a soldagem e menor a soldabilidade do aço. Isto posto, uma vez que o intuito seja garantir uma soldagem adequada e evitar esse tipo de problema, é essencial controlar esse parâmetro e escolher aços com valores adequados para a aplicação específica. Engenheiros e metalúrgicos utilizam essa medida como uma ferramenta para selecionar os aços adequados para determinados projetos e aplicações, levando em consideração as propriedades desejadas e a facilidade de soldagem.

3.3.3 Espectrometria de Emissão Óptica

A Espectrometria de Emissão Óptica (EEO) é um método de análise utilizado durante a fabricação de aço para determinar as concentrações dos elementos químicos presentes. O princípio da técnica se baseia na medida da radiação emitida pelos átomos destes elementos após receberem energia de uma fonte externa (MURTA, 2013).

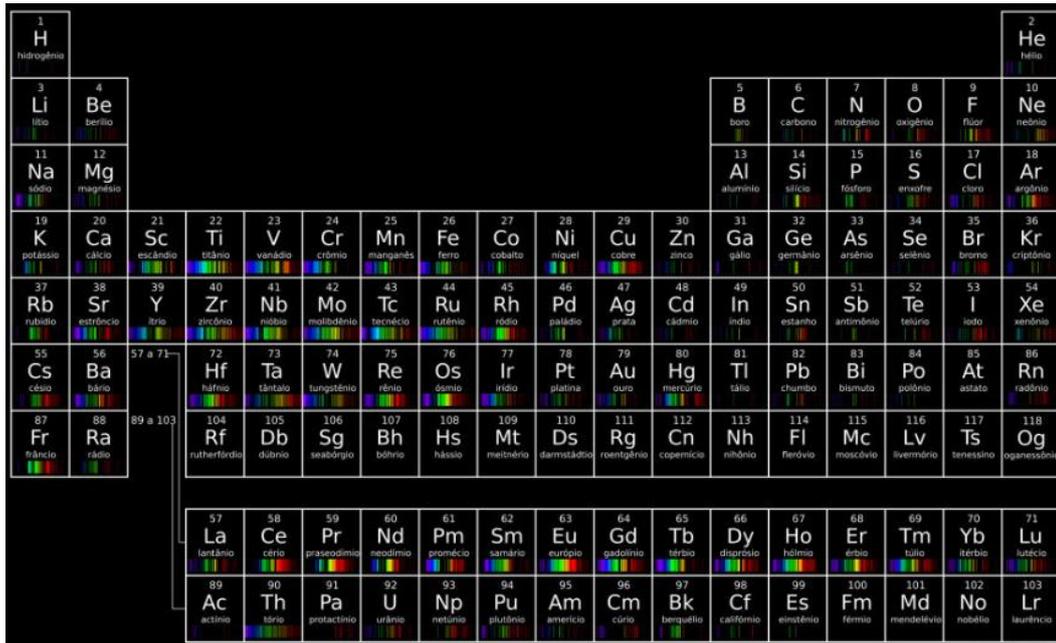
Peixoto (2007) cita as etapas fundamentais para a identificação dos elementos presentes na amostra de aço, uma vez que constam no processo descrito por Lefebvre (1986). Este ressalta

que para a análise com um espectrômetro de emissão óptica, há duas fases. A primeira envolve a aplicação de uma descarga de baixa energia entre o eletrodo e a amostra por um período curto, dado em milissegundos, resultando na ionização do argônio e na formação de um plasma condutor. Após isso, ocorre uma descarga com energia e uma voltagem, que se estabelece como a segunda etapa, causando, por fim, o derretimento e evaporação do elemento no ponto de impacto da centelha elétrica. Isto resulta no fato de que o elemento excitado presente no plasma emite um comprimento de onda característico (λ). A câmara é purgada com gás argônio, e a análise qualitativa é realizada identificando o λ emitido por cada elemento.

Uma amostra que contém vários átomos diferentes produz uma luz composta de comprimentos de onda específicos relativos a cada um dos seus elementos. Separando esses comprimentos de onda por meio de um sistema de dispersão, podem-se determinar os elementos presentes e sua concentração. Isso é possível pela detecção da intensidade de cada um dos comprimentos de onda emitidos com fotomultiplicadores dedicados e pelo processamento da informação em um computador (MURTA, 2013).

Murta (2013) apoia-se nas observações desenvolvidas por Martins (2006) ao detalhar a espectrometria para usuários, em que este afirma que a técnica pode ser utilizada a saber que a faixa de comprimentos de onda mensurados em análise compreende-se entre 130 a 800 nm. Martins (2006) finda esse ponto ao dizer que a EEO, entretanto, somente determinará as quantidades dos componentes especificamente, não fornecerá informações a respeito do modo no qual se encontram, como em composto ou solução sólida. Ilustrando esse raciocínio, a Figura 4, a seguir, apresenta os elementos que podem ser analisados por esta metodologia:

Figura 4: Espectros de emissão atômica da tabela periódica



Fonte: Tabela Periódica Org (2024)

A análise quantitativa, por meio de um equipamento calibrado, é minuciada abaixo por Peixoto (2007) na sequência completa de medida associada aos consecutivos cálculos matemáticos típicos de uma medição:

- ❖ Uma descarga elétrica é aplicada à amostra em uma atmosfera inerte;
- ❖ A luz produzida é separada em diversos comprimentos de onda;
- ❖ Os comprimentos de onda dos elementos são medidos em detectores específicos ao comprimento de onda, elemento, que se deseja analisar gerando uma intensidade;
- ❖ A intensidade medida pode sofrer uma padronização, onde a intensidade do elemento a ser medido é dividida pela intensidade do material base I (ex. o ferro em aço). Esta técnica é utilizada para compensar pequenas mudanças no sistema espectrométrico de uma medida para outra.
- ❖ Correção ou compensação de uma mudança gradual ou desvio do sistema ao longo do tempo, ou seja variações da exatidão do equipamento.

- ❖ Aplicação da intensidade corrigida, calculada analisando amostras com teores conhecidos e fazendo a regressão em relação aos valores da intensidade encontrada.

3.4 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas do aço são características que descrevem seu comportamento e resposta sob ação de forças ou cargas externas. Araújo (1997) aponta que essas propriedades são fundamentais para determinar a adequação do aço em diferentes aplicações. Desse modo, torna-se conveniente observar que elas podem variar dependendo do fabricante, das especificações e do tratamento térmico aplicado ao aço. A escolha do aço CA-50 é determinada pelo projeto e pelas exigências específicas de resistência e durabilidade da estrutura em questão (NICOLAU, 2020).

A NBR 7480, estipula e organiza os requisitos de propriedades mecânicas de tração. Estas, por conseguinte, são apresentadas na Tabela 1.

Nicolau (2020), ao examinar o comportamento mecânico de amostras de vergalhões CA-50 sujeitas ao teste de tração para verificar se atendem às suas especificações, destaca que a compreensão do comportamento mecânico dos materiais se baseia na análise de sua deformação e propriedades de ruptura quando submetidos a diferentes tipos de tensão, como tração, compressão ou tensões multiaxiais.

3.4.1 Ensaios de Tração

O ensaio de tração é bastante utilizado para determinar as propriedades mecânicas de um material. Segundo o que descreve Branco (1985) e, corroborado, posteriormente, por Callister (2002), envolve a aplicação de uma força de tração gradual a um corpo de prova padronizado até que ele se rompa após a deformação resultante. Durante o teste, são medidos vários parâmetros importantes sobre o comportamento mecânico de um material.

A ABNT NBR 7480 enfatiza os requisitos e procedimentos específicos para a condução do ensaio de tração em barras e fios de aço utilizados como armaduras em concreto armado, fornecendo diretrizes claras e padronizadas para avaliar a qualidade e o desempenho desses materiais através do encadeamento adiante:

- ❖ O ensaio de tração deve ser realizado de acordo com as ABNT NBR ISO (International

Organization for Standardization) 6892-1 e ISO 15630-1.

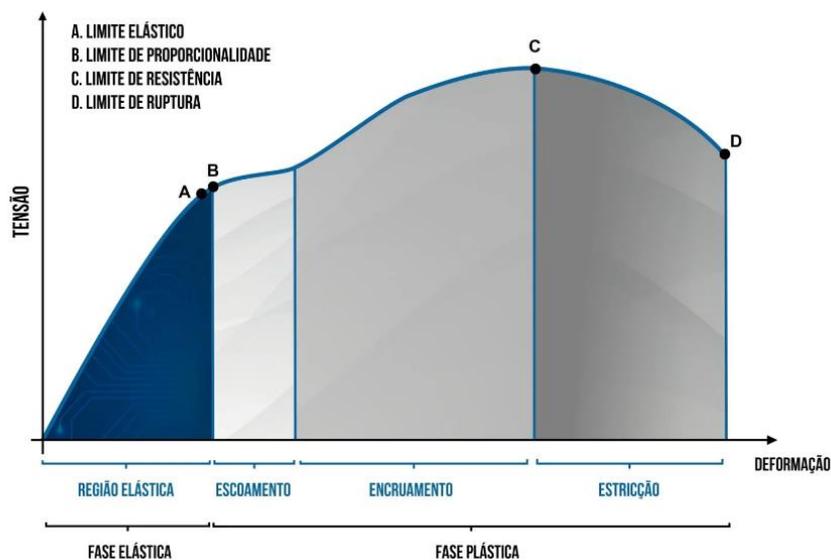
O comprimento inicial L_0 é igual a 10 diâmetros nominais, não sendo permitido o uso de corpo de prova usinado.

❖ A resistência de escoamento de barras e fios de aço pode ser caracterizada por um patamar no diagrama de tensão-deformação ou calculada pelo valor da tensão sob a carga correspondente à deformação permanente de 0,2 %.

❖ A resistência de escoamento de barras e fios de aço pode ser também calculada pelo valor da tensão sob carga correspondente à deformação de 0,5 %. Em caso de divergência, prevalece o valor obtido no disposto no item anterior.

Dessa forma, o ensaio de tração é fundamental na indústria para avaliar as propriedades mecânicas dos materiais. O diagrama “tensão-deformação”, associado ao teste, complementa a análise matemática do processo. Ao ser aplicado a materiais metálicos, revela parâmetros essenciais que descrevem a resposta do material a esforços mecânicos, indicando sua capacidade de transmitir ou resistir a esses esforços. A partir das medidas de cargas e alongamentos, constrói-se o gráfico aludido, ilustrado na Figura 5 para diferentes tipos de metais.

Figura 5: Gráfico típico de tensão x deformação de um ensaio de tração



Fonte: Biopdi (2023)

Os itens detalhados a seguir são variados e bastante expressivos, oriundos da análise dos gráficos resultantes dos ensaios de tração.

❖ **Módulo de elasticidade (ou módulo de Young):** De acordo com as considerações de Callister (2002), a lei de Hooke descreve a rigidez do material, demonstrando uma relação inversa com a temperatura e mostrando-se pouco sensível a pequenas variações na composição química dos elementos cristalinos. Através da equação de Hooke, é possível derivar a constante de proporcionalidade (E), mais conhecida como módulo de elasticidade ou módulo de Young. Essa relação pode ser expressa através da Equação 2:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

Onde pode ser observado a proporcionalidade entre:

σ : Tensão aplicada e a

ε : Deformação.

