

AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE LIGAÇÕES SOLDADAS EM ESTRUTURAS METÁLICAS¹

ASSESSMENT OF FATIGUE RESISTANCE OF WELDED JOINTS IN METALLIC STRUCTURES

Kêndally Kátia Silva²
Rubenusá Martins Sousa³
Vinicius Viana Coelho⁴
Déborah Vilas Boas Passos⁵

RESUMO

A análise da resistência à fadiga em ligações de estruturas metálicas é um aspecto crucial na engenharia moderna, uma vez que a segurança e longevidade das construções metálicas, dependem significativamente desse processo meticuloso. Este estudo visa aprofundar nossa compreensão sobre essa importante questão. Para a realização deste estudo, foi feita uma revisão abrangente da literatura disponível sobre a avaliação da resistência à fadiga de ligações soldadas em estruturas metálicas. O embasamento teórico se sustentou nos trabalhos de Smith et al. (2020), Rethwisch (2018), Johnson (2018), Viana (2019) e Gibson e Ashby (1997). Ao longo deste estudo, esperou-se não apenas ampliar o conhecimento sobre a resistência à fadiga, mas também, contribuir para o avanço da engenharia metálica fornecendo insights valiosos que possam influenciar práticas e normas futuras. Logo esse é um passo fundamental para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas metálicas num mundo em constante evolução. No entanto, é importante destacar que ainda há espaço para inovação e desenvolvimento de novas abordagens. O fenômeno da fadiga não pode ser subestimado pois demanda uma análise cada vez mais precisa e detalhada. Portanto, o desenvolvimento de novas metodologias torna-se crucial para aprimorar a precisão dos cálculos e evitar o desgaste prematuro das estruturas ao longo do tempo, porque somente através de um compromisso contínuo com a pesquisa e a inovação poderemos assegurar que as construções metálicas permaneçam seguras e funcionais em face dos desafios do ambiente construtivo moderno.

Palavras-chave: Durabilidade; Desgaste; Juntas; Aço.

¹ Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Inhumas FacMais, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, no primeiro semestre de 2024.

² Acadêmico(a) do 10º Período do curso de Engenharia Civil pela Faculdade de Inhumas. E-mail: viniciuscoelho@aluno.facmais.edu.br;

³ Acadêmico(a) do 10º Período do curso de Engenharia Civil pela Faculdade de Inhumas. E-mail: kendallysilva@aluno.facmais.edu.br;

⁴ Acadêmico(a) do 10º Período do curso de Engenharia Civil pela Faculdade de Inhumas. E-mail: rubenusam@aluno.facmais.edu.br;

⁵ Professor(a)-Orientador(a). Especialista em Engenharia Civil. Docente da Faculdade de Inhumas. E-mail: deborah@facmais.edu.br.

ABSTRACT

The analysis of fatigue resistance in metallic structure connections is a crucial aspect in modern engineering, since the safety and longevity of metallic constructions depend significantly on this meticulous process. This study aims to deepen our understanding of this important issue. To carry out this study, a comprehensive review of the available literature was carried out on the assessment of fatigue resistance of welded connections in metallic structures. The theoretical basis was supported by the work of Smith et al. (2020), Rethwisch (2018), Johnson (2018), Viana (2019) and Gibson and Ashby (1997). Throughout this study, it was hoped not only to expand knowledge about fatigue resistance, but also to contribute to the advancement of metal engineering by providing valuable insights that can influence future practices and standards. This is a fundamental step to guarantee the safety and durability of metal structures in a constantly evolving world. However, it is important to highlight that there is still room for innovation and development of new approaches. The phenomenon of fatigue cannot be underestimated and demands increasingly precise and detailed analysis. Therefore, the development of new methodologies becomes crucial to improve the accuracy of calculations and avoid premature wear of structures over time. Only through an ongoing commitment to research and innovation can we ensure that metal buildings remain safe and functional in the face of the challenges of the modern construction environment.

Keywords: Durability; Wear; Joints; Steel.

1 INTRODUÇÃO

A análise da resistência à fadiga em ligações soldadas de estruturas metálicas é essencial na engenharia para garantir a segurança e durabilidade de construções em aço, alumínio e materiais metálicos. De acordo com Edison da Rosa (2002), a fadiga é um processo gradual de redução da capacidade de carga de componentes estruturais, resultando na ruptura do material devido ao avanço quase infinitesimal de trincas a cada ciclo de carregamento.

Esse fenômeno é desencadeado pela presença de tensões que variam ao longo do tempo, provocando deformações plásticas cíclicas em pontos críticos da estrutura. Tais deformações levam à deterioração do material, originando trincas de fadiga que, com a continuidade dos carregamentos variáveis, crescem até atingir um tamanho suficiente para causar a ruptura final. Conforme descrito por Johnson (2018), o processo de nucleação da trinca de fadiga depende das tensões cisalhantes cíclicas, enquanto a propagação é influenciada pelas tensões de tração, responsáveis pelo crescimento das trincas nucleadas até a ruptura. Essa análise é crucial para entender os mecanismos subjacentes à fadiga dos materiais, como discutido por Smith et al. (2020), e é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de prevenção de falhas em estruturas e componentes.

É crucial destacar que os mecanismos os quais atuam na nucleação e propagação das trincas são distintos, e exigem critérios diferentes para avaliar falhas por fadiga em cada uma dessas fases. Conforme discutido por Johnson (2019), essa abordagem diferenciada é fundamental para uma análise precisa e abrangente da resistência à fadiga em ligações soldadas. Essa observação é reforçada por Smith et al. (2020), que ressalta a importância de entender os diferentes estágios do

processo de fadiga para garantir a integridade e a durabilidade das estruturas soldadas.

A fadiga, assim como a corrosão e o desgaste, figura como uma das principais causas de falhas em estruturas metálicas. Estruturas submetidas a carregamentos cíclicos estão sujeitas a um processo de deterioração contínua, no qual o surgimento e a propagação de trincas se tornam características distintivas da fadiga. É raro observar a formação de trincas em um material isolado, desprovido de entalhes, juntas, soldas ou conexões. Contudo, em cenários nos quais os materiais de ligação exibem uma resistência mais elevada, a fadiga também se manifesta nos elementos de ligação (Nussbaumer; Borges; Davaine, 2011). Esse fenômeno sublinha a importância crítica de se compreender os fatores que influenciam a fadiga em estruturas metálicas, permitindo uma abordagem eficaz na prevenção e mitigação desses danos ao longo do tempo.

Quanto à falha por fadiga, para uma etapa de projeto preliminar, uma alternativa viável é o uso da expressão integral do dano, conforme usado no exemplo de aplicação, o que permite, de uma forma rápida, fazer uma avaliação do grau de comprometimento quanto a uma falha por fadiga. Nesse caso o efeito de tensão média ou de tensões residuais deve ser usado diretamente nas constantes que definem a curva de fadiga do material, corrigida para o ponto crítico da peça (Rosa, 2002).

Considerando que a fadiga é um processo que resulta na redução da capacidade de carga de componentes estruturais devido à ruptura gradual do material, com o avanço quase infinitesimal da trinca a cada ciclo de carregamento, a indagação central é: como as ligações soldadas em estruturas metálicas respondem ao fenômeno da fadiga? De acordo com Johnson (2018), essa questão é fundamental para compreender os efeitos da fadiga em estruturas metálicas. Além disso, é crucial realizar uma análise aprofundada dos métodos de dimensionamento e reforço de ligações que estão sujeitas a carregamentos cíclicos, como discutido por Smith et al., (2020), para garantir a integridade e a segurança das estruturas ao longo de sua vida útil.

