

VALÉRIA ALVES DE CASTRO

**Influência do *Shot-Peening* e da Anodização Crômica na
Resistência à Fadiga da Liga de Alumínio 7475-T7351**

Valéria Alves de Castro

Influência do *Shot-Peening* e da Anodização Crômica na Resistência à Fadiga da Liga de Alumínio 7475-T7351

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães

Guaratinguetá - SP
2018

C355i	Castro, Valéria Alves de Influência do Shot-Peening e da Anodização Crômica na Resistência à Fadiga da Liga de alumínio 7475-T7351/ Valéria Alves de Castro – Guaratinguetá, 2018. 118 f : il. Bibliografia: f. 106-109 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Valdir Alves Guimarães 1. Materiais - fadiga. 2. Ligas de alumínio. 3. Aeronaves. I.Título. CDU 620.178.3(043)
-------	---

VALÉRIA ALVES DE CASTRO

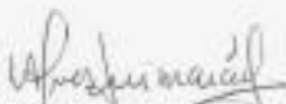
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr.ª Ana Paula Rosalini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
UNESP/FEG


Prof. Dr. GILBERT SILVA
UNIFEI

Fevereiro de 2018

DADOS CURRICULARES

VALÉRIA ALVES DE CASTRO

NASCIMENTO 16.05.1988 – São José dos Campos / SP

FILIAÇÃO Nilson Inácio de Castro
Maria de Fátima Machado

2009/2013 Curso de Graduação em Engenharia Civil
Universidade de Taubaté

2016/2018 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado.
Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

2006/Atual Atuação profissional na área de Engenharia de Manufatura de Ferramental na Embraer, indústria fabricante de aviões com sede no Brasil.

Dedico este trabalho à minha mãe Maria de Fátima e a meu irmão Jefferson que são as maiores referências da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeira a Deus, Aquele que me fortalece.

A minha família:

Minha mãe Maria de Fátima de Barros

Meu irmão Jefferson Inácio de Castro

Ao meu orientador Dr. Valdir Alves Guimarães, por sua dedicação no desenvolvimento desta pesquisa e pelo seu conhecimento que foi me transmitido.

A Embraer por incentivar no desenvolvimento de pesquisas e me apoiar na concretização desta.

Ao Prof. Dr. Rogério Hein, pelo apoio nas análises em Microscopia Eletrônica de Varredura.

Aos funcionários, professores, em especial o Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento, técnicos e alunos da UNESP.

Aos colegas de trabalho que contribuíram para a evolução da pesquisa.

Aos amigos e ao Rafael Macedo pela paciência e amizade, principalmente nesse período de estudo.

Ao Leonardo Roque Pedroso Franco, colaborador deste trabalho e aluno da iniciação científica.

“Porque para Deus nada é impossível”

Lucas 1:37

RESUMO

A influência do *Shot-Peening* e da anodização na resistência à fadiga vem sendo estudada ao longo dos anos, pois são processos amplamente utilizados nas indústrias, em especial na aeronáutica. A análise desse comportamento é extremamente necessária, pois as peças de aeronaves sofrem esforços cíclicos e são expostas ao ambiente corrosivo, que além de reduzir o ciclo de vida, são também prejudiciais à segurança de voo. Em função disso os materiais devem ter boa resistência à fadiga e à corrosão. Para melhorar essas propriedades são aplicados os processos de *Shot-Peening* e anodização, contudo é essencial que os parâmetros e materiais sejam estudados e ensaiados a fim de se obter um resultado efetivo. Em vista disso, esta pesquisa tem por objetivo avaliar a influência do *Shot-Peening* e da anodização crômica na resistência à fadiga do alumínio 7475-T7351. O ensaio de fadiga foi realizado com carga axial, frequência de 20 Hz e razão de carga 0,1. A intensidade Almen foi de 0.006 A - 0.010 A e as esferas do jateamento foram de aço. Os resultados dos ensaios das amostras com *Shot-Peening* seguido de anodização crômica apresentaram redução na resistência à fadiga. Essa redução foi atribuída às tensões residuais de tração e as características da camada de óxido geradas pela anodização e aos parâmetros do *Shot-Peening* que não induziu tensão residual de compressão o suficiente para retardar a propagação das trincas. O aumento da rugosidade, que é inerente ao processo de *Shot-Peening*, trabalhou como concentrador de tensão na superfície, intensificando a nucleação e propagação das trincas. No entanto, para as baixas tensões o *Shot-Peening* minimizou o efeito negativo causado pela anodização crômica. Com isso é possível afirmar que é primordial testar os materiais com diferentes parâmetros de *Shot-Peening* e avaliar seus efeitos para coletar uma base consolidada e evitar acidentes decorrentes de falha prematura de fadiga.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga. Anodização. *Shot-Peening*. Alumínio.

ABSTRACT

The influence of Shot-Peening and anodization on the fatigue strength has been studied over the years because these processes are broadly used in industries, especially in aeronautics. The analysis of this behavior is extremely necessary due the cyclic loading of the parts and exposure to corrosive environment, which in addition to reducing the life cycle of an aircraft are also detrimental to flight safety. Due to this, the materials must have good fatigue strength and corrosion resistance. To improve these properties, the Shot-Peening and anodization processes are applied, however it is essential that the parameters and materials be studied and tested in order to obtain an effective result. Therefore, this research has the objective of evaluating the influence of Shot-Peening and chromic anodization on the fatigue strength of 7475-T7351 aluminum alloy. The fatigue test was performed with axial load, frequency of 20 Hz and load ratio 0.1. The Almen intensity was 0.006 A - 0.010 A and the material of spheres was steel. The results of the Shot-Peening specimens followed by chromic anodization treatment show a reduction of the fatigue strength. This reduction is due to residual tensile stress and the characteristics of the oxide layer generated by the anodization treatment and to the Shot-Peening parameters that did not induce residual compression stress enough to delay the crack propagation. The increased roughness, which is inherent in the process, has worked as a stress concentrator on the surface, enhancing the nucleation and propagation of cracks. However, for the low tensions the Shot-Peening minimizes the negative effect caused by the chromic anodization treatment. Therefore, it is possible to affirm that it is essential to test the materials with different parameters of Shot-Peening and evaluate its effects to collect a consolidated base and avoid accidents due to premature fatigue failure.

KEYWORDS: Fatigue. Anodizing. Shot-Peening. Aluminum.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1: Sistema de designação das ligas de alumínio trabalhadas.....	22
Quadro 2: Sistema de designação básica das ligas de alumínio	22
Figura 1: Ligas de alumínio.....	23
Figura 2: Diagrama de fases Al-Zn	24
Figura 3: Etapas do tratamento térmico do alumínio	26
Figura 4: Gráfico comparativo da liga 7475–T7351 (R=-1)	28
Figura 5: Representação esquemática do processo de anodização.....	29
Figura 6: Estrutura porosa da camada anodizada	30
Figura 7: MEV da superfície do CDP do Al 2024-T3 com camada de óxido.....	31
Figura 8: MEV da seção transversal da camada anódica em liga de alumínio 2024-T3.....	31
Figura 9: Fluxograma dos estágios básicos no processo de anodização	33
Figura 10: Resultado de fadiga - anodização crômica, sulfúrica e dura - longitudinal	34
Figura 11: Superfície de fratura - (282 MPa, 58.000 ciclos) - (a) 40x e (b) 1000x.....	35
Figura 12: Resultado de fadiga - material usinado e pré-anodizado. R=0,1 e R=-1	36
Figura 13: Resultado de fadiga - material base e anodizado+selado R=0,1.....	36
Figura 14: Resultado do ensaio de fadiga do material base e anodizado+selado R=-1	37
Figura 15: Resultado de vida em fadiga. acabamento superficial Ra=0,6 µm	38
Figura 16: Diagrama de impacto do jateamento.....	39
Figura 17: Máquina de <i>Shot-Peening</i>	39
Figura 18: Arco típico de uma placa após <i>Shot-Peening</i>	40
Figura 19: Placa Almen	41
Figura 20: Inclusão de esfera de aço; a) superfície após <i>Shot-Peening</i> ; b) seção transversal..	42
Figura 21: Fratura de fadiga antes e depois do <i>Shot-Peening</i>	42
Figura 22: Superfície de fratura da liga Ti-6Al-4V	43
Figura 23: Resultados dos ensaios de fadiga	44
Figura 24: Resultados dos ensaios de fadiga	45
Figura 25: Preparação da lâmina para <i>Stress-Peening</i>	46
Figura 26: Resultado de fadiga - flexão alternada	49
Figura 27: Superfície de fratura - anodização crômica - (a) e (b)50x.	50
Figura 28: Curvas S-N para a liga Ti-6Al-4V anodizada, com e sem <i>Shot-Peening</i>	51

Figura 29: Fluxograma de etapas dos ensaios	53
Figura 30: Corpos de prova para ensaios de tração e fadiga	54
Figura 31: Dimensões do CDP de tração (mm).....	54
Figura 32: Dimensões do CDP de fadiga (mm)	55
Figura 33: Ensaio por líquido penetrante	56
Figura 34: Rugosímetro da marca Mahr e modelo MarSurf M 300 + RD18	56
Figura 35: Equipamento para ensaio de tração.....	58
Figura 36: Servo-hidráulica para ensaio de fadiga	59
Figura 37: Ponto de medição de dureza	60
Figura 38: Durômetro	60
Figura 39: Equipamento para microscopia eletrônica de varredura	61
Figura 40: Limite de resistência (MPa)	65
Figura 41: Limite de escoamento (MPa)	65
Figura 42: Módulo de elasticidade (GPa).....	66
Figura 43: Alongamento (%).....	66
Figura 44: Curva S-N - material base	69
Figura 45: Curva S-N - material com <i>Shot-Peening</i>	69
Figura 46: Curva S-N - material com anodização crômica	70
Figura 47: Curva S-N - material com <i>Shot-Peening</i> e anodização crômica.....	70
Figura 48: Comparativo dos ensaios de fadiga.....	71
Figura 49: MB - visão geral - 380 MPa, 154 603 ciclos	73
Figura 50: MB – nucleação	74
Figura 51: MB – propagação	74
Figura 52: MB - ruptura	75
Figura 53: MB – visão geral – 400 MPa, 36 050 ciclos	76
Figura 54: MB - nucleação	76
Figura 55: MB - propagação.....	77
Figura 56: MB - ruptura	77
Figura 57: MB – visão geral – 420 MPa, 31 825 ciclos	78
Figura 58: MB - nucleação	79
Figura 59: MB - propagação.....	79
Figura 60: MB - ruptura	80

Figura 61: SP – visão geral – 350 MPa, 78 387 ciclos.....	81
Figura 62: SP - nucleação.....	81
Figura 63: SP - propagação	82
Figura 64: SP - ruptura	82
Figura 65: SP – visão geral – 400 MPa, 21 810 ciclos.....	83
Figura 66: SP - nucleação.....	84
Figura 67: SP - propagação	84
Figura 68: SP - ruptura	85
Figura 69: SP – visão geral – 420 MPa, 20 160 ciclos.....	86
Figura 70: SP - nucleação.....	86
Figura 71: SP - propagação	87
Figura 72: SP - ruptura	87
Figura 73: AC – visão geral – 260 MPa, 256 601 ciclos.....	89
Figura 74: AC - nucleação.....	89
Figura 75: AC - propagação	90
Figura 76: AC - ruptura	90
Figura 77: MEV AC – visão geral – 320 MPa, 67 964 ciclos.....	91
Figura 78: MEV AC - nucleação.....	92
Figura 79: MEV AC - propagação	92
Figura 80: MEV AC - ruptura	93
Figura 81: MEV AC – visão geral – 340 MPa, 23 873 ciclos.....	94
Figura 82: MEV AC - nucleação.....	94
Figura 83: MEV AC - propagação	95
Figura 84: MEV AC - ruptura	95
Figura 85: MEV SP+AC – visão geral – 220 MPa, 280 639 ciclos	96
Figura 86: MEV SP+AC – nucleação	97
Figura 87: MEV SP+AC – propagação	97
Figura 88: MEV SP+AC – ruptura.....	98
Figura 89: MEV SP+AC – visão geral – 280 MPa, 110 644 ciclos	99
Figura 90: MEV SP+AC – nucleação	99
Figura 91: MEV SP+AC – propagação	100
Figura 92: MEV SP+AC – ruptura.....	100

Figura 93: MEV SP+AC – visão geral – 300 MPa, 56 300 ciclos	101
Figura 94: MEV SP+AC – nucleação	102
Figura 95: MEV SP+AC – propagação	102
Figura 96: MEV SP+AC – ruptura	103
Figura 97: Tensão x Deformação - material base - CDP 1.....	113
Figura 98: Tensão x Deformação - material base -CDP 2.....	113
Figura 99: Tensão x Deformação - material base - CDP 3.....	114
Figura 100: Tensão x Deformação - anodizado - CDP 1	114
Figura 101: Tensão x Deformação - anodizado - CDP 2	115
Figura 102: Tensão x Deformação - anodizado - CDP 3	115
Figura 103: Tensão x Deformação - <i>Shot-Peening</i> - CDP 1	116
Figura 104: Tensão x Deformação - <i>Shot-Peening</i> - CDP 2	116
Figura 105: Tensão x Deformação - <i>Shot-Peening</i> - CDP 3	117
Figura 106: Tensão x Deformação - <i>Shot-Peening</i> + anodizado - CDP 1.....	117
Figura 107: Tensão x Deformação - <i>Shot-Peening</i> + anodizado - CDP 2.....	118
Figura 108: Tensão x Deformação - <i>Shot-Peening</i> + anodizado - CDP 3.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limite de composição química - alumínio 7475	24
Tabela 2: Propriedades mecânicas do alumínio 7475-T7351.....	25
Tabela 3: Tenacidade à fratura (comparação com a liga 7075 e tratamento T651)	25
Tabela 4: Tratamento térmico típico da liga 7475.....	26
Tabela 5: Parâmetros do ensaio de fadiga	34
Tabela 6: Parâmetros do ensaio de fadiga	36
Tabela 7: Parâmetros do ensaio de fadiga	37
Tabela 8: Parâmetros do <i>Shot-Peening</i>	44
Tabela 9: Parâmetros do ensaio de fadiga	44
Tabela 10: Parâmetros do <i>Shot-Peening</i>	45
Tabela 11: Parâmetros do ensaio de fadiga	45
Tabela 12: Média da rugosidade das amostras	47
Tabela 13: Rugosidade x Vida em fadiga (ordem decrescente)	47
Tabela 14: Parâmetros do <i>Shot-Peening</i>	48
Tabela 15: Parâmetros do ensaio de fadiga	48
Tabela 16: Parâmetros do <i>Shot-Peening</i>	50
Tabela 17: Parâmetros do ensaio de fadiga	50
Tabela 18: Resultado das tensões residuais	52
Tabela 19: Parâmetros de <i>Shot-Peening</i>	57
Tabela 20: Composição da anodização	57
Tabela 21: Resultado da rugosidade	62
Tabela 22: Resultado do ensaio de dureza.....	64
Tabela 23: Resultado do ensaio de tração	65
Tabela 24: Resultado do ensaio de fadiga	67
Tabela 25: Previsão da resistência à fadiga para 10^6 ciclos	71
Tabela 26: Valores da rugosidade - material base.....	110
Tabela 27: Valores da rugosidade - material anodizado	110
Tabela 28: Valores da rugosidade - material com <i>Shot-Peening</i>	111
Tabela 29: Valores da rugosidade - material com <i>Shot-Peening</i> e anodização.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Anodização crômica
AD	Anodização dura
AS	Anodização sulfúrica
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ALCOA	<i>Aluminum Company of America</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BM	<i>Base metal</i>
CFC	Cúbica de face centrada
CDP	Corpo de prova
CNC	Controle numérico computadorizado
DEW	Double electrode welding
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
HAZ	<i>Heat-Affected Zone</i>
HB	<i>Hardness Brinell</i>
HRB	<i>Hardness Rockwell B</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MB	Material Base
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MIL	<i>Military Specification</i>
NBR	Norma Brasileira
SEW	<i>Simple electrode welding</i>
SP	<i>Shot-Peening</i>
UNESP	Universidade Estadual Paulista
WM	Welding metal
ZTA	Zona térmica afetada

LISTA DE SÍMBOLOS

CrO ₃	Ácido crômico
Al	Alumínio
A/dm ²	Ampere por decímetro quadrado
Cu	Cobre
Cr	Cromo
ε	Deformação
Fe	Ferro
F	Força
GPa	Giga Pascal
g/cm ³	Grama por centímetro cúbico
g/l	Grama por litro
°C	Grau Celsius
°F	Grau Fahrenheit
Hz	Hertz
h	Hora
IN	Inch
kg/min	Kilograma por minuto
kPa	Kilopascal
Ti-6Al-4V	Liga de titânio
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
MPa	Mega Pascal
MPa ^{√m}	Mega Pascal raiz quadrada de metro
m	Metro
μm	Micrometro
mm	Milímetro
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
%	Porcentagem
wt.%	Porcentagem em peso
Psi	Pound force per square inch
Ra	Rugosidade média aritmética
Rz	Rugosidade média
Rt	Rugosidade total
L-T	Sentido longitudinal com trinca no sentido transversal
T-L	Sentido transversal com trinca no sentido longitudinal
Si	Silício
σ	Tensão
$\sigma_{\text{mín}}$	Tensão mínima
$\sigma_{\text{máx}}$	Tensão máxima
S-N	Tensão de fadiga por número de ciclos
Ti	Titânio
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	18
1.2	OBJETIVO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	MATERIAL	21
2.1.1	Classificação do alumínio.....	21
2.1.2	Alumínio 7475-T7351	23
2.2	ANODIZAÇÃO	28
2.2.1	A influência da anodização na resistência à fadiga	34
2.3	SHOT-PEENING	38
2.3.1	A influência do <i>Shot-Peening</i> na resistência à fadiga.....	43
2.3.2	A influência do <i>Shot-Peening</i> e da anodização na resistência à fadiga.....	48
2.3.3	Avaliação da tensão residual	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	54
3.2	ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE	55
3.3	ENSAIO DE RUGOSIDADE	56
3.4	SHOT-PEENING	57
3.5	ANODIZAÇÃO	57

3.6	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	58
3.7	ENSAIO DE FADIGA	59
3.8	ENSAIO DE DUREZA	59
3.9	ANÁLISE FRACTOGRÁFICA.....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE	62
4.2	ENSAIO DE RUGOSIDADE	62
4.3	ENSAIO DE DUREZA.....	64
4.4	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	64
4.5	ENSAIO DE FADIGA	67
4.6	ANÁLISE FRACTOGRÁFICA.....	73
4.6.1	Amostras do Material Base.....	73
4.6.2	Amostras com <i>Shot-Peening</i>	80
4.6.3	Amostras com Anodização Crômica.....	88
4.6.4	Amostras com <i>Shot-Peening</i> e Anodização Crômica.....	96
5	CONCLUSÕES.....	104
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	106
	APÊNDICE A – TABELAS DE RUGOSIDADE	110
	APÊNDICE B – CURVAS DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO	113

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A indústria aeronáutica vem realizando grandes avanços tecnológicos para o desenvolvimento de aeronaves cada vez mais atrativas e eficientes. A busca por melhorias no desempenho das aeronaves, segurança de voo e também na redução no custo de fabricação é contínua. O monitoramento do desempenho de aeronaves tem trazido ao longo dos anos significativos avanços tecnológicos à indústria aeronáutica.

Os materiais utilizados em estruturas aeronáuticas devem apresentar elevada resistência mecânica e baixa densidade. Dentre os materiais utilizados nestas estruturas destacam-se os materiais compósitos e as ligas de alumínio que são praticamente utilizadas em diversas partes da aeronave, incluindo peças, válvulas e demais componentes estruturais como asas e fuselagem. A grande utilização do alumínio justifica-se em função da alta resistência mecânica além de ser um material leve, com baixo peso específico e boa resistência à corrosão.

O monitoramento de falhas em aeronaves tem trazido avanços significativos na prevenção de acidentes e na melhoria da segurança de voo. Em 1954, o famoso caso dos aviões Comet, deu início às investigações de falhas que estavam ocorrendo dentro do limite de deformação elástica. A partir desses trágicos acidentes, os engenheiros passaram a incluir nos projetos de aeronaves os mecanismos de fadiga. A falha por fadiga normalmente se inicia na superfície dos materiais podendo ser potencializada pela presença de defeitos e concentradores de tensões. É imprescindível, portanto, que ao projetar uma aeronave deva-se prever condições seguras para o voo, fazer a seleção adequada dos materiais e ter rigoroso controle de qualidade durante a fabricação e montagem.

O alumínio dependendo de seu uso ainda pode receber tratamentos térmicos e/ou superficiais para melhorar suas propriedades. O alumínio 7475-T7351, utilizado na estrutura da fuselagem do avião, é um material tratado termicamente e fornece um nível elevado de resistência à fratura. De forma geral, estas ligas podem ser submetidas a processos para melhorar a sua resistência à fadiga, corrosão e abrasão.

Uma das formas para melhorar a resistência à fadiga é a utilização do processo de *Shot-Peening* para induzir tensões residuais de compressão nas camadas superficiais dos materiais,

tornando a nucleação e propagação de fissuras de fadiga mais difíceis (TORRES; VOORWALD, 2002).

A corrosão que é uma deterioração do material exposto ao meio corrosivo, associada ou não a esforços mecânicos, pode reduzir a vida de um determinado componente. Diversas alternativas têm sido empregadas em estruturas visando o aumento da resistência à corrosão. Entre as alternativas utilizadas destaca-se a aplicação de tratamentos superficiais como o processo de anodização que tem sido aplicado em ligas de alumínio. O processo de anodização do alumínio é uma das técnicas de revestimento de conversão mais utilizadas para produzir uma película protetora de óxido de alumínio (ASM HANDBOOK, 2003). As anodizações sulfúrica, crômica e dura são as mais comuns, sendo a anodização crômica geralmente a mais empregada em peças que irão sofrer grandes solicitações mecânicas, como por exemplo, peças estruturais de aeronaves.

Estes tratamentos superficiais também podem causar efeitos indesejáveis no material, tal como o aumento da rugosidade gerado pelo processo de *Shot-Peening* e a diminuição da resistência à fadiga, que pode ocorrer após o processo de anodização, como foi mostrado pelos estudos conduzidos por Camargo (2007) na liga de alumínio 7050 T7451. Desta forma torna-se extremamente necessário o controle desses processos e o estudo envolvendo outras ligas e outros parâmetros de processo.

Os resultados dos processos especiais, como o *Shot-Peening* e a anodização, não garantem repetibilidade e também não podem ser totalmente inspecionados, pois existem falhas que podem ocorrer somente após sua aplicação, por exemplo, a variação da tensão residual devido a mudanças de temperatura, ciclos de fadiga e montagem estrutural.

Distorções em componentes individuais podem gerar dificuldades durante a montagem das peças que compõem esses componentes. Mesmo que pequenas distorções ocorram em peças individualmente, isso pode requerer força adicional a ser aplicada durante a montagem, o que pode levar as distorções severas e tensão residual no produto final. Assim, distorções em componentes menores têm o potencial de gerar um efeito dominó na estrutura, levando ao dano do produto final (TOTTEN; MACKENZIE, 2003). As deformações no produto podem afetar a montagem e em casos mais severos, até mesmo o desempenho do avião em voo.

A influência do *Shot-Peening* e da anodização em materiais sujeitos a esforços de fadiga ainda não estão bem caracterizados nas literaturas e isso fez com que pesquisas nessa área fossem indispensáveis para que haja a correta aplicação nos materiais. Portanto, este trabalho pretende contribuir com os dados dos resultados dos ensaios, para evitar que ocorram falhas

prematuras por fadiga e apresentar a importância de testar os parâmetros do *Shot-Peening* e da anodização antes de sua aplicação.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é estudar a resistência à fadiga da liga de alumínio 7475-T7351 e os efeitos dos processos de *Shot-Peening* e anodização crômica.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a vida em fadiga através da curva S-N obtida pelo ensaio de fadiga axial em temperatura ambiente.
- Avaliar a resistência à tração através das curvas de Tensão x Deformação.
- Avaliar o efeito da rugosidade na resistência à fadiga e os efeitos dos tratamentos de *Shot-Peening* e anodização crômica na variação da rugosidade.
- Avaliar o perfil de dureza do material base tratado termicamente.
- Avaliar a nucleação da trinca através da microscopia eletrônica de varredura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAL

O alumínio tem características de desempenho bem conhecidas, custos de fabricação conhecidos, projeto e fabricação estabelecidos. Essas são apenas algumas das razões para a confiança contínua nas ligas de alumínio que garantem sua utilização em quantidades significativas na indústria. Grandes avanços em ligas de alumínio continuam a mantê-los em uma posição competitiva. As ligas de alumínio eram desenvolvidas por tentativa e erro, mas nos últimos trinta anos houve avanços significativos na compreensão das relações entre composição, processamento, características e propriedades microestruturais (STARKE JR; STALEY, 1996).

A densidade do alumínio é de apenas $2,7 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente um terço da densidade do ($7,83 \text{ g/cm}^3$). Embora o alumínio seja um metal termodinamicamente reativo, ele possui excelente resistência à corrosão na maioria dos ambientes, o que pode ser atribuído à passividade proporcionada por uma película protetora de óxido de alumínio. Este filme está fortemente ligado a superfície do metal e, se danificado, reforma quase que imediatamente. A continuidade do filme é afetada pela microestrutura do metal - em particular, pela presença e fração volumétrica de partículas de segunda fase (ASM, 1992).

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio tão atraentes é o fato de o alumínio poder combinar-se com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de ligas possibilitando a obtenção de características tecnológicas ajustadas à aplicação do produto final.

2.1.1 Classificação do alumínio

As ligas de alumínio foram divididas em dois grandes grupos com base no seu processo de fabricação, sendo as ligas trabalhadas/dúcteis e ligas para fundição/fundidas.

As ligas trabalhadas foram aquelas que sofreram deformações plásticas a quente (acima da temperatura de recristalização) e a frio por meio de laminação, extrusão, forjamento ou estiramento. A composição e microestrutura destas ligas se diferem das ligas fundidas.

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), segundo a norma NBR 6834, adotou um sistema de identificação numérico normalmente composto por quatro dígitos.

As ligas de alumínio trabalhadas são classificadas primeiramente conforme os elementos da liga e são representadas por quatro dígitos como está apresentado no Quadro 1 e um sistema de letra indicando os tipos de tratamento conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 1: Sistema de designação das ligas de alumínio trabalhadas

Família	Principal elemento de liga
1xxx	Mínimo 99,00 de alumínio
2xxx	Cobre
3xxx	Manganês
4xxx	Silício
5xxx	Magnésio
6xxx	Magnésio e Silício
7xxx	Zinco
8xxx	Outros elementos
9xxx	Série ainda não utilizada

Fonte: (TOTTEN; MACKENZIE, 2003)

Quadro 2: Sistema de designação básica das ligas de alumínio

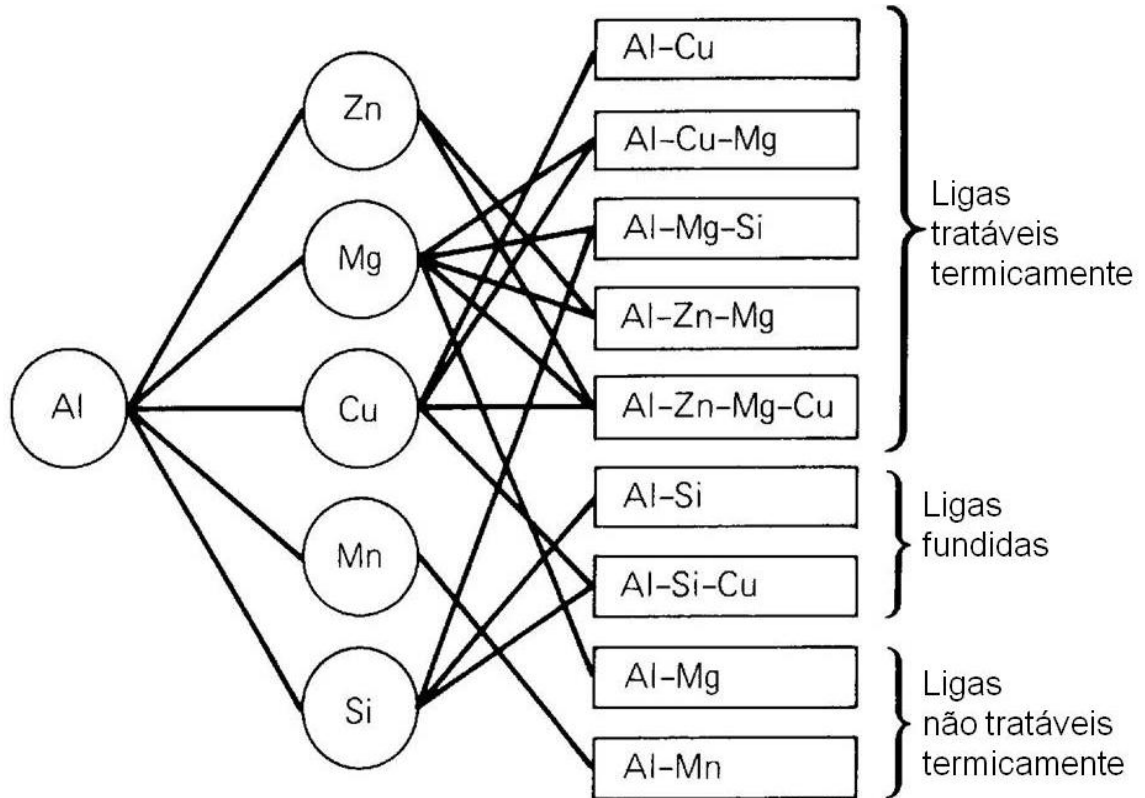
Definição	
F	Como fabricado
O	Recozido
H	Endurecido por deformação
W	Solubilizado
T	Tratado termicamente

Fonte: (TOTTEN; MACKENZIE, 2003)

As ligas ainda são subdividas em ligas tratáveis termicamente e não tratáveis termicamente. Ligas não tratáveis termicamente incluem as séries 1XXX, 3XXX, 4XXX e 5XXX. Ligas tratáveis termicamente incluem as séries 2XXX, algumas 4XXX, 6XXX e ligas da série 7XXX (TOTTEN; MACKENZIE, 2003).

A Figura 1 apresenta um esquema que ilustra várias combinações do alumínio com elementos de liga. Estas ligas foram criadas para aumentar a resistência mecânica do material, que já tem como característica uma elevada ductilidade.

Figura 1: Ligas de alumínio



Fonte: (DEAN, 1990)

2.1.2 Alumínio 7475-T7351

A liga 7475 é atualmente especificada para componentes com elevadas cargas mecânicas e tenacidade à fratura. Normalmente é aplicada em regiões altamente solicitadas, aplicações onde deve ser considerada alta resistência à fratura. Isto deve ser considerado para revestimento da fuselagem, revestimento da asa, longarina da asa e cavernas da fuselagem (ALCOA, 2016).

A liga de alumínio 7475 tem composição química conforme apresentada na Tabela 1.

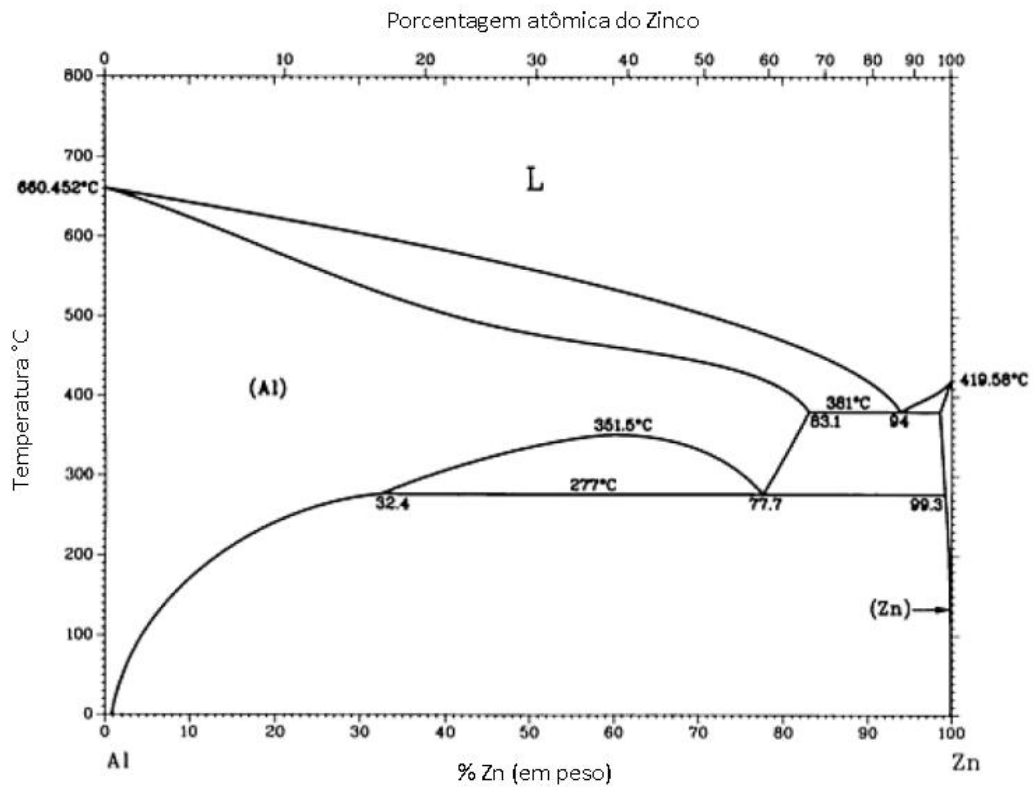
Tabela 1: Limite de composição química - alumínio 7475

Composição	% em peso
Si	0,10
Fe	0,12
Cu	1,2-1,9
Mn	0,06
Mg	1,9-2,6
Cr	0,18-0,25
Zn	5,2-6,2
Ti	0,06
Outros, cada	0,05
Outros, total	0,15
Al	Restante

Fonte: (ALCOA, 2016)

O diagrama de fases do Alumínio-Zinco esta apresentada na Figura 2.