❖ **Limite de escoamento:** Este fenômeno, representado por σ_e , é conhecido por pico de escoamento descontínuo. Por outro lado, para a maioria dos materiais a transição elastoplástica ocorre de maneira gradual, não sendo nítido o seu ponto de escoamento. Convencionou-se assim traçar uma linha reta paralela à porção elástica da curva a partir de uma pré-deformação, seguindo o mesmo esquema matemático (Equação 3) (FREDEL, ORTEGA e BASTOS, 2015).

$$LE = \frac{\text{Força no Patamar}}{\text{Área}} = \frac{\text{kgf}}{\text{mm}^2} \quad (3)$$

❖ **Limite de proporcionalidade:** Nos materiais dúcteis, ao terminar a fase elástica inicia-se a fase plástica, onde ocorrem deformações permanentes do material mesmo havendo a retirada da força de tração. No início da fase plástica, ocorre o fenômeno denominado de escoamento. Tal fenômeno é caracterizado por uma deformação permanente do material sem que haja incremento da carga, mas ocorre um aumento da velocidade de deformação. Durante o escoamento, os valores de carga oscilam muito próximos uns dos outros (FREDEL, ORTEGA e BASTOS, 2015).

❖ **Limite de Resistência:** O Limite de resistência à tração é a tensão no ponto máximo da curva tensão-deformação. Esse ponto corresponde à tensão máxima que pode ser suportada por uma estrutura sob tração, se essa tensão for aplicada e mantida ocorrerá ruptura no material. Nessa região uma pequena constrição ou estrangulamento começa a se formar e toda deformação subsequente fica confinada nesta região. Nessa fase, a tensão recomeça a subir até chegar a um valor máximo, denominado limite de resistência. Para o cálculo do valor do limite de resistência, usa-se a seguinte relação matemática demonstrada na Equação 4 (FREDEL, ORTEGA e BASTOS, 2015).

$$LR = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (4)$$

Onde:

F_{\max} é a força máxima aplicada pelo equipamento

A_0 é a área da seção inicial do corpo de prova

❖ **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 (LOPES, 2010).

❖ **Tenacidade:** A Tenacidade representa uma medida da capacidade de um material em absorver energia até a fratura. A geometria do corpo de prova, bem como a maneira como a carga é aplicada, são fatores importantes nas determinações de tenacidade. Para condições de carregamento dinâmicas (elevada taxa de deformação), e quando um entalhe ou ponto de concentração de tensão está presente, a tenacidade ao entalhe é averiguada pelo uso de um ensaio de impacto. Além disso, a tenacidade à ruptura é uma propriedade indicativa da resistência do material à fratura quando este possui uma trinca (LOPES, 2010).

❖ **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 5 (BIOPDI, 2023):

$$U_f = \frac{(\sigma_{esc})^2}{2\varepsilon} \quad (5)$$

Onde:

U_f é o módulo de resiliência e relaciona

σ_{esc} , a tensão de escoamento, com o módulo de elasticidade.

❖ **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. (BIOPDI, 2023).

❖ **Estricção ou empescoamento:** Pode ser entendido como uma “formação de pescoço” ou “estiramento” que ocorre quando o aumento da dureza por encruamento é menor que a tensão aplicada e o material sofre uma grande deformação. Fica localizado na região em uma seção reduzida em que grande parte da deformação se concentra (BIOPDI, 2023).

❖ **Coefficiente de Poisson:** Quando uma tensão de tração é aplicada a uma barra metálica, um alongamento elástico e sua deformação correspondente ε_z ocorrem na direção da tensão aplicada. Esse alongamento é acompanhado de uma variação das dimensões transversais da barra (deformações compressivas), representadas por ε_x e ε_y , respectivamente, as quais podem ser determinadas. Se a tensão aplicada for uniaxial (apenas na direção z) e o material for isotrópico, então tem-se a Equação 6:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y \quad (6)$$

Pode-se definir o coeficiente de Poisson (ν) como sendo um parâmetro resultante da razão entre as deformações lateral e axial, conforme exibido na Equação 7:

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

Uma vez que as deformações laterais e a deformação axial sempre terão sinais opostos, o sinal negativo foi incluído nesta relação para que ν seja sempre um número positivo. O

coeficiente de Poisson mede a rigidez do material na direção perpendicular à direção de aplicação da carga uniaxial (LOPES, 2010).

3.5 Métodos estatísticos

As correlações estatísticas são ferramentas fundamentais na análise de dados, especialmente em estudos que envolvem a relação entre variáveis. Elas medem a força e a direção da associação entre duas ou mais variáveis quantitativas. Uma correlação positiva indica que as variáveis se movem na mesma direção, enquanto uma correlação negativa sugere que elas se movem em direções opostas. Do Amaral, Loureiro E Reis (2009) esclarecem que o coeficiente de correlação mais comum é o coeficiente de correlação de Pearson, que varia de -1 a +1. Um valor próximo de +1 indica uma forte correlação positiva, enquanto um valor próximo de -1 sugere uma forte correlação negativa. Uma correlação próxima de zero indica uma associação fraca ou inexistente entre as variáveis. As correlações estatísticas são valiosas para identificar padrões, prever comportamentos e orientar decisões em diversas áreas, desde a economia e psicologia até a medicina e ciências sociais.

Análise de regressão é uma técnica estatística utilizada para investigar a relação existente entre variáveis através da construção de uma equação (um modelo). De maneira geral, essa técnica pode ser utilizada com vários objetivos, dentre os quais se pode destacar: descrever a relação entre variáveis para entender um processo ou fenômeno; prever o valor de uma variável a partir do conhecimento dos valores das outras variáveis; substituir a medição de uma variável pela observação dos valores de outras variáveis; controlar os valores de uma variável em uma faixa de interesse (DO AMARAL, LOUREIRO e REIS, 2009).

Moraes (2011) Descreve e contextualiza a Análise de Variância (ANOVA) como uma comparação de várias médias, informando que se trata de um método desenvolvido por Sir Ronald Fisher para analisar experimentos. A estatística "F" foi deduzida por Snedecor em homenagem a Fisher. A ANOVA identifica diferenças entre as médias populacionais devido a várias causas simultâneas e verifica se são iguais, baseando-se em amostras extraídas de cada uma. Ela determina se as diferenças entre as médias amostrais sugerem diferenças reais entre as médias das populações ou se são devido à variabilidade inerente a cada amostra.

4 METODOLOGIA

As análises que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho foram conduzidas, para fins comparativos, nos laboratórios de duas usinas, sendo uma semi-integrada e a outra, integrada, situadas nos municípios de Divinópolis e Araçariguama, nos Estados de Minas Gerais e São Paulo, respectivamente. As usinas pertencem a uma empresa siderúrgica renomada em seu setor, dedicada à produção e fornecimento de aço de alta qualidade para diversos segmentos, garantindo, assim, a confiabilidade das informações prestadas.

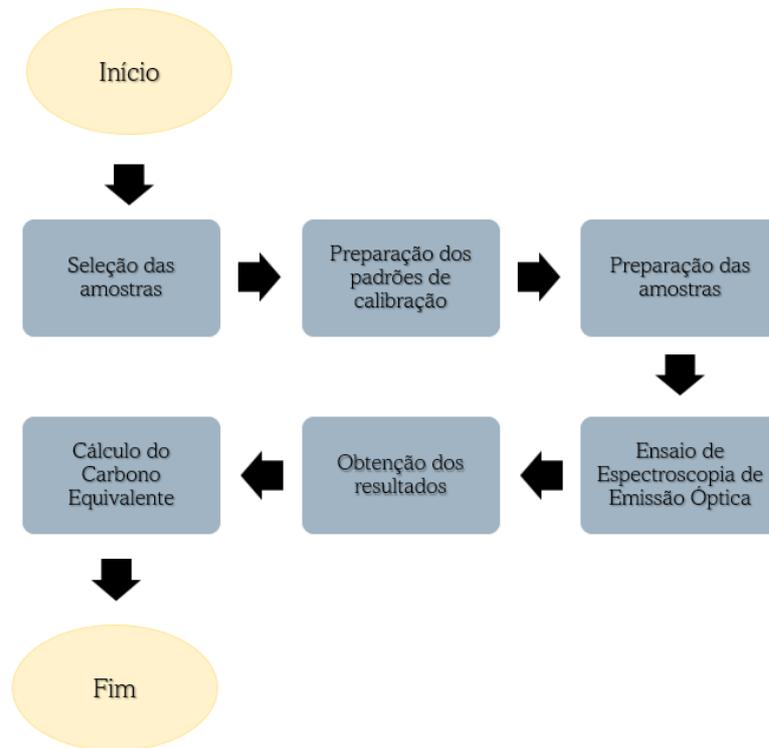
Ressalta-se que todas as etapas experimentais foram conduzidas em conformidade com as normas técnicas e boas práticas de laboratório, sendo adotadas precauções adequadas para garantir a segurança durante a manipulação das amostras e a utilização dos equipamentos.

4.1 Obtenção das amostras de aço CA-50

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022), amostra é configurada como a porção representativa de um lote, extraída aleatoriamente, destinada à verificação das características próprias das barras e fios de aço. À vista disso, vinte amostras foram coletadas na usina integrada e outras vinte na usina semi-integrada, todas provenientes de diferentes lotes do aço CA-50 e correspondendo à bitola de 20 mm, totalizando quarenta amostras.

4.2 Determinação da composição química das amostras selecionadas

A primeira etapa experimental consistiu na determinação da composição química das amostras do aço CA-50 através da análise de Espectrometria de Emissão Óptica (EEO), seguindo o fluxograma apresentado na Figura 6.

Figura 6: Fluxograma de determinação da composição química

Fonte: Autora (2023)

A análise EEO foi conduzida em um espectrômetro, pertencente à marca Thermo Scientific, modelo ARL iSpark series automatizado (Figura 7).

Figura 7: Espectrômetro ARL iSpark automatizado

Fonte: Manual de Pré-Instalação - Série ARL iSpark (2015)

A análise foi conduzida em ambiente fechado, seco, livre de condensações, poeira e

vapores corrosivos. O instrumento permaneceu no palete de transporte, a fim de facilitar os movimentos subsequentes ao ensaio e limitando quaisquer vibrações que pudessem interferir nos resultados. A análise de cada amostra foi realizada sob pulsão unitária semi-sinusoidal de 1 g durante 10^{-3} milissegundos (ms) aplicada em cada direção dos três eixos ortogonais. Utilizou-se o gás argônio para produção de plasma, cuja pureza correspondia a 99,998% em volume, à pressão de entrada de 2 bar (210 Pa).

4.2.1 Preparação das amostras

Durante o processo de lingotamento contínuo do aço, foram extraídas quarenta amostras (vinte amostras em cada usina) homogêneas do metal em fusão (estado líquido) e depositadas em moldes usinados com o intuito de solidificá-las rapidamente para ajustá-las ao compartimento dos espectrômetros onde seriam utilizadas para realizar a técnica de EEO. Após a solidificação, cada amostra teve suas superfícies limpas, planificadas, livres de inclusões e lixadas, com o auxílio de esmerilhadeiras de superfície rotativas, para eliminar óxidos, contaminações e irregularidades.

