

## **FADIGA EM JUNTAS SOLDADAS**

**Beatriz Borges Faria Fonseca, Universidade de Itaúna, bibiborges\_11@hotmail.com.**  
**José Afonso Lelis Junior, Universidade de Itaúna, joselelisjr@hotmail.com.**  
**José Felipe Dias, Universidade de Itaúna, josefelipedias@gmail.com.**  
**Ewerton Augusto de Sousa Nogueira, Universidade de Itaúna, ewertonasnogueira@gmail.com.**  
**Denilson José do Carmo, Universidade de Itaúna, SENAI CETEF, denilsoncarmo@uit.br.**

**Resumo:** Estima-se que a fadiga seja responsável por 80% a 90% das falhas em serviço de componentes mecânicos e estruturais. A fadiga em juntas soldadas é ainda mais agravante, pois essas juntas apresentam microestrutura heterogênea, tensões residuais e concentradores de tensão. Sendo assim, estuda-se a influência do acabamento superficial de juntas soldadas e das tensões médias na vida à fadiga de corpos de prova extraídos de chapa de aço estrutural ASTM A-36 de 9,53 mm de espessura, disponibilizada pela Alfa Caldeiraria e Montagens. Foram fabricados dois grupos com dez corpos de prova cada um, sendo um grupo com acabamento por esmerilhamento e o outro sem. Os ensaios de fadiga por flexão alternada foram executados em uma máquina projetada e fabricada pelo grupo de pesquisa GPME, cadastrado no CNPq. A amplitude de tensão variou de 60% a 90% do limite de resistência do material. Os resultados foram coletados e comparados com as equações das normas ABNT NBR 8800, Det Norske Veritas (DNV) e do International Institute of Welding (IIW), mostrando que os valores previstos pelas normas são conservadores para a vida à fadiga de juntas soldadas, pois os resultados obtidos experimentalmente ficaram acima dos valores previstos pelas normas. Os corpos de prova esmerilhados apresentaram melhor resistência à fadiga, que os corpos de prova sem acabamento, confirmando a influência do acabamento na vida à fadiga de juntas soldadas.

**Palavras-chave: Fadiga. Juntas soldadas. Acabamento. Previsão de vida à fadiga.**

### **1 Introdução**

Quaisquer componentes e equipamentos que sofrem tensões variantes, ou seja, tensões que modificam seu valor ou sentido ao longo do tempo, estão sujeitos à fadiga e podem romper, mesmo se essa tensão estiver abaixo do limite de resistência ou do escoamento do material em questão. Isso porque, a cada ciclo dessa variação de tensões, é provocado um dano na estrutura do material. Com o acúmulo desses danos, o componente ou equipamento pode vir a falhar por fadiga (BRANCO; FERNANDES; CASTRO, 1999).

Juntas soldadas apresentam microestrutura heterogênea, tensões residuais e concentradores de tensão, uma vez que a operação de soldagem modifica a estrutura do material de base, além de introduzir um material diferente na área a ser soldada. Dessa forma, a falha por fadiga em componentes soldados difere bastante daquela em componentes não soldados, apresentando menor resistência à fadiga (BRANCO; FERNANDES; CASTRO, 1999).

Atualmente, estima-se que a fadiga é responsável por cerca de 80% a 90% das falhas em serviço de componentes mecânicos. Nos Estados Unidos, segundo Dowling (1999), o prejuízo

causado por fadiga foi cerca de 3% do PIB do país. Além de causar prejuízos enormes, representa não só um perigo para os trabalhadores de indústrias, mas também para a sociedade em geral, visto que juntas soldadas sujeitas à fadiga estão presentes em pontes, automóveis e aeronaves.