Figura 2: Diagrama de fases Al-Zn



Fonte: (ASM, 1992)

As chapas da liga de alumínio 7475 são disponíveis em T61 e T761, enquanto que as placas são normalmente tratadas termicamente nas condições T651, T7351 e T7651. A placa tem a resistência à tração muito próxima da liga de alumínio 7075, enquanto que os valores de tenacidade à fratura estão acima de 40% da liga 7075 tratada termicamente (VERMA, ATKINSON, KUMAR, 2001).

As propriedades mecânicas da liga de alumínio 7475-T7351 estão apresentadas na Tabela 2. A tenacidade à fratura, assim como a comparação com a liga 7075 e o tratamento T651 está apresentada na Tabela 3.

Tabela 2: Propriedades mecânicas do alumínio 7475-T7351

Espessura placa	25,4 mm – 38,1 mm	50,8 mm – 63,5 mm	76,25 mm – 88,9 mm
Resistência a Tração	490 MPa	476 MPa	448 MPa
Limite de Escoamento	414 MPa	393 MPa	365 MPa
Alongamento	9%	8%	8%

Fonte: (ALCOA, 2016)

Tabela 3: Tenacidade à fratura (comparação com a liga 7075 e tratamento T651)

Liga	Tratamento	Orientação L-T	Orientação T-L
7475	T651	46,0 MPa√m	41,0 MPa√m
	T7351	55,0 MPa√m	45,0 MPa√m
7075**	T651	28,6 MPa√m	24,2 MPa√m
	T7351	32,0 MPa√m	28,6 MPa√m

**Essa liga não tem valores mínimos garantidos de tenacidade à fratura.

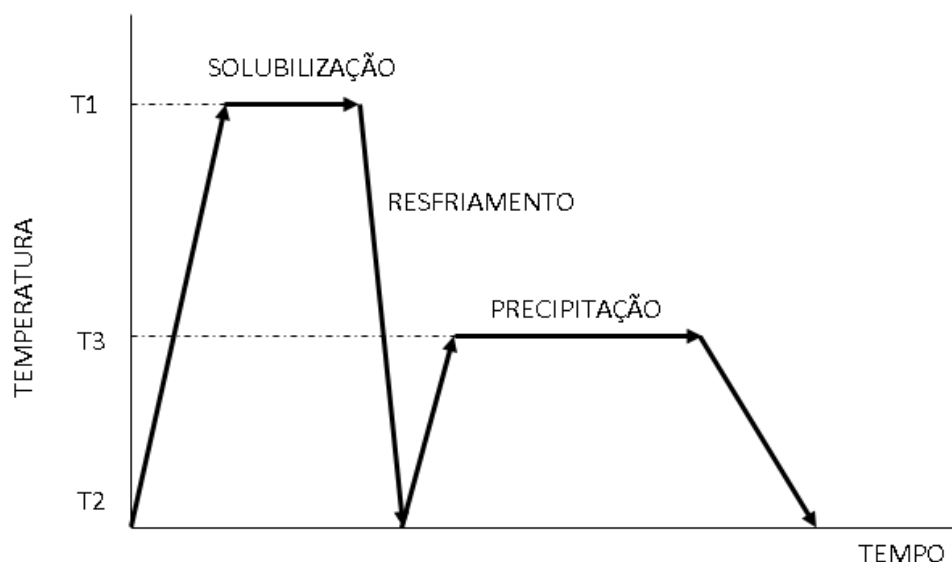
Fonte: (ALCOA, 2016)

O tratamento térmico para aumentar a resistência de ligas de alumínio é um processo de três etapas (ASM HANDBOOK, 1991).

- T1: Tratamento térmico de solubilização: as fases presentes entram em solução sólida.
- T1 → T2: Desenvolvimento de supersaturação: através do resfriamento rápido.
- T3: Endurecimento por envelhecimento: precipitação de átomos de soluto no reticulado cristalino, à temperatura ambiente (envelhecimento natural) ou à temperatura elevada (envelhecimento artificial ou tratamento térmico por precipitação).

As etapas do tratamento térmico do alumínio estão apresentadas na Figura 3.

Figura 3: Etapas do tratamento térmico do alumínio



Fonte: Produção do próprio autor

Conforme ASM HANDBOOK (1991) o tratamento térmico da placa da liga 7475 está apresentado basicamente conforme na Tabela 4.

Tabela 4: Tratamento térmico típico da liga 7475

Solubilização (a)			Precipitação			
Temperatura (b)		Designação	Temperatura (b)		Tempo (c)	Designação
°C	°F		°C	°F	h	
			120	250	24	T651 (e)
510 (e)	950 (e)	W51 (d)	(f)	(f)	(f)	T7651 (e) (g)
			(h)	(h)	(h)	T7351 (e) (g)

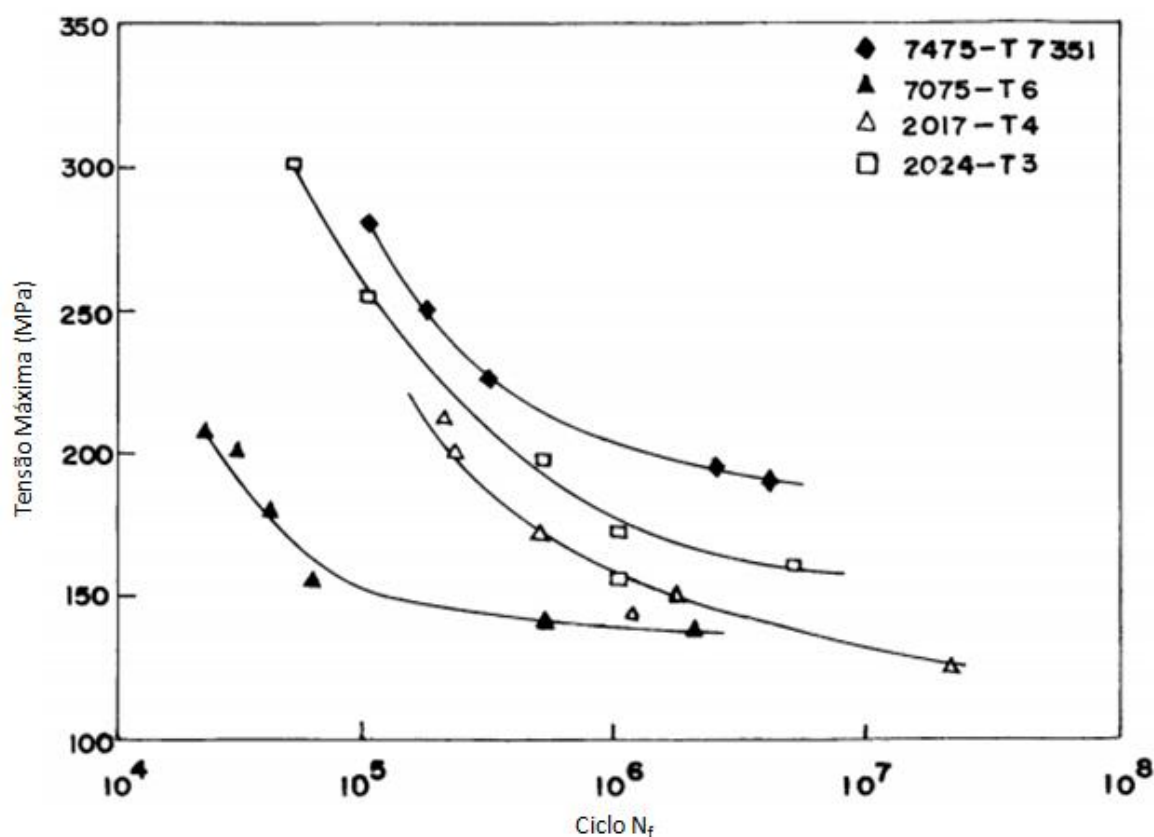
Fonte: Adaptado de ASM HANDBOOK (1991)

(a) O material deve ser resfriado logo após a retirada do forno. Quando o material é resfriado por imersão total em água, a menos que indicado de outra forma, a água deve estar à temperatura ambiente e deve ser resfriado adequadamente de modo a que permaneça abaixo de 38°C (100°F) durante o ciclo de resfriamento.

- (b) A temperatura nominal indicada deve ser alcançada e mantida dentro de $\pm 6^{\circ}\text{C}$ ($\pm 10^{\circ}\text{F}$).
- (c) Tempo aproximado de temperatura. O tempo específico dependerá do tempo necessário para que o material atinja a temperatura. Os tempos indicados são com base no aquecimento rápido, com o tempo de imersão medido a partir do momento em que o material atinja uma temperatura dentro de 6°C (10°F).
- (d) Alívio de tensões por estiramento após a solubilização e antes da precipitação.
- (e) Deve ser seguido por imersão na temperatura de 466°C até 477°C (870°F to 890°F).
- (f) O envelhecimento varia de acordo com o produto, o tamanho, a natureza do equipamento, os procedimentos de carregamento e as capacidades de controle do forno. A boa prática para um item específico pode ser determinado apenas pelo tratamento de teste real do item em condições específicas. Os procedimentos típicos envolvem um estágio de tratamento composto de 3 h a 30 h a temperatura de 121°C (250°F) seguido de 15 h a 18 h a temperatura de 16°C (325°F) para extrusões. Uma alternativa em duas fases do tratamento é de 8 h a temperatura de 99°C (210°F) seguido de 24 h a 28 h a temperatura de 163°C (325°F).
- (g) O envelhecimento das ligas de alumínio 7050, 7075, 7175 e 7475 dos tratamentos T73 ou T76 requer controles mais apertados do que o normal das variáveis de envelhecimento, como tempo, temperatura, taxa de aquecimento e assim por diante. Além disso, quando o material com tratamento tipo T6 é reenvelhecido para um tratamento do tipo T73 ou T76, é extremamente importante a condição específica do material T6 (como níveis de propriedade e outros efeitos de processamento variáveis) que afetará a capacidade do material reenvelhecido para atender os requisitos especificados para o tratamento T73 ou T76.
- (h) Tratamento em duas etapas constituídos de 6 h a 8 h a temperatura de 107°C (225°F) seguido por 24 h a 30 h a 163°C (325°F) para a chapa e placa; 08 h a 10 h a 177°C (350°F) para laminado ou barra e haste acabadas a frio; 06 h a 08 h a 177°C (350°F) para a extrusão e tubo; 8 h a 10 h a 177°C (350°F) para forjados na têmpera T73; e 6 h a 8 h a 177°C (350°F) para peças forjadas na têmpera T7352.

Os autores Verma, Atkinson, Kumar (2001) estudaram o comportamento em fadiga do alumínio 7475 e a liga exibiu vida em fadiga superior em relação as ligas estruturais mais convencionais. O gráfico de tensão x número de ciclos da liga 7475-T7351 ($R = -1$) está apresentada na Figura 4.

Figura 4: Gráfico comparativo da liga 7475-T7351 ($R=-1$)



Fonte: (VERMA, ATKINSON, KUMAR, 2001)

Conforme a especificação da ASM (1992), a resistência à fadiga da placa 7475-T7351 para 10^7 ciclos, carga axial e amostras com superfície acabada é de 205 a 235 MPa para $R = 0,0$ (longitudinal ou transversal). Para $R = +0,5$ é de 315 MPa (transversal) e para $R = -1,0$ é de 165 MPa (transversal).

2.2 ANODIZAÇÃO

A anodização em alumínio é um método eletroquímico que consiste na conversão de alumínio em óxido de alumínio (Al_2O_3), na superfície do item a ser revestido. É obtida imergindo a peça de trabalho numa célula eletrolítica. Embora vários metais possam ser

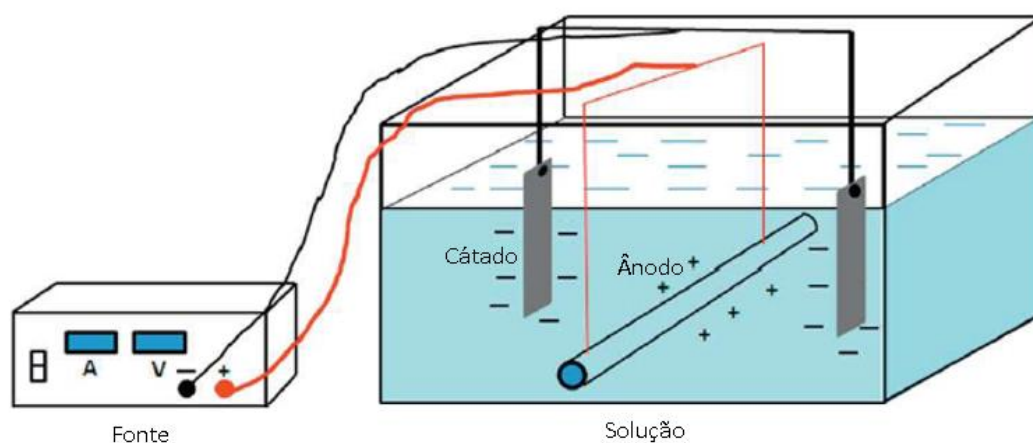
anodizadas, incluindo titânio e magnésio, somente o alumínio tem encontrado uso generalizado na indústria (ASM HANDBOOK, 1987).

A anodização é realizada para a proteção contra corrosão de aeronaves, veículos, barcos, trens, edifícios, artigos esportivos, artigos de escritório e eletrônicos (ASM HANDBOOK, 2003).

No processo de anodização, o alumínio funciona como ânodo e um outro metal ou o carbono funciona como cátodo. O eletrólito dentro do qual é colocado o componente é geralmente ácido sulfúrico ou ácido crômico. Uma corrente elétrica é aplicada aos elementos que compõem o processo e convertem a superfície do alumínio em um revestimento de óxido de alumínio. É possível também incorporar cores ao processo de anodização (CAMARGO, 2007).

O equipamento utilizado no processo de anodização compreende em uma fonte de alimentação, uma solução eletrolítica, ânodo (material do substrato) e cátodo como apresentado na Figura 5. O oxigênio reage com o substrato para se formar em fina camada de óxido resistente e abrasiva, enquanto que ao mesmo tempo é formado o hidrogênio no cátodo (SARHAN; ZALNEZHAD; HAMDI, 2013).

Figura 5: Representação esquemática do processo de anodização



Fonte: (SARHAN; ZALNEZHAD; HAMDI, 2013)

O processo eletroquímico de anodização produz uma camada de óxido porosa na superfície do alumínio. Por ser uma oxidação eletrolítica do próprio metal, a anodização salienta os defeitos existentes ou revela irregularidades que não são visíveis a olho nu no metal bruto (ASM HANDBOOK, 1996).

A estrutura da camada anódica é constituída por células hexagonais, (Figura 6), cada uma delas com um poro central. No fundo dos poros forma-se uma fina camada, que separa o óxido em formação do alumínio. A formação de óxido natural do alumínio pode ser explicada pela Eq. 1 (MENEGBESSO, 2007). Após a anodização é formado filmes de óxido anódico contendo $\gamma\text{Al}_2\text{O}_3$ e uma película de óxido porosa formada pelas soluções ácidas tais como H_2SO_4 , ácido oxálico, H_3PO_4 e H_2CrO_4 (ASM, 2003).

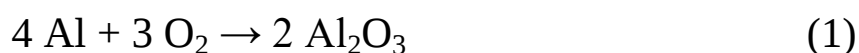
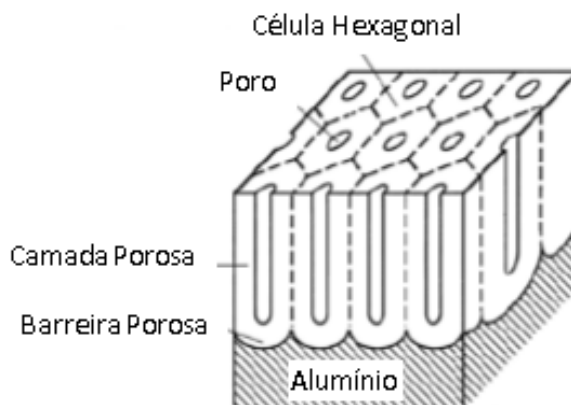


Figura 6: Estrutura porosa da camada anodizada



Fonte: (ASM, 2003)

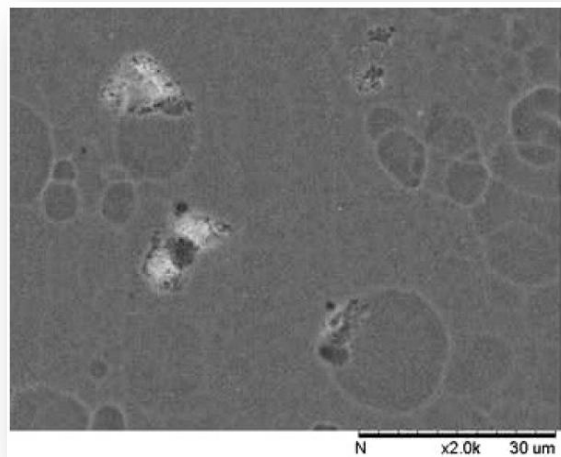
A barreira de óxido formada durante o processo de anodização pode tornar o sistema mais resistente à corrosão e ao desgaste. Por outro lado, é possível que sejam geradas tensões residuais na interface metal/óxido, fragilizando a superfície e tornando-a suscetível à fadiga (ROQUE, V. R. et al., 2013).

A camada de óxido formada constitui-se de células hexagonais sobrepostas, onde o centro será de alumina amorfa, pouco resistente a ácidos, e a periferia será formada de alumina cristalina, muito resistente a ácidos. Aparecem então, na superfície da camada milhares de pontos de ataque, que são consequência do efeito da dissolução da película pelo eletrólito, que se produz no centro das células de alumina, e que constitui o começo dos poros, formando, assim, a camada porosa. Cada ponto de ataque (poro) pode ser considerado como uma fonte de corrente, a partir da qual vai se desenvolver um campo de potencial, os íons, que se apresentam na separação óxido – eletrólito e fornecem o oxigênio que transforma em óxido a porção reatacada. Simultaneamente, a ação de dissolução do eletrólito continua se manifestando na base dos poros, tendendo a diminuir a espessura da camada barreira que se

desenvolve, os poros se alongam, fazendo com que os íons penetrem facilmente. Ocorre liberação de calor, o que tende a favorecer a dissolução (MENEGBESSO, 2006).

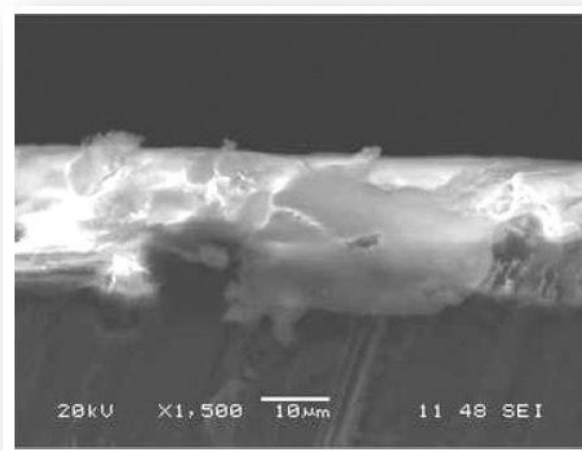
A Figura 7 apresenta a micrografia eletrônica de varredura da superfície do CDP da liga de alumínio 2024-T3 com camada de óxido. A Figura 8 apresenta a micrografia eletrônica de varredura da seção transversal da camada anódica em liga de alumínio 2024-T3. Verifica-se que a anodização tende a formar uma fina camada de óxido com alguns poros na superfície. O filme anódico distingue-se do alumínio e uma vez que a amostra fraturou, o filme foi removido da base (ZHAO, X. et al., 2015).

Figura 7: MEV da superfície do CDP do Al 2024-T3 com camada de óxido



Fonte: (ZHAO, X. et al., 2015)

Figura 8: MEV da seção transversal da camada anódica em liga de alumínio 2024-T3



Fonte: (ZHAO, X. et al., 2015)

A anodização com ácido crômico é atualmente utilizada na indústria aeroespacial para formar películas de óxido em ligas de alumínio de alta resistência. A anodização crômica promove a formação de um filme de Al_2O_3 incorporando com Cr. A película formada pode ser selada em água quente dando boa resistência à corrosão da liga ou não selada como base para pintura ou para adesão (DOMINGUES, L. et al., 2003).

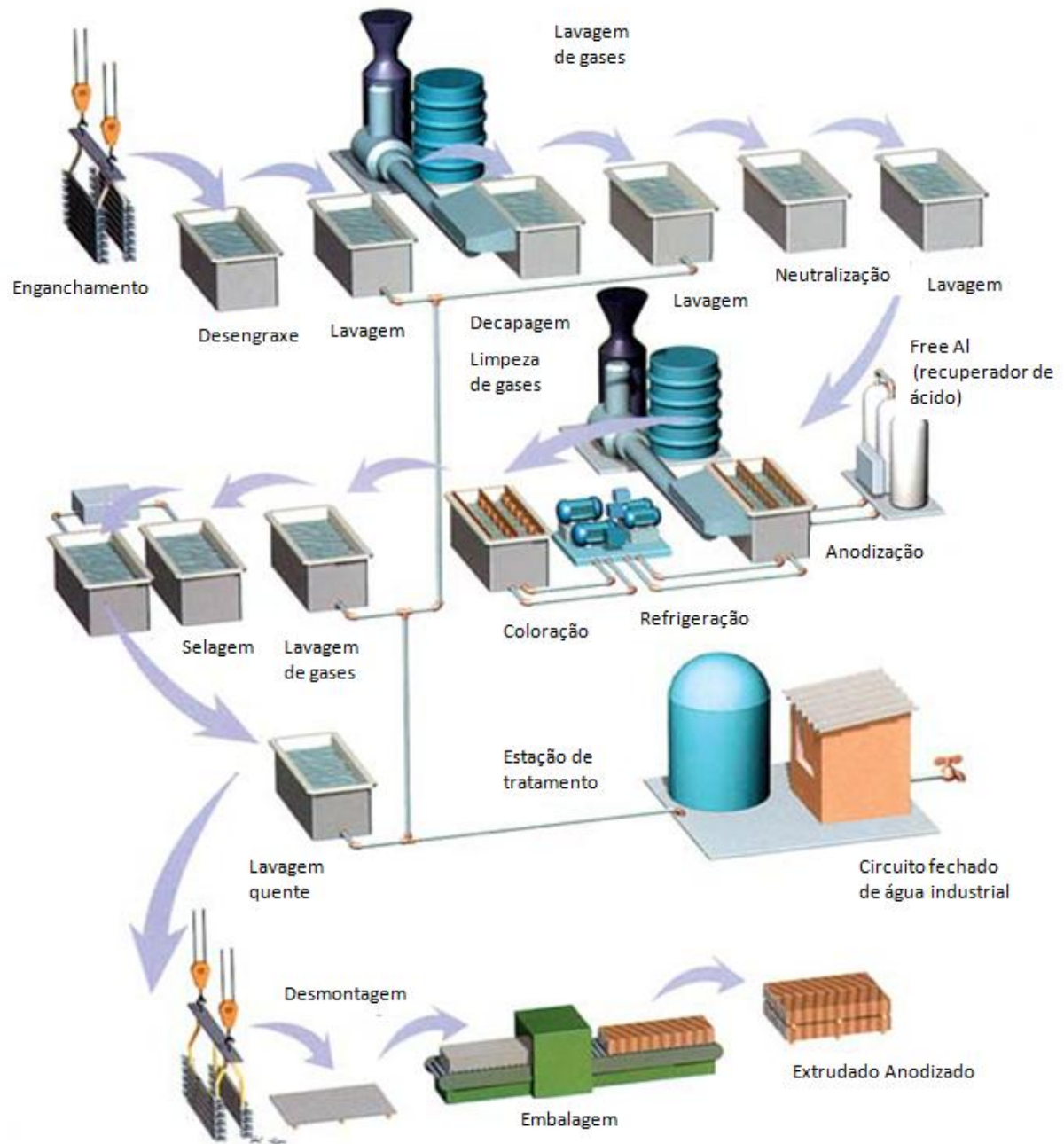
Outros processos, usados com menor frequência ou para fins especiais, são o ácido sulfúrico com ácido oxálico, fosfórico, ácido oxálico, ácido bórico, ácido sulfossalicílico, ácido ftálico ou ácido tartárico. Exceto para os revestimentos mais espessos produzidos por processos anodizados, a maioria dos revestimentos anódicos variam de 5 μm a 18 μm de espessura (ASM HANDBOOK, 1996).

Todo o processo de anodização é composto por uma série de etapas básicas (Figura 9), que incluem limpeza, anodização e selagem. Estas etapas são comuns a todos os tipos de anodização, sendo que cada processo adquire uma característica própria que identifica o tipo de acabamento (MENEHES, 2006).

A **limpeza** é um pré-tratamento da superfície, que consiste nos processos de desengraxe e decapagem. O propósito deste pré-tratamento é produzir uma superfície quimicamente limpa. Para o desengraxe, as peças são imersas em um detergente especial que remove óleo, graxa e partículas sólidas de poeira na superfície metálica. A decapagem é empregada para remover os óxidos naturais e outros compostos da superfície por meio de uma solução que age quimicamente. A remoção da camada de óxido permite uma superfície mais condutora, facilitando processos eletroquímicos, como a anodização (SHAHZAD, M. et al., 2010).

A **selagem** é essencial como um pós-tratamento para garantir a resistência à corrosão e a durabilidade de acabamentos. Filmes de óxido anódico porosos sem selagem não protegem contra a corrosão do substrato uma vez que íons agressivos facilmente penetram através dos poros (ASM HANDBOOK, 1996).

Figura 9: Fluxograma dos estágios básicos no processo de anodização



Fonte: (MENEGBESSO, 2006)

2.2.1 A influência da anodização na resistência à fadiga

O comportamento de peças anodizadas e sujeitas a carregamentos cíclicos foram estudados por Camargo (2007), Shahzad, M. et al. (2011) e Shahzad, M. et al. (2012), pois o processo de anodização, no qual a camada anódica atua como concentrador de tensão na superfície do material, pode influenciar na vida em fadiga dos materiais.

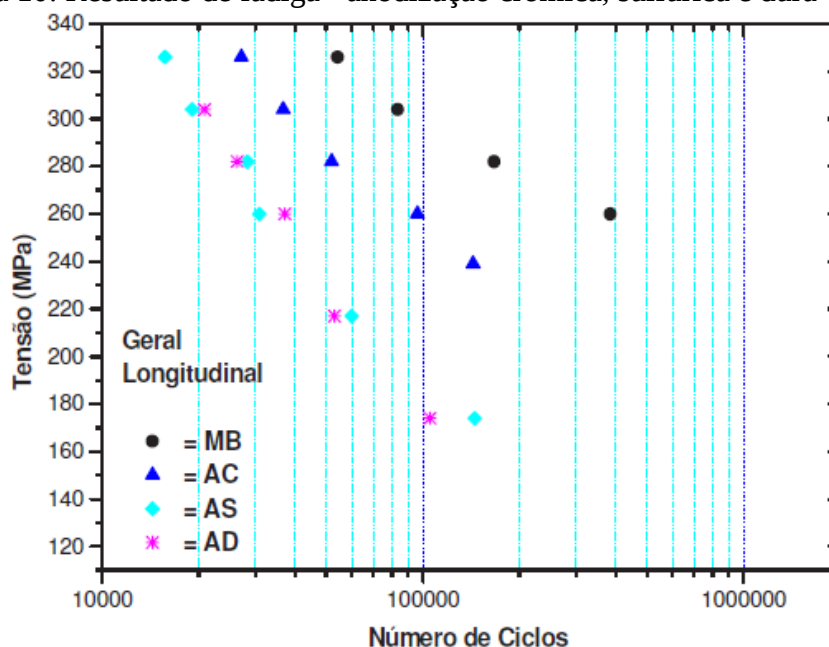
Deste modo, Camargo (2007) estudou a resistência à fadiga da liga Al 7050-T7451 submetidas aos três principais processos de anodização: crômica, sulfúrica e a dura. Sendo que cada processo de anodização forma camadas anódicas de diferentes espessuras, e nessa sequência, da menor para a maior, a anodização crômica (até 15 μm), sulfúrica (até 20 μm) e a dura (maior que 50 μm). Os parâmetros do ensaio de fadiga estão apresentados na Tabela 5 e os resultados dos ensaios na Figura 10.

Tabela 5: Parâmetros do ensaio de fadiga

Modo de Carga	Frequência	Razão de Carga R
Axial	28 Hz	0,1

Fonte: (CAMARGO, 2007)

Figura 10: Resultado de fadiga - anodização crômica, sulfúrica e dura - longitudinal

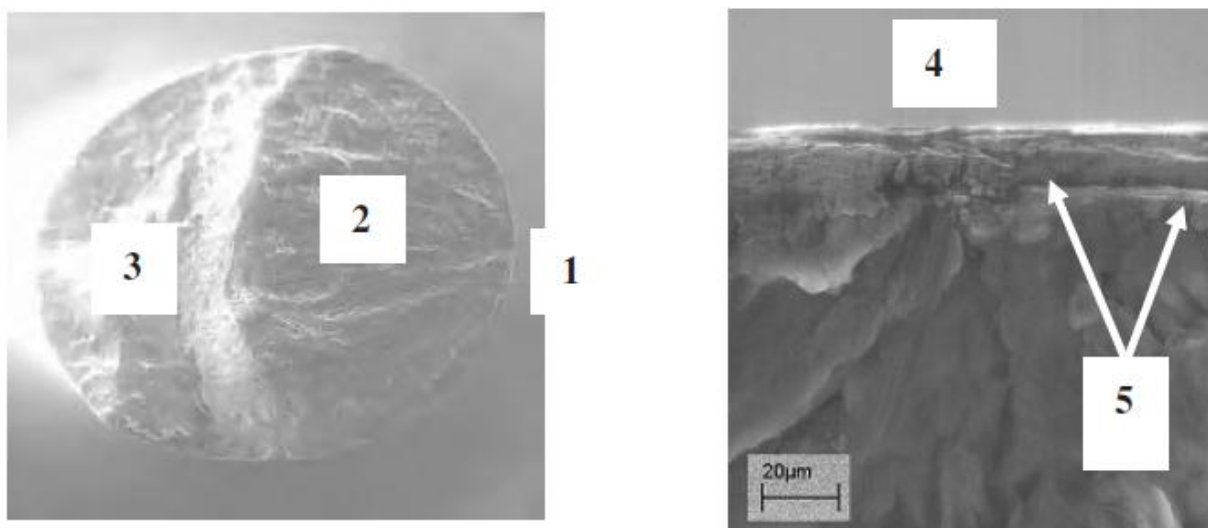


Fonte: (CAMARGO, 2007)

Os resultados confirmam a maior resistência à fadiga do material base, seguido da anodização crômica (AC). Os comportamentos do material com a anodização sulfúrica (AS) e a anodização dura (AD) foram semelhantes. Na Figura 11 apresenta a superfície de fratura do

CDP com anodização crômica no sentido longitudinal, na qual o ponto (1) é a nucleação da trinca, o ponto (2) a propagação da trinca e o ponto (3) a região rugosa de fratura dúctil. No ponto (4) da Figura 11 apresenta novamente a nucleação da trinca na camada anódica e nos pontos (5) da Figura 11 apresentam o deslocamento da camada anódica e a propagação para o interior do substrato. Também foram analisados os demais tratamentos de anodização sulfúrica e dura, concluindo-se que as camadas anódicas apresentaram trincas superficiais que ao atingirem o substrato propagaram-se para o interior do corpo de prova causando a fratura do material (CAMARGO, 2007).

Figura 11: Superfície de fratura - (282 MPa, 58.000 ciclos) - (a) 40x e (b) 1000x



Fonte: (CAMARGO, 2007)

A diminuição da resistência à fadiga em materiais anodizados pode ser dada pelo comportamento frágil da camada de óxido, tensão residual de tração na interface entre a camada de óxido e o substrato e também pela presença de poros encontrados na superfície (CHAUSSUMIER, M. et al., 2013).

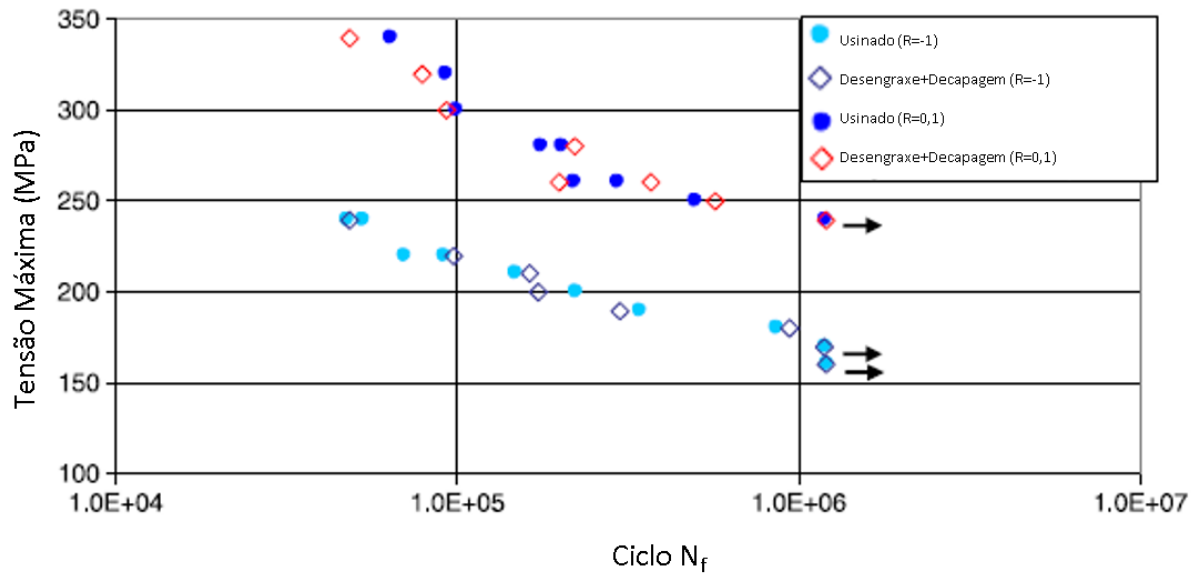
Portanto para saber a causa da diminuição da resistência à fadiga de materiais anodizados é importante compreender a relação entre comportamento do material com cada fase do processo de anodização. E isso foi tema da pesquisa de Shahzad, M. et al. (2012) que investigaram o efeito do pré-tratamento (desengraxe e decapagem) e da anodização sulfúrica selada na resistência em fadiga do alumínio 2214-T6. As tensões foram estabelecidas de forma que os valores estivessem entre 10^4 e 10^6 ciclos e parâmetros do ensaio de fadiga estão apresentados na Tabela 6 e os resultados apresentados nas Figura 12, Figura 13 e Figura 14.

