

VIDA À FADIGA DE JUNTA SOLDADA TIPO “T”: ENSAIOS PRELIMINARES

Maria Eduarda Santos Diniz, aluna de Engenharia Mecânica, UIT, marieduardiniz@hotmail.com
Jonas Milagre de Almeida, aluno de Engenharia Mecânica, UIT, jonasmilagredealmeida@gmail.com
Thiago Monteiro dos Reis, ex-aluno de Engenharia Mecânica, UIT, thiago21mont@outlook.com
Leandro Cassuli, aluno de Engenharia Mecânica, UIT, cassullileandro@gmail.com
Ewerton A. de Sousa Nogueira, professor de Engenharia Mecânica, UIT, ewerton@uit.br
José Felipe Dias, professor de Engenharia Mecânica, UIT, jfelipe@uit.br

Resumo: A junta soldada tipo “T” é utilizada na fabricação de peças que formam ângulos retos entre si e em perfis “I”, “H” e “T”. A previsão de vida à fadiga pode ser realizada utilizando as equações dos principais códigos de projeto à fadiga, as quais mostram que a resistência à fadiga de junta soldada tipo “T” é baixa (15 a 45%) quando comparadas com a resistência à fadiga de um aço estrutural como o ASTM A 36; evidenciando o potencial para melhorar a resistência à fadiga das juntas soldadas por meio de processos de usinagem, tratamentos térmicos ou mecânicos. O trabalho em questão apresenta o estudo do comportamento à fadiga de junta soldada tipo “T” em três tipos de corpos de prova, fabricados em aço estrutural NBR7007 Grau MR250, para em uma próxima etapa avaliar a influência da melhoria na resistência à fadiga por tratamento mecânico. Foram fabricados doze corpos de prova utilizando o processo de soldagem MAG, ensaiados à fadiga por flexão alternada utilizando quatro níveis de variação de tensão. Os resultados foram coletados e comparados com as previsões de normas nacionais e internacionais. As vidas à fadiga dos três tipos de corpo de prova foram superiores aos valores previstos pelas normas selecionadas, mostrando que a utilização das mesmas é adequado e seguro em projetos que contenham juntas soldadas sujeitas à fadiga. Para a continuidade da pesquisa, selecionou-se o corpo de prova que apresentou menor dispersão de resultados, na expectativa que o efeito do tratamento mecânico seja mais proeminente.

Palavras-chave: Fadiga. Aço. Juntas soldadas. Junta “T”. Previsão de vida à fadiga.

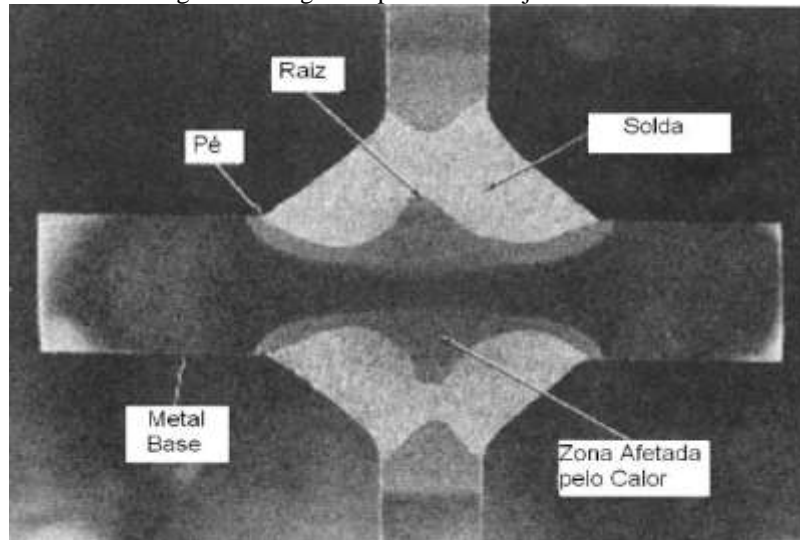
1 Introdução

O processo de soldagem está presente em praticamente todos os seguimentos industriais, de construções, dos transportes e aeroespacial. Pois, a soldagem é um dos processos de união que alia flexibilidade e baixo custo (GOES, 2010) quando comparado com outros processos. No entanto, devido ao processo de soldagem, as juntas metálicas apresentam regiões críticas, devido às variações de rigidez, aos concentradores de tensões e gradientes de temperatura. Portanto, o processo de soldagem pode produzir distorções, tensões residuais, variações microestruturais e de propriedades mecânicas e consequentemente redução da resistência à fadiga (MOURA; FERNANDES; CASTRO, 1999). Todos os efeitos citados estão presentes na zona afetada pelo calor (ZAC) apresentada na Figura 1, assim como as regiões típicas de uma junta soldada.