4.2.2 Preparação dos padrões de calibração

Prepararam-se amostras-padrão com concentrações conhecidas dos elementos que compõem o aço CA-50. Essas amostras foram usadas para construir curvas de calibração que relacionam as intensidades das linhas espectrais com as concentrações dos elementos.

4.2.3 Obtenção dos resultados

As intensidades das linhas espectrais foram registradas pelo software do espectrômetro. Essas intensidades foram posteriormente comparadas com as curvas de calibração previamente preparadas, permitindo determinar as concentrações dos elementos presentes na amostra. Com base nas curvas de calibração e nas intensidades das linhas espectrais medidas, foram calculadas as concentrações dos elementos na amostra de aço CA-50. Os resultados da análise foram compilados em um relatório que apresenta as concentrações dos elementos químicos presentes na amostra. Uma vez obtido o resultado da composição química da amostra, foi efetuado o cálculo do carbono equivalente (Equação 1).

4.3 Determinação das propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas das amostras foram determinadas a partir do ensaio de tração utilizando um corpo de prova por taxa de deformação, utilizando o equipamento nominado “Máquina de Teste Universal”, Dartec, Figura 8.

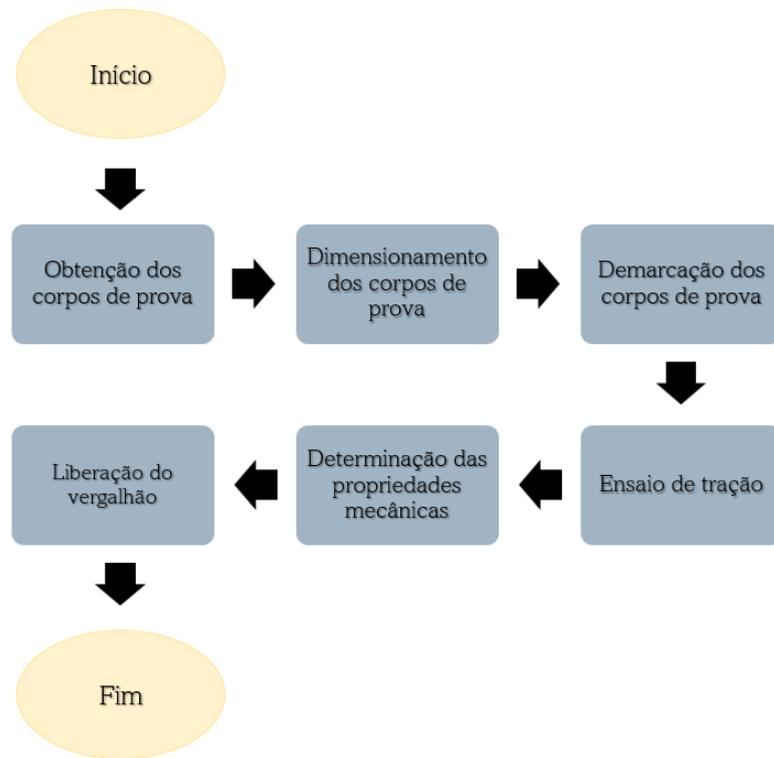
Figura 8: Máquina de teste universal Dartec



Fonte: Hydraulic Universal Testing Machine (2017)

Para a determinação das propriedades mecânicas, seguiu-se o fluxograma apresentado na Figura 9.

Figura 9: Fluxograma de determinação das propriedades mecânicas



Fonte: Autora (2023)

4.3.1 Coleta e preparo das amostras

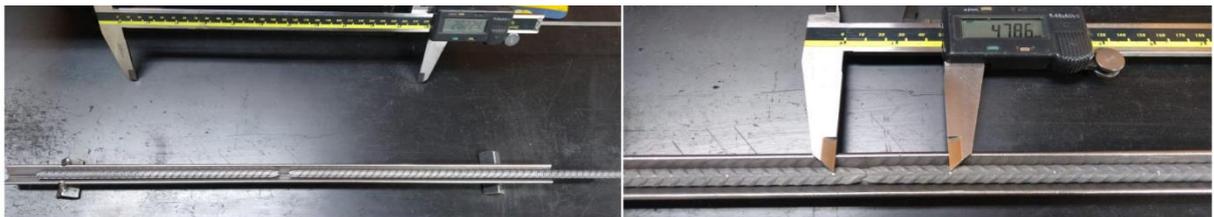
Foram coletadas amostras, barras de aço, para preparo de corpos de prova, em ritmo, isto é, durante o processo produtivo, com 2 m de comprimentos sob a temperatura de 100 °C. Cada uma delas foi retirada da barra central do tarugo laminado. Em seguida, foi necessário deixar as barras em repouso para que resfriassem ao ar (sendo estritamente proibido realizar resfriamento forçado, visto que esse procedimento pode ocasionar deformações, trincas ou outros tipos de falhas no material). Após resfriamento, todas as amostras foram devidamente identificadas por seus respectivos lotes.

As amostras foram preparadas em conformidade à ABNT NBR 7480 para obtenção dos corpos de prova. Assim, as barras foram demarcadas com um comprimento aproximado de 50 cm e então cortadas em policorte. A seguir, com o auxílio de uma régua, mediram-se seus comprimentos em milímetros (500 mm) e lançou-se o resultado da medição na planilha de ensaio para controle. Posteriormente, cada amostra foi pesada na balança do laboratório e o resultado obtido foi registrado. Em seguida, para determinar o alongamento, as amostras foram riscadas com espaçamentos de 20 mm.

4.3.2 Realização do ensaio de tração

Para dar início ao ensaio de tração, determinou-se o comprimento inicial L_0 (mm) dos corpos de prova, anteriormente preparados a partir das amostras coletadas em ritmo. Então, estes foram fixados às garras mecânicas inferiores e superiores do equipamento, projetadas para estabilizar o material firmemente por meio de suas extremidades e garantir que a aplicação da carga seja uniforme e centrada na amostra. O ensaio teve início após a fixação de cada corpo de prova no equipamento, que então aplicou uma carga gradualmente crescente a cada um, na forma de uma força de tração uniaxial. Isso ocorreu por intermédio das garras mecânicas, que foram se afastando a uma taxa constante para alongar o material. A tensão exercida sobre a amostra e seu alongamento foram continuamente monitorados e registrados em curvas de tensão-deformação até que ocorresse a ruptura do aço. A força máxima registrada até a falha dos corpos de prova da bitola de 20 mm correspondeu a cerca de 226.126 N. As duas partes restantes após a ruptura das amostras foram reajustadas entre si da melhor forma possível. Mais adiante, escolheram-se marcas espaçadas para medição do alongamento, garantindo que a região de falha permanecesse dentro do intervalo selecionado. Por último, mediu-se o comprimento final L em milímetros entre as marcas escolhidas e registrou-se esse valor, conforme exemplificado na Figura 10:

Figura 10: Exemplo de ajuste do corpo de prova para medição após ruptura



Fonte: Empresa siderúrgica fonte dos dados (2023)

Ao longo do ensaio, a temperatura da sala esteve entre 14 a 28 °C, com variação de 2 °C. A umidade manteve-se entre 20 a 90% sem condensação.

O cálculo do alongamento percentual A para o CA-50 equivale à razão entre a diferença do comprimento inicial e comprimento final após ensaio e o próprio comprimento inicial.

A relação entre o limite de resistência (LR), (Equação 4), e o limite de escoamento (LE), (Equação 3), (LR/LE), foi calculada dividindo o valor de LR pelo valor de LE.

Os resultados foram registrados e analisados estatisticamente. As médias, desvios-padrão e

outras estatísticas descritivas foram calculadas para cada parâmetro avaliado.

4.4 Correlação estatística entre a composição química e as propriedades mecânicas

Foram realizadas correlações estatísticas, teste de regressão linear e análise de variância para examinar as propriedades mecânicas e composição química do aço CA-50. A ANOVA verificou diferenças nas médias das propriedades mecânicas devido à variação na composição química. A regressão linear identificou relações causais entre a composição química e as propriedades mecânicas, destacando os elementos com maior impacto. Correlações estatísticas foram usadas para compreender as relações entre as propriedades mecânicas e a composição química. Essas análises foram cruciais para entender o comportamento do material e orientar o desenvolvimento de ligas com desempenho mecânico otimizado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no estudo. Estes foram organizados em três seções principais: análise da composição química, ensaio de tração e a correlação entre ambos. Na investigação da primeira seção, foram identificados os teores de vários elementos presentes nas amostras de aço CA-50 estudadas. Nos ensaios de tração, foram obtidas informações qualitativas e quantitativas a respeito das propriedades mecânicas. A fim de atingir os objetivos deste trabalho, adotou-se uma abordagem estatística composta por três técnicas principais: correlações estatísticas, análise de variância (ANOVA) e regressão linear. A regressão linear foi empregada para investigar afinidades ou a falta delas entre variáveis dependentes e independentes. A ANOVA foi utilizada para examinar diferenças significativas entre as médias de grupos específicos. Além disso, correlações estatísticas foram exploradas para entender a relação entre variáveis contínuas.

5.1 Composição química das amostras

Nas Tabelas 4 e 5 estão dispostos os teores em massa obtidos após o processo de refino secundário, conduzido no forno panela, para amostras representativas de quarenta lotes da bitola de 20 mm do aço CA-50, sendo vinte lotes para a usina semi-integrada e vinte lotes para a usina integrada, respectivamente. A análise de Espectrometria de Emissão Óptica (EEO), que forneceu a composição química, foi realizada em triplicata, com um desvio padrão e uma variância de cerca de 0,01 e 0,0001, respectivamente, entre as amostras. A aplicação dessa prática ofereceu uma maneira eficaz de reduzir o viés experimental e aumentar a confiabilidade dos resultados. Nesse contexto, os valores utilizados equivalem à média dos dados obtidos em cada repetição, permitindo uma análise mais robusta e confiável.