Tabela 6: Parâmetros do ensaio de fadiga

Modo de Carga	Frequência	Razão de Carga R
Axial	10 Hz	0,1 e -1

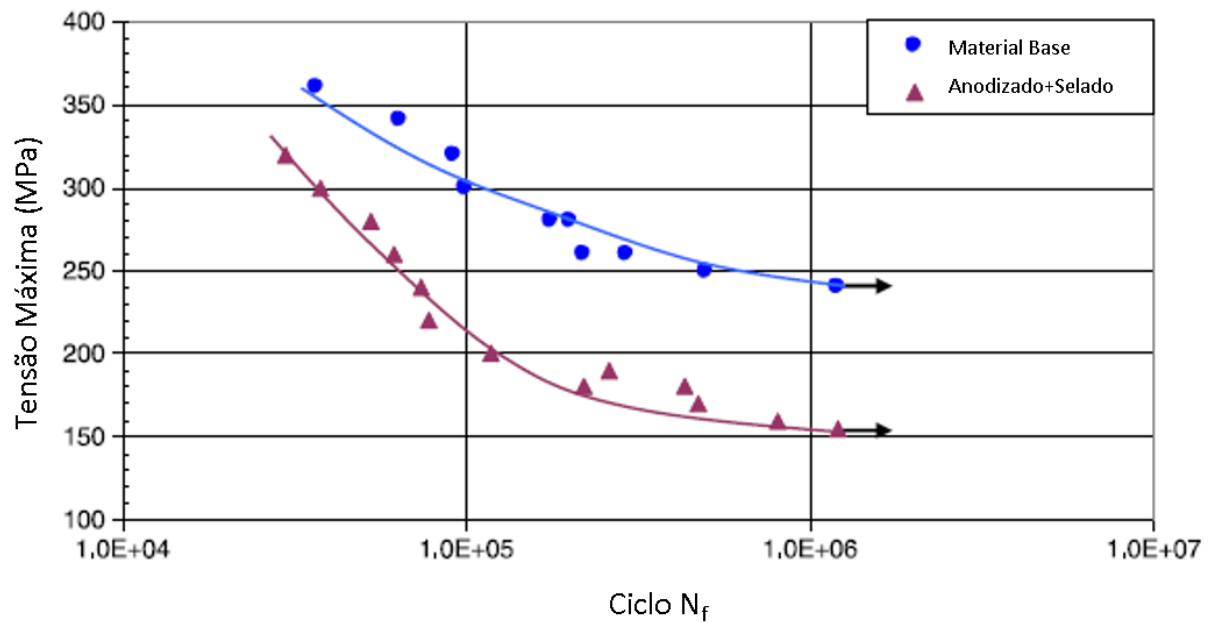
Fonte: (SHAHZAD, M. et al., 2012)

Figura 12: Resultado de fadiga - material usinado e pré-anodizado. R=0,1 e R=-1



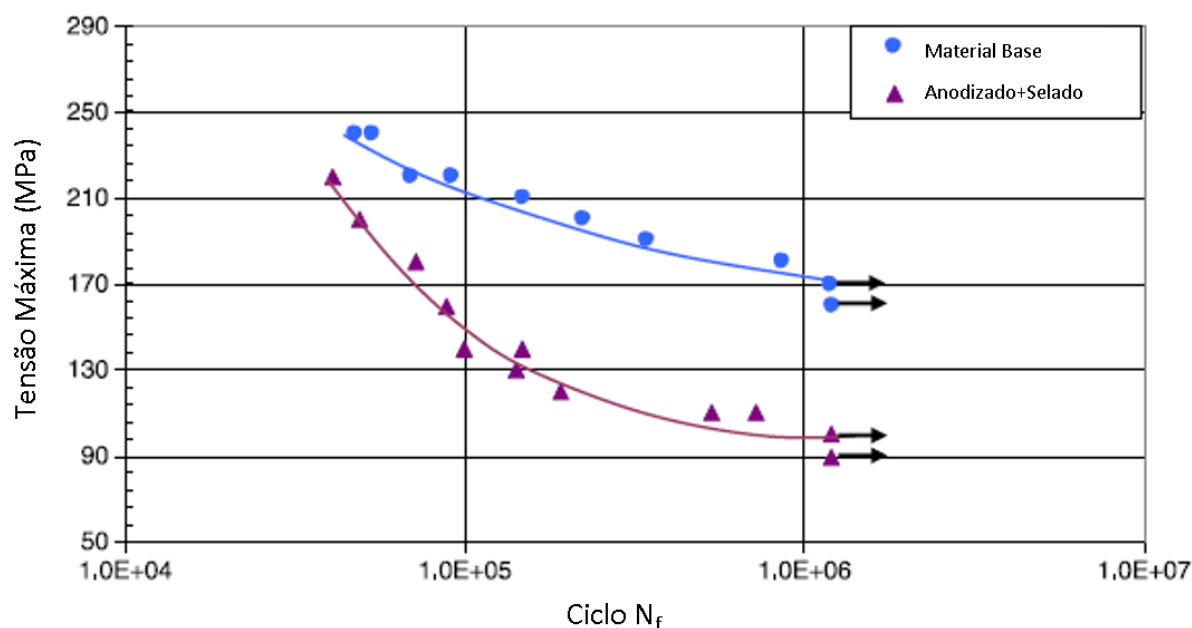
Fonte: (SHAHZAD, M. et al., 2012)

Figura 13: Resultado de fadiga - material base e anodizado+selado R=0,1



Fonte: (SHAHZAD, M. et al., 2012)

Figura 14: Resultado do ensaio de fadiga do material base e anodizado+selado $R=-1$



Fonte: (SHAHZAD, M. et al., 2012)

Foi observada na fractografia a presença de cavidades e fissuras no filme anódico selado antes do ensaio de fadiga. Contudo o pré-tratamento não afetou a morfologia da superfície. O resultado do ensaio de fadiga (Figura 12) apresentou nenhum efeito do pré-tratamento na resistência à fadiga enquanto o filme anódico selado (Figura 13 e Figura 14) reduziu o desempenho em fadiga comparado ao material base (SHAHZAD, M. et al., 2012).

Lee; Jeong; Kim (2012) propuseram que a resistência à fadiga de materiais anodizados é afetada fortemente pela natureza da camada pré-anodizada com diferentes processos de decapagem ácida.

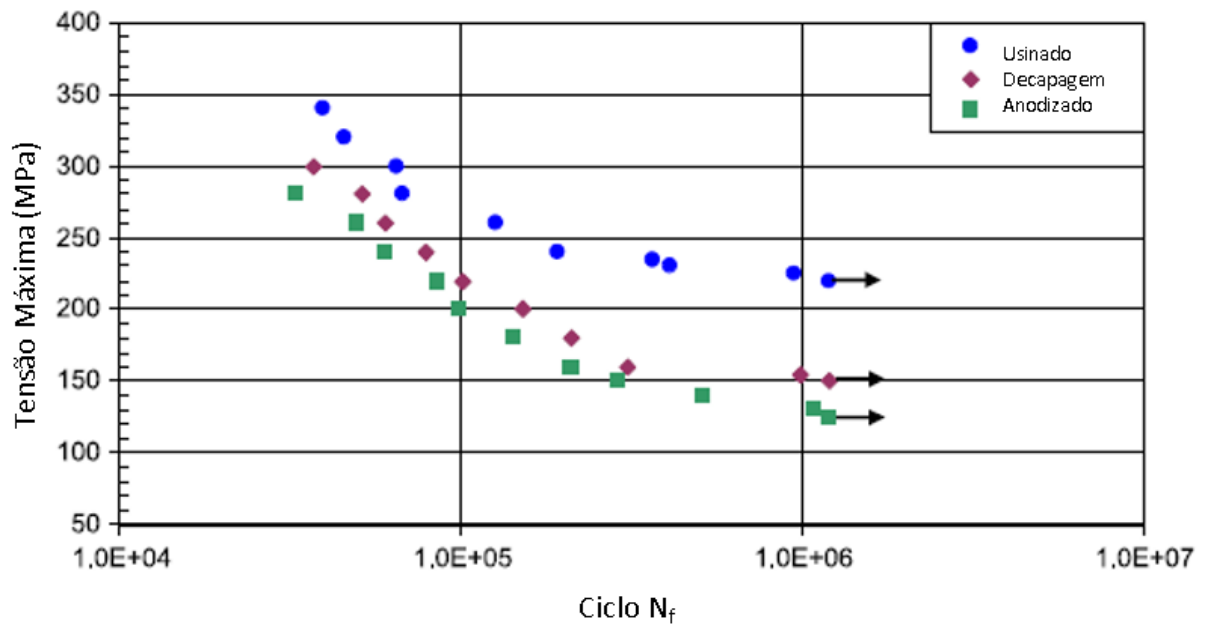
Na mesma linha de pesquisa, anteriormente Shahzad, M. et al. (2011) também estudaram a caracterização superficial e a influência do processo de anodização crômica e o pré-tratamento na vida em fadiga na liga Al 7050-T7451. As tensões foram estabelecidas de forma que os valores estivessem entre 10^4 e 10^6 ciclos e os parâmetros do ensaio de fadiga estão apresentados na Tabela 7 e os resultados dos ensaios na Figura 15.

Tabela 7: Parâmetros do ensaio de fadiga

Modo de Carga	Frequência	Razão de Carga R
Axial	10 Hz	0,1

Fonte: (SHAHZAD, M. et al., 2011)

Figura 15: Resultado de vida em fadiga. acabamento superficial $R_a=0,6 \mu\text{m}$



Fonte: (SHAHZAD, M. et al., 2011)

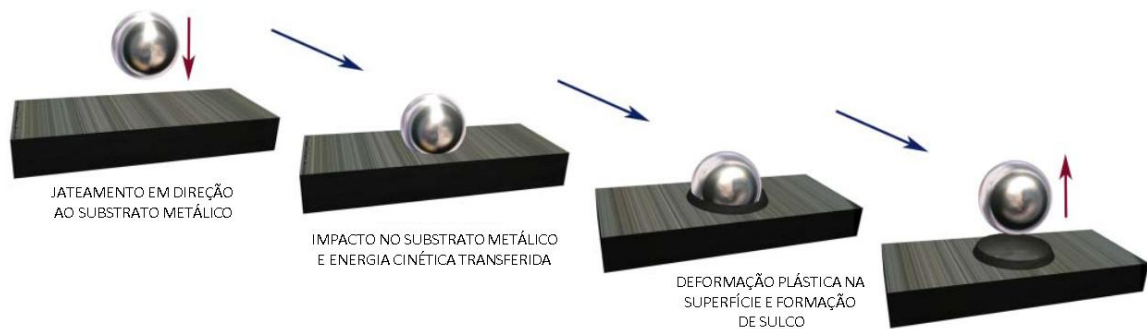
Shahzad, M. et al. (2011) mostraram que a decapagem e a anodização reduziram a resistência em fadiga do material base atribuído aos *pits* na superfície que foram formados como resultado da dissolução das partículas constituídas na solução. Shahzad et al. (2011) e Shahzad, M. et al. (2012) utilizaram diferentes soluções de decapagem, que confirma que a influência do pré-tratamento na resistência à fadiga depende dos constituintes da solução.

2.3 SHOT-PEENING

O *Shot-Peening* é um método de trabalho a frio, em que os esforços de compressão são induzidos na subsuperfície de peças metálicas através do impacto de um jateamento de esferas em alta velocidade e em condições controladas (ASM HANDBOOK, 1996). As tensões compressivas induzidas pelo processo de *Shot-Peening* criam nas camadas subsuperficiais do material uma barreira mecânica que dificulta ou impede a deformação plástica localizada do material, retardando a propagação da trinca além de dificultar a ocorrência de trincas a partir da superfície do material (CAMARGO, 2007).

As esferas do jateamento podem ser de aço, cerâmica ou vidro e sua dureza deve ser maior do que ao material a ser tratado. A Figura 16 apresenta a sequência do jateamento de esferas em uma superfície metálica.

Figura 16: Diagrama de impacto do jateamento



Fonte: (LEVASSEUR, 2002)

O processo de *Shot-Peening* é utilizado para aumentar a resistência à fadiga e a resistência à tensão por corrosão de componentes fabricados a partir de placas usinadas de ligas de alumínio de alta resistência e destinados especialmente para uso na indústria aeroespacial (CINA; KAATZ; ELDROR, 1990). O processo também é amplamente utilizado em molas de válvulas automotivas, molas de suspensão, engrenagens, eixos da transmissão, componentes de turbinas etc. (DIEPART, 1994).

A Figura 17 apresenta um revestimento da asa que será trabalhado em uma máquina de *Shot-Peening*.

Figura 17: Máquina de *Shot-Peening*



Fonte: (SHOT-PEENING, 2016)

A oclusão de trincas em materiais com *Shot-Peening* pode ser ocasionada devido à intensidade do *Shot-Peening*. No entanto outros fatores como a geometria da amostra e as propriedades do material também podem afetar no comportamento da trinca (SONG; WEN, 1999).

A intensidade de *Shot-Peening* é uma indicação da energia cinética (massa e velocidade da partícula) transferida para a superfície da peça e foi demonstrada com o uso da Placa Almen. John O. Almen, que trabalhou para a General Motors na década de 1920 desenvolveu um método de medição, especificação e duplicação das intensidades do *Shot-Peening*. A intensidade Almen trabalha com um princípio de que, se uma placa de metal é presa a um bloco sólido e exposto a um certo grau de jateamento, será curvado após a remoção do bloco. A curvatura será convexa no lado do jateamento. A altura da curvatura é medida em um calibre especial, ou seja, um calibre Almen, que serve como medida de intensidade, conforme apresentado na Figura 19 (O'HARA, 1999).

John O. Almen padronizou três tipos de placas de aço SAE 1070 iguais em dimensões, dureza (45 HRC), planicidade, acabamento etc. variando apenas a espessura. A leitura da curvatura da placa é medida em polegadas ou milímetros, é o que se denomina número de Almen (por exemplo, 0.010 A à 0.015 A (polegadas) ou 0,25 A à 0,38 A (mm) (ALMEN; BLACK, 1963).

As Placas Almen são classificadas em três tipos diferenciando cada uma pela espessura: A, N e C. (SHOT-PEENING STAFF, 2009).

As placas mais comuns são as A (0.051" - 1,2954 mm) e a C (0.0938" - 2,3825 mm) e para menor intensidade do jateamento a placa N (0.031" - 0,7874 mm) com menor espessura (CHAMPAIGNE, 1997).

A Figura 18 representa um arco típico de uma placa após *Shot-Peening* e a Figura 19 apresenta o sistema de medição da Placa Almen.

Figura 18: Arco típico de uma placa após *Shot-Peening*

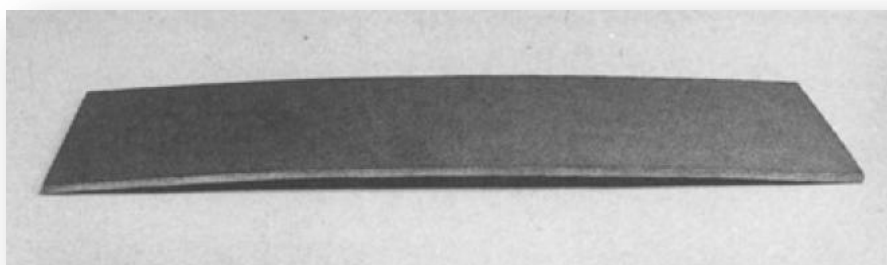
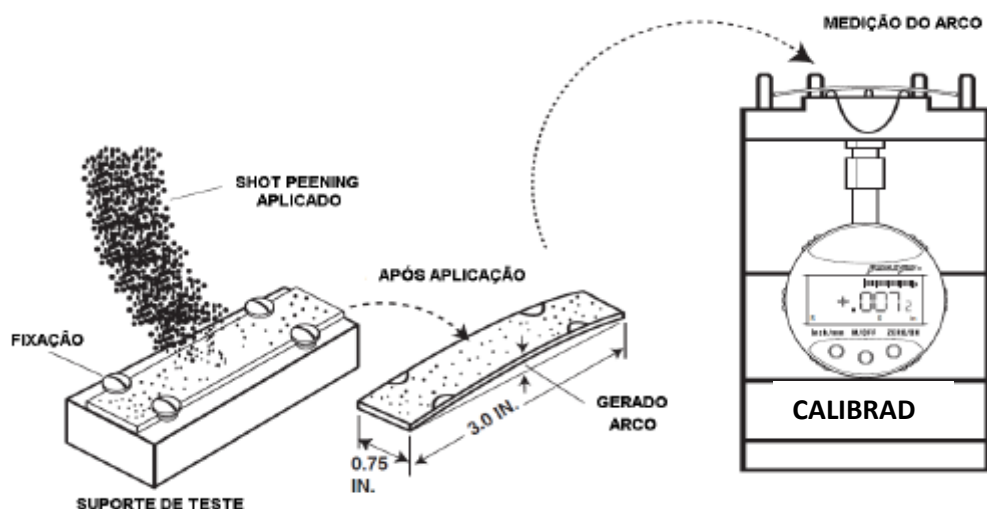


Figura 19: Placa Almen



Fonte: (SHOT-PEENING STAFF, 2009)

Após o impacto do jateamento de esferas a um determinado tempo e intensidade, são formados sulcos conforme foi apresentado na Figura 16. Os sulcos determinam outro parâmetro do processo de *Shot-Peening*, denominado cobertura.

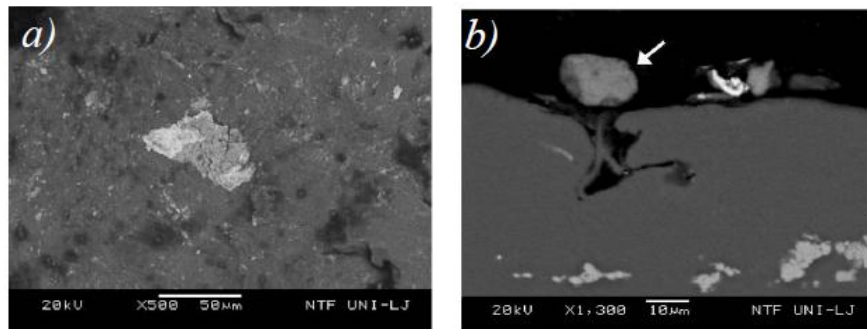
A cobertura é uma medida de quão uma área foi atingida pelas esferas. A cobertura é definida como a quantidade da superfície que foi atingida por ação do *Shot-Peening*. A cobertura completa é quando toda a superfície tem sulcos sobrepostos e nenhuma superfície original permanece, isso é definido como 100% de cobertura. 200%, 300% ou 400% de cobertura são 2,3 ou 4 vezes a cobertura de 100%. A cobertura fraca ou parcial pode resultar em áreas de menor tensão de compressão superficial ou, na pior das hipóteses, nenhum efeito. (O'HARA, 1999).

Sem uma cobertura de 100% ou a saturação, a melhora nas características de fadiga convencionalmente produzido pelo *Shot-Peening* não é obtido. (ASM HANDBOOK, 1996). O processo de *Shot-Peening* atinge uma situação de saturação, quando, a partir de certo tempo, a intensidade do *peening* pouco ou nada afeta a deformação causada na placa Almen. Esse ponto de saturação praticamente coincide com uma cobertura de 98% (CAMARGO, 2007).

Sabe-se que o acabamento superficial pode afetar consideravelmente a resistência à fadiga. (SURARATCHAI, M. et al., 2008). Mesmo com os parâmetros controlados do *Shot-Peening* a presença de defeitos na superfície como contaminação e rugosidade, pode exercer uma influência desfavorável na resistência do material.

O resíduo do *Shot-Peening* que introduzido na superfície do material como corpo estranho, pode, no caso de esferas de aço, resultar em menor resistência à corrosão (ZUPANC; GRUM, 2011). Esta apresentada na Figura 20 um exemplo de uma superfície contaminada do alumínio tratado com *Shot-Peening*.

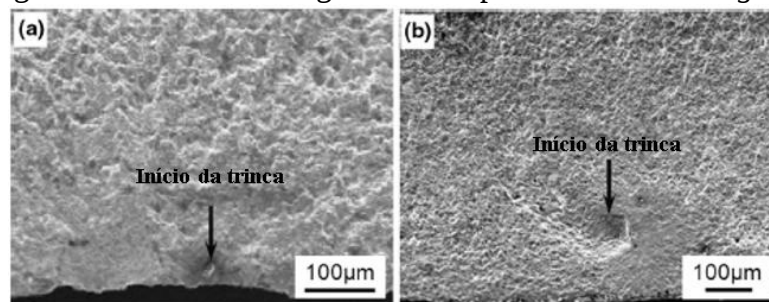
Figura 20: Inclusão de esfera de aço; a) superfície após *Shot-Peening*; b) seção transversal



Fonte: (ZUPANC; GRUM, 2011)

As morfologias da fratura de fadiga das amostras de aço de alta resistência, amplamente utilizado na indústria da aviação, foram comparadas antes e depois do *Shot-Peening* e estão apresentados na Figura 21 (a), a nucleação da trinca de fadiga está localizada na superfície da amostra sem *Shot-Peening*. Depois do *Shot-Peening*, ele se move 150µm para dentro da superfície, o que pode ser visto na Figura 21 (b). A nucleação da fratura na subcamada da amostra é a principal relação com o seu desempenho, que pode suprimir o início da fratura na superfície. Embora a força externa exista continuamente após o início da fratura, a propagação é restringida pelo campo de tensão compressivo e dificulta a propagação de forma rápida, o que melhora muito a resistência à fadiga e prolonga ainda mais a vida de fadiga de componentes (ZHAO, X. et al., 2015).

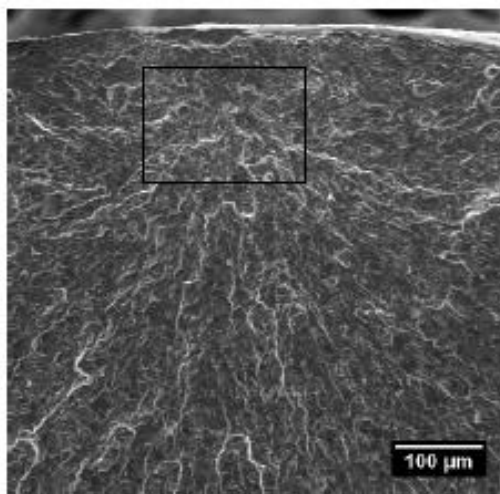
Figura 21: Fratura de fadiga antes e depois do *Shot-Peening*



Fonte: (ZHAO, X. et al., 2015)

Na Figura 22 apresenta a superfície de fratura da liga Ti-6Al-4V com pré-tratamento de *Shot-Peening* e anodização onde observa-se claramente a influência do campo residual compressivo induzido pelo *Shot-Peening*. A nucleação da trinca distanciou-se de aproximadamente 150 μm da superfície. Esse efeito se atribui ao tratamento de *Shot-Peening* que inibe a nucleação e a propagação das trincas por fadiga e desvia a frente de trincas para uma posição abaixo da superfície (COSTA, 2009).

Figura 22: Superfície de fratura da liga Ti-6Al-4V



Fonte: (COSTA, 2009)

2.3.1 A influência do *Shot-Peening* na resistência à fadiga

O tratamento superficial de *Shot-Peening* em componentes de engenharia é muito eficaz e amplamente utilizado como uma técnica para melhorar a resistência à fadiga. Algumas outras mudanças no material também são evidentes após o *Shot-Peening*, como por exemplo, o encruamento, distorção da estrutura cristalina e superfície rugosa. Um estudo mais abrangente é necessário para uma compreensão completa dessas mudanças, de modo a conseguir uma otimização do processo. Essa foi a motivação dos pesquisadores De Los Rios, Trool e Levers (1999) para estudar o efeito do *Shot-Peening* na resistência à fadiga do alumínio 2024-T351, utilizando teste de flexão *in situ* sob microscópio ótico para monitorar continuamente a propagação de fissuras durante o ensaio de fadiga. Quando a fissura se formou, ela foi continuamente monitorada até a falha ou até que a fissura atingisse o comprimento requerido. Dez amostras com *Shot-Peening* foram ensaiadas nas três intensidades conforme apresentado na Tabela 8 e os parâmetros do ensaio de fadiga estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 8: Parâmetros do *Shot-Peening*

Baixa Intensidade Almen	Média Intensidade Almen	Alta Intensidade Almen
6 A	8,8 A	11 A

Fonte: (DE LOS RIOS; TROOL; LEVERS, 1999)

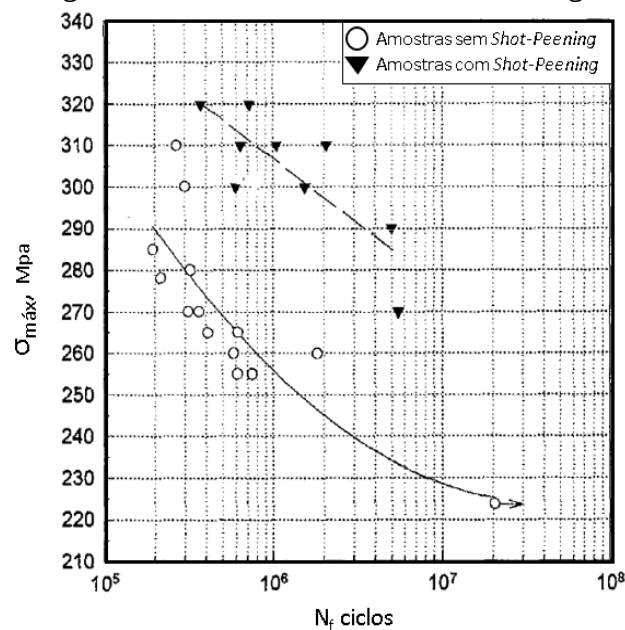
Tabela 9: Parâmetros do ensaio de fadiga

Modo de Carga	Frequência	Razão de Carga R
Flexão	20 Hz	0,1

Fonte: (DE LOS RIOS; TROOL; LEVERS, 1999)

A Figura 23 apresenta resultados experimentais e o melhor ajuste das linhas das amostras com *Shot-Peening* e sem *Shot-Peening*. Isto mostra que a vida em fadiga para amostras com *Shot-Peening* é maior do que as amostras sem *Shot-Peening* em uma ampla gama de tensões aplicadas. Os dados foram limitados para permitir uma diferenciação entre as intensidades de jateamento. Assim, as três intensidades foram agrupadas e nenhuma diferenciação foi feita. O *Shot-Peening* também mudou a forma dos grãos e diminuiu seu tamanho médio de 52 μm para 42 μm . Isso aumentou a quantidade de barreiras microestruturais que a trinca precisou superar, diminuindo o crescimento da trinca. E a dureza da camada distorcida do material com *Shot-Peening* foi maior do que o material sem *Shot-Peening* (DE LOS RIOS; TROOL; LEVERS, 1999).

Figura 23: Resultados dos ensaios de fadiga



Fonte: (DE LOS RIOS; TROOL; LEVERS, 1999)

Na conclusão feita por De Los Rios, Trool e Levers (1999), o potencial do material foi desenvolvido após o processo de *Shot-Peening*, porém esse desenvolvimento pode ser afetado quando as tecnologias do *Shot-Peening* não forem adequadas. Tempo, intensidade, ângulo, material e tamanho das esferas bem como o duplo *Shot-Peening* podem estabelecer a base teórica para um resultado efetivo do processo de *Shot-Peening* (ZHAO, C. et al., 2015).

Isto também foi o objetivo da pesquisa de Minto (2012), em que ele compara os resultados de fadiga do material base e do material com *Shot-Peening* da liga de alumínio 7175-T74. A Tabela 10 apresenta os parâmetros do *Shot-Peening*, na Tabela 11 os parâmetros do ensaio de fadiga e na Figura 24 os resultados do ensaio de fadiga para o material base (MB) sem *Shot-Peening* e material base com *Shot-Peening* (SP).

Tabela 10: Parâmetros do *Shot-Peening*

Intensidade Almen	Cobertura	Esferas
0.013 N	120%	Vidro

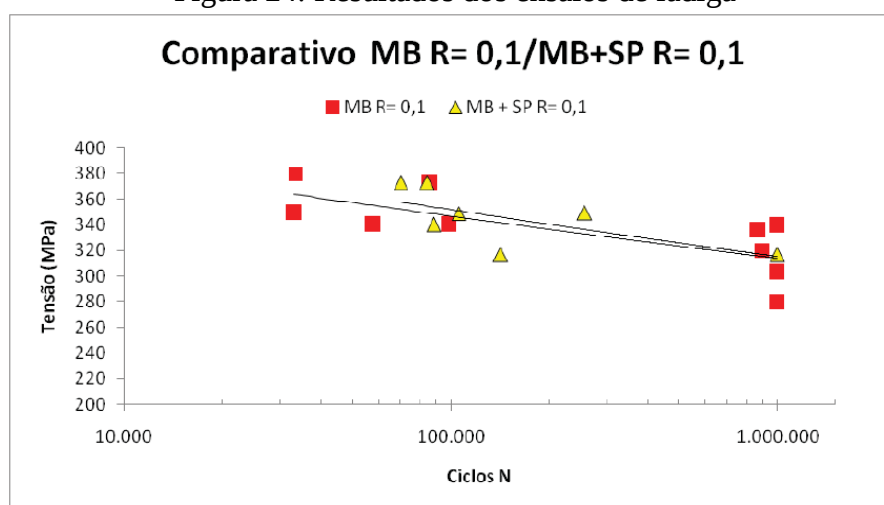
Fonte: (MINTO, 2012)

Tabela 11: Parâmetros do ensaio de fadiga

Modo de Carga	Frequência	Razão de Carga R
Axial	10 Hz	0,1

Fonte: (MINTO, 2012)

Figura 24: Resultados dos ensaios de fadiga



Fonte: (MINTO, 2012)

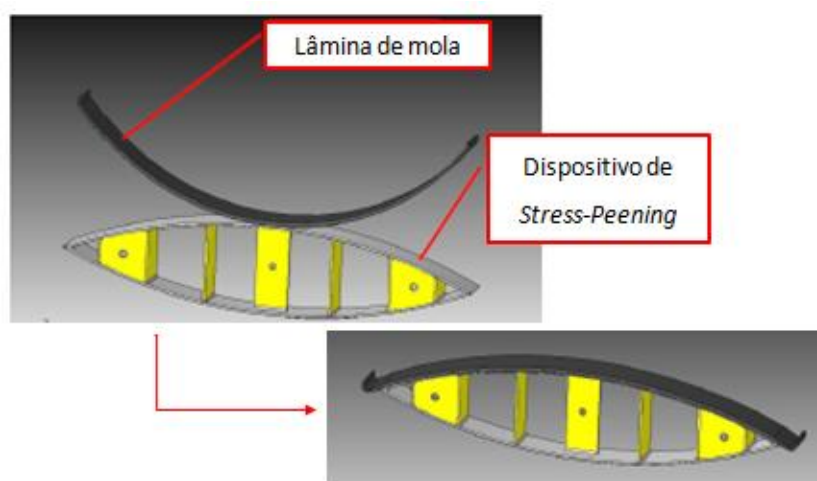
O material base com *Shot-Peening* apresentou maior resistência à fadiga do que o material base sem o *Shot-Peening*. Porém, para esse caso o aumento não foi tão significativo.

Isso pode ocorrer, pois a intensidade utilizada na liga não induziu um campo de tensão residual compressiva suficiente para prolongar a vida em fadiga para níveis acima da curva do material base (MINTO, 2012).

Tal como a intensidade insuficiente, o acabamento superficial também pode influenciar na resistência à fadiga, como foi proposto por SURARATCHAI, M. et al. (2008). E para melhorar o acabamento da superfície, uma dupla operação de *Shot-Peening* pode ser aplicada, na qual a operação de *Shot-Peening* é seguida por uma operação com micro-esfera. Às vezes a superfície também pode ser submetida ao polimento químico ou eletroquímico após *Shot-Peening* para melhorar o acabamento superficial (SHARMA, 2001). Nesse âmbito, Scuracchio (2012) analisou a influência da rugosidade e diferentes variações no processo do *Shot-Peening* na vida em fadiga de molas de aço. As peças foram submetidas a diversas condições de *Shot-Peening*, como a aplicação de pré-tensionamento (*Stress-Peening*), jateamento simples, jateamento duplo e utilizando diferentes tipos de esferas (tamanho e tipo).

Além do processo de *Shot-Peening* usual, é bastante difundido para lâminas de molas o processo de *Stress-Peening* (SCURACCHIO, 2012). No processo de *Stress-Peening* (Figura 25), os componentes são tensionados na direção de tração durante o jateamento. Depois do *Shot-Peening*, as partes são aliviadas da carga aplicada, que produz uma tensão residual de compressão ainda maior na camada de deformação (LUAN; JIANG; VICENT, 2009).

Figura 25: Preparação da lâmina para *Stress-Peening*



Fonte: (SCURACCHIO, 2012)

Os diâmetros das esferas utilizadas correspondem a S110 (0.011"-0,3 mm), S170 (0.017"-0,4 mm), S230 (0.023"-0,6 mm), S330 (0.033"-0,8 mm) e S390 (0.039"-0,1 mm).

Para fins de comparação e análise, foi escolhida a vida B50 sendo o valor de ciclo característico, onde 50% irão sobreviver em um intervalo de confiança de 90%. Este parâmetro é amplamente utilizado pela indústria de molas e foi escolhido para fins de comparação com histórico de outras peças e modelos (SCURACCHIO, 2012). Os resultados dos ensaios de rugosidade estão apresentados na Tabela 12 e em relação à vida em fadiga na Tabela 13.

