

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E
DE MATERIAIS
PPGE-3M

MAURO JAEGER MOREIRA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM FADIGA DE FIOS DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE
DUTOS FLEXÍVEIS COM DEFEITOS INDUZIDOS ARTIFICIALMENTE

Porto Alegre

2022

MAURO JAEGER MOREIRA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM FADIGA DE FIOS DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE
DUTOS FLEXÍVEIS COM DEFEITOS INDUZIDOS ARTIFICIALMENTE

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges

Porto Alegre

2022

MAURO JAEGER MOREIRA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM FADIGA DE FIOS DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE
DUTOS FLEXÍVEIS COM DEFEITOS INDUZIDOS ARTIFICIALMENTE

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges

Prof. Dr. Afonso Reguly

Aprovado em: 14/04/2022

BANCA EXAMINADORA:

Dra. Joseane Ortiz Breitenbach – LAMEF/UFRGS _____

Dr. Toni Roger Schifelbain de Lima – DEMET/UFRGS _____

Prof. Dr. Flávio Galdino Xavier – IFRS _____

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela oportunidade de aprendizado, capacitação e crescimento.

Ao LAMEF e todos os seus colaboradores, pela disponibilização de recursos, equipamentos e conhecimento essenciais ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, pelo apoio e suporte.

Ao Prof. Dr. Marcelo Favaro Borges, pela orientação e conhecimento.

RESUMO

Na produção e extração de petróleo e gás em ambientes marinhos, diversos componentes e sistemas são utilizados, dentre eles, dutos flexíveis dinâmicos, responsáveis pelo transporte de fluidos do poço à unidade de produção. Por estarem expostos a solicitações mecânicas oscilantes e ambientes corrosivos, é importante avaliar o desempenho em fadiga dos componentes dos dutos flexíveis quando há indícios de corrosão em suas superfícies. Sobretudo, os fios de aço que suportam as cargas mecânicas de operação em um *riser*, costumam ser componentes vulneráveis a falhas decorrentes da ação combinada de corrosão e solicitações oscilantes. O presente trabalho tem por objetivo avaliar o efeito de pites de corrosão, caracterizados por suas dimensões, quantidades e localização, na vida em fadiga de fios de tração de dutos flexíveis. Para que fosse possível correlacionar os parâmetros dos pites com o desempenho em fadiga, o processo de eletroerosão foi utilizado, permitindo um controle maior sobre o desenvolvimento de pites em comparação com a corrosão natural. O método de Taguchi foi utilizado para reduzir o número total de combinações de parâmetros a serem ensaiados e determinar os efeitos de cada parâmetro no desempenho em fadiga. Alguns pites produzidos por eletroerosão não possuíam as dimensões determinadas, em especial, os pites de menor diâmetro e maior profundidade. Foram realizados ensaios de fadiga em amostras de fios da armadura de tração para determinar o número de ciclos até a falha em patamares de carga pré-definidos. Os resultados dos ensaios de fadiga das amostras corroídas por eletroerosão sugerem um efeito mais significativo dos diâmetros dos pites na redução do desempenho em fadiga, comparando com os parâmetros controlados de profundidade, quantidade, localização e razão de aspecto. A redução do número de ciclos máxima ficou em torno de 73%, para pites de maior diâmetro, localizados na face plana do corpo de prova, e a redução mínima, em torno de 40%, para pites de menor diâmetro, localizados na aresta do corpo de prova.

Palavras-chave: Dutos flexíveis. Armadura de tração. Fadiga. Pites de corrosão.

ABSTRACT

In the extraction and production of oil and gas in sea environments, multiple components and systems are used, among them, flexible dynamic pipes, responsible for the transport of fluids. Because they are exposed to mechanical stress and corrosive conditions, it is important to assess the fatigue performance of the flexible pipe's components when there are signs of corrosion on their surfaces. Especially, the steel wires that bear the mechanical load during a riser's operation, are often vulnerable components to failure derived from the combination of corrosion and oscillating loads. The present work has the objective to assess the effects of corrosion pits, characterized by their dimensions, quantities and location, in the fatigue life of flexible pipes' tension wires. To make possible the correlation of the pits' parameters with their fatigue performance, the electrical discharge machining process was used, allowing a greater control of pits' development when compared to natural corrosion. The Taguchi method was employed to reduce the total amount of parameter combinations to be tested and to ascertain the effects of each parameter in the fatigue performance. Some pits obtained by electrical discharge machining didn't have the determined dimensions, especially the narrower and deeper pits. Fatigue tests were conducted in tensile armor wire specimens to assess the number of cycles to failure at pre-defined load levels. The fatigue testing results of electrical discharge machining corroded specimens suggest a more significant effect of the pits' diameter in reducing the fatigue performance, when compared to the controlled parameters of depth, quantity, location and aspect ratio. The maximum cycles reduction was around 73%, for wider pits, located in the planar face of the specimen, and the minimum reduction, around 40%, for narrower pits, located at the edge of the specimen.

Keywords: Flexible pipes. Tensile armor. Fatigue. Corrosion pits.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação de um sistema de exploração <i>offshore</i>	19
Figura 2: Representação das camadas de um <i>riser</i> flexível.	22
Figura 3: Representação das variações de estrutura de dutos flexíveis. 1 - Tubo <i>bonded</i> ; 2 - <i>Rough bore</i> ; 3 - <i>Smooth bore</i> ; 4 – Armadura de pressão Zeta; 5 – Armadura de pressão C; 6 - 4 armaduras de tração.	23
Figura 4: Oscilações nos esforços trativos em decorrência de oscilações na superfície.....	24
Figura 5: Representação de fios da armadura de tração e sua seção transversal.....	29
Figura 6: Fios da armadura de tração posicionados por armadura no duto flexível.	30
Figura 7: Fios da armadura de tração corroídos devido a ruptura de camada externa.	31
Figura 8: Representação dos estágios de nucleação e propagação de uma trinca de fadiga.....	33
Figura 9: Superfície de uma fratura por fadiga. (a) Macrografia mostrando marcas de praia com setas indicando a direção de propagação da trinca a partir da região de nucleação. (b) Micrografia mostrando estrias desenvolvidas na propagação da trinca.....	34
Figura 10: Representações gráficas de carregamentos cíclicos e seus respectivos parâmetros. (a) é um carregamento completamente reverso, com tensão média igual a zero; (b) é um carregamento com tensão mínima igual a zero; (c) é um carregamento com tensões mínimas compressivas; (d) é um carregamento apenas com tensões trativas.	35
Figura 11: Exemplo ilustrando a diferença de visualização de uma curva S-N em escala linear e uma curva em escala logarítmica.....	37
Figura 12: Representação da corrosão por pites.....	39
Figura 13 : Dimensões de um pite de corrosão.	40
Figura 14: Comparação do desempenho em fadiga de fios com degradação superficial e fios sem defeitos.	41
Figura 15: Gráfico de ensaios em fadiga de amostras com pites gerados por eletroerosão, comparados com amostras sem degradação.....	41

Figura 16: Esquema simplificado do processo de eletroerosão.....	44
Figura 17: Pite artificialmente gerado por método eletroquímico.....	44
Figura 18: Fluxograma da estrutura do trabalho.....	45
Figura 19: Dimensões das amostras utilizadas nos ensaios.	47
Figura 20: Microestrutura da seção longitudinal das amostras.....	48
Figura 21: Microestrutura da seção transversal das amostras.	48
Figura 22: Corpos de prova usinados para ensaios de tração.....	50
Figura 23: Instrumentação de um dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração.	50
Figura 24: Exemplos de perfis de superfícies planas dos corpos de prova. ...	52
Figura 25: Exemplos de perfis de superfícies de borda dos corpos de prova.	53
Figura 26: Exemplos de Amostras com variações em posição, profundidade, diâmetro e quantidade dos pites.	56
Figura 27: Amostras posicionadas em máquina de ensaio de fadiga em flexão a 4 pontos.....	59
Figura 28: Representação de apoios do dispositivo de flexão a 4 pontos.	60
Figura 29: Exemplo de análise das dimensões dos pites por interferômetro..	62
Figura 30: Representação dos limites de remoção devido ao fio no método da eletroerosão.	64
Figura 31: Diferença de geometria entre pites de pequenas dimensões e pites maiores na face plana do fio.	65
Figura 32: Diferença de geometria entre pites de pequenas dimensões e pites maiores na aresta do fio.....	66
Figura 33: Curva SN dos fios sem defeitos.....	68
Figura 34: Número de ciclos do grupo 1 em comparação com fios sem defeitos.....	69
Figura 35: Número de ciclos do grupo 2 em comparação com fios sem defeitos.....	70
Figura 36: Número de ciclos do grupo 3 em comparação com fios sem defeitos.....	71
Figura 37: Número de ciclos do grupo 4 em comparação com fios sem defeitos.....	72

Figura 38: Número de ciclos do grupo 5 em comparação com fios sem defeitos.....	73
Figura 39: Número de ciclos do grupo 6 em comparação com fios sem defeitos.....	74
Figura 40: Número de ciclos do grupo 7 em comparação com fios sem defeitos.....	75
Figura 41: Número de ciclos do grupo 8 em comparação com fios sem defeitos.....	76
Figura 42: Número de ciclos do grupo 9 em comparação com fios sem defeitos.....	77
Figura 43: Número de ciclos do grupo 10 em comparação com fios sem defeitos.....	78
Figura 44: Número de ciclos do grupo 11 em comparação com fios sem defeitos.....	79
Figura 45: Número de ciclos do grupo 12 em comparação com fios sem defeitos.....	80
Figura 46: Número de ciclos do grupo 13 em comparação com fios sem defeitos.....	81
Figura 47: Número de ciclos do grupo 14 em comparação com fios sem defeitos.....	82
Figura 48: Número de ciclos do grupo 15 em comparação com fios sem defeitos.....	83
Figura 49: Número de ciclos do grupo 16 em comparação com fios sem defeitos.....	84
Figura 50: Número de ciclos do grupo 17 em comparação com fios sem defeitos.....	85
Figura 51: Número de ciclos do grupo 18 em comparação com fios sem defeitos.....	86
Figura 52: Comparação da redução relativa na vida em fadiga entre diferentes autores.	88
Figura 53: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 0 (sem defeitos), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 60% da tensão de escoamento.....	93

- Figura 54: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 0 (sem defeitos), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.....94
- Figura 55: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 0 (sem defeitos), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 80% da tensão de escoamento.....94
- Figura 56: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 0 (sem defeitos), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 90% da tensão de escoamento.....95
- Figura 57: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 1 (defeito com 0,03 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.95
- Figura 58: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 2 (2 defeitos com 0,1 mm de profundidade e 0,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.96
- Figura 59: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 3 (3 defeitos com 0,1 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.96
- Figura 60: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 4 (1 defeito com 0,05 mm de profundidade e 0,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.97
- Figura 61: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 5 (2 defeitos com 0,16 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.97
- Figura 62: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 6 (3 defeitos com 0,17 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.98
- Figura 63: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 7 (2 defeitos com 0,05 mm de profundidade e 0,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.98
- Figura 64: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 8 (3 defeitos com 0,25 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.99
- Figura 65: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 9 (1 defeito com 0,25 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.99

Figura 66: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 10 (3 defeitos com 0,1 mm de profundidade e 0,8 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.	100
Figura 67: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 11 (1 defeito com 0,15 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.	100
Figura 68: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 12 (2 defeitos com 0,15 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.	101
Figura 69: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 13 (2 defeitos com 0,1 mm de profundidade e 0,6 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.	101
Figura 70: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 14 (3 defeitos com 0,2 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.	101
Figura 71: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 15 (1 defeito com 0,27 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.	102
Figura 72: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 16 (3 defeitos com 0,07 mm de profundidade e 0,6 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.	102
Figura 73: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 17 (1 defeito com 0,3 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.	103
Figura 74: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 18 (2 defeitos com 0,3 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.	103
Figura 75: Superfície de fratura de amostras sem corrosão prévia ensaiadas a 70% da tensão de escoamento.	104
Figura 76: Superfície de fratura da amostra 11-C, revelando defeito que originou a trinca por fadiga. a) defeito superficial na aresta da amostra. b) defeito superficial na aresta da amostra na região de nucleação da trinca por fadiga.....	105
Figura 77: Superfície de fratura e detalhe de pite da amostra 01-D.	106

Figura 78: Superfície de fratura e detalhe de pites da amostra 03-D.	107
Figura 79: Superfície de fratura e detalhe de pites da amostra 08-A.....	108
Figura 80: Superfície de fratura e detalhe de pites da amostra 16-B.....	109
Figura 81: Superfície de fratura e detalhe de pite da amostra 16-C.	110
Figura 82: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 1.....	118
Figura 83: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 2.....	119
Figura 84: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 3.....	120
Figura 85: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 4.....	121
Figura 86: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 5.....	122
Figura 87: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 6.....	123
Figura 88: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 7.....	124
Figura 89: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 8.....	125
Figura 90: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 9.....	126
Figura 91: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 10.....	127
Figura 92: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 11.....	128
Figura 93: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 12.....	129
Figura 94: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 13.....	130
Figura 95: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 14.....	131
Figura 96: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 15.....	132
Figura 97: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 16.....	133
Figura 98: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 17.....	134
Figura 99: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 18.....	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química das amostras.	49
Tabela 2: Resultados obtidos de ensaios de tração dos corpos de prova.	51
Tabela 3: Parâmetros de rugosidade das amostras analisadas.	54
Tabela 4: Características dos pites de corrosão nas amostras para ensaio de fadiga e respectivos níveis.	55
Tabela 5: Parâmetros dos grupos de amostras com pites produzidos por eletroerosão.	57
Tabela 6: Fatores de concentração de tensão para as geometrias estabelecidas dos pites.	58
Tabela 7: Grupos de controle de amostras de fio sem defeitos.	60
Tabela 8: Valores de profundidade e diâmetro dos pites gerados por eletroerosão.	63
Tabela 9: Fatores de concentração de tensão para as geometrias medidas dos pites.	67
Tabela 10: Dados do ensaio de amostras do grupo 1	69
Tabela 11: Dados do ensaio de amostras do grupo 2	70
Tabela 12: Dados do ensaio de amostras do grupo 3	71
Tabela 13: Dados do ensaio de amostras do grupo 4	72
Tabela 14: Dados do ensaio de amostras do grupo 5	73
Tabela 15: Dados do ensaio de amostras do grupo 6	74
Tabela 16: Dados do ensaio de amostras do grupo 7	75
Tabela 17: Dados do ensaio de amostras do grupo 8	76
Tabela 18: Dados do ensaio de amostras do grupo 9	77
Tabela 19: Dados de ensaio de amostras do grupo 10	78
Tabela 20: Dados de ensaio de amostras do grupo 11	79
Tabela 21: Dados de ensaio de amostras do grupo 12	80
Tabela 22: Dados de ensaio de amostras do grupo 13	81
Tabela 23: Dados de ensaio de amostras do grupo 14	82
Tabela 24: Dados de ensaio de amostras do grupo 15	83
Tabela 25: Dados de ensaio de amostras do grupo 16	84
Tabela 26: Dados de ensaio de amostras do grupo 17	85
Tabela 27: Dados de ensaio de amostras do grupo 18	86

Tabela 28 : Arranjo Ortogonal dos parâmetros de ensaio.	90
Tabela 29: Sinal-ruído dos ensaios dinâmicos conforme parâmetros de pites.	91
Tabela 30: Número de ciclos dos ensaios dinâmicos conforme a razão de aspecto e fator de concentração de tensões dos pites medidos nas amostras.	92
Tabela 31: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 1.	118
Tabela 32: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 2.	119
Tabela 33: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 3.	120
Tabela 34: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 4.	121
Tabela 35: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 5.	122
Tabela 36: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 6.	123
Tabela 37: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 7.	124
Tabela 38: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 8.	125
Tabela 39: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 9.	126
Tabela 40: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 10.	127
Tabela 41: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 11.	128
Tabela 42: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 12.	129
Tabela 43: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 13.	130
Tabela 44: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 14.	131

Tabela 45: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 15.	132
Tabela 46: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 16.	133
Tabela 47: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 17.	134
Tabela 48: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 18.	135

LISTA DE SÍMBOLOS

σ_{\max}	Tensão máxima
σ_{\min}	Tensão mínima
σ_a	Amplitude de tensões
σ_m	Tensão média
R	Razão de carregamento
$\Delta\sigma$	Variação de tensões
2c	Diâmetro de pite
a	Profundidade de pite
k_t	Fator de concentração de tensões
k_f	Fator de concentração de tensões em fadiga devido a entalhe
S	Tensão nominal aplicada
σ_{ar}	Tensão devido a esforços alternados em componente com entalhe
S_{ar}	Tensão devido a esforços alternados em componente liso
ρ	Raio de curvatura de pite
L_0	Base de medida de corpo de prova
R_a	Desvio médio do perfil de rugosidade
R_t	Altura total do perfil de rugosidade
σ_y	Tensão de escoamento do material
ϵ_{\max}	Deformação máxima superficial
σ_{UTS}	Limite de resistência à tração do material
m	Inclinação da curva SN
σ_e	Limite de fadiga
R_T	Número de repetições do ensaio
y_j	Valor da característica medida no ensaio
$\left(\frac{S}{N}\right)$	Sinal-ruído dos ensaios
$\left(\frac{S}{N}\right)_{\max}$	Sinal-ruído máximo dos ensaios
$\left(\frac{S}{N}\right)_{\min}$	Sinal-ruído mínimo dos ensaios
$\left(\frac{a}{2c}\right)$	Razão de aspecto de pite

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
	2.1 DUTOS FLEXÍVEIS	21
	2.2 FADIGA.....	32
	2.3 CORROSÃO	38
	2.4 SENSIBILIDADE AO ENTALHE	42
	2.5 CORROSÃO INDUZIDA	43
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	45
	3.1 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	46
	3.2 AMOSTRAS	46
	3.3 GEOMETRIA DOS PITES.....	55
	3.4 ESTIMATIVA DO FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO	58
	3.5 ENSAIOS DE FADIGA	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	62
	4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PITES ARTIFICIAIS	62
	4.2 DESEMPENHO EM FADIGA DAS AMOSTRAS.....	67
	4.3 ANÁLISE PELO MÉTODO DE TAGUCHI.....	89
	4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS FRATURAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA 93	
	4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS FRATURAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	104
5	CONCLUSÕES	111
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114
	APÊNDICE A.....	118

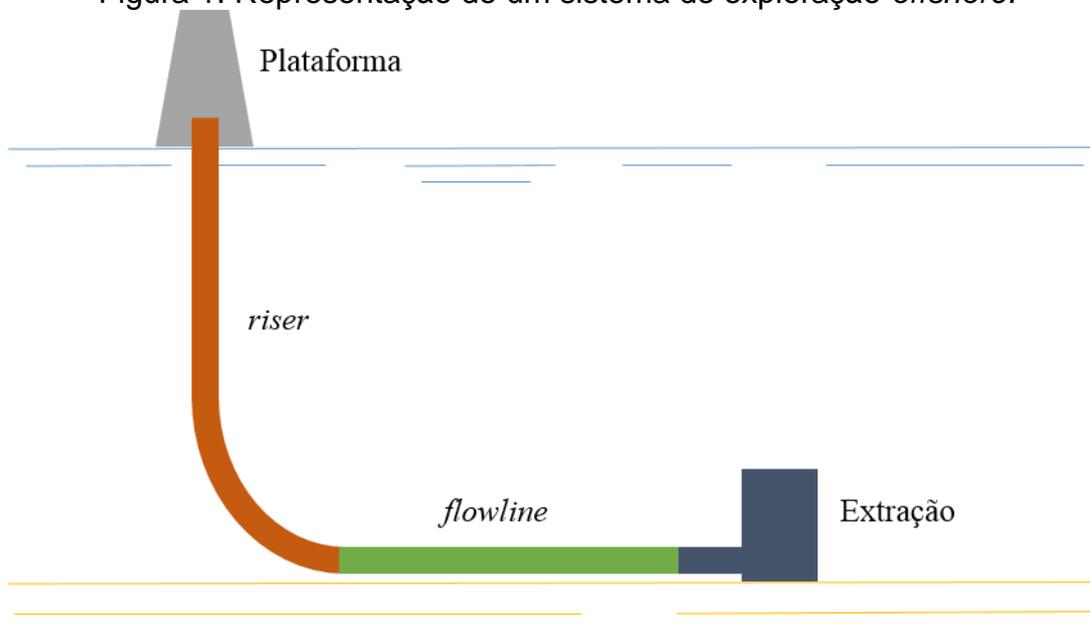
1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo em alto mar, também chamada de *offshore*, começou no final do século XIX de maneira relativamente simples, consistindo apenas de uma cópia dos sistemas utilizados para exploração em terra, adaptados ao ambiente marítimo. Possuíam sondas de perfuração, bombas de extração e dutos de transporte, entre outros componentes. Conforme as operações de extração eram iniciadas em condições cada vez mais adversas e complexas, novas tecnologias e critérios de análise eram empregados, até que o ramo de exploração *offshore* cobrisse uma extensa gama de equipamentos e técnicas especialmente desenvolvidos para a extração segura e eficiente de hidrocarbonetos (MORAIS, 2013).

Em meados da década de 1960, apesar de possuir operações de extração de petróleo em terra, o Brasil ainda dependia da importação de óleo estrangeiro para a maior parte do consumo nacional. Seguindo os modelos de exploração de petróleo no mar, já estabelecidos em outros países, o Brasil iniciou a perfuração de poços em águas rasas. Em dezembro de 1966, a PETROBRAS encomendava a construção de sua primeira plataforma marítima de exploração de petróleo (MORAIS, 2013).

De maneira simplificada, um sistema de exploração *offshore* consiste em uma unidade de extração, no leito oceânico, dutos para condução de fluidos ao longo do leito, dutos de transporte entre o leito e a superfície e a plataforma acima da superfície da água. Os dutos de transporte de fluidos no leito oceânico e os dutos de transporte do leito até a plataforma são chamados de *flowlines* e *risers*, respectivamente. A Figura 1 mostra esquematicamente a disposição dos componentes de um sistema deste tipo.

Figura 1: Representação de um sistema de exploração *offshore*.



FONTE: o Autor

O desempenho destes sistemas de produção e transporte de óleo e gás, submetidos a carregamentos cíclicos devido às condições de operação, é muito estudado de maneira criteriosa e cuidadosa, sobretudo com relação à exposição a meios corrosivos.

Devido à natureza cíclica dos carregamentos a que os dutos de transporte de hidrocarbonetos estão submetidos, é necessário avaliar a resistência de seus componentes à fadiga. De fato, as condições em que estes dutos operam mostraram-se favoráveis à nucleação e propagação de falhas por fadiga (BAI, 2005).

Falhas por fadiga podem ocorrer, quando componentes são submetidos a cargas flutuantes com tração, mesmo em tensões muito abaixo do limite de resistência do metal (BOARDMAN, 1990). Além disso, podem culminar em fraturas catastróficas, comprometendo a integridade estrutural de componentes submetidos a carregamentos cíclicos com tensões trativas. Por isso, se faz necessário avaliar o desempenho em fadiga da estrutura de *risers* flexíveis, assim como o comportamento de seus componentes individuais, para estimar quão susceptíveis são às falhas ocasionadas por fadiga.

Estima-se que em torno de 90% das falhas de estruturas metálicas são ocasionadas por fadiga (CALLISTER, 2007). Por essa razão, há grande interesse, não apenas científico, em compreender os fenômenos que influenciam a falha por fadiga. Somada aos custos associados, a natureza catastrófica e repentina das falhas por fadiga torna imprescindível o estudo minucioso do comportamento de estruturas metálicas submetidas a carregamentos cíclicos.

Além das condições de carregamento dinâmico, os dutos flexíveis estão também muitas vezes submetidos às ações de meios corrosivos, dado que a estanqueidade das camadas protetoras fica comprometida em determinadas situações (NEGREIROS, 2016). Em muitos dutos retirados de serviço, observou-se a presença de corrosão nas camadas metálicas de suas estruturas, o que prejudica o desempenho e durabilidade destes componentes.

A corrosão por pites, comparada com os outros tipos de corrosão observados em fios de tração, provou ser uma das mais degradantes, tanto pela frequência em que ocorre quanto pelo efeito nocivo no desempenho dos componentes em que aparece (NEGREIROS, 2016).

Atualmente, existem inúmeros estudos quanto ao desempenho em fadiga de fios de tração em ambiente corrosivo, assim como o comportamento tanto de fios novos, recém produzidos, quanto de fios retirados de sistemas em serviço (GONÇALVES, 2018). Existe ainda amplo espaço para exploração do desempenho em fadiga de fios novos, sem dano acumulado pelas solicitações em serviço, mas previamente corroídos, de maneira artificial e controlada.

O objetivo principal deste trabalho foi analisar os efeitos de parâmetros geométricos de pites no desempenho em fadiga de fios da armadura de tração de *risers* flexíveis. Como objetivo secundário, avaliou-se o método da eletroerosão para a obtenção de pites superficiais, em diferentes parâmetros de caracterização, em fios de tração de *risers* flexíveis.

O presente trabalho é formado por: Revisão Bibliográfica, apresentando os conceitos mais relevantes para o desenvolvimento teórico do texto; Procedimento Experimental, caracterizando os ensaios realizados, as amostras utilizadas e os parâmetros posteriormente analisados; Resultados e Discussão, apresentando os resultados obtidos após execução dos ensaios conforme o Procedimento

Experimental e posterior análise dos dados obtidos; Conclusões, sintetizando resultados e Sugestões para Trabalhos Futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DUTOS FLEXÍVEIS

Os sistemas de extração e produção de petróleo e gás natural consistem em inúmeros componentes com diversas funções que vão desde o transporte de fluídos do leito submarino até a produção dos compostos finais em uma plataforma flutuante. Dentre os componentes de transporte de fluídos destacam-se os chamados *risers*, ou dutos flexíveis, normalmente utilizados para levar o óleo bruto extraído abaixo do leito submarino até a plataforma acima do nível do mar.

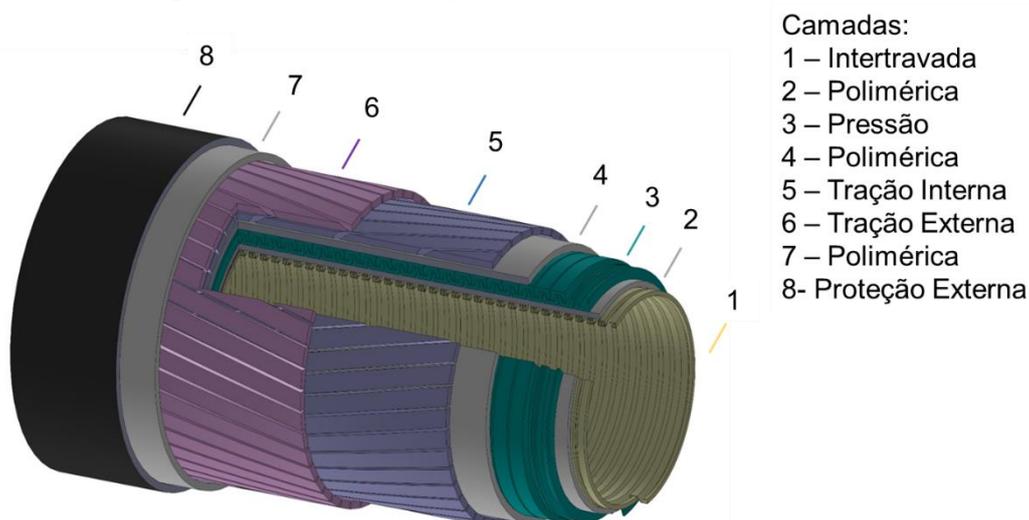
Estes *risers* flexíveis têm alta resistência mecânica, boa resistência à corrosão e baixa rigidez, características necessárias para operação sob alta pressão, assentamento no leito submarino e resistência à fadiga ocasionada por oscilações e turbulências marítimas (CAMPELLO, 2014; FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

2.1.1 ESTRUTURA DOS DUTOS FLEXÍVEIS

Devido à natureza e complexidade das condições de operação, os *risers* flexíveis são compostos de diversas camadas, cada uma com uma função específica e construída de materiais adequados a essas funções. Para transporte do fluído, a camada mais interna, chamada de intertravada, é constituída por um perfil similar a um “Z” em helicóide. Tem por função impedir o colapso da barreira polimérica interna, ou seja, conferir resistência à pressão externa. A barreira polimérica interna, ou barreira de vedação, é o contato entre o fluído transportado e as outras camadas do duto, ou seja, é a camada que isola o fluído transportado do ambiente marinho. A camada de pressão, externa à barreira interna, é composta por um perfil em “Z” em helicóide ou por duas camadas em “C” ou “T” em contato. Sua função é manter a pressão interna no duto, suportando as tensões derivadas das pressões elevadas do fluído transportado. Envolvendo essas camadas, há as camadas de tração,

compostas por fios de seção aproximadamente retangular, com passo helicoidal. Os *risers* atuais possuem no mínimo duas destas camadas, com passos em sentidos contrários, para compensar rotações e conferir equilíbrio à estrutura. Têm a função de suportar os esforços de tração e, em alguns dutos aonde a armadura de pressão não existe, suportar também a pressão interna. Para proteger as camadas mais internas de efeitos adversos do ambiente marinho, assim como evitar o atrito entre as camadas, existem ainda camadas poliméricas intermediárias e fitas anti-desgaste (*anti-wear*) (API RP 17B, 2008). Uma representação esquemática das camadas, em uma escala próxima da maioria dos *risers* flexíveis, é mostrada na Figura 2.

Figura 2: Representação das camadas de um *riser* flexível.



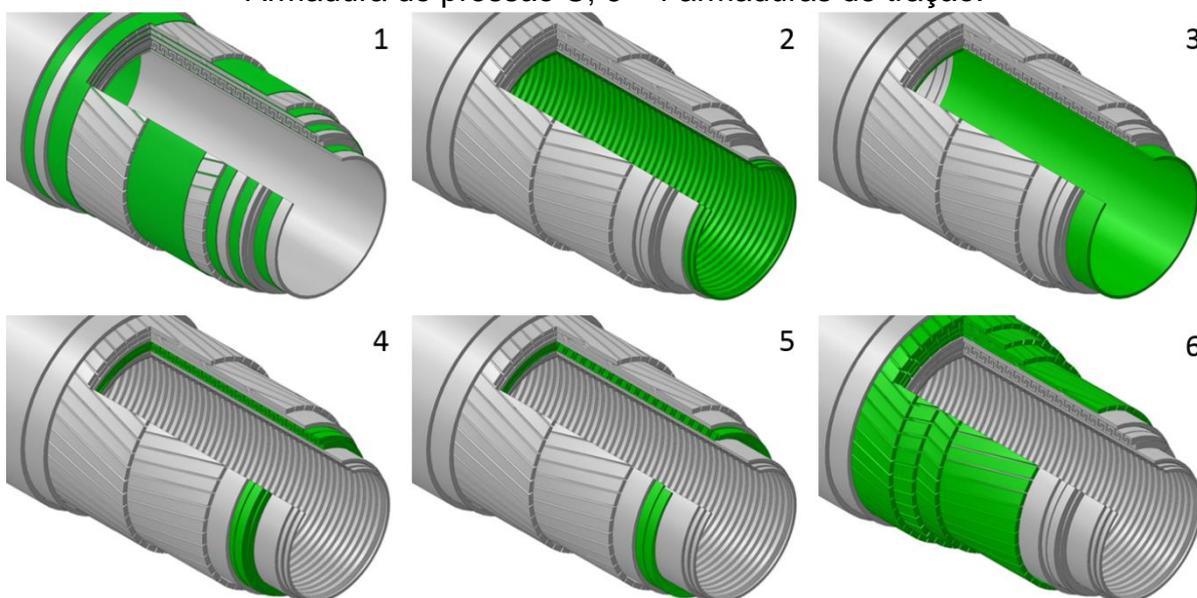
FONTE: o Autor

Há, ainda, diversas variações deste tipo de componente, todas adequadas a diferentes parâmetros de operação. É possível encontrar dutos do tipo *bonded*, em que as camadas poliméricas intermediárias não permitem que as camadas metálicas deslizem, conferindo adesão à estrutura anular, como é conhecida a região entre a camada polimérica mais interna e capa externa (componentes de 2 a 7, na Figura 2). Se o duto flexível, em vez de transportar fluídos em alta pressão, tem a função de transferir energia ou pressão hidráulica entre a instalação de superfície e o equipamento no leito submarino, este é denominado umbilical e possui uma estrutura consideravelmente diferente: em vez de possuir camadas de pressão e

intertravada, há cabos condutores de eletricidade e/ou mangueiras hidráulicas, além de, muitas vezes, possuir fios da armadura de tração com seção circular (LEMOS, 2005).

Outras variações na estrutura dos dutos flexíveis incluem os *risers* “*rough bore*” e “*smooth bore*”, denominados a partir da camada mais interna em contato com o fluido transportado: os *rough bore* possuem uma camada metálica intertravada em contato com o fluido e os *smooth bore* não possuem camada intertravada, mantendo o fluido transportado em contato apenas com uma camada polimérica. Ainda é possível, como já mencionado, encontrar variações de seções na camada de pressão (Zeta, em “C” ou em “T”) e quantidades diferentes de armaduras de tração: há dutos que possuem 2 ou 4 camadas de fios de tração. De maneira ilustrativa, a Figura 3 representa essas variações, mais comuns, na estrutura dos *risers* flexíveis.

Figura 3: Representação das variações de estrutura de dutos flexíveis. 1 - Tubo *bonded*; 2 - *Rough bore*; 3 - *Smooth bore*; 4 – Armadura de pressão Zeta; 5 – Armadura de pressão C; 6 - 4 armaduras de tração.



FONTE: o Autor

O espaço contido entre a capa polimérica externa e a vedação interna é denominado “espaço anular” e contém as camadas metálicas responsáveis pela resistência a carregamentos mecânicos. No processo de fabricação, montagem e operação inicial de um *riser*, o espaço anular tende a manter-se seco, mas, ao longo do tempo, ou devido a danos nas camadas responsáveis pela vedação do duto,

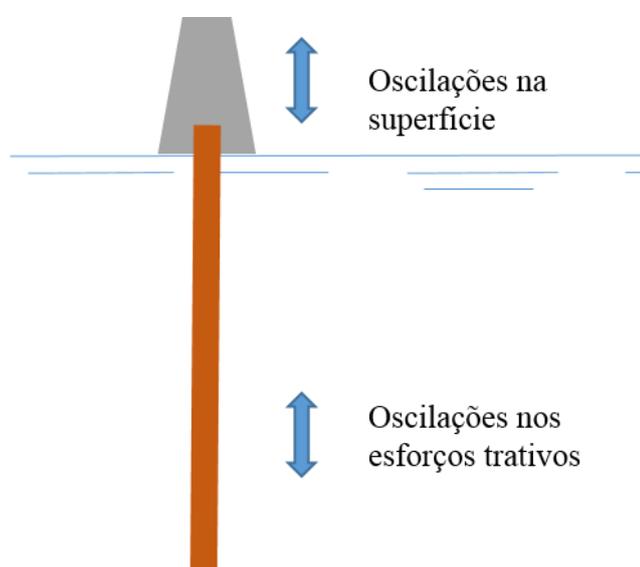
observou-se a presença de fluidos e componentes capazes de degradar os materiais internos do duto (FERGESTAD; LØTVEIT, 2014).

Como os dutos do tipo *riser* flexível são normalmente muito solicitados em operação e possuem função crítica, estes costumam ser o foco de estudos na área da engenharia de dutos e sistemas de extração e produção de petróleo. Dentre os componentes dos dutos flexíveis, ainda, destacam-se as armaduras de tração, devido tanto à sua importância para uma operação segura e adequada quanto aos esforços e condições a que são submetidos. Estão entre os componentes mais propensos a falhar, mesmo em condições normais, graças ao dano causado por corrosão e fadiga (BARNES, 2014; SIMONSEN, 2014; NEGREIROS, 2016).

2.1.2 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E MECANISMOS DE FALHA DE DUTOS FLEXÍVEIS

Os dutos flexíveis, estendendo-se da superfície ao leito marinho, são submetidos a esforços variados e de alta intensidade. Parte da solicitação mecânica sob a qual os dutos se encontram deriva de oscilações da plataforma na superfície devido a agitações marítimas naturais (MORAIS, 2013). O movimento relativo entre a plataforma e o leito impõe esforços trativos oscilantes aos dutos que conectam os componentes do sistema (Figura 4).

Figura 4: Oscilações nos esforços trativos em decorrência de oscilações na superfície.



FONTE: o Autor

Devido à quantidade de componentes e à complexidade das interações entre eles em um duto flexível em operação, há grande diversidade de modos de falha. Tipicamente, a falha ocorre por uma sucessão de defeitos ou degradação que levam à perda de integridade, caracterizada pela perda de contenção, redução da capacidade de produção e aumento de riscos. Um mecanismo de falha pode ser um defeito único ou degradação que, individualmente, não necessariamente causam a falha do duto (SIMONSEN, 2014).

Os modos de falha considerados em avaliações de dutos flexíveis normalmente são:

- Colapso;
- Explosão;
- Falha em tração;
- Falha em compressão;
- Curvatura excessiva;
- Falha por torção;
- Erosão;
- Corrosão;
- Falha por fadiga.

No presente trabalho, as falhas por corrosão e por fadiga são as mais relevantes e são apresentadas com mais detalhes. Demais modos de falha são brevemente descritos.

Colapso

O colapso se caracteriza pela falha da camada de vedação interna, que cede à pressão ou tensão excessiva e deforma-se em direção ao interior do duto, prejudicando a vazão interna de fluido e a integridade estrutural do duto. Pode ocorrer devido a elevada tração nos fios da armadura de tração, que se deformam de maneira a restringir as camadas mais internas, assim como devido à pressão externa excessiva. Em ambos os casos, defeitos de fabricação como ovalização, erosão e corrosão podem contribuir significativamente para desenvolvimento da falha.

Explosão

Ao contrário do colapso, a explosão ocorre por pressão interna excessiva que faz com que os componentes do duto rompam em direção ao exterior do duto. Pode ocorrer devido a comprometimento da integridade estrutural do duto, ocasionado pela ruptura de fios da armadura de pressão. Assim como nas falhas por colapso, as falhas por explosão são afetadas por defeitos de fabricação, erosão e corrosão.

Explosão da capa externa

É possível também que a pressão interna na região anular do duto aumente por causa da difusão de gases no espaço anular oriundos do *bore*. Neste caso, o duto se mantém ainda íntegro, mas ocorre o ingresso de água do mar no espaço anular, acelerando a degradação das armaduras metálicas ali contidas.

Falha em tração

Devido às grandes solicitações em tração, oriundas do próprio peso do duto sobre as seções mais próximas à plataforma ou, ainda, eventos não previstos como arrasto de âncoras, os fios da armadura de tração podem vir a falhar estaticamente. Graças aos grandes coeficientes de segurança no projeto de dutos flexíveis, esta falha é pouco crítica.

Falha em compressão

Também conhecidas como gaiola-de-passarinho, ou *bird-caging*, as falhas ocasionadas por compressão no tubo derivam de esforços trativos nas camadas mais internas, oriundas de elevadas temperaturas dos fluidos transportados, restringidos pelo atrito com camadas mais externas ou forças de compressão. A expansão dos componentes mais internos, aliada a danos na camada externa de proteção, provoca a falha final. Mais rara em dutos novos, devido a materiais mais resistentes empregados em torno da armadura de tração.

Curvatura Excessiva

Na região de contato com o leito marinho (*touch-down*), o duto pode apresentar curvatura excessiva, que resulta em tensões elevadas de compressão

em um lado e de tração em outro. Estas tensões podem ser elevadas ao ponto de causar falhas como colapso ou ruptura. Também pode fazer com que as camadas intertravadas se soltem e a camada de proteção interna frature.

Falha por torção

Devido aos movimentos e oscilações da plataforma e seus componentes, muitas vezes os *risers* flexíveis são submetidos a esforços de torção, que, quando aplicados no mesmo sentido que o helicóide dos fios das armaduras de tração, causam constrição das camadas mais internas e falha por colapso e, quando aplicados em sentido contrário ao helicóide dos fios de tração, podem provocar abertura e destravamento dos fios.

A falha por torção pode também advir da ruptura de fios, helicoidais, da armadura de tração, o que força a estrutura a deformar-se para realinhar seus componentes e pode resultar na ruptura de camadas mais internas do duto.

Erosão

A erosão em dutos flexíveis ocorre quando partículas presentes no fluido transportado colidem com as paredes internas do *bore* e causam redução da seção da camada ao longo do tempo. Regiões curvadas e linhas que transportam gás são mais suscetíveis à erosão. Pode ser um fenômeno perigoso, quando remove partes da camada anti-corrosão, tornando o duto vulnerável ao colapso e ruptura devido ao efeito nocivo da corrosão.

Corrosão

As camadas de aço dos *risers* flexíveis podem sofrer danos por corrosão ao longo do período de operação, o que reduz significativamente a resistência dos materiais. Normalmente ocorre devido ao contato dos componentes metálicos com água do mar saturada de oxigênio (em águas rasas) ou outros contaminantes (proveniente da permeação do *bore* através da barreira de vedação interna), proveniente de uma eventual ruptura da camada de proteção externa ou por causa da difusão de fluidos transportados através da camada de pressão. O processo

corrosivo sozinho não costuma provocar a falha do duto, mas, quando aliado a altas tensões e carregamentos cíclicos, pode causar a ruptura de componentes.