Sendo assim, é de extrema importância conhecer os efeitos da fadiga em juntas soldadas, a fim de prever falhas e corrigi-las antes que acidentes ocorram. Por isso, nesse trabalho, investiga-se o comportamento de corpos de prova soldados sujeitos à fadiga por flexão alternada e qual o efeito do acabamento superficial por esmerilhamento nessas juntas, além de estudar a influência da tensão média não nula na vida à fadiga desses corpos de prova, utilizando as EQUAÇÕES (1), (2) e (3), propostas por Goodman, Gerber e Soderberg, (CASTRO; MEGGIOLARO, 2009).

$$\text{Goodman: } \frac{\sigma_a}{S_F} + \frac{\sigma_{méd}}{S_R} = 1 \quad (1)$$

$$\text{Gerber: } \frac{\sigma_a}{S_F} + \left(\frac{\sigma_{méd}}{S_R}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

$$\text{Soderberg: } \frac{\sigma_a}{S_F} + \frac{\sigma_{méd}}{S_E} = 1 \quad (3)$$

Onde,  $\sigma_a$ ,  $\sigma_{méd}$ ,  $S_F$ ,  $S_R$  e  $S_E$  representam, respectivamente, tensão alternada, tensão média, resistência à fadiga, limite de resistência à tração e limite de escoamento à tração.

A trinca por fadiga passa por três estágios: nucleação ou iniciação, propagação e ruptura. A primeira fase acontece normalmente na superfície do corpo, devido a concentração de tensões nesse local ser máxima e cresce em um ângulo de 45° em relação ao esforço aplicado. Na segunda fase, a trinca propaga perpendicularmente ao esforço aplicado. Com o crescimento da trinca, atinge-se um comprimento crítico. A área remanescente é insuficiente para suportar o esforço aplicado e o fator de intensidade de tensão supera a tenacidade do material, ocorrendo então a ruptura. A FIGURA 1 ilustra a iniciação e propagação de uma trinca devido à fadiga.

FIGURA 1 – Iniciação (estágio I) e propagação (estágio II) da trinca



Fonte: CASTRO; MEGGIOLARO (2009).

Em um carregamento característico de fadiga, há algumas relações básicas, como tensão média, tensão alternada e amplitude de tensão ou gama de tensões. Essas relações foram calculadas pelas EQUAÇÕES (4), (5) e (6), respectivamente:

$$\sigma_{méd} = \frac{\sigma_{máx} + \sigma_{mín}}{2} \quad (4)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{máx} - \sigma_{mín}}{2} \quad (5)$$

$$\Delta\sigma = 2\sigma_a = \sigma_{máx} - \sigma_{mín} \quad (6)$$

Nessas equações,  $\sigma_{máx}$ ,  $\sigma_{mín}$  e  $\Delta\sigma$  representam respectivamente, tensão máxima, tensão mínima e gama de tensões. As outras variáveis já foram definidas anteriormente.

Existem duas abordagens mais comuns no estudo da fadiga em juntas soldadas: tensão nominal ou tensão estrutural conhecida também como *hot spot*. A abordagem pela tensão nominal, que será adotada nesta pesquisa, consiste em comparar a amplitude de tensão que é aplicada no corpo de prova com curvas S-N (tensão x número de ciclos) possibilitando estimar o número de ciclos necessários para a iniciação de trincas. É importante destacar que elas 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). 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. Foram utilizadas as normas fornecidas pela ABNT NBR 8800 (2008), classe 5.1-B, DNV (2011) classes C1 e E e IIW (BRANCO; FERNANDES; CASTRO, 1999) classe 125 para corpos de prova com acabamento esmerilhado. Para os corpos de prova sem acabamento utilizaram-se a ABNT NBR 8800 (2008), classe 5.4-C, DNV (2011) classes D e E e IIW (BRANCO; FERNANDES; CASTRO, 1999) classes 80 e 100. As normas ABNT NBR 8800 (2008) e IIW utilizam a EQUAÇÃO (7) e a norma DNV a EQUAÇÃO (8).

$$N = \frac{K.C}{\Delta\sigma^3} \quad (7)$$

$$N = \frac{C_f}{\left[\Delta\sigma \cdot \left(\frac{t}{25}\right)^\alpha\right]^3} \quad (8)$$

Nessas equações,  $N$ ,  $\Delta\sigma$  e  $t$  representam, respectivamente, número de ciclos, gama de tensões e espessura da chapa. Já  $K$ ,  $C$ ,  $C_f$  e  $\alpha$  são constantes determinadas pelas normas, os quais estão detalhados na TABELA 1.