Segundo Maddox (2000) a fadiga é a principal causa de falha, principalmente em estruturas soldadas, refletindo a baixa resistência à fadiga de juntas soldadas quando comparadas com o metal base com ou sem o efeito de concentradores de tensão, como mostra a Figura 2. Portanto, máquinas, equipamentos e estruturas que operam sob carregamentos variáveis devem incluir a verificação à fadiga das juntas soldadas, como previsto por normas nacionais (AISC, 2005;

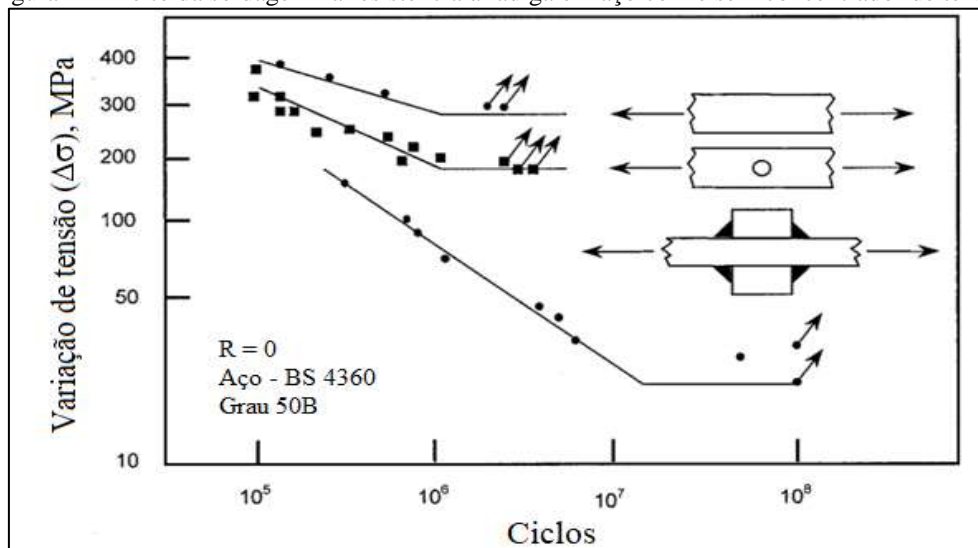
ABNT NBR 8800, 2008) e internacionais como o *International Institute of Welding* (IIW, 2008) e a *Det Norske Veritas* (DNV, 2011). Para uma visão geral destas normas, metodologias, aplicações, restrições e limitações, sugerem-se consultar as referências (MOURA; FERNANDES; CASTRO, 1999; CASTRO; MEGGIOLARO, 2009; TREMARIN; PRAVIA, 2017).

Figura 1 – Regiões típicas de uma junta soldada



Fonte: Adaptado de Fuchs; Stephens (1980) *apud* Goes (2010)

Figura 2 – Efeito da soldagem na resistência à fadiga em aço com e sem concentrador de tensão



Fonte: MADDOX (2000)

Para a previsão à fadiga de juntas soldadas, o IIW (2008) e a DNV-RP-C203 (2011) utilizam a Equação (1), a ABNT NBR 8800 (2008) utiliza a Equação (2) e o AISC (2005) a Equação (3):

$$N = \frac{c}{\Delta\sigma^m}; \Delta\sigma \geq \Delta\sigma_L \quad (1)$$

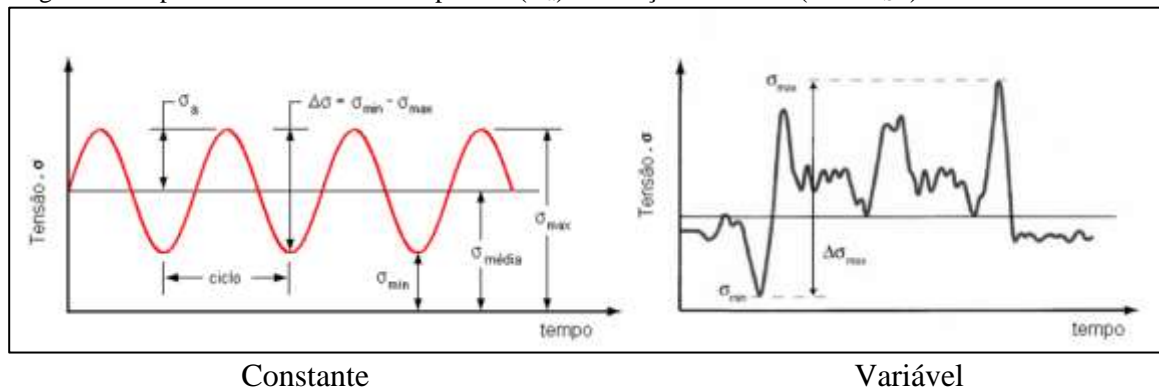
$$N = \frac{327 C_f}{\sigma_{SR}^m}; \sigma_{SR} \geq \sigma_{TH} \quad (2)$$