Tabela 12: Média da rugosidade das amostras

Condição	Tipo de granada: 1º Jateamento	Tipo de granada: 2º Jateamento	Rugosidade de Profundidade Média Rz (μm)	Rugosidade Média Aritimética Ra (μm)	Rugosidad e Total Rt (μm)
1	S330 c/ Stress	-	41,3 $\pm$ 2,3	7,07 $\pm$ 0,49	52,5 $\pm$ 3,1
2	S330	-	45,7 $\pm$ 6,4	8,73 $\pm$ 0,61	59,6 $\pm$ 5,9
3	S330 c/ Stress	S230	37,5 $\pm$ 4,1	5,24 $\pm$ 0,42	41,7 $\pm$ 2,5
4	S330	S230	38,1 $\pm$ 2,0	5,98 $\pm$ 0,29	45,8 $\pm$ 2,9
5	S390 c/ Stress	S230	35,5 $\pm$ 2,1	5,52 $\pm$ 0,37	46,1 $\pm$ 3,5
6	S390	S230	34,1 $\pm$ 2,5	5,96 $\pm$ 0,47	40,7 $\pm$ 3,2
7	S330 c/ Stress	S170	37,1 $\pm$ 7,0	6,71 $\pm$ 0,65	46,9 $\pm$ 5,6
8	S390 c/ Stress	S170	33,3 $\pm$ 5,9	6,02 $\pm$ 0,49	47,8 $\pm$ 4,4
9	S330 c/ Stress	S110	33,2 $\pm$ 2,1	5,52 $\pm$ 0,31	41,1 $\pm$ 3,7
10	S390 c/ Stress	S110	31,9 $\pm$ 1,8	5,99 $\pm$ 0,36	43,3 $\pm$ 2,6

Fonte: Adaptado de SCURACCHIO (2012)

Tabela 13: Rugosidade x Vida em fadiga (ordem decrescente)

Condição	Rugosidade Média Rz (μm)	Rugosidade Média Ra (μm)	Rugosidade Total Rt (μm)	Vida B50 (ciclos) e valores limites (intervalo de confiança 90%)
10	31,9 $\pm$ 1,8	5,99 $\pm$ 0,36	43,3 $\pm$ 2,6	427508 (336212 – 641862)
8	33,3 $\pm$ 5,9	6,02 $\pm$ 0,49	47,8 $\pm$ 4,4	394731 (331154 – 594235)
9	33,2 $\pm$ 2,1	5,52 $\pm$ 0,31	41,1 $\pm$ 3,7	317887 (269687 – 436526)
7	37,1 $\pm$ 7,0	6,71 $\pm$ 0,65	46,9 $\pm$ 5,6	293519 (243454 – 433620)
1	41,3 $\pm$ 2,3	7,07 $\pm$ 0,49	52,5 $\pm$ 3,1	216461 (180534 – 304472)
5	35,5 $\pm$ 2,1	5,52 $\pm$ 0,37	46,1 $\pm$ 3,5	93995 (73593 – 134748)
3	37,5 $\pm$ 4,1	5,24 $\pm$ 0,42	41,7 $\pm$ 2,5	58233 (50387 – 73864)
6	34,1 $\pm$ 2,5	5,96 $\pm$ 0,47	40,7 $\pm$ 3,2	40892 (35840 – 47966)
4	38,1 $\pm$ 2,0	5,98 $\pm$ 0,29	45,8 $\pm$ 2,9	26611 (22145 – 38780)
2	45,7 $\pm$ 6,4	8,73 $\pm$ 0,61	59,6 $\pm$ 5,9	23972 (21718 – 30970)

Fonte: Adaptado de SCURACCHIO (2012)

A conclusão é que para mola em lâmina, a técnica de duplo-*peening* pode aumentar a vida em fadiga. Porém, este efeito benéfico só foi alcançado para granalhas de menor diâmetro no segundo *peening*. Com isso conclui-se que o tamanho da granalha do segundo *Shot-Peening* é um fator importante para o resultado da vida em fadiga. Observa-se também que as amostras com duplo jateamento apresentaram uma média de rugosidade superficial menor, porém nenhum método de avaliação de rugosidade se mostrou aderente com os resultados de vida em fadiga. Portanto, dentro da amplitude dos valores mencionados, a rugosidade teve pouco ou nenhum efeito na vida em fadiga das peças ensaiadas (SCURACCHIO, 2012).

2.3.2 A influência do *Shot-Peening* e da anodização na resistência à fadiga

É compreendido que o processo de *Shot-Peening* e o processo de anodização individualmente podem gerar efeitos na resistência à fadiga. Já que os processos de *Shot-Peening* seguido de anodização são utilizados na indústria, torna-se necessário o estudo da influência dos dois processos em conjunto na resistência à fadiga.

Em vista disso, Camargo (2007) avaliou a influência do *Shot-Peening* e das anodizações crômica (AC), sulfúrica (AS) e dura (AD) sobre a resistência à fadiga por flexão alternada da liga Al 7050-T7451. Os parâmetros do *Shot-Peening* estão apresentados na Tabela 14 e do ensaio de fadiga na Tabela 15.

Tabela 14: Parâmetros do *Shot-Peening*

Intensidade Almen	Cobertura	Esferas
0.013 N	120%	Vidro

Fonte: (CAMARGO, 2007)

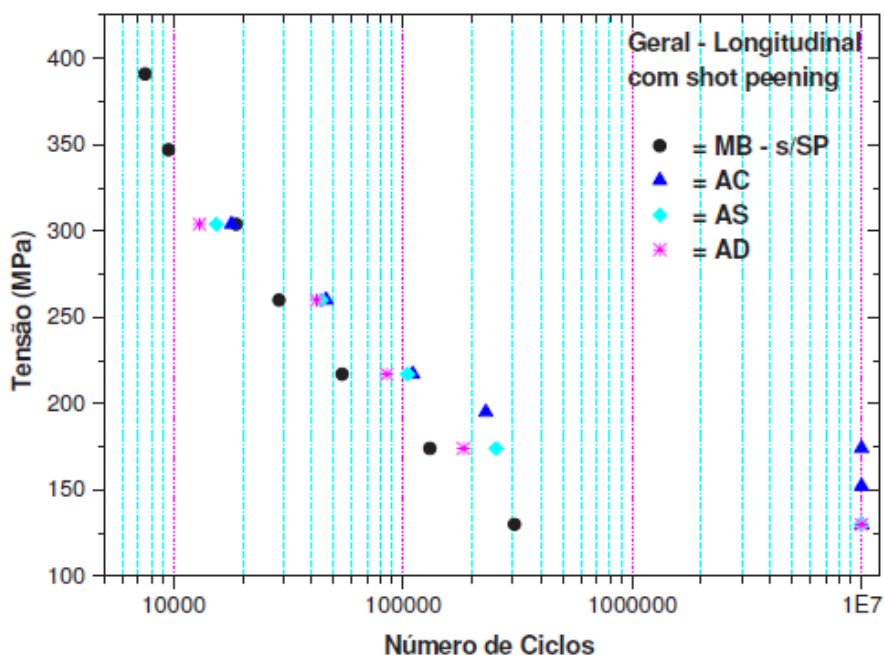
Tabela 15: Parâmetros do ensaio de fadiga

Modo de Carga	Frequência	Razão de Carga R
Flexão Alternada	25 Hz	-1

Fonte: (CAMARGO, 2007)

Conforme apresentada na Figura 26 foi concluído que o processo de *Shot-Peening* e anodização aumentou a vida em fadiga do material quando comparado como material base e que a anodização crômica obteve maior resistência à fadiga em relação à anodização sulfúrica e dura (CAMARGO, 2007).

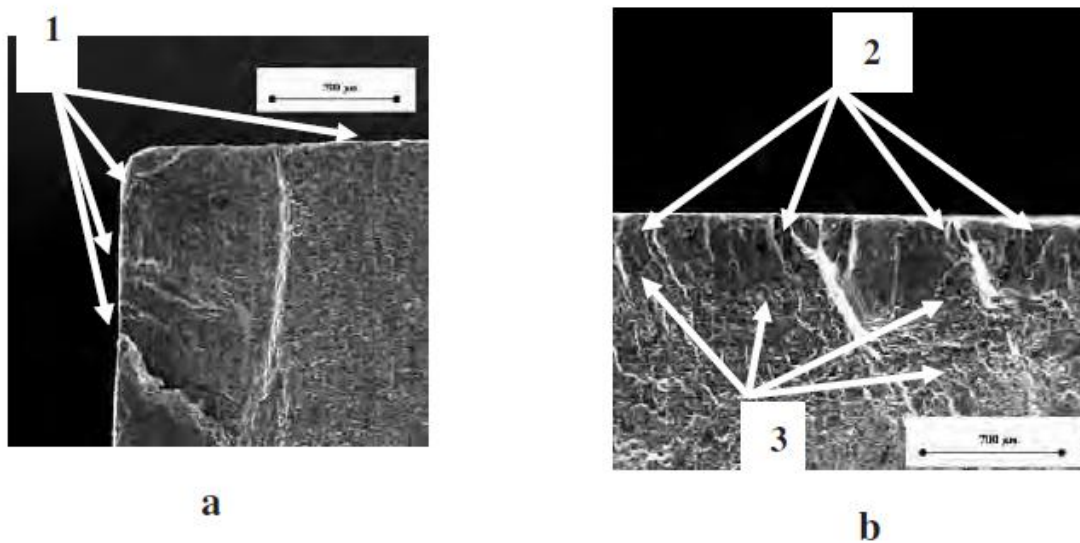
Figura 26: Resultado de fadiga - flexão alternada



Fonte: (CAMARGO, 2007)

A Figura 27 apresenta a superfície de fratura do ensaio de fadiga por flexão alternada (195 MPa, 201.200 ciclos) do metal base com *Shot-Peening* e anodização crômica. A foto (a) apresenta uma visão geral da superfície de fratura, nos pontos indicados com o número (1) pode-se observar a nucleação de trincas próximo à borda, na superfície e na lateral do corpo-de-prova. A foto (b) apresenta a nucleação de trincas na superfície da camada anódica, indicadas com o número (2), que sofrem desvios no substrato gerando trincas nas camadas sub-superficiais, como estão apresentados nos pontos indicados com o número (3). Embora as trincas apresentem a nucleação na superfície elas não se propagam de forma contínua para o interior do metal base devido às tensões residuais induzidas pelo *Shot-Peening*. Na anodização sulfúrica apresentou trincas se propagando para o interior do material e na anodização dura apresentou ruptura da camada anódica em vários pontos e a trinca propagou-se entre a camada anódica e o substrato, promovendo o descolamento da camada, mas não penetrou diretamente no substrato, devido ao impedimento provocado pelo *Shot-Peening* (CAMARGO, 2007).

Figura 27: Superfície de fratura - anodização crômica - (a) e (b) 50x.



Fonte: (CAMARGO, 2012)

Assim como pesquisas envolvendo o alumínio, Costa (2009) também avaliou o comportamento em fadiga e o desgaste da liga Ti-6Al-4V sob o tratamento superficial de anodização. A liga de titânio foi ensaiada com camada de anodização sulfúrica com e sem *Shot-Peening*. Os parâmetros do *Shot-Peening* estão apresentados na Tabela 16 e os parâmetros do ensaio de fadiga na Tabela 17.

Tabela 16: Parâmetros do *Shot-Peening*

Intensidade Almen	Velocidade	Distância	Rotação	Esferas
0.008 A	250 mm/min	200 mm	30 RPM	Aço

Fonte: (COSTA, 2009)

Tabela 17: Parâmetros do ensaio de fadiga

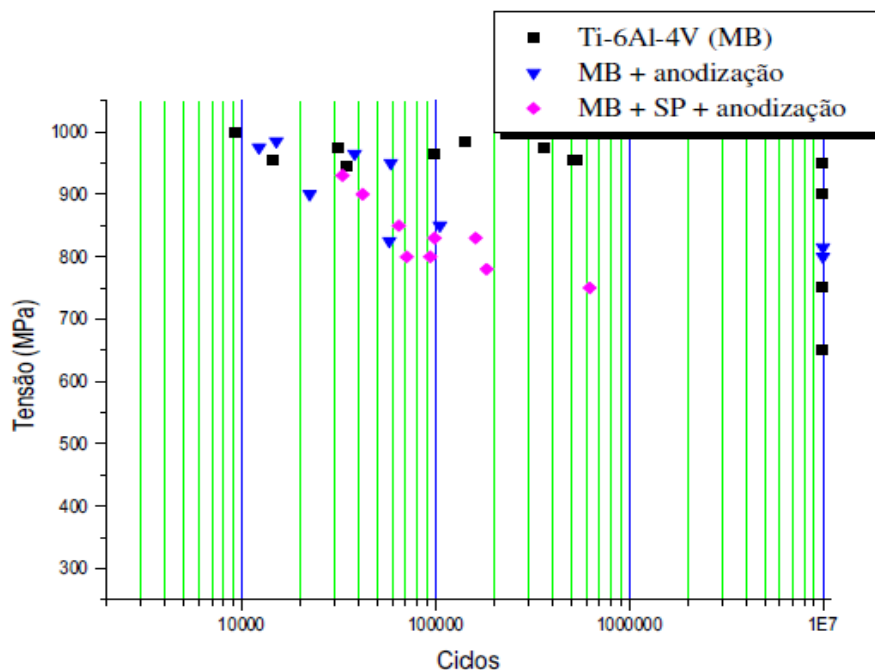
Modo de Carga	Frequência	Razão de Carga R
Axial	20 Hz	0,1

Fonte: (COSTA, 2009)

Na Figura 28 estão apresentados os resultados dos ensaios de fadiga da liga anodizada com e sem *Shot-Peening*, onde é possível observar que a anodização reduziu a resistência à fadiga e o pré-tratamento com *Shot-Peening* promoveu a recuperação da resistência à fadiga. O tratamento de *Shot-Peening* inibiu a nucleação e propagação das trincas por fadiga e desviou as trincas para uma posição abaixo da superfície, região em que o esforço mecânico

aplicado não é o suficiente para ultrapassar o efeito do campo residual compressivo criado pelo processo (COSTA, 2009).

Figura 28: Curvas S-N para a liga Ti-6Al-4V anodizada, com e sem *Shot-Peening*



Fonte: (COSTA, 2009)

2.3.3 Avaliação da tensão residual

O sistema de tensões residuais pode ser formado e alterado por muitos processos de manufatura e condições de serviço que causam mudanças térmicas, metalúrgica, mecânica ou química no metal. Essas mudanças podem ser significativas, pois todo o processo e ou tratamento térmico e outras condições de serviços têm a possibilidade de afetar o sistema de tensões residuais de modo positivo ou em detrimento a resistência do material (CAMARGO, 2007).

As tensões residuais são definidas como as tensões que existem em um corpo elástico quando todas as cargas externas são removidas e são comumente associadas com processos metalúrgicos. Muitos dos efeitos das tensões residuais são prejudiciais, por exemplo, tensões residuais de tração na superfície externa de um componente sujeito a cargas de fadiga conduzem a falhas prematuras. As tensões residuais também podem ter algumas aplicações benéficas, como o *Shot-Peening*, para induzir tensão residual compressiva na superfície dos componentes para aumentar a sua vida em fadiga (TOTTEN; MACKENZIE, 2003).

As pesquisas atuais geralmente não são suficientes, detalhadas e analisadas compreensivamente sobre as características do campo de tensão residual de compressão e a tecnologia do *Shot-Peening*, e existem alguns equívocos na aplicação. Sabe-se que a tensão residual superficial não está apenas relacionada com as propriedades mecânicas do material, mas também com os parâmetros do *Shot-Peening* (ZHAO, C. et al., 2015).

Minto (2012) em sua pesquisa também apresentou as análises de tensões residuais das amostras da liga Al 7175-T74 nas condições de material base, material com *Shot-Peening*, material anodizado e material com *Shot-Peening* e anodizado. O objetivo foi identificar qual profundidade o material passa de tensão compressiva para trativa. As medidas de tensão residual que receberam o sinal negativo (-) são denominadas tensões residuais compressivas. As medidas de tensão residual que recebem o sinal positivo (+) são denominadas tensões residuais do tipo trativa. As medições do valor absoluto das tensões residuais foram realizadas por método de difração de raios X (MINTO, 2012). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Resultado das tensões residuais

Número	Condição da amostra	Profundidade (μm)	Tensão (MPa)
1	Material base sem <i>Shot-Peening</i>	0	- 105
2		100	- 100
3		200	- 60
4		300	+ 149
5		400	+ 180
6		500	+ 210
1	Material base com <i>Shot-Peening</i>	0	- 300
2		100	- 200
3		200	- 210
4		300	- 105
5		400	- 115
6		500	+ 60
1	Material base com anodização sulfúrica	0	+ 90
1	Material base com <i>Shot-Peening</i> e anodização sulfúrica	0	- 71

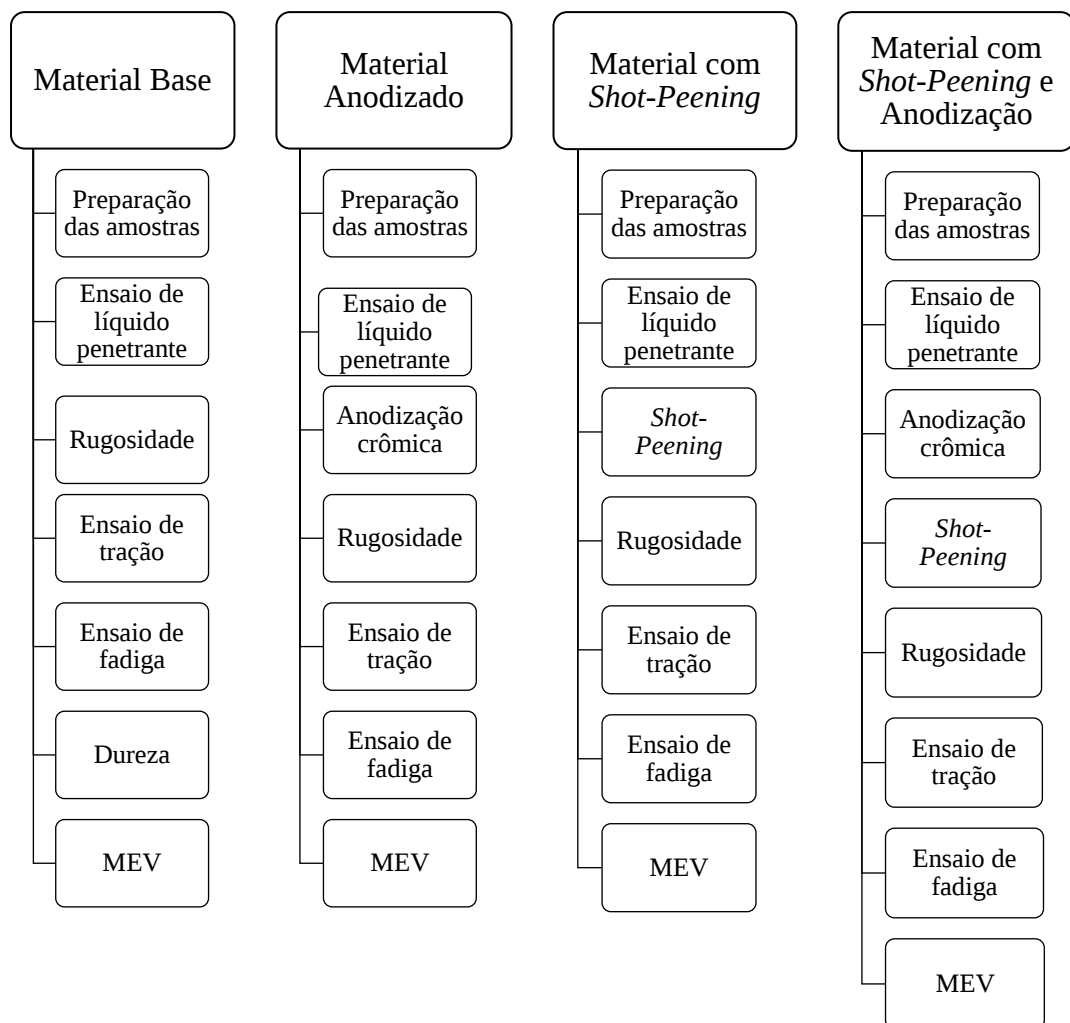
Fonte: Adaptado de MINTO (2012)

Concluiu-se que o *Shot-Peening* aplicado sobre o metal base aumentou as tensões residuais compressivas na superfície. Verificou-se uma grande diferença nos valores da tensão residual entre as regiões superficiais e subsuperficiais do substrato com e sem tratamento de *Shot-Peening* (MINTO, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi dividido em etapas para cada tipo de amostra: sendo as mostras do material base, material com anodização crômica, material com *Shot-Peening* e material com *Shot-Peening* e anodização crômica. Cada etapa está apresentada na Figura 29.

Figura 29: Fluxograma de etapas dos ensaios



Fonte: Produção do próprio autor

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Os corpos de prova da liga de alumínio 7475-T7351 para ensaio de tração e ensaio de fadiga foram usinados no torno convencional e CNC na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP como apresentado na Figura 30.

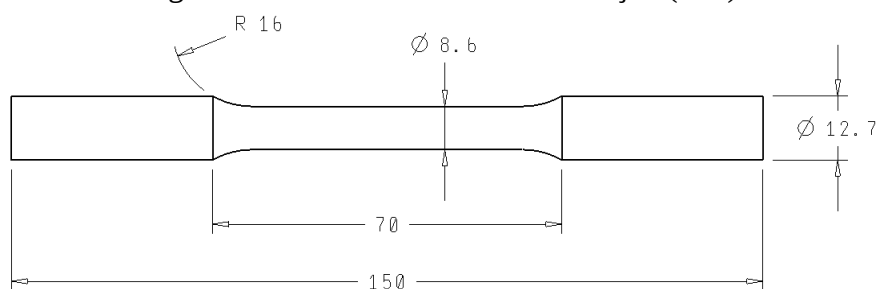
Figura 30: Corpos de prova para ensaios de tração e fadiga



Fonte: Produção do próprio autor

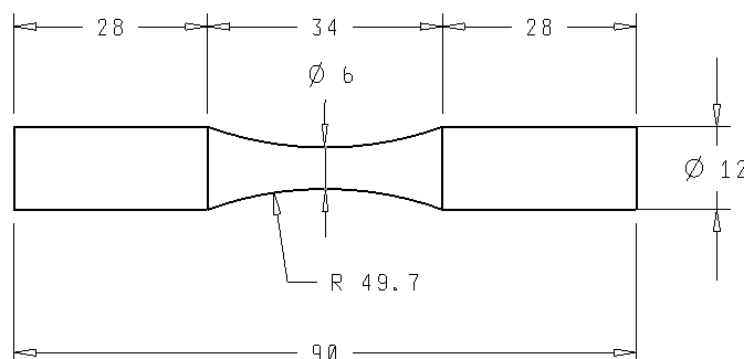
Os corpos de prova foram usinados no sentido longitudinal da laminação de uma placa de alumínio de 50,8 mm de espessura. Para o dimensionamento do corpo de prova de tração foi utilizada a norma ASTM E 8M. Os CDPs foram adaptados para a utilização do extensômetro. Os corpos de prova de fadiga foram usinados conforme a norma ASTM E466. As geometrias das amostras podem ser visualizadas na Figura 31 e Figura 32.

Figura 31: Dimensões do CDP de tração (mm)



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 32: Dimensões do CDP de fadiga (mm)



Fonte: Produção do próprio autor

3.2 ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE

O ensaio não destrutivo por líquido penetrante foi realizado para verificar se existiam descontinuidades na superfície do material base usinado. O ensaio seguiu as recomendações da fabricante METAL-CHEK e a norma ABNT NBR 16450:2016. O ensaio foi dividido em três etapas:

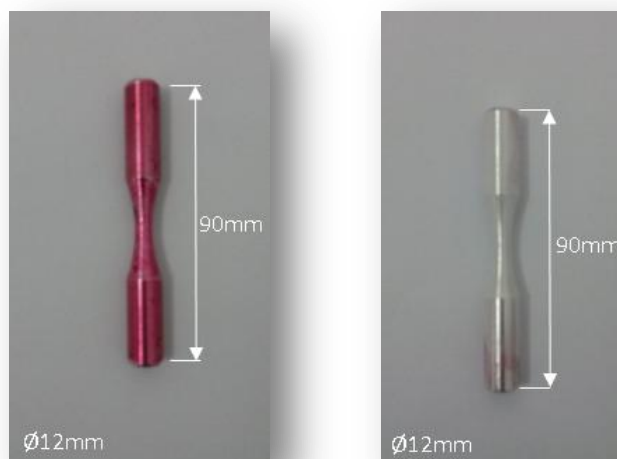
1ª - Aplicação do Removedor: Executada a limpeza prévia das partes a serem ensaiadas. Aplicado o removedor e após aguardar os resíduos ou impurezas se dissolverem, foi realizada uma limpeza com um pano limpo.

2ª - Aplicação do Líquido Penetrante: Aplicado o líquido penetrante sobre a superfície limpa e seca, e aguardado 20 minutos para penetração.

3ª - Aplicação do Revelador: Foi removido o excesso do líquido penetrante da superfície com água e aplicado o revelador.

A Figura 33 apresenta o CDP com o líquido penetrante e o revelador.

Figura 33: Ensaio por líquido penetrante



Fonte: Produção do próprio autor

3.3 ENSAIO DE RUGOSIDADE

O rugosímetro utilizado foi da marca Mahr e modelo MarSurf M 300 + RD18 conforme apresentado na Figura 34 e as medições foram realizadas na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP. Os valores de *Cut-off* foram de 0,8 e comprimento total de 5,6 mm. Cada corpo de prova foi medido com três repetições. Os conceitos de rugosidade superficial foram definidos pela norma ABNT NBR 6405/1985 e NBR ISO 4287/2002.

Figura 34: Rugosímetro da marca Mahr e modelo MarSurf M 300 + RD18



Fonte: Produção do próprio autor

Foram medidas as rugosidades Ra, Rz e Rt. A rugosidade Ra é a média aritmética dos picos e vales em relação à linha média dentro do percurso de avaliação. A rugosidade Rz é a média entre cinco valores da rugosidade parcial, sendo que a rugosidade parcial é a distância entre o pico e o vale dentro do percurso de avaliação. A rugosidade Rt é a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo.

3.4 SHOT-PEENING

O *Shot-Peening* foi aplicado em toda a superfície do corpo de prova com jateamento de esferas de aço seguindo os parâmetros da Tabela 19. O *Shot-Peening* foi realizado conforme norma MIL-S-13165C.

Tabela 19: Parâmetros de *Shot-Peening*

Intensidade Almen	Passo	Vazão	Cobertura	Pressão
0.006 A – 0.010 A	15 mm	4 kg/min	98%	40 Psi

Fonte: Produção do próprio autor

3.5 ANODIZAÇÃO

As amostras passaram por uma limpeza especial para a remoção de óleo, graxa, partículas sólidas de poeira, remoção dos óxidos naturais e outros compostos da superfície, formando uma superfície mais condutora para o processo de anodização. A anodização foi realizada conforme norma MIL-A-8625F. No processo de anodização as amostras foram imersas no tanque de anodização crômica seguindo os parâmetros da Tabela 20.

Tabela 20: Composição da anodização

Eletrólito	CrO ₃
Concentração do eletrólito	50 a 60 g/l
Temperatura	32 a 37 °C
Tempo	45 min.
Densidade de corrente	1,5 A/dm ²
Tensão	22±2 volts

Fonte: Produção do próprio autor

A selagem foi realizada com cromo hexavalente a uma temperatura de 90 a 96°C durante 15 a 25 minutos. O uso do cromo hexavalente vem sendo descontinuado, pois pode causar danos à saúde como o câncer (ASM HANDBOOK, 2003).

3.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado seguindo a norma ASTM E8/ E8M, na máquina tipo SFL-50KNAG da SHIMADZU com capacidade até 50 kN conforme apresentado na Figura 35, na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP

O ensaio foi realizado com extensômetro até atingir a tensão máxima da curva $\sigma_x \epsilon$ e após a retirada do mesmo, os corpos de provas foram ensaiados até a ruptura total. A velocidade do ensaio foi de 2 mm/min.

Figura 35: Equipamento para ensaio de tração



Fonte: Produção do próprio autor

3.7 ENSAIO DE FADIGA

O ensaio de fadiga axial foi realizado no Laboratório de Ensaaios Mecânicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG/UNESP. Utilizou-se uma unidade servo-hidráulica de ensaios mecânicos modelo INSTRON 8801, com capacidade de 100 kN conforme apresentado na Figura 36.

Os corpos de prova e o ensaio de fadiga axial seguem a norma ASTM E466. A frequência para o ensaio de fadiga foi de 20 Hz, razão de carregamento $R=0,1$ (tração-tração), temperatura ambiente, tensão cíclica senoidal e amplitude constante. Os ensaios de fadiga foram conduzidos até a fratura ou até 10^6 ciclos.

Figura 36: Servo-hidráulica para ensaio de fadiga

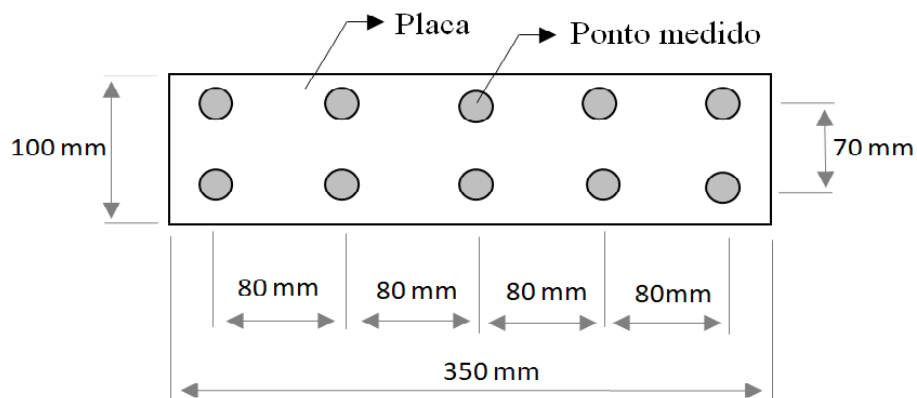


Fonte: Produção do próprio autor

3.8 ENSAIO DE DUREZA

Foram realizadas 10 medidas de dureza Rockwell B no material base, distribuídos de maneira uniforme ao longo da placa como esta apresentada na Figura 37. O ensaio de dureza foi realizado segundo a norma ASTM E18.

Figura 37: Ponto de medição de dureza



Fonte: Produção do próprio autor

O ensaio de dureza foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG/UNESP com o equipamento OTTO WOLPERT WERKE apresentado na Figura 38.

Figura 38: Durômetro



Fonte: Produção do próprio autor

3.9 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

A análise fractográfica foi realizada através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), que é um equipamento que produz imagens de alta resolução e ampliação. O

princípio de funcionamento consiste na emissão de feixes de elétrons sobre a superfície a ser analisada.

Foram analisadas as fraturas para cada tipo de amostra (material base, com *Shot-Peening*, anodizado e *Shot-Peening* e anodizado), com o objetivo de comparar e analisar a superfície de fratura.

Para preservar a região de fratura, após o seccionamento as amostras passaram por um processo de limpeza a base de detergente e água, assistida por agitação em ultrassom, que é eficaz na remoção de detritos.

Para a preparação do MEV, as amostras foram limpas com metanol, secas por nitrogênio e então colocadas na câmara do microscópio. O ensaio foi realizado no Laboratório de Microscopia e Microanálise do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, FEG/UNESP. O equipamento de microscopia eletrônica de varredura utilizado foi da marca Zeiss e modelo EVO LS-15 como apresentado na Figura 39.

Figura 39: Equipamento para microscopia eletrônica de varredura



Fonte: Produção do próprio autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE

Foi realizado o ensaio por líquido penetrante e os corpos de prova não apresentaram trincas superficiais.

4.2 ENSAIO DE RUGOSIDADE

As médias das rugosidades e os desvios padrão estão apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Resultado da rugosidade			
Tipo	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)
Material Base	$1,10 \pm 0,16$	$5,27 \pm 0,64$	$6,7 \pm 1,7$
Anodizado	$1,04 \pm 0,16$	$5,24 \pm 1,2$	$6,8 \pm 2,7$
<i>Shot-Peening</i>	$3,80 \pm 0,56$	$19,14 \pm 2,7$	26 ± 3
<i>Shot-Peening</i> +Anodizado	$6,21 \pm 0,58$	$34,86 \pm 2,6$	44 ± 4

Fonte: Produção do próprio autor

Os processos de torneamento e fresamento normalmente produzem superfícies dentro do intervalo de 3,17- 12,7 μm Ra. Quando os processos são controlados a rugosidade pode chegar a 1,01 μm Ra ou menos (SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS, 1998), o que demonstra que as amostras foram usinadas dentro desta categoria. Houve pouca alteração na rugosidade das amostras anodizadas.

Após o processo de *Shot-Peening* a rugosidade superficial aumentou de 1,10 μm para 3,80 μm devido ao jateamento de esferas em direção à superfície das amostras. Atualmente já está bem estabelecido que a rugosidade superficial possa causar uma redução na vida em fadiga de materiais metálicos, uma vez que sulcos deixados na superfície do material podem agir como agentes nucleadores de trincas. Da mesma forma também está bem consolidado o efeito benéfico do processo de *Shot-Peening* no sentido de aumentar a vida em fadiga de

materiais em função da indução de tensões residuais compressivas na superfície de componentes. Na pesquisa de Scuracchio (2012) citada na revisão bibliográfica, houve o aumento da resistência à fadiga após o processo de *Shot-Peening* das amostras de aço mesmo com a rugosidade R_a variando entre 5,24-8,73 μm . No estudo de Zupanc; Grum (2011) envolvendo o alumínio 7075-T651, os resultados apresentaram aumento na resistência à fadiga após o processo de *Shot-Peening* e a rugosidade R_a foi de 0,32 μm para 4,57 μm (Almen 8 A) e 5,81 μm (Almen 12 A). Para essas pesquisas, mesmo com o aumento da rugosidade, o *Shot-Peening* melhorou a resistência à fadiga das amostras, pois a tensão residual de compressão foi mais eficiente na oclusão das trincas do que a rugosidade intensificando a nucleação e propagação das trincas. Portanto, nesta pesquisa a rugosidade após o *Shot-Peening* foi menor comparando com as rugosidades das referências citadas, porém ela pode ser prejudicial caso o *Shot-Peening* não tenha sido eficiente na inclusão da tensão residual de compressão.