A vida à fadiga de juntas soldas, prevista pelas normas citadas, é o número de ciclos,  $N$ , necessários para iniciar um trinca detectável por ensaios não destrutivos convencionais. Portanto, as normas utilizadas consideram somente o estágio de iniciação da trinca e propagação até atingir aproximadamente 1 mm de comprimento. No entanto, os dados experimentais coletados englobam todas as fases da falha por fadiga: iniciação, propagação e ruptura.

Tabela 1 – Coeficientes das equações de previsão de vida à fadiga

<b>Norma ABNT NBR 8800 (2008)</b>	<b>C</b>	<b>K</b>
5.1 – B	1,20E+10	327
5.4 – C	4,40E+09	327
<b>Norma IIW</b>	<b>C (B=3,0)</b>	<b>K</b>
Classe 125	3,91E+12	1
Classe 100	2,00E+12	1
Classe 80	1,02E+12	1
<b>Norma DNV</b>	<b>Cf (C=3,0)</b>	<b>A</b>
C1	2,81E+12	0,15
D	1,46E+12	0,20
E	1,02E+12	0,20

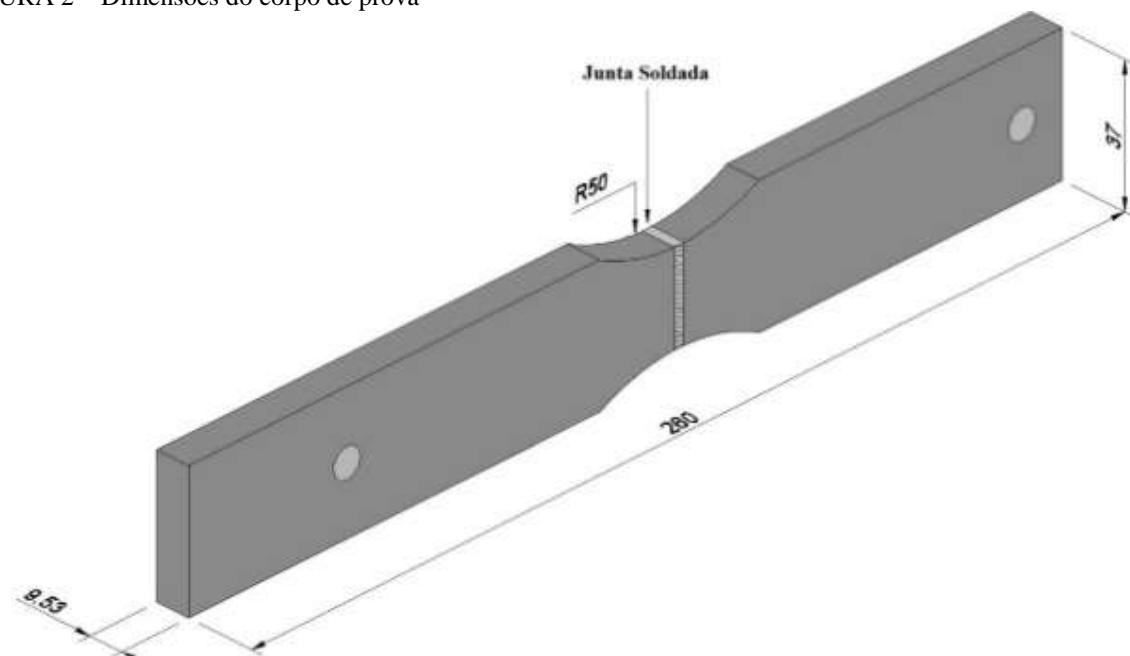
Fonte: elaborado pelos autores.