Se a camada de proteção externa for danificada próximo ao topo do *riser* na superfície da água (*splash zone*), o espaço anular pode permanecer alagado com um suprimento constante de oxigênio e o processo corrosivo pode ocorrer de maneira acelerada. A corrosão afeta negativamente as propriedades do aço dos fios da camada de tração, reduzindo sua resistência e vida em fadiga, comprometendo a integridade do duto.

Falha por fadiga

A combinação de esforços variados, assim como a oscilação natural das tensões a que os dutos são submetidos pode resultar em falha por fadiga. Se as cargas no duto fossem aplicadas somente uma vez, os componentes as suportariam sem sofrer danos, mas, quando as tensões são impostas de maneira cíclica, componentes das diferentes camadas do duto flexível podem vir a falhar.

Praticamente todos os outros modos de falha contribuem para a redução da vida em fadiga de *risers* flexíveis. Danos na camada de proteção externa podem inundar o espaço anular e acelerar o processo de corrosão dos fios da armadura de tração, por exemplo, reduzindo significativamente a vida em fadiga. Raramente a falha por fadiga ocorre independente de outros mecanismos.

Fios da armadura de tração são particularmente suscetíveis a danos por fadiga, sobretudo em regiões do duto próximas a conectores (SIMONSEN, 2014).

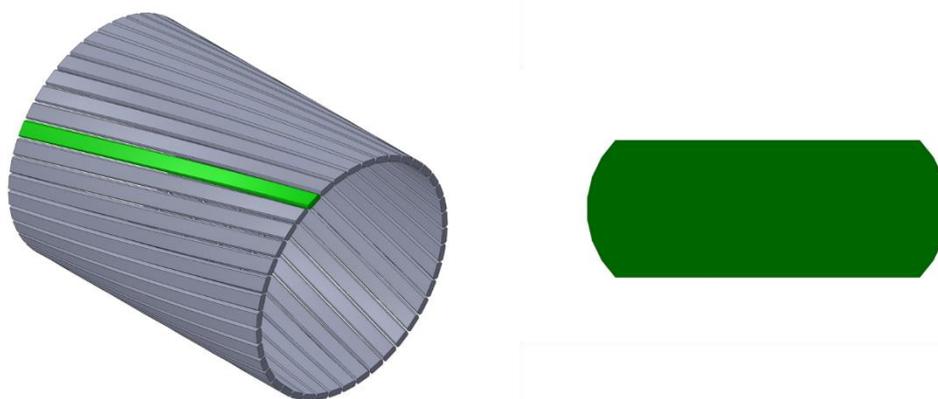
Por se tratar de um fenômeno complexo, envolvendo muitos componentes e variáveis, diversos modelos foram desenvolvidos com o intuito de prever o desempenho em fadiga de dutos flexíveis. Sobretudo, os fios da armadura de tração, devido à sua vulnerabilidade ao dano por fadiga e importância na integridade estrutural dos dutos, são foco de estudos e avaliações (LEMOS, 2005).

2.1.3 ARMADURAS DE TRAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS

As armaduras de tração de um duto flexível têm a função de suportar, primariamente, esforços de tração, flexão e torção devido às solicitações mecânicas dos *risers*. Têm também a função secundária de auxiliar no suporte de esforços

devido à pressão interna do fluido transportado. São compostas de fios, usualmente de aço carbono, dispostos de maneira helicoidal com passo longo e pequeno espaçamento. O número de fios que compõem as armaduras varia, geralmente ficando entre 30 e 80 unidades, dependendo das dimensões do duto e dos esforços previstos. As dimensões de cada fio individual também variam, mas suas seções normalmente são retangulares, com bordas arredondadas, de dimensões usualmente da ordem de 10 mm (FERGESTAD, 2014). A Figura 5 representa um trecho de uma armadura de tração e a seção transversal de um de seus fios.

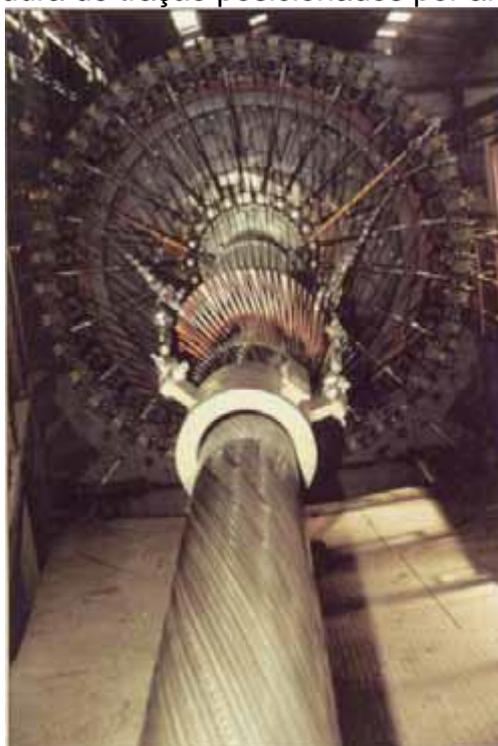
Figura 5: Representação de fios da armadura de tração e sua seção transversal.



FONTE: o Autor

As armaduras de tração são fabricadas por dispositivos denominados armadoras, que assentam os fios, tracionando-os a partir de bobinas e posicionando-os ao longo do duto. As armadoras funcionam em pares, formando as armaduras interna e externa de tração simultaneamente (SOUSA, 1999; SOUSA, 2005). A Figura 6 apresenta uma foto do processo de assentamento dos fios da armadura de tração em um *riser* flexível.

Figura 6: Fios da armadura de tração posicionados por armadora no duto flexível.



FONTE: SOUSA (1999)

Os fios são posicionados em ângulo de assentamento entre 20° e 55° , conferindo à linha flexibilidade e resistência à tração, mesmo que os fios venham a se deslocar ou deslizar devido a movimentos durante a operação (SOUSA, 2005).

2.1.4 FALHA DE FIOS DA ARMADURA DE TRAÇÃO

As falhas em fios da armadura de tração de dutos flexíveis ocorrem, principalmente, devido à fadiga originária dos carregamentos cíclicos na operação e à corrosão desenvolvida no meio em que os fios operam (LEMOS, 2005, NEGREIROS, 2016).

As armaduras de tração de *risers* flexíveis são projetadas para suportar cargas bastante acima das cargas previstas em operação, mas na presença de corrosão, defeitos de fabricação e outros fatores, a resistência mecânica destes componentes pode ser reduzida (SIMONSEN, 2014).

Quando os fios da armadura de tração de um *riser* encontram-se em condição de espaço anular alagado, ou seja, quando há permeação de fluidos devido à

ruptura de camadas de vedação, inicia-se um processo corrosivo. A degradação dos fios (Figura 7) e a presença de descontinuidades na superfície devido à corrosão, aliadas aos carregamentos dinâmicos da operação de um duto flexível podem resultar na fratura destes fios (SIMONSEN, 2014).

Figura 7: Fios da armadura de tração corroídos devido a ruptura de camada externa.



FONTE: Adaptado de SIMONSEN (2014)

2.2 FADIGA

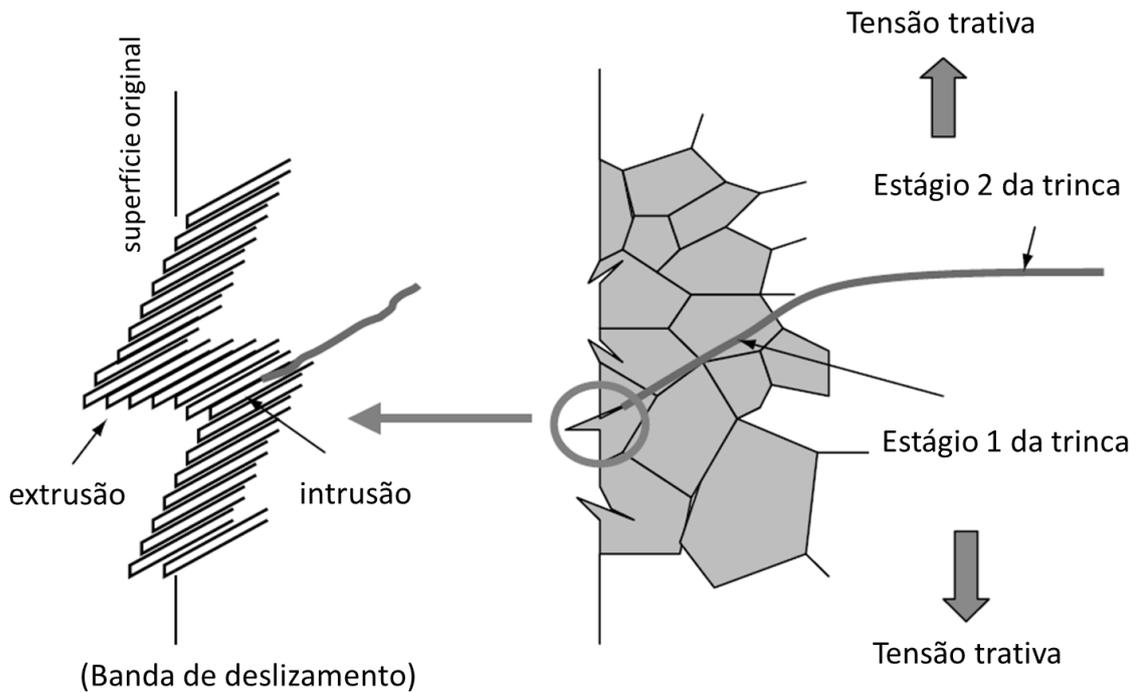
A fadiga pode ser definida como um processo de dano localizado proveniente de carregamento cíclico, consistindo em iniciação e propagação de trinca e eventual fratura de um componente (LEE, 2005). Uma característica importante da falha por fadiga é que pode ocorrer mesmo em tensões que, em carregamento estático, não levariam o componente à ruptura. Por esse motivo, a tensão de escoamento ou fratura de um material não é um parâmetro suficiente para determinar a adequação de um componente a um projeto. O fenômeno da fadiga é o principal responsável por falhas em componentes metálicos, com estimativas aproximando 90% dos casos de falha (CALLISTER, 2007).

Para que ocorra a falha por fadiga, é necessário que o componente seja submetido a um carregamento variável, podendo ser cíclico, flutuante ou aleatório. Devido à aplicação de *risers* flexíveis como sistemas de transporte de fluidos em operações de extração oceânicas, esses componentes são submetidos a cargas de tração flutuantes.

Trincas de fadiga têm início no plano de cisalhamento local em regiões de concentração de tensões, como bandas de deslizamento, inclusões, porosidades ou descontinuidades. O plano de cisalhamento local normalmente ocorre na superfície ou em contornos de grão do material. Uma vez nucleada a trinca e sob carregamento cíclico, a trinca tende a se propagar ao longo do plano de máximo cisalhamento e através do contorno de grão. O processo de nucleação pode ser dividido em dois estágios: o estágio I consiste na propagação inicial na ordem de alguns grãos no plano de máximo cisalhamento local. Neste estágio, a plasticidade da ponta da trinca é substancialmente afetada pelas características do deslizamento, tamanho de grão, orientação e nível de tensão, pois a trinca é de dimensões comparáveis à microestrutura local. O estágio II corresponde à propagação da trinca em dimensões maiores, normal ao plano de tensão trativa principal e na direção da máxima tensão cisalhante local. Neste estágio, as características da trinca são menos afetadas pela microestrutura, pois têm dimensões muito superiores aos elementos microestruturais. Normalmente, o período de iniciação ou nucleação de trinca corresponde à maior parte da vida em fadiga de aços, principalmente no regime de altos ciclos (acima de 10000 ciclos). Na fadiga de baixos ciclos (abaixo de

10000 ciclos), a maior parte da vida em fadiga corresponde à propagação da trinca (LEE, 2005). A Figura 8 apresenta uma representação gráfica do processo de nucleação e propagação inicial da trinca de fadiga.

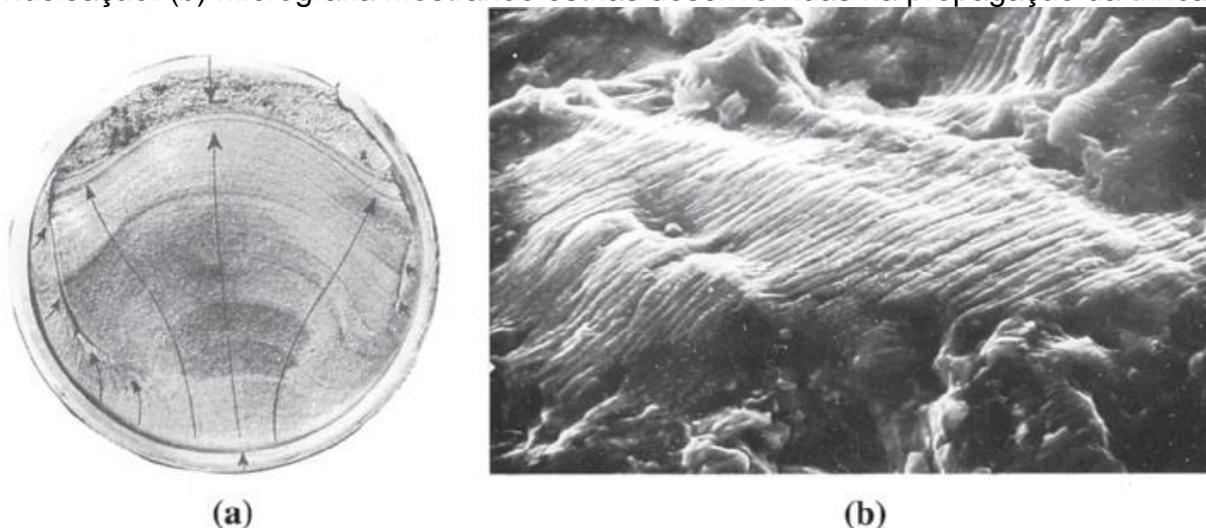
Figura 8: Representação dos estágios de nucleação e propagação de uma trinca de fadiga.



FONTE: adaptado de LEE (2005).

A identificação de uma falha por fadiga pode ser feita observando a superfície de fratura, caracterizada por uma região lisa próximo à origem da trinca, superfície rugosa na região de propagação e superfície fibrosa ou irregular correspondente aos estágios finais de propagação e fratura. Inspeções visuais e análises microscópicas costumam revelar “marcas de praia”, que podem ser formadas quando o carregamento cíclico é intermitente ou as cargas mudam. Estrias podem ser observadas, de dimensões menores que as marcas de praia, correspondendo à evolução da trinca em cada ciclo de carregamento (Figura 9). A presença de marcas de praia normalmente sugere falha por fadiga, mas ocasionalmente falhas por fadiga não apresentam tal característica (ASKELAND et al., 2011).

Figura 9: Superfície de uma fratura por fadiga. (a) Macrografia mostrando marcas de praia com setas indicando a direção de propagação da trinca a partir da região de nucleação. (b) Micrografia mostrando estrias desenvolvidas na propagação da trinca.



FONTE: ASKELAND et al. (2011)

Um componente submetido a carregamentos cíclicos pode falhar após determinado número de ciclos de carregamento. Quando submetido a carregamentos cíclicos mais elevados, o mesmo componente falhará após um número inferior de ciclos. Em resumo, o número de ciclos necessário para a falha por fadiga de um componente é inversamente proporcional ao carregamento aplicado. É possível construir gráficos que representem o comportamento de um componente, frente a carregamentos cíclicos, demonstrando a relação entre carregamento aplicado e o número de ciclos até a falha por fadiga. Estes gráficos são comumente chamados de “Curvas S-N”, por apresentarem o número de ciclos até a falha (N), em função da variação da amplitude de tensões (S). A amplitude de tensões, Equação (1), é definida como a diferença entre a tensão máxima desenvolvida no componente (σ_{\max}) e a tensão mínima (σ_{\min}), considerando-se um carregamento cíclico de amplitude, Equação (2), constante (σ_a). A tensão média (σ_m) é definida como a média entre a tensão máxima e mínima, Equação (3), e a razão de carregamento (R) é a razão entre a tensão mínima e a tensão máxima, Equação (4). A tensão em um componente pode ser calculada a partir das dimensões e solicitações ou determinada a partir de deformações medidas na superfície do componente (ASM, 2008). A Figura 10 apresenta uma representação gráfica de carregamentos cíclicos com os parâmetros de interesse.

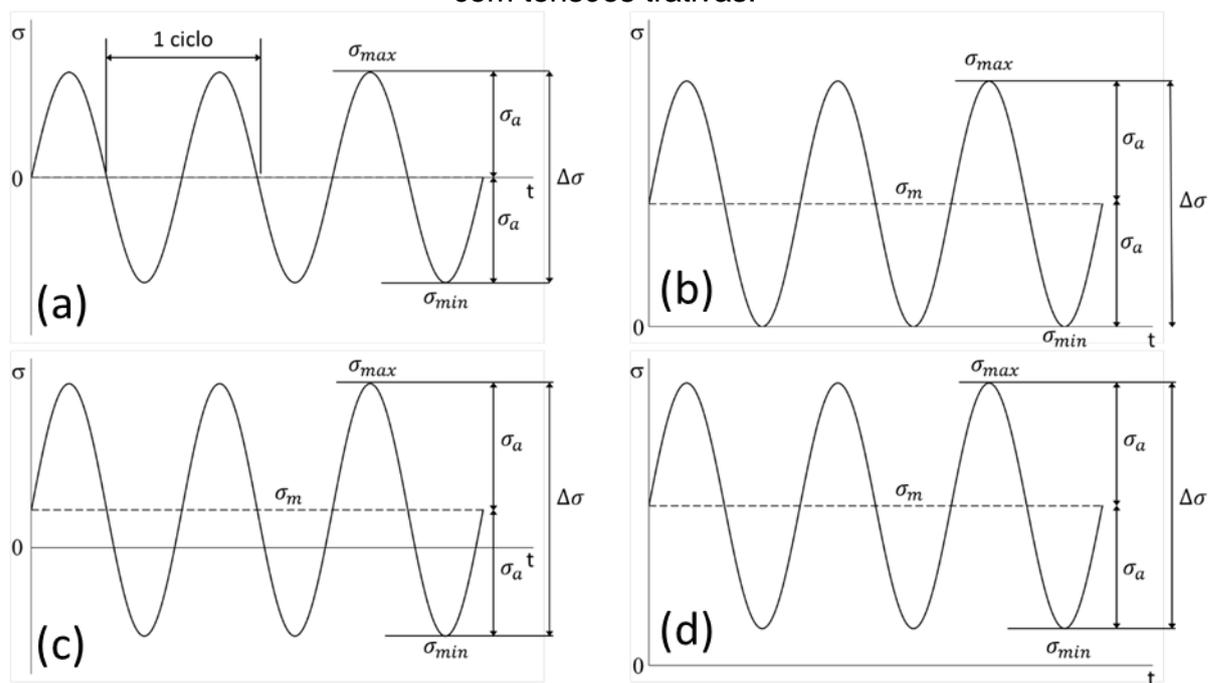
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_m = \frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4)$$

Figura 10: Representações gráficas de carregamentos cíclicos e seus respectivos parâmetros. (a) é um carregamento completamente reverso, com tensão média igual a zero; (b) é um carregamento com tensão mínima igual a zero; (c) é um carregamento com tensões mínimas compressivas; (d) é um carregamento apenas com tensões trativas.



FONTE: o Autor

A curva S-N construída a partir dos dados levantados pelos ensaios dinâmicos das amostras sem defeitos foi gerada em escala logarítmica, com base na Equação (5) e na Equação (6).

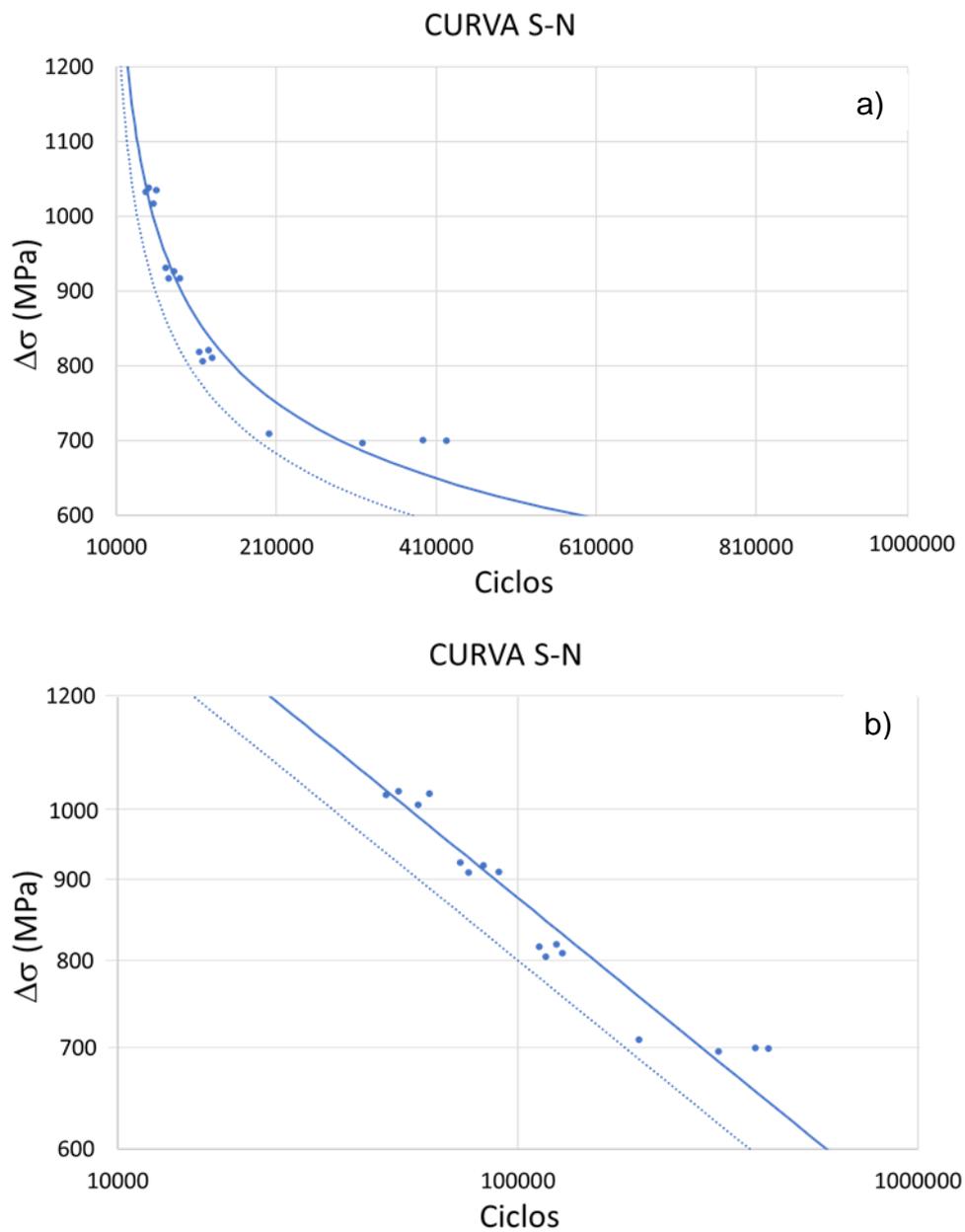
$$(\Delta\sigma)^m \cdot N = A \quad (5)$$

$$\log N = \log A - m \cdot \log(\Delta\sigma) \quad (6)$$

Onde N é o número de ciclos até a falha por fadiga, $\Delta\sigma$ é a variação de tensão aplicada, m é a inclinação da curva e A é o número de ciclos para $\Delta\sigma = 0$.

Devido à natureza do fenômeno de fadiga, um gráfico do tipo S-N com abcissas e ordenadas representadas de forma linear pode ser difícil de interpretar: a diferença entre o número de ciclos até a falha para níveis de tensão elevados (próximos à tensão de escoamento do material) pode ser insignificante quando comparada com a diferença entre os “N”s de “S”s menores. Para melhor visualizar os efeitos dos níveis de tensão no número de ciclos até a falha por fadiga, as curvas S-N costumam ser apresentadas em escala logarítmica, de base 10, tanto para o eixo das tensões quanto para o eixo do número de ciclos (DOWLING, 2013). A diferença de visualização entre uma curva S-N representada com eixos em escala linear e representada com eixos em escala logarítmica é ilustrada na Figura 11.

Figura 11: Exemplo ilustrando a diferença de visualização de uma curva S-N em escala linear (a) e uma curva em escala logarítmica (b).



FONTE: o Autor

2.3 CORROSÃO

Corrosão é a deterioração de um material exposto à ação química ou eletroquímica de um meio, com a presença ou não de esforços mecânicos. É um processo que afeta a durabilidade e desempenho especialmente dos materiais metálicos (GENTIL, 1996), podendo fazer com que componentes falhem e aumentando os riscos de acidentes.

Dependendo das condições de operação, dos elementos presentes na atmosfera e da suscetibilidade do material, diferentes tipos de corrosão podem ser observados em componentes metálicos. Fios da armadura de tração de *risers* flexíveis retirados de operação, quando corroídos, apresentavam três tipos principais de corrosão: generalizada, por frestas e em pites (NEGREIROS, 2016; BARNES, 2014).

CORROSÃO UNIFORME

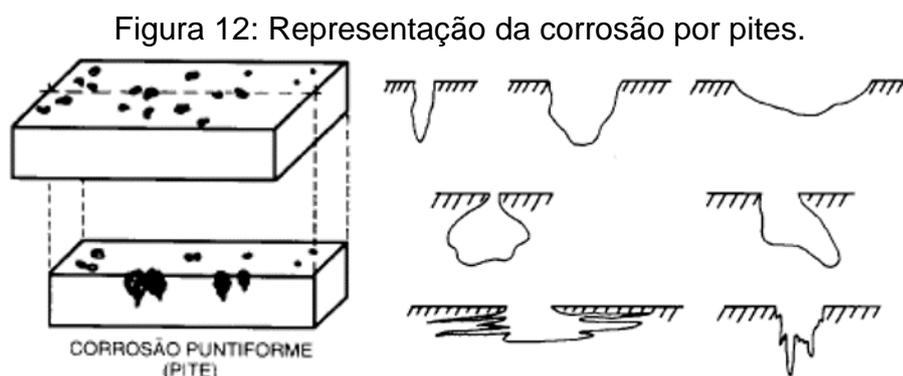
Também chamada de corrosão generalizada, a corrosão uniforme se caracteriza pela oxidação da superfície, reduzindo a espessura de maneira uniforme (GENTIL, 1994). Apesar de representar uma redução da seção resistente dos componentes metálicos de um duto flexível, a corrosão generalizada não é a mais crítica. É raro um duto falhar unicamente por este mecanismo (SIMONSEN, 2014).

CORROSÃO POR FRESTAS

A corrosão eletroquímica pode ocorrer como consequência da diferença de concentrações de íons ou gases dissolvidos na solução eletrolítica e entre regiões do mesmo componente metálico. Neste caso, a corrosão acontece na região de menor concentração. A corrosão por frestas, então, origina-se em frestas, reentrâncias ou sob depósitos de sujeira e produtos de corrosão em regiões onde a solução torna-se estagnada e há diminuição local de oxigênio dissolvido. A fresta deve ser grande o suficiente para que haja penetração da solução, mas estreita a ponto de promover estagnação (CALLISTER, 2007).

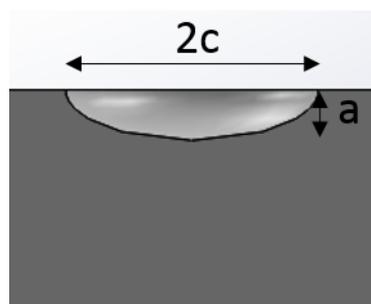
CORROSÃO POR PITES

A corrosão por pites, ou puntiforme, caracteriza-se por pequenos pontos ou zonas corroídas, com cavidades de profundidade maior que o diâmetro e fundo arredondado ou angular (GENTIL, 1996). As cavidades, também chamadas de “pites”, apresentam diversas geometrias e dimensões, como representado na Figura 12, podendo, inclusive, ter formas extremamente irregulares sob a superfície metálica. Normalmente, uma superfície metálica afetada por corrosão por pites é avaliada, visualmente, conforme a densidade de cavidades, seu tamanho médio e sua distribuição. Para aferir sobre a profundidade dos pites, pode ser necessário remover material da superfície ou cortar o objeto corroído de maneira a expor a seção transversal das cavidades. Quando é necessário manter a integridade do objeto analisado, pode-se determinar as profundidades dos pites através de técnicas de ensaio não destrutivo, como raios-X e ultrassom. Estas técnicas, contudo, não são eficazes na identificação de pites muito pequenos (ASTM, 2005). Independentemente do tipo de análise realizada, os fatores mais importantes são: número de pites por unidade de área (densidade de pites), diâmetro ($2c$) e profundidade (a), apresentados na Figura 13.



FONTE: GENTIL (1996)

Figura 13 : Dimensões de um pite de corrosão.



FONTE: o Autor

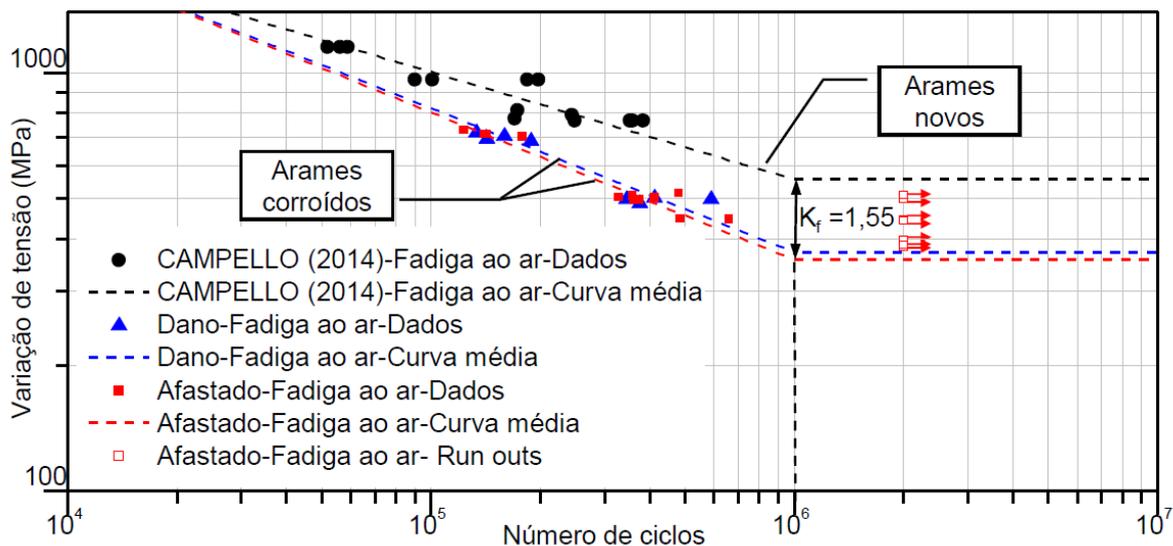
Logo após fabricado, o espaço anular de um duto flexível permanece preenchido por ar atmosférico, mas durante a operação, pode haver a presença de outras substâncias. Dependendo das condições de operação e da integridade das camadas mais externas, é possível que haja água do mar, água permeada, sulfeto de hidrogênio (H_2S) ou dióxido de carbono (CO_2), oriundos da penetração de água do mar externa ou da difusão de substâncias no *bore* interno. Estas substâncias promovem corrosão acelerada nos fios da armadura de tração, sobretudo na forma de pites (BERGE, 2014).

Em *risers* retirados de operação, assim como em testes desenvolvidos em laboratório, foram observados pites de corrosão nos fios da armadura de tração com dimensões da ordem de 500 a 2000 μm de diâmetro e de 50 a 300 μm de profundidade (BERGE, 2014; BARNES, 2014; KRISHNAN, 2014, GONÇALVES, 2018). Para simplificação da geometria dos pites analisados, que podem ter formas variadas, como apresentado na Figura 12, estes são aproximados por furos semielípticos na superfície dos fios.

A presença de pites de corrosão pode afetar significativamente o desempenho de um componente em fadiga. Isso ocorre porque os pites agem como concentradores de tensão, diminuindo a tensão necessária para propagação de trincas e eventual falha por fadiga (DOWLING, 2013).

NEGREIROS (2016) obteve um coeficiente de redução da tensão de limite de fadiga (k_f) igual a 1,55 para fios corroídos, com a presença de pites de corrosão de diâmetro médio de 270 μm e profundidade média de 85 μm , aproximadamente, comparado com o desempenho em fadiga de fios sem degradação superficial. No nível de tensão igual a 700 MPa, isso corresponde a uma redução de aproximadamente 70% do número de ciclos até a falha por fadiga (Figura 14).

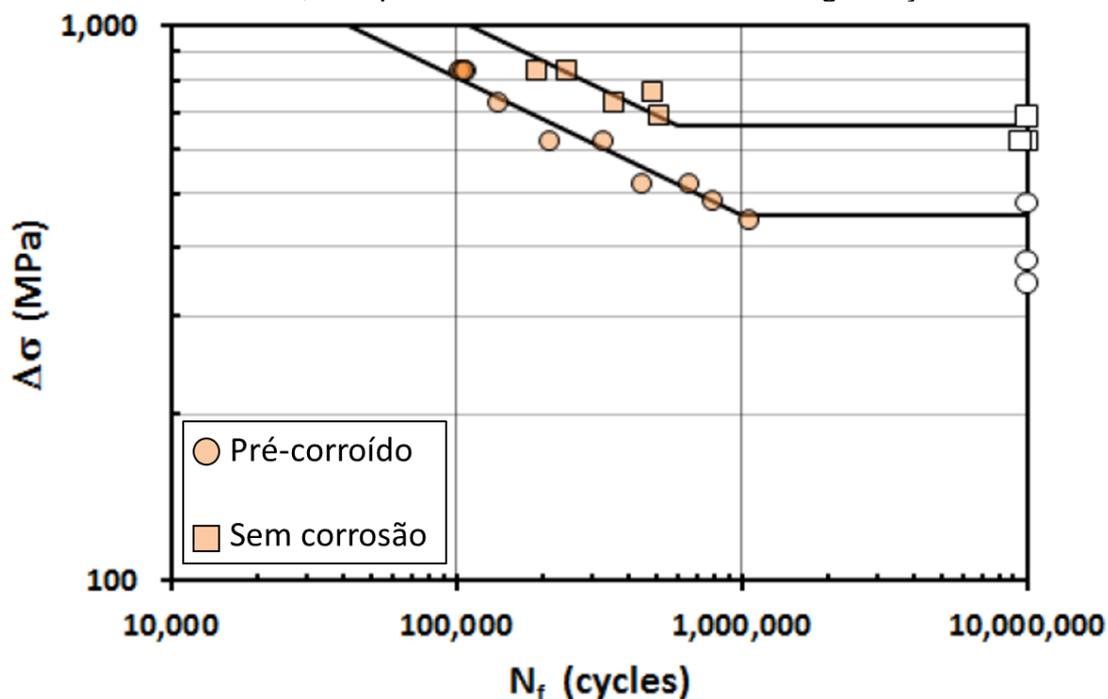
Figura 14: Comparação do desempenho em fadiga de fios com degradação superficial e fios sem defeitos.



FONTE: NEGREIROS (2016), CAMPELLO (2014)

KRISHNAN (2017) comparou o desempenho em fadiga de fios com defeitos superficiais produzidos por eletroerosão de 1000 μm de diâmetro e 300 μm de profundidade, obtendo uma redução de aproximadamente 65% na vida em fadiga em nível de tensão de 700 MPa (Figura 15).

Figura 15: Gráfico de ensaios em fadiga de amostras com pites gerados por eletroerosão, comparados com amostras sem degradação.



FONTE: Adaptado de KRISHNAN (2017)

2.4 SENSIBILIDADE AO ENTALHE

Descontinuidades geométricas alteram localmente a distribuição de tensões, ampliando-as e afetando negativamente o desempenho em fadiga (DOWLING, 2013). Chamadas de entalhes, estas descontinuidades impõem um fator de concentração de tensões, k_t , definido como a razão entre a tensão local no entalhe (σ) e a tensão nominal (S), conforme Equação (7):

$$k_t = \frac{\sigma}{S} \quad (7)$$

O efeito da presença de um entalhe na vida em fadiga de um componente está associado a um fator de concentração de tensão em fadiga devido a entalhe, k_f . Este fator é definido como a razão entre a tensão devido a esforços alternados em um componente com entalhe (σ_{ar}), e a tensão devido a esforços alternados em um componente liso (S_{ar}) conforme Equação (8):

$$k_f = \frac{\sigma_{ar}}{S_{ar}} \quad (8)$$

Devido à presença de pites na superfície dos fios, as tensões não são uniformes nas proximidades destes pites, que agem como descontinuidades e induzem a concentração de tensões. Assumindo que os pites possuem geometria semielíptica, é possível estimar um fator de concentração de tensão que multiplica as tensões próximo à curvatura no fundo do pite (DOWLING, 2013; JAKUBOWSKI, 2015).

Na estimativa do fator k_t devido à presença de pites de corrosão na superfície do componente, a geometria dos pites deve ser considerada: o fator de concentração de tensões é dependente do diâmetro ($2c$), da profundidade (a) e o raio de curvatura (ρ) dos pites. O raio de curvatura é um fator geométrico determinado por: $\rho = \frac{c^2}{a}$.

Para o cálculo do fator de concentração de tensões devido à presença dos pites, CERIT, et al. (2009) obtiveram um modelo analítico, a partir de simulações numéricas pelo método dos elementos finitos. Considerando as dimensões principais de um pite semielíptico, localizado na superfície, o fator de concentração de tensões (k_t), pode ser estimado pela Equação (9):

$$k_t = \frac{1+6,6\cdot\left(\frac{a}{2c}\right)}{1+2\cdot\left(\frac{a}{2c}\right)} \quad (9)$$

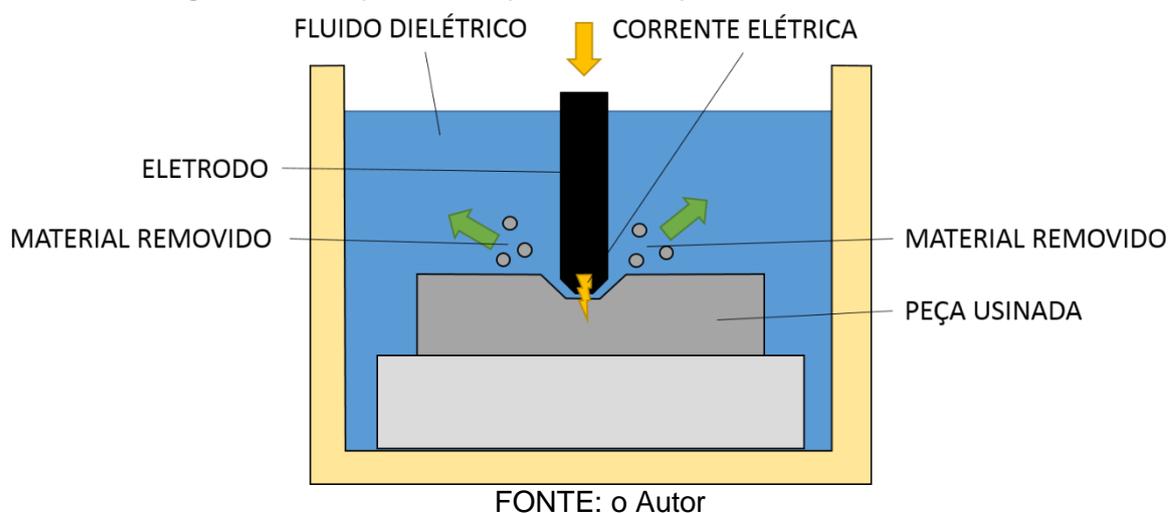
A presença de concentradores de tensão na superfície, quando submetida a esforços cíclicos de tração, tem o potencial de reduzir a vida em fadiga de componentes. Defeitos superficiais, descontinuidades e corrosão são responsáveis por falhas em componentes por acelerarem o processo de nucleação e propagação de trincas por fadiga, afetando negativamente o desempenho (BERGE et al., 2014; BARNES, 2014; GONÇALVES 2018, NEGREIROS, 2016).

2.5 CORROSÃO INDUZIDA

O processo de eletroerosão consiste na remoção de material e obtenção de geometrias através de descargas elétricas. Não há contato físico entre a peça produzida e o eletrodo, que age como uma ferramenta de desbaste em um processo convencional de usinagem. Na eletroerosão, cavidades são produzidas como um “negativo” do eletrodo, sendo possível controlar a geometria das cavidades pelo controle da geometria do eletrodo: um eletrodo cilíndrico produz cavidades de seção circular de diâmetro próximo ao diâmetro do eletrodo.