Tabela 4: Composição química do aço CA-50 para análise em panela nas amostras da usina semi-integrada

Lote	C (%)	Mn (%)	Mg (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Sn (%)	Zn (%)	O (ppm)	CE (%)
1,00	0,20	0,63	0,63	0,22	0,02	0,01	0,11	0,04	0,12	0,01	0,00	79,00	0,34
2,00	0,21	0,60	0,60	0,17	0,04	0,03	0,20	0,06	0,14	0,01	0,00	89,00	0,36
3,00	0,21	0,59	0,59	0,15	0,04	0,03	0,13	0,05	0,12	0,02	0,00	102,00	0,35
4,00	0,22	0,58	0,58	0,17	0,04	0,03	0,23	0,07	0,13	0,01	0,01	99,00	0,38
5,00	0,21	0,56	0,56	0,20	0,03	0,02	0,18	0,05	0,11	0,01	0,00	90,00	0,35
6,00	0,19	0,55	0,55	0,17	0,02	0,02	0,13	0,06	0,12	0,01	0,00	62,00	0,33
7,00	0,19	0,64	0,64	0,18	0,03	0,03	0,14	0,05	0,11	0,02	0,00	44,00	0,34
8,00	0,18	0,60	0,60	0,15	0,03	0,03	0,13	0,05	0,11	0,01	0,00	70,00	0,32
9,00	0,20	0,60	0,60	0,17	0,04	0,03	0,13	0,04	0,11	0,01	0,00	56,00	0,34
10,00	0,22	0,59	0,59	0,17	0,03	0,02	0,13	0,04	0,12	0,01	0,00	97,00	0,36
11,00	0,21	0,57	0,57	0,16	0,04	0,03	0,15	0,05	0,11	0,01	0,00	90,00	0,35
12,00	0,20	0,57	0,57	0,15	0,03	0,03	0,13	0,05	0,14	0,01	0,00	99,00	0,34
13,00	0,19	0,57	0,57	0,16	0,03	0,03	0,15	0,05	0,12	0,01	0,00	82,00	0,33
14,00	0,20	0,56	0,56	0,16	0,03	0,03	0,15	0,04	0,12	0,02	0,00	101,00	0,33
15,00	0,20	0,56	0,56	0,15	0,04	0,03	0,15	0,04	0,12	0,02	0,00	48,00	0,34
16,00	0,20	0,56	0,56	0,15	0,03	0,03	0,13	0,05	0,14	0,01	0,00	67,00	0,33
17,00	0,21	0,56	0,56	0,15	0,03	0,03	0,14	0,05	0,12	0,02	0,00	68,00	0,35
18,00	0,22	0,55	0,55	0,15	0,04	0,02	0,15	0,05	0,12	0,02	0,00	86,00	0,35
19,00	0,19	0,55	0,55	0,16	0,03	0,02	0,13	0,05	0,14	0,02	0,00	72,00	0,32
20,00	0,19	0,54	0,54	0,15	0,03	0,02	0,15	0,05	0,12	0,02	0,01	60,00	0,32
Média	0,20	0,58	0,58	0,17	0,03	0,03	0,15	0,05	0,12	0,01	0,00	78,05	0,34

Fonte: Autora (2023)

Tabela 5: Composição química do aço CA-50 para análise em panela nas amostras da usina integrada

Lote	C (%)	Mn (%)	Mg (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Sn (%)	Zn (%)	N (ppm)	CE (%)
1,00	0,22	0,52	0,52	0,13	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03	0,00	0,00	45,00	0,32
2,00	0,24	0,51	0,51	0,13	0,04	0,02	0,05	0,03	0,03	0,00	0,00	53,00	0,34
3,00	0,24	0,50	0,50	0,14	0,04	0,01	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	70,00	0,32
4,00	0,24	0,52	0,52	0,17	0,03	0,01	0,07	0,03	0,03	0,00	0,00	55,00	0,33
5,00	0,25	0,55	0,55	0,18	0,02	0,01	0,06	0,02	0,02	0,00	0,00	49,00	0,34
6,00	0,23	0,52	0,52	0,17	0,03	0,01	0,05	0,03	0,03	0,00	0,00	67,00	0,31
7,00	0,24	0,55	0,55	0,16	0,04	0,01	0,07	0,02	0,02	0,00	0,00	117,00	0,33
8,00	0,24	0,55	0,55	0,16	0,04	0,01	0,07	0,02	0,02	0,00	0,00	117,00	0,33
9,00	0,24	0,54	0,54	0,18	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00	59,00	0,33
10,00	0,25	0,57	0,57	0,19	0,02	0,01	0,05	0,02	0,03	0,00	0,00	59,00	0,35
11,00	0,24	0,57	0,57	0,16	0,02	0,01	0,05	0,02	0,03	0,00	0,00	88,00	0,34
12,00	0,24	0,56	0,56	0,15	0,03	0,01	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	55,00	0,33
13,00	0,23	0,58	0,58	0,18	0,02	0,01	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	47,00	0,33
14,00	0,24	0,58	0,58	0,18	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,00	0,01	38,00	0,33
15,00	0,24	0,58	0,58	0,19	0,02	0,01	0,04	0,02	0,03	0,00	0,00	40,00	0,34
16,00	0,25	0,60	0,60	0,19	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,00	0,00	65,00	0,35
17,00	0,25	0,60	0,60	0,17	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02	0,00	0,00	81,00	0,35
18,00	0,23	0,52	0,52	0,14	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	35,00	0,31
19,00	0,24	0,53	0,53	0,14	0,02	0,01	0,07	0,04	0,03	0,00	0,00	51,00	0,33
20,00	0,27	0,58	0,58	0,17	0,03	0,01	0,08	0,10	0,02	0,00	0,00	68,00	0,37
Média	0,24	0,54	0,55	0,16	0,03	0,01	0,05	0,02	0,02	0,00	0,00	62,95	0,33

Fonte: Autora (2023)

Ressalta-se que os valores observados nas tabelas foram arredondados para duas casas decimais. As diferenças entre os valores originais e os arredondados estavam a partir da terceira casa decimal e foram irrelevantes para este cálculo.

Averiguando-se os dados acima para os elementos químicos em quantidades mais significativas, pontua-se a conformidade de produção de ambas as usinas com a requisição da NBR 7480, visto que a composição química apresentada individualmente não excede os valores estabelecidos pela norma para nenhum dos componentes especificados.

Nessa direção, em cada tipo de usina é possível constatar um teor de carbono (C), onde a média dos lotes da usina semi-integrada apresenta teor ligeiramente mais baixo de carbono (0,20%) em comparação com a usina integrada (0,24%), dentro dos parâmetros definidos pela norma 7480 (0,35%) a ponto de conferir dureza ao material sem comprometer sua estrutura ao torná-lo mais frágil e suscetível a trincas. Isto porque, quando presente em excesso (acima de 0,3605%), o carbono, conforme aponta Mendes (2015), forma carbonetos de ferro, como a cementita, que são mais duros e quebradiços do que a estrutura de ferro puro, impossibilitando diversos tratamentos posteriores no material metálico.

Paralelamente, o teor de magnésio (Mg) é maior na usina semi-integrada (média por lote de 0,58% vs. 0,55% na integrada), essa diferença representa, consoante a De Freitas, et.al. (2018), uma mínima variação na microestrutura dos aços produzidos, influenciando diretamente na resistência e ductilidade, pois controla o tamanho e a forma dos grãos metálicos, resultando em uma estrutura mais resistente e com melhor ductilidade.

O mesmo preceito se estabelece para o manganês (Mn), uma vez que na usina semi-integrada possui média dos lotes em torno de 0,58%, enquanto na usina integrada apresenta 0,54%. À medida que o manganês se encontra dentro dos limites tolerados, fortalece a estrutura do aço, bem como participa do refinamento dos grãos do aço, o que não só melhora sua resistência mecânica, mas também sua ductilidade, tornando-o mais maleável. Atua ainda como desoxidante durante o processo de fabricação da liga, eliminando impurezas. Essas constatações são também verificadas no trabalho “Caracterização microestrutural de diferentes bitolas do aço CA-50 com composição química definida” desenvolvido por Queiroz Neto (2011).

Elementos residuais como fósforo (P), enxofre (S), estanho (Sn) e zinco (Zn) apresentam teores muito próximos entre seus pares para as duas usinas avaliadas. Esses teores conseguem se associar às propriedades mecânicas desejadas. Por intermédio da literatura, sabe-se que o fósforo afeta a usinabilidade, soldabilidade e resistência do aço, mas em níveis elevados, acima dos limites aceitados pela NBR 7480 (0,0504%), poderia tornar o aço quebradiço. O enxofre melhora a usinabilidade, mas em concentrações elevadas (0,0504%) reduz a ductilidade e a tenacidade. Também pode causar a formação de inclusões indesejáveis. O estanho melhora a usinabilidade e a resistência à corrosão. Em excesso, porém, torna o aço frágil. O zinco melhora a resistência à corrosão do aço, mas em níveis elevados reverberariam em efeitos prejudiciais à ductilidade. Entretanto, não há especificações na ABNT 7480 que definam, quantitativamente, um teor máximo para esse elemento. Bem como para o cobre, o cromo e o níquel. A investigação das repercussões das concentrações desses componentes químicos se dá por meio de suas implicações nas propriedades mecânicas.

O cobre, todavia, pode aumentar a resistência do aço, especialmente em concentrações mais altas e melhorar sua resistência à corrosão. Contudo, observa-se um teor seis vezes maior deste elemento para a usina semi-integrada em relação à usina integrada e essa particularidade, nessa conjuntura, significa uma maior resistência do processo produtivo adotado para realizar uma maior remoção do cobre. Apesar disso, a concentração ainda se encontra baixa e não é capaz por si só de conferir instabilidades ao produto.

Em se tratando de silício (Si), cromo (Cr) e níquel (Ni), sabe-se que o primeiro pode aumentar a resistência do aço e melhorar sua resistência à corrosão. Os teores de silício nas duas usinas são bastante semelhantes (uma média por lote de 0,01 e 0,03 para a usina semi-integrada e integrada, nesta ordem). O cromo é um elemento de liga que pode aumentar significativamente a resistência à corrosão do aço. Na usina semi-integrada, o teor de cromo é mais alto (0,15), o que pode resultar em uma resistência à corrosão superior em comparação com o aço produzido na usina integrada. O níquel pode aumentar a resistência e a tenacidade do aço, bem como melhorar sua resistência à corrosão. Seus teores nas duas usinas são praticamente iguais, o que indica que ambos os tipos de aço podem ter propriedades mecânicas semelhantes relacionadas a este elemento. Portanto, a principal diferença entre as usinas está no teor de cobre (0,12 para a usina semi-integrada e 0,02 para a usina integrada). No entanto, outros fatores, como o processamento e os tratamentos térmicos, também podem influenciar as propriedades mecânicas do aço e devem ser considerados para uma avaliação completa.

O nitrogênio pode estar presente no aço de várias fontes, incluindo o próprio curso de produção. Esse elemento pode ser adicionado através do contato com o ar durante o processo de fusão e refino do metal. Além disso, pode ser advindo dos materiais de carga, como o minério de ferro ou os materiais refratários usados nos fornos de fusão. O oxigênio, por sua vez, é introduzido no aço durante as etapas de fusão e refino para ajudar na remoção de impurezas indesejadas, como carbono excessivo, enxofre e fósforo. Ele reage com essas impurezas, formando óxidos que podem ser facilmente removidos. Isso ajuda a melhorar a qualidade e a pureza do produto. Desse modo, a dissimilaridade mais evidente verificada entre as usinas, em termos quantitativos, consiste na presença desses dois elementos, uma vez que são observados em concentrações muito baixas pelas razões citadas e assim não proporcionam imperfeições ao material. Nesse sentido, é importante controlar seus teores para evitar a formação de inclusões de óxido, o que pode prejudicar as propriedades mecânicas do aço, como a ductilidade e a resistência à tração. Além disso, o oxigênio em excesso pode contribuir para a formação de camadas de óxido na superfície do aço, o que pode afetar sua resistência à corrosão. Já o excesso de nitrogênio pode causar problemas de fragilização e reduzir a ductilidade do material. Em

excesso, pode formar compostos intermetálicos que tornam o material mais quebradiço e menos resiliente. Isso pode comprometer a capacidade do aço de resistir a cargas dinâmicas e impactos, reduzindo sua vida útil e confiabilidade em aplicações estruturais.