## 2 Metodologia

Os corpos de prova cujas dimensões são apresentadas na FIGURA 2, foram extraídos de chapa de aço estrutural ASTM A-36, de espessura nominal de 9,53mm com chanfro em V. No passe de raiz utilizou-se o processo TIG e nos passes de preenchimento o processo MAG. A Alfa Caldeiraria e Montagens forneceu a chapa e executou a solda. As propriedades mecânicas e caracterização estrutural do metal base e da junta soldada foram determinadas através de ensaios de tração, dureza, dobramento e exames micro e macrográficos. Os ensaios de fadiga por flexão alternada foram executados em uma máquina projetada e fabricada pelo grupo de pesquisa GPME, cujo funcionamento é detalhado por Borges (2011) e Camargos (2014).

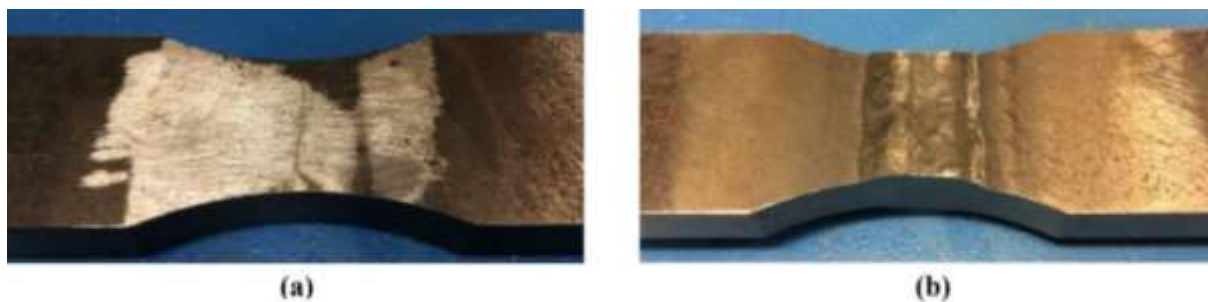
Com o intuito de verificar a influência do acabamento superficial, foram testados vinte corpos de prova extraídos da chapa soldada, porém sendo dez com acabamento por esmerilhamento e dez sem acabamento, mostrados na FIGURA 3. Os corpos de prova foram testados seguindo uma sequência aleatória, definida através de Tabela de Números Aleatórios. Foi definido um carregamento nominal, o qual variou de 60% a 90% do limite de resistência (LR) do material utilizado, como é mostrado na TABELA 2. Os dados coletados experimentalmente dos vinte corpos de prova foram analisados e comparados com as curvas S-N para juntas soldadas com e sem acabamento superficial.

FIGURA 2 – Dimensões do corpo de prova



Fonte: LELIS JUNIOR (2017).

FIGURA 3 – Corpos de prova, sendo (a) com acabamento superficial por esmerilhamento e (b) sem acabamento superficial.



Fonte: LELIS JUNIOR (2017).

TABELA 2 – Identificação dos corpos de prova, tipo de acabamento e valor nominal do carregamento

Nº C.P.	Tipo de acabamento	$\Delta\sigma$ nominal [MPa]	% LR
1	Sem Acab.	291,00	60,00%
2	Esmerilhado	356,40	73,48%
3	Esmerilhado	436,50	90,00%
4	Sem Acab.	356,40	73,48%
5	Esmerilhado	394,42	81,32%
6	Sem Acab.	394,42	81,32%
7	Sem Acab.	436,50	90,00%
8	Esmerilhado	394,42	81,32%
10	Esmerilhado	291,00	60,00%
11	Sem Acab.	322,04	66,40%
12	Sem Acab.	356,40	73,48%
13	Esmerilhado	436,50	90,00%
15	Esmerilhado	291,00	60,00%
16	Sem Acab.	436,50	90,00%
17	Esmerilhado	322,04	66,40%
18	Sem Acab.	291,00	60,00%
19	Esmerilhado	322,04	66,40%
20	Sem Acab.	322,04	66,40%
21	Esmerilhado	356,40	73,48%
22	Sem Acab.	394,42	81,32%

Fonte: LELIS JUNIOR (2017).