A ênfase na análise das interfaces entre perfis metálicos, especialmente ligações soldadas, é justificada pelo elevado grau de variabilidade inerente ao processo produtivo, resultando em pontos suscetíveis a falhas. Conforme destacado por Johnson (2018), essa variabilidade pode levar a pontos críticos de falha nas estruturas metálicas. Esse estudo visa preencher lacunas críticas, identificando fatores determinantes para a confiabilidade dessas estruturas, especialmente durante a fase de execução. Essa abordagem é fundamental para garantir a integridade estrutural e a segurança das construções, como mencionado por Smith et al., (2020), e destaca a importância de considerar cuidadosamente as interfaces entre perfis metálicos para evitar falhas prematuras.

Logo, esse estudo analisa a eficiência da seleção adequada dos materiais, considerando suas propriedades mecânicas e resistência à fadiga e como se pode prevenir falhas prematuras, enquanto a adoção de procedimentos de soldagem de alta qualidade e a qualificação dos profissionais envolvidos são essenciais para assegurar a integridade das soldas e da estrutura como um todo.

2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

2.1 EXPLORANDO A VERSATILIDADE DO AÇO: SUAS PROPRIEDADES EM DETALHES

A contribuição de Callister e Rethwisch (2018) oferece uma análise profunda sobre a resistência do aço, revelando os intrincados mecanismos que sustentam essa característica essencial do material. A capacidade excepcional do aço de suportar cargas substanciais sem falhar é um testemunho de sua robustez inigualável. Segundo os autores, essa notável qualidade tem suas bases na estrutura cristalina do material e nas interações complexas entre suas diversas fases (Callister; Rethwisch, 2018).

Ao explorar os detalhes da estrutura do aço, a organização molecular do material contribui diretamente para sua resistência. Como salientado por Callister e Rethwisch (2018), cada átomo e ligação dentro da matriz cristalina desempenha um papel crucial na capacidade do aço de resistir a forças externas, tornando-o um elemento essencial em uma ampla gama de aplicações industriais e de engenharia.

Entretanto, não é apenas a força bruta que define o aço mas sua capacidade de resistir à deformação permanente por impacto ou abrasão que o torna um material inestimável em inúmeros contextos industriais. Como discutido por Callister e Rethwisch (2018), essa capacidade de resistência à deformação permanente é uma característica fundamental do aço, o que o torna altamente valorizado em uma variedade de aplicações industriais. Conforme analisado por Dieter (1986), tratamentos térmicos específicos como têmpera e revenimento podem drasticamente elevar sua dureza, reconfigurando sua estrutura molecular. Esta propriedade desempenha um papel vital em setores onde o desgaste e a abrasão são inevitáveis, como na produção de ferramentas e componentes mecânicos essenciais.

A tenacidade do aço é outro aspecto digno de nota, conferindo-lhe a capacidade de absorver quantidades consideráveis de energia sem fraturar, tornando-o um elemento indispensável em aplicações sujeitas a impactos súbitos e violentos, conforme observado meticulosamente por Van Vlack (1986). Essa característica é particularmente crucial em setores como a construção naval, onde a resistência a impactos é uma garantia para a segurança e a longevidade das estruturas em alto-mar.

A maleabilidade e a ductilidade excepcionais do aço permitem que ele seja facilmente moldado e trabalhado em uma variedade de formas sem sacrificar suas propriedades mecânicas, como enfatizado por Gibson e Ashby (1997). Essa capacidade de deformação plástica é uma vantagem substancial, tornando o aço a escolha preeminente para uma gama diversificada de aplicações, desde objetos do cotidiano até as construções mais complexas.

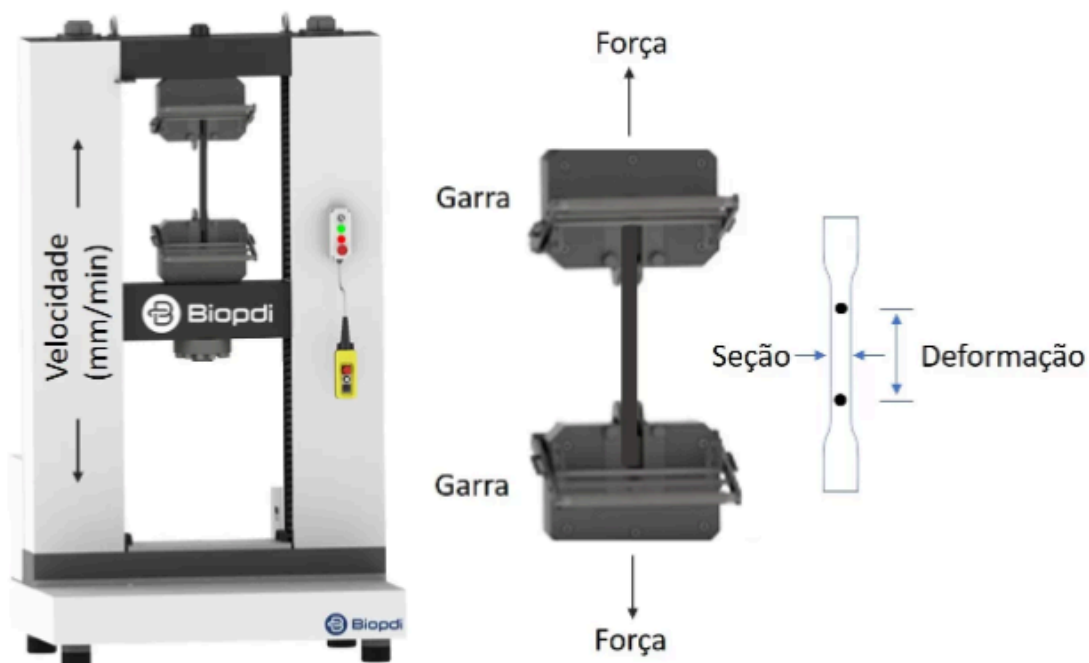
Além disso, é importante destacar que muitas formulações de ligas de aço são cuidadosamente projetadas para resistir à corrosão, tornando-as ideais para ambientes adversos, conforme enfatizado por Fontana (1986). A incorporação estratégica de elementos de liga, como cromo, níquel e molibdênio pode significar prolongar a vida útil do aço em ambientes corrosivos, sendo particularmente essencial em setores como os marítimos, químicos e de petróleo e gás.

2.2 A CAPACIDADE ESTRUTURAL: O TESTE DE RESISTÊNCIA DO AÇO

O teste de resistência do aço em estruturas metálicas desempenha um papel crucial na garantia da segurança e confiabilidade dessas estruturas em uma variedade de aplicações. Como enfatizado por Smith (2015), este procedimento é fundamental para avaliar como o aço responde a diferentes tipos de cargas e condições, fornecendo dados essenciais para projetos de engenharia e padrões de segurança. Jones (2018), destaca a necessidade de compreender as propriedades mecânicas do aço sob diversas circunstâncias de carregamento. Isso não só permite o projeto adequado das estruturas, mas também ajuda a prever seu comportamento sob condições adversas.

Um dos métodos mais comuns para avaliar a resistência do aço é o teste de tração. Nele, uma amostra de aço é gradualmente submetida a uma força de tração crescente até a ruptura. Conforme destacado por Callister e Rethwisch (2018), durante o teste, são registrados dados como carga aplicada e deformação resultante, permitindo a construção de um diagrama tensão-deformação. Esses dados são essenciais para determinar propriedades importantes, como limite de elasticidade, limite de resistência e alongamento percentual, como demonstrado na Figura 1 abaixo:

Figura 1 – Representação de um ensaio de tração.