$$N = \frac{329 C_f}{F_{SR}^m}; F_{SR} \geq F_{TH} \quad (3)$$

Onde:

- N: número de ciclos de variação de tensões durante a vida útil da estrutura, vida à fadiga;
- $\Delta\sigma$; σ_{SR} ; F_{SR} : gama de tensões; faixa admissível de variação de tensão, explicitado na Figura 3;
- C; C_f : constante específica para cada detalhe construtivo, classe ou categoria;
- m: expoente ou inclinação, sendo:
 - m = 3 para AISC (2005) e NBR 8800 (2008);
 - m = 3 para IIW(2008) e DNV (2011) para $N \leq 1 \times 10^7$ ciclos;
- $\Delta\sigma_L$; σ_{TH} ; F_{TH} : limite de fadiga; limite admissível de variação de tensões, para um número infinito de ciclos de solitação.

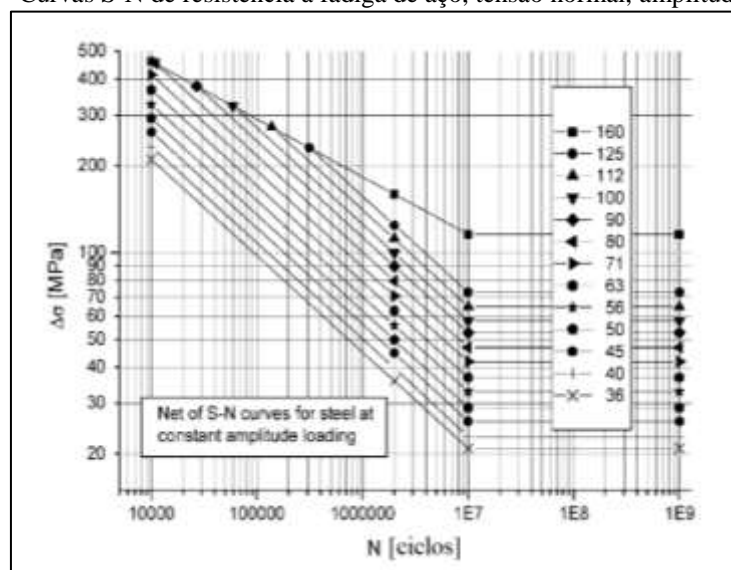
Figura 3 – Espectro de tensões com amplitude (σ_a) e variação de tensão ($\Delta\sigma = \sigma_{SR}$) constantes e variáveis



Fonte: Elaboradas pelos autores

As curvas S-N fornecidas pelas normas, em geral são separadas em classe de igual resistência à fadiga, tipo de junta soldada e qualidade da solda. As curvas S-N do IIW (2008) e DNV (2011) representam uma probabilidade de sobrevivência de pelo menos 95% ou 5% de probabilidade de falha. Apresentam-se na Figura 4 curvas S-N normalizadas pelo IIW (2008).

Figura 4 – Curvas S-N de resistência à fadiga de aço, tensão normal, amplitude constante



Fonte: IIW (2008, p.43)

Embora não seja objetivo deste trabalho aprofundar nos critérios das normas citadas, é importante destacar que as curvas S-N padronizadas das juntas soldadas, independem da resistência do material de base, do tipo de eletrodo e da tensão média nominal, desde que as juntas soldadas estejam aprovadas por critérios de qualidade (CASTRO; MEGGIOLARO, 2009).

Analisando a Figura 4 e utilizando os parâmetros da Equação (1) fornecidos pelo IIW (2008), conclui-se que o limite de fadiga das juntas soldadas em relação ao limite de fadiga de um aço estrutural (165 MPa) fica entre:

- Classe 125, limite de fadiga = 73 MPa, 44% do limite de fadiga do aço estrutural;
- Classe 36, limite de fadiga = 21 MPa, 13% do limite de fadiga do aço estrutural.