### 3 Resultados

Após o ensaio por fadiga até a ruptura, foi realizado exame e registro macrofratográfico, a fim de verificar as diferenças na superfície de fratura de corpos de prova com e sem acabamento superficial, ilustradas nas FIGURAS 4 e 5.

FIGURA 4 – Superfície de fratura de corpo de prova com acabamento por esmerilhamento.



Fonte: elaborado pelos autores.

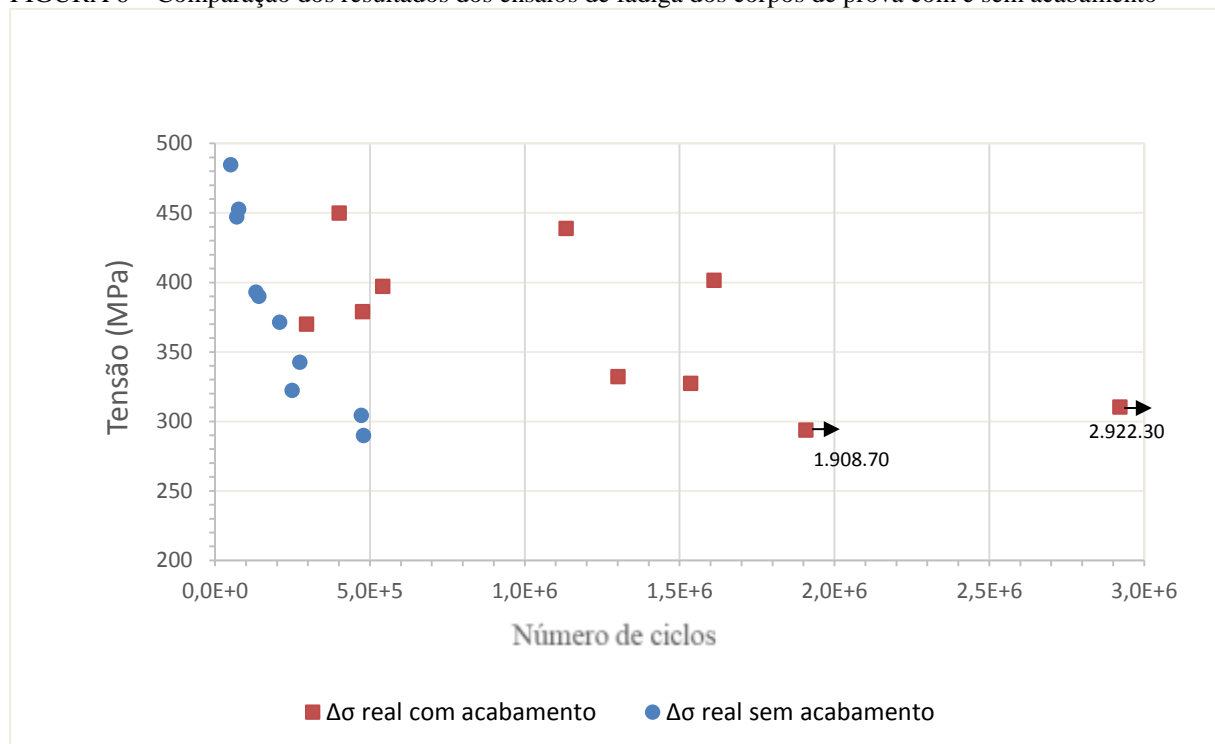
FIGURA 5 – Superfície de fratura de corpo de prova sem acabamento.



Fonte: elaborado pelos autores.

Os resultados dos ensaios de fadiga são apresentados na FIGURA 6.