A média da rugosidade R_a das amostras com *Shot-Peening* e anodização aumentou 564,54% em relação ao material base usinado. Comparando com a pesquisa de Dhafir Sadik Al-Fattal et. al. (2016) a razão foi aproximada, tendo o incremento de rugosidade de 548,48% após os processos de *Shot-Peening* e anodização. Esse aumento foi associado à camada de anodização, onde é formada uma nova fase Al_2O_3 , e aos sulcos gerados pelo jateamento de esferas (DHAFIR SADIK AL-FATTAL et. al., 2016).

Existem muitos fatores que interferem nas reações/interações que ocorrem na superfície do revestimento quando em contato com uma solução como a formação do óxido superficial, o qual pode dificultar a corrosão do metal ou mesmo bloquear a porosidade existente, bem como a rugosidade superficial do revestimento afeta diretamente os resultados (RODRIGUEZ, 2003).

A estrutura da camada anódica é constituída por células hexagonais, cada uma delas com um poro central. Essencialmente, o tamanho das células é determinado pela voltagem, enquanto a espessura é determinada pela densidade da corrente (MENEGBESSO, 2006). A densidade elétrica é quantidade de corrente elétrica que passa em determinada área. Com o aumento da área, devido à rugosidade gerada pelo jateamento, a velocidade de reação é mais rápida e conseqüentemente forma-se mais óxido. Portanto conclui-se que a rugosidade

superficial gerada pelo jateamento influencia na formação da camada de óxido, podendo aumentar a rugosidade da peça.

4.3 ENSAIO DE DUREZA

Os resultados de dureza dos 10 pontos medidos no metal base, a média da dureza e o desvio padrão estão apresentados na Tabela 22.

Convertendo a dureza Rockwell (HRB) em dureza Vickers (HV), a média da dureza é de aproximadamente 140 HV. Na pesquisa de Diniz, S. B.; Paula, A. S.; Brandão, L. P. M (2016) a medida de dureza da liga de alumínio 7475-T7351 é de 158,80 HV, o que se conclui que a liga 7475-T7351 desta pesquisa está adequada para o estudo considerando a propriedade de dureza.

Tabela 22: Resultado do ensaio de dureza

Amostra	Dureza	Média
1	74	76 ± 6 HRB
2	80	
3	70	
4	61	
5	80	
6	80	
7	80	
8	79	
9	81	
10	80	

Fonte: Produção do próprio autor

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

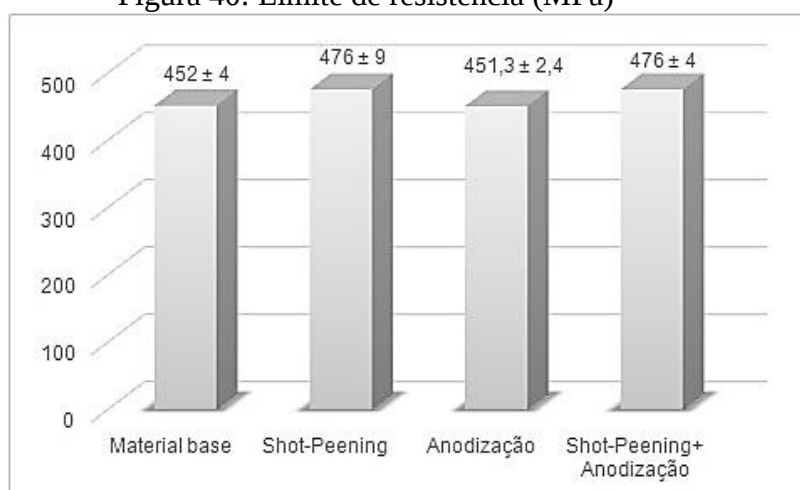
No resultado do ensaio de tração foram obtidos os valores de limite de resistência, tensão de escoamento, módulo de elasticidade e alongamento, como apresentado na Tabela 23 e os gráficos estão apresentados na Figura 40, Figura 41, Figura 42 e Figura 43.

Tabela 23: Resultado do ensaio de tração

Valores Médios	Material base	<i>Shot-Peening</i>	Anodizado	<i>Shot-Peening</i> + Anodizado
Limite de resistência (MPa)	452 ± 4	476 ± 9	$451,3 \pm 2,4$	476 ± 4
Limite de escoamento (MPa)	$379,7 \pm 2,8$	401 ± 9	380 ± 4	$403,8 \pm 1,6$
Módulo de elasticidade (GPa)	$67,2 \pm 1,2$	77 ± 4	$67,0 \pm 1,6$	$71,8 \pm 1,2$
Alongamento %	9	12	11	11

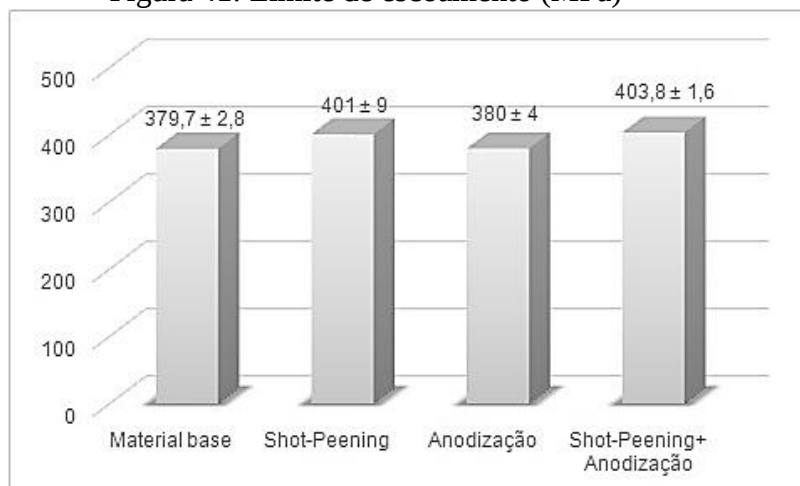
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 40: Limite de resistência (MPa)



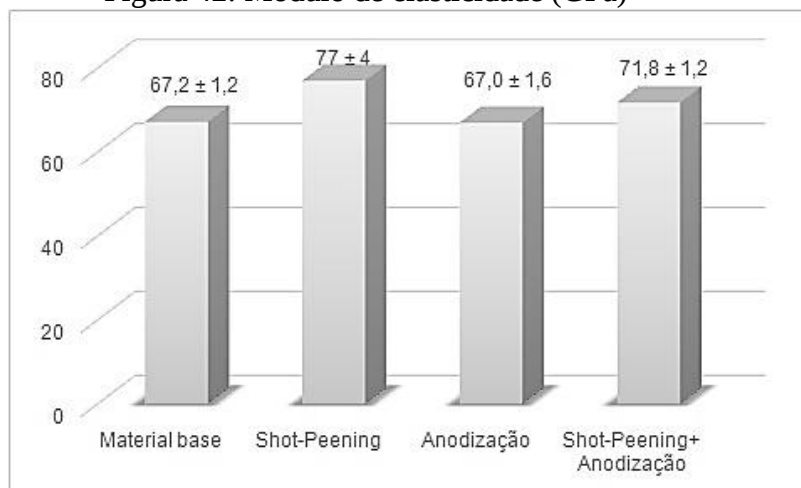
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 41: Limite de escoamento (MPa)



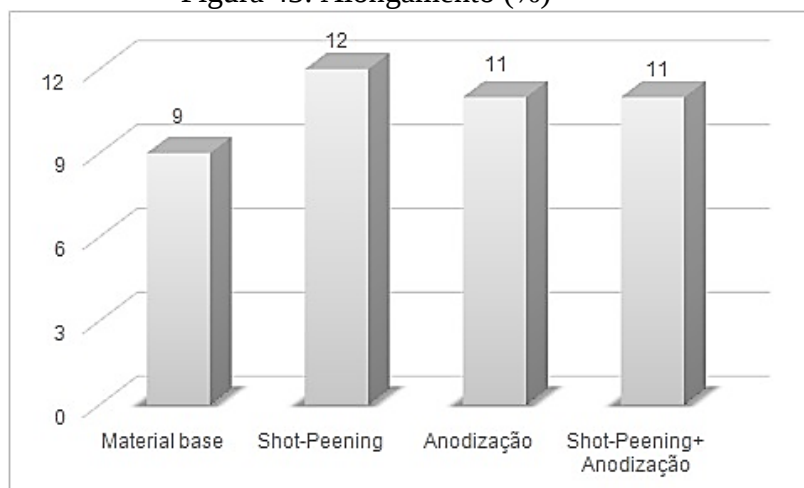
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 42: Módulo de elasticidade (GPa)



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 43: Alongamento (%)



Fonte: Produção do próprio autor

Observa-se que o tratamento superficial de anodização crômica pouco afetou na resistência à tração, limite de escoamento e módulo de elasticidade do material. Porém o *Shot-Peening* provocou um aumento que pode estar associado ao encruamento do material.

Conforme a ALCOA (2016) o limite de resistência à tração do alumínio 7475-T7351 é de 476 MPa, limite de escoamento é 393 MPa e alongamento 8%. Na pesquisa de Gao; Wu (2011), o resultado do alongamento da liga de alumínio 7475-T7351 foi apresentado em 13,3%. O que se conclui que resultados estão dentro dos valores das referências analisadas.

4.5 ENSAIO DE FADIGA

Os resultados dos ensaios de fadiga axial para o material base (MB), material com *Shot-Peening* (SP), material com anodização crômica (AC) e material com *Shot-Peening* e anodização crômica (SP+AC) são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Resultado do ensaio de fadiga

Tensão (MPa)	Número de ciclos			
	MB	SP	AC	SP+AC
200				1 000 000
220			1 000 000	280 639*
220				430 953
230			74 095	
230			102 510	
240		231 711	117 369	147 754
240				218 890
250			80 900	
260		161 987	73 942	176 635
260			256 601*	130 386
280		95 021	98 674	110 644*
280				85 933
300	1 673 815	101 157	87 150	56 300*
320			67 964*	
330		117 977		
330		88 043		
340	48 747	140 859	23 873*	
340		75 272		
350	879 639	78 387*		
350		73 009		
360	57 305	49 609		
360		38 798		
370	138 845	35 225		
370	124 086			
370	28 652			

(conclusão)

Tensão (MPa)	Número de ciclos			
	MB	SP	AC	SP+AC
380	154 603*	34 395		
380	151 747	36 213		
400	89 740	21 810*		
400	36 050*			
420	40 483	20 160*		
420	31 825*			

Fonte: Produção do próprio autor

Observações:

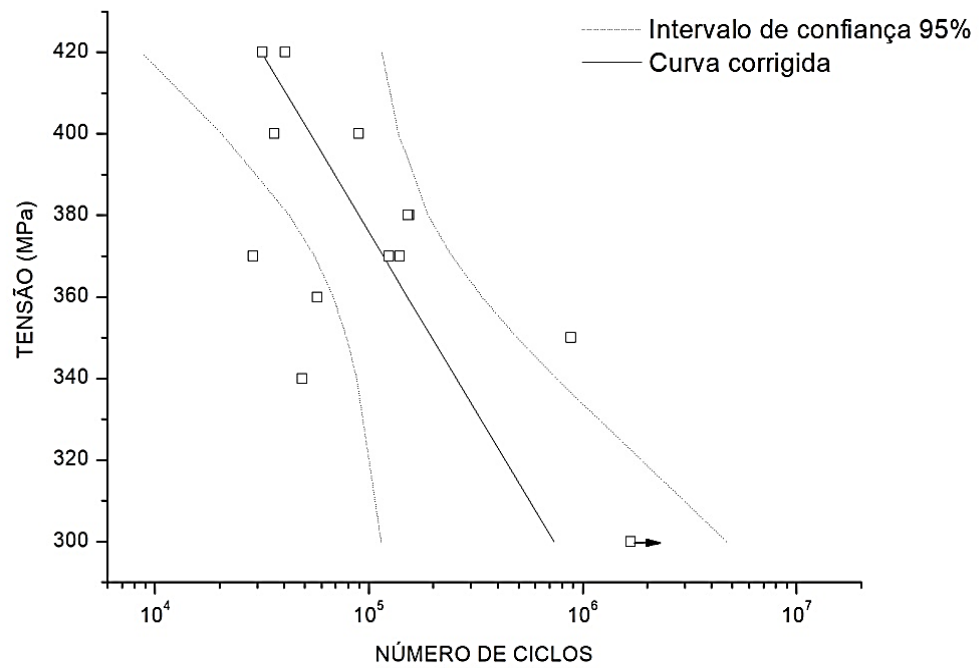
1. Valores em *itálico* da Tabela 24 e o símbolo (→) nos gráficos de fadiga: ensaio interrompido antes da ruptura da amostra. Quando a vida em fadiga alcançou 10^6 ciclos ou mais.
2. Valores com asterisco (*) na Tabela 24: Amostras que foram avaliadas no ensaio de microscopia eletrônica de varredura para auxiliar na identificação das origens das falhas na superfície da fratura.

Os resultados dos ensaios de fadiga foram representados por meio da curva S-N. Para avaliar os dados estatisticamente foram traçadas as curvas corrigidas e o intervalo de confiança de 95% conforme a norma ASTM E739-10.

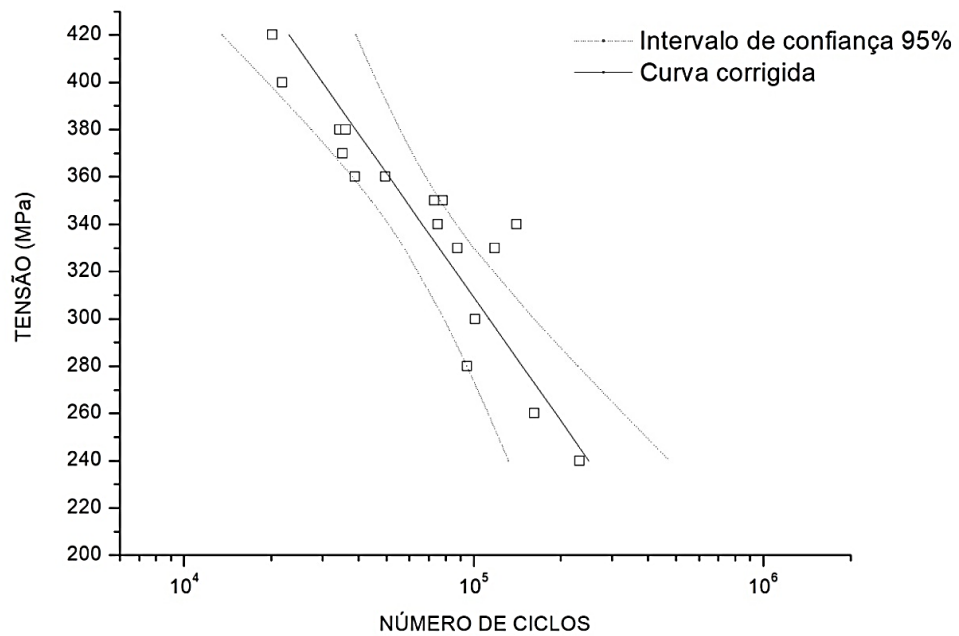
As curvas não apresentam limite de resistência à fadiga com patamar definido como nos casos de materiais ferrosos, sendo isso uma característica da curva S-N do alumínio.

A Figura 44 apresenta a curva S-N com intervalo de confiança do material base. A Figura 45 apresenta a curva S-N com o intervalo de confiança das amostras com *Shot-Peening*. A Figura 46 apresenta a curva S-N com o intervalo de confiança das amostras com anodização crômica. A Figura 47 apresenta a curva S-N com o intervalo de confiança do material com *Shot-Peening* e anodização crômica.

Figura 44: Curva S-N - material base

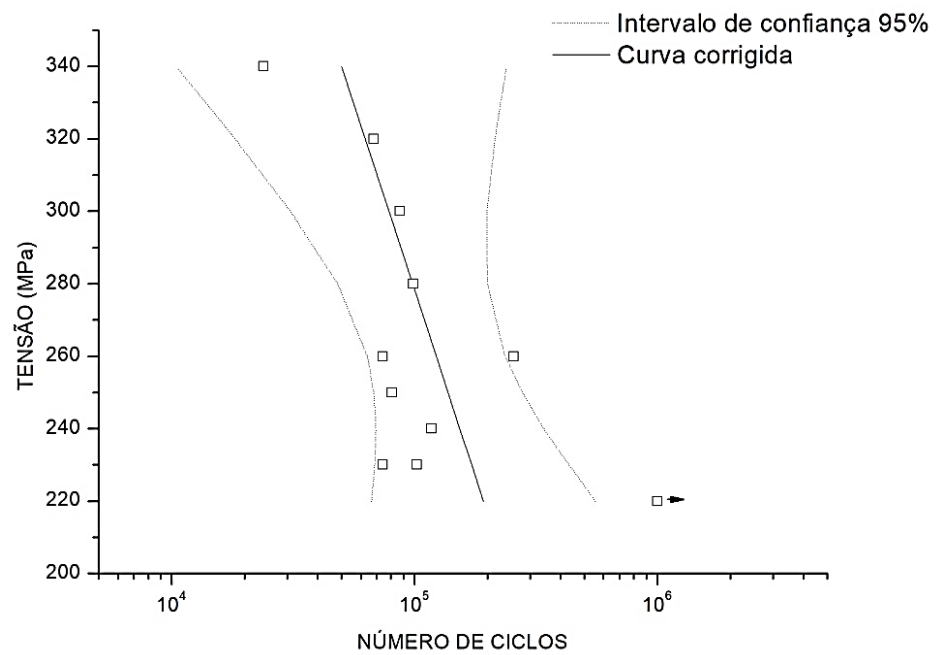


Fonte: Produção do próprio autor

Figura 45: Curva S-N - material com *Shot-Peening*

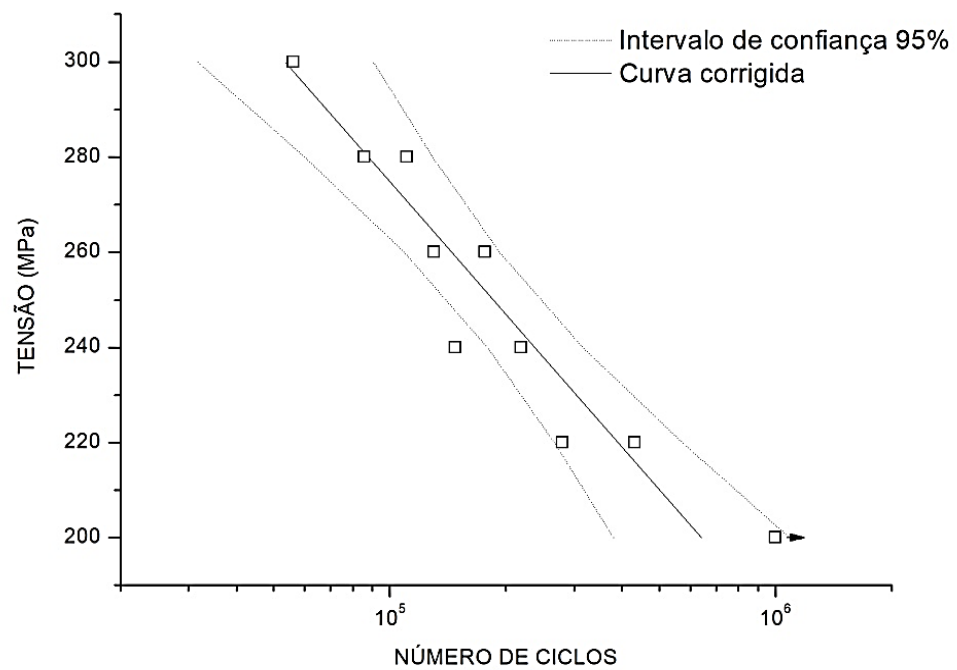
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 46: Curva S-N - material com anodização crômica



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 47: Curva S-N - material com *Shot-Peening* e anodização crômica



Fonte: Produção do próprio autor

As previsões da resistência à fadiga para a vida infinita adotada neste trabalho de 10^6 podem ser retiradas diretamente dos gráficos ou através das equações das curvas conforme apresentado na Tabela 25. Pode-se verificar que para todas as amostras pesquisadas os valores do limite de resistência à fadiga estiveram bem abaixo da tensão de escoamento do material

Tabela 25: Previsão da resistência à fadiga para 10^6 ciclos

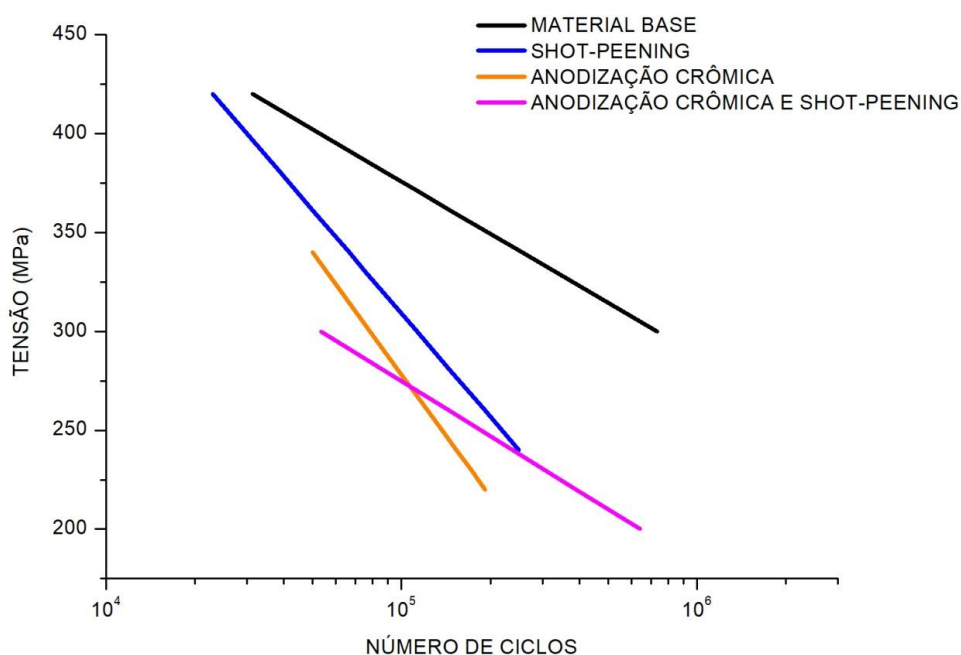
Amostras	Equação da curva S-N	PREVISÃO da resistência à fadiga	% da Tensão de Escoamento
Material Base	$\text{Log}(N) = 9,284 - 0,011(S)$	288 MPa	76%
<i>Shot-Peening</i>	$\text{Log}(N) = 6,779 - 0,006(S)$	135 MPa	34%
Anodização crômica	$\text{Log}(N) = 6,359 - 0,005(S)$	73 MPa	19%
<i>Shot-Peening</i> e anodização	$\text{Log}(N) = 7,965 - 0,011(S)$	182 MPa	45%

Fonte: Produção do próprio autor

N-número de ciclos
S-tensão

A Figura 48 apresenta o comparativo entre as curvas S-N corrigidas das amostras do material base, amostras com *Shot-Peening*, amostras com anodização crômica e amostras com anodização crômica e *Shot-Peening*.

Figura 48: Comparativo dos ensaios de fadiga



Fonte: Produção do próprio autor

A previsão da resistência à fadiga do material base apresentou resultado equivalente ao resultado de Verma, Atkinson, Kumar (2001). A resistência à fadiga do material base foi reduzida após todos os outros processos. Nas amostras com o *Shot-Peening* a redução foi de 53%. Nas amostras com anodização crômica a redução foi de 75% e as amostras com *Shot-Peening* seguidas de anodização crômica obtiveram a redução da resistência à fadiga de 36%.

Era esperado o aumento da resistência à fadiga após o processo de *Shot-Peening*, porém conforme citado por Champaigne, J. (1991) para melhorar o limite de fadiga, a tensão residual de compressão, bem como o aumento da densidade de discordâncias devem ser introduzidos na subsuperfície do material. No entanto o aumento da rugosidade que é inerente do processo de *Shot-Peening* é um fator negativo. Em maior ampliação, micro trincas e irregularidades na superfície podem ser encontradas e atingir o interior do material. Se a tensão residual de compressão (benéfica) ou densidade de discordâncias forem significadamente reduzidas, o limite de fadiga pode ser inferior ao de um componente sem o tratamento. Portanto conclui-se que os parâmetros do *Shot-Peening* não foram suficiente para aumentar a resistência à fadiga das amostras com o material e dimensões utilizadas nessa pesquisa, o que confirma o resultado apresentado por Minto (2012).

Assim como foi apresentado por Chaussumier, M. et al. (2013), era previsto que nesta pesquisa o material base após o tratamento superficial de anodização crômica também obtivesse a redução da vida em fadiga devido à tensão residual de tração na camada de óxido.

Nas amostras com *Shot-Peening* e anodização crômica, a vida em fadiga foi reduzida em relação ao material base, porém para as baixas tensões, houve um aumento da resistência à fadiga, quando comparado com a curva S-N das amostras somente com anodização crômica. Na pesquisa realizada por Minto (2012), foi apresentada que o *Shot-Peening* neutraliza o efeito negativo da anodização, recuperando a resistência à fadiga do material. No entanto, nesta pesquisa esse efeito somente foi confirmado para baixas tensões e a sua recuperação não foi o suficiente para atingir a resistência inicial do material base.

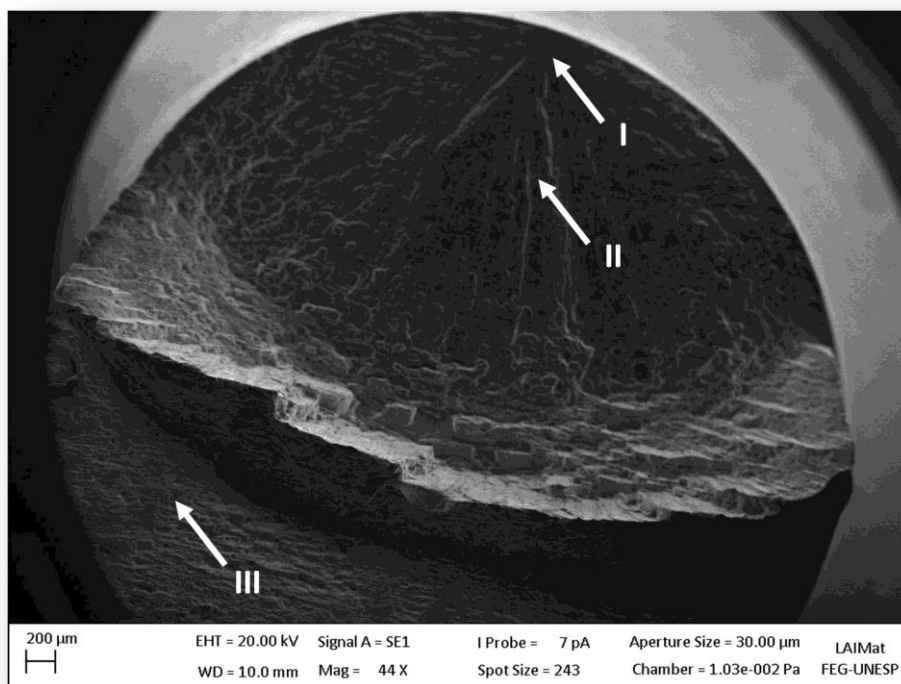
Esses resultados demonstram a importância de testar os materiais com diferentes parâmetros de *Shot-Peening* e avaliar seus efeitos a fim de obter uma base teórica para um resultado efetivo do *Shot-Peening*, como foi citado por Zhao, C. et al., 2015.

4.6 ANÁLISE FRACTOGRÁFICA

4.6.1 Amostras do Material Base

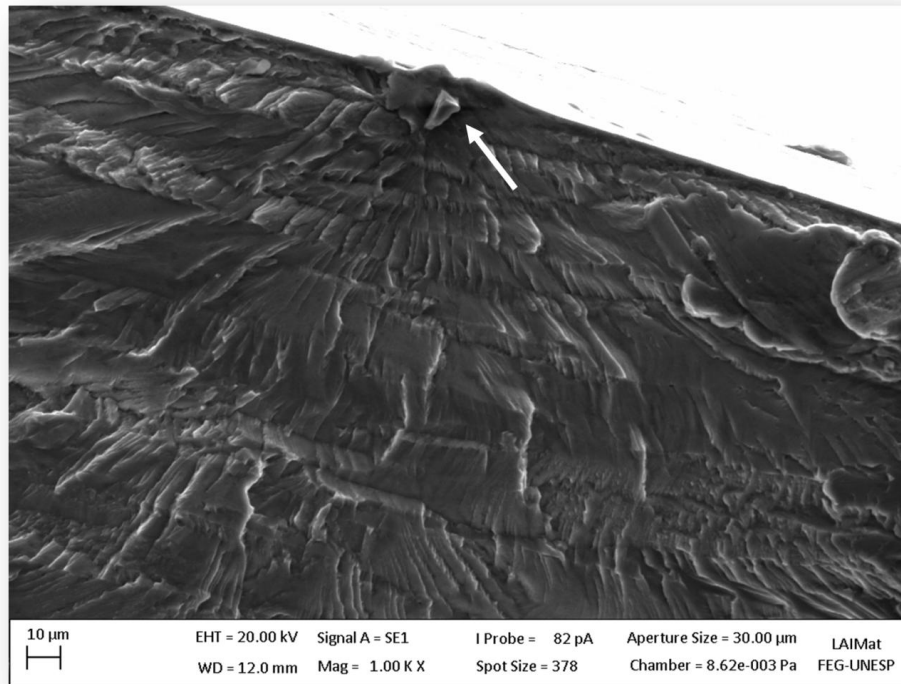
A análise fractográfica de cada amostra está dividida pelos três estágios da trinca por fadiga. Nucleação no estágio I, propagação durante a maior parte do seu comprimento no estágio II e procede a fratura catastrófica durante o estágio III. A Figura 49 apresenta a superfície de fratura de um corpo de prova de fadiga axial do material base da liga de alumínio 7475-T7351 (380 MPa, 154 603 ciclos). A Figura 50 apresenta o estágio I da fratura com precipitado na nucleação da trinca. Na Figura 51 apresenta o estágio II da fratura, a região de propagação da trinca. Na Figura 52 apresenta o estágio III da fratura com uma região rugosa de fratura dúctil. A fratura tem característica de alto-ciclo e baixa-tensão. Nas ligas endurecidas por precipitação, como as de alumínio, podem-se esperar na nucleação da trinca precipitados dispersos que possam variar de esférico a plaquetas dependendo da liga e a presença do oxido usualmente é causado por interação do material com o meio ambiente enquanto a trinca está se desenvolvendo ASM (1996).

Figura 49: MB - visão geral - 380 MPa, 154 603 ciclos



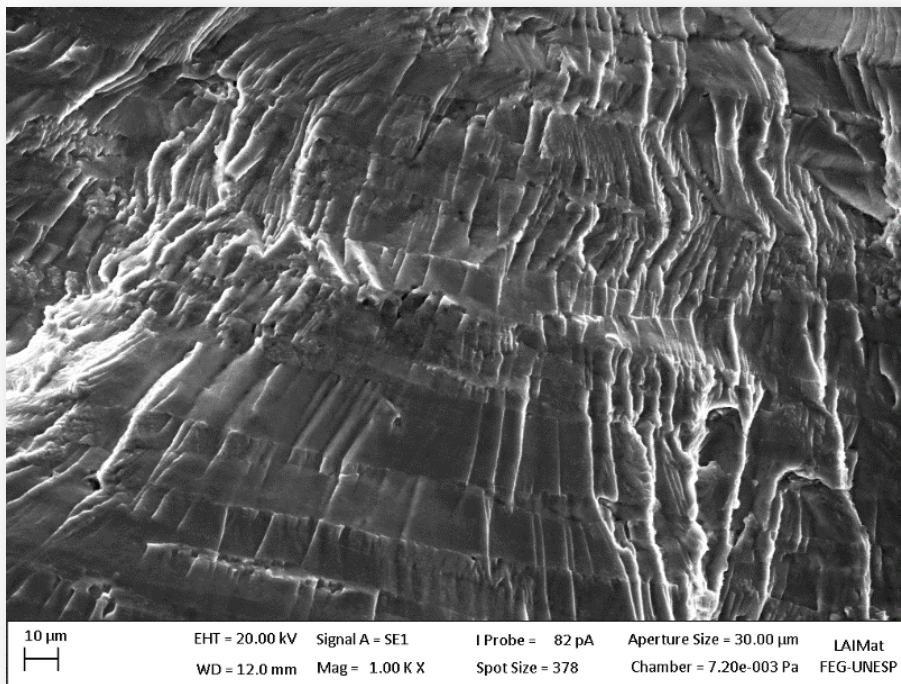
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 50: MB – nucleação



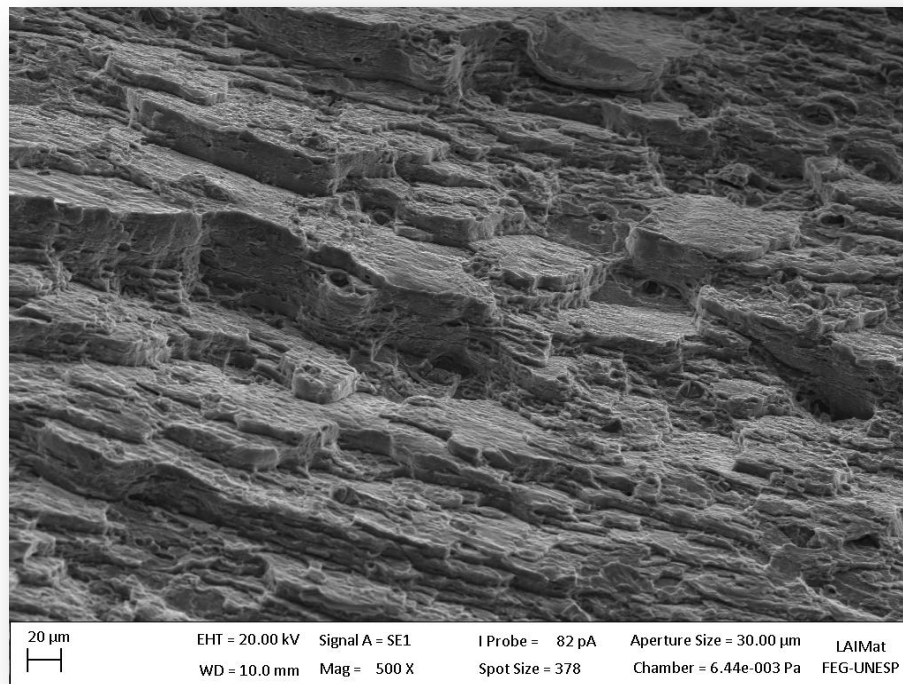
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 51: MB – propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 52: MB - ruptura

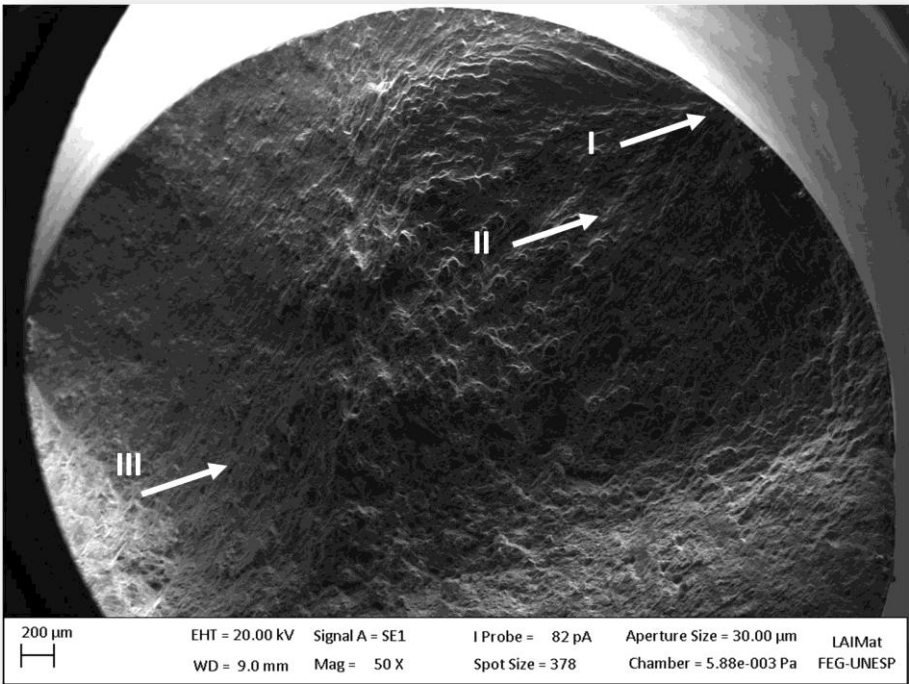


Fonte: Produção do próprio autor

Conforme a ASM (1987), a nucleação e o crescimento durante o estágio I ocorrem principalmente por fratura do plano de deslizamento. O estágio I é fortemente influenciado pela microestrutura e pela tensão média. A fratura costuma seguir os planos cristalográficos, mas muda a direção nas descontinuidades, como os contornos de grãos. A região do estágio I é normalmente observada em fraturas de alto-ciclo e baixa-tensão e frequentemente está ausente na fadiga de baixo-ciclo e alta-tensão. A propagação das trincas no estágio II, o que geralmente ocorre por fratura transgranular, é mais influenciado pela magnitude da tensão alternada do que pela tensão média ou da microestrutura. O estágio III é a fase de ruptura final, ela é sensível à tensão média e a microestrutura.