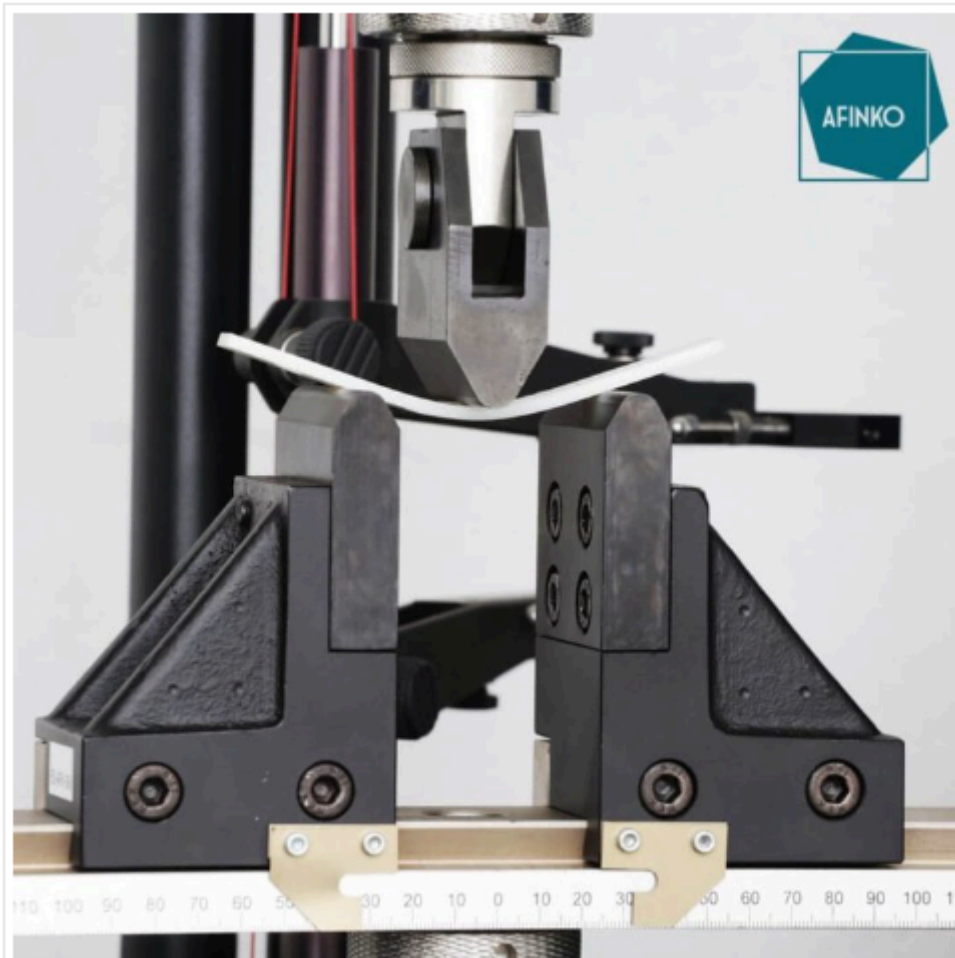
Fonte: Biopdi.

Esse tipo de ensaio fornece informações valiosas sobre o comportamento do aço sob carga e é amplamente utilizado na indústria para garantir que os materiais atendam aos requisitos de segurança e desempenho. De acordo com Smith (2018), os testes de tração são essenciais para compreender como o aço se comporta em diferentes condições de carga. A partir dos resultados obtidos nos testes de tração, os engenheiros podem tomar decisões informadas sobre o uso do aço em diferentes aplicações, garantindo a integridade estrutural e a segurança das construções. Essa

abordagem é crucial para garantir que as estruturas atendam aos padrões de segurança e desempenho estabelecidos pelas normas industriais, conforme destacado por Johnson et al. (2020).

De acordo com Dieter(1986), o teste de flexão é um procedimento crucial para determinar como o aço responde a cargas aplicadas em um ponto específico da estrutura. Durante o teste, uma amostra de aço é submetida a uma carga que a força a se curvar, imitando as condições de carga que a estrutura enfrentará em seu ambiente de operação. Esse processo é especialmente relevante para vigas e lajes, onde a capacidade de suportar cargas distribuídas uniformemente ao longo de sua extensão é essencial para o desempenho estrutural, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Representação de um ensaio de flexão.

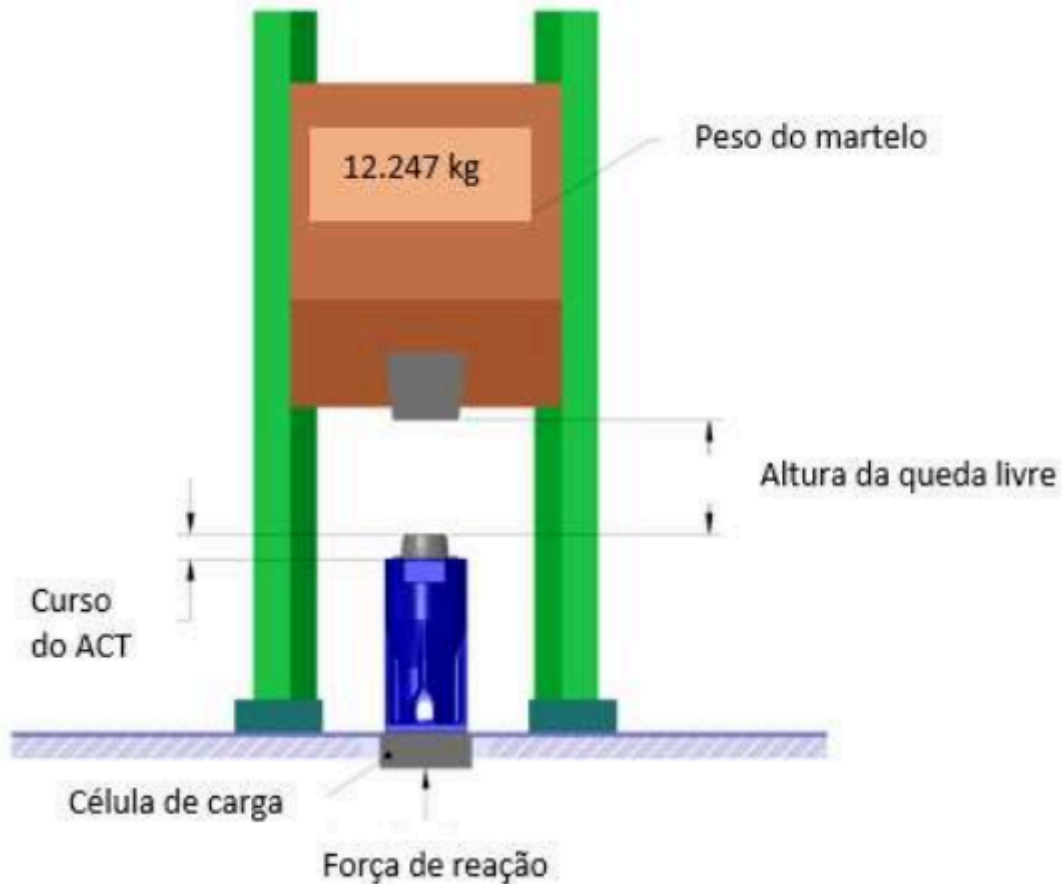


Fonte: AFINKO Polímeros.

Através do teste de flexão, os engenheiros podem avaliar a capacidade de carga das estruturas metálicas em pontos críticos, garantindo que atendam aos requisitos de segurança e desempenho estabelecidos pelos padrões da indústria. Segundo Jones et al. (2019), os resultados obtidos nesse teste fornecem informações valiosas para o projeto e a construção de estruturas metálicas, contribuindo para a integridade estrutural e a segurança das edificações. Essa prática é fundamental para assegurar que as estruturas metálicas possuam a resistência necessária para suportar as cargas aplicadas, conforme exigido pelas normas de engenharia, como mencionado por Smith (2018).