As Tabelas 6 e 7 apresentam, a seguir, informações mais gerais e complementares acerca das vinte amostras oriundas de cada usina.

Tabela 6: Abrangência estatística da composição química do aço CA-50 da usina semi-integrada

	C (%)	Mg (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Sn (%)	Mn (%)	Zn (%)	O (ppm)	CE (%)
Média	0,20	0,58	0,17	0,03	0,03	0,15	0,05	0,12	0,01	0,58	0,00	78,05	0,34
Mínimo	0,18	0,54	0,15	0,02	0,01	0,11	0,04	0,11	0,01	0,54	0,00	44,00	0,32
Máximo	0,22	0,64	0,22	0,04	0,03	0,23	0,07	0,14	0,02	0,64	0,01	102,00	0,38
Amplitude	0,04	0,10	0,07	0,03	0,02	0,12	0,03	0,04	0,02	0,10	0,01	58,00	0,06
Desvio Padrão	0,01	0,03	0,02	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01	0,00	0,03	0,00	18,18	0,02

Fonte: Autora, 2023

Tabela 7: Abrangência estatística da composição química do aço CA-50 da usina integrada

	C (%)	Mg (%)	Si (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Cu (%)	Sn (%)	Mn (%)	Zn (%)	N (ppm)	CE (%)
Média	0,24	0,55	0,16	0,03	0,01	0,05	0,02	0,02	0,00	0,55	0,01	62,95	0,33
Mínimo	0,22	0,50	0,13	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,50	0,00	35,00	0,31
Máximo	0,27	0,60	0,19	0,04	0,02	0,08	0,10	0,03	0,00	0,60	0,01	117,00	0,37
Amplitude	0,05	0,10	0,06	0,03	0,01	0,06	0,09	0,02	0,00	0,10	0,01	82,00	0,05
Desvio Padrão	0,01	0,03	0,02	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,00	0,03	0,00	22,93	0,01

Fonte: Autora, 2023

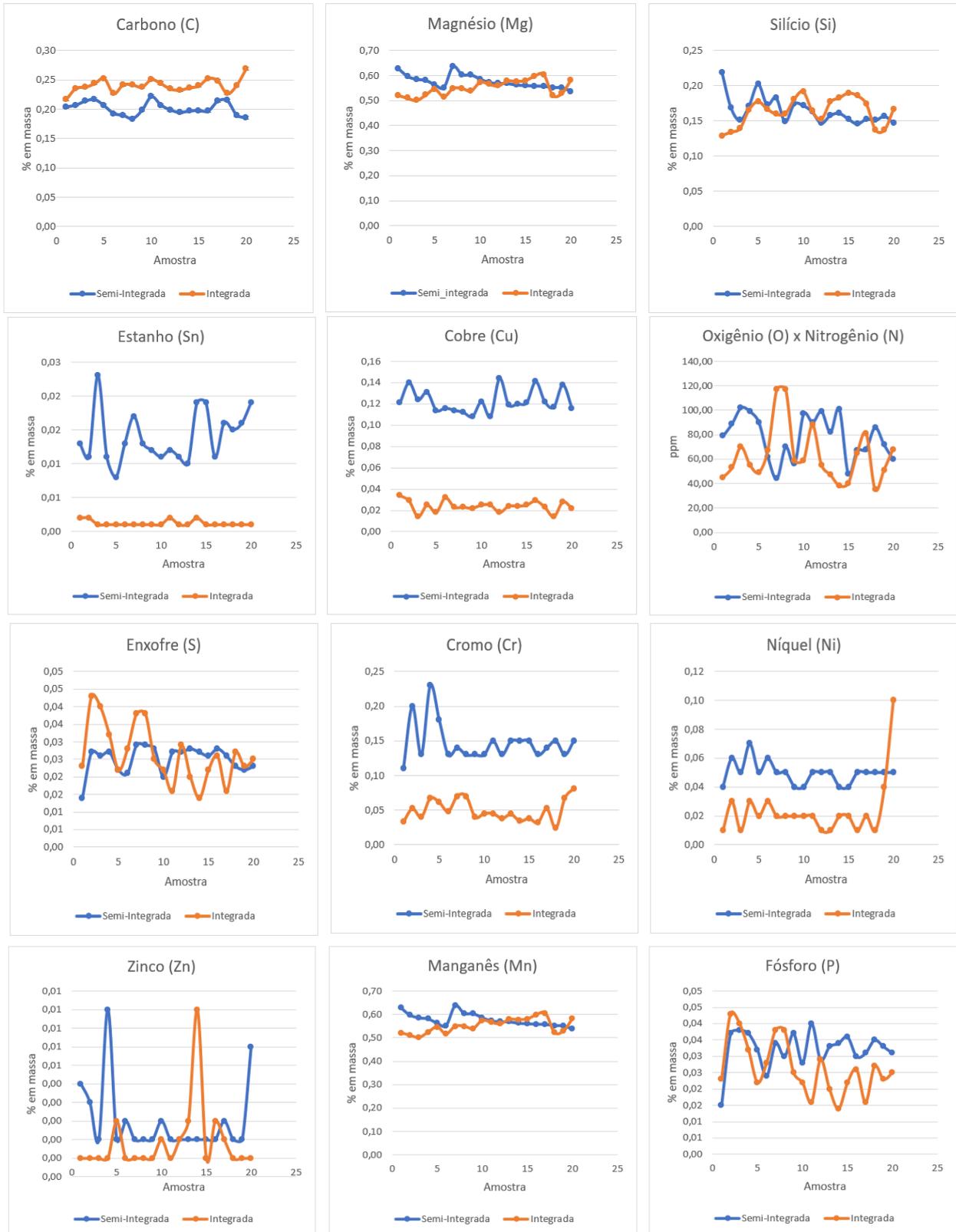
Em relação à média, observa-se que, para a maioria dos elementos, as diferenças entre as usinas são sutis, indicando uma consistência geral na composição do aço produzido em ambas as instalações. No entanto, a usina integrada tende a apresentar valores ligeiramente mais altos em comparação com a usina semi-integrada. Esse é um ponto importante a ser ressaltado pois nas usinas semi-integradas a principal matéria-prima é a sucata de aço. Já nas usinas integradas, consiste no minério de ferro. Além disso, há instalações para fabricação de ferro-gusa direto. Isso significa que a usina integrada pode produzir ferro-gusa diretamente do

minério de ferro, eliminando etapas intermediárias. Essa diferença afeta custos, eficiência e controle de qualidade. A usina integrada pode ter maior controle sobre a composição do ferro-gusa, resultando em produtos finais mais consistentes. Porém, o processo direto pode exigir investimentos mais altos.

O desvio padrão fornece uma medida da dispersão dos dados em torno da média. Os valores de desvio padrão são geralmente baixos para a maioria dos elementos em ambas as usinas, o que sugere que as concentrações dos elementos tendem a ser consistentes e previsíveis. Nada obstante, para o nitrogênio e o oxigênio, o desvio padrão é maior, indicando uma maior variabilidade na composição desses elementos em ambas as usinas.

A fim de ilustrar e contrapor as diferenças verificadas de composição química entre as amostras de cada usina, expõem-se os gráficos de dispersão na Figura 11:

Figura 11: Gráficos de dispersão - composição química do aço CA-50 (continua)

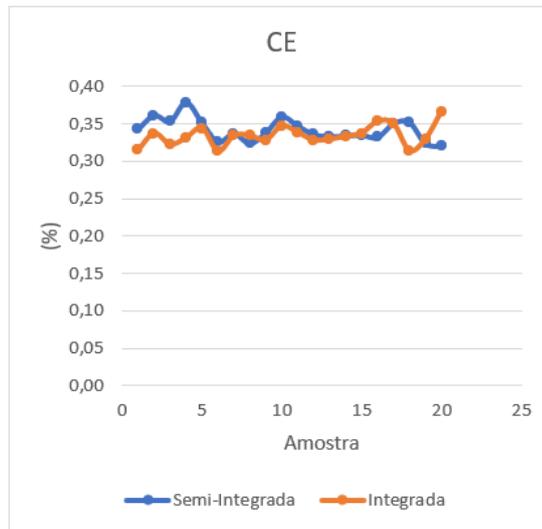


Fonte: Autora (2023)

A partir da Figura 11, é possível acompanhar e evidenciar a variabilidade de cada elemento presente por amostra dentro de uma mesma linha de fabricação e entre linhas distintas. Apesar de os valores de composição estarem dentro dos critérios estabelecidos pela NBR 7480, nota-se uma variabilidade destes devido às circunstâncias técnicas da cadeia produtiva, a exemplo disso estão as condições climáticas, uma vez que estas afetam direta e indiretamente na escolha e quantidades dos elementos de liga a serem adicionados. Conseqüentemente, é fácil perceber que certas curvas tendem a seguir um padrão de comportamento parecido em função da variabilidade do teor de cada elemento comparado à usina de origem, apontando conformidade em suas rotas produtivas para a obtenção da qualidade requerida. Porquanto, apresenta-se o carbono, o fósforo, o oxigênio, o nitrogênio, o enxofre, o cromo e níquel. Entretanto, um dos pontos que mais importantes a ser observado nessa circunstância é a sobreposição das curvas dos teores ou o distanciamento delas. Esse comportamento pode ser justificado, compensatoriamente, pela influência dos demais elementos de liga e pela flexibilidade na realização de ajustes às condições de produção, como a temperatura, tempo de fusão e refino, composição do material de carga, processo de mistura e homogeneização e controle de impurezas. Corroborando com essa proposição, há o contraponto da convergência, averiguada pela sobreposição das curvas, ao perceber-se as não-linearidades e os afastamentos dos elementos zinco, estanho, magnésio, manganês, cobre e silício que, assim, explicam a confluência do processo.

Enunciados esses comportamentos, a Figura 12, abaixo, ressalta a convergência entre o carbono equivalente para ambas as usinas, tanto em comportamento, demonstrado pelas curvas, quanto pela sobreposição observada, expressa no gráfico apresentado, o que explica que, independentemente das diferenças de concentrações, o requisito para soldabilidade mantém-se abaixo do limite proposto (0,55%) pela norma 7480. Logo, em tais casos, as concentrações dos elementos constantes na Equação 1 também estão dentro e abaixo dos limites da NBR (Tabela 2).

Figura 12: Carbono Equivalente comparado entre as amostras das usinas semi-integrada e integrada



Fonte: Autora (2023)

5.2 Propriedades mecânicas

Com o intuito de investigar as propriedades mecânicas do material, representam-se nas Tabelas 8 e 9, para cada uma das usinas, os valores a respeito das principais propriedades mecânicas especificadas pela norma 7480, da ABNT (Limite de escoamento, LE; Limite de Resistência, LR; LR/LE e Alongamento). Isto porque reúnem e agregam informações fundamentais suficientes para a aplicação do aço em questão, sem causar impedimentos ou comprometer as estruturas para as quais se destinam.