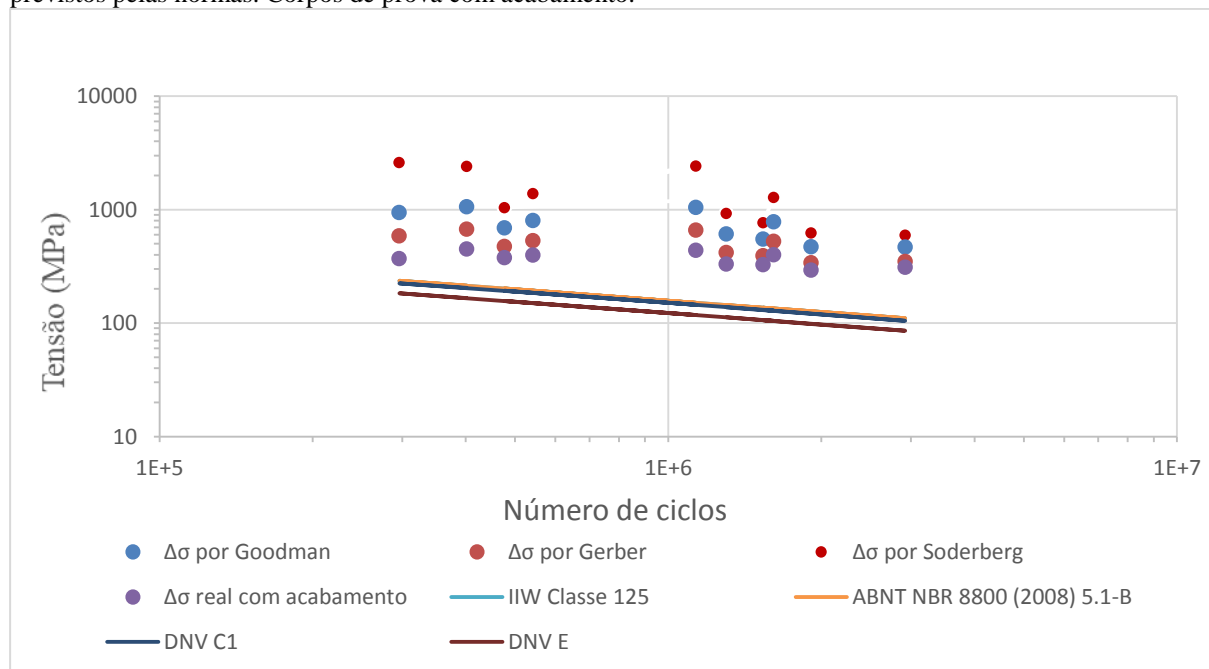
FIGURA 6 – Comparação dos resultados dos ensaios de fadiga dos corpos de prova com e sem acabamento



Fonte: Elaborado pelos autores.