O teste de impacto é um procedimento crucial para avaliar a resiliência do aço em estruturas metálicas, especialmente diante de cargas repentinas e de curta duração, como aquelas causadas por colisões ou choques. Essa metodologia, como discutido por Van Vlack (1986), desempenha um papel vital na determinação da capacidade do aço de absorver energia durante situações de impacto, garantindo a segurança e a integridade estrutural em condições dinâmicas, como demonstrado na Figura 3 abaixo.

Figura 3 – Representação de um ensaio de impacto.



Fonte: ResearchGate.

O teste de impacto fornece informações valiosas sobre a capacidade do aço de absorver energia e resistir a cargas dinâmicas, por isso auxilia os engenheiros na concepção de estruturas mais seguras e resilientes. Conforme ressaltado por Smith (2018), esse tipo de teste é fundamental para avaliar como o aço se comporta sob condições de impacto. Ao compreender o comportamento do aço nessas situações, é possível implementar medidas de segurança adequadas e garantir a integridade das estruturas em situações de colisão ou choque. Essa compreensão é essencial para o design e a construção de estruturas capazes de suportar eventos imprevistos, conforme mencionado por Johnson et al., (2020).

2.3 COMPLEXIDADE DA FADIGA EM ESTRUTURAS: PERSPECTIVAS TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS NA ENGENHARIA

A complexidade dos métodos de análise, como destacado por Teixeira (2004), propõe três métodos para análise e previsão de fadiga: a abordagem pela tensão,

pela deformação e pela mecânica da fratura. A abordagem pela tensão é aplicada quando a deformação permanece no regime elástico, resultando em longos períodos de vida à fadiga. A análise é feita considerando o número de ciclos que um corpo de prova resiste ao carregamento cíclico de uma determinada tensão, gerando a curva tensão versus número de ciclos (curva S-N). A abordagem pela deformação, por sua vez, é utilizada em situações com deformação plástica considerável e períodos curtos, utilizando a curva tensão-deformação para traçar a curva de deformação versus vida útil à fadiga. O método da mecânica da fratura diferencia-se ao levar em conta a presença de trincas, permitindo calcular os ciclos até a ruptura de um elemento estrutural com trincas pré-existentes.

No contexto da engenharia estrutural, a ruptura por fadiga é um fenômeno de grande relevância e complexidade, pois exige uma abordagem metódica e multidisciplinar para sua compreensão e prevenção. Conforme destacado por Silva (2010), a qualidade do cordão de solda é fundamental nesse contexto, uma vez que defeitos oriundos do processo de soldagem podem comprometer a vida à fadiga das juntas, agindo como pontos de concentração de tensão. Mesmo quando a resistência mecânica é adequada e os defeitos são mínimos, descontinuidades geométricas podem desencadear falhas na estrutura devido à concentração de tensões.

Um dos principais desafios enfrentados na análise da fadiga reside na modelagem precisa do comportamento dos materiais sob condições de carregamento variável, como ressaltado por Johnson (2016). A complexidade das interações entre a microestrutura do material, a tensão aplicada e o número de ciclos demanda o desenvolvimento de modelos avançados para prever o desempenho em fadiga com precisão.

Nesse contexto, a validação experimental desempenha um papel crucial na garantia da confiabilidade dos modelos de fadiga, conforme evidenciado por Gomes et al. (2019). Os ensaios em laboratório proporcionam dados empíricos sobre o comportamento dos materiais sob diferentes condições de carregamento, permitindo a calibração e verificação dos modelos teóricos desenvolvidos. Paralelamente, o avanço tecnológico tem possibilitado o surgimento de novas técnicas e ferramentas para a análise e prevenção da fadiga, como mencionado por Garcia et al. (2017). Métodos computacionais, como a simulação por elementos finitos, e técnicas de monitoramento de saúde estrutural têm ganhado destaque na avaliação e manutenção de componentes sujeitos à fadiga, demonstrando um papel crucial na busca por estruturas mais seguras e duradouras. Esse panorama reforça a importância de uma abordagem integrada, que combine tanto a pesquisa teórica quanto a prática experimental, na análise e mitigação dos efeitos da fadiga em estruturas.

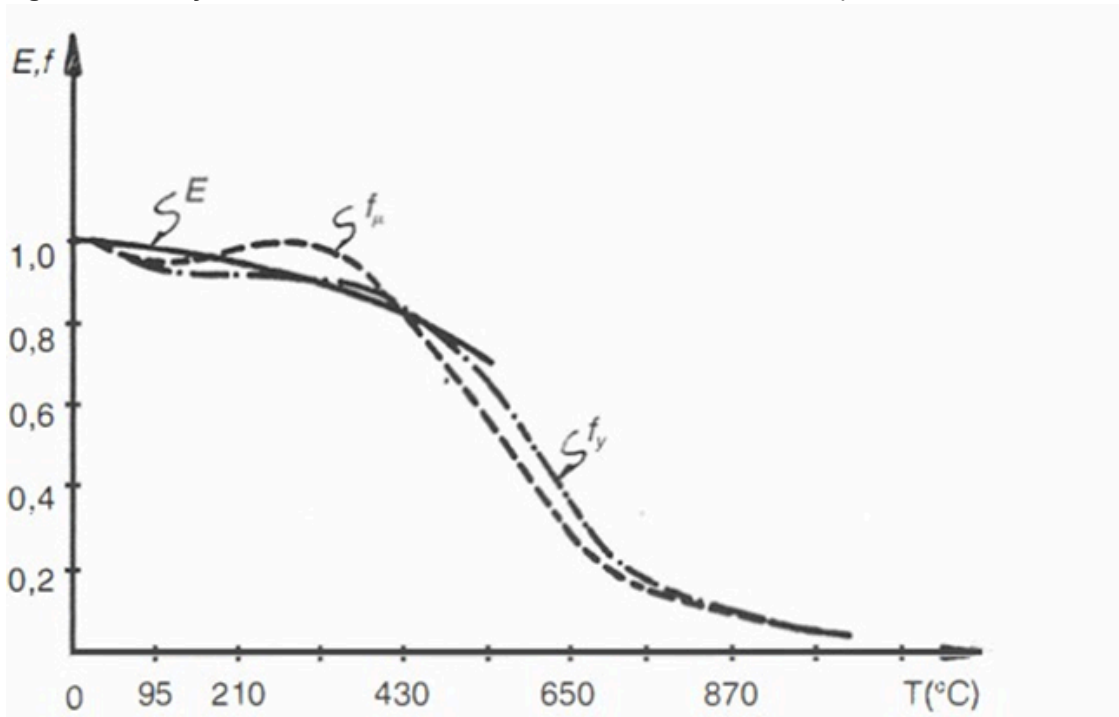
2.4 EXPLORANDO MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA EM ESTRUTURAS METÁLICAS

Os ensaios experimentais são uma abordagem direta para avaliar a resistência à fadiga de materiais e componentes. Como destacado por Smith et al. (2017), esses ensaios envolvem a aplicação de cargas cíclicas em corpos de prova para determinar sua vida útil sob condições de fadiga específicas. Os métodos de avaliação por meio de ensaios oferecem diversas vantagens na análise da durabilidade dos materiais. Um dos principais benefícios reside na capacidade de identificar falhas incipientes, que podem passar despercebidas em outros tipos de

ensaios. Ao submeter o material a carregamentos cíclicos, torna-se possível observar o aparecimento de trincas e fissuras, indicando o início de um processo de falha. Além disso, esses ensaios permitem determinar quantos ciclos de carga o material é capaz de suportar antes de falhar, sendo essencial para a avaliação da durabilidade de um componente ou estrutura. Os resultados obtidos nos ensaios possibilitam otimizar o projeto e assegurar uma vida útil satisfatória para o material.