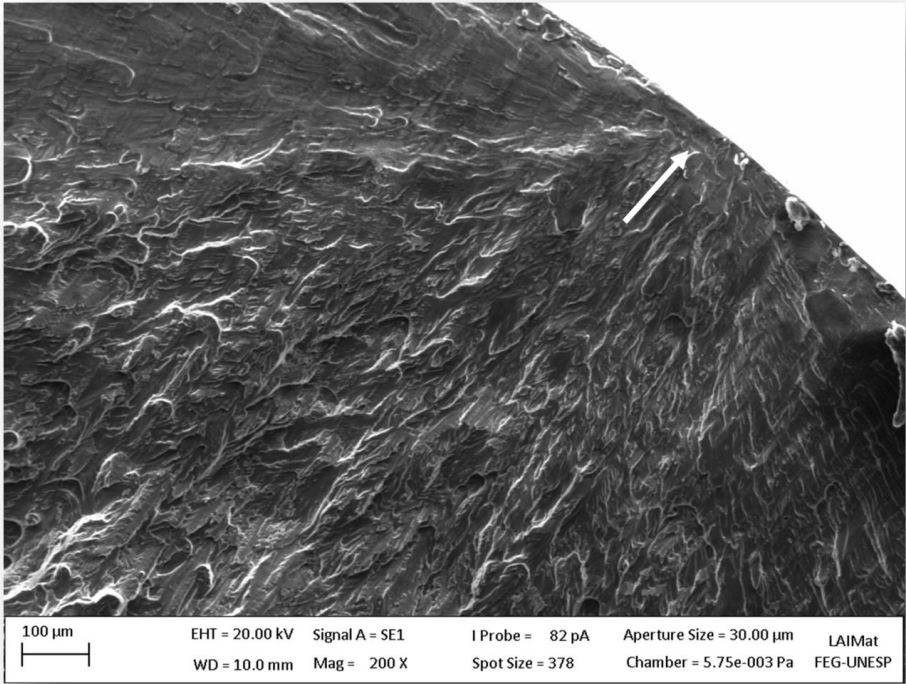
A Figura 53 apresenta a superfície de fratura de um corpo de prova de fadiga axial do material base da liga de alumínio 7475-T7351 (400 MPa, 36 050 ciclos). A fratura tem característica de baixo-ciclo e alta-tensão. A Figura 54 apresenta o estágio I da fratura com característica de nucleação devido à sobrecarga. A Figura 55 apresenta o estágio II da fratura com estrias visíveis de propagação da trinca. A Figura 56 apresenta o estágio III, a ruptura final.

Figura 53: MB – visão geral – 400 MPa, 36 050 ciclos



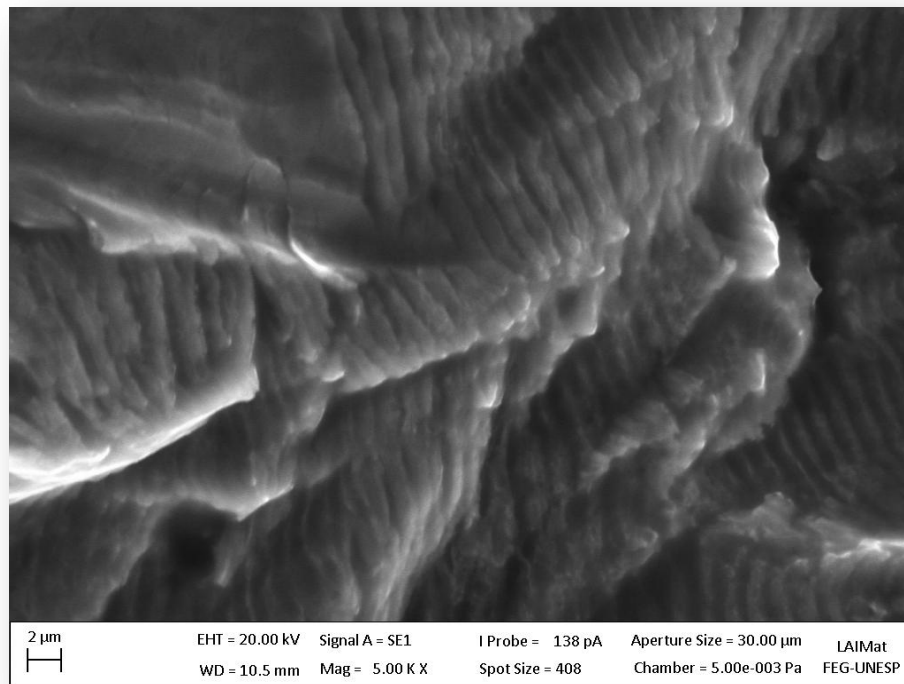
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 54: MB - nucleação



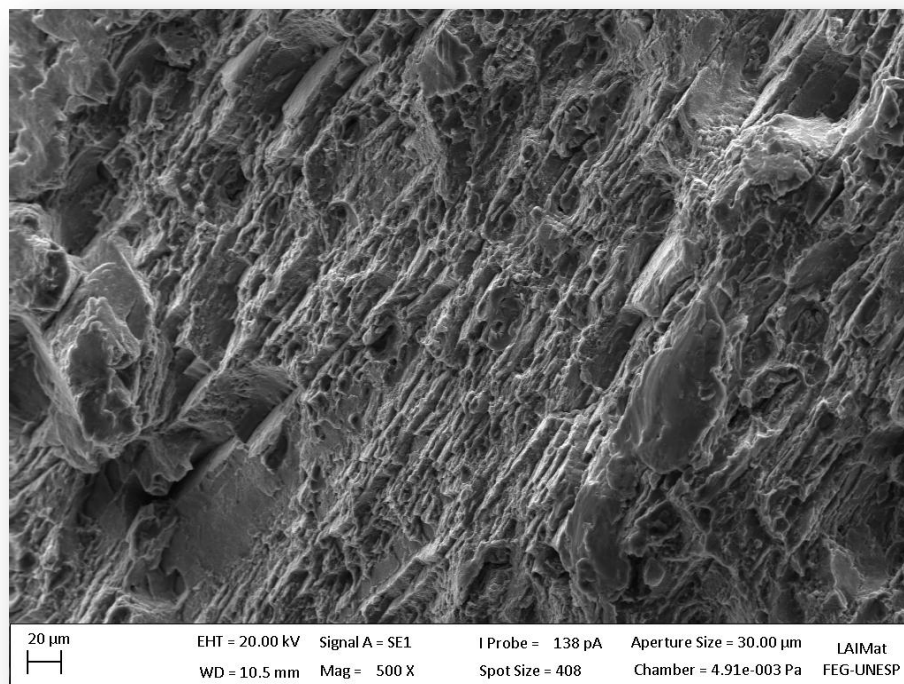
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 55: MB - propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 56: MB - ruptura

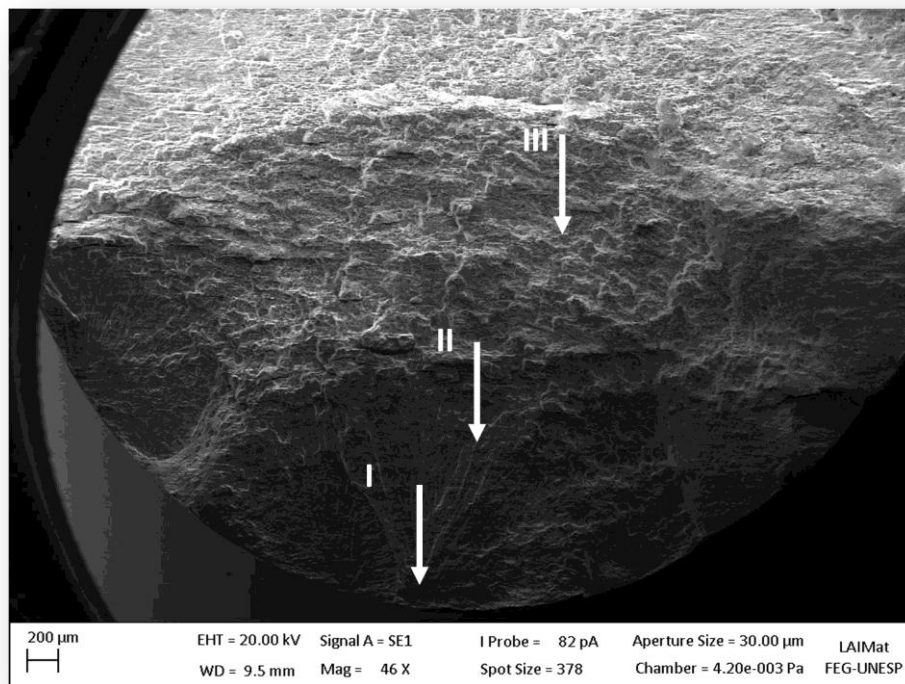


Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 57 apresenta a superfície de fratura de um corpo de prova de fadiga axial do material base da liga de alumínio 7475-T7351 (420 MPa, 31 825 ciclos). A Figura 58 apresenta o estágio I da fratura com precipitado na nucleação da trinca. A Figura 59 apresenta o estágio II da fratura com estrias de propagação da trinca. Na Figura 60 apresenta o estágio III da fratura, a ruptura final. A fratura tem característica de baixo-ciclo e alta-tensão.

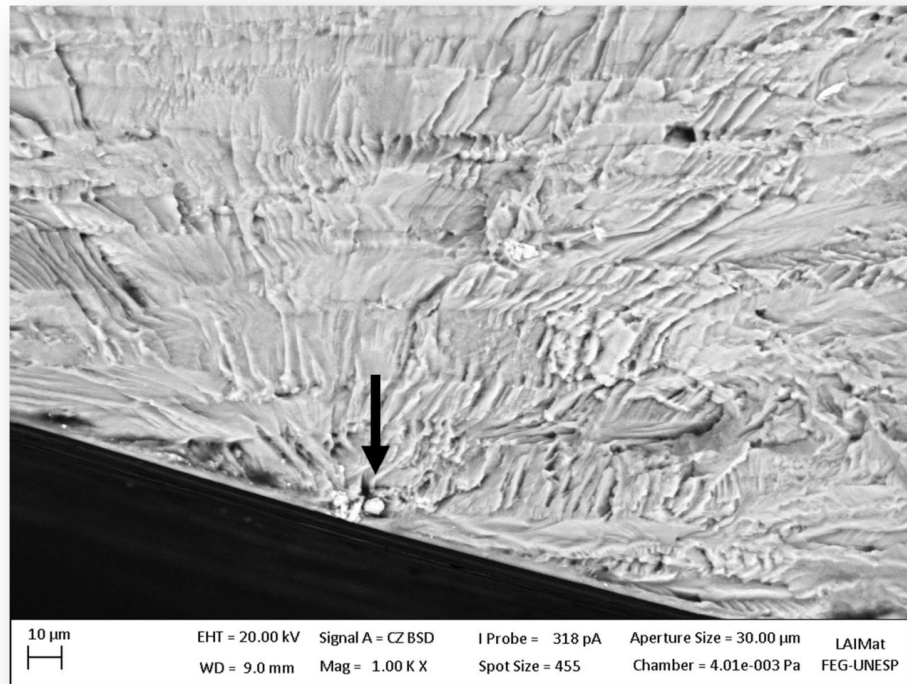
As estrias de fadiga formadas no estágio II são encontradas frequentemente nas superfícies de fratura das ligas de alumínio que ciclaram em ar úmido, enquanto que para outras ligas, as estrias nem sempre são encontradas (ASM, 1996).

Figura 57: MB – visão geral – 420 MPa, 31 825 ciclos



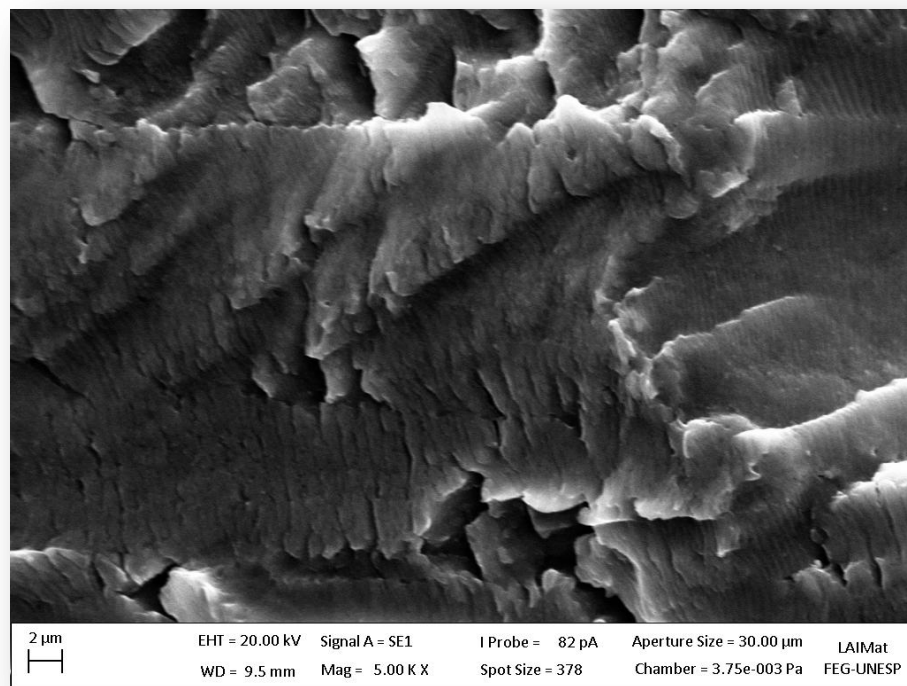
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 58: MB - nucleação



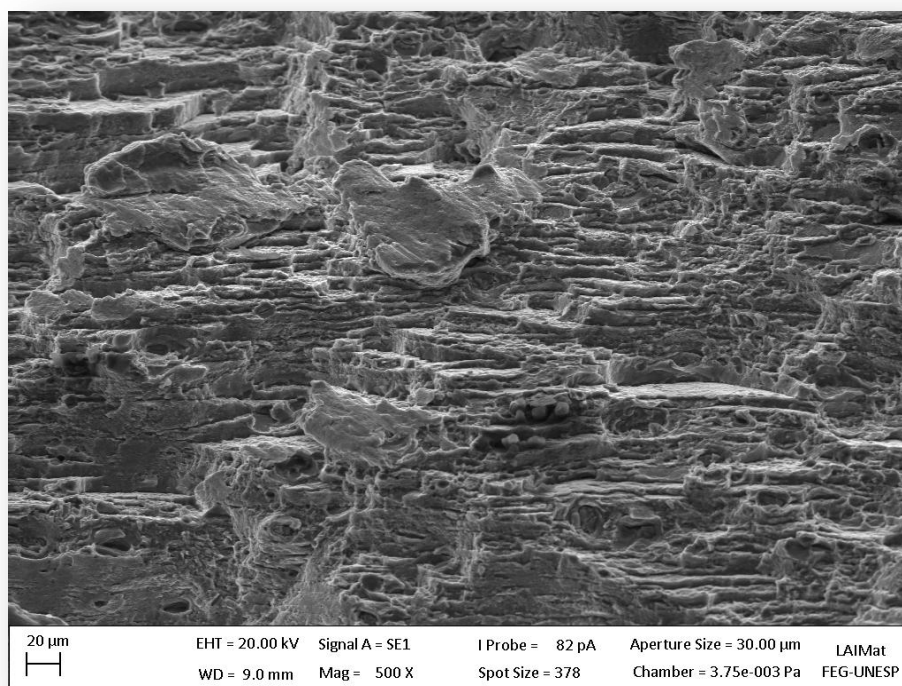
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 59: MB - propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 60: MB - ruptura



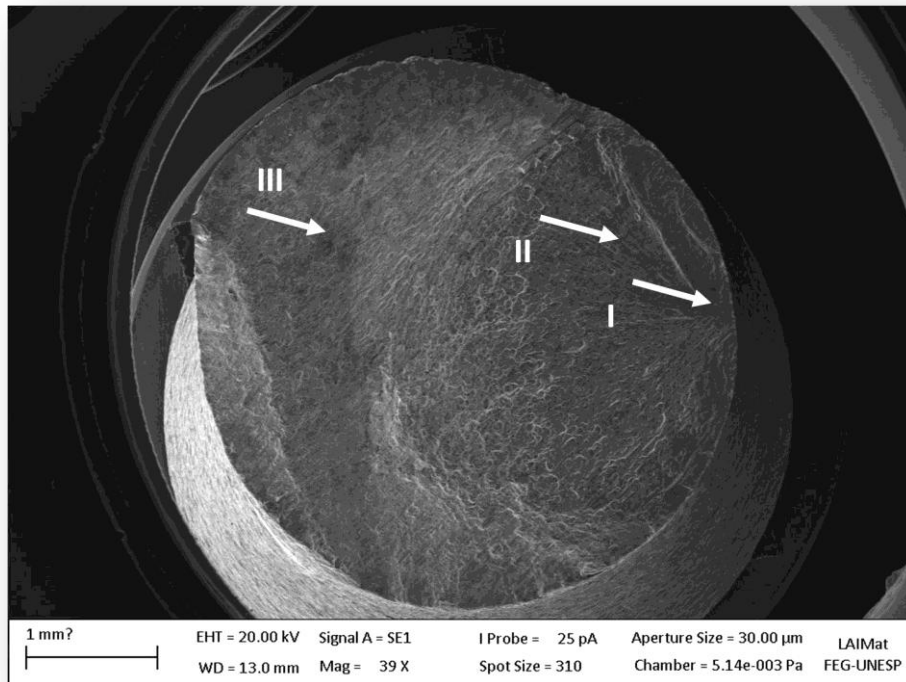
Fonte: Produção do próprio autor

Na análise fractográfica do material base, pode-se observar condições normais de ruptura por fadiga. As fraturas ocorreram sob alta tensão e na presença de concentrador de tensão no corpo de prova. Na propagação da trinca apresentou estrias visíveis, que é característica de materiais como o alumínio.

4.6.2 Amostras com *Shot-Peening*

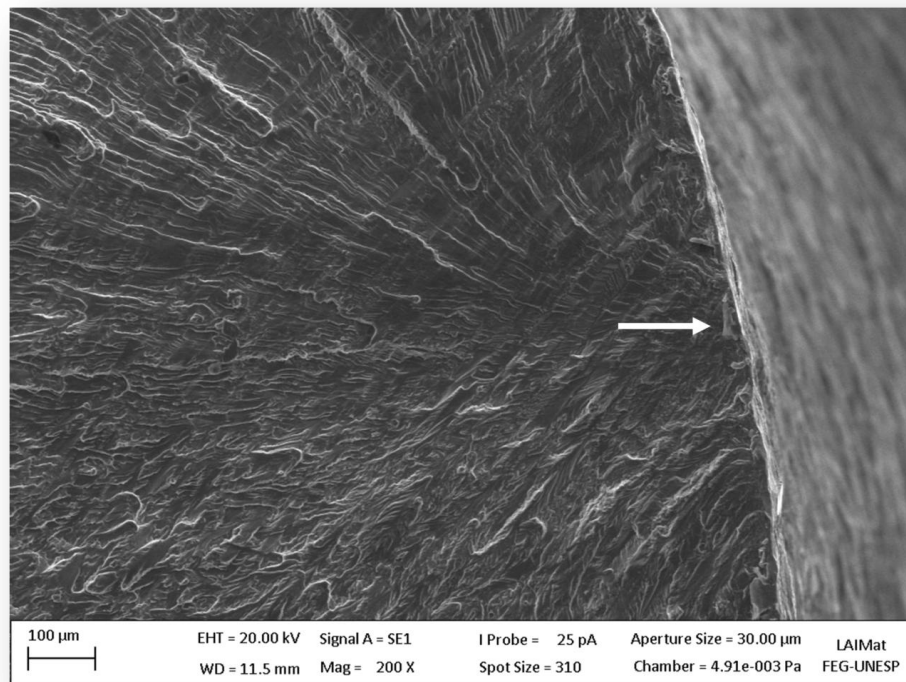
Ao contrário do que foi apresentado por Zhao, X. et al. (2015), a trinca nucleou na superfície da amostra, o que justifica não ter melhorado a resistência à fadiga da amostra. A Figura 61 apresenta a superfície de fratura do corpo de prova de fadiga axial da liga de alumínio 7475-T7351 com *Shot-Peening* (350 MPa, 78 387 ciclos). A Figura 62 apresenta o estágio I da fratura com nucleação da trinca na superfície. A Figura 63 apresenta o estágio II da fratura, com trincas na propagação entre as estrias. A Figura 64 apresenta o estágio III da fratura, a ruptura final.

Figura 61: SP – visão geral – 350 MPa, 78 387 ciclos



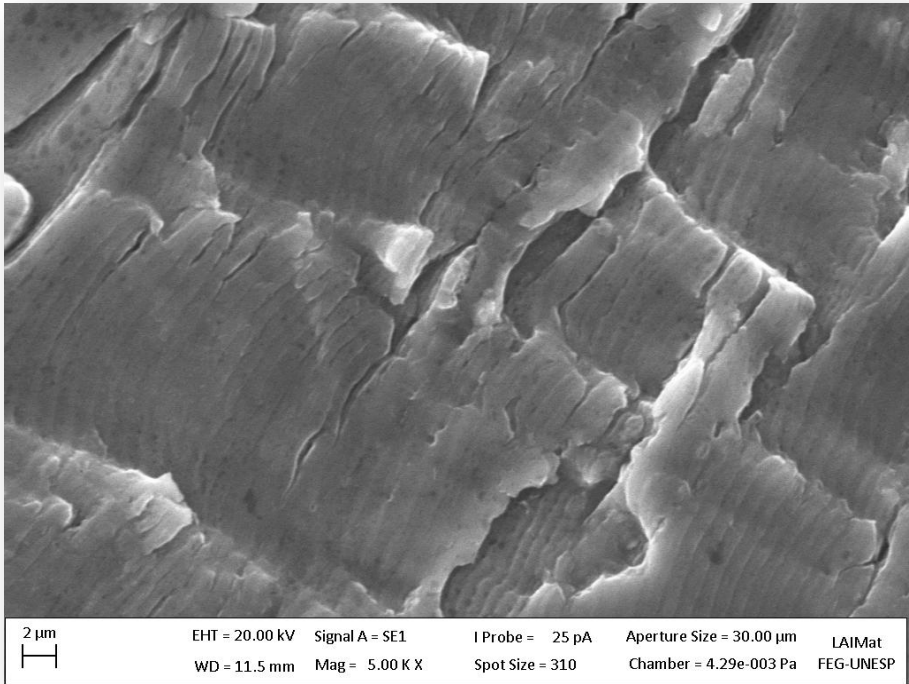
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 62: SP - nucleação



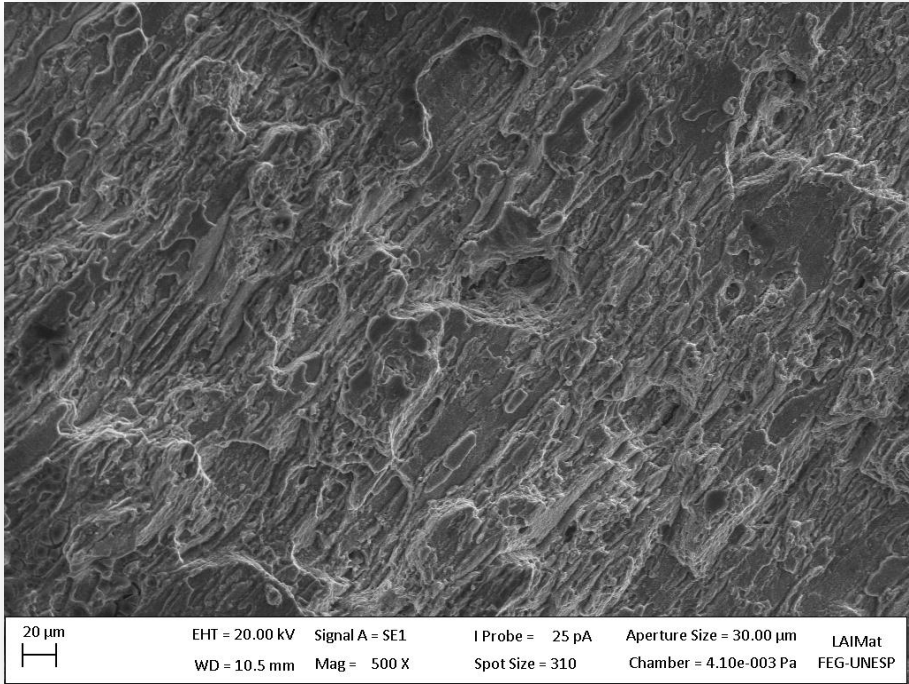
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 63: SP - propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 64: SP - ruptura

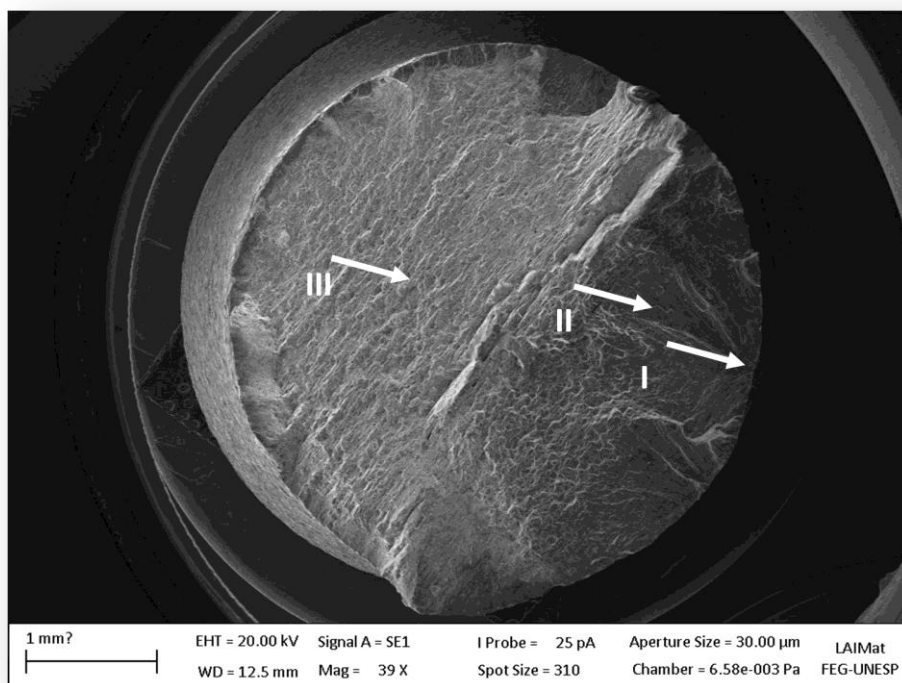


Fonte: Produção do próprio autor

A amostra com *Shot-Peening* (400 MPa, 21 810 ciclos) que correspondente a Figura 65 também obteve um resultado negativo. A Figura 66 apresenta o estágio I da fratura com uma deformação plástica devido ao jateamento na região de nucleação da trinca. A Figura 67 apresenta o estágio II da fratura, a propagação da trinca. A Figura 68 apresenta o estágio III da fratura, a ruptura final.

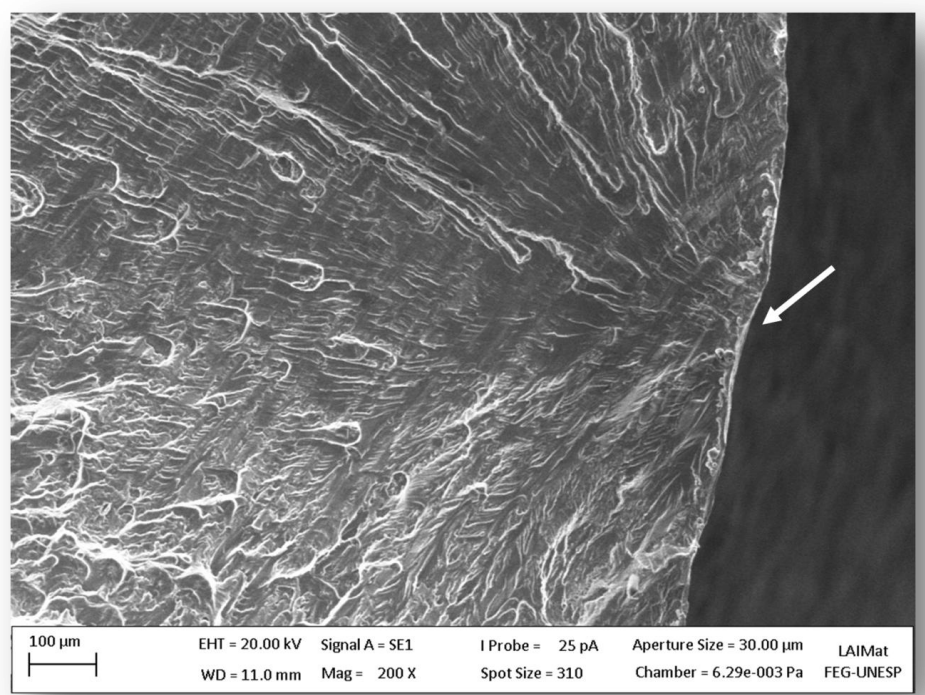
Considerando as tensões residuais de compressão, bem como o aumento da densidade de discordâncias que são introduzidas na superfície material com o objetivo de melhor o limite de fadiga, o aumento da rugosidade que é inerente do *Shot-Peening* deve ser sempre considerado negativo. Em maior ampliação são encontradas na superfície do material, sobreposições, micro trincas e áreas com fluxo turbulento. Estas sobreposições podem atingir o interior do material. Se a tensão residual de compressão benéfico (ou a densidade de discordâncias) são significativamente reduzidas durante o serviço do componente, devido a condições térmicas ou mecânicas, o limite de fadiga pode ser inferior ao de um componente não tratado com um superfície (CHAMPAIGNE, 1991).