Tabela 8: Propriedades mecânicas do aço CA-50 da usina semi-integrada

Lote	LE (mpa)	LR (mpa)	LR/LE (u.a.)	A (%)
1,00	585,39	682,75	1,17	12,50
2,00	613,79	702,07	1,14	13,00
3,00	614,32	703,04	1,14	14,00
4,00	598,24	682,74	1,14	13,00
5,00	606,61	711,89	1,17	13,00
6,00	608,97	711,21	1,17	12,00
7,00	606,97	702,47	1,16	12,00
8,00	599,84	698,27	1,16	12,50
9,00	600,34	701,07	1,17	12,50
10,00	577,57	676,17	1,17	14,00
11,00	614,26	707,32	1,15	12,50
12,00	594,02	682,78	1,15	12,50
13,00	586,76	685,85	1,17	14,50
14,00	601,12	687,84	1,14	13,50
15,00	598,53	684,53	1,14	13,50
16,00	589,63	686,75	1,16	14,00
17,00	594,62	694,69	1,17	12,00
18,00	593,45	688,28	1,16	13,50
19,00	575,75	673,68	1,17	13,00
20,00	584,77	682,30	1,17	15,00
Média	597,25	692,28	1,16	13,13

Fonte: Autora (2023)

Tabela 9: Propriedades mecânicas do aço CA-50 da usina integrada (continua)

Lote	LE (mpa)	LR (mpa)	LR/LE (u.a.)	A (%)
1,00	598,52	696,24	1,16	14,26
2,00	633,27	753,03	1,19	14,27
3,00	614,22	721,45	1,17	14,97
4,00	668,40	781,59	1,17	11,09
5,00	637,91	744,71	1,17	14,32
6,00	632,02	749,06	1,19	13,26
7,00	630,88	738,48	1,17	15,22
8,00	612,39	716,87	1,17	14,61
9,00	607,97	718,11	1,18	14,80
10,00	602,87	712,91	1,18	15,04
11,00	603,80	707,61	1,17	15,30
12,00	601,67	702,11	1,17	15,17
13,00	590,10	692,70	1,17	13,56
14,00	588,38	687,49	1,17	15,31
15,00	606,77	712,10	1,17	16,40
16,00	608,98	722,39	1,19	16,20
17,00	619,18	725,32	1,17	16,54
18,00	604,25	702,66	1,16	15,08
19,00	616,13	717,62	1,17	15,02
20,00	622,51	728,55	1,17	14,83
Média	615,01	721,55	1,17	14,76

Fonte: Autora (2023)

Novamente, é fácil perceber como os valores apresentados nas duas tabelas configuram-se conforme as exigências da norma a qual atendem (exibidos nas Tabelas 2 e 3), comprovando, satisfatoriamente, como a composição química utilizada em cada rota consegue ser razoável para a obtenção de um material não somente seguro, mas com assegurada qualidade.

A despeito da conformidade qualitativa dos valores observados, não se pode deixar de aludir à sutil, porém notória diferença de média entre as usinas, ou seja, os números são superiores para a integrada. Em seu trabalho, Queiroz Neto (2011) percebe, assim como se reproduz neste estudo, essa pequena diferença, que é influenciada pelos teores de carbono e

manganês. Este é um indicativo de que esta rota tem qualidade vertiginosa em função de sua metodologia de fabricação.

As Tabelas 10 e 11 complementam as divergências e semelhanças estatísticas das propriedades mecânicas observadas para o aço produzido nas diferentes usinas.

Tabela 10: Abrangência estatística das propriedades mecânicas do aço CA-50 na usina semi-integrada

	LE (mpa)	LR (mpa)	LR/LE (u.a.)	A (%)
Média	597,25	692,28	1,16	13,13
Mínimo	575,75	673,68	1,14	12,00
Máximo	614,32	711,89	1,17	15,00
Amplitude	38,57	38,21	0,03	3,00
Desvio Padrão	11,59	11,58	0,01	0,86

Fonte: Autora (2023)

Tabela 11: Abrangência estatística das propriedades mecânicas do aço CA-50 na usina integrada

	LE (mpa)	LR (mpa)	LR/LE (u.a.)	A (%)
Média	615,01	721,55	1,17	14,76
Mínimo	588,38	687,49	1,16	11,09
Máximo	668,40	781,59	1,19	16,54
Amplitude	80,02	94,10	0,03	5,45
Desvio Padrão	18,71	22,96	0,01	1,19

Fonte: Autora (2023)

Na usina semi-integrada, a média do Limite de Escoamento (LE) é de 597,25 MPa, enquanto na usina integrada é ligeiramente maior, com uma média de 615,01 MPa. O Limite de Resistência (LR) médio na usina semi-integrada é de 692,28 MPa, em comparação com 721,55 MPa na usina integrada. Essa diferença quantitativa reflete diretamente na relação LR/LE, que é de 1,16 para a usina semi-integrada e 1,17 para a usina integrada. Embora a variação seja pequena, sugere uma ligeira diferença na ductilidade do material, com a usina integrada apresentando uma tendência ligeiramente maior para uma maior deformação antes da falha. Além disso, o alongamento médio é outro aspecto a considerar. Na usina semi-integrada, o alongamento médio é de 13,13%, enquanto na usina integrada é ligeiramente maior, com

14,76%. Isso indica uma diferença na capacidade de deformação antes da ruptura, com a usina integrada mostrando uma tendência ligeiramente maior para uma maior ductilidade. Essa propriedade refere-se à capacidade do material de deformar-se plasticamente antes de romper-se. Ao analisar as propriedades mecânicas do aço CA-50 em estado de corrosão, Souza (2021) justifica um maior alongamento, em relação à referência normativa (ABNT 7480), através da corrosão do material, que, por sua vez, culmina nesse efeito quanto mais evidente. Em paralelo a essa afirmação, no caso deste estudo, pode-se fundamentar esse acréscimo também nos valores de alongamento à composição química, mais especificamente a elementos que tornem o aço suscetíveis à corrosão, como o oxigênio. Isso é particularmente importante em estruturas sujeitas a cargas dinâmicas, como pontes e edifícios, onde a capacidade de absorver energia antes da fratura é essencial para garantir a segurança e a integridade da sustentação. Os elementos químicos ligados à ductilidade são o manganês e o silício. O manganês atua como um desoxidante e agente de refino de grão no aço, o que ajuda a melhorar sua ductilidade e tenacidade. Estando em quantidades adequadas, como verificado, promove uma microestrutura mais homogênea e refinada, reduzindo a propensão à formação de defeitos e aumentando a capacidade do aço de deformar-se plasticamente antes da fratura. O silício contribui indiretamente, controlando o tamanho dos grãos de cristal na estrutura do aço. Grãos menores geralmente resultam em uma estrutura mais homogênea e refinada, o que pode aumentar a ductilidade do material. Além disso, ajuda a controlar a formação de inclusões indesejáveis.

Majoritariamente, a usina integrada apresenta informações quantitativas médias superiores à usina semi-integrada (média, mínimo, máximo, amplitude e desvio padrão). Nesse contexto, por um lado, isso sugere que a usina semi-integrada detém, qualitativamente, valores mais concentrados e uniformes, menos destoantes. Por outro lado, embora isso se traduza em um grau satisfação maior, a usina integrada retém, quantitativamente, propriedades mecânicas mais apreciáveis, devido aos maiores valores.

Uma investigação comparativa das propriedades mecânicas do aço produzido na usina integrada e semi-integrada foi conduzida utilizando a técnica estatística de Análise de Variância (ANOVA). A ANOVA é uma ferramenta veemente que permite averiguar as diferenças entre as médias de três ou mais grupos de dados, determinando se essas diferenças são estatisticamente significativas.

Nesta investigação, a ANOVA foi aplicada para avaliar se existem diferenças significativas nas propriedades mecânicas do aço (LR, LE, LR/LE e Alongamento) entre os produtos das usinas objetos de estudo. Essas informações são apontadas nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12: ANOVA realizada para a usina semi-integrada

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	112068,10	12,00	9339,00	367,37	6,58E-150	1,79
Dentro dos grupos	6278,99	247,00	25,42	-	-	-
Total	118347,00	259,00	-	-	-	-

Fonte: Autora (2023)

Tabela 13: ANOVA realizada para a usina semi-integrada

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Entre grupos	72888,16	12,00	6074,01	150,13	4,87E-106	1,79
Dentro dos grupos	9992,99	247,00	40,46	-	-	-
Total	82881,16	259,00	-	-	-	-

Fonte: Autora (2023)

As linhas de título das tabelas anteriores representam, respectivamente:

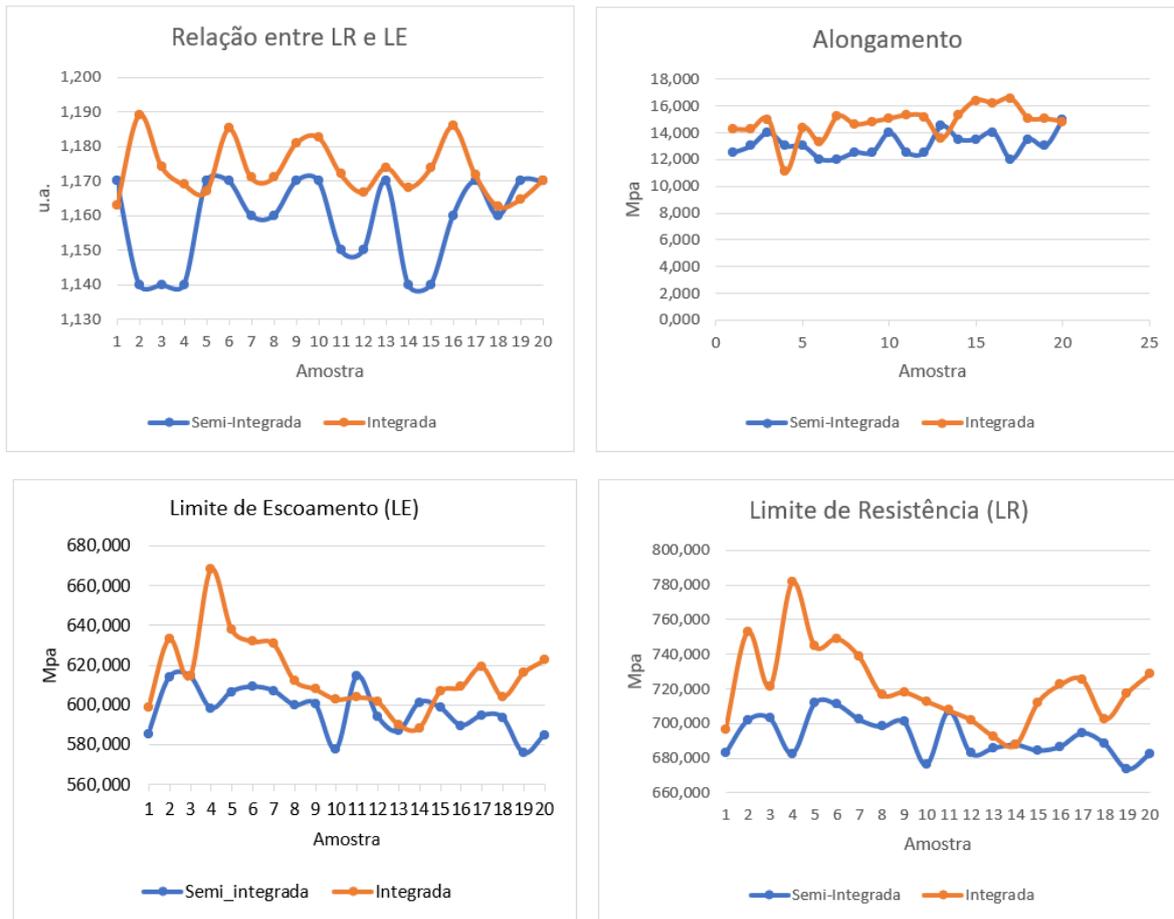
- ❖ **Fonte de variação:** Indica a fonte da variação nos dados, neste caso, "Entre grupos" e "Dentro dos grupos".
- ❖ **SQ (Soma dos Quadrados):** Representa a soma dos quadrados dos desvios de cada valor observado em relação à média global dos dados.
- ❖ **gl (Graus de Liberdade):** Indica o número de grupos menos um para a variação entre grupos e o número total de observações menos o número de grupos para a variação dentro dos grupos.
- ❖ **MQ (Média dos Quadrados):** É calculada dividindo a soma dos quadrados pelo número de graus de liberdade.
- ❖ **F (Estatística F):** É a relação entre a variabilidade entre os grupos e a variabilidade dentro dos grupos. É calculado dividindo a média dos quadrados entre grupos pela média dos quadrados dentro dos grupos.