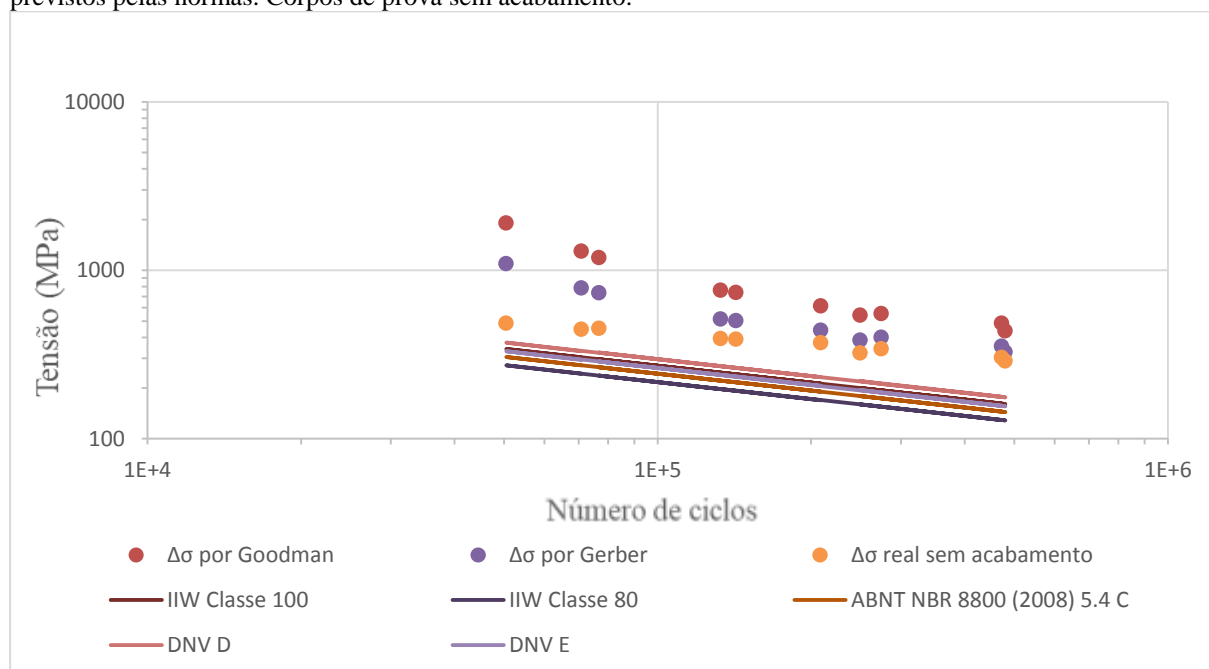
Nas FIGURAS 7 e 8 são apresentados os resultados dos ensaios comparados com os valores previstos pelas normas utilizando as EQUAÇÕES (7) e (8). Também são comparados os resultados corrigidos pela influência da tensão média segundo as EQUAÇÕES (1) a (3).

FIGURA 7 – Resultados de ensaios de fadiga com e sem influência da tensão média comparados com os valores previstos pelas normas. Corpos de prova com acabamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.

FIGURA 8 – Resultados de ensaios de fadiga com e sem influência da tensão média comparados com os valores previstos pelas normas. Corpos de prova sem acabamento.



Fonte: Elaborado pelos autores.



#### 4 Discussão

Os corpos de prova com acabamento suportaram maior número de ciclos que os corpos de prova sem acabamento superficial, em todos os níveis de carregamento estudados, como evidenciado pela FIGURA 6. Os dados obtidos confirmaram os resultados das pesquisas citadas por Branco; Fernandes; Castro (1999) e Barrios *et al.* (2007) e já incorporados nas equações de previsão de vida à fadiga das normas citadas, isto é, o acabamento de juntas soldadas provoca um aumento da vida à fadiga.

O acabamento superficial influenciou também na morfologia da superfície de fratura, visto que corpos de prova com acabamento por esmerilhamento apresentaram características menos grosseiras quando comparados com aqueles sem acabamento; como ilustrado nas FIGURAS 4 e 5. No entanto, este fenômeno deverá ser investigado com maior profundidade.

As superfícies de fratura dos corpos de prova com e sem acabamento apresentaram regiões semelhantes e características das fases de iniciação, propagação estável, propagação instável e ruptura final, também ilustradas nas FIGURAS 4 e 5.

As FIGURAS 7 e 8 mostram que para um determinado número de ciclos, o carregamento suportado por um corpo de prova foi sempre superior ao valor previsto pelas normas ABNT NBR 8800 (2008), DNV (2011) e IIW (BRANCO; FERNANDES; CASTRO, 1999). Indicando que as equações de previsão indicadas pelas normas fornecem valores a favor da segurança, seja no cálculo do nível de carregamento ( $\Delta\sigma$ ) ou na vida a fadiga ( $N$ ) de determinada junta soldada. Embora os dados experimentais coletados englobem todas as fases da falha por fadiga: iniciação, propagação e ruptura; e as normas utilizadas consideram somente o estágio de iniciação da trinca e propagação até atingir aproximadamente 1 mm de comprimento.