Os resultados confirmam a baixa resistência à fadiga de juntas soldadas como já ressaltado na Figura 1. Evidenciando o potencial para melhorar a resistência à fadiga das juntas soldadas por meio de processos de usinagem, tratamentos térmicos ou mecânicos (MOURA; FERNANDES; CASTRO, 1999, CASTRO; MEGGIOLARO, 2009).

Este trabalho é uma continuidade da pesquisa sobre melhoria da resistência à fadiga de juntas soldadas, iniciada em 2017 (LELIS JUNIOR, 2017). A melhoria da resistência à fadiga em juntas de topo por esmerilhamento foi confirmada experimentalmente (LELIS JUNIOR, 2017; FONSECA *et al.*, 2018). O trabalho em questão inicia o estudo da melhoria na resistência à fadiga por tratamento mecânico em junta soldada tipo “T”. Optou-se pela junta soldada tipo “T” porque é utilizada na fabricação de peças que formam ângulos retos entre si e em perfis “I”, “H” e “T”. Também é utilizada em enrijecedores transversais e longitudinais de vigas em perfil “I” e caixão. No Quadro 1 são apresentados exemplos de detalhes construtivos extraídos da norma AISC (2005) relativos à junta “T” e o correspondente limite de fadiga.

Infelizmente a verificação à fadiga de elementos estruturais e especificamente elementos contendo juntas soldadas, não são abordadas na maioria dos cursos de graduação em Engenharia Mecânica ou Civil, apesar da existência de normas nacionais e internacionais. Portanto, os objetivos deste trabalho são:

- a) estudo do comportamento à fadiga de junta soldada tipo “T” em três tipos de corpos de prova, fabricados em aço estrutural NBR7007 Grau MR250, para em uma próxima etapa avaliar a influência da melhoria na resistência à fadiga por tratamento mecânico;
- b) utilizar e comparar equações de previsão de vida à fadiga de juntas soldadas tipo “T” disponíveis em normas nacionais (ABNT NBR 8800, 2008; AISC, 2005) e internacionais (IIW, 2008 e DNV, 2011);
- c) proporcionar um material inicial de consulta para estudantes e profissionais da área de projeto.

Quadro 1 – Detalhes construtivos e limites de fadiga normalizados pelo AISC, aplicáveis a junta “T”

Nº	Detalhe construtivo	Categoria de tensão	Limite de fadiga F_{TH} (MPa)
3.1		B	110
5.7		C	69
6.4		$R > 50 \text{ mm: D}$	48
		$R \leq 50 \text{ mm: E}$	31
8.2		F	55

Fonte: AISC (2005, p. 165-177)

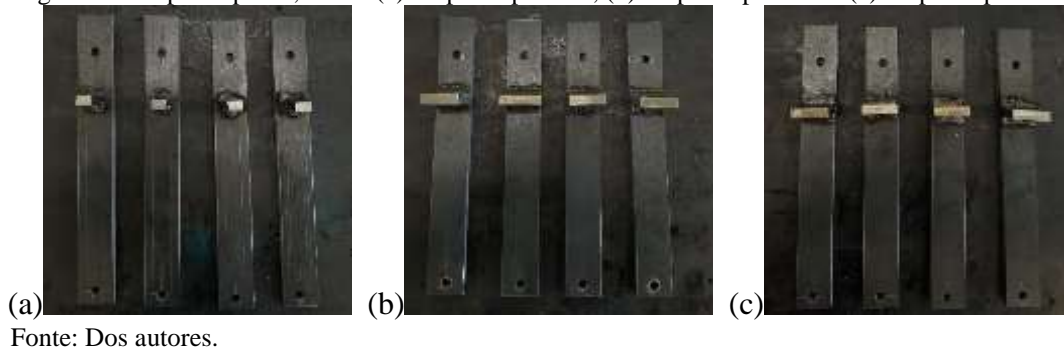
2 Metodologia

2.1 Corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga

Os corpos de prova, foram extraídos de chapas de aço estrutural NBR 7007 Grau MR250 com espessura de 9,53 mm e largura de 63,5 mm, utilizando serra de fita e soldados por meio do processo MAG, no qual foi utilizado como metal de adição, o arame ER70S6 de 1,2 mm de diâmetro.

Para selecionar o corpo de prova mais adequado para avaliar a influência da melhoria na resistência à fadiga por tratamento mecânico na próxima etapa da pesquisa, foram fabricados três tipos de corpos de prova, sendo quatro unidades de cada conforme mostra a Figura 5, com as características possíveis de serem associadas com os detalhes construtivos e as equações de previsão de vida à fadiga das normas utilizadas, conforme detalhado no Quadro 2.