Conforme destacado por Walter Pfeil (2009), a resistência à ruptura dos materiais é comumente medida em ensaios estáticos, como se pode observar na Figura 4. Contudo, quando as peças metálicas estão sujeitas a esforços repetidos em grande número, a ruptura pode ocorrer em tensões inferiores às obtidas em ensaios estáticos, fenômeno conhecido como fadiga do material. A resistência à fadiga assume papel determinante no dimensionamento de peças sujeitas a efeitos dinâmicos significativos, como é o caso de peças de máquinas e pontes. Ressalta-se que a resistência à fadiga das peças é substancialmente reduzida nos pontos de concentração de tensões, que podem ser causados por variações abruptas na forma da seção, indentações devidas à corrosão, entre outros fatores, diante disso foi demonstrado na figura 4 abaixo.

Figura 4 - Variação de módulo de elasticidade e resistência com a temperatura.



Fonte: Pfeil, Walter, 2009.

As uniões por solda induzem alterações na estrutura cristalina do aço adjacente à solda, gerando concentrações de tensões que resultam na redução da resistência à fadiga nesses pontos específicos. De acordo com Jones et al. (2018), a manifestação da fadiga se caracteriza pelo surgimento de fraturas que se propagam com a repetição dos carregamentos. Em geral, essas fraturas têm início nos locais previamente mencionados de concentração de tensões. Esse fenômeno é amplamente documentado na literatura especializada, conforme destacado por Smith (2019), e ressalta a importância de técnicas de soldagem precisas e cuidadosamente controladas para minimizar os efeitos adversos na integridade estrutural das peças soldadas.

Normas tanto americanas quanto brasileiras avaliam a resistência à fadiga considerando as flutuações de tensões elásticas geradas pelas cargas variáveis. Segundo Johnson (2017), a maioria dos testes de fadiga baseados em estresse utiliza carga completamente reversa. Entretanto, há situações em que cargas completamente reversas podem não ser aplicadas, seja devido a limitações práticas ou porque, em condições normais de serviço, um componente é submetido a forças em uma única direção. Por exemplo, testes de fadiga que envolvem apenas compressão em implantes de quadril ou tensão uniaxial em aços laminados (materiais finos que se deformam em compressão) representam casos nos quais cargas reversas completas podem não ser pertinentes. Essa perspectiva é mostrada por Smith et al., (2019), que ressalta a importância de considerar as condições específicas de carregamento ao avaliar a resistência à fadiga de materiais em diferentes aplicações industriais.

É amplamente reconhecido que materiais metálicos sujeitos a variações de tensão apresentam maior propensão a falhas em comparação à fase quando estão sob tensões constantes. Conforme destacado por Johnson (2019), essas falhas geralmente ocorrem de maneira abrupta e resultam em fraturas aparentemente frágeis, com pouca deformação visível. O processo de fadiga em metais é complexo e comumente dividido em quatro estágios distintos. Esta observação é apoiada por Smith et al., (2020, p.890-894), que também ressalta a importância de compreender os efeitos das variações de tensão na integridade estrutural dos materiais metálicos.

Estágio 1: Início da Formação da Trinca: Esse estágio se inicia quando uma microfissura surge em locais de alta concentração de tensão. Esses pontos de alta concentração frequentemente estão localizados em entalhes, arestas afiadas ou cantos. Em alguns casos, o recozimento é empregado para reparar danos causados neste estágio.

Estágio 2: Crescimento Inicial da Trinca: Neste estágio, a rachadura inicial aprofunda-se em planos de alta tensão de cisalhamento, tornando-se mais definida.

Estágio 3: Crescimento Avançado da Trinca: A rachadura definida cresce na direção normal à tensão máxima de tração.

Estágio 4: Falha Dúctil: Quando a trinca atinge um comprimento crítico, a seção transversal restante não consegue mais sustentar as forças aplicadas, resultando em falha completa.

Para prevenir a falha por fadiga, é crucial identificar estratégias preventivas, porque isso envolve analisar dois aspectos fundamentais na engenharia: a Falha Mecânica, onde as tensões e/ou o tipo de carregamento são os responsáveis pela falha, e a Falha Metalúrgica, originada por defeitos metalúrgicos. Como destacado por Jones (2018), entender esses dois aspectos é crucial para implementar medidas preventivas eficazes contra a falha por fadiga. Essas medidas podem incluir a otimização do design das estruturas, o uso de materiais adequados e a aplicação de técnicas de fabricação e inspeção de alta qualidade, conforme discutido por Smith et al., (2020).

Na Falha Mecânica, é imperativo analisar as forças atuantes no equipamento, o tipo de carregamento ao qual está sujeito, a presença de forças excessivas ou cargas que excedam as condições nominais do equipamento. Conforme destacado por Johnson (2019), nesse contexto, ensaios experimentais de vibração, extensometria e análise de elementos finitos são empregados para compreender o comportamento do material sob diferentes condições. Essas técnicas oferecem insights valiosos sobre como as forças mecânicas afetam a integridade estrutural do

equipamento, auxiliando na identificação de potenciais pontos de falha e no desenvolvimento de estratégias de mitigação de riscos, como discutido por Smith et al. (2021).

Na Falha Metalúrgica, a falha decorre de defeitos metalúrgicos, muitas vezes, provenientes do processo de fabricação, descontinuidades na superfície fraturada ou defeitos pontuais em ligações cristalinas, entre outros. Conforme ressaltado por Jones (2017), identificar essa falha requer a realização de ensaios químicos, metalográficos e a caracterização das propriedades mecânicas do material. Além disso, uma análise detalhada da região fraturada é essencial para identificar a causa raiz do problema. Essa abordagem é crucial para evitar recorrências futuras de falhas metalúrgicas, como discutido por Smith et al. (2020).

2.5 NORMAS E REGULAMENTAÇÕES

A norma NBR 8800:2008 desempenha um papel fundamental na avaliação da resistência à fadiga de estruturas metálicas, estabelecendo diretrizes claras e procedimentos específicos para garantir a integridade estrutural sob condições de carregamento cíclico. Nesse contexto, a aplicação rigorosa das diretrizes estipuladas pela norma é essencial para assegurar resultados confiáveis e consistentes em ensaios de resistência à fadiga.

Conforme estipulado pela norma NBR 8800:2008, a avaliação da tensão máxima e da máxima variação de tensões demanda a aplicação de uma análise elástica. Essa análise deve incorporar excentricidades, quando presentes, assim como todos os esforços solicitantes, especialmente quando há uma atuação conjunta de forças axiais e momentos fletores. A determinação da faixa de variação das tensões é regida por equações distintas, alinhadas com as diversas categorias de detalhe.

No escopo da análise proposta, que envolve uma ligação com soldas de filete, adotou-se a categoria de detalhe "E", como explicitado no Quadro 1, adaptado da NBR 8800:2008:

Tabela 1- Tabela K.1, Parâmetros de Fadiga Fonte: Adaptado de NBR 8800:2008.

Descrição	Categoria de tensão	Constante Ct	Limite σ Mpa		Ponto de Início potencial de fissura
Seção 3 – Ligações soldadas dos componentes de barras compostas de chapas ou perfis					
Metal-base nas extremidades de segmentos longitudinais de soldas intermitentes de filete	E		11×10^3	31	No material ligado, e, locais de começo e fim de deposição de solda.

Fonte: Adaptado de NBR 8800:2008.