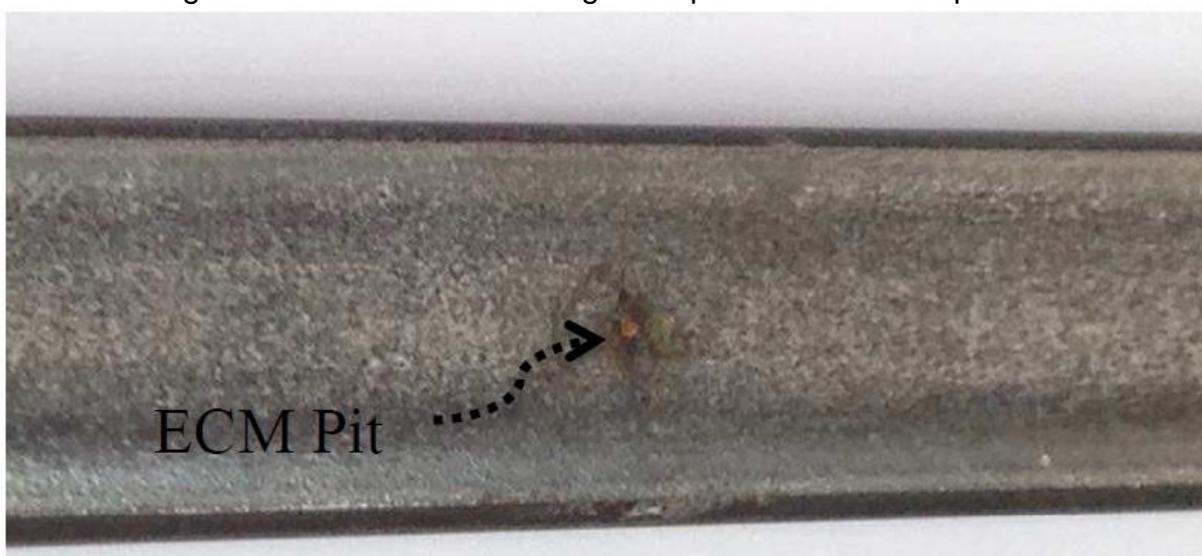
Resumidamente, o material é removido aquecendo-o pela passagem de corrente elétrica, o que funde ou sublima o metal base, produzindo partículas que depois são removidas pela renovação de fluido dielétrico na superfície da peça (BABU, 2016). O processo é esquematizado na Figura 16.

Figura 16: Esquema simplificado do processo de eletroerosão



A superfície de um fio submetido ao processo de eletroerosão para obtenção de pites artificiais é semelhante ao que foi obtido por KRISHNAN, 2016, mostrado na Figura 17.

Figura 17: Pite artificialmente gerado por método eletroquímico.



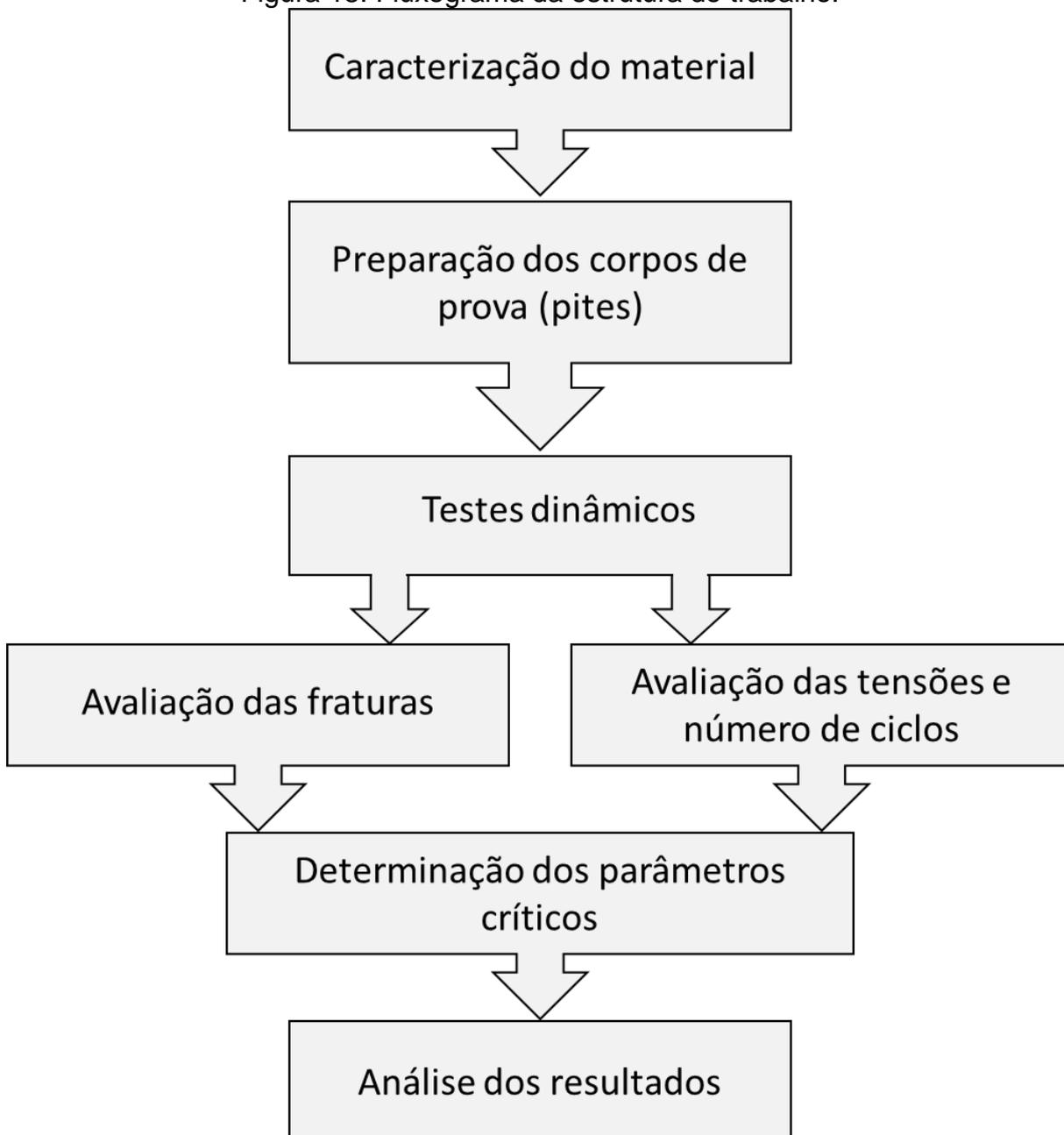
FONTE: KRISHNAN (2016)

Segundo BERGE (2014) e KRISHNAN (2016), as dimensões características de pites de corrosão observados em fios de *risers* ficam em torno de 1000 μm para o diâmetro e aproximadamente 100 μm para a profundidade, em média. Além das dimensões características dos pites de corrosão, foi observado que fios retirados de operação não costumam apresentar redução significativa de seção devido à corrosão.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A estrutura do trabalho consiste, basicamente, da caracterização inicial do material utilizado nas amostras de fios, preparação dos corpos de prova conforme variados parâmetros de pites de corrosão, testes de fadiga dinâmicos, avaliação das fraturas e determinação dos fatores críticos à falha por fadiga. A Figura 18 mostra em um fluxograma as etapas que compõem o trabalho.

Figura 18: Fluxograma da estrutura do trabalho.



FONTE: o Autor

3.1 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

O Planejamento de Experimentos (em inglês, *Design of Experiments*, ou *DOE*) consiste em técnicas estatísticas para o estudo do efeito de múltiplos fatores em variáveis de controle. Basicamente, o *DOE* tem por objetivo correlacionar uma grandeza com fatores que a afetam simultaneamente.

Por exemplo, os efeitos da chuva, fertilizante, água e exposição ao sol na produção de uma lavoura. Dentre os fatores múltiplos (chuva, fertilizante, água e sol), todos afetam de forma simultânea a variável, ou grandeza, de saída: a safra total (ROY, 1990).

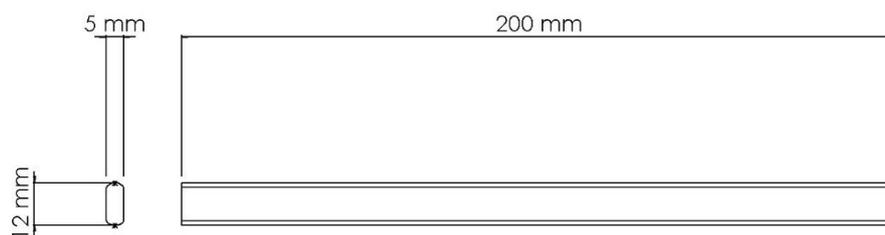
Sobretudo, o planejamento de experimentos pode ajudar a determinar, dentre os fatores investigados, quais têm efeito mais significativo na grandeza controlada. Esta informação permite priorizar ações de controle com relação aos fatores mais influentes, reduzindo significativamente a necessidade de tempo e recursos para monitoramento e modificação do processo (ROY, 1990).

Com o objetivo de reduzir o número de ensaios necessário para estabelecer uma correlação entre os parâmetros dos pites de corrosão e o desempenho em fadiga de amostras dos fios de tração, o método de Taguchi foi empregado, em que os parâmetros são organizados por níveis e cria-se um arranjo ortogonal que estabelece a influência da variação dos níveis de cada parâmetro no desempenho em fadiga (i. e. número de ciclos até a falha) (KARNA, 2012).

3.2 AMOSTRAS

Para execução dos ensaios de fadiga, foram preparadas amostras de 200 mm de comprimento, cortadas a partir dos fios de tração de um duto flexível. Os fios eram novos, ou seja, não haviam sido submetidos a esforços ou ambientes corrosivos. As amostras possuíam seção aproximadamente retangular, com 5 mm de espessura e 12 mm de largura, como mostrado na Figura 19.

Figura 19: Dimensões das amostras utilizadas nos ensaios.



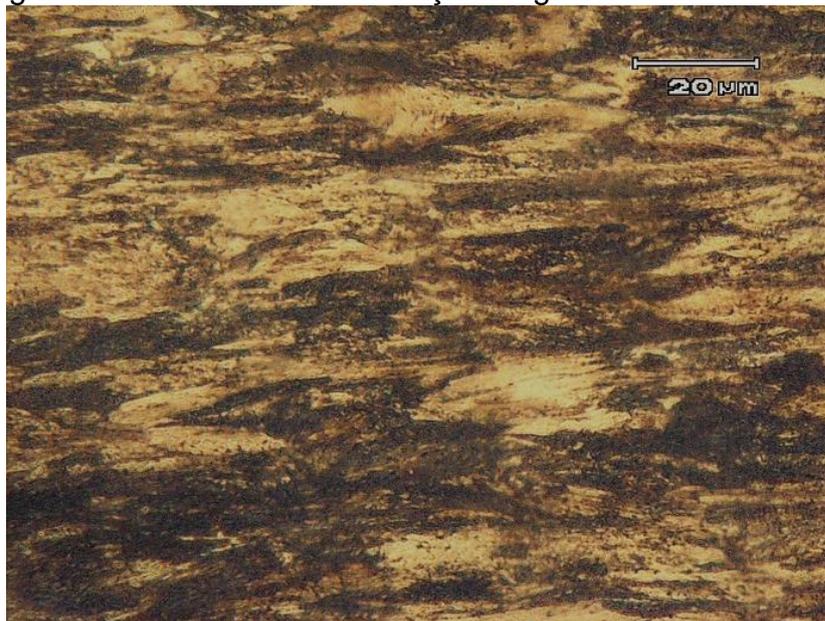
FONTE: o Autor

3.2.1 CARACTERIZAÇÃO METALGRÁFICA

A análise microestrutural do componente foi realizada nas seções longitudinal e transversal. A amostra foi preparada para observação mediante embutimento em resina termofixa, lixamento e polimento. Para revelar a microestrutura foi realizado o ataque com reativo de Nital 2% (ASTM E3 2011). A observação foi efetuada através de Microscopia Óptica utilizando-se um microscópio marca Olympus, modelo *BX 51 M* com as micrografias obtidas através de câmera digital acoplada ao microscópio.

A análise metalográfica revelou uma microestrutura perlítica com grãos deformados no sentido de laminação dos fios, conforme observação feita em um corte longitudinal (Figura 20) e microestrutura perlítica não deformada em observação feita em corte transversal (Figura 21).

Figura 20: Microestrutura da seção longitudinal das amostras.



FONTE: o Autor

Figura 21: Microestrutura da seção transversal das amostras.



FONTE: o Autor

A observação por microscopia óptica foi baseada na Norma ASTM E45 e não revelou inclusões e a composição química do fio, obtida através de espectrometria de emissão óptica, é apresentada na Tabela 1, revelando similaridades a um aço SAE 1080.

Tabela 1: Composição química das amostras.

Elemento	% (em massa)
C	0,813
Si	0,259
Mn	0,887
P	< 0,001
S	0,01
Cr	0,0229
Mo	< 0,005
Ni	0,0215
Al	< 0,001
Co	< 0,01
Cu	< 0,01
Nb	0,0037
Ti	< 0,001
V	< 0,001
W	< 0,01
Pb	< 0,002
Sn	0,0023
B	0,001
Fe	< 98,0

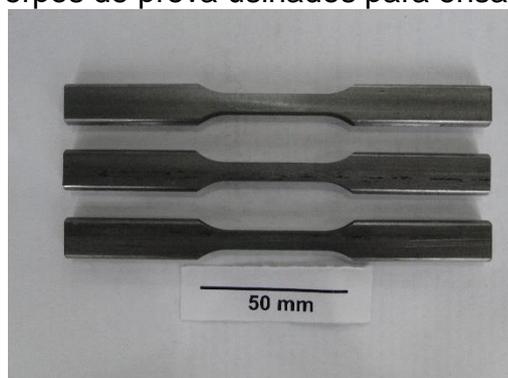
FONTE: o Autor

3.2.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Para obtenção das propriedades de limite de resistência ao escoamento e limite de resistência à tração, foram realizados ensaios de tração conforme a norma ASTM E 8M-04.

Os corpos de prova foram preparados a partir da usinagem de trechos de fio, adequando suas dimensões às especificadas pela norma, conforme Figura 22.

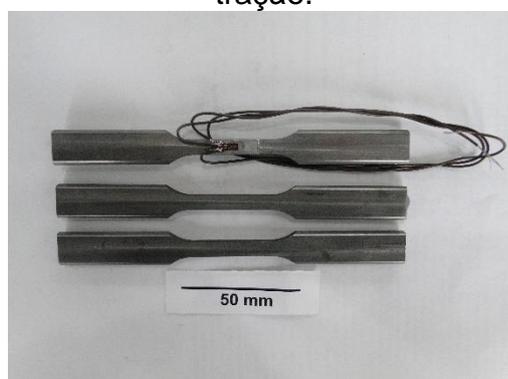
Figura 22: Corpos de prova usinados para ensaios de tração.



FONTE: o Autor

Com o objetivo de registrar as deformações dos corpos de prova durante a aplicação das tensões, foram utilizados extensômetros de resistência uniaxiais (*strain-gauges*), aderidos a uma das superfícies de cada corpo de prova, na região de seção reduzida, conforme Figura 23.

Figura 23: Instrumentação de um dos corpos de prova utilizados no ensaio de tração.



FONTE: o Autor

O ensaio de tração foi realizado em uma máquina eletromecânica marca Instron modelo 5585H. A taxa de deslocamento da máquina foi de 0,375 mm/min e a base de medida (L_0) para determinação do alongamento foi de 25 mm. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos para os limites de escoamento e de resistência à tração, assim como o alongamento, dos corpos de prova ensaiados. Os resultados obtidos, sobretudo o limite de escoamento, foram posteriormente utilizados para determinação dos patamares de tensão aplicados nos ensaios de fadiga.

Tabela 2: Resultados obtidos de ensaios de tração dos corpos de prova.

Amostra	Limite de escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%) ($L_0 = 25$ mm)
1	1287	1473	16,5
2	1276	1473	16,4
3	1281	1476	16,8

FONTE: o Autor

3.2.3 CARACTERIZAÇÃO SUPERFICIAL

Para caracterização superficial das amostras utilizadas nos ensaios em fadiga, foi utilizado um *Profilômetro 3D ContourGT-X* da marca *Bruker*.

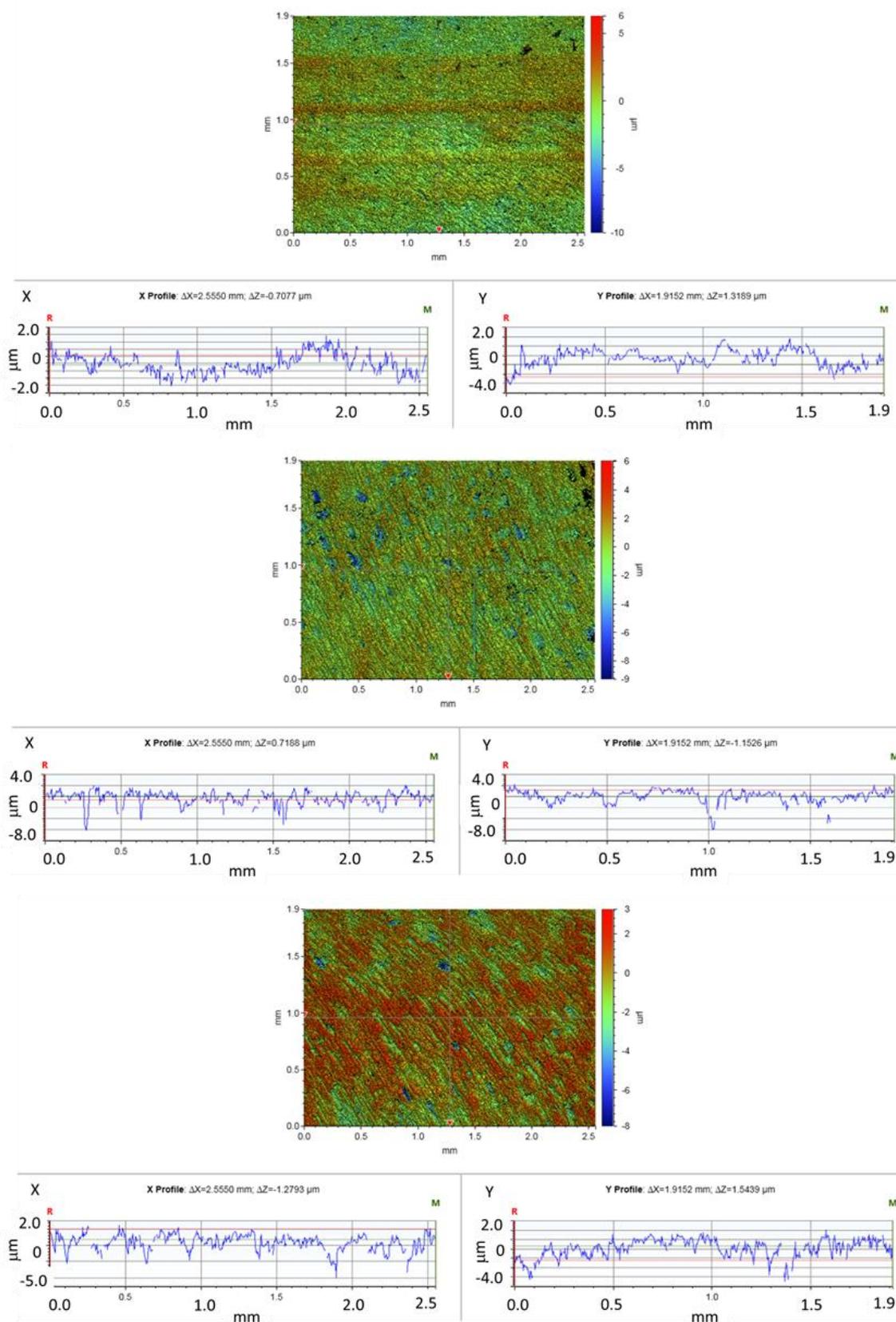
As amostras foram analisadas por interferometria, de forma a obter imagens indicando a qualidade das superfícies. A análise foi feita nas amostras antes e depois do processo de eletroerosão, de forma a permitir sua avaliação.

No caso das amostras sem defeitos, 3 foram selecionadas aleatoriamente e colocadas no interferômetro, para averiguar a uniformidade da superfície. Em cada uma das duas faces planas de cada corpo de prova, 5 pontos foram selecionados aleatoriamente para a interferometria. A análise revelou pouca variação e baixa rugosidade das superfícies.

A Figura 24 mostra exemplos de perfis de superfícies planas dos corpos de prova, obtidos por interferometria na região do meio de cada superfície, enquanto a Figura 25 mostra exemplos de perfis de superfícies de borda.

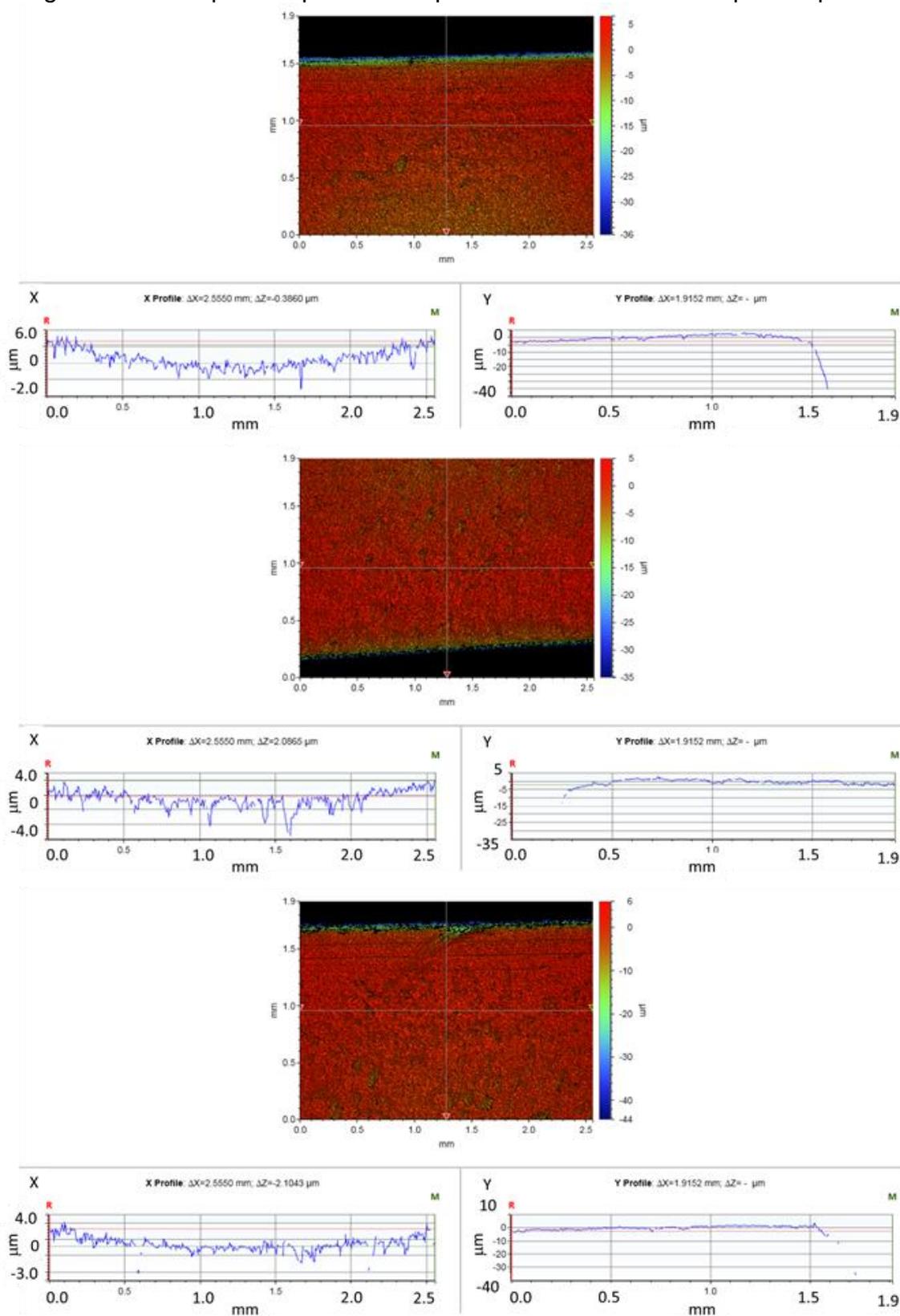
Considerando a escala dos gráficos de perfil superficial, é possível observar que as superfícies não apresentavam defeitos ou descontinuidades significativas.

Figura 24: Exemplos de perfis de superfícies planas dos corpos de prova.



FONTES: o Autor

Figura 25: Exemplos de perfis de superfícies de borda dos corpos de prova



FONTE: o Autor

A rugosidade superficial foi posteriormente medida com um rugosímetro modelo *SJ-210* da marca *Mitutoyo*, em quatro pontos da superfície plana de quatro amostras selecionadas aleatoriamente, obtendo-se os parâmetros da Tabela 3.

Os parâmetros R_a e R_t foram medidos, conforme definidos pela norma ISO 4287 (1997). R_a (Equação (10)) é um parâmetro que se refere à média de picos e vales em relação à linha média do perfil. R_t é um parâmetro definido pela soma das distâncias do pico mais elevado e do vale mais profundo em relação à linha média do perfil.

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (10)$$

Tabela 3: Parâmetros de rugosidade das amostras analisadas.

Amostra	Ponto	R_a (μm)	R_t (μm)
1	1	0,265	4,329
	2	0,275	3,333
	3	0,279	3,713
	4	0,345	2,726
2	1	0,42	2,946
	2	0,502	9,562
	3	0,325	4,582
	4	0,562	6,244
3	1	0,496	3,952
	2	0,536	7,514
	3	0,617	4,134
	4	0,436	6,188
4	1	0,345	6,47
	2	0,326	2,748
	3	0,529	5,256
	4	0,461	4,005
Médias		0,4199	4,856

FONTE: o Autor

Os parâmetros de rugosidade obtidos são próximos dos obtidos por COSER, 2016, na condição de fios não revestidos, que obteve R_a média de 0,41 μm e R_t

média de 5,03 μm . GONÇALVES, 2018, obteve R_a média de 0,32 μm e R_t média de 3,53 μm em fios novos sem corrosão e NEGREIROS, 2016, encontrou R_a média de 0,42 μm e R_t média de 4,51 μm em fios sem corrosão retirados de campo.

3.3 GEOMETRIA DOS PITES

As características da corrosão que se julgou mais relevantes para a confecção de amostras representativas foram: diâmetro do pite, profundidade do pite, quantidade total de pites e localização dos pites na superfície da amostra. Como o intuito dos ensaios era correlacionar o desempenho em fadiga com o tipo de dano mais comumente observado em campo, as dimensões dos pites de corrosão foram definidas com base em observações e caracterizações de fios da armadura de tração de *risers* que permaneceram em operação sob condições e períodos capazes de originar danos por corrosão (CAMPELLO, 2014; BERGE, 2014; NEGREIROS, 2016). Dos atributos analisados, apenas a quantidade total de pites não provém de observações em campo, que determinaram a presença de pites de corrosão da ordem de dezenas ou até mesmo centenas em um único fio (BERGE, 2014). As quantidades estabelecidas têm por objetivo elucidar os efeitos da proximidade entre dois ou mais pites, observando a interação entre os pites individuais na vida em fadiga e falha final das amostras. A Tabela 4 apresenta os valores de cada atributo relevante ao estudo.

Tabela 4: Características dos pites de corrosão nas amostras para ensaio de fadiga e respectivos níveis.

Nível	Característica			
	Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
1	100	500	1	Centro
2	200	1000	2	Aresta
3	300	1500	3	-

FONTE: o Autor

No total, 54 combinações de atributos são possíveis, oriundos da permutação simples entre 3 características com 3 níveis de variáveis e 1 característica com 2

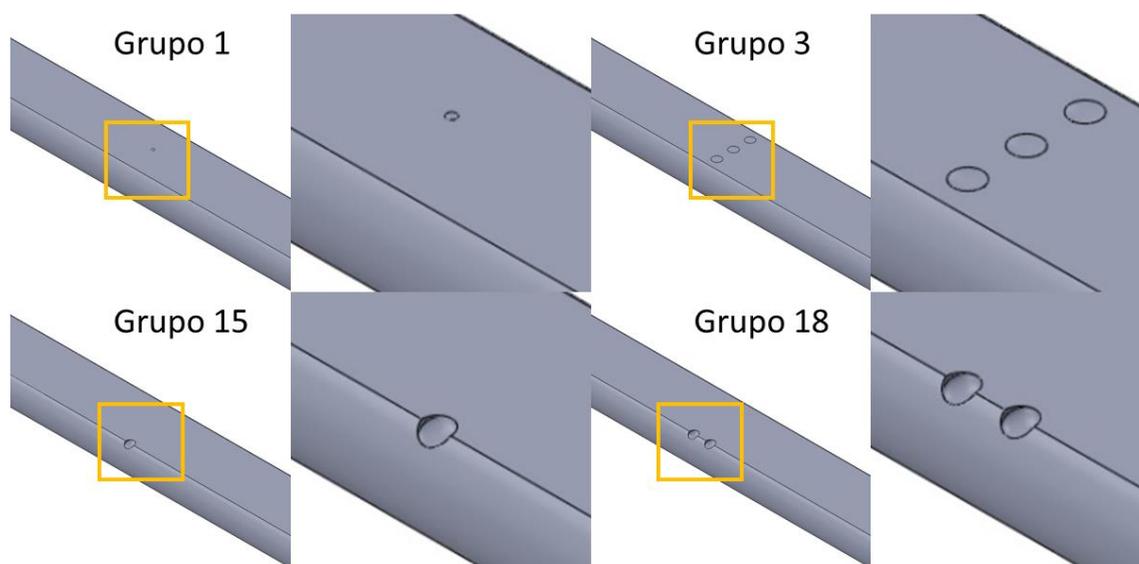
níveis. A fim de determinar quais características têm efeito mais significativo na vida em fadiga, assim como reduzir significativamente a quantidade total de ensaios, o método de planejamento de experimentos de Taguchi foi utilizado (KUMAR, 2017; ROY, 1990).

Pelo método de Taguchi, um experimento com 4 variáveis, 3 em 3 níveis e 1 em 2 níveis, pode ser reduzido a 18 combinações. A partir destas 18 combinações de variáveis em diversos níveis, é possível determinar quais características alteram mais significativamente o desempenho em fadiga das amostras artificialmente preparadas, permitindo assim um estudo dos efeitos dos pites de corrosão com um número reduzido de ensaios.

Para identificação e organização, as amostras foram separadas em “grupos”, cada qual correspondendo a uma combinação de diâmetro de pite, profundidade de pite, quantidade de pites e localização na superfície da amostra. Por exemplo, o Grupo 1 é composto por amostras com 1 pite, localizado na face plana, com diâmetro de 500 μm e profundidade de 100 μm ; o Grupo 5 é composto por amostras com 2 pites, localizados na superfície plana, com diâmetro de 1000 μm e profundidade de 200 μm ; o Grupo 13 é composto por 2 pites, localizados na aresta, com diâmetro de 500 μm e profundidade de 200 μm . A Figura 26 apresenta alguns exemplos de amostras com pites e a

Tabela 5 contém os parâmetros de cada grupo de amostras.

Figura 26: Exemplos de Amostras com variações em posição, profundidade, diâmetro e quantidade dos pites.



FONTE: o Autor

Tabela 5: Parâmetros dos grupos de amostras com pites produzidos por eletroerosão.

Grupo	Profundidade - a (μm)	Diâmetro - 2c (μm)	Quantidade	Localização
1	100	500	1	Centro
2	100	1000	2	Centro
3	100	1500	3	Centro
4	200	500	1	Centro
5	200	1000	2	Centro
6	200	1500	3	Centro
7	300	500	2	Centro
8	300	1000	3	Centro
9	300	1500	1	Centro
10	100	500	3	Aresta
11	100	1000	1	Aresta
12	100	1500	2	Aresta
13	200	500	2	Aresta
14	200	1000	3	Aresta
15	200	1500	1	Aresta
16	300	500	3	Aresta
17	300	1000	1	Aresta
18	300	1500	2	Aresta

FONTE: o Autor

Nas amostras com mais de 1 pite na superfície, a distância entre a borda dos pites foi estabelecida em torno de 1000 μm . Esta distância foi definida para que o processo de eletroerosão fosse capaz de produzir os defeitos sem alteração na geometria de defeitos próximos e para que os defeitos da face plana não ficassem muito próximos das arestas do fio.

3.4 ESTIMATIVA DO FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Conforme descrito na Seção 2.4 – SENSIBILIDADE AO ENTALHE, é possível estimar um fator de concentração de tensão nas proximidades dos pites, que agem como entalhes. Os pites foram considerados como entalhes semi-elípticos na superfície dos fios e o fator k_t foi calculado conforme Equação (9). Para cada geometria de pite, um fator k_t foi obtido, conforme Tabela 6:

Tabela 6: Fatores de concentração de tensão para as geometrias estabelecidas dos pites.

Grupo	a (mm)	2c (μ m)	k_t
1	100	500	1,66
2	100	1000	1,38
3	100	1500	1,27
4	200	500	2,02
5	200	1000	1,66
6	200	1500	1,48
7	300	500	2,25
8	300	1000	1,86
9	300	1500	1,66
10	100	500	1,66
11	100	1000	1,38
12	100	1500	1,27
13	200	500	2,02
14	200	1000	1,66
15	200	1500	1,48
16	300	500	2,25
17	300	1000	1,86
18	300	1500	1,66

FONTE: o Autor

3.5 ENSAIOS DE FADIGA

Com o objetivo de avaliar os efeitos das diferentes geometrias dos pites de corrosão em fios da armadura de tração, foram realizados ensaios de fadiga ao ar, pelo método da flexão a quatro pontos, seguindo a norma ASTM E739. Como os

parâmetros de desempenho em fadiga haveriam de ser comparados entre as diferentes configurações de pites de corrosão, apenas um nível de tensões foi aplicado para cada conjunto de corpos de prova.

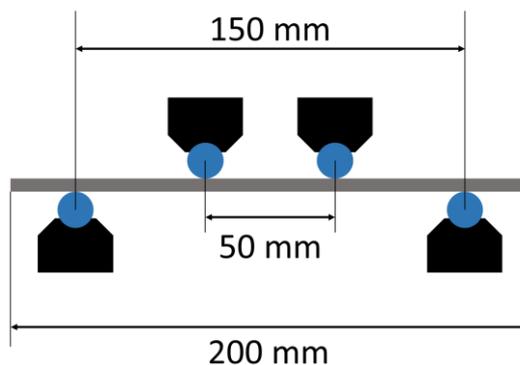
Para a realização dos ensaios de flexão a quatro pontos, foi utilizado um dispositivo acoplado em uma bancada de testes dotada de um atuador, marca *MTS*, modelo *Bionix*. Simultaneamente, quatro amostras foram ensaiadas, com ajuste individual de carga, apoiadas em dois roletes poliméricos inferiores e flexionadas pela aplicação da carga através de dois roletes superiores (Figura 27). A Figura 28 representa de forma esquemática as posições e dimensões dos apoios do dispositivo utilizado nos ensaios.

Figura 27: Amostras posicionadas em máquina de ensaio de fadiga em flexão a 4 pontos.



FONTE: o Autor

Figura 28: Representação de apoios do dispositivo de flexão a 4 pontos.



FONTE: o Autor

A frequência de aplicação das cargas cíclicas nos ensaios de fadiga foi estabelecida em 5 Hz. Frequências superiores podem resultar em aquecimento dos corpos de prova e redução da confiabilidade dos ensaios. Como os ensaios foram realizados ao ar, sem a presença de atmosfera corrosiva, a frequência foi definida com o objetivo de reduzir o tempo dos testes realizados.

A matriz de ensaios dinâmicos de flexão a quatro pontos consiste das amostras com pites por eletroerosão e um grupo de controle de amostras sem defeitos. Inicialmente, realizaram-se ensaios dinâmicos nas amostras sem defeitos, com o objetivo de estimar a curva S-N usada como parâmetro para avaliar os efeitos dos diferentes pites de corrosão. Cada grupo consiste em 4 corpos de prova e foi submetido a ensaios conforme parâmetros da Tabela 7.

Tabela 7: Grupos de controle de amostras de fio sem defeitos.

Grupo de amostras	Patamar (% σ_y)	σ_{max} (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	ϵ_{max} ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Razão de carregamento	Frequência de ensaio	Critério de parada dos ciclos (% $\Delta\sigma$)
090	90	1152	1036,8	5619,5			
080	80	1024	921,6	4995,1			
070	70	896	806,4	4370,7	0,1	5 Hz	95
060	60	768	691,2	3746,3			
050	50	640	576	3121,9			

FONTE: o Autor

O grupo 090, por exemplo, foi ensaiado com uma razão de carregamento de 0,1 ($\sigma_{max} / \sigma_{min}$), a uma frequência de 5 Hz, com tensão máxima de 1152 MPa (90%

da tensão de escoamento de 1280 MPa) e máxima deformação medida na superfície comprimida do fio igual a 5619,5 $\mu\text{m/m}$. O critério utilizado para contagem dos ciclos da estimativa da curva S-N foi de 95% do delta de tensões, ou seja, o número de ciclos necessários para falha por fadiga corresponde ao número de ciclos até que a diferença entre tensão máxima e mínima entre ciclos (calculada a partir das deformações medidas) atingisse 95% do valor nominal.

O nível de tensões mais baixo, correspondente a 50% da tensão de escoamento, serve para estimar o limite de fadiga e espera-se que as amostras neste patamar de carregamentos atinjam o *run-out* (2.000.000 de ciclos sem rupturas ou quedas no delta de deformações). Caso o *run-out* fosse atingido em um patamar mais alto, seria necessário realizar um ensaio em um patamar intermediário entre o patamar de *run-out* e o nível anterior. Por exemplo, caso o *run-out* fosse atingido no patamar correspondente a 60% da tensão de escoamento, supondo que no patamar de 70% as falhas ocorreram em número de ciclos inferior a 2.000.000, seria necessário realizar um ensaio adicional com um patamar de carregamento correspondente a 65% da tensão de escoamento.

Com os ensaios dinâmicos de amostras pré-corroídas, esperava-se obter um valor para a redução da vida em fadiga, quando comparado com amostras sem corrosão. O número de ciclos até a falha dos fios pré-corroídos deve indicar o efeito dos parâmetros e dimensões dos pites de corrosão em relação à curva de fadiga obtida para o grupo de controle (fios novos, sem corrosão). Esperava-se que a razão de aspecto ($a/2c$) dos pites gerados fosse um fator determinante na redução dos ciclos até a falha por fadiga.

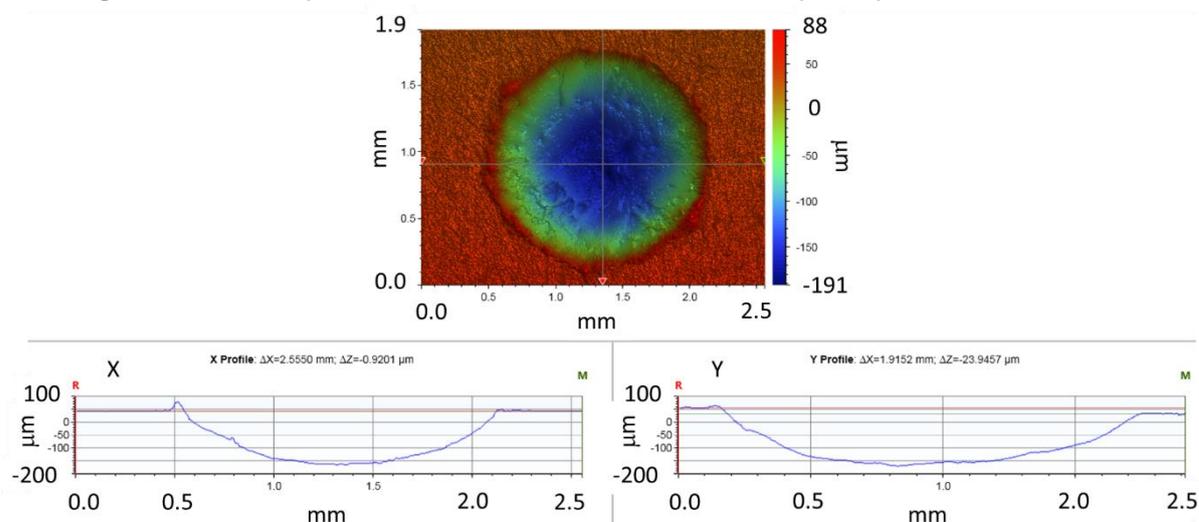
A curva de referência, obtida através de ensaios com fios sem corrosão, foi construída com 4 patamares de carregamento correspondentes a falhas por fadiga, mais um patamar correspondente à tensão aproximada do limite de fadiga (sem ruptura por fadiga). Os ensaios de fios com pites artificiais, por sua vez, foram realizados em apenas um nível de carregamento (equivalente a um $\Delta\sigma$ de 70% da tensão de escoamento, devido à menor dispersão de resultados e possibilidade de melhor avaliar a redução do número de ciclos em comparação com amostras sem defeitos), tomando a inclinação da curva de fios sem defeitos como parâmetro, com o objetivo de obter a redução da vida em fadiga devido aos defeitos induzidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PITES ARTIFICIAIS

Os pites de corrosão, artificialmente produzidos por eletroerosão foram analisados através de um interferômetro óptico, *Contour GT-K 3D Optical Microscope*, marca Bruker, com o objetivo de determinar as dimensões dos pites (Figura 29). As dimensões dos pites, determinadas a partir das referências bibliográficas e apresentadas na seção 3.3 do procedimento experimental, foram comparadas com as dimensões obtidas pelo método de eletroerosão e medidas por um interferômetro. A Tabela 8 apresenta as dimensões determinadas para cada amostra, conforme os grupos.

Figura 29: Exemplo de análise das dimensões dos pites por interferômetro.