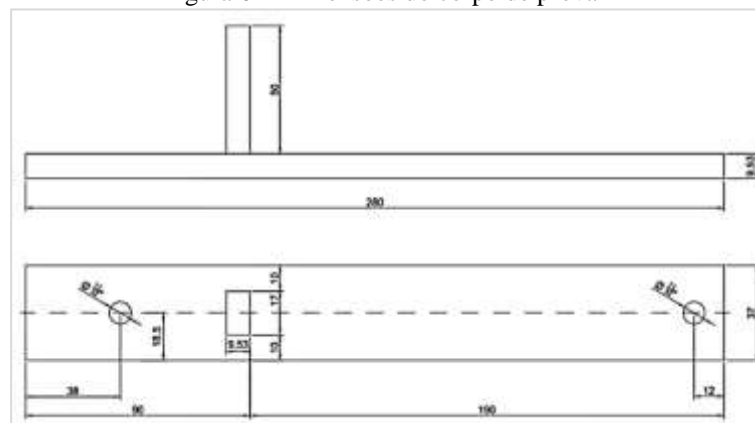
Figura 5 - Corpo de prova, sendo (a) corpo de prova 1, (b) corpo de prova 2 e (c) corpo de prova 3



Detalhes construtivos, características e especificações dos corpos de prova:

- a) O primeiro corpo de prova, Figura 6, tem como característica ter o elemento perpendicular, soldado com um afastamento de 10 mm em relação à borda lateral, assim a solda não produz a ZAC e possíveis mordeduras nas laterais da chapa, dificultando a nucleação de trinca por fadiga.

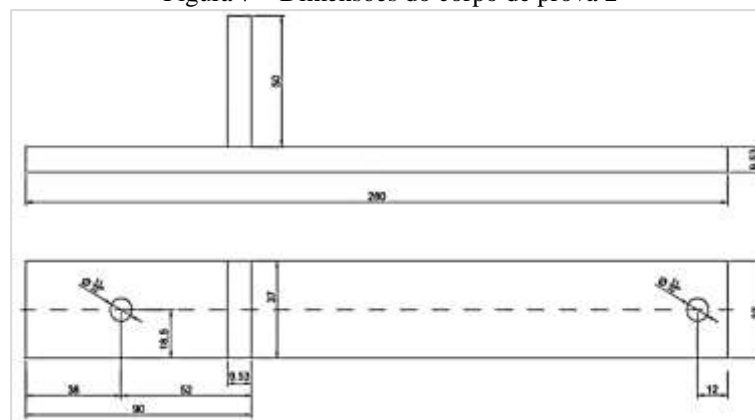
Figura 6 – Dimensões do corpo de prova 1



Fonte: Elaborado pelos autores

- b) O segundo corpo de prova, Figura 7, primeiramente foi soldado e depois cortado nas dimensões definidas, deste modo, as possíveis mordeduras laterais foram eliminadas.

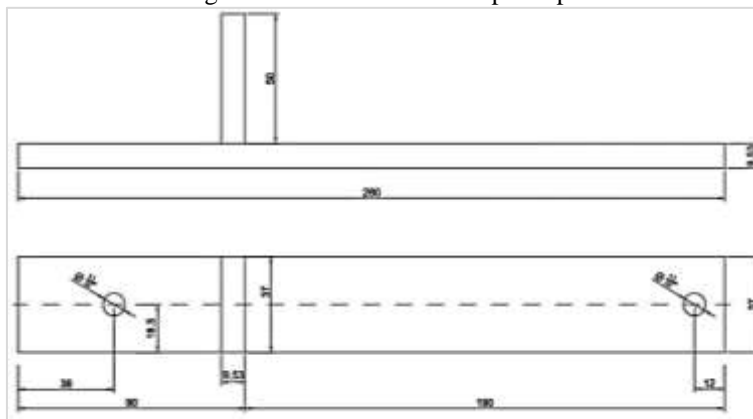
Figura 7 – Dimensões do corpo de prova 2



Fonte: Elaborado pelos autores

- c) O terceiro corpo de prova, ao contrário do anterior, foi cortado nas dimensões definidas e logo após, as partes foram soldadas, mantendo as possíveis mordeduras oriundas do processo de soldagem, conforme Figura 8.

Figura 8 – Dimensões do corpo de prova 3



Fonte: Elaborado pelos autores

Quadro 2 – Relação entre tipos de corpos de prova (CP), detalhes construtivos e parâmetros das equações de previsão de vida à fadiga de juntas soldadas propostas pelas normas citadas.