A utilização da categoria de detalhe adequado, estabelecida pela norma, permite uma análise precisa e completa da resistência à fadiga da estrutura em questão. Além disso, ao seguir as diretrizes da norma, é possível garantir a segurança e durabilidade da estrutura, minimizando os riscos de falha prematura e otimizando o desempenho em serviço.

Portanto, a norma NBR 8800:2008 desempenha um papel crucial na condução de ensaios de resistência à fadiga, fornecendo um arcabouço normativo sólido e confiável para a avaliação da integridade estrutural de componentes metálicos submetidos a carregamentos cíclicos. Sua aplicação rigorosa é fundamental para assegurar a qualidade e segurança das estruturas construídas.

Cálculo da faixa de tensões admissível para um determinado número de ciclos “N”, enquadrando a categoria de tensão “E”, se dá por:

Em que:

σ_{SR} – Faixa admissível de variação de tensões;

C_f – É a constante C_f , dada no Quadro 1, para a categoria E;

N – É o número de ciclos de variação de tensões durante a vida útil da estrutura;

σ_{TH} – É o limite da faixa de variação de tensões para um número infinito de ciclos.

Sendo assim, serão apresentados estudos que avaliaram a resistência à fadiga em estruturas metálicas soldadas, a fim de verificar materiais pertinentes para garantir uma maior segurança à construção. Além disso, essa definição mostra-se importante uma vez que utilizar materiais adequados implica em uma maior vida útil da estrutura, assegurando uma maior durabilidade e segurança diante do processo de fadiga.

2.6 TÉCNICAS DE MELHORIA DA RESISTÊNCIA À FADIGA

A análise de fadiga em estruturas metálicas é de extrema importância para garantir a segurança e durabilidade das construções. A fadiga é um fenômeno complexo que ocorre devido à aplicação cíclica de cargas em materiais, levando à formação e propagação de trincas que podem resultar em falhas catastróficas. Portanto, a avaliação da resistência à fadiga é essencial para identificar possíveis pontos fracos nas ligações soldadas e implementar medidas de melhoria para aumentar a vida útil das estruturas (Fonseca, 2017).

Dentre as principais técnicas de melhoria da resistência à fadiga em ligações soldadas, destacam-se o uso de tratamentos térmicos e superficiais. Os tratamentos térmicos visam melhorar as propriedades mecânicas do material, reduzir tensões residuais e aumentar a resistência à fadiga. Já os tratamentos superficiais, como o jateamento abrasivo e a pintura protetora, têm o objetivo de melhorar a resistência à corrosão e reduzir o surgimento de trincas por fadiga (Diniz, 2020).

A geometria da junta soldada exerce grande influência na resistência à fadiga das estruturas metálicas. Aspectos como o tipo de solda (como filete, chanfrada ou sobreposta) e o acabamento superficial da junta podem afetar significativamente a distribuição de tensões e a propagação de trincas por fadiga. Portanto, é fundamental considerar esses aspectos durante o projeto e execução das soldas para garantir uma maior resistência à fadiga das ligações (Ferreira; Alencar; Silva; Jesus, 2018).

A aplicação de ensaios não destrutivos é essencial para avaliar a qualidade das soldas e identificar possíveis pontos fracos que podem comprometer a resistência à fadiga das estruturas metálicas. Ensaios como ultrassom, radiografia e partículas magnéticas permitem detectar defeitos internos nas soldas, como inclusões, porosidades e trincas, que podem ser prejudiciais à resistência à fadiga (Lima, 2019).

O controle de qualidade durante o processo de soldagem é crucial para minimizar defeitos que possam prejudicar a resistência à fadiga das ligações. A correta execução dos procedimentos de soldagem, o monitoramento das variáveis do processo (como temperatura, velocidade de soldagem e proteção gasosa) e a qualificação dos operadores são medidas fundamentais para garantir a integridade das soldas e sua resistência à fadiga (Viveiros, Campos, Guirardi, 2023).

Os desafios enfrentados na avaliação da resistência à fadiga em estruturas metálicas incluem variações de carga ao longo do tempo, condições ambientais adversas (como corrosão) e dificuldades na previsão do comportamento dos materiais sob carregamentos cíclicos. Além disso, a interação entre diferentes tipos de solicitações mecânicas pode gerar situações complexas que demandam uma análise detalhada para garantir a segurança das estruturas (Viana, 2018).

As perspectivas futuras para o estudo e desenvolvimento de técnicas avançadas de melhoria da resistência à fadiga em ligações soldadas visam garantir a segurança e eficiência das estruturas metálicas. Avanços na simulação computacional, no desenvolvimento de novos materiais mais resistentes à fadiga e na implementação de tecnologias inovadoras prometem contribuir significativamente para aumentar a vida útil das estruturas metálicas submetidas a cargas cíclicas. Portanto, investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento são essenciais para acompanhar as demandas crescentes por estruturas mais seguras e duráveis (Patrício, 2018).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com a norma ASTM E1823 (2002) da American Society for Testing and Materials (ASTM), a fadiga é descrita como um processo de alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, que ocorre em um material sujeito a condições que produzem tensões e deformações cíclicas em um ou vários pontos. Esse processo pode culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de ciclos.

A investigação desse fenômeno é de grande relevância para o projeto de máquinas e estruturas, uma vez que a maioria das falhas observadas durante o serviço está relacionada à fadiga do material (Silva Junior, 1962; Colpaert, 1974; Branco, 1985; Garcia et al., 2000; Callister Jr., 2002).

Os ensaios de fadiga podem ser conduzidos com três tipos distintos de corpos de prova, conforme descrito por Souza (1982,p.16):

1. Utilização da própria peça, de um modelo ou de um protótipo como corpo de prova para determinar a vida da peça sob uma tensão específica ou após um número definido de ciclos, utilizando uma máquina apropriada;
2. Utilização de produtos acabados como barras, chapas, tubos, arames, entre outros, que podem ser diretamente colocados em máquinas de ensaio apropriadas;
3. Utilização de corpos de prova usinados para o ensaio, os quais podem ser lisos ou apresentar entalhes.

Para avaliar a resistência à fadiga de um material, são conduzidos ensaios de fadiga cíclica, nos quais o material é submetido a cargas alternadas repetidas ao longo do tempo. Esses ensaios são essenciais para determinar a vida em fadiga do material e identificar potenciais pontos de concentração de tensão que podem resultar em falhas (Silva, 2010).

Portanto, os ensaios de resistência do aço desempenham um papel crucial na

garantia da qualidade e segurança de diversas aplicações industriais. Ao compreender melhor o comportamento mecânico do material, é possível projetar estruturas mais eficientes e duráveis, contribuindo para o avanço da engenharia de materiais.

Os ensaios conduzidos pela equipe técnica da Usiminas envolveram uma análise detalhada do comportamento do aço sob carregamentos cíclicos, replicando as condições de serviço esperadas em diversas aplicações industriais. Ao utilizarem tecnologia de ponta e seguindo rigorosos protocolos de teste, os pesquisadores foram capazes de avaliar com precisão a capacidade do aço de resistir à fadiga e identificar possíveis áreas de melhoria. Diante disso, segue abaixo um resultado de ensaio de tração e de dobramento.

Tabela 2. Ensaio de ensaios de tração e de dobramento.

Lote	L.E. (MPa)	L.R. (MPa)	Al (%)	Tipo de Aço	Teste de Dobramento	Resultado
17749543	324	469	28.0	USI-CIVIL- 300	180°	BOM/GOOD
17749544	317	473	25.0	USI-CIVIL- 300	180°	BOM/GOOD

Fonte: Soluções em Aço Usiminas S.A, 2023.

Abreviaturas: L.E.= Limite de escoamento; L.R. = Limite de Resistência AL. = Alongamento

3.1 Ensaio à tração

A determinação das propriedades mecânicas dos materiais, tais como resistência e ductilidade, é fundamental na engenharia de materiais, sendo o teste de tração um dos ensaios mais importantes para essa caracterização" (CALLISTER JR., 2018).