Embora as curvas S-N fornecidas pelas normas citadas, independentemente da tensão média, verificou-se a sua influência através das equações de Goodman, Gerber e Soderberg, a fim de calcular uma tensão alternada equivalente, que leva em consideração a tensão média. Porém, os resultados apresentados nas FIGURAS 7 e 8, mostram que os valores onde foi considerada a influência da tensão média apresentou um maior distanciamento que os valores obtidos do ensaio, isto é, sem influência da tensão média; tomando como referência as equações de previsão das normas citadas. Portanto, as equações das normas ao não levarem em consideração o efeito da tensão média, aparentemente, estariam a favor da segurança. No entanto, os corpos de prova utilizados nesta pesquisa não estão sujeitos aos mesmos valores de tensão residual que os corpos de prova utilizados para levantar as curvas S-N fornecidas pelas normas.

Alguns corpos de prova sem melhoria no acabamento superficial foram submetidos a tensões acima do limite de escoamento. Por esse motivo, a análise por meio da equação de Soderberg não foi levada em consideração, sendo analisados somente em relação a Goodman e Gerber.

## 5 Conclusão

Tendo como referência o material utilizado, os ensaios realizados e os resultados obtidos é possível afirmar que o acabamento superficial por esmerilhamento da junta soldada aumentou a vida à fadiga. Confirmando o que já está documentado pela bibliografia sobre a influência benéfica do acabamento de juntas soldadas na vida à fadiga, mas infelizmente ainda é pouco conhecido no meio técnico e acadêmico.

A diferença observada entre os resultados experimentais e os valores previstos pelas normas indicam que as equações fornecem valores conservadores. Embora os dados experimentais coletados englobem todas as fases da iniciação, propagação e ruptura; e as normas utilizadas consideram somente o estágio de iniciação da trinca e propagação até atingir a trinca aproximadamente 1 mm de comprimento. Portanto, na continuidade da pesquisa será necessário utilizar um sistema de ensaio que seja capaz de detectar o início da trinca por fadiga, para que a comparação seja adequada.

As análises dos dados considerando os efeitos da tensão média levam a concluir que as equações das normas estão a favor da segurança ao não considerarem tais efeitos. No entanto, é necessário cautela, pois os corpos de prova utilizados são apresentados as dimensões e os valores de tensões residuais dos corpos de prova utilizados pelas normas.

Para fazer quaisquer afirmativas sobre a influência do acabamento superficial na morfologia da superfície de fratura será necessário mais estudo.

A realização e divulgação dos resultados desta pesquisa no meio acadêmico e técnico poderão contribuir para o aumento da vida à fadiga de estruturas soldadas, aumentando a segurança e reduzindo prejuízos socioambientais e econômicos.

## Referências

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

BARRIOS, Daniel Benítez *et al.* O Processo de Jateamento como Via para Melhorar a Resistência à Fadiga e à Corrosão de Juntas Soldadas: uma Revisão (Parte II: aços e suas ligas). **Soldagem Inspeção**, São Paulo, v. 12, n. 2, p.148-159, abr./jun. 2007.

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

BORGES, V. F.. **Máquina para ensaio de iniciação de trinca por flexão alternada: detecção pela perda de estanqueidade**. Itaúna: Universidade de Itaúna, 2011.

CAMARGOS, T. P. L.. **Ensaio de Iniciação de Trinca por Flexão Alternada: Detecção pela Perda de Estanqueidade**. Itaúna: Universidade de Itaúna, 2014.



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. **RP-C203**: Fatigue Design of Offshore Steel Structures. Oslo, 2011.

DOWLING, N. E.. **Mechanical Behavior of Materials**. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

LELIS JUNIOR, José Afonso. **Ensaio de Fadiga por Flexão Alternada em Juntas Soldadas**. Itaúna: Universidade de Itaúna, 2017.

### **Agradecimentos**

A equipe agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), por fomentar a pesquisa e pelo apoio financeiro e à Universidade de Itaúna, pelo apoio ao projeto de pesquisa.