Figura 65: SP – visão geral – 400 MPa, 21 810 ciclos



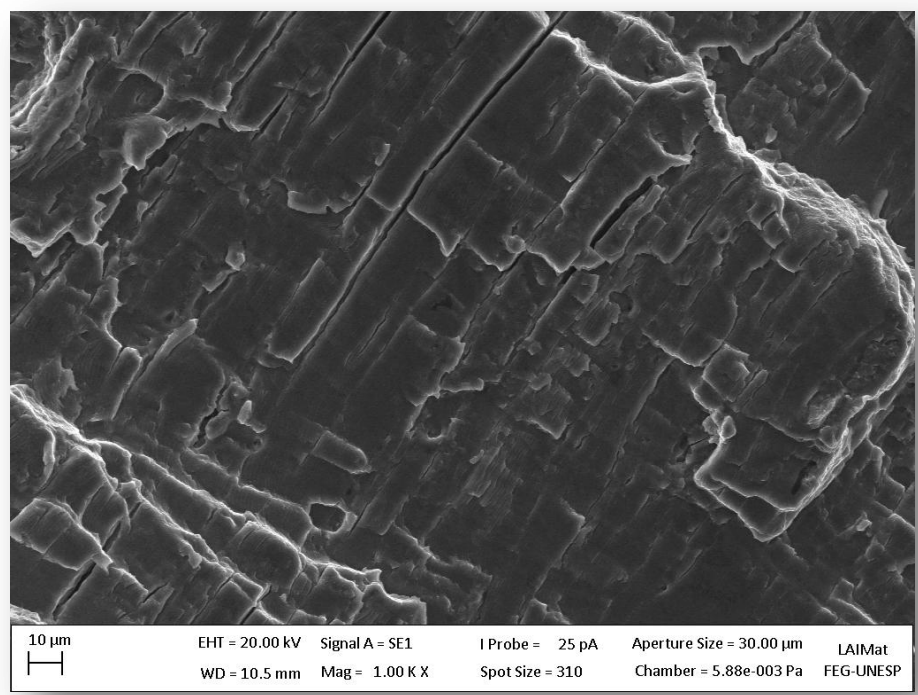
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 66: SP - nucleação



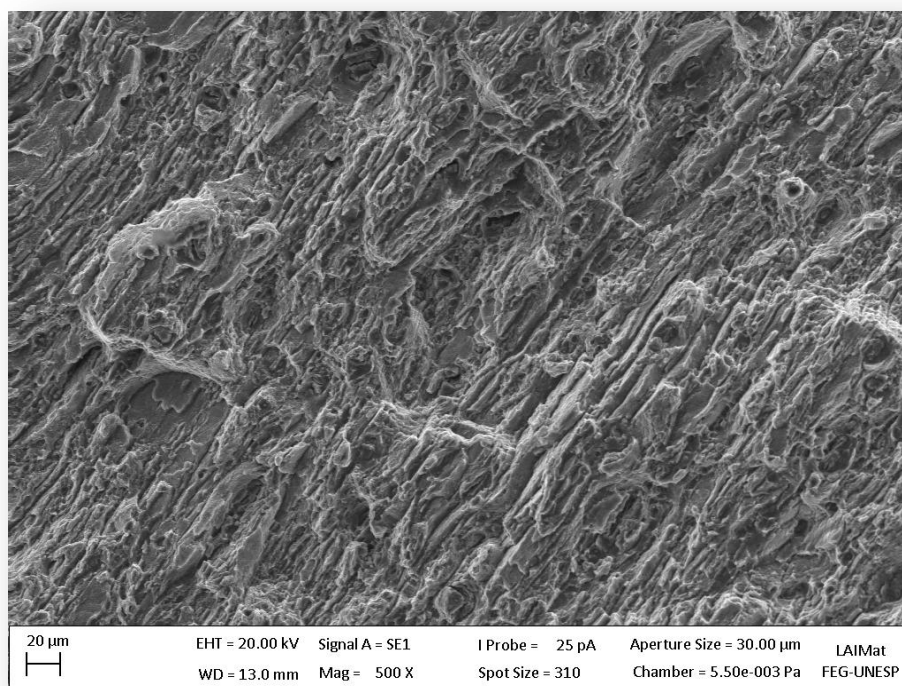
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 67: SP - propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 68: SP - ruptura



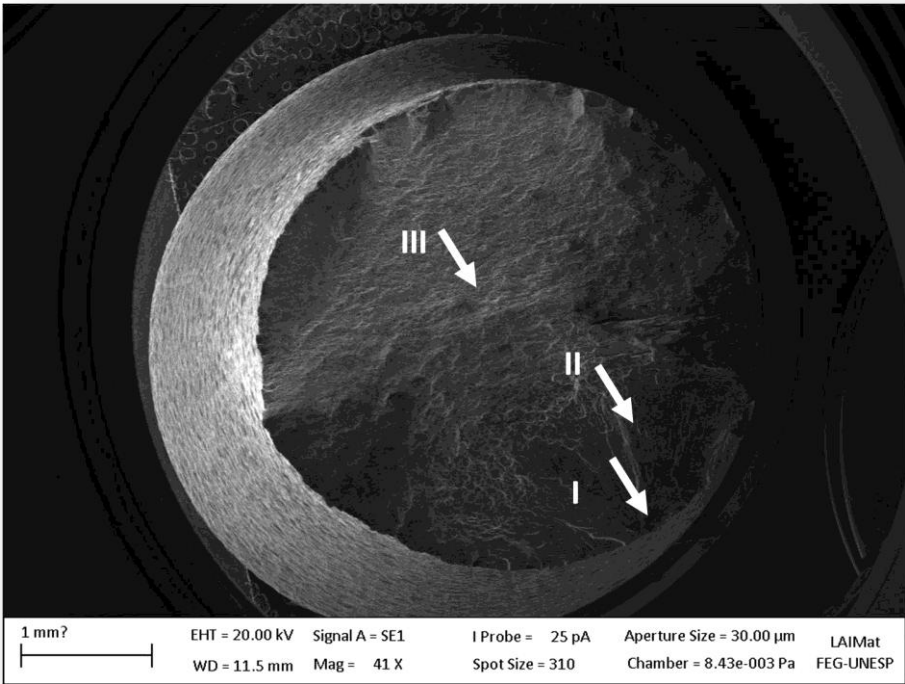
Fonte: Produção do próprio autor

Um aumento excessivo na rugosidade após o tratamento de *Shot-Peening* pode reduzir a resistência à fadiga do material, assim como uma intensidade de jateamento insuficiente e uma intensidade acima do ideal não resultam em bom desempenho em fadiga (COSTA, 2009).

A amostra referente à Figura 69 foi ensaiada com maior tensão do ensaio de fadiga, que corresponde a 420 MPa. A vida em fadiga foi de 20 160 ciclos, a menor vida de todos os resultados. Esse valor é a metade da vida em fadiga do material base para a mesma tensão.

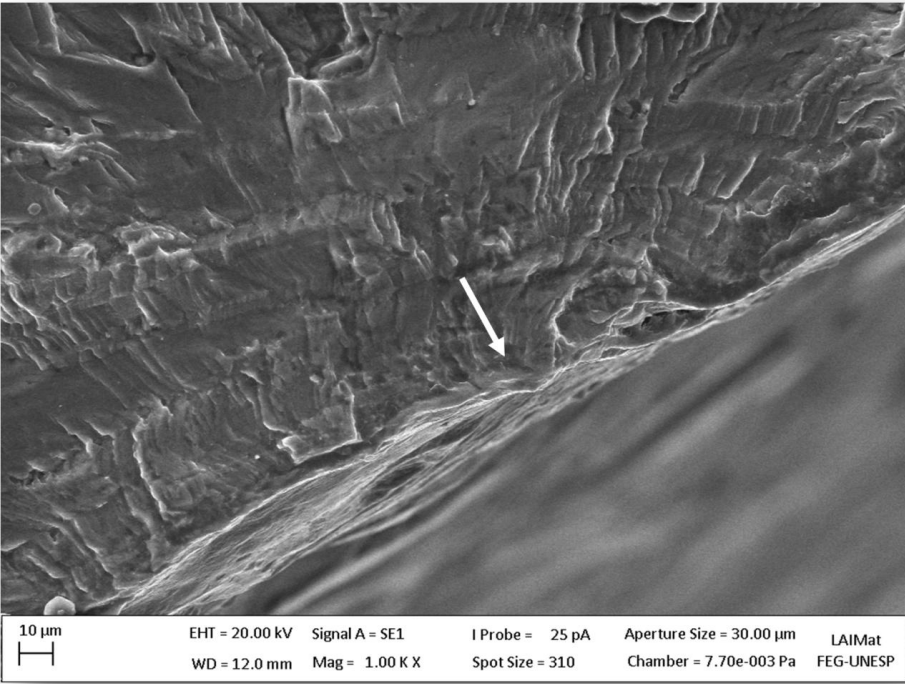
A Figura 70 apresenta o estágio I da fratura, onde a nucleação da trinca ocorreu próxima da superfície. A Figura 71 apresenta o estágio II da fratura, com trinca na propagação. A Figura 72 apresenta o estágio III da fratura, a ruptura final.

Figura 69: SP – visão geral – 420 MPa, 20 160 ciclos



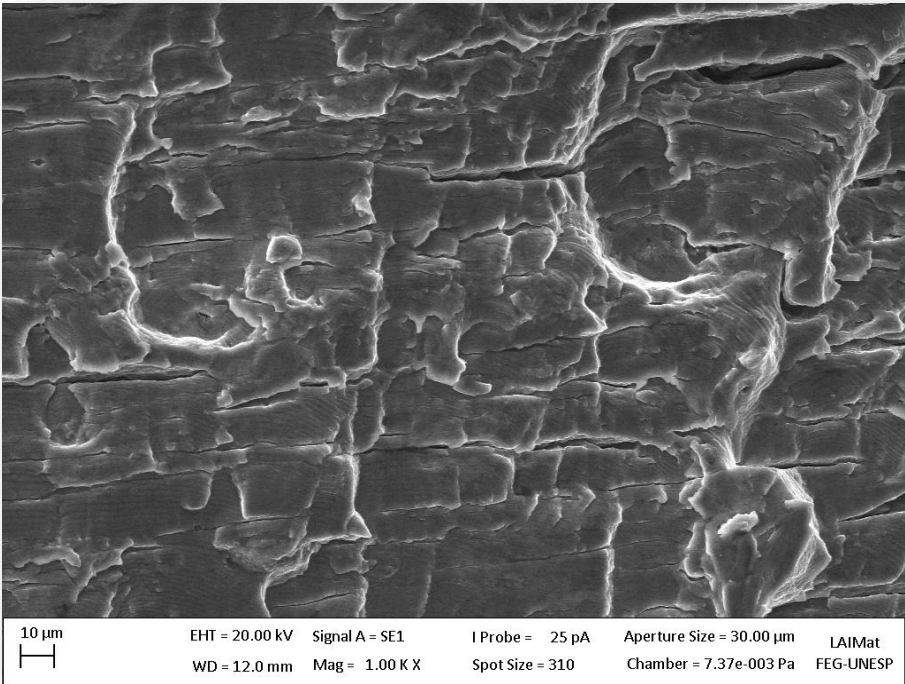
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 70: SP - nucleação



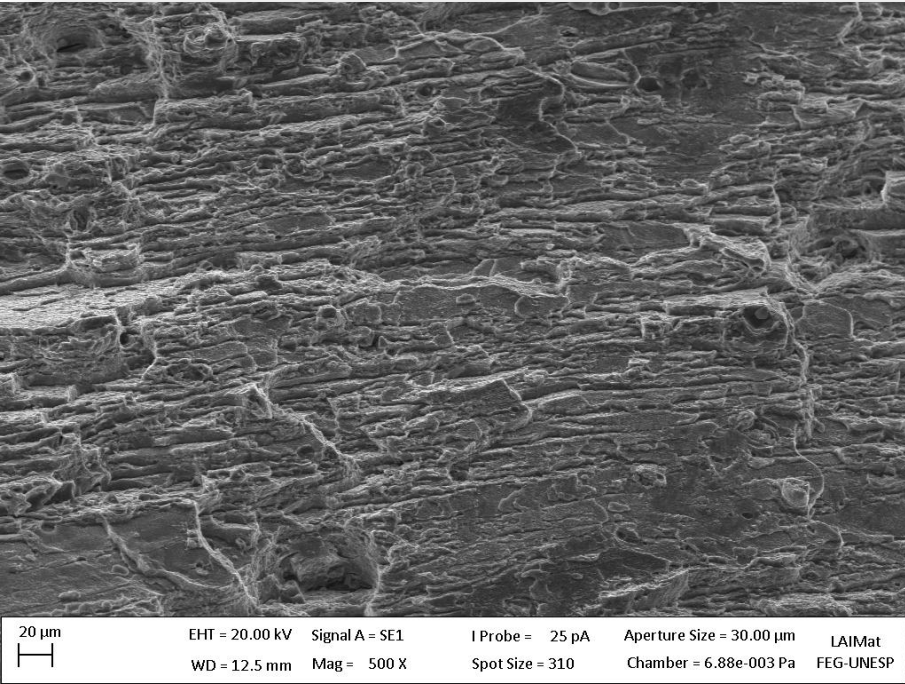
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 71: SP - propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 72: SP - ruptura



Fonte: Produção do próprio autor

Na avaliação da microscopia eletrônica de varredura das amostras com *Shot-Peening*, as trincas nuclearam na superfície e próximo da superfície das amostras. De acordo com Camargo (2007) as tensões de compressão induzidas pelo processo de *Shot-Peening* criam nas camadas subsuperficiais do material uma barreira mecânica que dificulta ou impede a deformação plástica localizada do material, retardando a propagação da trinca além de dificultar a ocorrência de trincas a partir da superfície do material, o que se conclui que os parâmetros do *Shot-Peening* utilizados nessa pesquisa não foram o suficiente para gerar as tensões residuais de compressão que retardasse a propagação das trincas e dificultasse a nucleação das trincas na superfície mesmo com o aumento da rugosidade.

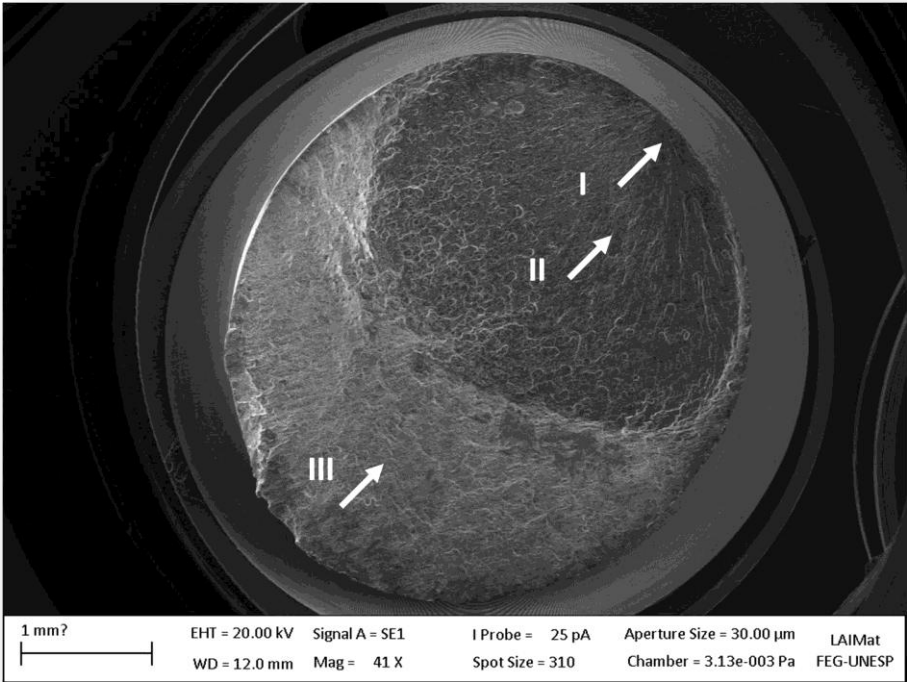
4.6.3 Amostras com Anodização Crômica

As fratura por fadiga podem ser iniciadas em uma grande variedade de características, como arranhões, mudanças abruptas na seção, marcas de ferramentas, *pits* de corrosão, inclusões, precipitados e defeitos de solda. Em alguns casos, microfissuras pode estar presente antes do início do carregamento, por exemplo, fissuras de resfriamento e fissuras de soldagem. Todos esses problemas aumentam a probabilidade de uma falha precoce por fadiga. A ausência do aumento da tensão superficial, superfícies polidas e poucas inclusões não evitam a fadiga se a tensão alternada for de magnitude suficiente e for aplicada em tempo suficiente. Porém esses fatores são características desejáveis para uma longa vida útil (ASM, 1987).

Assim como as características citadas na ASM (1987) que podem afetar a resistência à fadiga de componentes, o tratamento superficial de anodização também afeta negativamente, pois a resistência à fadiga de materiais anodizados pode ser prejudicada devido ao comportamento frágil da camada de óxido e a tensão residual de tração formada, conforme foi apresentado por Chaussumier, M. et al. (2013).

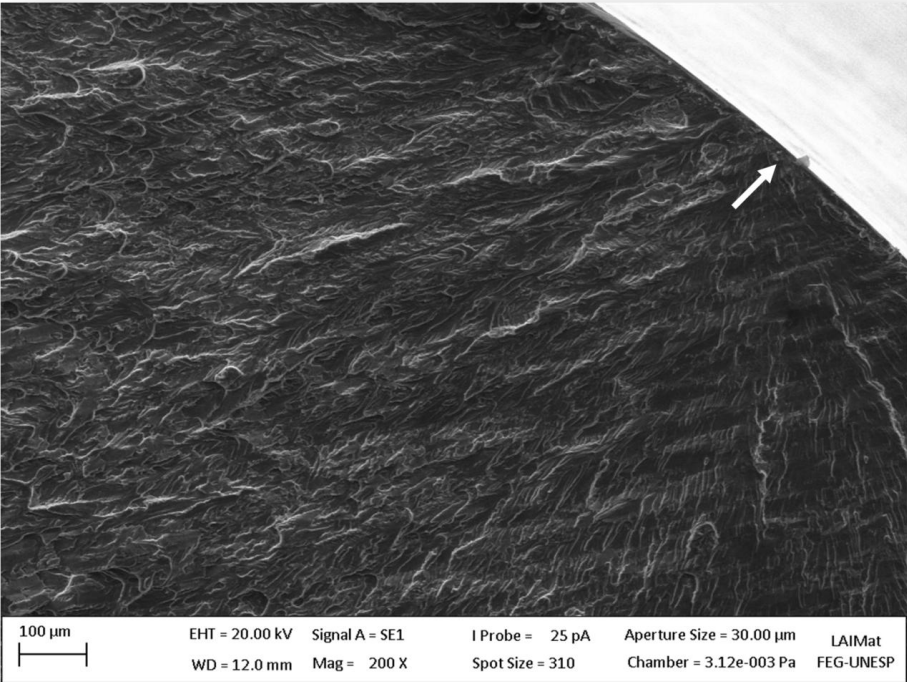
A Figura 73 apresenta a superfície de fratura de um corpo de prova de fadiga axial da liga de alumínio 7475-T7351 com anodização crômica (260 MPa, 256 601 ciclos). A Figura 74 apresenta o estágio I da fratura com a nucleação da trinca na superfície da camada anodizada. A Figura 75 apresenta o estágio II da fratura, a propagação da trinca. A Figura 76 apresenta o estágio III da fratura, a ruptura final.

Figura 73: AC – visão geral – 260 MPa, 256 601 ciclos



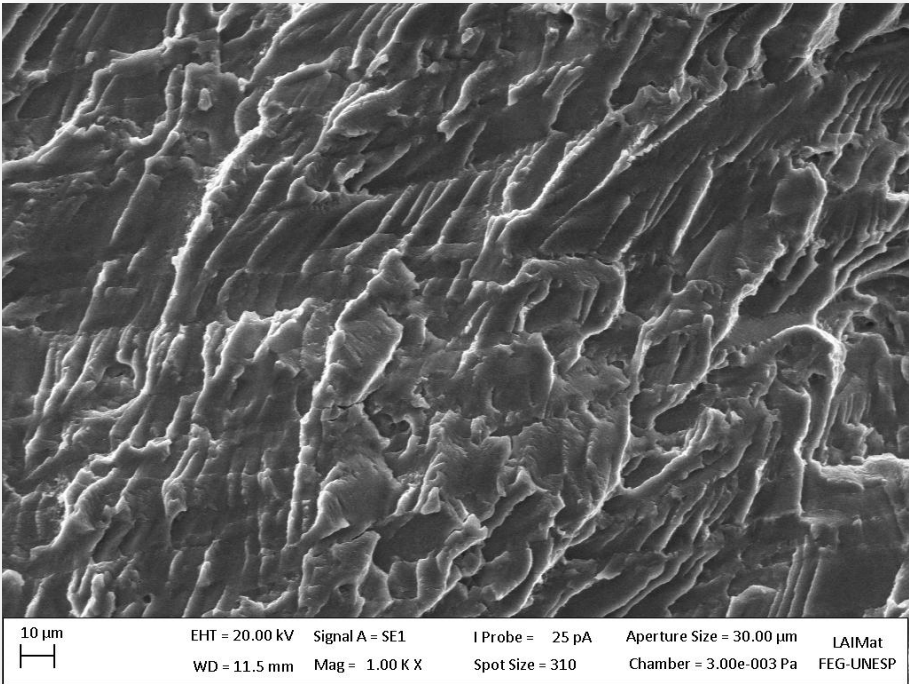
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 74: AC - nucleação



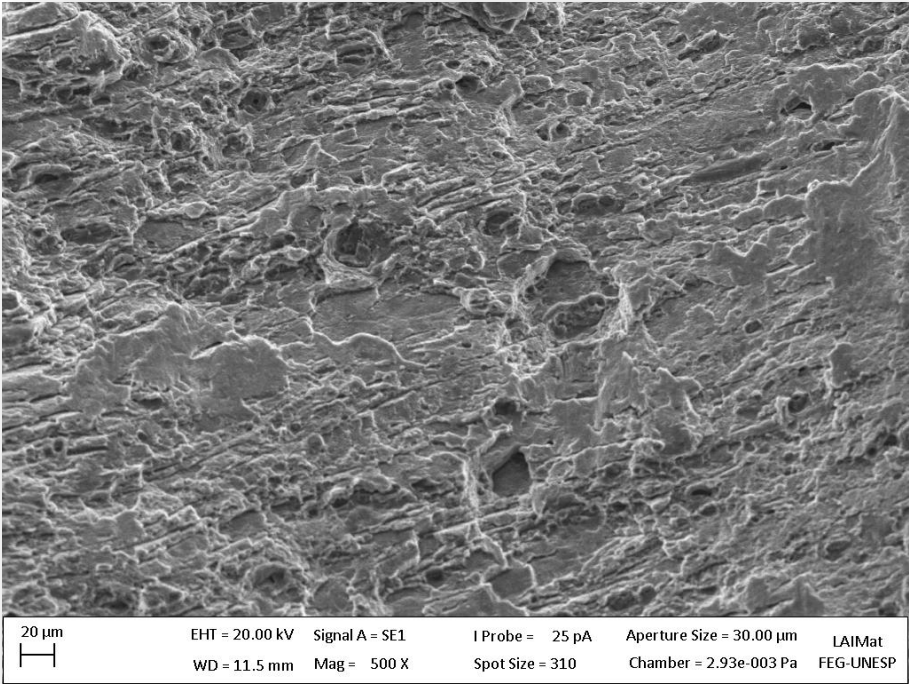
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 75: AC - propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 76: AC - ruptura

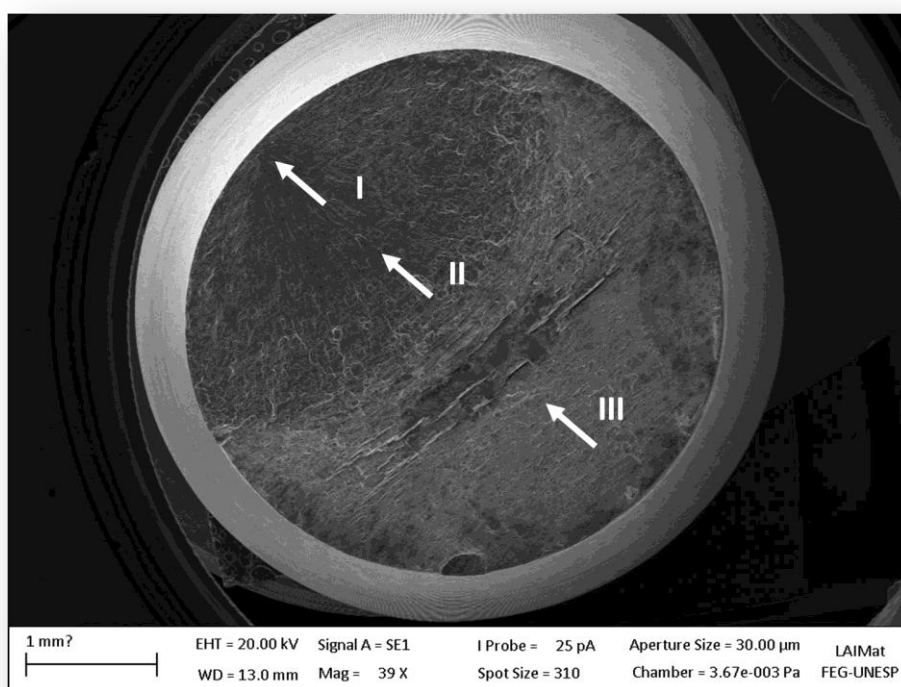


Fonte: Produção do próprio autor

Na amostra com anodização crômica (320 MPa, 67 964 ciclos) referente a Figura 77 é observado o mecanismo de Wood, onde pode-se explicar a ocorrência das trincas de fadiga baseado na ocorrência de microdeformações na superfície do material submetido a carregamentos de fadiga, que provocam o surgimento de extrusões e intrusões, que podem crescer e se propagar como uma trinca de fadiga. Durante parte do carregamento do ciclo, o escorregamento ocorre num plano orientado e durante parte do descarregamento do ciclo, o escorregamento ocorre num plano paralelo (WOOD, 1959).

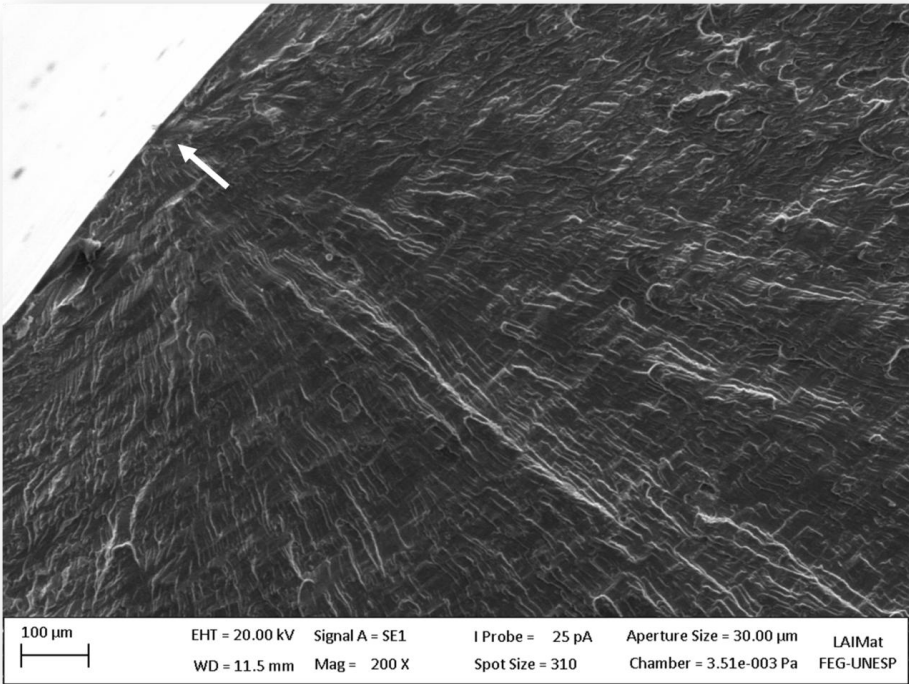
A Figura 78 apresenta o estágio I da fratura, com a nucleação da trinca na superfície da camada anodizada. A Figura 79 apresenta o estágio II da fratura, a propagação da trinca. A Figura 80 apresenta o estágio III da fratura, com placas alongadas na ruptura final.

Figura 77: MEV AC – visão geral – 320 MPa, 67 964 ciclos



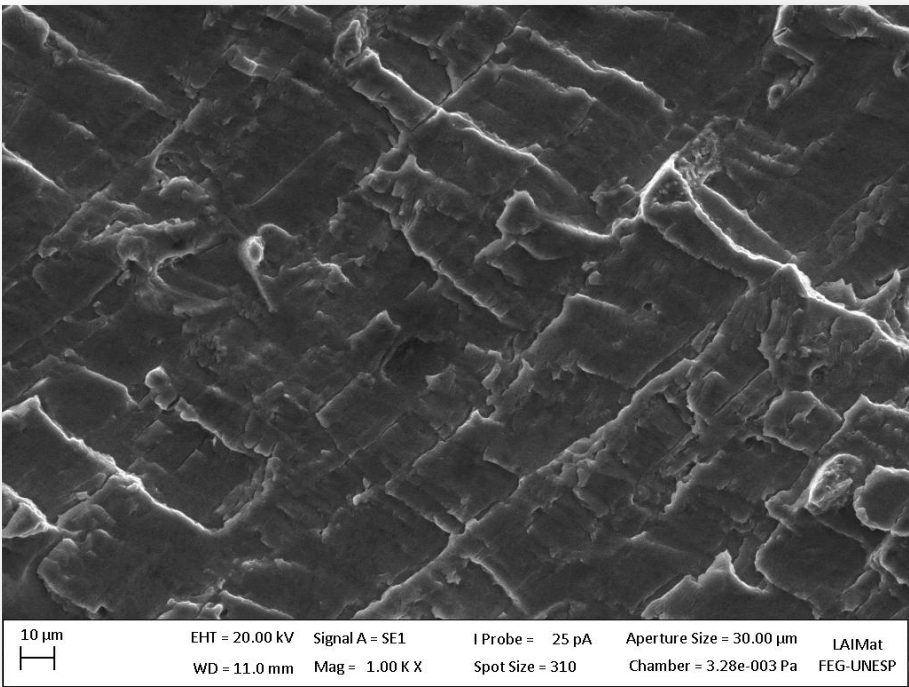
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 78: MEV AC - nucleação



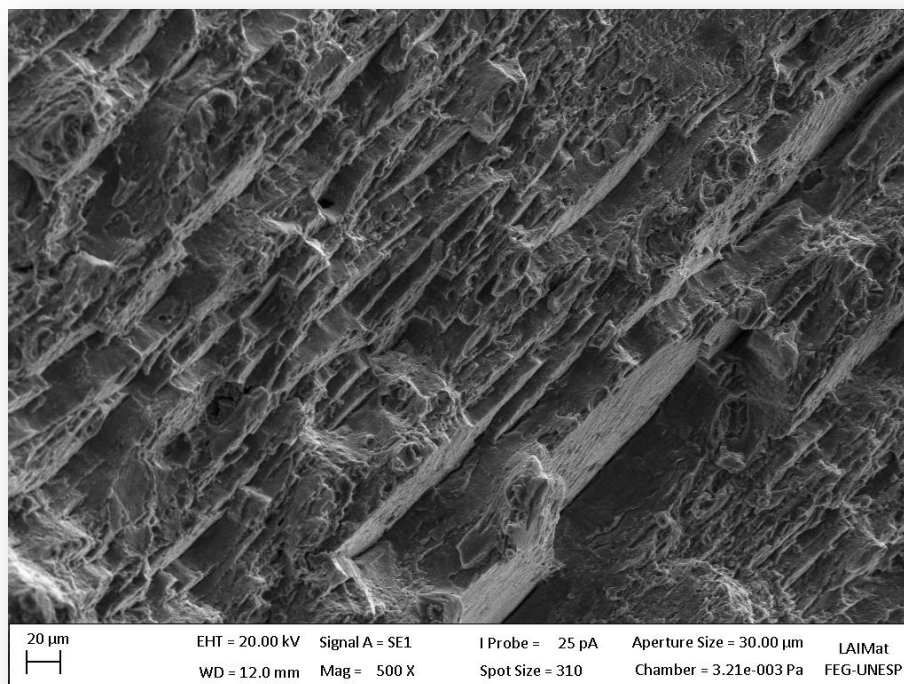
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 79: MEV AC - propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 80: MEV AC - ruptura



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 81 apresenta a amostra do ensaio de fadiga axial da liga de alumínio 7475-T7351 com anodização crômica (340 MPa, 23 873 ciclos). A Figura 82 apresenta o estágio I da fratura, com a nucleação da trinca na superfície da camada anodizada. A Figura 83 apresenta o estágio II da fratura, a propagação da trinca. A Figura 84 apresenta o estágio III da fratura, a ruptura final.

A amostra com 340 MPa e 23 873 ciclos apresentou a mesma característica de nucleação da trinca na superfície comparando com a amostra de 260 MPa e 256 601 ciclos e a amostra 320 MPa e 67 964 ciclos. A rugosidade superficial pouco foi afetada após o tratamento superficial de anodização crômica.

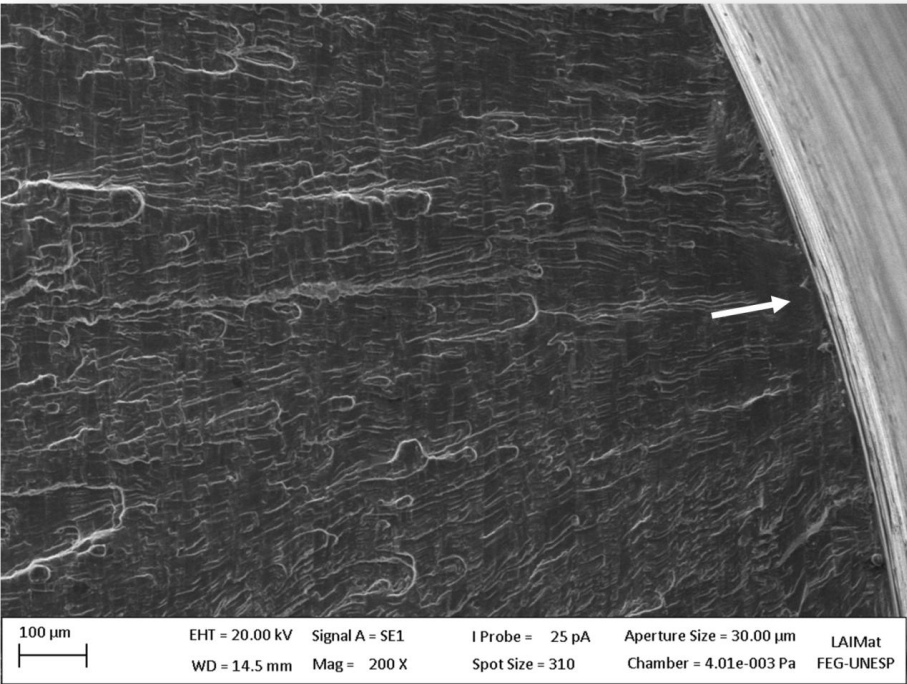
O resultado da avaliação das amostras com anodização crômica confirmam a influência negativa na resistência à fadiga conforme apresentado pelos autores Camargo (2007), Shahzad, M. et al. (2011) e Shahzad, M. et al. (2012) citados na revisão bibliográfica.