Sendo amplamente utilizado para determinar suas propriedades mecânicas, como resistência e ductilidade. Para realizar o teste de tração é necessário seguir um passo a passo para garantir a qualidade desejada.

- Preparação da amostra:** A amostra é preparada de acordo com as normas específicas para o material em questão. As dimensões e formato da amostra devem seguir as recomendações da norma NBR NM-ISO 6892-1.
- Montagem da amostra:** A amostra é fixada nas garras da máquina de ensaio de tração de acordo com as especificações da norma NBR NM-ISO 7500-1, garantindo que não haja folgas e a amostra esteja alinhada corretamente.
- Calibração da máquina:** Antes do ensaio, a máquina de ensaio de tração é calibrada de acordo com a norma NBR NM-ISO 7500-1 para garantir medições precisas.
- Aplicação de carga:** A carga é aplicada gradualmente à amostra de acordo com a norma NBR NM-ISO 6892-1, a uma taxa de deformação constante especificada pela norma.

5. **Registro dos dados:** Durante o teste, são registrados dados como a carga aplicada e a deformação da amostra. Esses dados são registrados automaticamente pela máquina de ensaio.
6. **Determinação das propriedades mecânicas:** Com base nos dados registrados, as propriedades mecânicas da amostra, como limite de elasticidade, limite de resistência, alongamento e redução de área são calculadas de acordo com as normas NBR NM-ISO 6892-1 e NBR NM-ISO 6892-2.
7. **Análise dos resultados:** Os resultados são analisados de acordo com as normas para determinar a qualidade do material e sua adequação para aplicações específicas.

O resultado esperado do teste de tração em aço é a obtenção das curvas de tensão-deformação, que fornecem informações essenciais sobre o comportamento mecânico do material. A partir dessas curvas, é possível determinar o limite de elasticidade, o limite de resistência, o alongamento e a redução de área, os quais são propriedades mecânicas importantes para a caracterização do material e sua aplicação em projetos de engenharia.

3.2 Ensaio de dobramento

O ensaio de dobramento em aço é um procedimento utilizado para avaliar a ductilidade e a qualidade do material, especialmente em aplicações onde a capacidade de deformação sem fratura é importante. Ele será abordado desde a preparação da amostra até a avaliação dos resultados, destacando a relevância de cada etapa para a determinação das propriedades mecânicas do material. Todo embasamento será baseado nas normas técnicas brasileiras da ABNT e nos princípios descritos por Callister Jr. e Rethwisch (2014) em "Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução", que abordam a importância dos ensaios mecânicos na avaliação de materiais.

1. **Preparação da amostra:** Uma amostra do material, geralmente em forma de chapa, é preparada de acordo com as dimensões e especificações da norma NBR NM-ISO 7438.
2. **Marcação da linha de dobra:** Na amostra preparada, é marcada uma linha de dobra com a distância especificada pela norma, geralmente a partir de uma das bordas da chapa.
3. **Dobramento da amostra:** A amostra é dobrada ao longo da linha marcada utilizando um equipamento apropriado, como uma dobradeira, aplicando-se gradualmente a força necessária para o dobramento.
4. **Inspeção da amostra:** Após o dobramento, a amostra é inspecionada visualmente para verificar se houve fratura ou trincas na região da dobra.
5. **Avaliação do resultado:** O resultado do ensaio é avaliado de acordo com os critérios estabelecidos pela norma. A presença de fratura ou trincas indica falha no material, enquanto a ausência desses defeitos indica sua boa qualidade.

3.3 Resultados apresentados no laudo

Com base nos resultados alcançados no teste conduzido pelo departamento de controle de qualidade da empresa Soluções em Aço Usiminas S.A., podemos examinar as propriedades do material e sua viabilidade para uma variedade de usos.

De acordo com o certificado emitido pelo laboratório, o material testado, identificado como USI-CIVIL-300, foi submetido a uma série de testes, como ensaios de tração e flexão, conforme especificado nas normas técnicas de referência.

Tabela 3: Resultados apresentados no laudo.

Propriedade	Valor
Limite de escoamento	325 MPa
Limite de Resistência	470 MPa
Alongamento	28%

Fonte: Elaborado pelos autores.

Durante o teste de tração, o material foi avaliado quanto à sua capacidade de resistir à tração, limite de escoamento e capacidade de alongamento. Os resultados mostraram que o material atingiu valores os quais estão dentro das normas esperadas, com uma resistência à tração média de cerca de 470 MPa e um limite de escoamento de aproximadamente 325 MPa. Esses resultados estão em conformidade com as exigências técnicas do material, o que evidencia sua aptidão para ser utilizado em aplicações estruturais.

Foi conduzido um teste de dobramento para examinar a capacidade de maleabilidade e conformação do material. O resultado obtido, que demonstrou um ângulo de 180° e uma classificação de "BOM/GOOD", confirma a excelente durabilidade do aço, um aspecto fundamental para uma ampla gama de aplicações na indústria civil e estrutural.

Esses resultados estão em linha com as propriedades previstas para o aço, conforme mencionado em várias fontes, como Krauss (1990) e Meyers e Callister (2006), que exploram o impacto da composição química, tratamentos térmicos e microestrutura na resistência e maleabilidade do aço.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os desafios enfrentados na avaliação da resistência à fadiga em estruturas metálicas soldadas para a engenharia civil ressaltam a complexidade das geometrias das soldas e a dificuldade em prever seu comportamento sob condições de carregamento variável, além disso, destacam a necessidade de abordagens mais avançadas, como simulações por elementos finitos.

A conformidade com normas técnicas, como a AWS D1.1/D1.1M, é fundamental para garantir a resistência à fadiga das estruturas, assim como a qualidade das soldas é crucial para a integridade estrutural e segurança das construções, evitando falhas prematuras.

É essencial considerar que os níveis de tensão para ruptura sob carregamento cíclico são inferiores aos de ruptura sob carregamento estático. Portanto, desenvolver uma metodologia para prever a vida útil em fadiga permite uma análise de durabilidade do antes da fabricação do produto.

Em síntese, este estudo contribui para o avanço do conhecimento na engenharia civil, fornecendo um alicerce sólido para futuras pesquisas e práticas na área de resistência à fadiga em estruturas metálicas soldadas. Isso é fundamental para a construção de infraestruturas mais duráveis, seguras e resilientes, atendendo às crescentes demandas por infra estruturas de alta qualidade e longa vida útil.

Para garantir a integridade estrutural e minimizar os riscos de falha por fadiga, é crucial desenvolver metodologias proativas para prever a vida útil em fadiga e realizar ajustes no projeto, se necessário, antes da fabricação do produto. Isso permite uma abordagem preventiva e contribui para a segurança e durabilidade das construções metálicas.

Considerando o teste de resistência do aço conduzido pela Soluções em Aço Usiminas S.A., é possível concluir que os resultados obtidos são promissores em termos de qualidade e adequação para diversas aplicações na indústria civil e estrutural. A avaliação da resistência à tração e à flexão demonstrou que o material testado, identificado como USI-CIVIL-300, atende às normas técnicas de referência, evidenciando sua capacidade de resistir a esforços mecânicos e de deformação.

REFERÊNCIAS

American Welding Society. **Normas** - Disponível em: Target Normas: AWS D1.1/D1.1M: Código de Soldagem Estrutural Aço.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. E-8M; standard test methods for tension testing of metallic materials. Philadelphia, 1995.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. E-8M; standard test methods for tension testing of metallic materials. Philadelphia, 1995.