FONTE: o Autor

Tabela 8: Valores de profundidade e diâmetro dos pites gerados por eletroerosão.

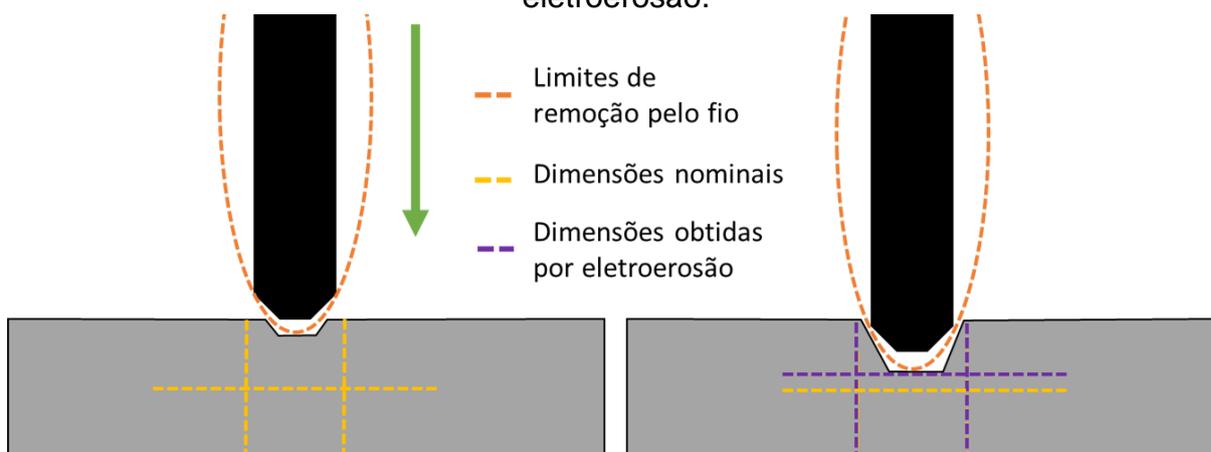
Amostra	Grupo	Diâmetro Nominal (mm)	Profundidade Nominal (mm)	Diâmetro Medido (mm)	Profundidade Medida (mm)
1-A		0,5	0,1	0,5	0,03
1-B	1	0,5	0,1	0,5	0,03
1-C		0,5	0,1	0,5	0,02
1-D		0,5	0,1	0,5	0,04
2-A		1,0	0,1	1,0	0,1
2-B	2	1,0	0,1	1,0	0,1
2-C		1,0	0,1	1,0	0,1
2-D		1,0	0,1	1,0	0,1
3-A		1,5	0,1	1,5	0,1
3-B	3	1,5	0,1	1,5	0,1
3-C		1,5	0,1	1,5	0,1
3-D		1,5	0,1	1,5	0,2
4-A		0,5	0,2	0,5	0,04
4-B	4	0,5	0,2	0,5	0,05
4-C		0,5	0,2	0,5	0,04
4-D		0,5	0,2	0,5	0,06
5-A		1,0	0,2	1,0	0,2
5-B	5	1,0	0,2	1,0	0,15
5-C		1,0	0,2	1,0	0,17
5-D		1,0	0,2	1,0	0,16
6-A		1,5	0,2	1,5	0,2
6-B	6	1,5	0,2	1,5	0,15
6-C		1,5	0,2	1,5	0,17
6-D		1,5	0,2	1,5	0,16
7-A		0,5	0,3	0,8	0,06
7-B	7	0,5	0,3	0,5	0,05
7-C		0,5	0,3	0,5	0,04
7-D		0,5	0,3	0,5	0,04
8-A		1,0	0,3	1,0	0,3
8-B	8	1,0	0,3	1,0	0,25
8-C		1,0	0,3	1,0	0,26
8-D		1,0	0,3	1,0	0,2
9-A		1,5	0,3	1,5	0,3
9-B	9	1,5	0,3	1,5	0,25
9-C		1,5	0,3	1,5	0,25
9-D		1,5	0,3	1,5	0,25
10-A		0,5	0,1	0,5	0,06
10-B	10	0,5	0,1	0,5	0,12
10-C		0,5	0,1	1,0	0,10
10-D		0,5	0,1	1,0	0,09
11-A		1,0	0,1	1,0	0,1
11-B	11	1,0	0,1	1,0	0,15
11-C		1,0	0,1	1,0	0,15
11-D		1,0	0,1	1,0	0,17
12-A		1,5	0,1	1,5	0,2
12-B	12	1,5	0,1	1,5	0,23
12-C		1,5	0,1	1,5	0,1
12-D		1,5	0,1	1,5	0,1
13-A		0,5	0,2	0,6	0,07
13-B	13	0,5	0,2	0,5	0,09
13-C		0,5	0,2	0,7	0,1
13-D		0,5	0,2	0,5	0,12
14-A		1,0	0,2	1,0	0,2
14-B	14	1,0	0,2	1,0	0,2
14-C		1,0	0,2	1,0	0,15
14-D		1,0	0,2	1,0	0,16
15-A		1,5	0,2	1,5	0,3
15-B	15	1,5	0,2	1,5	0,3
15-C		1,5	0,2	1,5	0,22
15-D		1,5	0,2	1,5	0,25
16-A		0,5	0,3	0,5	0,1
16-B	16	0,5	0,3	0,7	0,08
16-C		0,5	0,3	0,7	0,06
16-D		0,5	0,3	0,7	0,04
17-A		1,0	0,3	1,0	0,3
17-B	17	1,0	0,3	1,0	0,26
17-C		1,0	0,3	1,0	0,25
17-D		1,0	0,3	1,0	0,27
18-A		1,5	0,3	1,5	0,3
18-B	18	1,5	0,3	1,5	0,27
18-C		1,5	0,3	1,5	0,3
18-D		1,5		1,5	0,3

FONTE: o Autor

É possível observar que em algumas amostras, há diferença significativa entre as dimensões nominais, determinadas a partir das referências de pites observados em campo (CAMPELLO, 2014; BERGE, 2014; NEGREIROS, 2016), e as dimensões medidas pelo interferômetro. Por exemplo, o Grupo 1, de amostras com 1 pite na face plana do fio, tinha uma profundidade nominal (estabelecida pelas referências) de 100 μm , mas a profundidade medida nos corpos de prova após o processo de eletroerosão foi de aproximadamente 30 μm , em média.

Esta diferença deve-se às limitações do método de eletroerosão: o fio utilizado para remoção de material possuía limites de remoção com profundidade inferior à profundidade desejada para o pite, fazendo com que, para profundidades maiores, o fio não se aproximasse da amostra o suficiente. A Figura 30 representa a causa da diferença entre dimensões nominais e as dimensões obtidas.

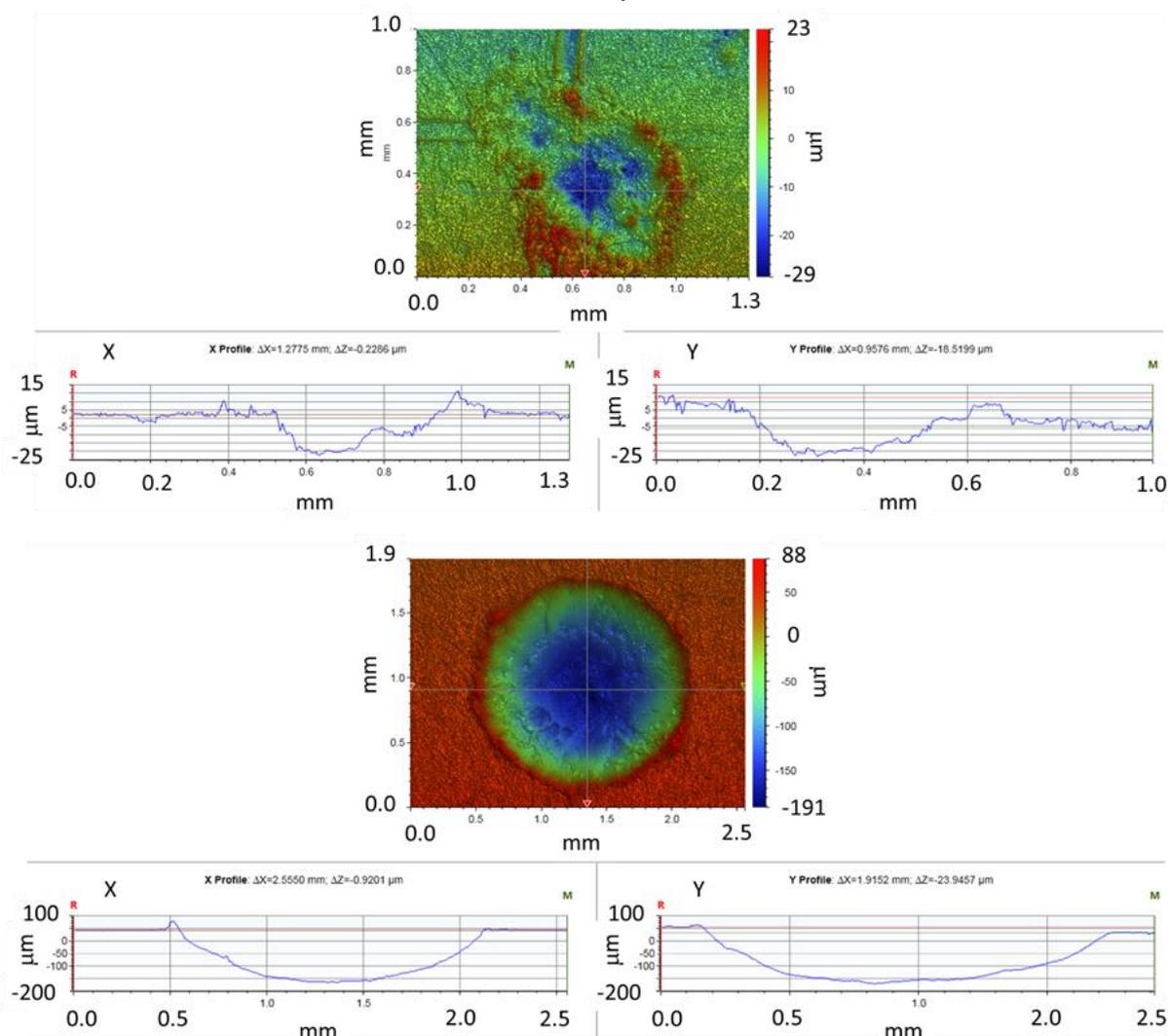
Figura 30: Representação dos limites de remoção devido ao fio no método da eletroerosão.



FONTE: o Autor

Além da limitação de profundidade dos pites devido à penetração do fio na eletroerosão, é possível observar que, para pites menores, a geometria final é diferente de um furo circular, como o obtido nos pites maiores. A avaliação por interferômetro permitiu observar as diferenças de geometria nos pites produzidos (como demonstrado no exemplo da Figura 31). Embora os resultados obtidos por eletroerosão tenham revelado as limitações do método, as amostras não foram descartadas, pois o objetivo de avaliar os efeitos dos parâmetros dos pites de corrosão no desempenho em fadiga dos fios de tração não foi significativamente afetado.

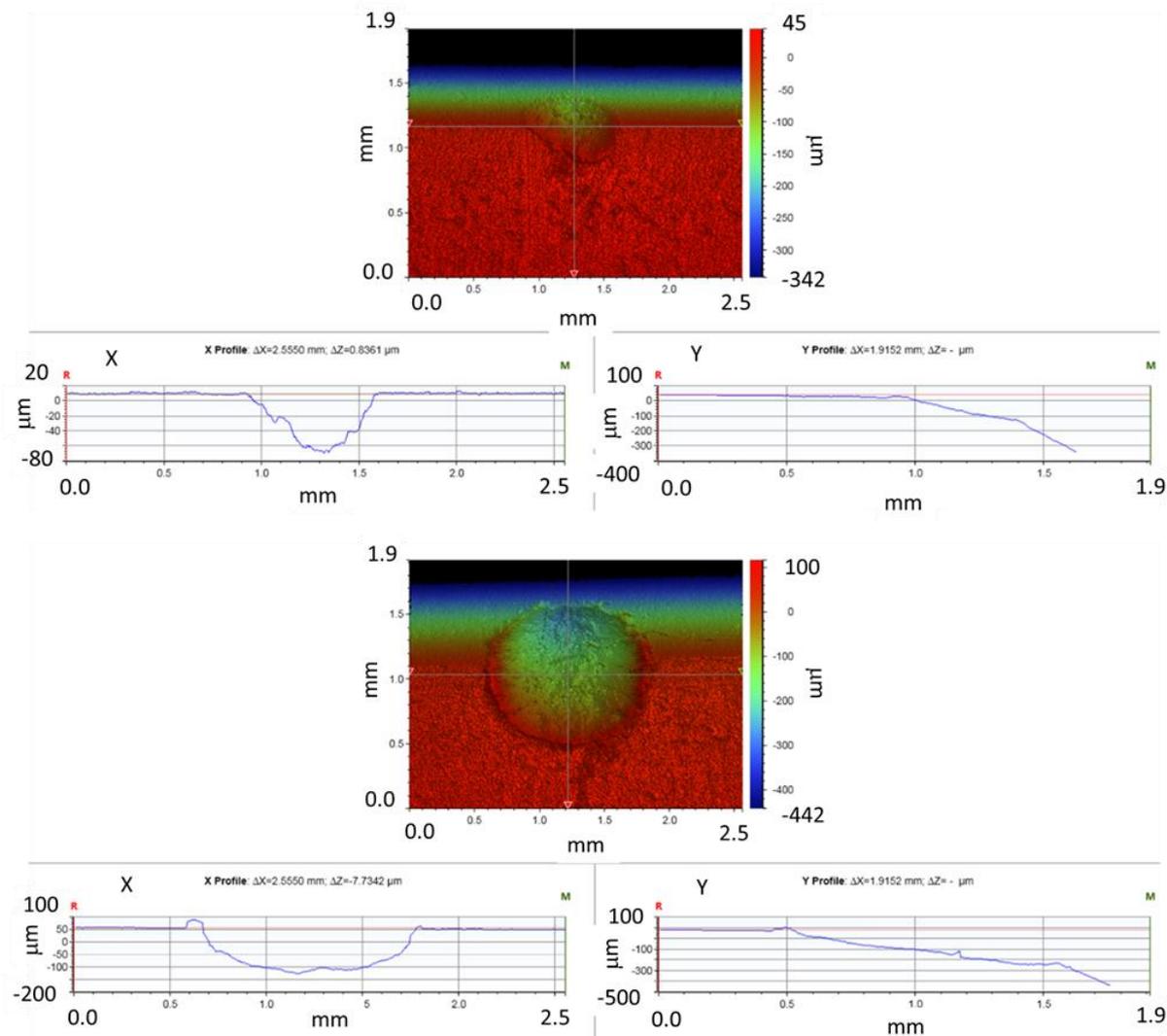
Figura 31: Diferença de geometria entre pites de pequenas dimensões e pites maiores na face plana do fio.



FONTE: o Autor

Houve diferença também entre a geometria projetada para os pites nas arestas dos fios e os pites produzidos por eletroerosão, acentuada nos pites de maior profundidade e menor diâmetro, de forma semelhante ao ocorrido nas amostras com pites produzidos no centro do fio, conforme demonstrado na Figura 32.

Figura 32: Diferença de geometria entre pites de pequenas dimensões e pites maiores na aresta do fio.



FONTE: o Autor

As imagens obtidas por interferometria e as dimensões observadas nos pites produzidos por eletroerosão estão compiladas no APÊNDICE A.

Devido à diferença entre as dimensões nominais estabelecidas e as dimensões obtidas na eletroerosão, foi necessário recalculer os coeficientes de concentração de tensões. A Tabela 9 apresenta os coeficientes calculados para as geometrias de pite medidas pelo interferômetro.

Tabela 9: Fatores de concentração de tensão para as geometrias medidas dos pites.

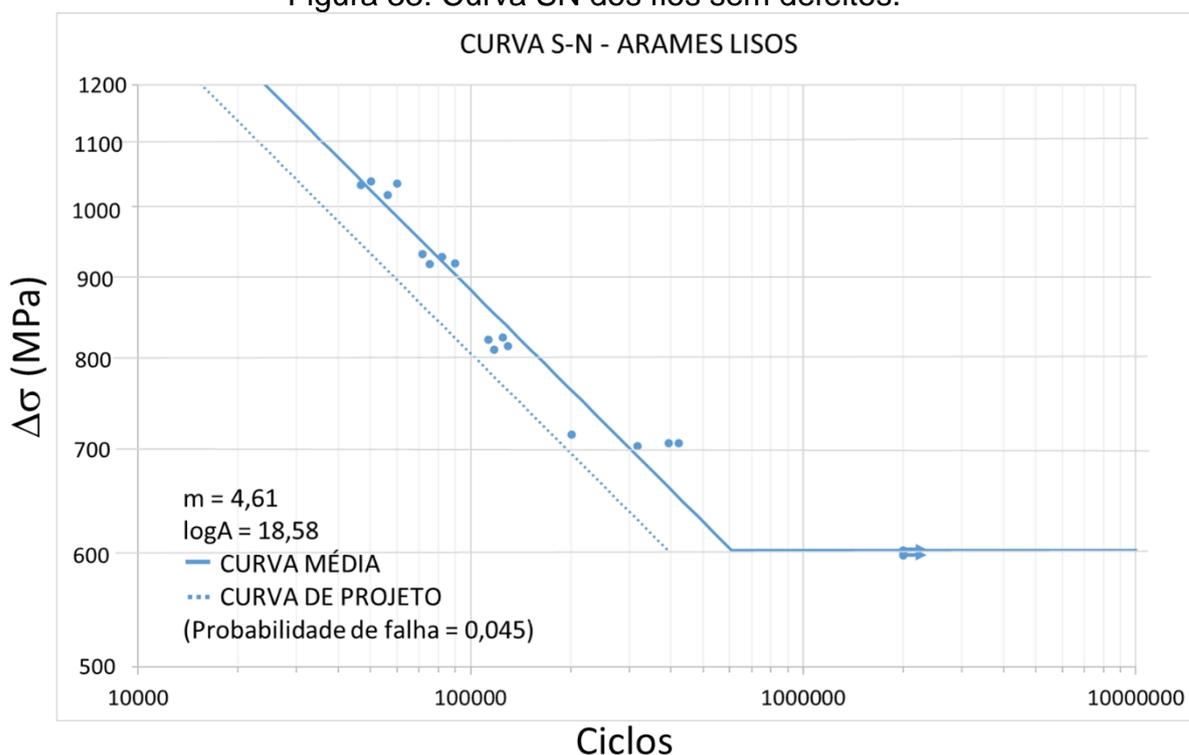
Grupo	a (μm)	2c (μm)	k_t
1	30	500	1,25
2	100	1000	1,38
3	100	1500	1,27
4	50	500	1,38
5	160	1000	1,56
6	170	1500	1,43
7	50	500	1,38
8	250	1000	1,77
9	250	1500	1,58
10	100	800	1,46
11	150	1000	1,53
12	150	1500	1,38
13	100	600	1,58
14	200	1000	1,66
15	270	1500	1,61
16	70	600	1,44
17	300	1000	1,86
18	300	1500	1,66

FONTE: o Autor

4.2 DESEMPENHO EM FADIGA DAS AMOSTRAS

Seguindo o procedimento e critérios apresentados no item 3.5 (Procedimento experimental – Ensaio de fadiga), foi obtido um gráfico correlacionando o número de ciclos até a falha e o patamar de tensões aplicadas nas amostras de fios sem defeitos (lisos, sem pites). A Figura 33 apresenta a curva obtida (em escala logarítmica) e os parâmetros de inclinação (m) e $\log A$.

Figura 33: Curva SN dos fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

Segundo DOWLING, 2013, o limite de fadiga de materiais metálicos, sem a presença de defeitos ou descontinuidades superficiais, costuma ser aproximadamente igual a 50% do limite de resistência à tração ($\sigma_e \approx 0.5 \sigma_{UTS}$), podendo ser mais baixo para aços de resistência elevada. A partir dos ensaios realizados, o limite de fadiga encontra-se entre 600 MPa e 700 MPa, correspondendo a um limite entre 40% e 47,5% do limite de resistência à tração.

Os ensaios dinâmicos das amostras com pites foram realizados seguindo o mesmo procedimento, mas apenas no patamar de tensões correspondente a 70% da tensão de escoamento do material. Como esperado, o número de ciclos destes ensaios é significativamente menor, quando comparado com os ensaios em amostras sem defeitos. Devido ao fato de que os ensaios foram executados em somente um patamar de tensão, a inclinação da curva obtida para amostras sem defeitos ($m = 4,61$) foi utilizada para avaliar a redução da vida em fadiga das amostras com pites.

O número de ciclos obtido, os parâmetros do ensaio e comparações gráficas com a curva obtida em amostras sem defeitos são apresentados da Tabela 10 à

Tabela 27 e da Figura 34 à Figura 51 (em vermelho, dados dos ensaios de amostras com pites induzidos; em azul, dados dos ensaios de amostras sem defeitos).

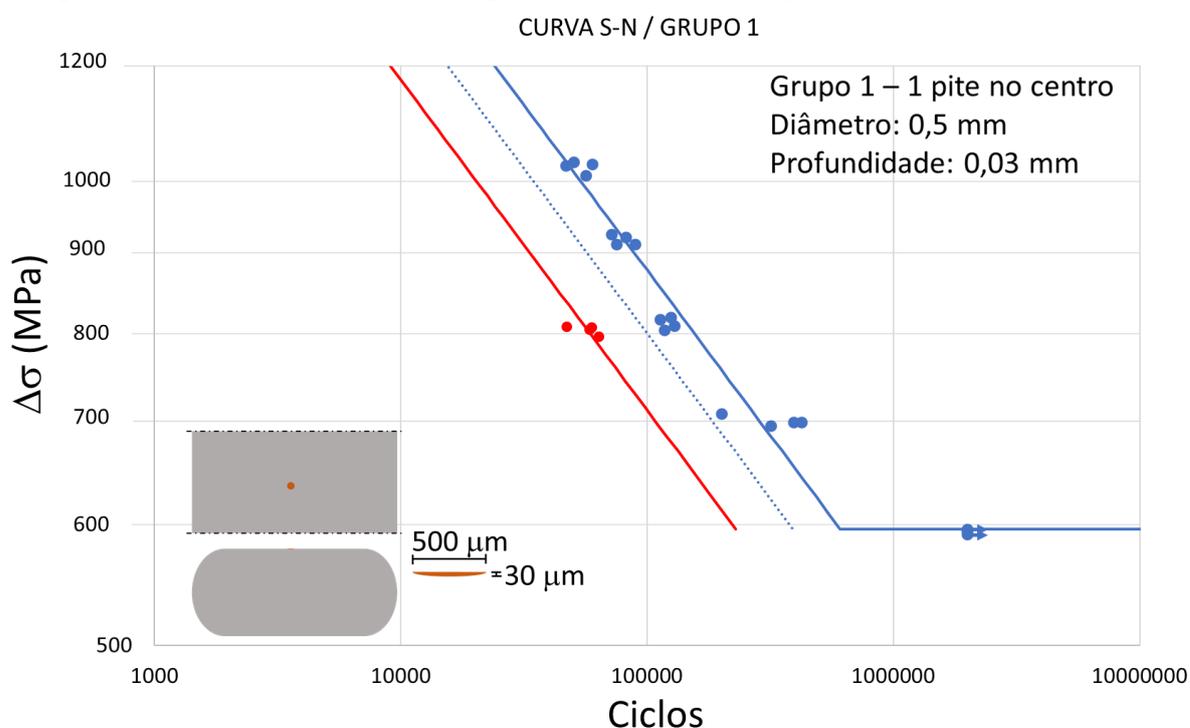
O grupo 1, de amostras com 1 pite na face central do fio, de 500 μm de diâmetro e 30 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 53% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 34 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 1 e a Tabela 10 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 10: Dados do ensaio de amostras do grupo 1

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
59634	809,2
47145	809,8
58255	806,5
63801	797,6

FONTE: o Autor

Figura 34: Número de ciclos do grupo 1 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

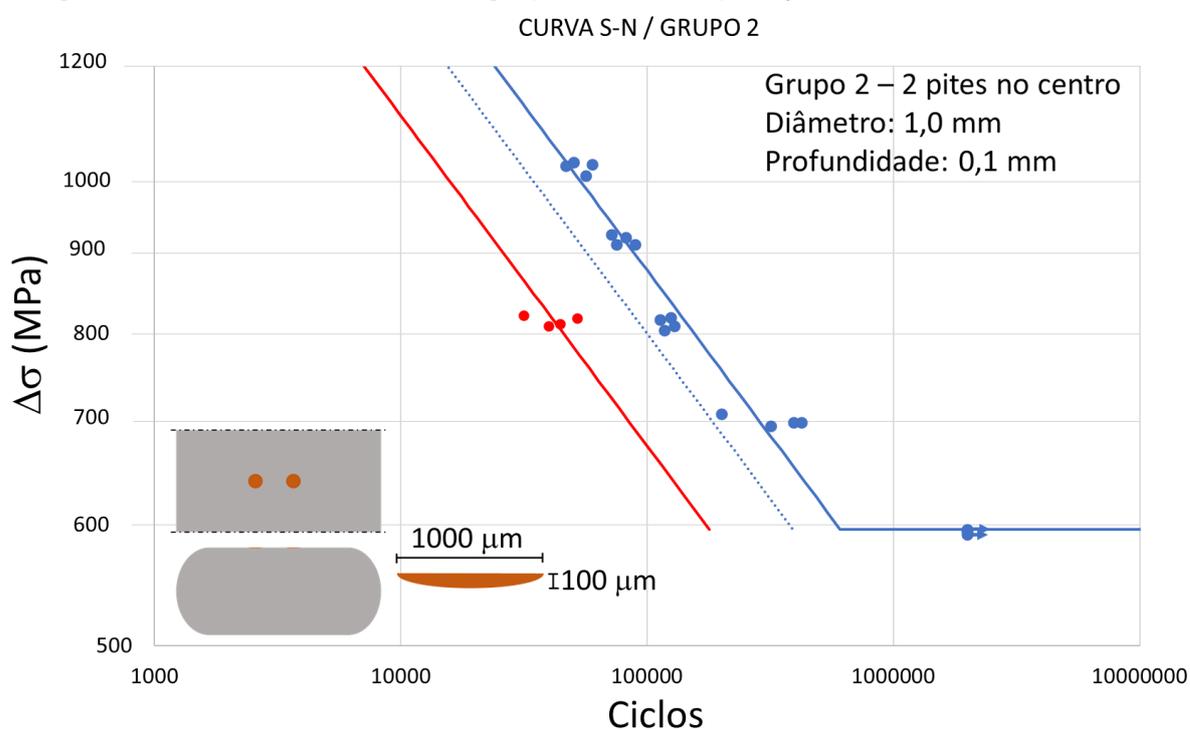
O grupo 2, de amostras com 2 pites na face central do fio, de 1000 μm de diâmetro e 100 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 65% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 35 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 2 e a Tabela 11 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 11: Dados do ensaio de amostras do grupo 2

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
44492	813,12
31518	823,4
52034	819,97
39857	810,34

FONTE: o Autor

Figura 35: Número de ciclos do grupo 2 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

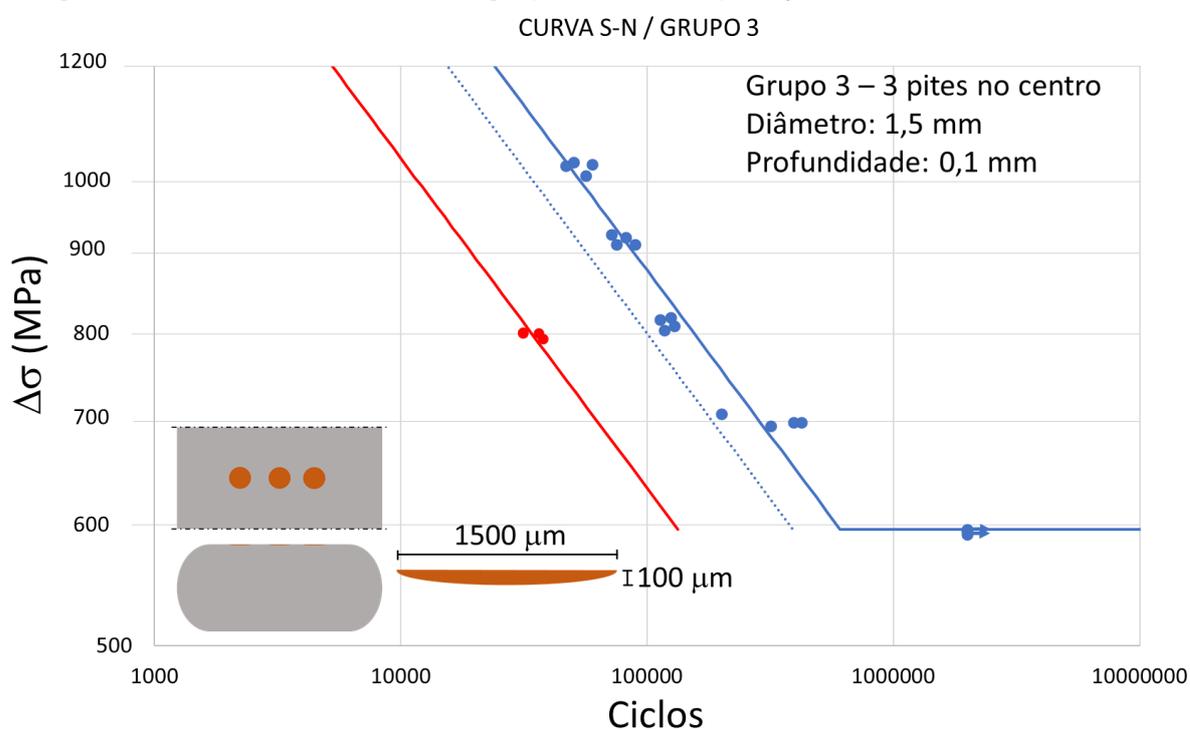
O grupo 3, de amostras com 3 pites na face central do fio, de 1500 μm de diâmetro e 100 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 72% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 36 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 3 e a Tabela 12 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 12: Dados do ensaio de amostras do grupo 3

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
31371	802,96
31370	801,8
36231	801,78
37888	795,46

FONTE: o Autor

Figura 36: Número de ciclos do grupo 3 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

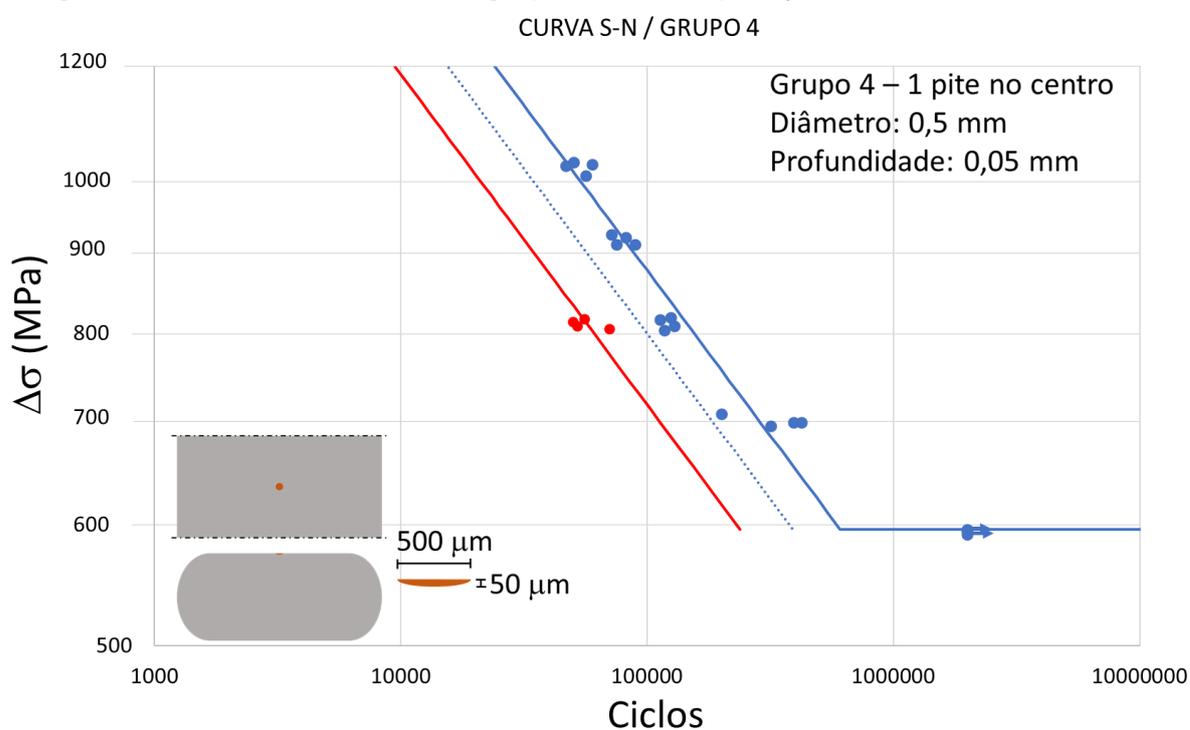
O grupo 4, de amostras com 1 pite na face central do fio, de 500 μm de diâmetro e 50 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 53% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 37 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 4 e a Tabela 13 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 13: Dados do ensaio de amostras do grupo 4

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
50167	816
55756	819
51994	811
70159	807

FONTE: o Autor

Figura 37: Número de ciclos do grupo 4 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

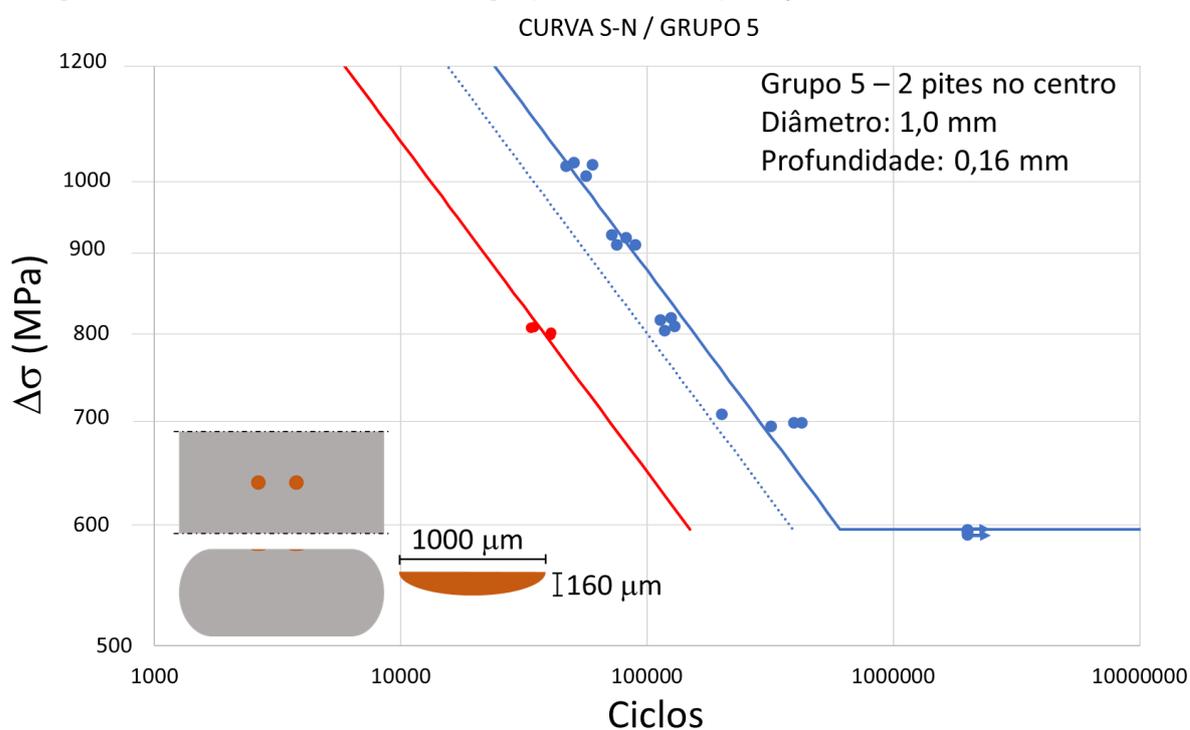
O grupo 5, de amostras com 2 pites na face central do fio, de 1000 μm de diâmetro e 160 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 69% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 38 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 5 e a Tabela 14 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 14: Dados do ensaio de amostras do grupo 5

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
40571	803
34748	810
40309	800
33691	809

FONTE: o Autor

Figura 38: Número de ciclos do grupo 5 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

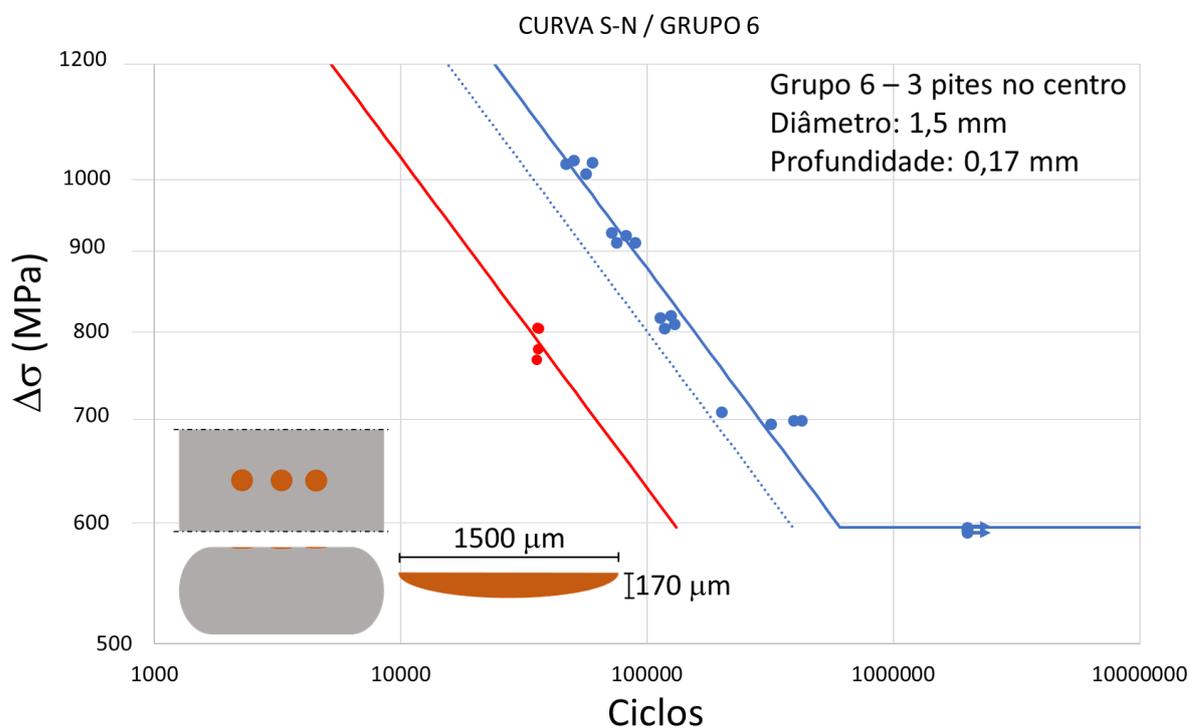
O grupo 6, de amostras com 3 pites na face central do fio, de 1500 μm de diâmetro e 170 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 70% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 39 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 6 e a Tabela 15 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 15: Dados do ensaio de amostras do grupo 6

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
35950	780,4
35700	806,3
36420	805,7
35500	768,7

FONTE: o Autor

Figura 39: Número de ciclos do grupo 6 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

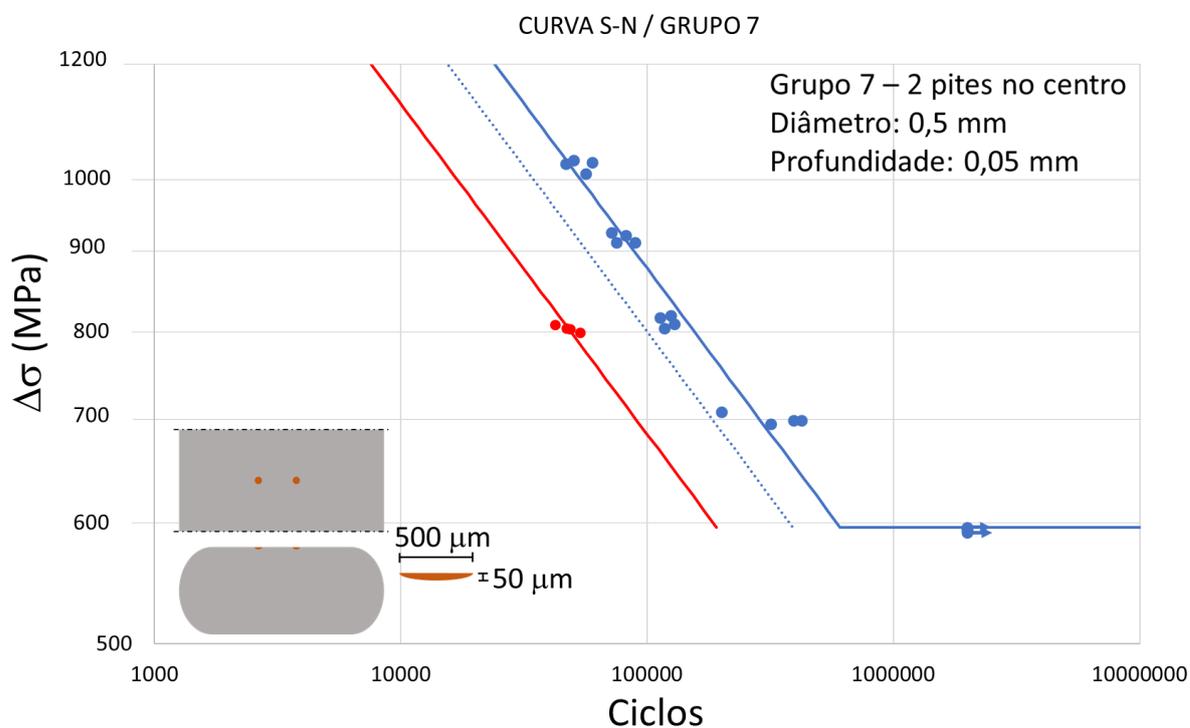
O grupo 7, de amostras com 2 pites na face central do fio, de 500 μm de diâmetro e 50 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 60% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 40 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 7 e a Tabela 16 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 16: Dados do ensaio de amostras do grupo 7