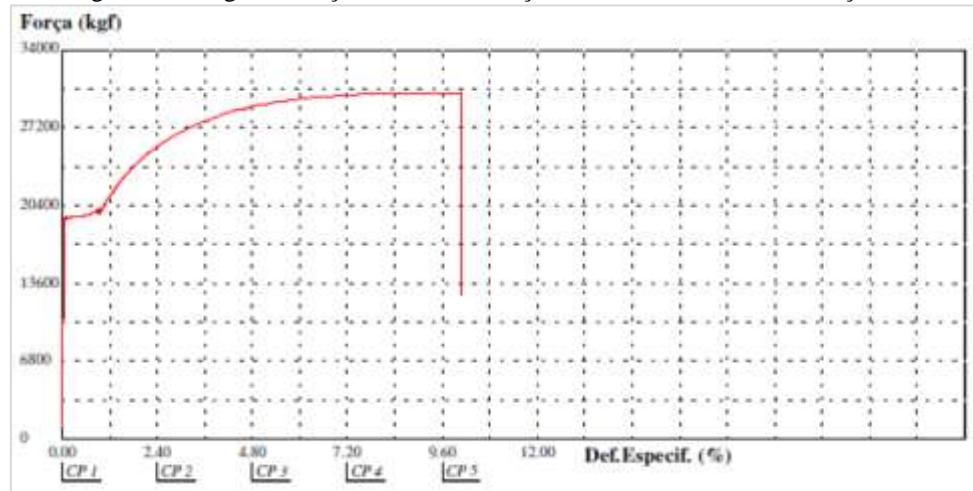
Tipo de CP	Norma	Nº	Detalhe construtivo	Categoria ou classe	Constante C ou C _f	Observação
2	IIW (2008)	511		100	$2,000 \times 10^{12}$	Enrijecedor transversal não carregado. Com acabamento na junta soldada.
1, 3				80	$1,024 \times 10^{12}$	Enrijecedor transversal não carregado. Sem acabamento na junta soldada.
1	DNV (2011)	8		E	$1,024 \times 10^{12}$	de ≥ 10 mm
2, 3				F	$7,16 \times 10^{11}$	de < 10 mm
1, 2, 3	AISC (2005) NBR 8800 (2008)	5.7		C	44×10^8	Metal-base em almas ou mesas de vigas, no pé de filetes de solda adjacentes a enrijecedores transversais soldados.

Fonte: Elaborado pelos autores a partir das normas citadas

2.2 Ensaios realizados

As propriedades mecânicas das barras utilizadas na fabricação dos corpos de prova foram determinadas através de ensaios de tração. Apresenta-se na Figura 9 o gráfico força versus deformação, de um dos ensaios realizados.

Figura 9 – Diagrama força versus deformação resultante do ensaio de tração da barra



Fonte: Extraído do relatório de ensaio n.º 21179 Lab. Metalográfico da UIT

Os ensaios de vida à fadiga foram realizados até a ruptura na máquina de fadiga por flexão alternada do laboratório da UIT. Foram utilizados quatro níveis diferentes de variação de tensão, calculados em relação ao limite de resistência do material da chapa (496 MPa), apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores das tensões aplicadas nos corpos de prova utilizados nos ensaios de fadiga.

Tensão normal (MPa)		Variação de tensão	Relação entre o limite de resistência do material e $\Delta\sigma$
$\sigma_{\text{máxima}}$	$\sigma_{\text{mínima}}$	$\Delta\sigma$ (MPa)	
310,02	28,18	281,84	57%
361,46	32,66	328,6	66%
421,43	38,31	383,12	77%
491,35	44,67	446,68	90%

Fonte: Elaborada pelos autores

3 Apresentação e discussão dos resultados

Após os ensaios à fadiga até a ruptura, foram realizados os registros macrofratográficos, com o intuito de tornar possível a verificação das diferenças na superfície de fratura em função do tipo de corpo de prova e dos quatro níveis de variação de tensão no qual foram submetidos. As superfícies de fratura apresentaram regiões semelhantes e características das fases de iniciação, propagação estável, propagação instável e ruptura final, ilustradas nas Figuras 10,11 e 12. No entanto, ainda não foi possível correlacionar a morfologia da superfície de fratura com o tipo de corpo de prova e o nível de variação de tensão.