❖ **Valor-P:** É a probabilidade de obter uma estatística F igual ou mais extrema do que aquela observada, assumindo que a hipótese nula seja verdadeira. Um valor P baixo indica que a diferença entre as médias dos grupos é estatisticamente significativa.

❖ **F crítico:** é o valor crítico da estatística F para um determinado nível de significância e número de graus de liberdade.

A partir dos dados fornecidos, constata-se que para ambas as usinas, a estatística F é bastante alta (367,37 e 150,13), o que sugere que há uma diferença significativa entre as médias dos grupos. O valor P é muito baixo (6,58E-150 e 4,87E-106, próximos de zero), o que indica uma alta significância estatística, isto é, confiança de que os resultados observados são verdadeiros e não ocorreram apenas por acaso. Como os valores F são muito maiores do que o valores críticos F, rejeita-se a hipótese nula de que não há diferença entre os grupos. O que indica que há diferenças significativas entre os grupos em relação às variáveis estudadas e isso então demonstra uma interdependência indireta.

Para tornar mais clara e objetiva tal comparação, apresentam-se, na Figura 13, os gráficos de dispersão para ambos os tipos de usina:

Figura 13: Gráficos de dispersão comparativos para as propriedades mecânicas

Fonte: Autora (2023)

Os gráficos trazem à tona as inferências antecedentes realizadas, comprovando a oscilação dos valores entre as amostras de uma mesma rota produtiva e uma rota produtiva diferente, sem perder, distintamente, a compatibilidade normativa, podendo desvelar, então, a variabilidade dessas propriedades mecânicas em razão de como o aço se compõe quimicamente.

5.3 Determinação das correlações estatísticas

Utilizando o carbono equivalente (CE) para representar a composição química e a razão entre o limite de resistência e o limite de escoamento (LR/LE) para representar as propriedades mecânicas, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para comparar a influência dessas variáveis entre si. A escolha dessas variáveis é justificada pelas suas representatividades e relação direta. As informações resultantes dessa análise estão apresentadas nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 14: ANOVA composição química x propriedades mecânicas da usina semi-integrada

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	111341,40	11,00	10121,94	367,54	2,52E-138	1,83
Dentro dos grupos	6278,99	228,00	27,54	-	-	-
Total	117620,40	239,00	-	-	-	-

Fonte: Autora (2023)

Tabela 15: ANOVA composição química x propriedades mecânicas da usina integrada

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	70887,54	11,00	6444,32	144,19	5,38E-93	1,83
Dentro dos grupos	9653,83	216,00	44,69	-	-	-
Total	80541,36	227,00	-	-	-	-

Fonte: Autora (2023)

Os resultados reportados em cada tabela sugerem que não houve uma influência significativa das porcentagens de elementos químicos nas propriedades mecânicas identificadas, como evidenciado pelo valor-P extremamente baixo em ambos os casos, que é muito menor que o nível de significância padrão utilizado como referência, 0,05 (5%).

Para ambas as usinas, a estatística F calculada é muito maior do que o valor crítico de F observado individualmente. Isso reforça a evidência de que a variação nas propriedades mecânicas entre os grupos não pode ser atribuída ao acaso, mas a fatores como diferenças na composição química, processos de fabricação, tratamentos térmicos, variações na microestrutura e controle de qualidade.

A maior fonte de variação nas propriedades mecânicas é imputada entre os grupos, o que sugere que as diferenças observadas nas propriedades mecânicas são principalmente devidas às diferentes porcentagens de elementos químicos. Por outro lado, a fonte de variação dentro dos grupos, porcentagens de elementos químicos, também é considerável, mas em menor medida.

Com base em todas as interpretações feitas até o momento, faz sentido usar a regressão linear para analisar a relação existente entre LR/LE e o CE do aço CA-50. A regressão linear é uma técnica estatística comum para modelar a relação entre uma variável dependente, nesse caso a razão LR/LE, e uma ou mais variáveis independentes, como a composição química. Essas informações são descritas nas Tabelas 16 e 17 e Figuras 14 e 15.

Tabela 16: Estatísticas de regressão linear para a usina semi-integrada a um nível de confiança de 95%

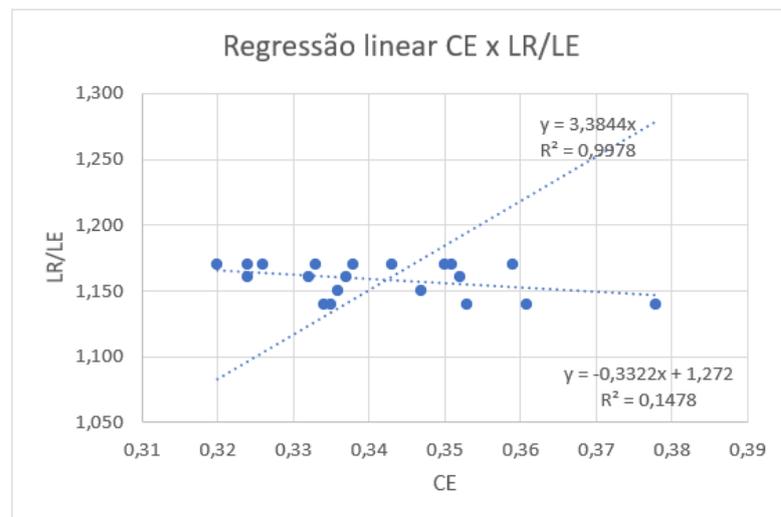
Estatísticas de regressão	
Correlação R	-0,38
R^2	0,15
R^2 ajustado	0,10
Erro padrão	0,01
Amostras	20,00

Fonte: Autora (2023)

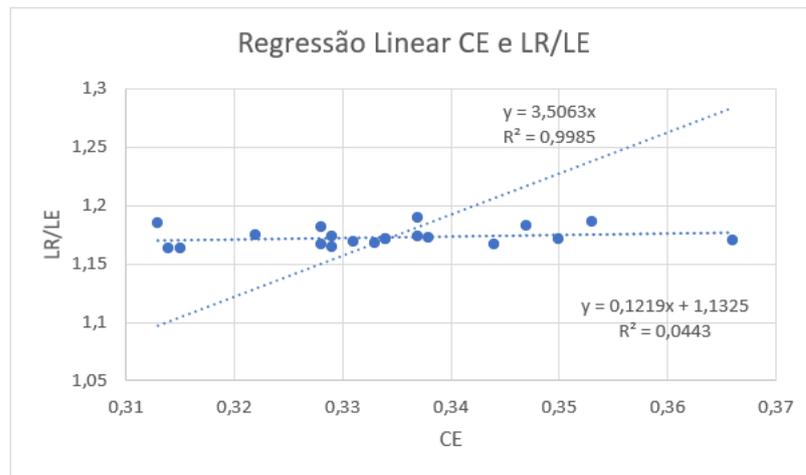
Tabela 17: Estatísticas de regressão linear para a usina integrada a um nível de confiança de 95%

Estatísticas de regressão	
Correlação R	0,21
R^2	0,04
R^2 ajustado	-0,01
Erro padrão	0,01
Amostras	20,00

Fonte: Autora, 2023

Figura 14: Gráfico de dispersão linear CE x LR/LE da usina semi-integrada

Fonte: Autora, 2023

Figura 15: Gráfico de dispersão linear CE x LR/LE da usina integrada

Fonte: Autora, 2023

Para a usina semi-integrada, em virtude de a correlação entre CE e LR/LE ser de aproximadamente -0,38, há o indicativo de uma relação negativa entre as duas variáveis, pois à medida que o carbono equivalente aumenta, a razão entre limite de resistência e o limite de escoamento inclina-se à diminuição. Isto decorre do fato de que um aumento dos elementos que compõem a liga metálica, em geral, tende a fragilizar o aço em diversos aspectos, reduzindo a atuação das propriedades mecânicas. No entanto, sem a inclusão da intercepção das informações de partida, o valor absoluto da correlação é baixo, sugerindo uma relação fraca entre as variáveis. Essa informação diz que a composição química, sob essa amostragem, não é capaz de revelar um nível de influência exclusiva ou mesmo considerável sobre as propriedades mecânicas. Esses dados traduzem-se nessas conclusões a partir da conformidade das amostras estudadas com os teores dos elementos com a NBR 7480, não havendo, portanto, grandes flutuações em seus valores. A conformidade mencionada ocorreu devido à concretização da comercialização dos lotes produzidos do aço, uma vez que a empresa siderúrgica fornecedora dos dados se dedica ao alto rigor de qualidade, utilizando processos e matérias-primas que correspondam ao seu alcance. O coeficiente de determinação é cerca de 0,148. Isso significa que cerca de 14,8% da variabilidade em LR/LE pode ser explicada pela variabilidade em CE. Desse modo, o modelo de regressão linear explica uma parte da variação observada para a variável independente em função da variável dependente. Quando o coeficiente de determinação ajustado circunda 0,10, este valor leva em consideração o número de variáveis independentes no modelo e fornece uma medida mais precisa da qualidade em seu ajuste. Neste caso, sugere que cerca de 10% da variabilidade em LR/LE é explicada pela variabilidade em

CE. O erro padrão é de aproximadamente 0,012 e aponta a dispersão dos dados em torno da linha de regressão. Como este é um valor baixo, indica maior precisão estimativa do modelo.

Em contrapartida, é relevante considerar a variabilidade dos dados, uma vez que esta é grande em torno da origem, torna-se mais apropriado incluir a interceptação para permitir uma melhor adaptação da linha de regressão. Além disso, a ausência de interceptação pode introduzir um viés no modelo, especialmente se os dados tiverem um ponto de corte significativo no eixo y que não seja zero. Isso pode levar a uma subestimação ou superestimação dos coeficientes de regressão e, conseqüentemente, dos valores de R^2 . Observa-se, então, correlação absoluta passa a ser cerca de 0,9978, demonstrando afinidade considerável entre as variáveis analisadas.