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
48829	804,7
53476	800,5
42235	809,9
47246	805,5

FONTE: o Autor

Figura 40: Número de ciclos do grupo 7 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

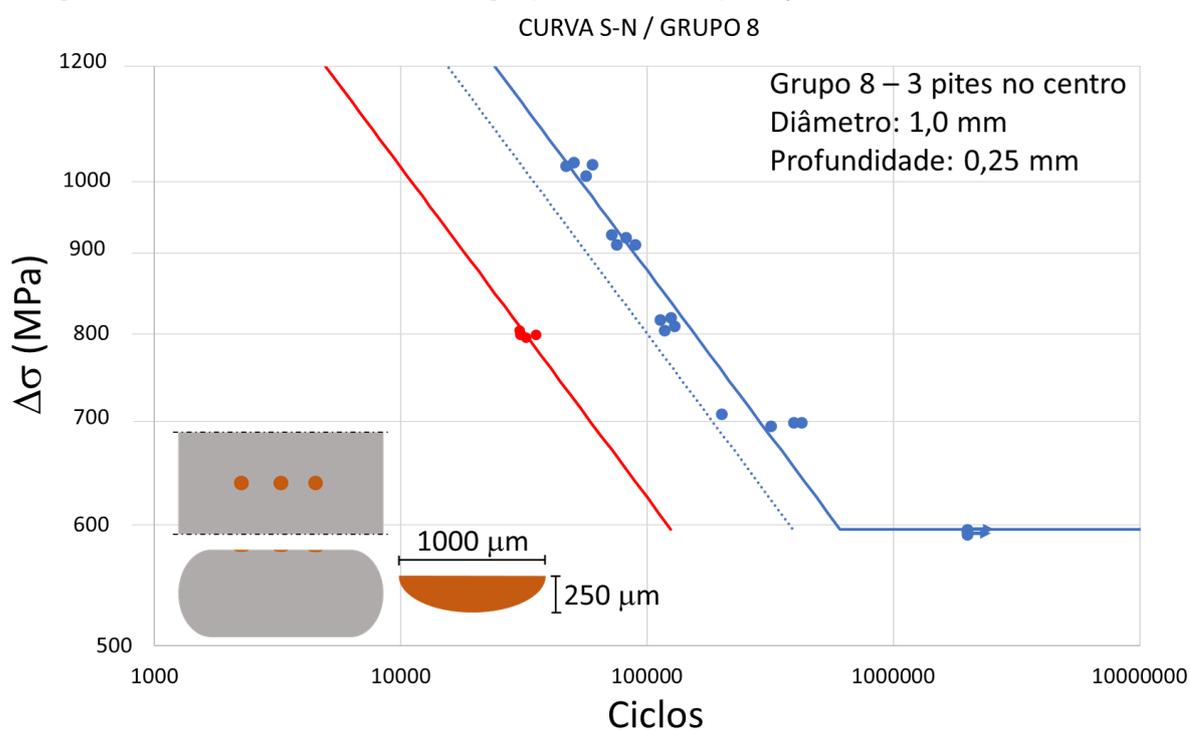
O grupo 8, de amostras com 3 pites na face central do fio, de 1000 μm de diâmetro e 250 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 73% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 41 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 8 e a Tabela 17 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 17: Dados do ensaio de amostras do grupo 8

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
30376	805,2
35228	800,4
30593	800,4
32123	796,9

FONTE: o Autor

Figura 41: Número de ciclos do grupo 8 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

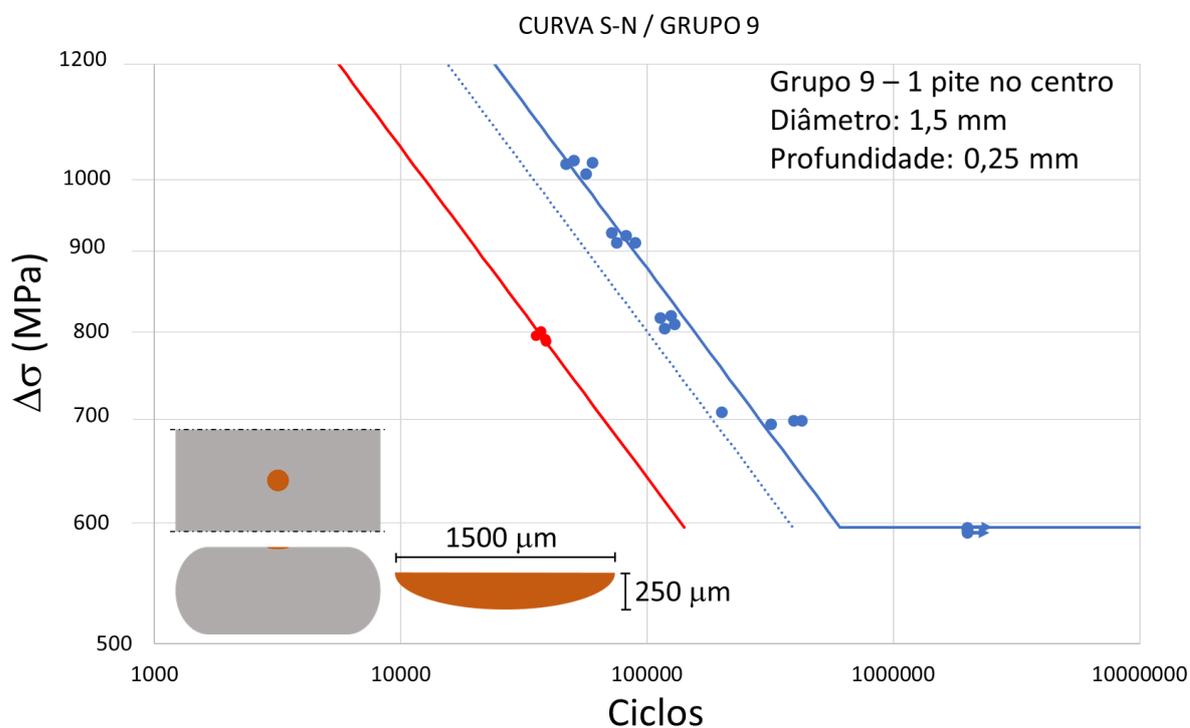
O grupo 9, de amostras com 1 pite na face central do fio, de 1500 μm de diâmetro e 250 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 69% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 42 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 9 e a Tabela 18 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 18: Dados do ensaio de amostras do grupo 9

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
35226	797,2
38795	790,3
37152	801,7
38585	792,4

FONTE: o Autor

Figura 42: Número de ciclos do grupo 9 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

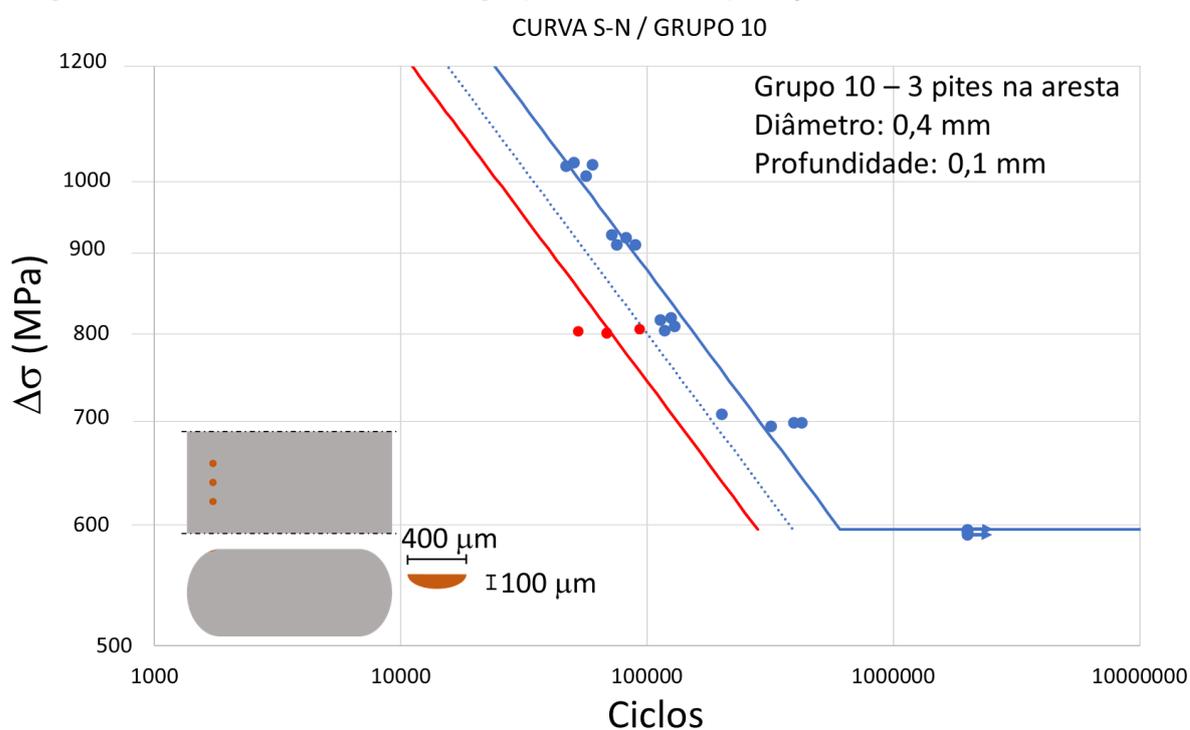
O grupo 10, de amostras com 3 pites na aresta do fio, de 400 μm de diâmetro e 100 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 43% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 43 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 10 e a Tabela 19 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 19: Dados de ensaio de amostras do grupo 10

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
64484	802,1
93325	807,2
68380	802,8
52313	804,8

FONTE: o Autor

Figura 43: Número de ciclos do grupo 10 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

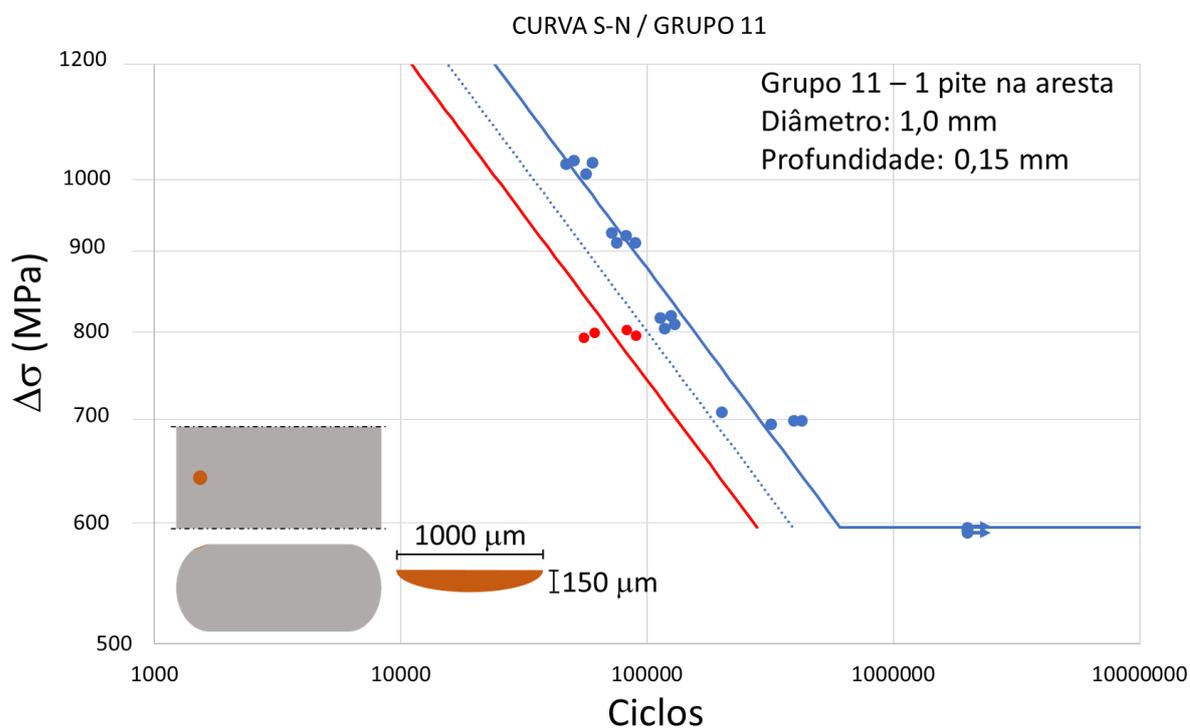
O grupo 11, de amostras com 1 pite na aresta do fio, de 1000 μm de diâmetro e 150 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 40% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 44 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 11 e a Tabela 20 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 20: Dados de ensaio de amostras do grupo 11

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
82752	803,6
61252	800,5
90304	796,6
55394	794,6

FONTE: o Autor

Figura 44: Número de ciclos do grupo 11 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

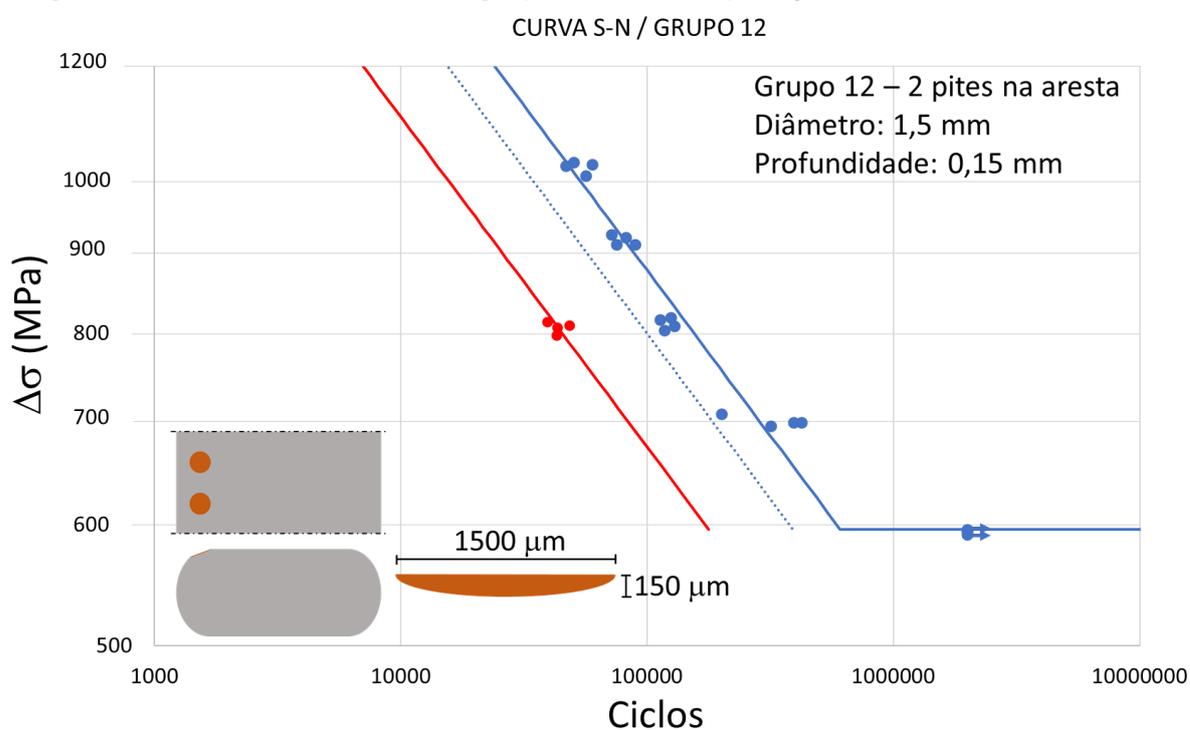
O grupo 12, de amostras com 2 pites na aresta do fio, de 1500 μm de diâmetro e 150 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 64% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 45 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 12 e a Tabela 21 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 21: Dados de ensaio de amostras do grupo 12

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
43110	808,9
48315	811,8
39339	815,9
42919	799,6

FONTE: o Autor

Figura 45: Número de ciclos do grupo 12 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

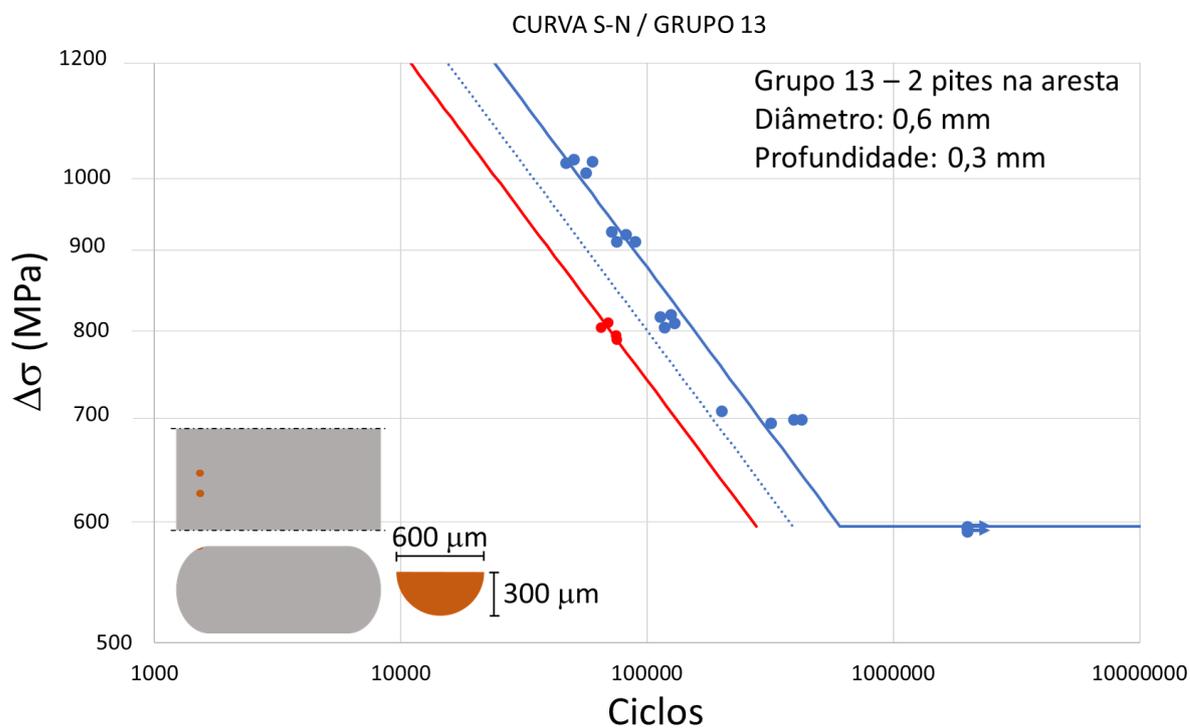
O grupo 13, de amostras com 2 pites na aresta do fio, de 600 μm de diâmetro e 300 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 41% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 46 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 13 e a Tabela 22 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 22: Dados de ensaio de amostras do grupo 13

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
69567	811,5
65018	805,8
75011	790,9
74476	795,9

FONTE: o Autor

Figura 46: Número de ciclos do grupo 13 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

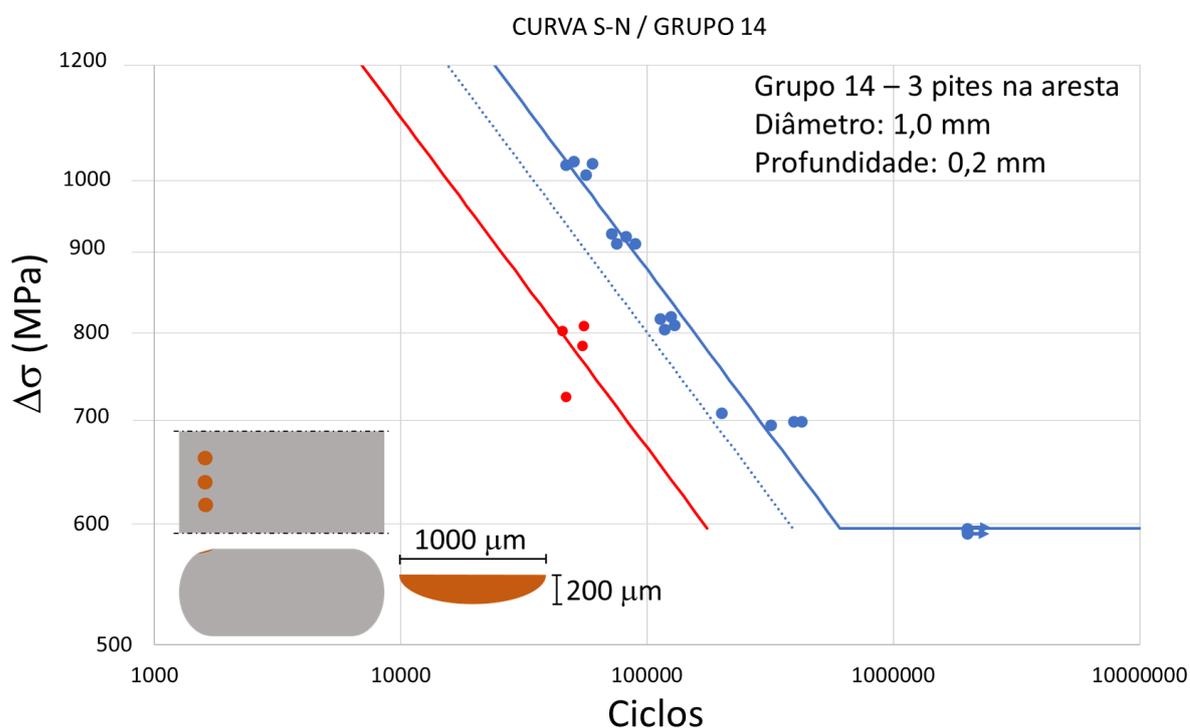
O grupo 14, de amostras com 3 pites na aresta do fio, de 1000 μm de diâmetro e 200 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 58% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 47 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 14 e a Tabela 23 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 23: Dados de ensaio de amostras do grupo 14

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
54448	785,7
55243	809,7
46734	727,7
45233	803,4

FONTE: o Autor

Figura 47: Número de ciclos do grupo 14 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

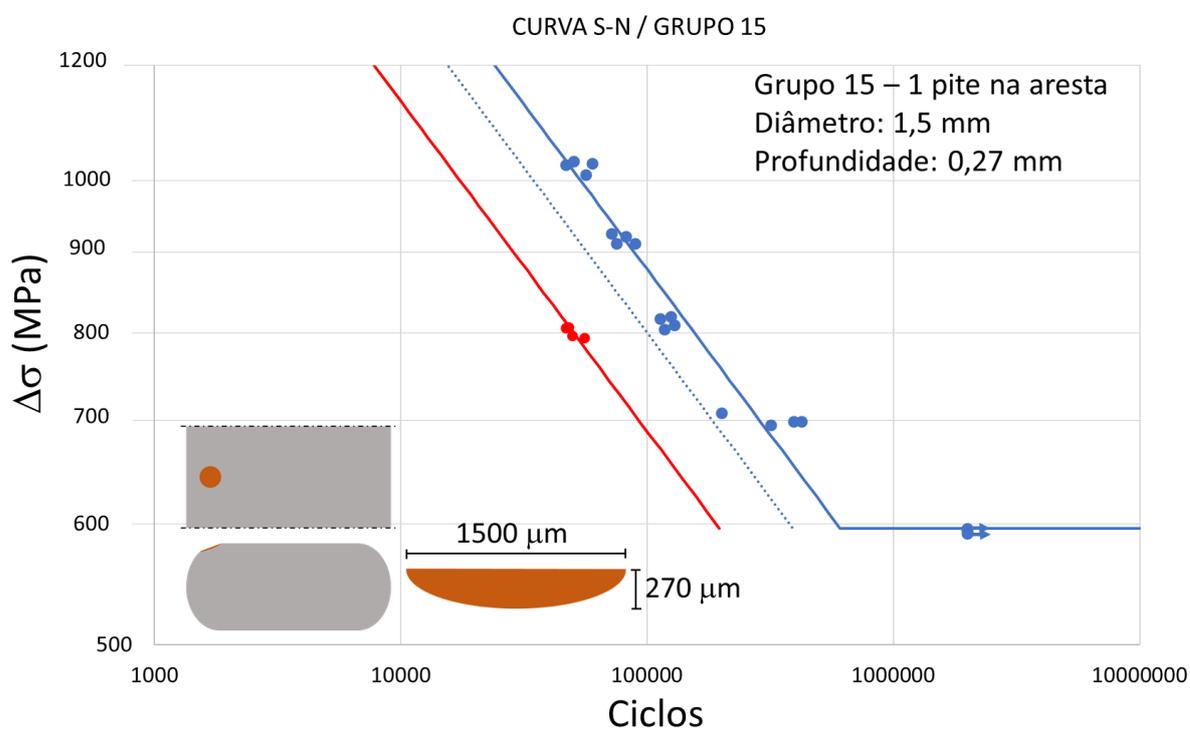
O grupo 15, de amostras com 1 pite na aresta do fio, de 1500 μm de diâmetro e 270 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 59% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 48 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 15 e a Tabela 24 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 24: Dados de ensaio de amostras do grupo 15

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
46845	807,5
47925	808,3
49792	798
55674	795,4

FONTE: o Autor

Figura 48: Número de ciclos do grupo 15 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

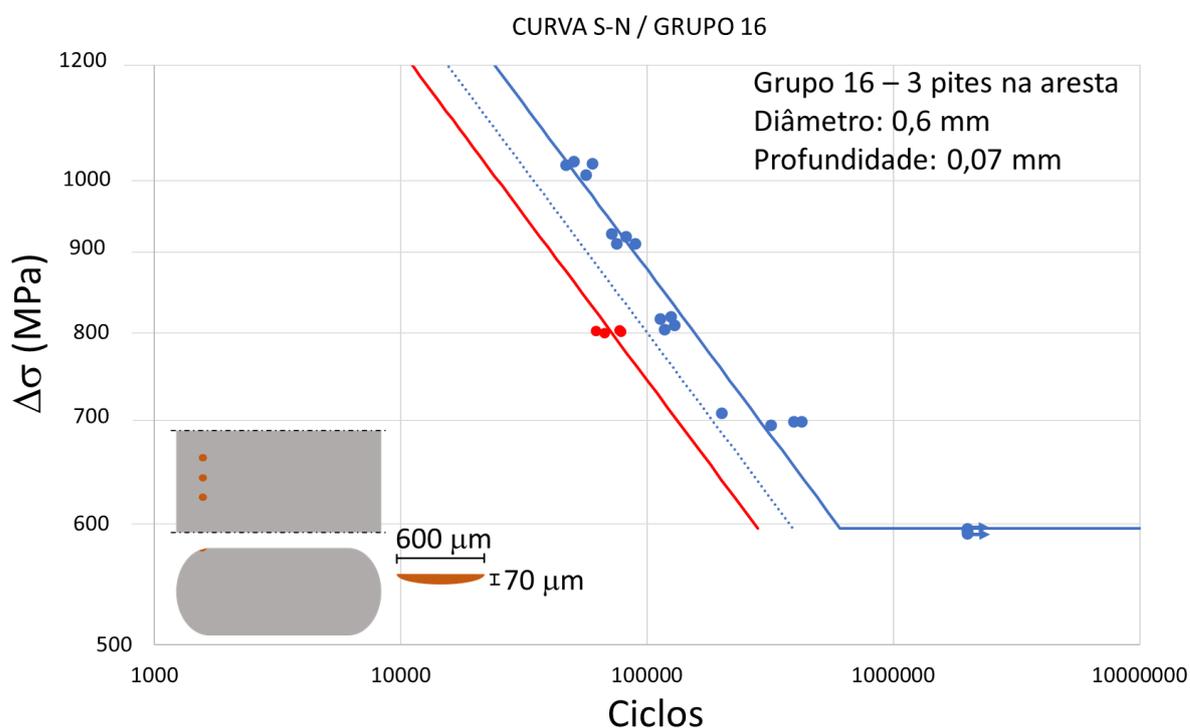
O grupo 16, de amostras com 3 pites na aresta do fio, de 600 μm de diâmetro e 70 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 41% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 49 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 16 e a Tabela 25 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 25: Dados de ensaio de amostras do grupo 16

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
77180	804,8
62059	803,5
67293	801,3
78046	802,8

FONTE: o Autor

Figura 49: Número de ciclos do grupo 16 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

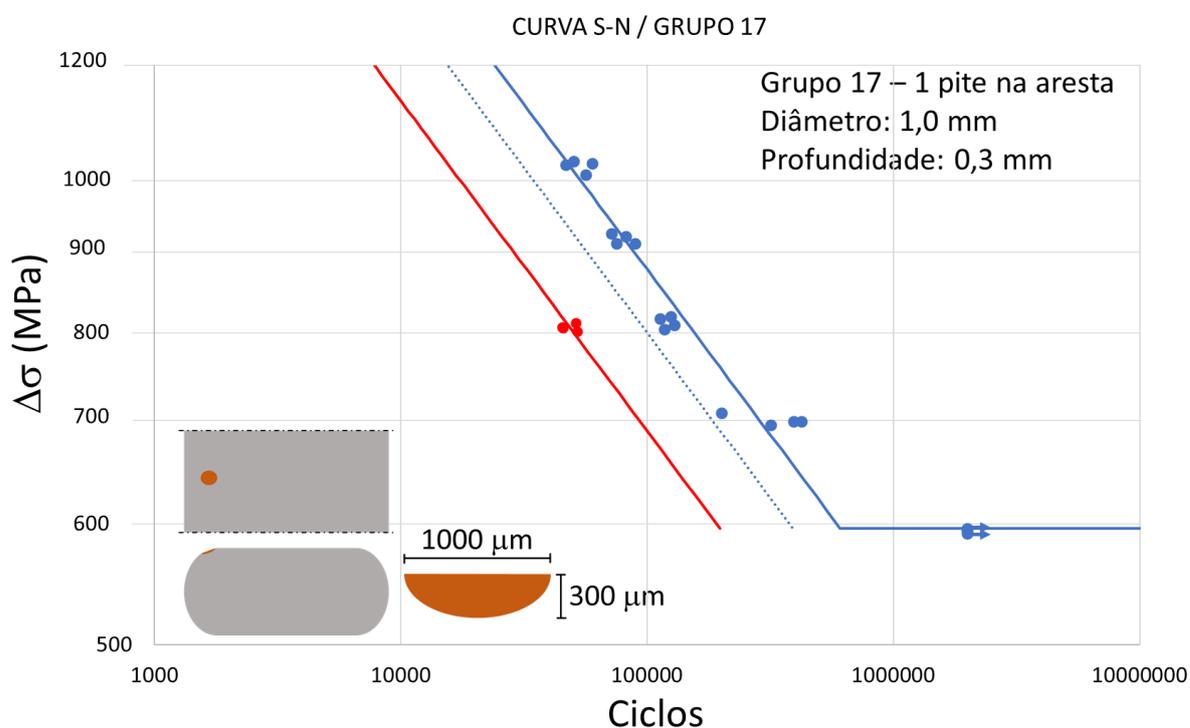
O grupo 17, de amostras com 1 pite na aresta do fio, de 1000 μm de diâmetro e 300 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 60% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Tabela 26 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 17 e a Figura 50 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 26: Dados de ensaio de amostras do grupo 17

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
51448	813
45198	808,5
51921	803,3
45654	806,9

FONTE: o Autor

Figura 50: Número de ciclos do grupo 17 em comparação com fios sem defeitos.



FONTE: o Autor

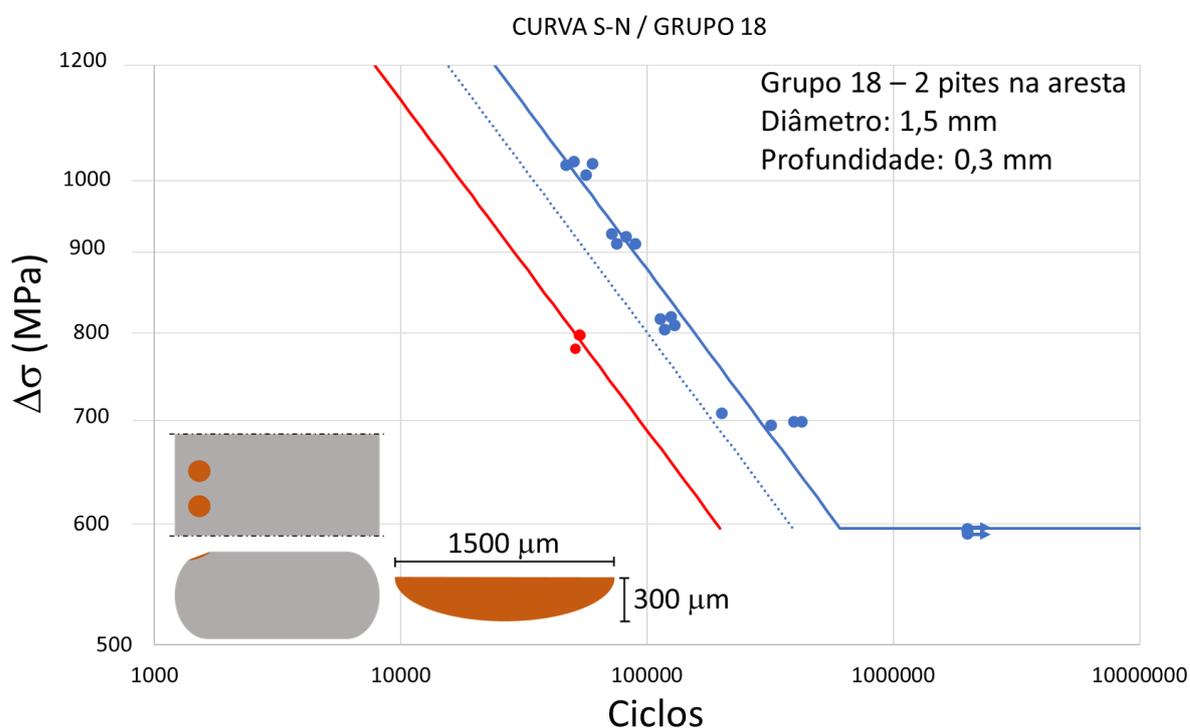
O grupo 18, de amostras com 2 pites na aresta do fio, de 1500 μm de diâmetro e 300 μm de profundidade, apresentou uma redução de aproximadamente 57% na vida em fadiga, em comparação com fios sem defeitos. A Figura 51 contém o gráfico do desempenho em fadiga do grupo 18 e a Tabela 27 apresenta o número de ciclos de cada corpo de prova do ensaio.

Tabela 27: Dados de ensaio de amostras do grupo 18

Número de ciclos	$\Delta\sigma$
53555	799
53216	799,2
51148	782,9
52630	798,2

FONTE: o Autor

Figura 51: Número de ciclos do grupo 18 em comparação com fios sem defeitos.

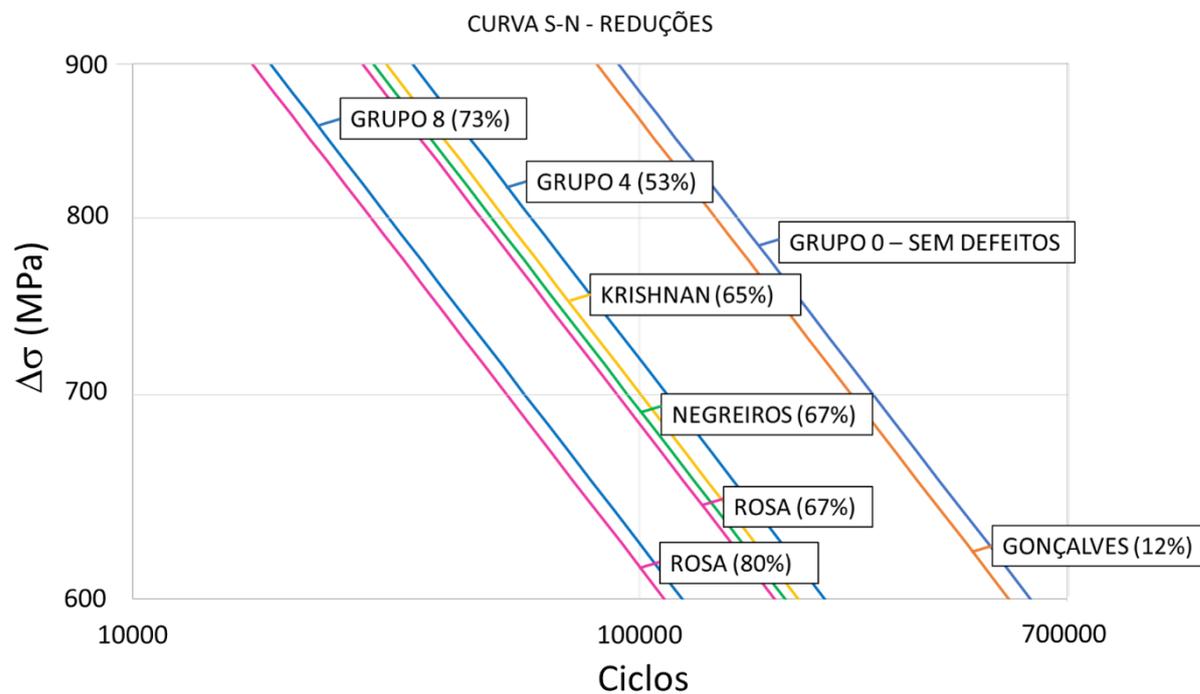


FONTE: o Autor

Os resultados dos ensaios em fadiga dos fios com pites gerados por eletroerosão indicaram redução entre 52% e 74% da vida em fadiga para pites

localizados na face plana dos corpos de prova e redução entre 40% e 64% da vida em fadiga para pites localizados na aresta dos corpos de prova em $\Delta\sigma = 800$ MPa (70% σ_y). KRISHNAN, 2017, encontrou em seu estudo uma redução de aproximadamente 65% na vida em fadiga de fios pré-corroídos com pites únicos, na face plana do fio, de 1000 μm de diâmetro e 300 μm de profundidade, aproximadamente, com $\Delta\sigma = 700$ MPa (75% σ_y). NEGREIROS, 2016, encontrou redução próxima de 67% na vida em fadiga de fios corroídos em ambiente marinho, com pites de dimensões variadas (diâmetro médio de 270 μm e profundidade média de 85 μm , aproximadamente) com $\Delta\sigma = 700$ MPa (60% σ_y). GONÇALVES, 2018, obteve em seu estudo redução de aproximadamente 12% na vida em fadiga de fios mantidos em ambiente corrosivo, com pites de dimensões variadas (diâmetro médio de 215 μm e profundidade média de 58 μm , aproximadamente) e $\Delta\sigma = 630$ MPa (55% σ_y). ROSA, 2019, obteve redução de 67% no desempenho em fadiga de fios com um único pite de 1000 μm de diâmetro e 500 μm de profundidade para $\Delta\sigma = 500$ MPa e redução de 80 % no desempenho em fadiga de fios com um único pite de 1000 μm de diâmetro e 1000 μm de profundidade para $\Delta\sigma = 500$ MPa (40% σ_y). De maneira meramente ilustrativa, a Figura 52 apresenta um gráfico com as reduções relativas na vida em fadiga obtidas por diferentes autores. Não estão representadas as curvas obtidas, nem os níveis de tensão dos ensaios realizados em outros trabalhos, apenas a redução relativa na vida em fadiga dos corpos de prova com pites de corrosão, comparados com corpos de prova sem defeitos.

Figura 52: Comparação da redução relativa na vida em fadiga entre diferentes autores.



FONTE: o Autor

4.3 ANÁLISE PELO MÉTODO DE TAGUCHI

A partir dos dados obtidos dos ensaios de flexão dinâmicos, foi possível estabelecer uma correlação entre os parâmetros dos pites das amostras e o seu desempenho em fadiga (i. e. o número de ciclos de carregamento até a falha).

Através do método de Taguchi, utilizando um arranjo ortogonal L18 em que um parâmetro (localização dos pites) possui 2 níveis e os outros parâmetros (diâmetro, profundidade e quantidade) possuem 3 níveis cada, a razão sinal – ruído foi calculada, conforme Equação (11) (KUMAR, 2017):

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -10 \log \left(\frac{1}{R_T}\right) \left[\sum_{j=1}^{R_T} \frac{1}{y_j^2}\right] \quad (11)$$

Em que R_T é o número de repetições do ensaio ($R_T = 4$) e y_j é o valor da característica medida ($y_j =$ Número de ciclos do ensaio dinâmico), para cada nível de cada parâmetro conforme o arranjo ortogonal L18 ($2^1 3^3$) da Tabela 28.