ABNT. NBR 8800: **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

AFINKO **Polímeros**. Representação de um ensaio de flexão. S.l.: s.n., [s.d.].

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM-ISO 6892-1**: Materiais metálicos - Ensaio de tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM-ISO 6892-2**: Materiais metálicos - Ensaio de tração - Parte 2: Método de ensaio à temperatura elevada. Rio de Janeiro, 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM-ISO 7500-1**: Máquinas universais de ensaio de tração e compressão - Parte 1: Ensaio de tração e/ou compressão com controle de força/deflexão. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM-ISO 7438**: Materiais metálicos - Ensaio de dobramento. Rio de Janeiro, 2001.

ASTM International. ASTM E1823-02: **Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**. ASTM International, 2002.

BRANCO, M. C. **Fadiga dos Materiais Metálicos**. Fundação Calouste Gulbenkian, 1985.

CALLISTER Jr., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. John Wiley & Sons, 2018.

Colpaert, H. J. **Fatigue of Materials**. Pergamon Press, 1974.

CORREIA, T. P. **Avaliação da influência de tensões normais no banzo para a resistência de ligações soldadas entre perfis RHS e SHS**. 2019. Disponível em: <https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/11512>..

Rosa, Edison da. **Mecânica da fratura aplicada à integridade estrutural**. Rio de Janeiro: LTC.Técnica, 2002.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. McGraw-Hill, 1986.

DINIZ, LDA CDECEE. **Comparativo de custos entre estruturas de aço e concreto armado em Teófilo Otoni**. Faculdade Presidente Antônio Carlos de Teófilo Otoni Engenharia Civil, 2020. Disponível em: https://repositorio.alfaunipac.com.br/publicacoes/2020/358_comparativo_de_custos_entre_estruturas_de_aco_e_concreto_armado_em_teo.pdf.

FAQUI, D. P. **Análise teórica e experimental de ligações soldadas em estruturas de aço submetidas a ensaios de tração**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.unisc.br/jspui/handle/11624/2513>..

FERREIRA, Gonçalo et al. **Avaliação à fadiga de um viaduto ferroviário misto (aço-betão) sob tráfego de alta velocidade pelo método das tensões hot-spot**. In: XI Congresso de Construção metálica e Mista, 2017.

FERREIRA, G., ALENCAR, G., SILVA, J. G. S. da, JESUS, A. de. **Avaliação à fadiga de um viaduto ferroviário misto (aço-betão) sob tráfego de alta velocidade pelo método das tensões hot-spot**. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Guilherme-Alencar/publication/324163603_Avaliacao_a_fadiga_de_um_viaduto_ferrovuario_misto_aco-betao_sob_trafego_de_alta_velocidade_pelo_metodo_das_tensoes_hot-spot/links/5ac26938a6fdccda65f7ae7/Avaliacao-a-fadiga-de-um-viaduto-ferrovuario-misto-aco-betao-sob-trafego-de-alta-velocidade-pelo-metodo-das-tensoes-hot-spot.pdf..

FONSECA, M.C. **Verificação à fadiga de suportes de apoio soldados de um transportador de correia de alto forno**. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/8716>.

FONTANA, M. G. **Corrosion Engineering**. McGraw-Hill, 1986.

GARCIA, M. et al. Multiaxial Fatigue Failure Criteria: A Review. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 45, n. 3., 2020.

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. Cellular Solids: **Structure and Properties**. Cambridge University Press, 1997.

GARCIA, Amauri; SPIM, J. A.; SANTOS, **Fadiga de Materiais**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000.

Gibson, L., & Ashby, M. F. **Cellular solids: structure and properties**. Cambridge university press, 1997.

GOMES, Daniel Januário Cordeiro. Validação Experimental em Ensaios de Fadiga: Práticas Recomendadas. *Revista de Engenharia Mecânica*, v. 12, n. 3, 2019..

JOHNSON, R. P. A review of models for predicting the fatigue life of welded joints. **International Journal of Fatigue**, 2016.

JOHNSON, R. P. Recent advances in understanding the fatigue behavior of welded joints. **Engineering Failure Analysis**, 2017.

JOHNSON, R. P. Fatigue failure analysis of welded structures: concepts, criteria, and evaluation techniques. **International Journal of Fatigue**, 2018.

JOHNSON, R. P. **A review on fatigue design criteria for welded structures**. *Engineering Failure Analysis*, 104, 1044-1060, 2019.

Jones, D. A. **Principles and Prevention of Corrosion (2nd ed.)**. Pearson Education, 2017.

Jones, D. A., et al. **Principles and Prevention of Corrosion (3rd ed.)**. Pearson Education, 2018.

Krauss, G. **Steels: Processing, Structure, and Performance**. ASM International, 1990.

LIMA, J.L.R. **Estudo comparativo entre estrutura metálica e de concreto armado em uma edificação: estudo de caso**. 2019 Disponível em: <https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/prefix/13187>.

MEYERS, M. A. CALLISTER Jr., W. D. **Mechanical Behavior of Materials**. Cambridge University Press, 2006.

NUSSBAUMER, A.; BORGES, R.; DAVAINÉ, L. **Fadiga em Estruturas Metálicas: Mecanismos de Nucleação e Propagação de Trincas**. São Paulo: Editora Técnica.

PATRÍCIO, H. Pontes ferroviárias metálicas existentes-Characterização dos materiais e avaliação da fadiga. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**, 2018. Disponível em: http://rpee.Inec.pt/Ficheiros/rpee_seriiII_n06/rpee_slII_n06_pg113_124.pdf.

PFEIL, Michele Pfeil; Walter Pfeil. **Estruturas de Aço - Dimensionamento Prático**. Disponível em: file:///C:/Users/User/Downloads/Estruturas%20de%20a%C3%A7o_%20dimensionam

ento%20pr%C3%A1tico%20de%20acordo%20com%20a%20NBR%208800_2008.pdf..

SILVA, Edgard Suzano da. **Propagação de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas**: Circunferências de Aços para Risers Rígido da Classe API 5L Grau X80. 2010. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso Superior de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <link>..

SILVA, R. Marcos Saalfeld da; SOUZA, Daniel; LIMA, Elias Hoffmann de; BIANCHI, Kleber Eduardo. Nominal Stress Analysis for Fatigue Assessment. International.

Silva Junior, A. C. **Fadiga dos materiais**. Editora Blucher, 1962.

SMITH, J. et al. **Metodologia da Fadiga: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Editora Técnica, 2018.

Smith, J., et al. **Advanced Materials for Structural Engineering: Innovations and Challenges**. Wiley, 2020.

Smith, J. **Welding Technology: Principles and Practices**. McGraw-Hill Education, 2019.

SOUZA, Sérgio A. de. Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos. 5.ed. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1982.

TEIXEIRA, Ricardo Santos. **Metodologia de Análise de Fadiga em Componentes Estruturais de Aço Baseada na Mecânica da Fratura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <link>.

VAN VLACK, L. H. **Elements of Materials Science and Engineering**. Addison-Wesley, 1986.

VALLE, A. M.; OLIVEIRA, A. C. C. R.; CARAZZAI, É. R. **Análise de fadiga em ligações soldadas: ênfase na modelagem numérica**. 2017. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8042>.

VIANA, C. H. **Estudo do Efeito da Fadiga e Recomendações para o Projeto de Pontes Rodoviárias em Estrutura Metálica**. 2018 Disponível em: <http://www.abpe.org.br/trabalhos2018/279.pdf>.

VIVEIROS, JFC de; CAMPOS, GC de; GUIRARDI, DM. **Contribuições às inspeções de Obras de Arte Especiais em estruturas metálicas**. 2023. Disponível em: http://abpe.org.br/trabalhos2023/trabalhos/ID_084.pdf.