Na Figura 13 são apresentados os resultados dos ensaios de vida à fadiga dos três tipos de corpos de prova, em função da variação de tensão. Também são comparados os valores obtidos com os resultados previstos pelas equações das normas IIW (2008), NBR 8800 (2008) e DNV (2011). Não foram apresentados os resultados previstos pela norma AISC (2005) pois são

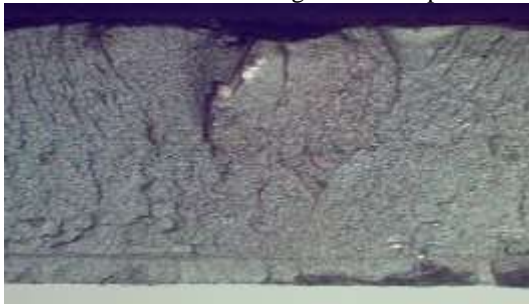
praticamente iguais aos da NBR 8800 (2008).

Figura 10 – Superfície de fratura do corpo de prova 1



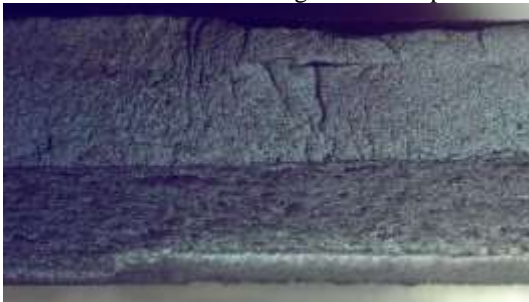
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 11 – Superfície de fratura do corpo de prova 2



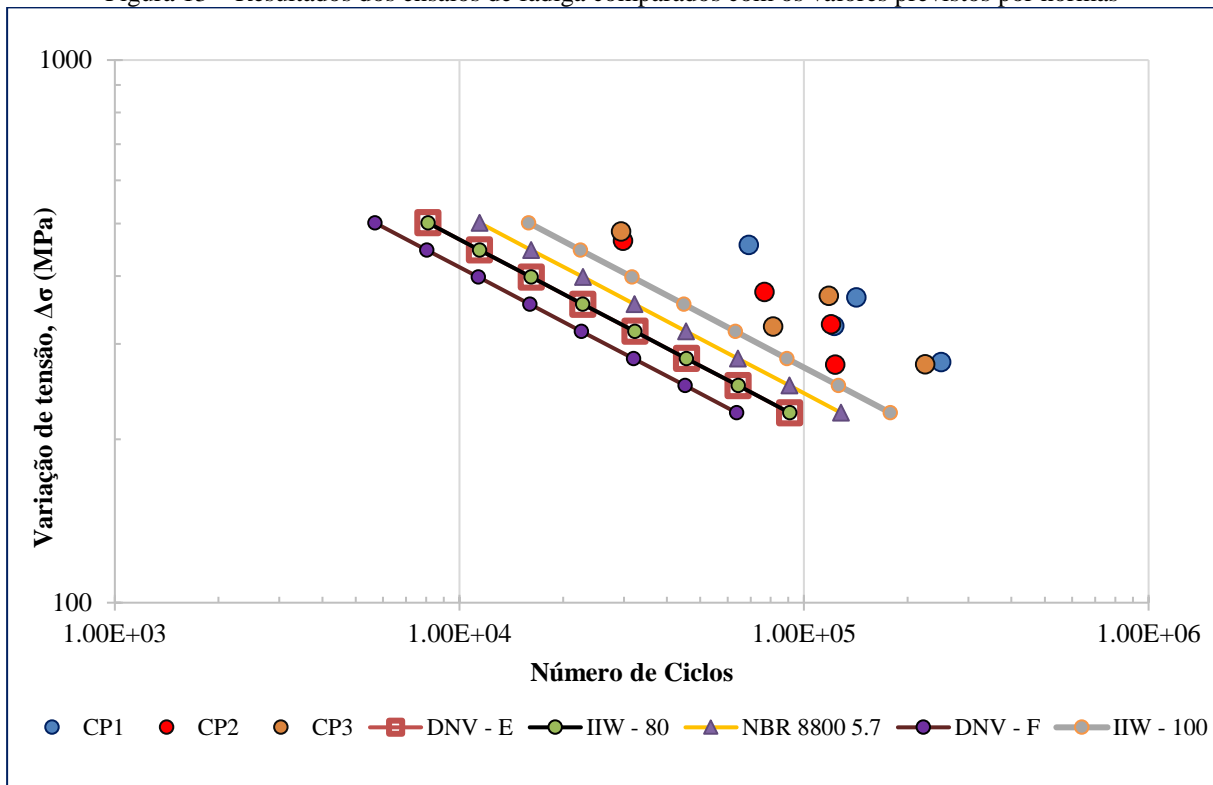
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 12 – Superfície de fratura do corpo de prova 3



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 13 – Resultados dos ensaios de fadiga comparados com os valores previstos por normas



Fonte: Elaborado pelos autores

Através dos resultados obtidos nos ensaios, foi possível perceber que o corpo de prova que apresentou o maior número de ciclos até sua ruptura nos quatro níveis de amplitude de tensão aplicados, e consequente melhor resultado à fadiga, foi o tipo 1, caracterizado pelo detalhe construtivo de espaçamento lateral de 10 milímetros em relação ao corpo perpendicular soldado.