Tabela 28 : Arranjo Ortogonal dos parâmetros de ensaio.

Grupo	1 (Localização)	2 (Profundidade)	3 (Diâmetro)	4 (Quantidade)
1	1 (centro)	1 (100 μm)	1 (500 μm)	1 (1 pite)
2	1 (centro)	1 (100 μm)	2 (1000 μm)	2 (2 pites)
3	1 (centro)	1 (100 μm)	3 (1500 μm)	3 (3 pites)
4	1 (centro)	2 (200 μm)	1 (500 μm)	1 (1 pite)
5	1 (centro)	2 (200 μm)	2 (1000 μm)	2 (2 pites)
6	1 (centro)	2 (200 μm)	3 (1500 μm)	3 (3 pites)
7	1 (centro)	3 (300 μm)	1 (500 μm)	2 (2 pites)
8	1 (centro)	3 (300 μm)	2 (1000 μm)	3 (3 pites)
9	1 (centro)	3 (300 μm)	3 (1500 μm)	1 (1 pite)
10	2 (aresta)	1 (100 μm)	1 (500 μm)	3 (3 pites)
11	2 (aresta)	1 (100 μm)	2 (1000 μm)	1 (1 pite)
12	2 (aresta)	1 (100 μm)	3 (1500 μm)	2 (2 pites)
13	2 (aresta)	2 (200 μm)	1 (500 μm)	2 (2 pites)
14	2 (aresta)	2 (200 μm)	2 (1000 μm)	3 (3 pites)
15	2 (aresta)	2 (200 μm)	3 (1500 μm)	1 (1 pite)
16	2 (aresta)	3 (300 μm)	1 (500 μm)	3 (3 pites)
17	2 (aresta)	3 (300 μm)	2 (1000 μm)	1 (1 pite)
18	2 (aresta)	3 (300 μm)	3 (1500 μm)	2 (2 pites)

FONTE: o Autor

A partir da Equação (11), o desempenho em fadiga das amostras com pites foi organizado conforme a sensibilidade aos parâmetros dos pites. Esta sensibilidade refere-se à variação do desempenho em fadiga conforme a variação de cada parâmetro, ou seja, a sensibilidade é maior quando a variação do número de ciclos do ensaio dinâmico é grande em uma pequena variação de um determinado parâmetro. A Tabela 29 apresenta os valores obtidos para cada nível dos parâmetros analisados.

Tabela 29: Sinal-ruído dos ensaios dinâmicos conforme parâmetros de pites.

Parâmetro	Valor	$\left(\frac{S}{N}\right)$	$\left(\frac{S}{N}\right)_{max} - \left(\frac{S}{N}\right)_{min}$
Profundidade	1 (100 μm)	93,89	
	2 (200 μm)	93,70	0,55
	3 (300 μm)	93,34	
Diâmetro	1 (500 μm)	95,63	
	2 (1000 μm)	92,96	3,26
	3 (1500 μm)	92,36	
Quantidade	1 (1 pite)	94,27	
	2 (2 pites)	93,50	1,09
	3 (3 pites)	93,18	
Localização	1 (centro)	92,22	
	2 (aresta)	95,07	2,85

FONTE: o Autor

A partir dos dados obtidos, é possível observar que a variação do desempenho em fadiga é maior conforme a variação do diâmetro dos pites, considerando as dimensões mais comumente observadas em fios da armadura de tração retirados de operação. Logo em seguida, observa-se o efeito da localização dos pites no fio (as amostras com pites no centro apresentaram desempenho em fadiga inferior às amostras com pites na aresta). Os parâmetros que menos influenciaram no desempenho em fadiga foram a profundidade do pite e a quantidade dos pites.

Ainda, considerou-se o efeito da razão de aspecto $\left(\frac{a}{2c}\right)$ sobre o desempenho em fadiga das amostras, conforme Tabela 30. É possível observar que a maior razão de aspecto não corresponde ao menor número de ciclos, assim como a menor razão de aspecto não corresponde ao maior número de ciclos, como sugeriria uma análise baseada unicamente no fator de concentração de tensões.

Tabela 30: Número de ciclos dos ensaios dinâmicos conforme a razão de aspecto e fator de concentração de tensões dos pites medidos nas amostras.

Grupo	$\left(\frac{a}{2c}\right)$	k_t	Redução em fadiga	Ciclos			
				Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4
1	0,06	1,25	53%	59634	47145	58255	63801
2	0,1	1,38	65%	44492	31518	52034	39857
3	0,067	1,27	72%	31371	31370	36231	37888
4	0,1	1,38	53%	50167	55756	51994	70159
5	0,16	1,56	69%	40571	34748	40309	33691
6	0,113	1,43	70%	35950	35700	36420	35500
7	0,1	1,38	60%	48829	53476	42235	47246
8	0,25	1,77	73%	30376	35228	30593	32123
9	0,167	1,58	69%	35226	38795	37152	38585
10	0,125	1,46	43%	68484	93325	68380	52313
11	0,15	1,53	40%	82752	61252	90304	55394
12	0,1	1,38	64%	43110	48315	39339	42919
13	0,167	1,58	41%	69567	65018	75011	74476
14	0,2	1,66	58%	54448	55243	46734	45233
15	0,18	1,61	59%	46845	47925	49792	55674
16	0,117	1,44	41%	77180	62059	67293	78046
17	0,3	1,86	60%	51448	45198	51921	45654
18	0,2	1,66	57%	53555	53216	51148	52630

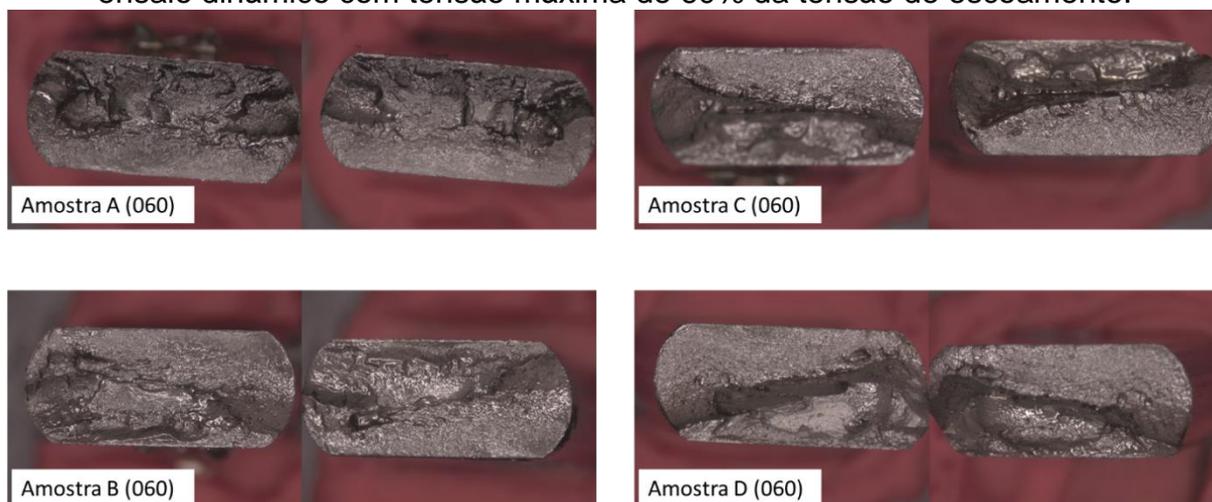
FONTE: o Autor

Por exemplo, comparando o desempenho em fadiga dos grupos 2, 4 e 7, de mesma razão de aspecto e mesmo k_t , com pites localizados na face plana da amostra, o grupo 2 teve um desempenho, em média, inferior. Dentre os três grupos, o grupo 2 possuía pites de maior diâmetro do que os grupos 4 e 7, corroborando a ideia de que o diâmetro dos defeitos foi o fator determinante no desempenho em fadiga. De forma similar, dentre os grupos 1 e 3, com k_t s próximos, o grupo de maior diâmetro (grupo 3) obteve um desempenho em fadiga inferior.

4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS FRATURAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA

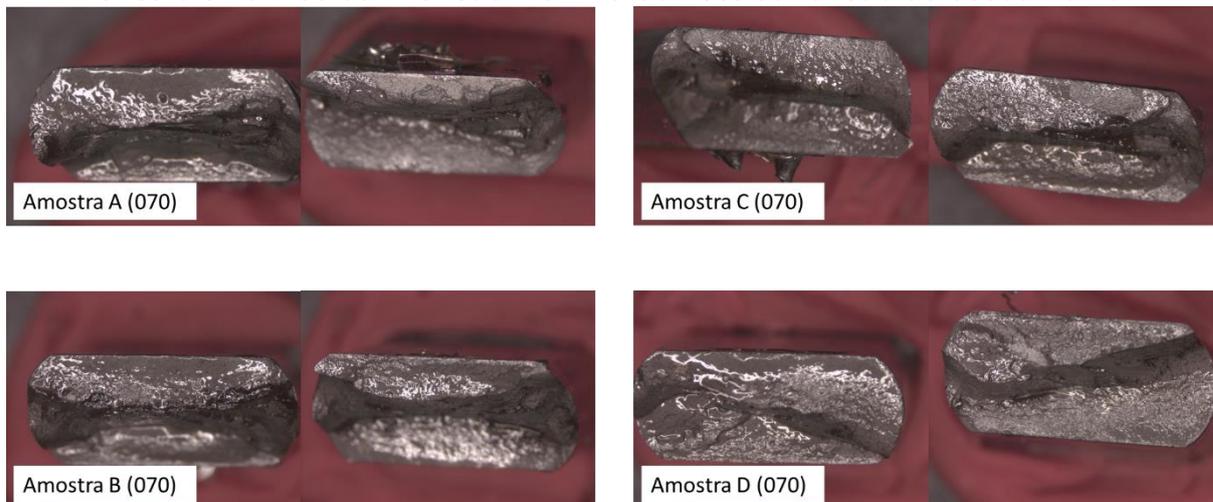
Após a realização dos ensaios, as superfícies de fratura foram analisadas através de uma lupa *Olympus* modelo 5z-ctv. Em cada superfície, foi identificada a região de propagação da fratura e, considerando os defeitos induzidos por eletroerosão, os pites foram apontados como origens das falhas. Da Figura 53 até a Figura 56 são apresentadas as macrografias obtidas do grupo de controle (Grupo 0), sem defeitos induzidos. Da Figura 57 à Figura 65 são apresentadas as macrografias obtidas dos grupos com defeitos induzidos na superfície plana, no centro das amostras (Grupos 1 – 9). Da Figura 66 à Figura 74 são apresentadas as macrografias obtidas dos grupos com defeitos induzidos na aresta das amostras (Grupos 10 – 18). Algumas amostras não romperam por completo nos ensaios dinâmicos e, portanto, não possuem macrografias da superfície de fratura. Apesar de terem seus ensaios finalizados pelo critério de falha ($\Delta\sigma$ abaixo de 95%, conforme metodologia de ensaio), não foi possível produzir imagens de fraturas ao longo da seção transversal. É o caso das amostras A(4), C(13), D(13), A(16) e D(16).

Figura 53: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 0 (sem defeitos), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 60% da tensão de escoamento.



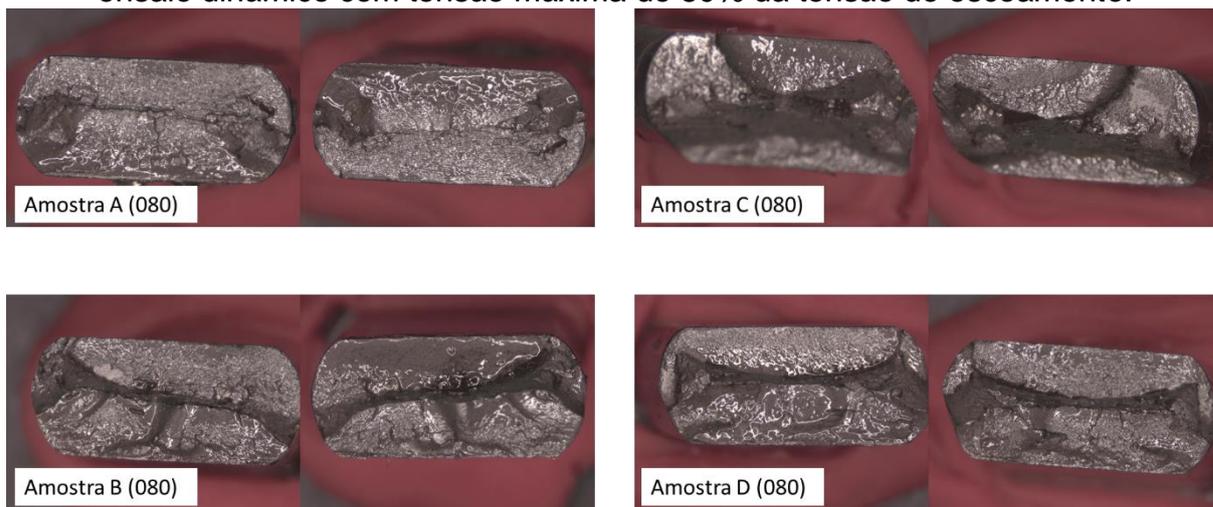
FONTE: o Autor

Figura 54: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 0 (sem defeitos), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



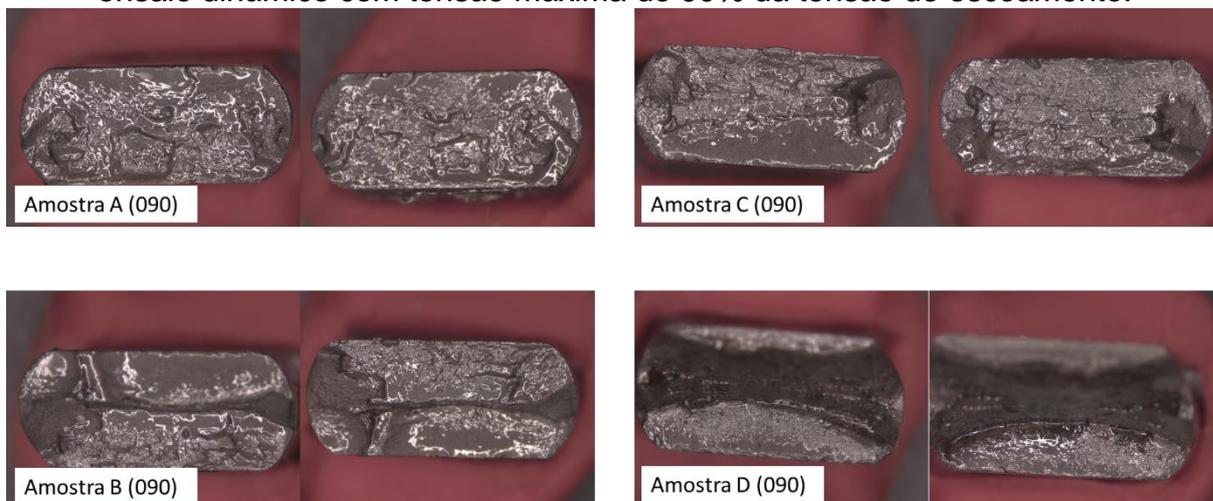
FONTE: o Autor

Figura 55: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 0 (sem defeitos), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 80% da tensão de escoamento.



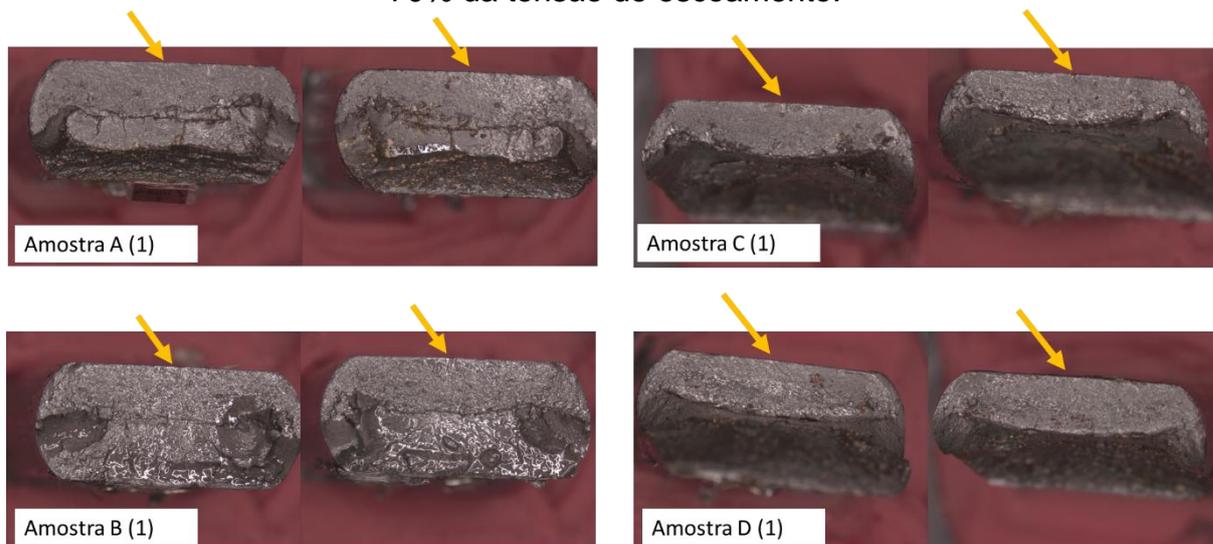
FONTE: o Autor

Figura 56: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 0 (sem defeitos), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 90% da tensão de escoamento.



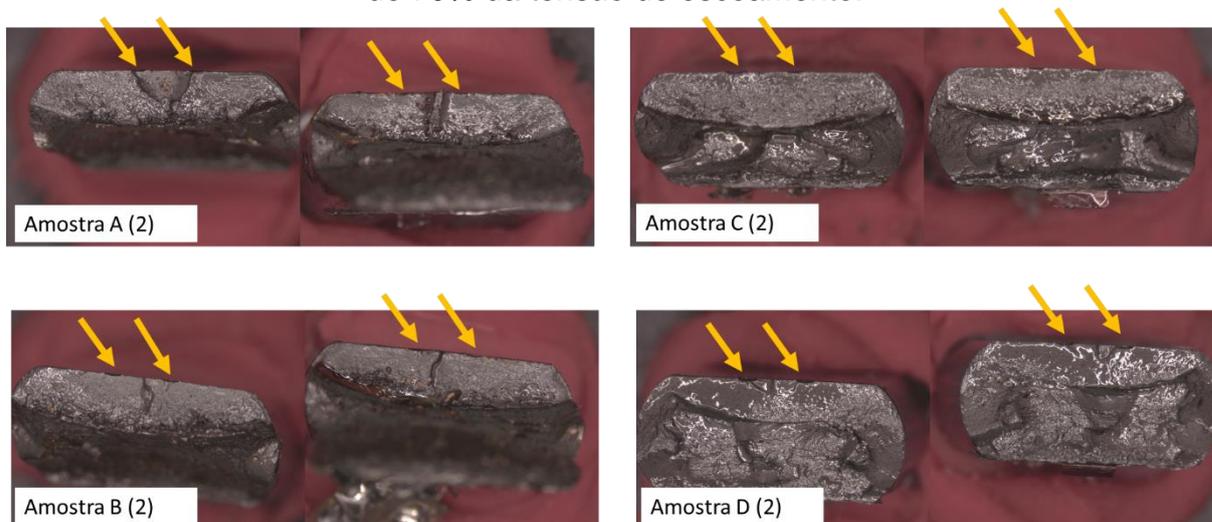
FONTE: o Autor

Figura 57: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 1 (defeito com 0,03 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



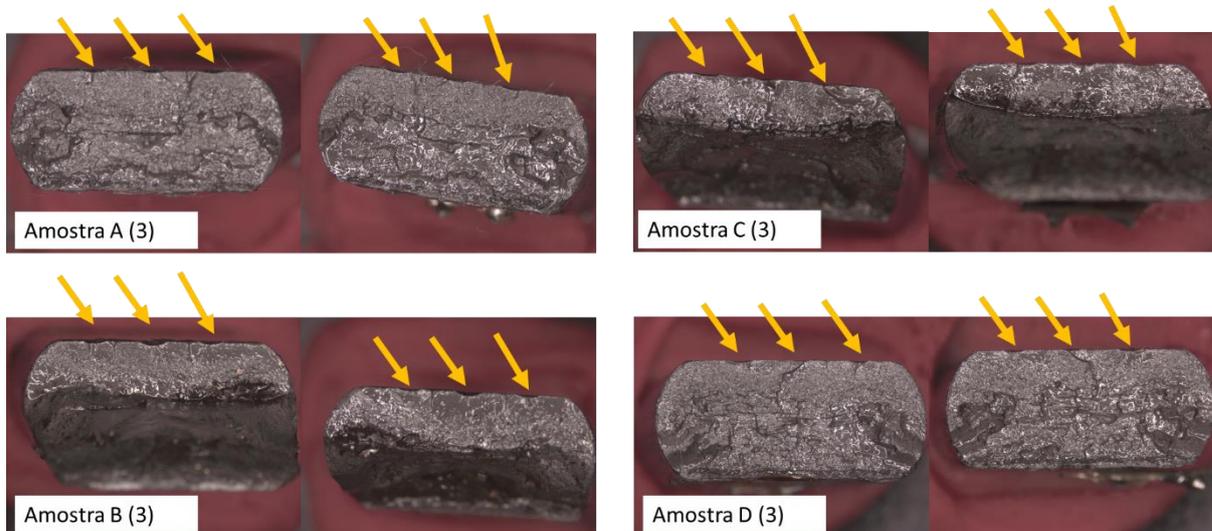
FONTE: o Autor

Figura 58: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 2 (2 defeitos com 0,1 mm de profundidade e 0,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



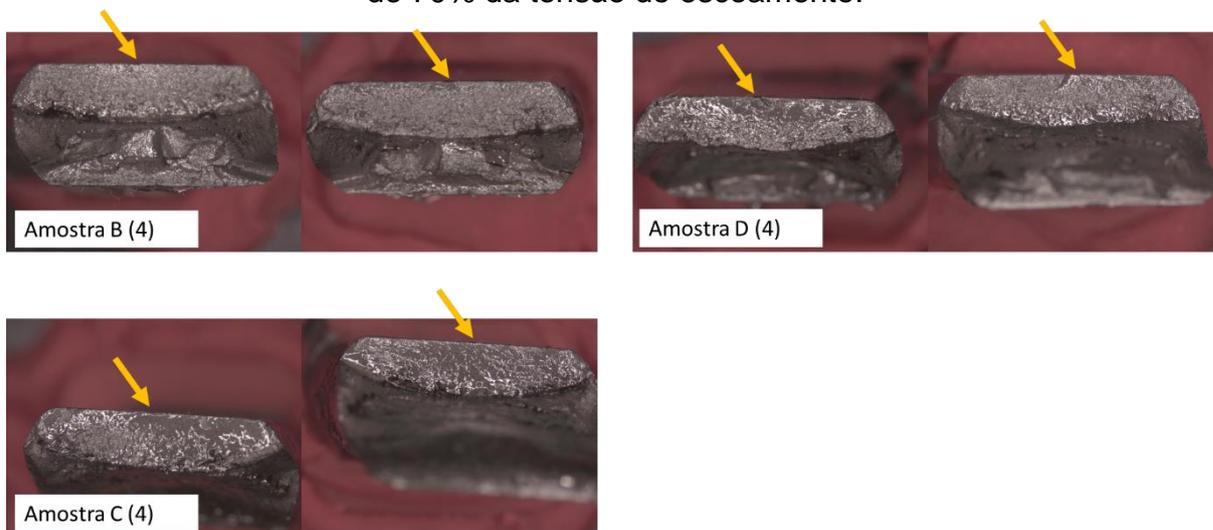
FONTE: o Autor

Figura 59: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 3 (3 defeitos com 0,1 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



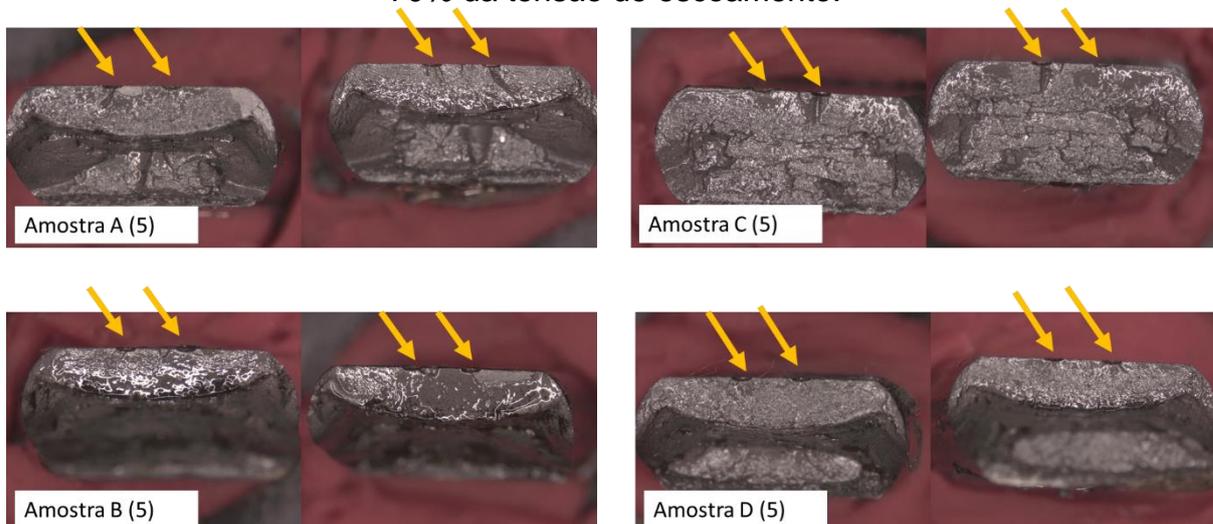
FONTE: o Autor

Figura 60: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 4 (1 defeito com 0,05 mm de profundidade e 0,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



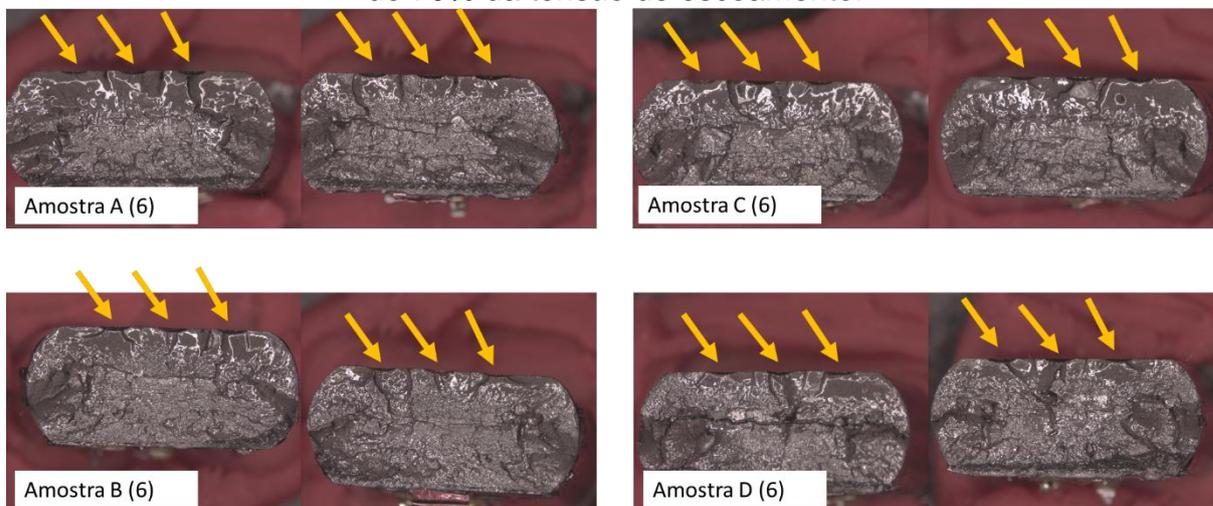
FONTE: o Autor

Figura 61: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 5 (2 defeitos com 0,16 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



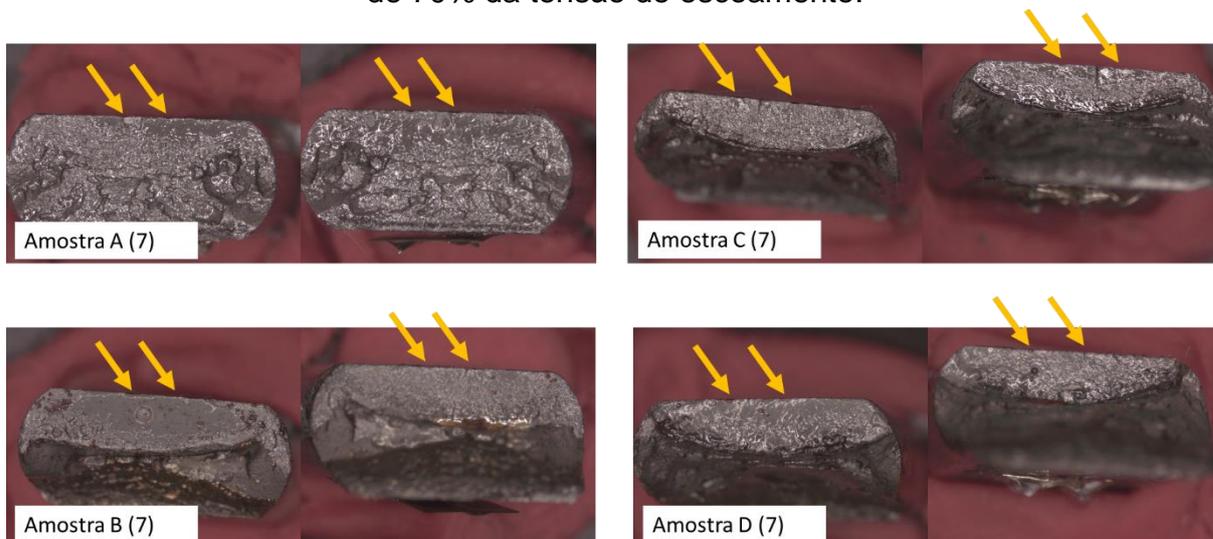
FONTE: o Autor

Figura 62: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 6 (3 defeitos com 0,17 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



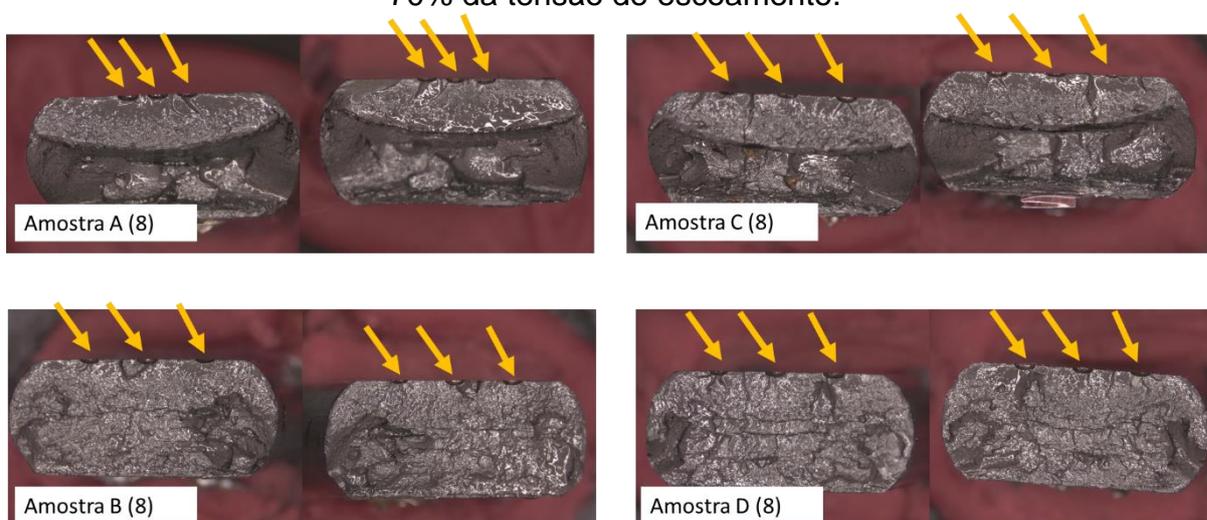
FONTE: o Autor

Figura 63: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 7 (2 defeitos com 0,05 mm de profundidade e 0,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



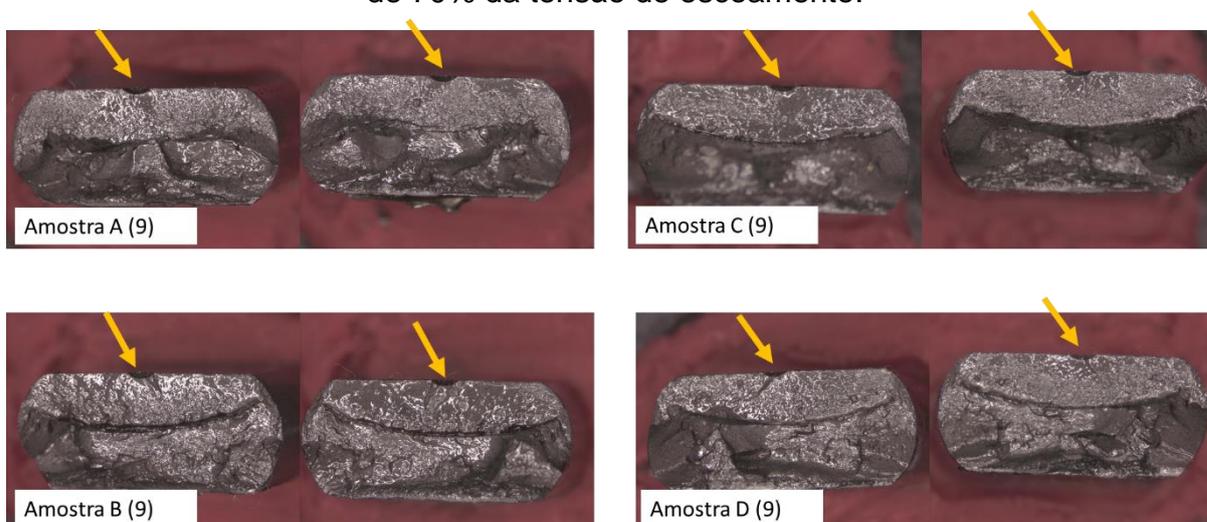
FONTE: o Autor

Figura 64: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 8 (3 defeitos com 0,25 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



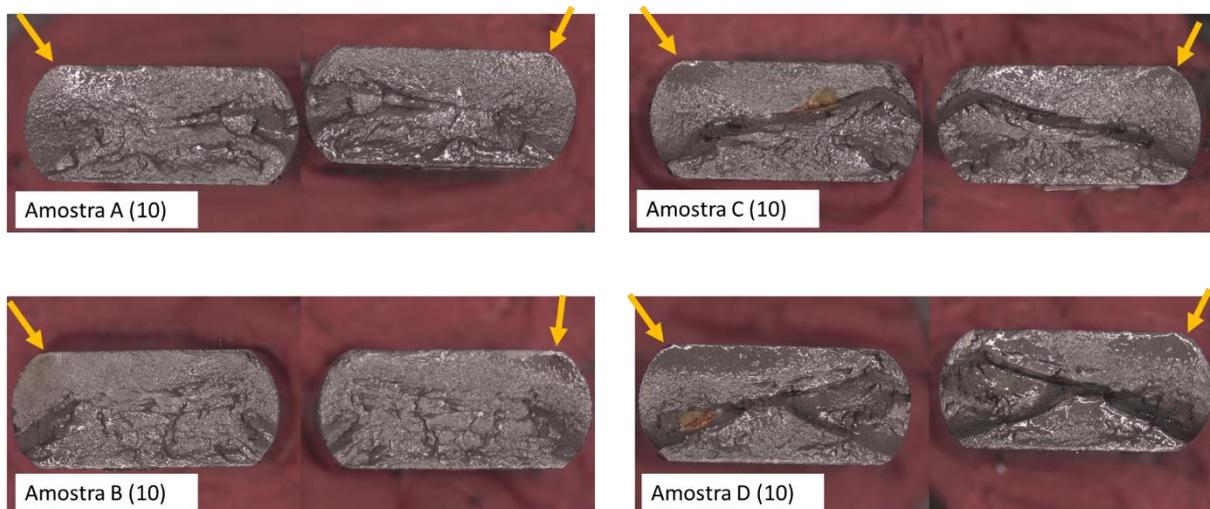
FONTE: o Autor

Figura 65: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 9 (1 defeito com 0,25 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



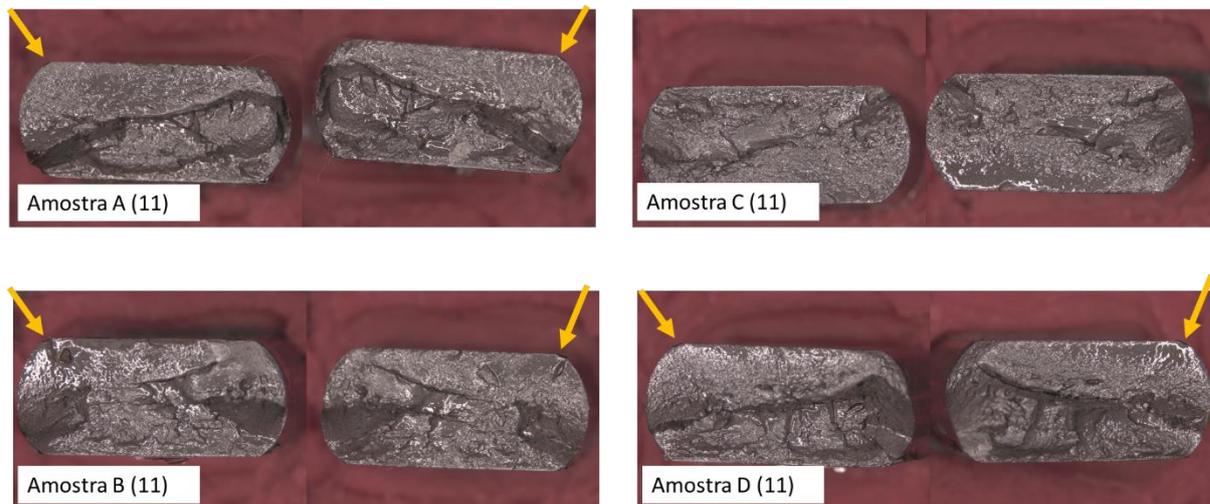
FONTE: o Autor

Figura 66: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 10 (3 defeitos com 0,1 mm de profundidade e 0,8 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



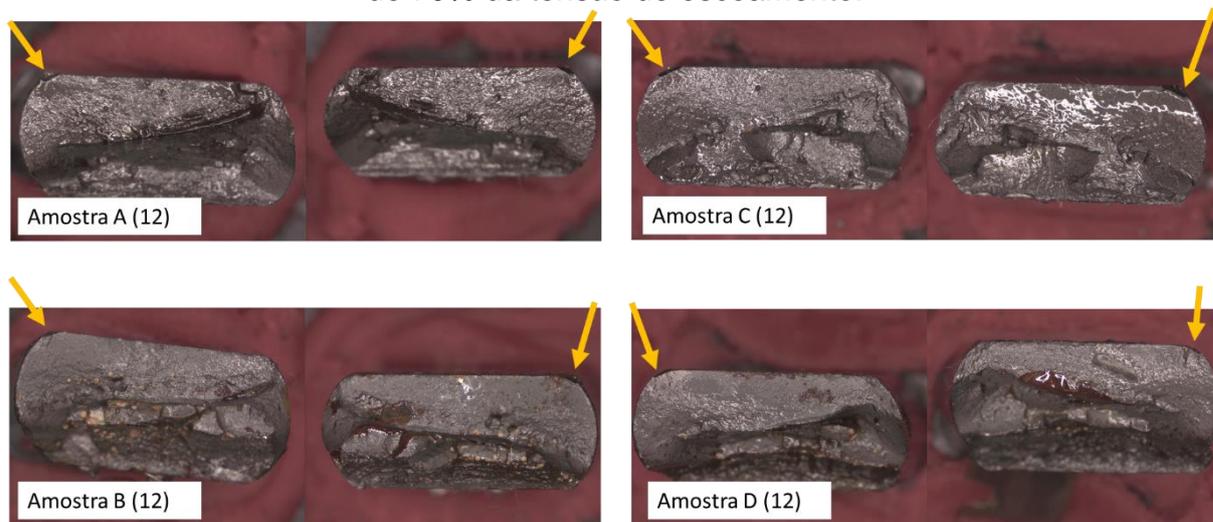
FONTE: o Autor

Figura 67: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 11 (1 defeito com 0,15 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



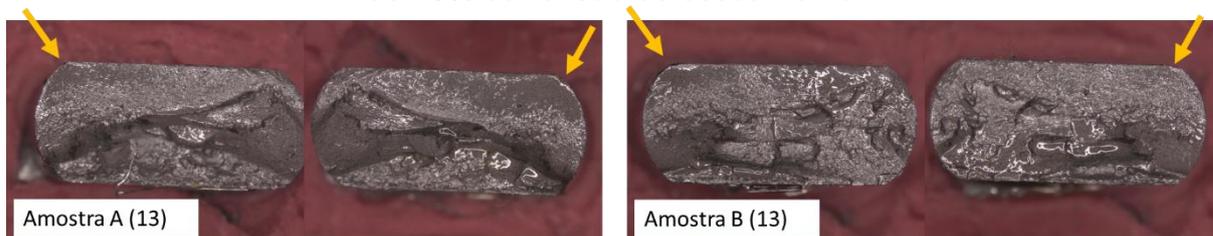
FONTE: o Autor

Figura 68: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 12 (2 defeitos com 0,15 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