Quando esta mesma abordagem é feita para os dados da usina integrada, observa-se que os resultados da análise de regressão linear entre o CE e LR/LE revelam algumas conclusões importantes. Primeiramente, o coeficiente de correlação múltipla R foi calculado como cerca de 0,21, indicando uma correlação positiva fraca entre as duas variáveis. Isso sugere que há uma relação linear, porém não muito forte, entre as variáveis. Além disso, o coeficiente de determinação R^2 é de apenas aproximadamente 0,044, o que significa que por volta de 4,43% da variabilidade em CE pode ser explicada pela variabilidade em LR/LE. O erro padrão, que mede a dispersão dos pontos de dados em torno da linha de regressão, foi calculado como 0,0078. Quanto menor esse valor, melhor o modelo se ajusta aos dados. No entanto, o R-quadrado ajustado foi negativo é -0,008, mostrando que o modelo não se ajusta bem aos dados. Esses resultados sugerem que a abordagem técnica adotada por este tipo de usina para esses parâmetros não é adequadamente explicada por um modelo de regressão linear. Contudo, observa-se que dentro das amostras estudadas não houve uma influência da composição química sobre as propriedades mecânicas. Acredita-se que em razão de as amostras utilizadas estarem todas dentro dos limites especificados pela norma ABNT, uma vez que se destinavam à comercialização e deviam atender rigorosamente aos critérios estabelecidos. Nesse contexto, uma discussão sobre a importância do tratamento térmico como um fator influente nas propriedades mecânicas pode ser relevante. O tratamento térmico é fundamental na fabricação de materiais metálicos, alterando sua microestrutura. Isso influencia diretamente propriedades como resistência e ductilidade. Diferentes tratamentos, como recozimento e têmpera, têm impactos distintos. A otimização envolve ajustes na temperatura e tempo de tratamento. Outros fatores, como processamento mecânico, geometria do produto final e inclusões, também afetam as propriedades mecânicas e devem ser considerados.

6 CONCLUSÃO

Findando a execução deste estudo sobre a influência da composição química do aço CA-50 em suas propriedades mecânicas, é possível fazer conclusões apreciáveis que contribuem para o entendimento e aprimoramento desse material fundamental na indústria da construção civil.

A etapa de coleta e preparação das amostras foi crucial para garantir a representatividade dos dados obtidos. A análise por Espectrometria de Emissão Óptica revelou informações valiosas sobre a composição química das amostras, identificando os elementos predominantes e eventuais impurezas. Todavia, vale ressaltar que a escolha da rota de produção do aço, seja ela integrada ou semi-integrada, pode impactar não apenas na composição, desde a seleção da matéria-prima, mas também na qualidade final do material e em seu desempenho em termos de resistência à corrosão e impacto ambiental.

O ensaio de tração, conduzido de acordo com a norma técnica aplicável, NBR 7480, de 2022, proporcionou dados quantitativos sobre as propriedades mecânicas das diferentes amostras de aço CA-50, indicando que todas as amostras analisadas estão dentro dos valores estipulados pelas normativas vigentes. A investigação desses resultados permitiu comparar as diferentes composições químicas das amostras e identificar correlações através da ANOVA e regressão linear entre o alongamento, os limites de resistência e escoamento e razão entre eles.

As análises estatísticas, incluindo regressão linear, análise de variância (ANOVA) e correlações dos dados obtidos, foram fundamentais para identificar associações expressivas entre os elementos químicos presentes e as propriedades mecânicas avaliadas. Esse conjunto de métodos e procedimentos utilizados para entender e interpretar dados forneceram insights adicionais sobre os fatores que influenciam as propriedades mecânicas do aço CA-50, possibilitando uma compreensão mais aprofundada do comportamento do material. Assim, observou-se que não há considerável influência, dentro das amostras estudadas, da composição química sobre as propriedades mecânicas, visto que foram comercializadas e precisavam possuir alto rigor normativo, pois a empresa fonte dos dados estudados mantém um processo produtivo bastante consolidado, uniforme e que atende aos critérios estabelecidos pela NBR 7480, isso sugere que outros fatores podem desempenhar um papel mais significativo.

Nesse contexto, uma discussão sobre a importância do tratamento térmico como um fator influente nas propriedades mecânicas pode ser relevante. Outros fatores, como processamento mecânico, geometria do produto final e inclusões, também afetam as propriedades mecânicas e devem ser considerados.

Por fim, suportando-se nas apurações efetuadas, é possível sugerir bastantes direções para trabalhos futuros. Direções tais que incluem possíveis aprimoramentos na metodologia, como a utilização de técnicas de análise mais avançadas e áreas adicionais de pesquisa relacionadas ao tema, como o estudo do efeito de tratamentos térmicos na composição química e nas propriedades mecânicas do aço CA-50. Além disso, seria relevante perscrutar mais profundamente o impacto ambiental e a resistência à corrosão de diferentes rotas de produção do produto, levando em consideração as usinas integradas e semi-integradas, visando também aprimorar e promover práticas mais sustentáveis na indústria siderúrgica.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia. Produção**. Editora Arte & Cultura, São Paulo: vol.1. 1997.

ASHBY, M. F.; JONES, D. R.H. **Engenharia de Materiais**. 1ª Ed. Editora Elsevier. 2007

ASKELEAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo, Cengage Learning, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7480: **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado** – Especificação. Rio de Janeiro, 2022.

BIOPDI. **Ensaio de tração**. Solução em Ensaio de Materiais. 2023. Disponível em: <<https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-de-tracao/>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

BOLOTA, J. R.; FACO, R. J.; GENTILE, E. F.; GONÇALVES, M.; LEANDRO, C. A. S.; MALYNOWSKYJ, A.; MOURÃO, M. B.; QUITES, E. E. C.; SILVA, G. F. B. L.; TAKANO, C.; YOKOJI, A. **Introdução à siderurgia**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2007.

BRANCO, C. A.G. M. **Mecânica dos Materiais**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1985.

CALDAS, J. A. C. **Análise de duas rotas tecnológicas na siderurgia brasileira com foco na eficiência energética**. JUIZ DE FORA, 2011. Disponível em: <https://www2.ufjf.br/engenhariadeproducao/files/2014/09/2011_3_Jos%C3%A9-Augusto.pdf>. Acesso em 12 Nov 2023.

CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: característicos gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 5ª ed. ampl. e rev. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – ABM, 1982.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª ed. São Paulo, SP: Edgard Blücher, 2008.

DE FREITAS, B. M.; CAMPELO, G. G.; LOPES, A. P.; FALEIROS, A. K. S.; SOUZA, P. P. **Análise da tensão de flexão entre metais**. Maceió, 2018. Disponível em: <https://www.confesa.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/mecanica/5_adtdfem.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2024.

DO AMARAL, G. D.; LOUREIRO, V. S.; REIS, E. A. **Análise de Regressão Linear no Pacote R**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.est.ufmg.br/portal/wp-content/uploads/2023/01/RTE-01-2009.pdf>>. Acesso em 05 dez. 2023.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE. **Caracterização da energia no setor siderúrgico.** Ministério das Minas e energia, Brasil, 2009. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2009>>. Acesso em: 7 fev. 2024.

FREDEL, M. C.; ORTEGA, P.; BASTOS, E. **Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais.** CERMAT. v. 1 , 2015. Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos do Departamento de Eng. Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<https://cermat.ufsc.br/wp-content/uploads/2015/03/APOSTILA-DO-LABORATORIO-DE-PROPRIEDADES-MEC-160315.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

LEFEBVRE-BRION, H.; FIELD, R.W. **The Spectra and Dynamics of Diatomic Molecules.** Academic Press, London, 2004.

LOPES, J. T. B. **Estrutura e Propriedades dos Materiais.** Belém, 2010. Disponível em: <<https://jorgeteofilos.files.wordpress.com/2010/08/epm-apostila-capitulo09-ensaios-mod1.pdf>>. Acesso em: 5 dez. 2023.

MARTINS. **Espectrometria para usuários.** Belo Horizonte: DAC Instrumentos, 2006.

MENDES, M. K. O.; MACIEL, P. H. C.; FARIA, G. L.; **Efeito da Composição Química e Temperatura de Austenitização sobre a Temperabilidade Jominy de Aços Baixo Carbono.**

NUNES, L. M. **Desenvolvimento de Aço Microligado para a Produção de Vergalhão Nervurado.** Dissertação. PUC-RJ, 2009.

MORAES, R. M. **Modelos de probabilidade e inferência estatística análise de variância e estatística não paramétrica.** UFPB, 2011. Disponível em: <http://www.de.ufpb.br/~ulisses/disciplinas/anova_estat_naoparametrica.pdf>. Acesso em 05 dez. 2023.

MURTA, M. C. J. **Análise de inclusões não metálicas em aço por espectrometria de emissão óptica associada ao sistema Spark-DAT.** Belo Horizonte, Fevereiro de 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD9DKEMQ/1/disserta_o_mariacecilia.pdf>. Acesso em 15 dez. 2023.

NICOLAU, D. M. **Análise da resistência de amostras de vergalhões ca-50 submetidos ao teste de tração para verificação de suas especificações.** Centro Universitário Do Sul De Minas. Varginha, 2020. Disponível em: <<http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/1501/1/Diego%20Maia%20Nicolau.pdf>>. Acesso em 17 de nov. de 2023.

PEIXOTO, R. C. C. **Análise Da Variação Típica Da Composição Química De Placas De Lingotamento Contínuo.** Belo Horizonte. 2007. Disponível em: <https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1039M.PDF>. Acesso em: 20 out. 2023.

QUEIROZ NETO, M. **Caracterização microestrutural de diferentes bitolas do aço CA-50 com composição química definida.** Trabalho final de curso. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

SILVA, J. N. S. **Siderurgia.** E-tec Brasil. Belém, 2011. Disponível em: https://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_metal/siderurgia/161012_siderurgia.pdf. Acesso em 27 dez. 2023.

SOUSA, B. M.; DA SILVA, M. A. M.; DE SOUSA, A. A. S. R.; SANTOS, P. R. A. R. **Análise das propriedades mecânicas do aço ca-50 em estado de corrosão.** Disponível em: https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/Contecc2021/Civil/AN%C3%81LISE_DAS_PROPRIEDADES_MEC%C3%82NICAS_DO_A%C3%87O_CA-50_EM_ESTADO_DE_CORROS%C3%83O.pdf. Acesso em: 12 jan. 2024.

SOUZA, S. A. **Composição química dos aços.** São Paulo, SP: Edgard Blücher, 1989.

VAZ, G. D. **Quantificação das Perdas de Ferro Metálico em Escórias de Forno Elétrico a Arco.** Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/18624/18624_3.PDF. Acesso em 10 nov. 2023.

YI, H.; DU, L.; WANG, G.; LIU, X. **Development of a Hot-Rolled Low Carbon Steel with High Yield Strength.** ISIJ International 46, p. 754-758, 2006.