Por outro lado, os corpos de prova dos tipos 2 e 3 apresentaram resultados de vida à fadiga semelhantes. Diante disso, é importante destacar a particularidade utilizada na fabricação do corpo de prova número 2, no qual foi efetuado o corte longitudinal após a solda do reforço na seção transversal da barra, o que sugere que a retirada de possíveis regiões de concentração de tensão devido à mordeduras, não aumentou significativamente a vida à fadiga. No entanto, o número de ensaios realizados não são suficientes para fazer qualquer afirmativa com validade estatística.

Foi possível observar que os resultados obtidos por todos os tipos de corpos de prova submetidos ao ensaio em questão, apresentaram resultados superiores aos resultados previstos pelas Equações 1, 2 e 3, comprovando que as normas AISC (2005), IIW (2008), DNV (2011) e NBR 8800 (2008) podem ser utilizadas na previsão de vida à fadiga de elementos mecânicos ou estruturais contendo junta “T” soldada.



SICIT 2021

Semana de Iniciação
Científica e Tecnológica

ISSN 2595-9417

27 de setembro a
01 de outubro de 2021

Universidade de Itaúna

4 Conclusão

Tendo como referência o material utilizado, os ensaios realizados e os resultados obtidos é possível afirmar que as equações das normas AISC (2005), IIW (2008), NBR 8800 (2008) e DNV (2011) são capazes de prever a vida de juntas soldadas tipo “T” sujeitas a fadiga.

Todos os doze resultados obtidos nos ensaios de fadiga foram inferiores aos valores previstos pelas normas citadas. No entanto, o número de ensaios realizados por corpo de prova não é suficiente para avaliar a confiabilidade de 95% das equações utilizadas.

Selecionou-se o corpo de prova tipo 1 para a próxima etapa da pesquisa, pela menor dispersão dos resultados. Possivelmente pela ausência de influência da ZAC e de mordeduras nas laterais do corpo de prova.

Como a verificação à fadiga de elementos contendo juntas soldadas ainda não é um assunto abordado na maioria dos cursos de graduação na área de Engenharia, espera-se que a realização desta pesquisa e a divulgação dos resultados proporcionem um material inicial de consulta para estudantes e profissionais de Engenharia.

Referências

AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION. **ANSI/AISC 360-05**: Specification for Structural Steel Buildings. 13.ed. Chicago, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8800**: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

BRANCO, C.A.M; FERNANDES, A.A; CASTRO, P.M.S. **Fadiga de estruturas soldadas**. 2.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

CASTRO, J. T. P.; MEGGIOLARO, M. A. **Fadiga - técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sobre cargas reais de serviço**: Volume 1 - iniciação de trincas. [s. l.]: [s. n.], 2009.

DET NORSKE VERITAS. Recommended Practice. **DNV-RP-C203**: Fatigue Design of Offshore Steel Structures. Oslo, 2011.

FONSECA, B.B.F.; LELIS JUNIOR, J.A.; DIAS, J.F.; NOGUEIRA, E.A.S.; CARMO, D.J. Fadiga em juntas soldadas. In: SICIT – Semana de Iniciação Científica e Tecnológica, 2018, Itaúna. **Anais**. Itaúna, 2018.

FUCHS, H. O.; STEPHENS, R. I. **Metal Fatigue in Engineering**. Canadá: John Wiley & Sons, 1980.

GOES, K. C. **Um modelo para previsão de vida à fadiga de juntas soldadas submetidas a carregamentos combinados**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

INTERNACIONAL INSTITUTE OF WELDING. **Recommendations for Fatigue design of welded Joints and Components**. Paris: IIW, 2008.



LELIS JUNIOR, J. A. **Ensaio de fadiga por flexão alternada em juntas soldadas**. Itaúna: Universidade de Itaúna, 2017.

MADDOX, S.J. Fatigue design rules for welded structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**.v.2, n.1, p.102-109, 2000.

TREMARIN, R.C.; PRAVIA, Z.M.C. Previsões de vida fadiga segundo normas técnicas: uma revisão crítica. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v.22, n. 3, p.281-299, 2017.