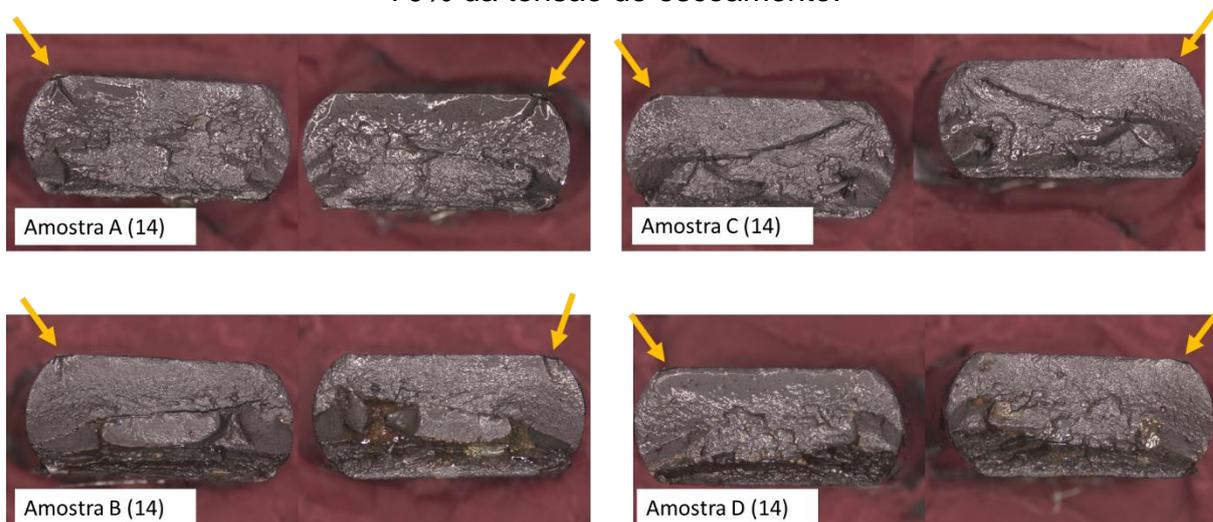
FONTE: o Autor

Figura 69: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 13 (2 defeitos com 0,1 mm de profundidade e 0,6 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



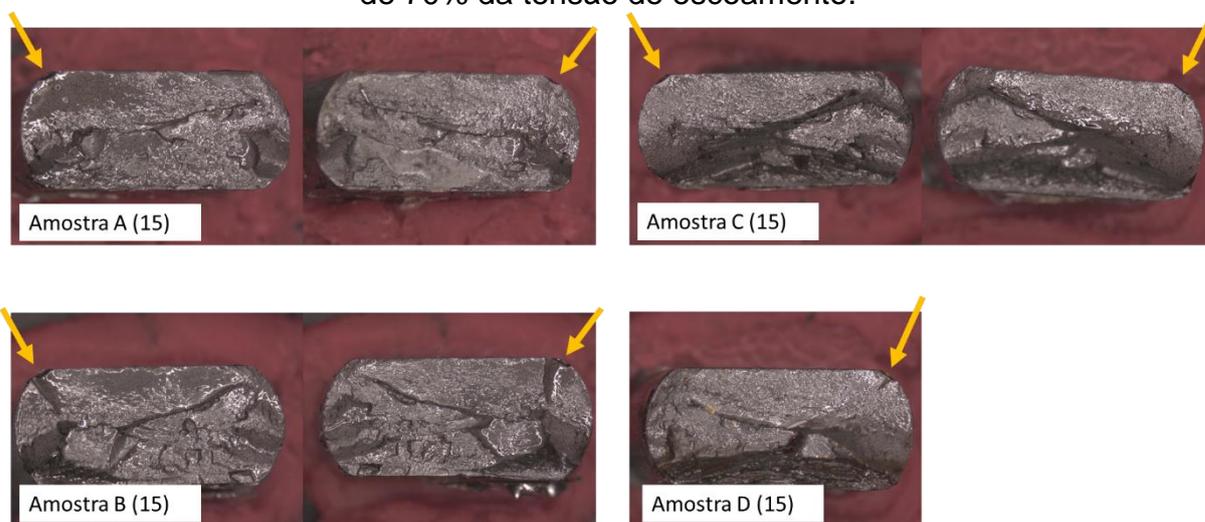
FONTE: o Autor

Figura 70: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 14 (3 defeitos com 0,2 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



FONTE: o Autor

Figura 71: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 15 (1 defeito com 0,27 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



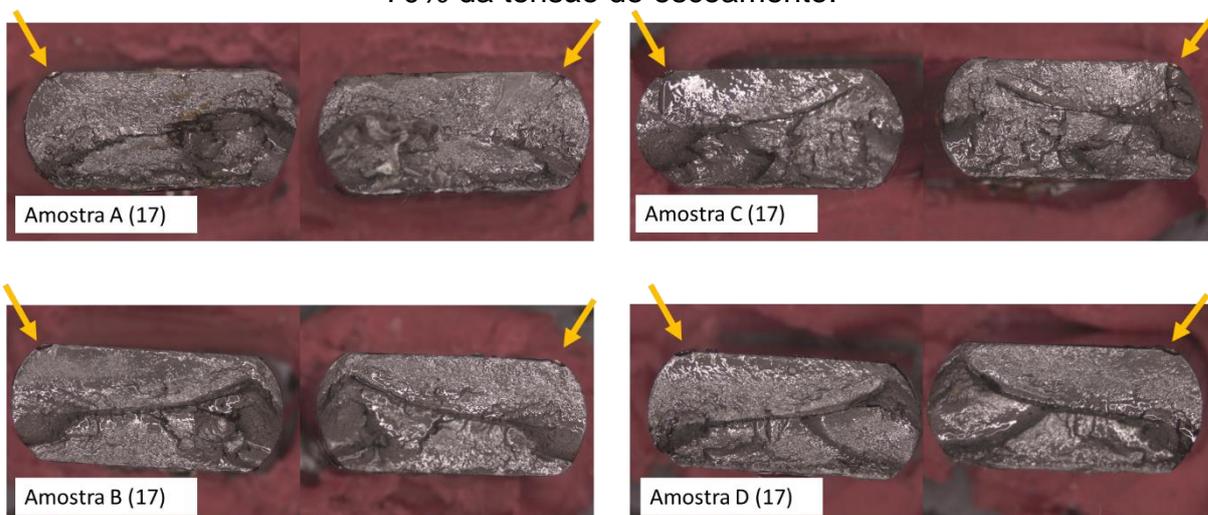
FONTE: o Autor

Figura 72: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 16 (3 defeitos com 0,07 mm de profundidade e 0,6 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



FONTE: o Autor

Figura 73: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 17 (1 defeito com 0,3 mm de profundidade e 1 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.



FONTE: o Autor

Figura 74: Superfícies de fratura das amostras do Grupo 18 (2 defeitos com 0,3 mm de profundidade e 1,5 mm de diâmetro), após ensaio dinâmico com tensão máxima de 70% da tensão de escoamento.

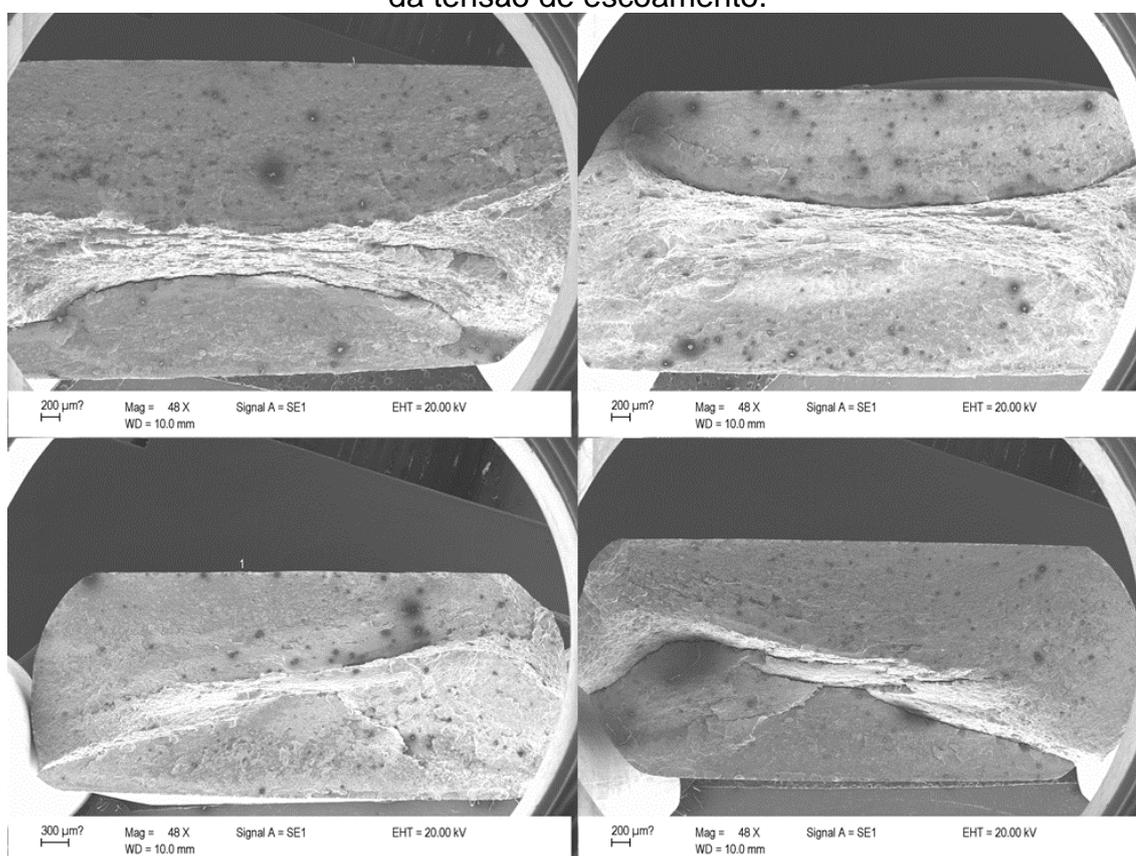


FONTE: o Autor

4.5 CARACTERIZAÇÃO DAS FRATURAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A análise das superfícies de fratura por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), realizada em microscópio *Zeiss EVO 10*, revelou a região de nucleação e propagação das trincas que ocasionaram as falhas por fadiga dos fios ensaiados. A Figura 75 apresenta a superfície de fratura de duas amostras, sem defeitos superficiais, ensaiadas em fadiga a 70 % da tensão de escoamento, o mesmo nível de tensões aplicado nas amostras com pites de eletroerosão.

Figura 75: Superfície de fratura de amostras sem corrosão prévia ensaiadas a 70% da tensão de escoamento.

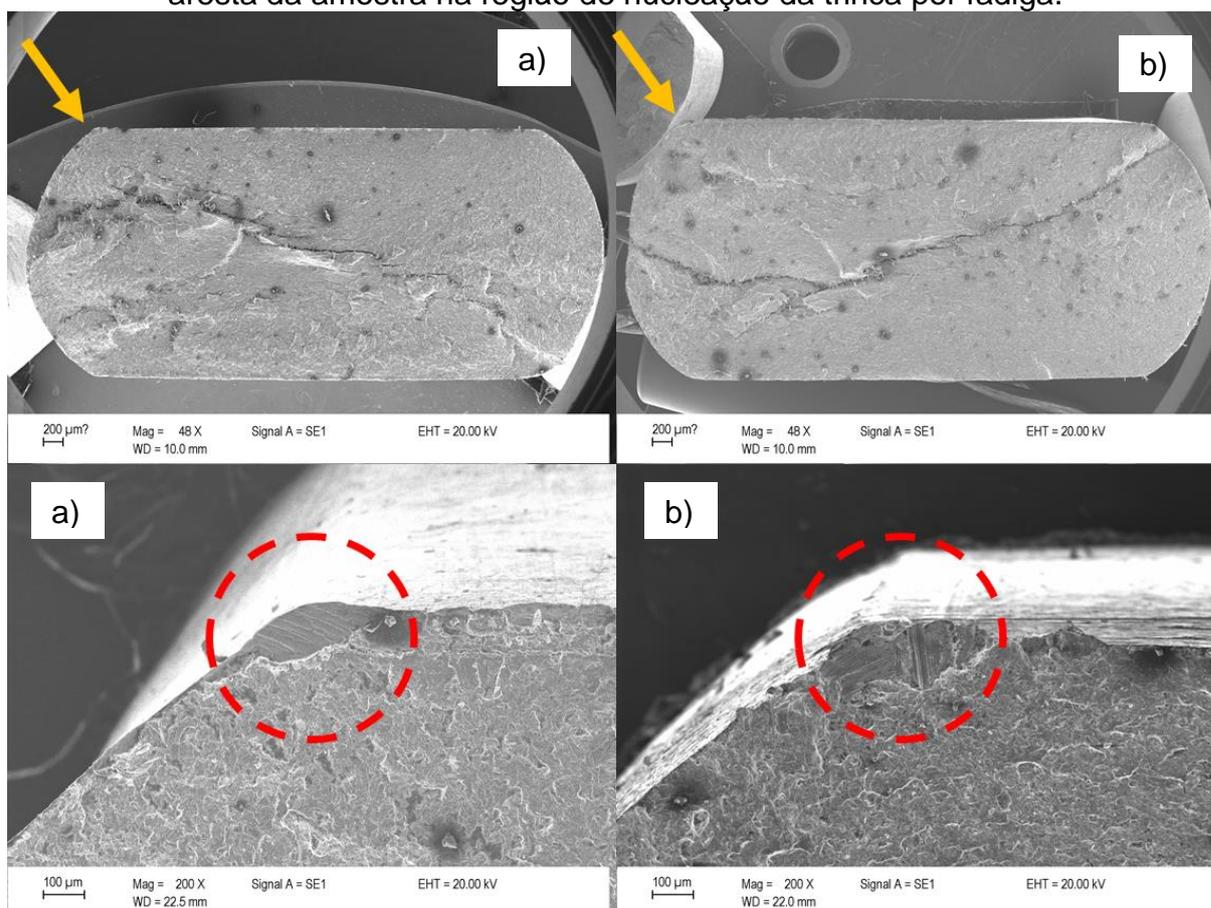


FONTE: o Autor

Dentre os corpos de prova com pites por eletroerosão submetidos a ensaios dinâmicos, apenas um apresentou fratura não propagada pelo pite gerado: a amostra C do grupo 11 (com um pite de 1000 μm de diâmetro e 150 μm de profundidade na aresta do fio). A análise por Microscopia Eletrônica de Varredura da

superfície de fratura desta amostra revelou a presença de um defeito na aresta, próximo à superfície, na região de nucleação da trinca por fadiga, com dimensões da ordem de 400 μm (Figura 76). Foi identificado também um defeito superficial (Figura 76 – a) na aresta oposta ao defeito que originou a trinca por fadiga (Figura 76 – b).

Figura 76: Superfície de fratura da amostra 11-C, revelando defeito que originou a trinca por fadiga. a) defeito superficial na aresta da amostra. b) defeito superficial na aresta da amostra na região de nucleação da trinca por fadiga.

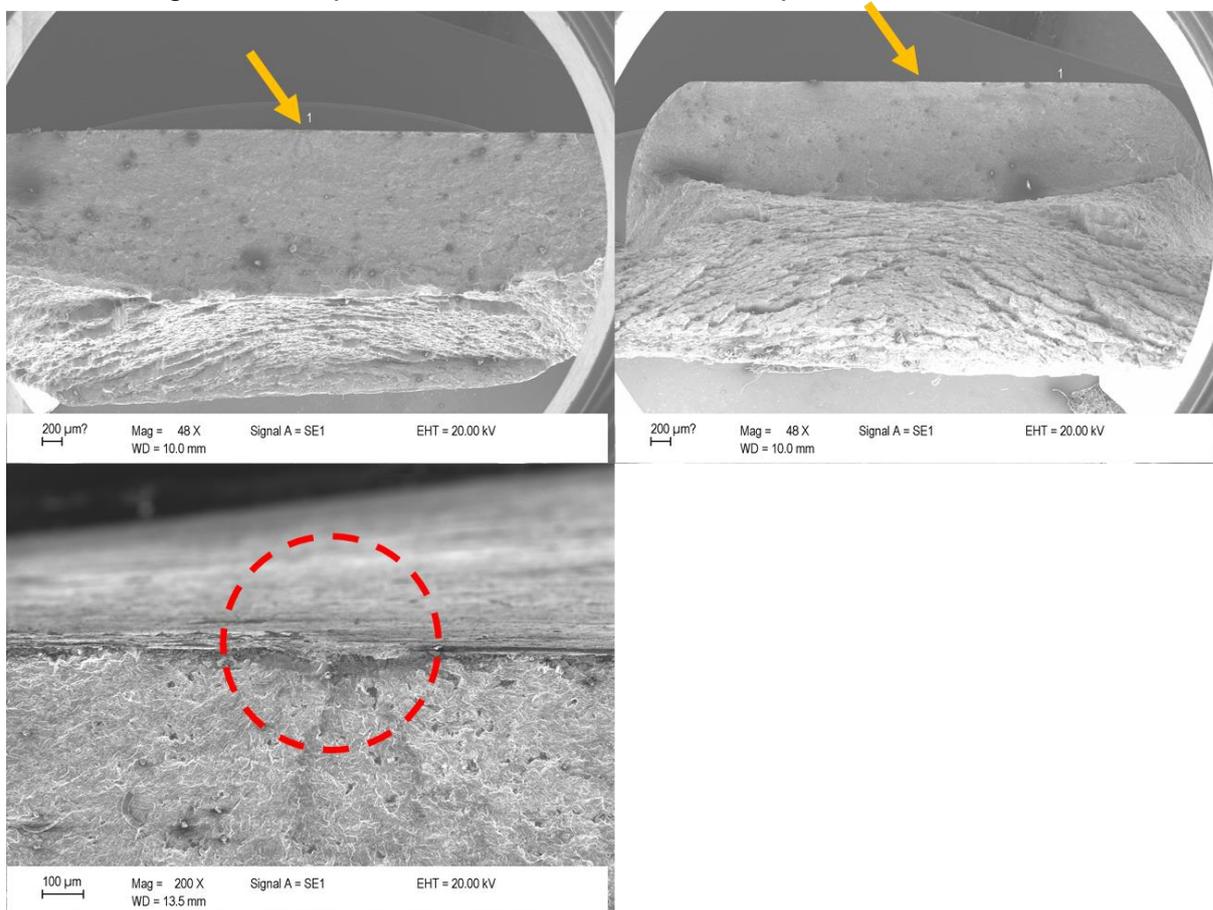


FONTE: o Autor

O restante das fraturas analisadas demonstrou a propagação da trinca a partir dos pites gerados na superfície do fio. Da Figura 79 até a Figura 81 são apresentadas as superfícies de fratura de algumas amostras com pites produzidos por eletroerosão, ensaiadas em fadiga.

A Figura 77 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova D do grupo 1, com 1 pite de 500 μm de diâmetro e 40 μm de profundidade na superfície plana do fio.

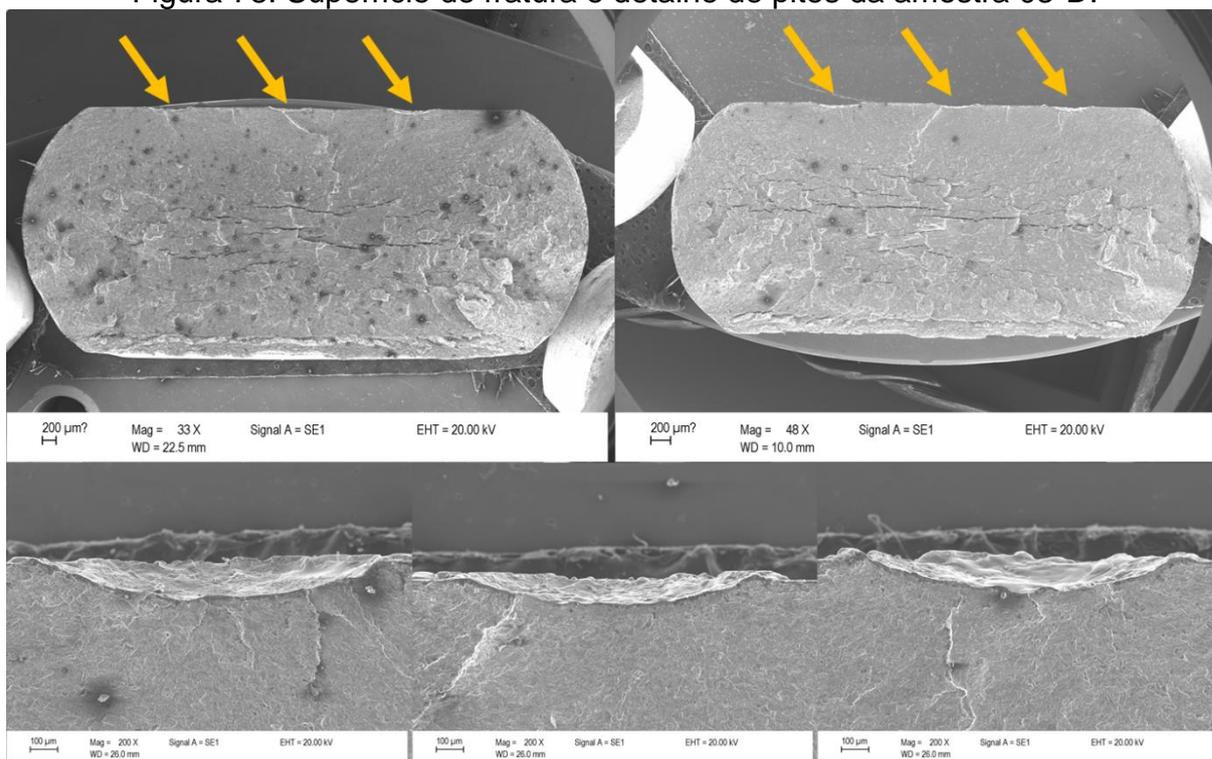
Figura 77: Superfície de fratura e detalhe de pite da amostra 01-D.



FONTE: o Autor

A Figura 78 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova D do grupo 3, com 3 pites de 1500 μm de diâmetro e 200 μm de profundidade na superfície plana do fio.

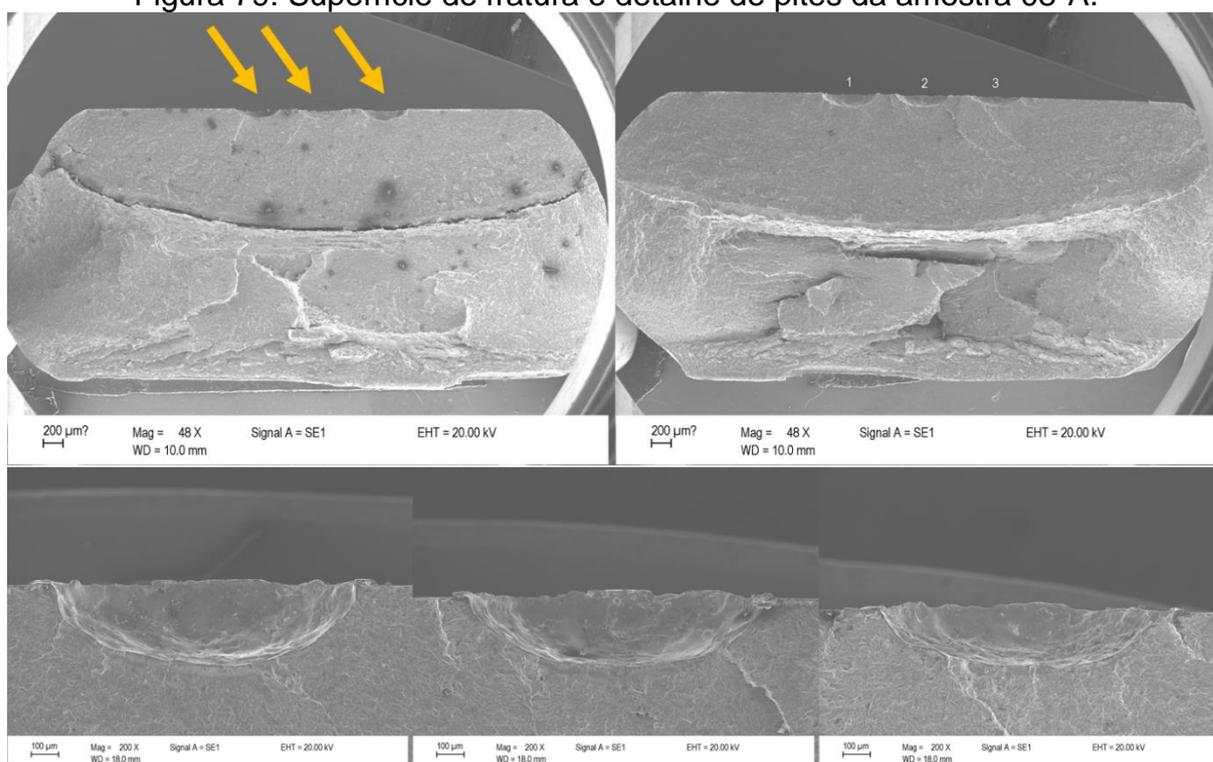
Figura 78: Superfície de fratura e detalhe de pites da amostra 03-D.



FONTE: o Autor

A Figura 79 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova A do grupo 8, com 3 pites de 1000 µm de diâmetro e 300 µm de profundidade na superfície plana do fio.

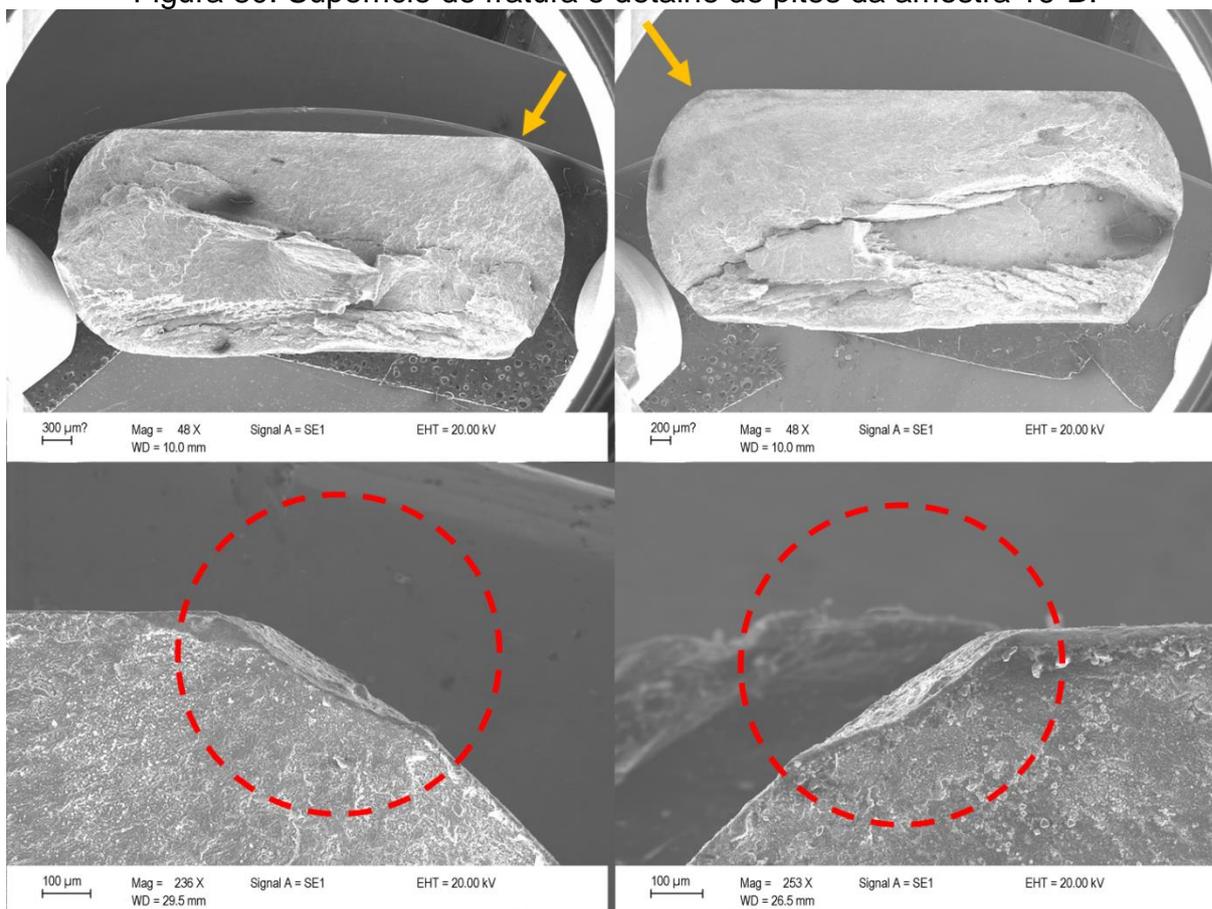
Figura 79: Superfície de fratura e detalhe de pites da amostra 08-A.



FONTE: o Autor

A Figura 80 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova B do grupo 16, com 3 pites de 700 μm de diâmetro e 80 μm de profundidade na aresta do fio.

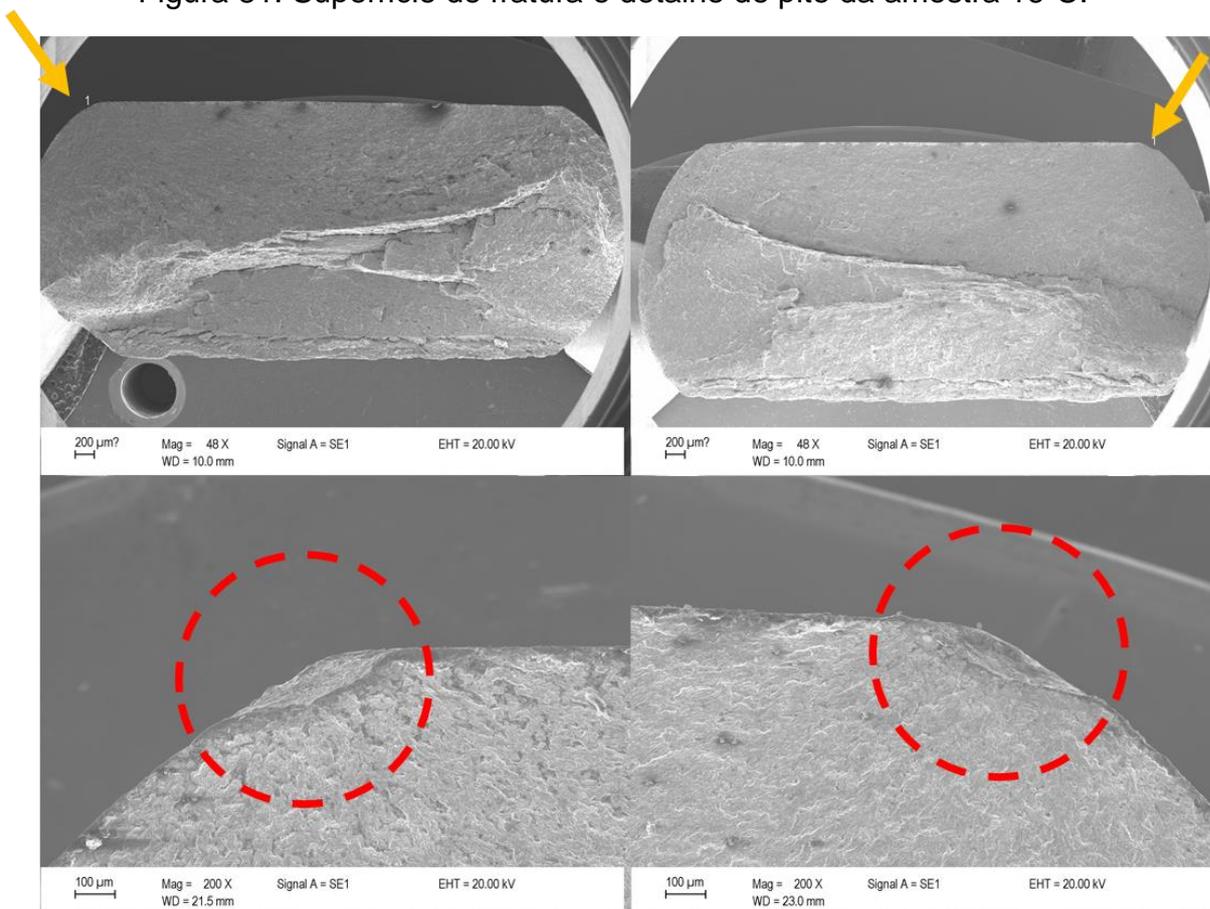
Figura 80: Superfície de fratura e detalhe de pites da amostra 16-B.



FONTE: o Autor

A Figura 81 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova C do grupo 16, com 3 pites de 700 μm de diâmetro e 60 μm de profundidade na aresta do fio.

Figura 81: Superfície de fratura e detalhe de pite da amostra 16-C.



FONTE: o Autor

Além dos pontos de nucleação e propagação das trincas de fadiga, foi possível observar nas superfícies de fratura regiões de delaminação. Isso provavelmente se deve ao processo de fabricação dos fios das armaduras de tração, que envolve deformações mecânicas no sentido longitudinal e promove deformação dos grãos, como observado na Figura 20 da caracterização metalográfica (Seção 3.2.1).

5 CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos pelos ensaios dinâmicos das amostras utilizadas permitiu relacionar os parâmetros de defeitos, semelhantes a pites de corrosão, produzidos artificialmente pelo processo de eletroerosão, com o seu desempenho em fadiga. Ainda, foi possível avaliar as características superficiais de pites gerados por eletroerosão, quando comparadas aos parâmetros inicialmente planejados.

Na produção de pites superficiais por eletroerosão, observou-se que o método não é adequado para gerar defeitos semi-elípticos com diâmetros de 500 μm e profundidades acima de 100 μm . Supõe-se que para geometrias de diâmetro inferior a 500 μm e profundidades acima de 300 μm a geometria obtida seja ainda mais irregular e difícil de obter conforme parâmetros planejados;

A geração de pites na aresta das amostras também provou ser difícil de controlar, sobretudo tratando-se de uma região do fio em que há variação considerável da tangente superficial. Os pites gerados por eletroerosão na aresta das amostras diferiram muito dos defeitos inicialmente planejados, em especial o parâmetro de profundidade do defeito;

Os ensaios dinâmicos mostraram que o parâmetro mais influente na redução do número de ciclos em fadiga é o diâmetro do defeito superficial. Os demais parâmetros (profundidade, quantidade e localização) não demonstraram uma influência tão significativa;

A razão de aspecto dos pites gerados, normalmente considerada como parâmetro dominante na redução da vida em fadiga, mostrou-se menos influente que o diâmetro dos defeitos: para grupos de amostras com pites de mesma razão de aspecto, as amostras com pites de maior diâmetro tiveram redução significativa na vida em fadiga, enquanto grupos de amostras com pites de mesmo diâmetro tiveram desempenhos similares, mesmo com razões de aspecto significativamente diferentes.

Quantitativamente, os ensaios em fadiga dos fios com pites gerados por eletroerosão indicaram redução entre 52% e 74% da vida em fadiga para pites localizados na face plana dos corpos de prova e redução entre 40% e 64% da vida

em fadiga para pites localizados na aresta dos corpos de prova em $\Delta\sigma = 800$ MPa (70% σ_y).

Em termos de efeitos sobre a vida em fadiga, as amostras com pites gerados por eletroerosão apresentaram redução similar à estimada em trabalhos anteriores, considerando a geometria dos pites. O método mostrou-se confiável para a estimativa da vida em fadiga de fios com pites, desde que observadas as dimensões, sobretudo a profundidade dos defeitos superficiais: pites de pequeno diâmetro e grande profundidade (diâmetros de 500 μm ou menos) não puderam ser gerados pelo método utilizado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de investigar os efeitos da degradação superficial de fios da armadura de tração de *risers* flexíveis no seu desempenho sob carregamento cíclico, sugerem-se as seguintes análises:

- Produção de pites superficiais por outros métodos, além da eletroerosão, observando a geração de geometrias similares às observadas em fios retirados de dutos em condições de operação;

- Ensaio em fadiga em níveis de tensão inferiores aos utilizados neste trabalho, com amostras de mesmas características, com o objetivo de obter uma curva S-N completa para fios pré-corroídos;

- Ensaio em fadiga de amostras com pites gerados por eletroerosão de dimensões não contempladas neste trabalho, observando os efeitos críticos do diâmetro de pite e localização na superfície do fio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). *Recommended Practice for Flexible Pipe*. Recommended Practice 17B. 4th ed. Washington, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. Fatigue. In: ASM INTERNATIONAL. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. ASM International, 2008. Cap. 14, p. 243.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E8M-04: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E739-91: Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life and Strain-Life Fatigue Data*. West Conshohocken, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E45-2013: Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel*. West Conshohocken, 2013.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E3-2011: Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. West Conshohocken, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM G46-94: Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*. West Conshohocken, 2005.

ASKELAND, D. R.; FULAY, P. P.; WRIGHT, W. J. *The Science and Engineering of Materials*. 6th. ed. Cengage Learning, 2011.

BABU, T. V.; SONI, J. S.; KUMAR, B. S.; KUMAR, S. A. *Electrical Discharge Machining (EDM): A Review*. In: International Journal of Engineering and Technology – Volume-40 Number-6. Seventh Sense Research Group, 2016.

BAI, Y., BAI, Q. *Subsea pipelines and risers*. 1st ed. Oxford: Elsevier, 2005.

BARNES, P. *An Investigation into the Corrosion Fatigue Behaviour of High Strength Carbon Steel Tensile Armor Wires*. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências Físicas) – The University of Manchester, Manchester, UK, 2014.

BERGE, S.; BENDIKSEN, E.; GUDME, J.; CLEMENTS, R. *Corrosion Fatigue Testing of Flexible Riser Armour: Procedures for Testing and Assessment of Design Criteria*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING (OMAE), 22. 2003, Cancun. *Proceedings...* New York: ASME, 2003. p. 225–231.

BERGE S.; WANG T.; LANGHELLE N. *Surface characterization and fatigue strength of corroded armor wire*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE

MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING (OMAE), 33. 2014, São Francisco, EUA. Proceedings... New York: ASME, 2014.

BOARDMAN, B. *Fatigue resistance of steels*. In: ASM Handbook Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys. ASM International, 1990, V. 1, p. 673–688.

CALLISTER JR., W. D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CAMPELLO, G. C. *Metodologia de projeto para o sistema de ancoragem de conectores de dutos flexíveis e proposição de novas tecnologias*. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de engenharia civil, Instituto de pós-graduação e pesquisa em engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014. 203p.

CERIT, M.; GENEL, K.; EKSI, S. *Numerical investigation on stress concentration of corrosion pit*. Engineering failure analysis, v. 16, n. 7, p. 2467–2472, out. 2009.
COSER, T. B. *Avaliação de revestimento protetor de alumínio aplicado a arames da armadura de tração de dutos flexíveis*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2016. 144 p.

DOWLING, N. E.; SIVA PRASAD, K.; NARAYANASAMY, R. *Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue*. 4th ed., Boston, Pearson, 2013. 977p.

FERGESTAD, D.; LØTVEIT, S. A. *Handbook on Design and Operation of Flexible Pipes*. 3rd ed. Trondheim: Marintek, NTNU, 4Subsea, 2014.

GENTIL, V. *Corrosão*. 3^a Ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ, 1996.

GONÇALVES, R. *Metodologia de análise da vida em fadiga da armadura de tração de dutos flexíveis submetidos a meios agressivos, um estudo comparativo*. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2018. 111 p.

HUDAK JR., S. J., FEIGER, J. H., ROBLEDO, G. B. *Corrosion-Fatigue Performance of High-Strength Riser Materials in Seawater and Sour Brine Environments*. San Antonio, TX, EUA: Southwest Research Institute, 2012. 79p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 4287: Geometric Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters*. Geneva, 1997.

JAKUBOWSKI, M. *Influence of pitting corrosion on fatigue and corrosion fatigue of ship and offshore structures, part 2: Load-pit-crack interaction*. Polish maritime research, Gdańsk, Volume 22, Issue 3, Pages 57–66, ISSN (Online) 2083-7429, DOI: 10.1515/pomr-2015-0057, October 2015.

KARNA, S. K.; SAHAI, R. *An overview on Taguchi Method*. International Journal of Engineering and Mathematical Sciences – Volume 1, Issue 1. 2012.

KRISHNAN, V. R., et al. *Flexible Armor Wires: Fatigue Load Frequency Effects and an Accelerated Pitting Methodology*. In: Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, CA, EUA, 2014.

KRISHNAN, V.; ASHER, S.; KAN, W.; POPELAR, C. *Effect of Pitting Corrosion on Fatigue Life of Flexible Armor Wires*. In: TWENTY-SIXTH INTERNATIONAL OCEAN AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 2016, Grécia. Proceedings... Rhodes: ISOPE, 2016.

KUMAR, A. *A Detail Study of Taguchi Technique*. International Journal of R&D in Engineering, Science and Management – Volume 5, Issue 2. Department of Mechanical Engineering, Rohtak, Haryana, India. 2017.

LEE, Y. L., et al. *Fatigue Testing and Analysis (Theory and Practice)*. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, 2005.

LEMOS, C. A. D. *Análise de Fadiga em Risers Flexíveis*. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de engenharia civil, Instituto de pós-graduação e pesquisa em engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2005. 248p.

MORAIS, J. M. *Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore*. 1ª ed. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2013.

NEGREIROS, L. A. S. *Avaliação da resistência à fadiga e corrosão-fadiga da armadura de tração de um riser flexível retirado de operação*. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2016. 196 p.

ROBERGE, P. R. *Handbook of corrosion engineering*. 1st ed. New York: McGraw-Hill, 2000. 1139 p.

ROSA, C. D. *Estudo da influência da geometria de defeitos pontuais produzidos por eletroerosão em fios de aço carbono submetidos a carregamentos cíclicos*. Trabalho de diplomação (Bacharel em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2019. 67p.

ROY, R. K. *A Primer on the Taguchi Method*. Dearborn, Michigan, Society of Manufacturing Engineers, 1990.

SCHÖNBAUER, B., et al. *Influence of Corrosion Pits on the Fatigue Limit of 12% Cr Steam Turbine Blade Steel*. Charlotte, NC, EUA, 2011.

SHIGLEY. *Mechanical Engineering Design*. 8th ed. Mc Graw-Hill, New York, NY, EUA 2006.

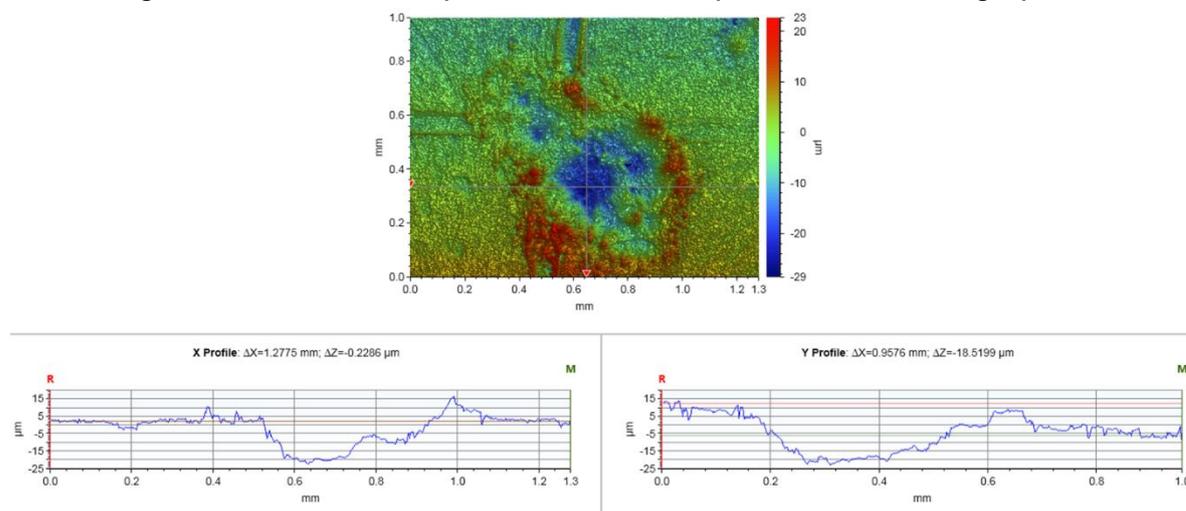
SIMONSEN, A. *Inspection and monitoring techniques for un-bonded flexible risers and pipelines*. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Offshore) – Faculty of Science and Technology, University of Stavanger, Stavanger, 2014. 74p.

SOUSA, J. R. M.; ELLWANGER, G. B.; LIMA, E. C. P. *Análise numérica de risers flexíveis*. 1999. Relatório Técnico, ET-150843, Instituto de pós-graduação e pesquisa em engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

SOUSA, J. R. M. *Análise local de linhas flexíveis pelo método dos elementos finitos*. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de engenharia civil, Instituto de pós-graduação e pesquisa em engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. 809p.

APÊNDICE A

Figura 82: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 1.



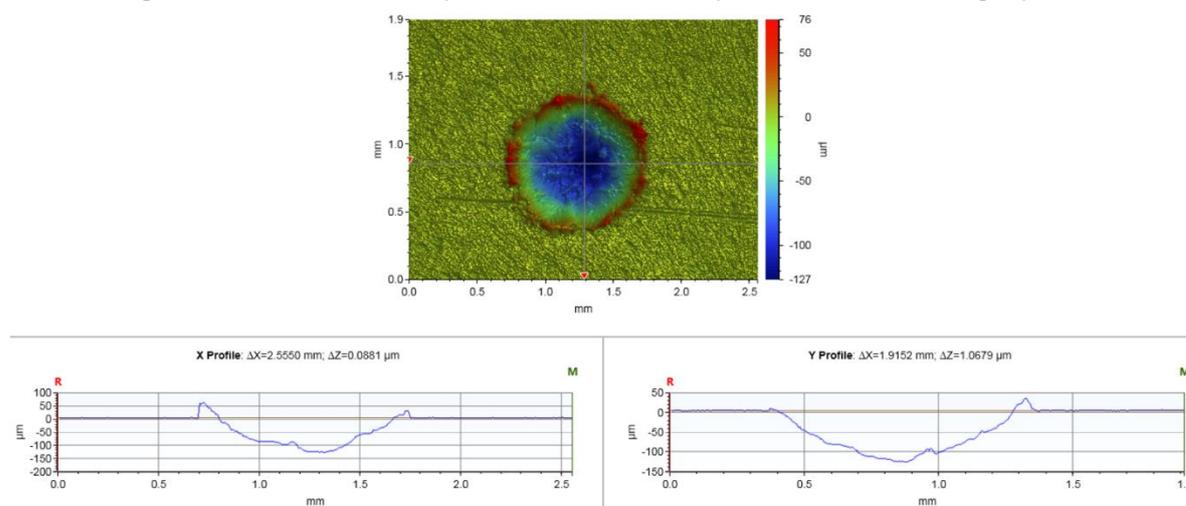
FONTE: o Autor

Tabela 31: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 1.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
1	Nominal	100	500	1	Centro
	Medido	30	500		

FONTE: o Autor

Figura 83: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 2.



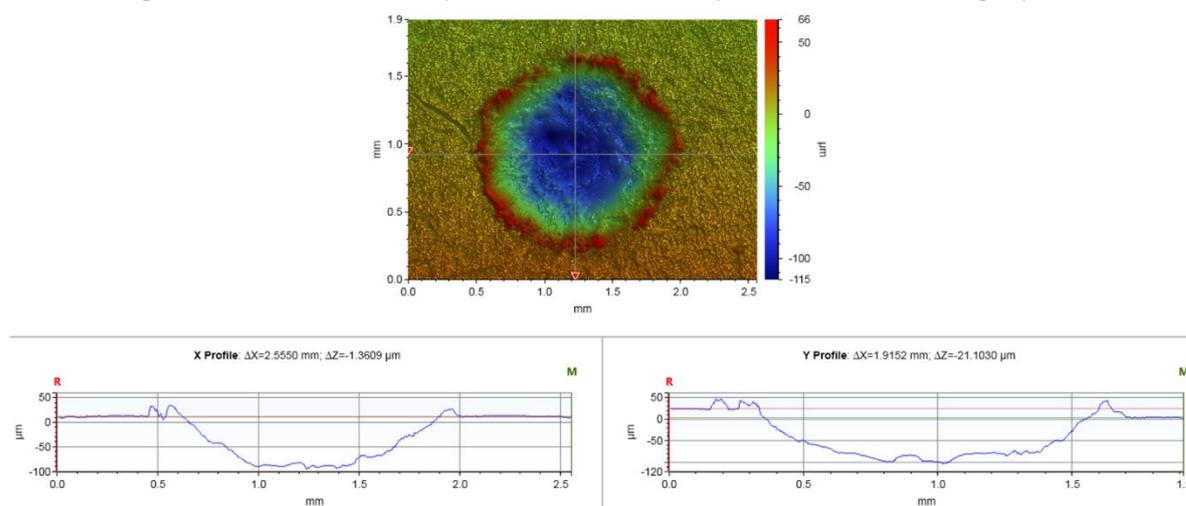
FONTE: o Autor

Tabela 32: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 2.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
2	Nominal	100	1000	2	Centro
	Medido	100	1000		

FONTE: o Autor

Figura 84: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 3.



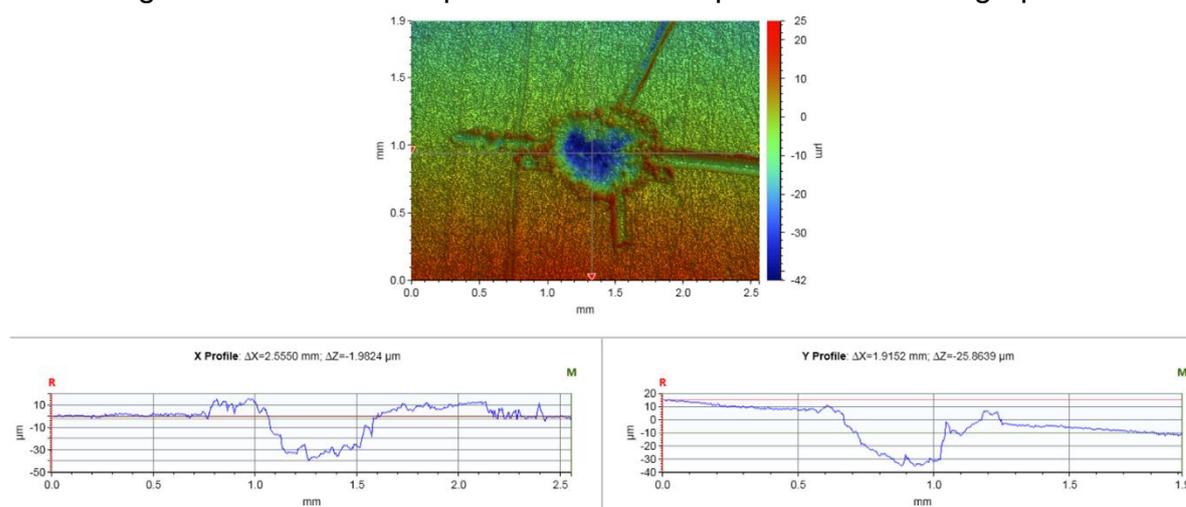
FONTES: o Autor

Tabela 33: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 3.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (µm)	Diâmetro (µm)	Quantidade	Localização
3	Nominal	100	1500	3	Centro
	Medido	100	1500		

FONTES: o Autor

Figura 85: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 4.



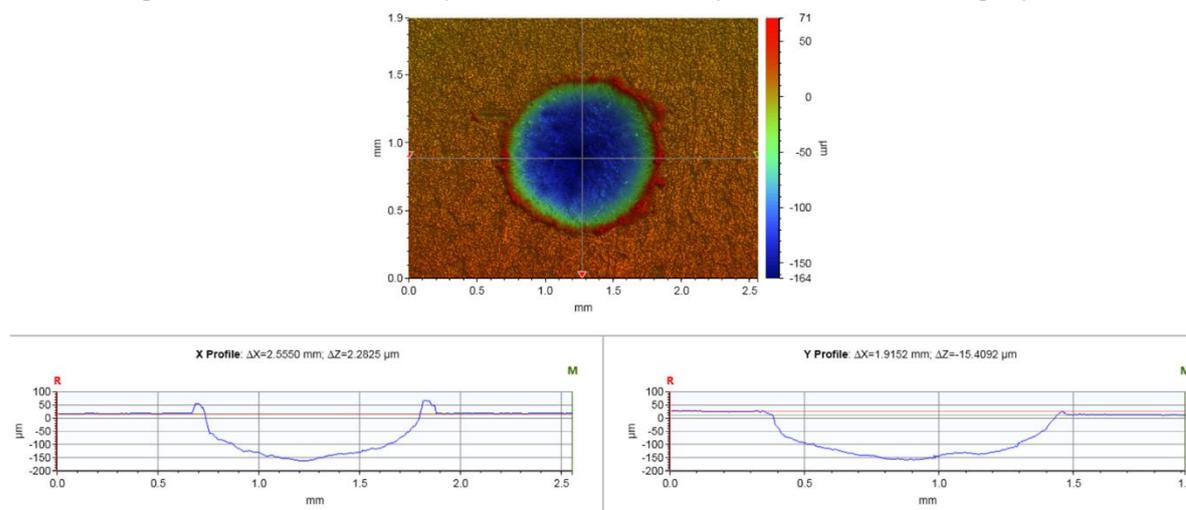
FONTE: o Autor

Tabela 34: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 4.

Grupo de Amostras	Característica				
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
4	Nominal	200	500	1	Centro
	Medido	40	500		

FONTE: o Autor

Figura 86: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 5.



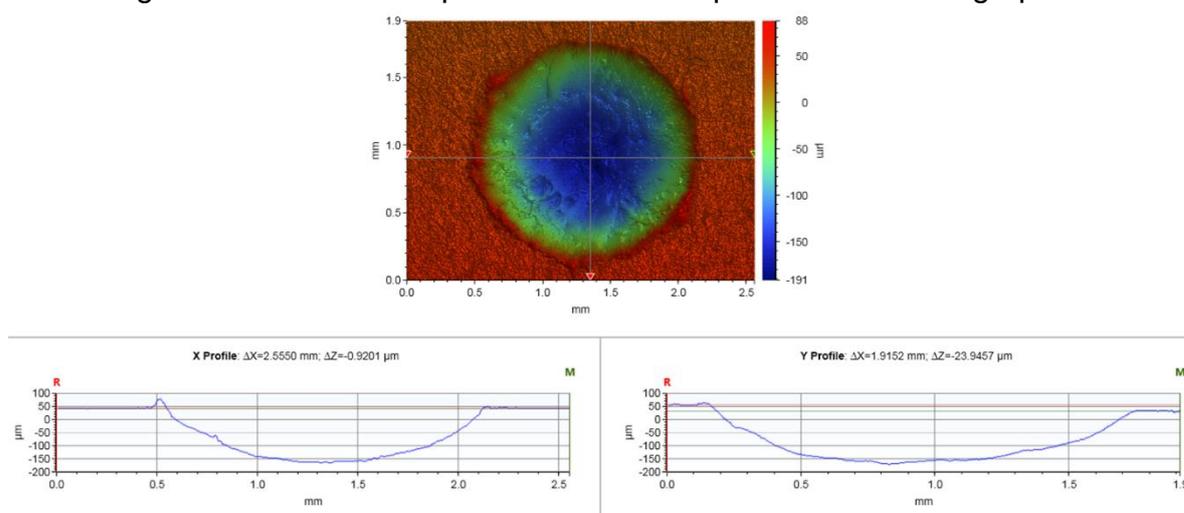
FONTE: o Autor

Tabela 35: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 5.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
5	Nominal	200	1000	2	Centro
	Medido	200	1000		

FONTE: o Autor

Figura 87: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 6.



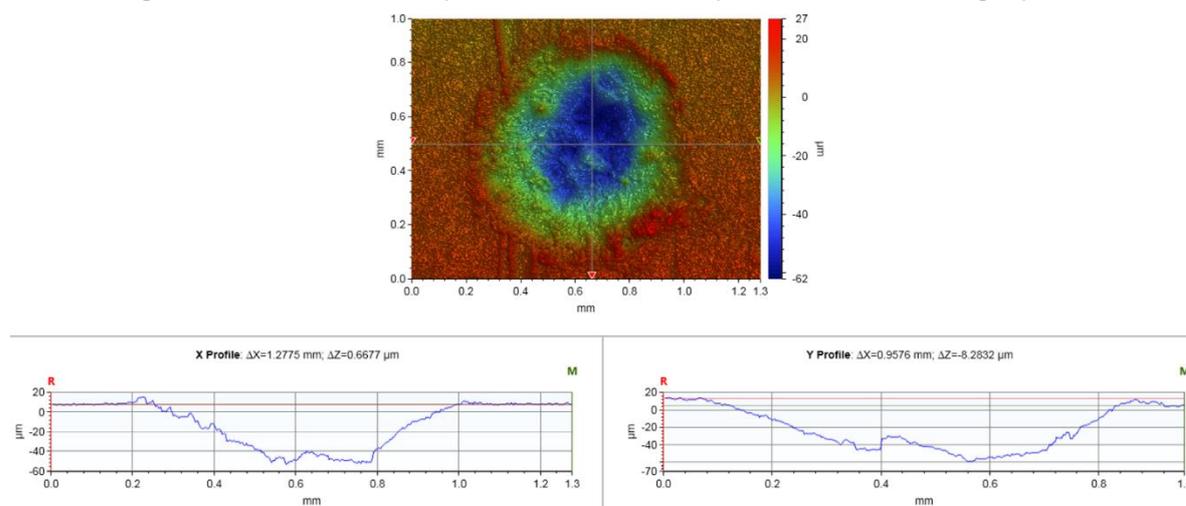
FONTE: o Autor

Tabela 36: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 6.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
6	Nominal	200	1500	3	Centro
	Medido	200	1500		

FONTE: o Autor

Figura 88: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 7.



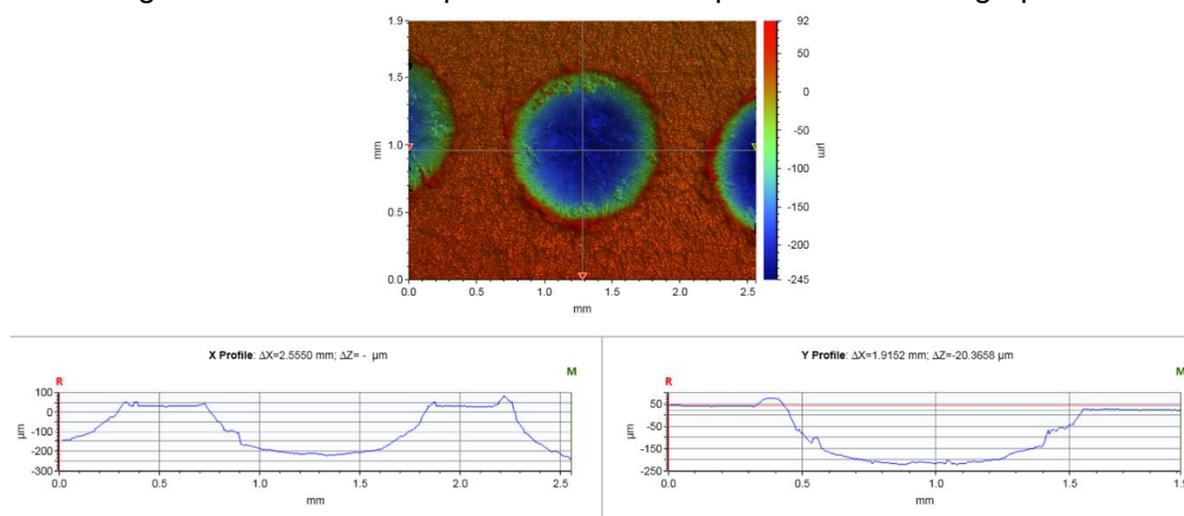
FONTE: o Autor

Tabela 37: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 7.

Grupo de Amostras		Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
7	Nominal	300	500	2	Centro
	Medido	60	800		

FONTE: o Autor

Figura 89: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 8.



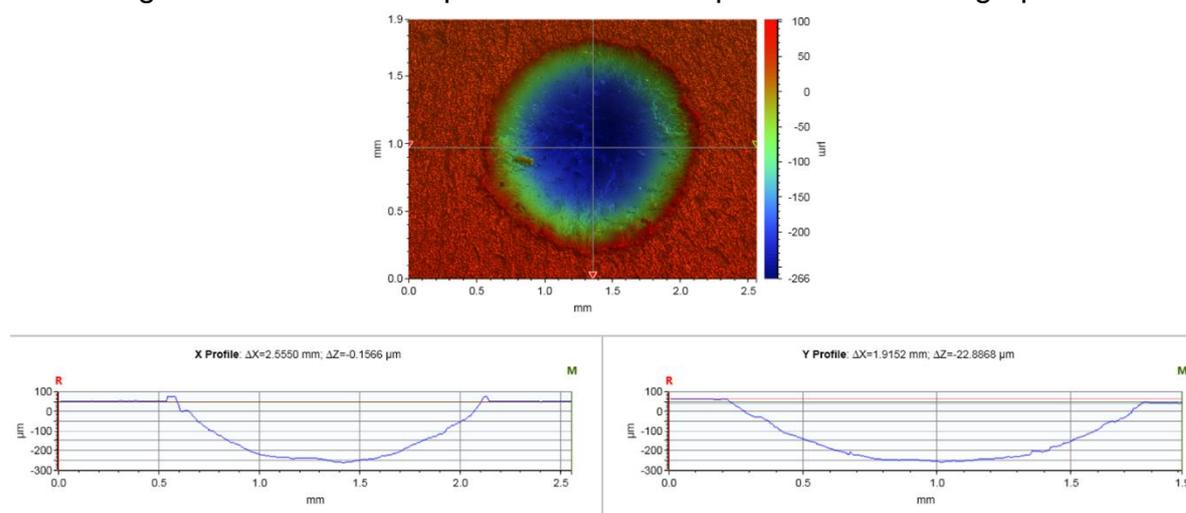
FONTE: o Autor

Tabela 38: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 8.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (µm)	Diâmetro (µm)	Quantidade	Localização
8	Nominal	300	1000	3	Centro
	Medido	300	1000		

FONTE: o Autor

Figura 90: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 9.



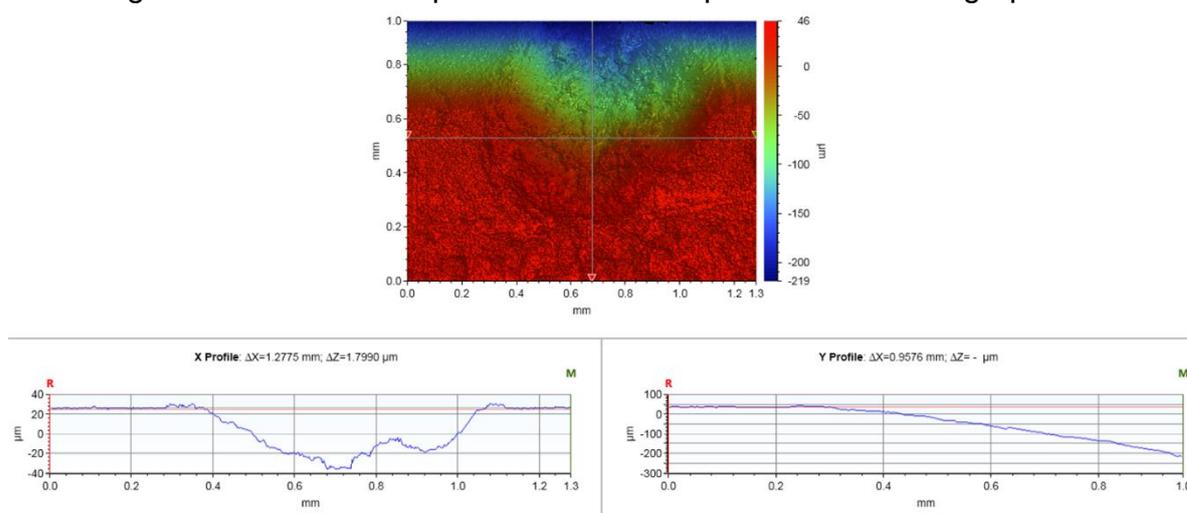
FONTE: o Autor

Tabela 39: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 9.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
9	Nominal	300	1500	1	Centro
	Medido	300	1500		

FONTE: o Autor

Figura 91: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 10.



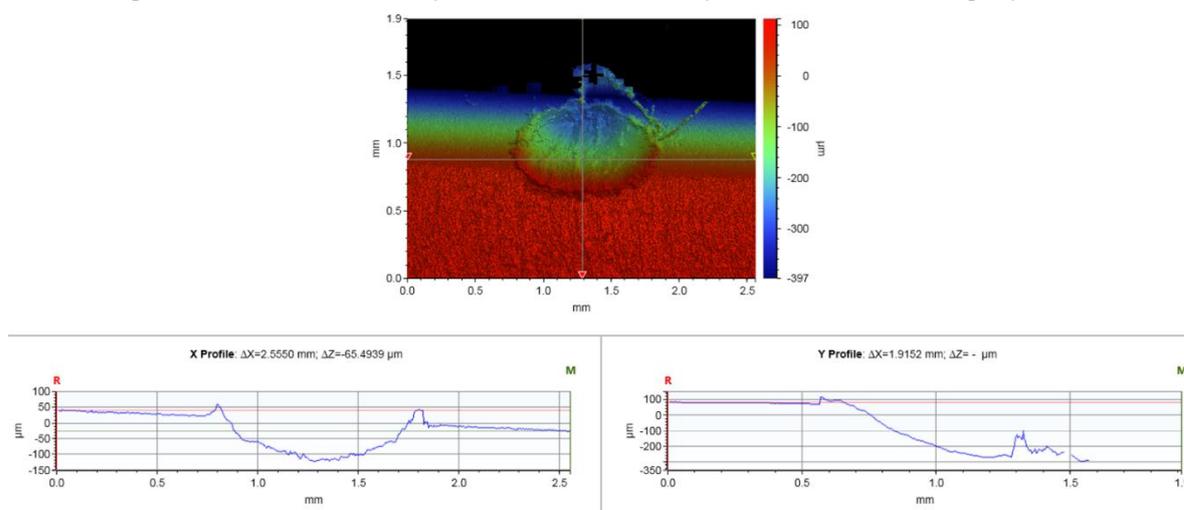
FONTE: o Autor

Tabela 40: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 10.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
10	Nominal	100	500	3	Aresta
	Medido	60	500		

FONTE: o Autor

Figura 92: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 11.



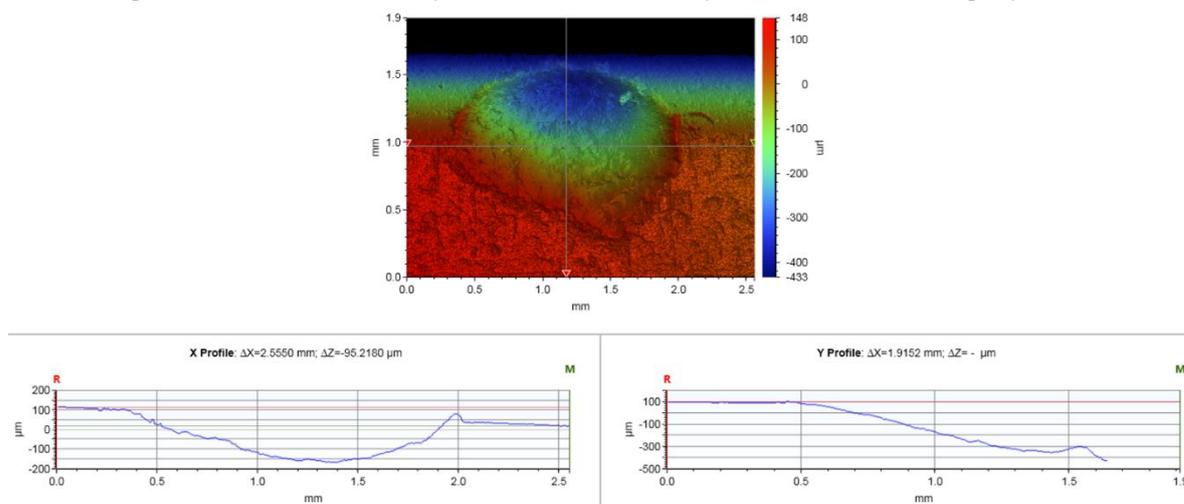
FONTE: o Autor

Tabela 41: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 11.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
11	Nominal	100	1000	1	Aresta
	Medido	100	1000		

FONTE: o Autor

Figura 93: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 12.



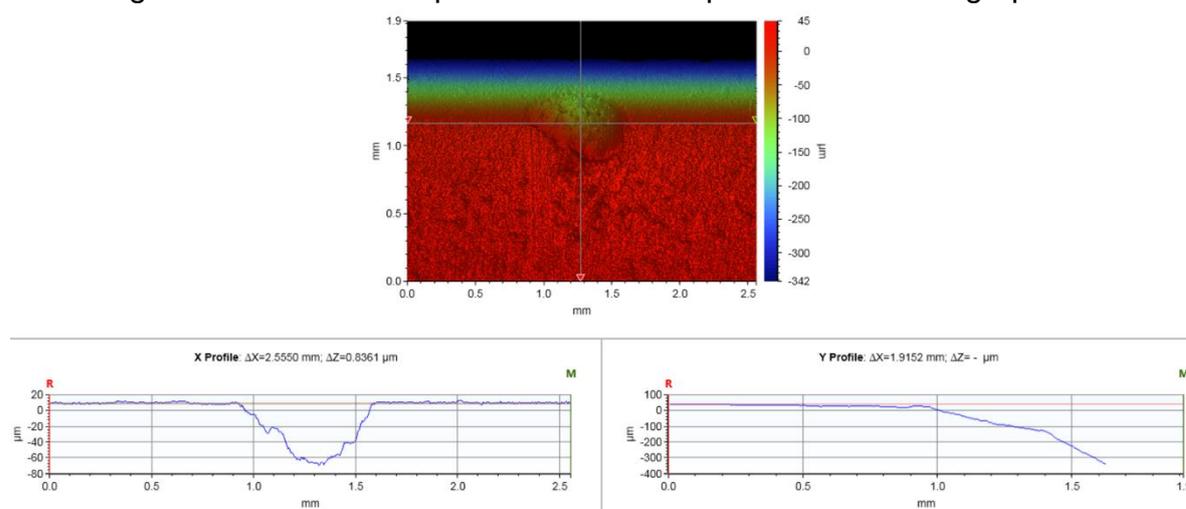
FONTE: o Autor

Tabela 42: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 12.

Grupo de Amostras	Característica				
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
12	Nominal	100	1500	2	Aresta
	Medido	200	1500		

FONTE: o Autor

Figura 94: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 13.



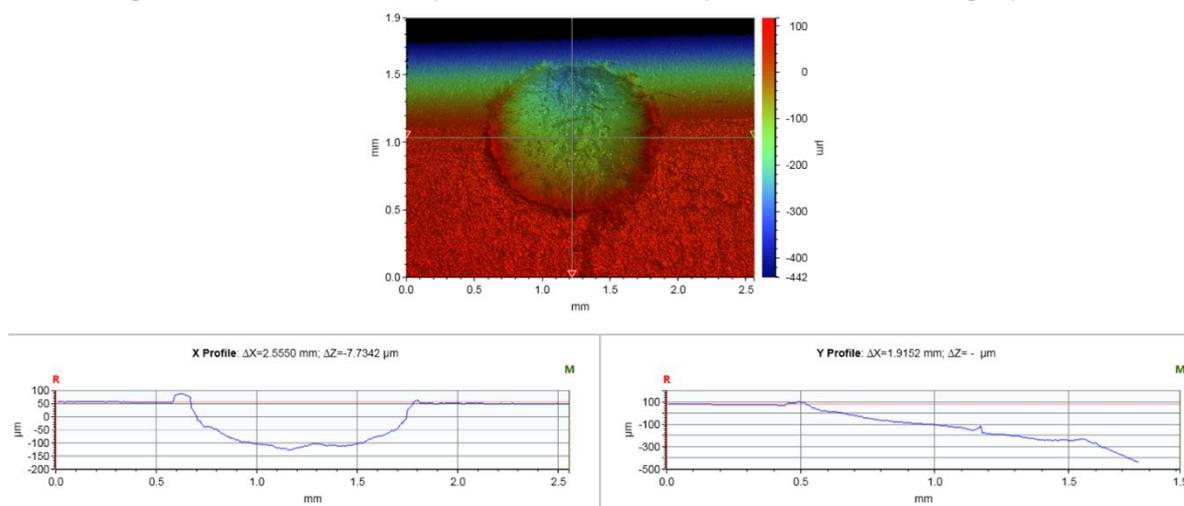
FONTE: o Autor

Tabela 43: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 13.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (µm)	Diâmetro (µm)	Quantidade	Localização
13	Nominal	200	500	2	Aresta
	Medido	70	600		

FONTE: o Autor

Figura 95: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 14.



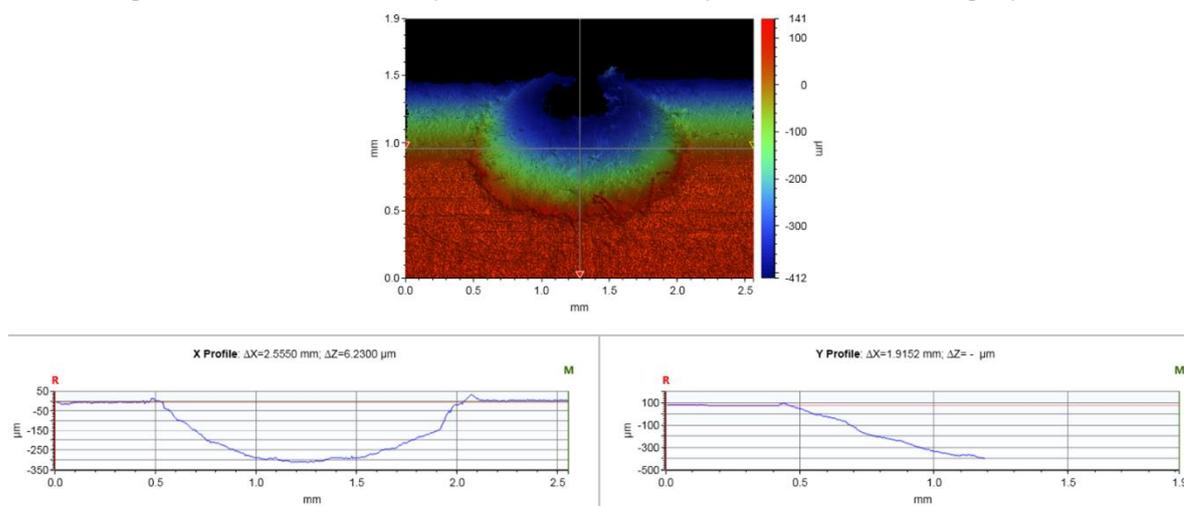
FONTE: o Autor

Tabela 44: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 14.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
14	Nominal	200	1000	3	Aresta
	Medido	200	1000		

FONTE: o Autor

Figura 96: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 15.



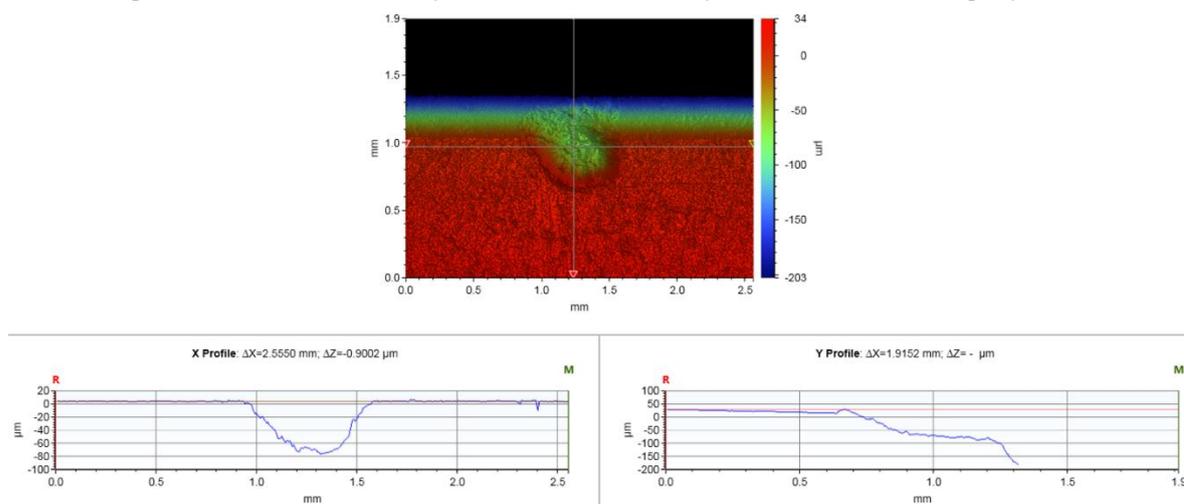
FONTE: o Autor

Tabela 45: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 15.

Grupo de Amostras	Característica				
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
15	Nominal	200	1500	1	Aresta
	Medido	300	1500		

FONTE: o Autor

Figura 97: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 16.



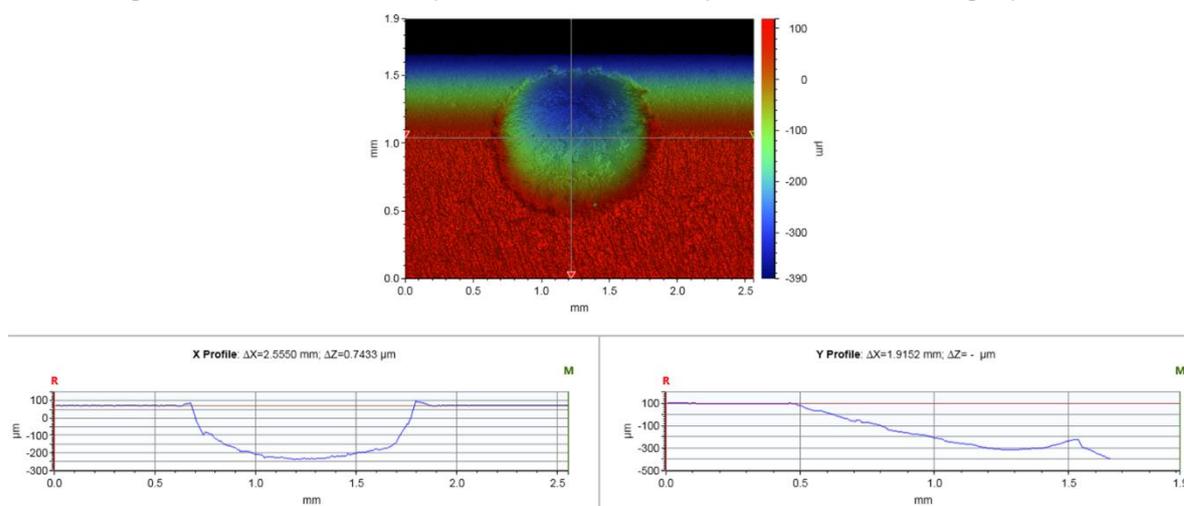
FONTE: o Autor

Tabela 46: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 16.

Grupo de Amostras	Característica				
		Profundidade (µm)	Diâmetro (µm)	Quantidade	Localização
16	Nominal	300	500	3	Aresta
	Medido	80	500		

FONTE: o Autor

Figura 98: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 17.



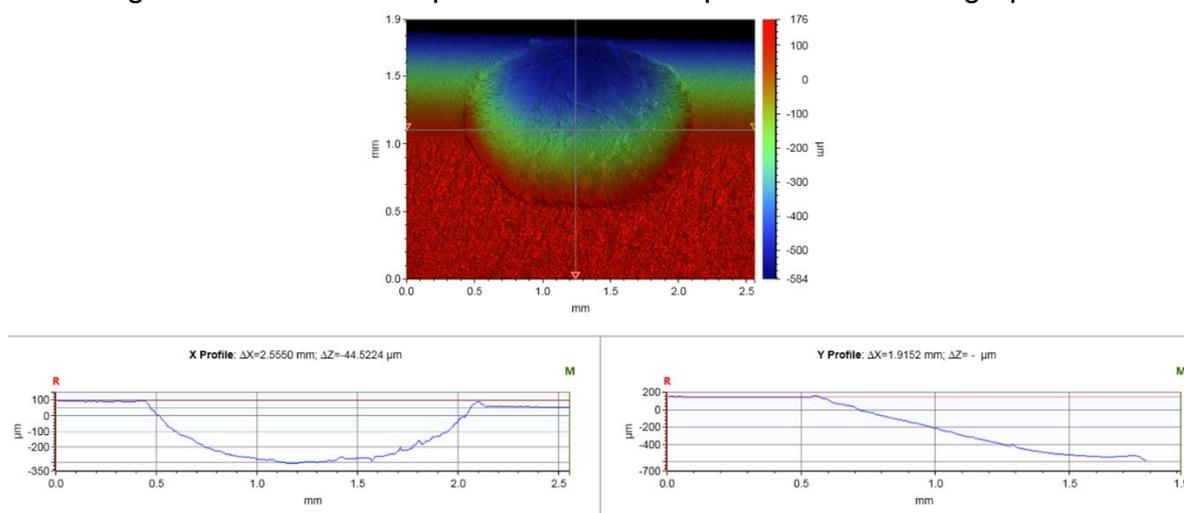
FONTE: o Autor

Tabela 47: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 17.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
17	Nominal	300	1000	1	Aresta
	Medido	300	1000		

FONTE: o Autor

Figura 99: Perfil obtido por interferometria para amostras do grupo 18.



FONTE: o Autor

Tabela 48: Características geométricas dos pites das amostras do grupo 18.

Grupo de Amostras	Característica	Característica			
		Profundidade (μm)	Diâmetro (μm)	Quantidade	Localização
18	Nominal	300	1500	2	Aresta
	Medido	300	1500		

FONTE: o Autor