Figura 81: MEV AC – visão geral – 340 MPa, 23 873 ciclos



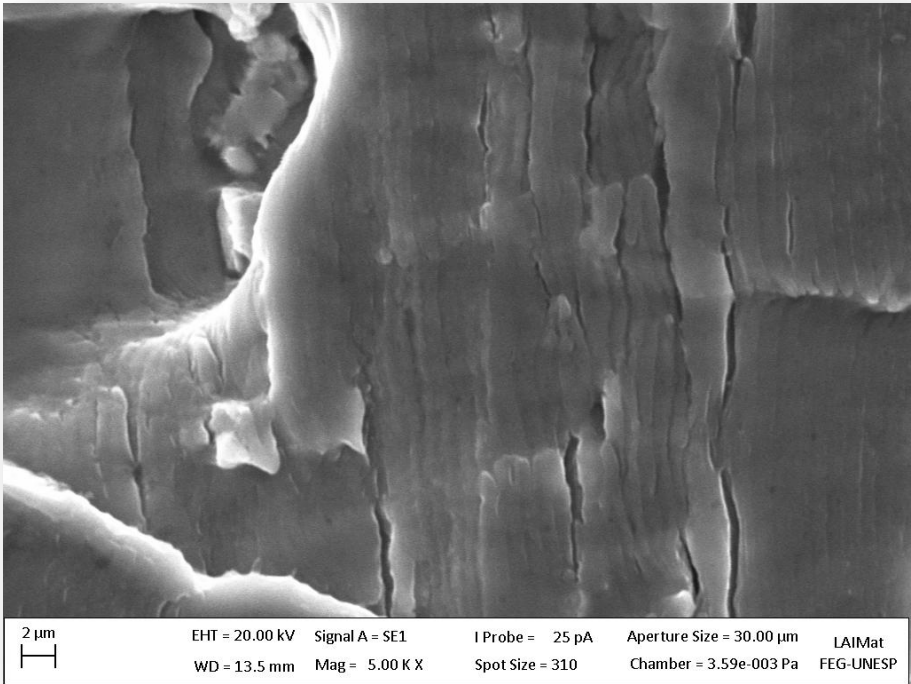
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 82: MEV AC - nucleação



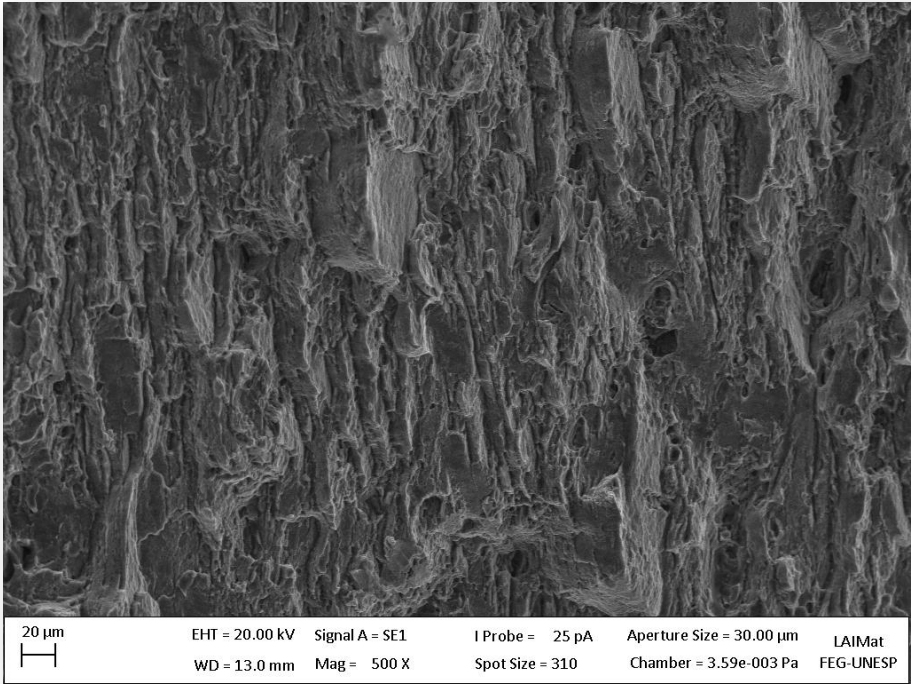
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 83: MEV AC - propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 84: MEV AC - ruptura



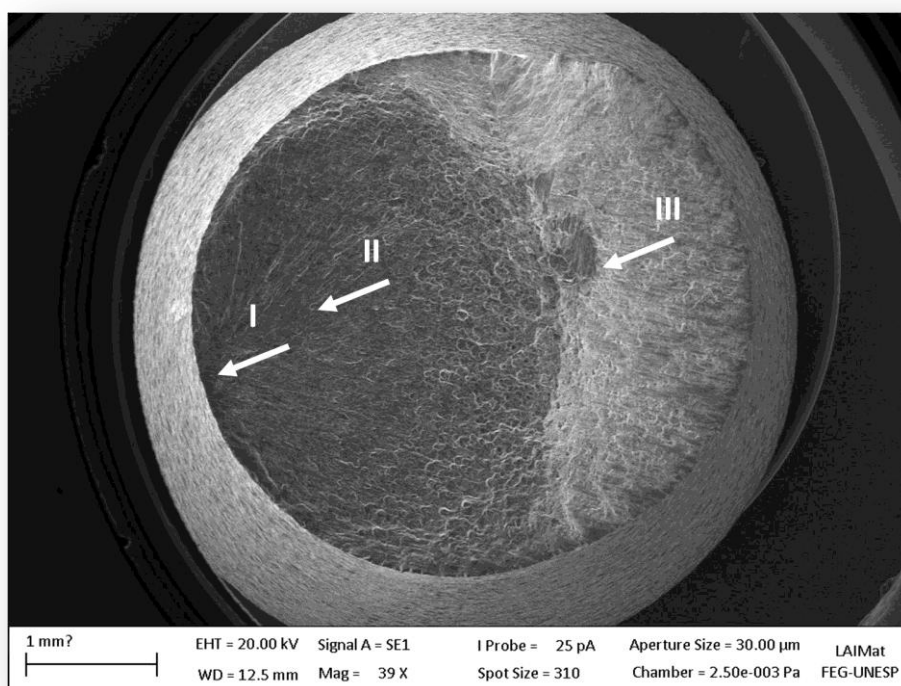
Fonte: Produção do próprio autor

Portanto conclui-se que a anodização crômica não altera a rugosidade do material usinado com bom acabamento superficial e que a camada de óxido formada pelo tratamento de anodização crômica reduz a vida em fadiga. Para as peças que irão trabalhar em fadiga, deve-se se ter cautela com a aplicação da anodização e garantir que os efeitos positivos da anodização sejam aproveitados. Com a indução da tensão residual de tração, prejudicial à vida em fadiga, deve-se haver o contrabalanceamento das tensões residuais, ou seja, induzir tensão residual de compressão.

4.6.4 Amostras com *Shot-Peening* e Anodização Crômica

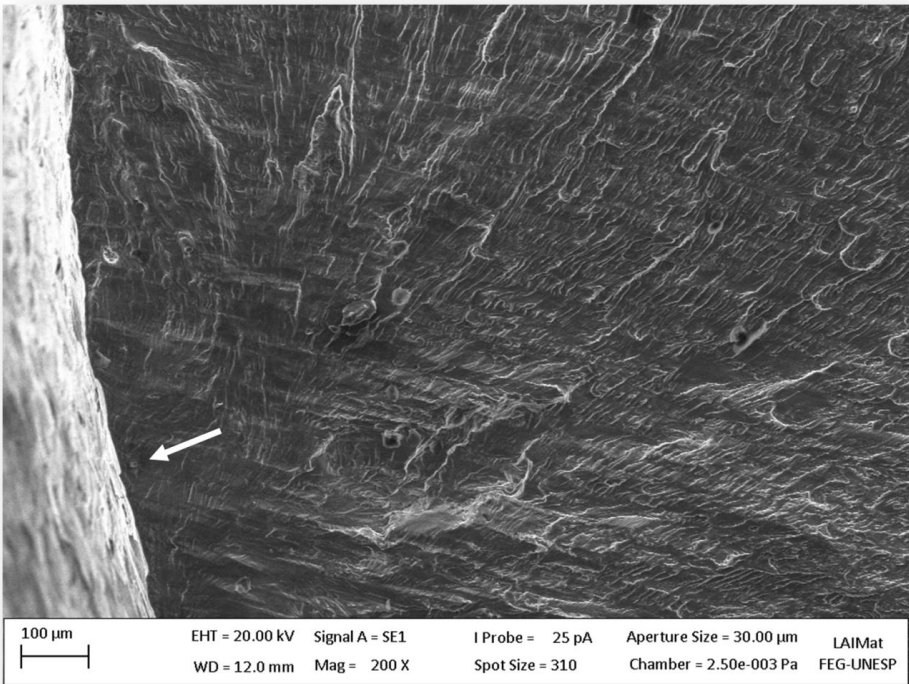
O primeiro corpo de prova analisado do ensaio de fadiga axial da liga de alumínio 7475-T7351 com *Shot-Peening* e anodização crômica (220 MPa, 280 639 ciclos) está apresentado na Figura 85. A Figura 86 apresenta o estágio I da fratura, com a nucleação da trinca na subcamada da amostra. A Figura 87 apresenta o estágio II da fratura, com estrias menos visíveis na propagação da trinca. A Figura 88 apresenta o estágio III da fratura, a ruptura final.

Figura 85: MEV SP+AC – visão geral – 220 MPa, 280 639 ciclos



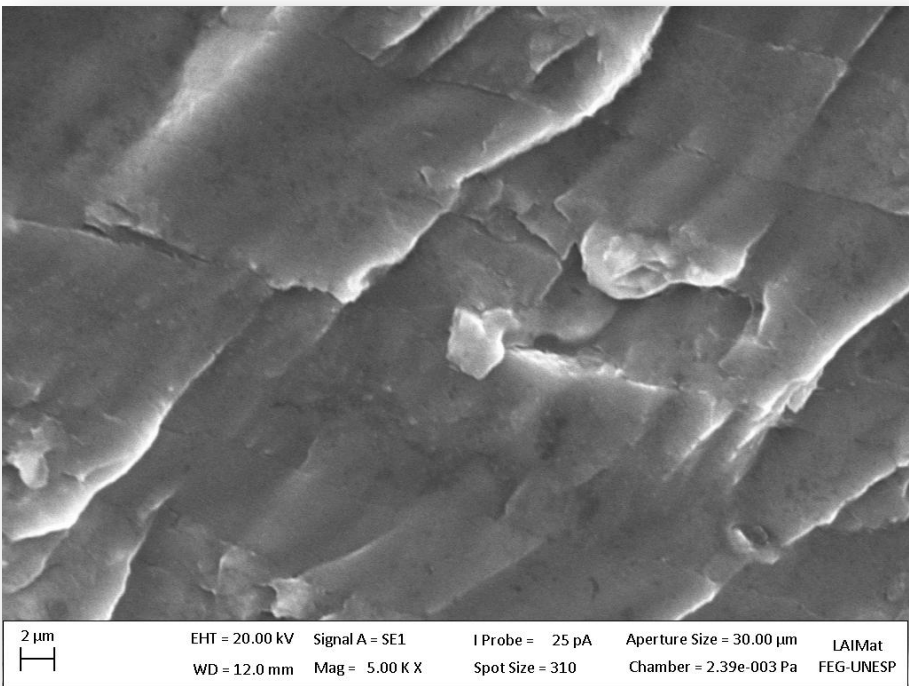
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 86: MEV SP+AC – nucleação



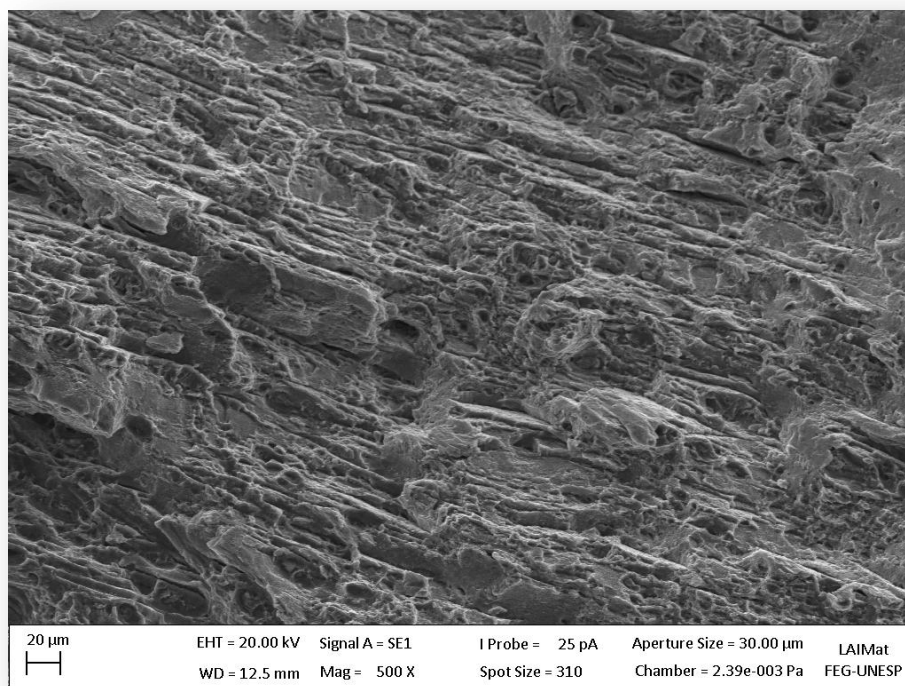
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 87: MEV SP+AC – propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 88: MEV SP+AC – ruptura



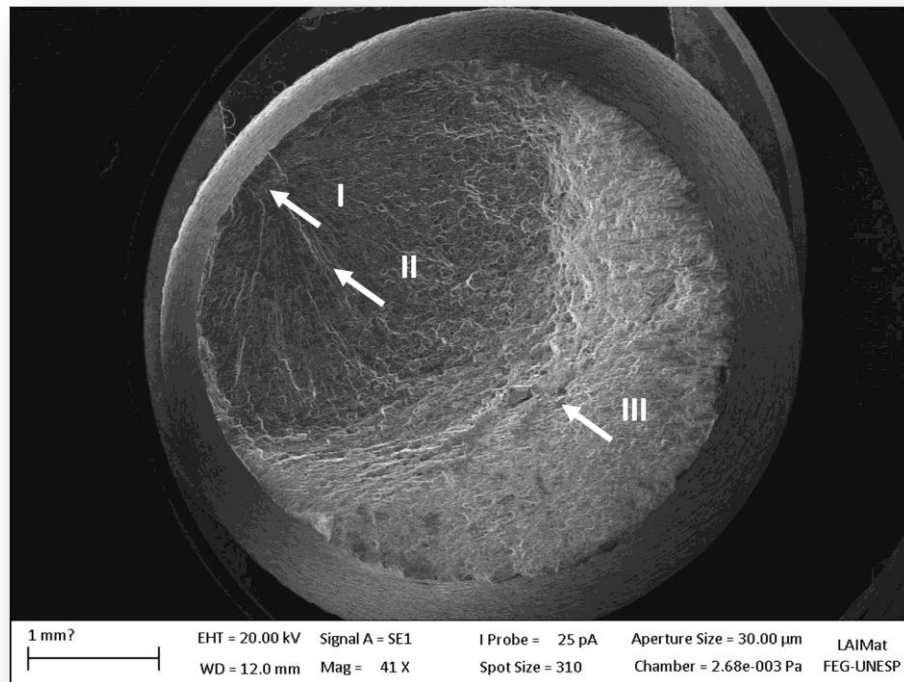
Fonte: Produção do próprio autor

Costa (2009) verificou a superfície de fratura da liga Ti-6Al-4V com pré-tratamento de *Shot-Peening* e anodização. Observou claramente a influência do campo residual compressivo induzido pelo *Shot-Peening*, pois o início de trinca distanciou-se de aproximadamente 150 μm da superfície. O tratamento de *Shot-Peening* inibe a nucleação e a propagação das trincas por fadiga e desvia a frente de trincas para uma posição abaixo da superfície.

A Figura 89 apresenta a superfície de fratura de um corpo de prova de fadiga axial da liga de alumínio 7475-T7351 com *Shot-Peening* e anodização crômica (280 MPa, 110 644 ciclos). A Figura 90 apresenta o estágio I da fratura, com pontos secundários na nucleação da trinca. A Figura 91 apresenta o estágio II da fratura, com estrias menos visíveis na propagação da trinca. A Figura 92 apresenta o estágio III da fratura, a ruptura final.

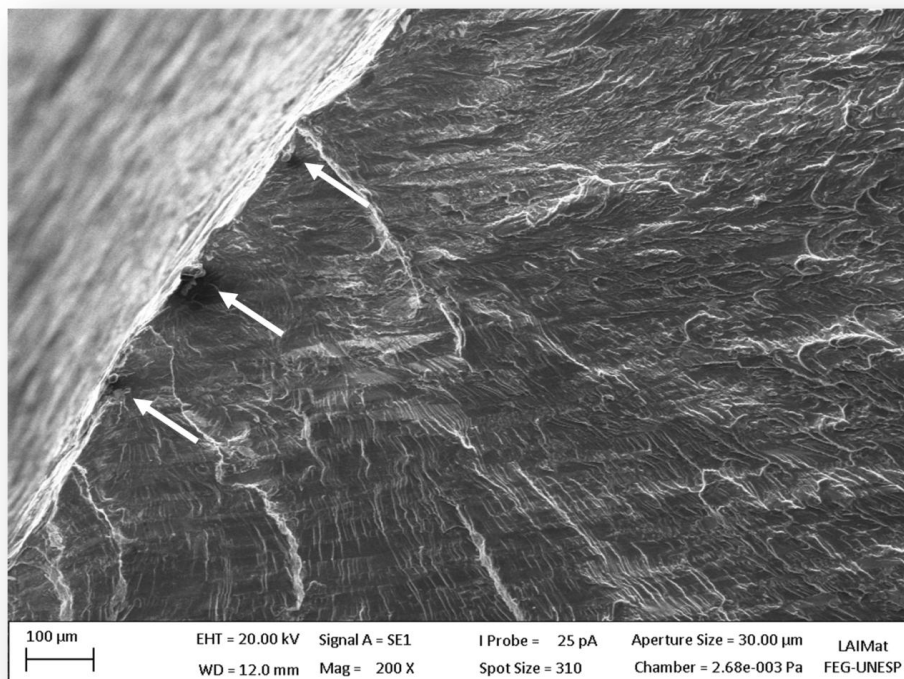
De acordo com a ASM (1987) as estrias são mais proeminentes em ligas de alumínio e muitas vezes são mal definidas em ligas ferrosas. A oxidação, corrosão ou danos mecânicos podem obstruir as estrias.

Figura 89: MEV SP+AC – visão geral – 280 MPa, 110 644 ciclos



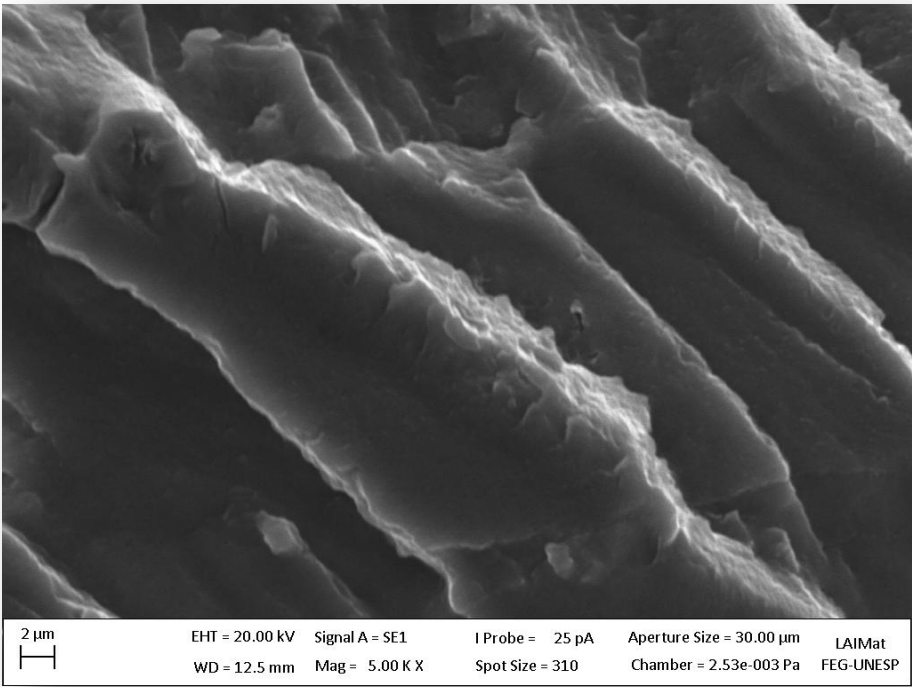
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 90: MEV SP+AC – nucleação



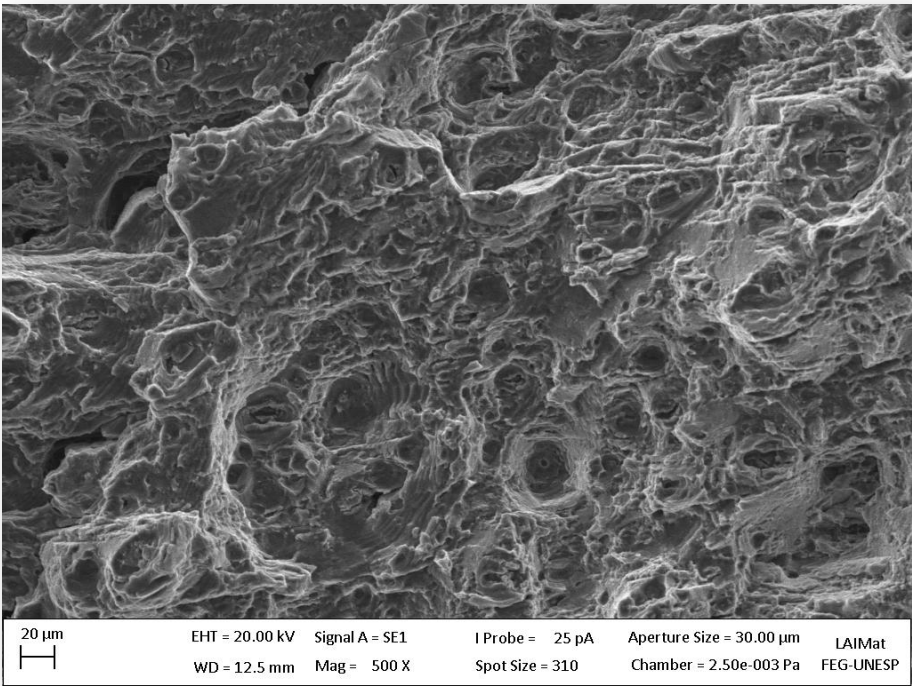
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 91: MEV SP+AC – propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 92: MEV SP+AC – ruptura

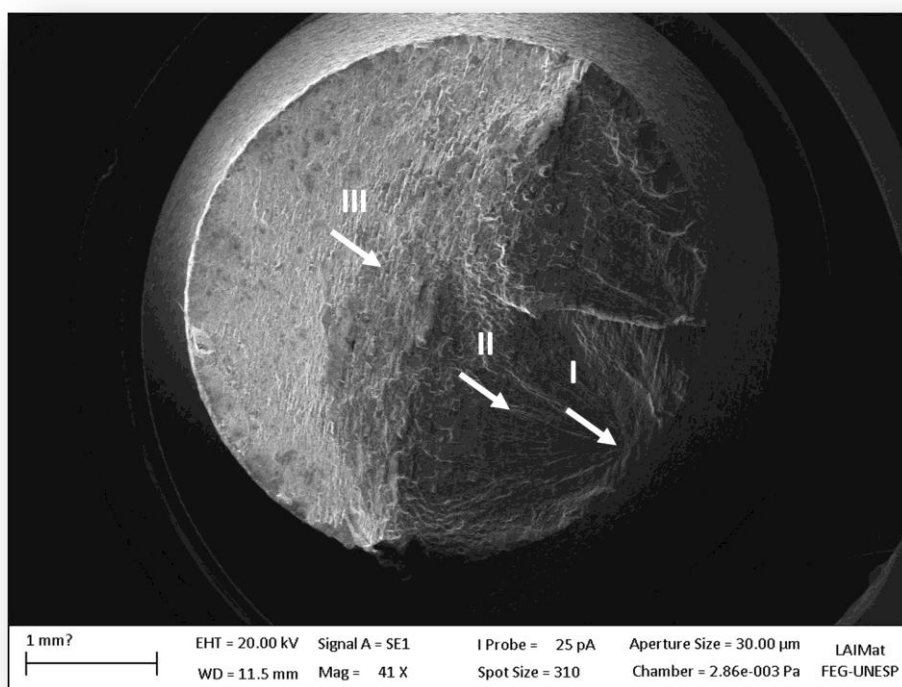


Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 93 apresenta a superfície de fratura de um corpo de prova de fadiga axial da liga de alumínio 7475-T7351 com anodização crômica e *Shot-Peening* (300 MPa, 56 300 ciclos). A Figura 94 apresenta o estágio I da fratura, com um precipitado na nucleação da trinca. A Figura 95 apresenta o estágio II da fratura, a propagação da trinca. A Figura 96 apresenta o estágio III da fratura, a ruptura final.

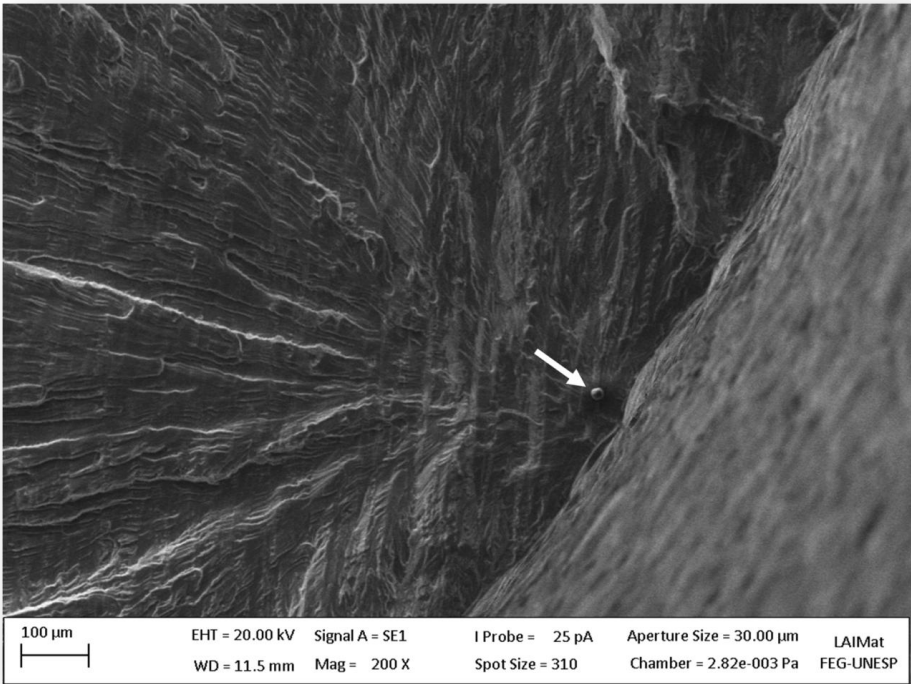
As amostras com *Shot-Peening* seguidas de anodização crômica apresentaram estrias menos visíveis mesmo na ampliação 5000x. Esse efeito pode ser atribuído aos danos na gerados na superfície.

Figura 93: MEV SP+AC – visão geral – 300 MPa, 56 300 ciclos



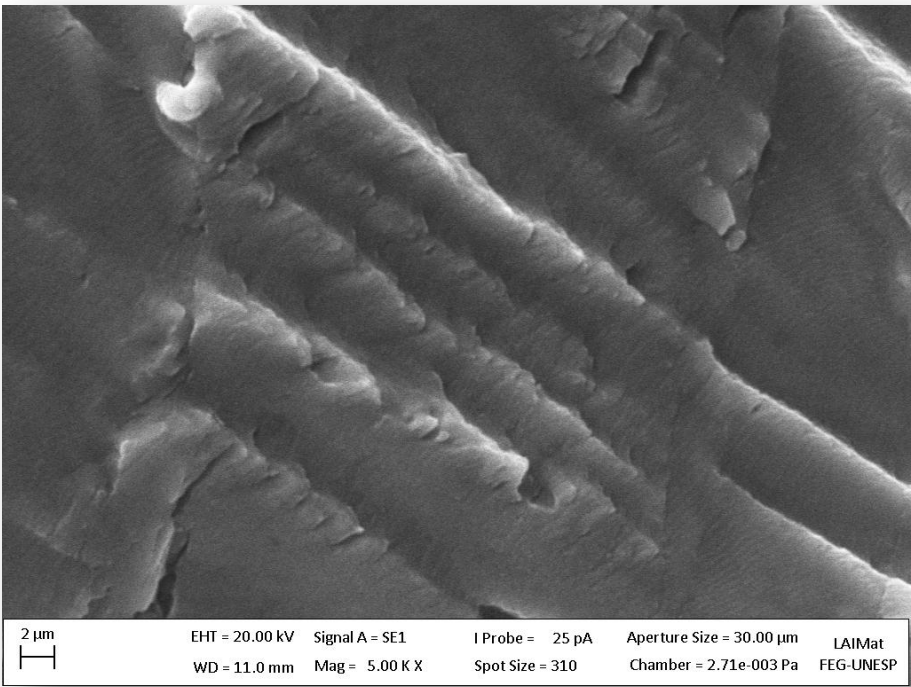
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 94: MEV SP+AC – nucleação



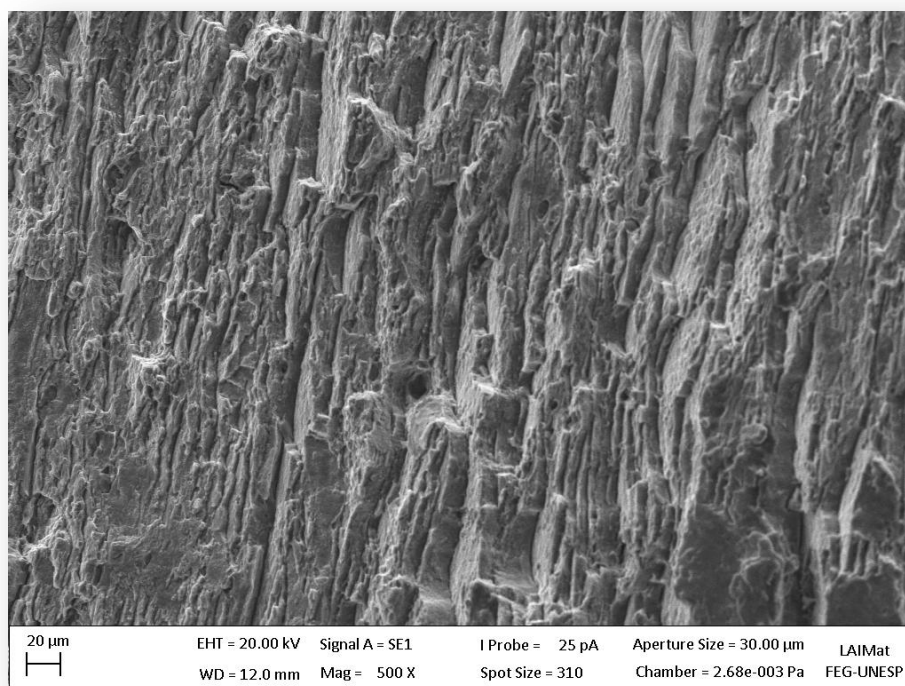
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 95: MEV SP+AC – propagação



Fonte: Produção do próprio autor

Figura 96: MEV SP+AC – ruptura



Fonte: Produção do próprio autor

Na avaliação da microscopia eletrônica de varredura das amostras com *Shot-Peening* e anodização crômica foi possível observar que a nucleação da trinca tendeu a se afastar da superfície, porém não foi o suficiente para suprimir o efeito negativo da anodização crômica e da rugosidade. No entanto, avaliando os resultados de resistência à fadiga, para baixas tensões o *Shot-Peening* minimizou o efeito negativo da anodização.

O que se conclui que os processos de *Shot-Peening* e anodização podem trabalhar no contrabalanceamento de tensões residuais.

5 CONCLUSÕES

Com base no objetivo geral que foi proposto, material, parâmetros de ensaio e tratamento específicos desta pesquisa, conclui-se que:

1. A resistência à tração da liga 7475-T7351 não é significativamente alterada após os processos de anodização crômica e *Shot-Peening*.
2. O perfil de dureza do material base está adequado conforme especificado em literatura.
3. O tratamento superficial de anodização crômica reduz a resistência à fadiga da liga 7475-T7351 provavelmente devido à tensão residual de tração e características da camada de óxido. A rugosidade não é afetada pelo tratamento.
4. Para o material e dimensões das amostras utilizadas nessa pesquisa, os parâmetros do *Shot-Peening* não são eficientes para melhorar a resistência à fadiga da liga 7475-T7351. Consequentemente o aumento da rugosidade, que é inerente ao processo, trabalha como concentrador de tensão na superfície. Quando a trinca se propaga não há barreiras suficientes para retardar sua propagação, diminuindo então a resistência a fadiga do material.
5. O alumínio 7475-T7351 com *Shot-Peening* seguido de anodização crômica reduz a resistência à fadiga quando os parâmetros do *Shot-Peening* são ineficientes para barrar o efeito negativo da rugosidade e da tensão residual de tração gerada pelo tratamento superficial de anodização que acelera a propagação da trinca. No entanto, para baixas tensões o *Shot-Peening* minimiza o efeito negativo causado pela anodização crômica.
6. É extremamente necessário testar os materiais com diferentes parâmetros de *Shot-Peening* e avaliar seus efeitos a fim de obter melhoras na resistência à fadiga e evitar acidentes decorrentes de falha prematura de fadiga.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São sugeridos estudos abaixo para a continuação desse trabalho:

1. Avaliar a variação da tensão residual do material base, após o processo de *Shot-Peening* e após a anodização.
2. Estudar outros parâmetros do processo de *Shot-Peening* que possam aumentar a resistência à fadiga e correlacionar com a rugosidade;
3. Estudar outro método para substituição da anodização crômica e avaliar seu efeito na resistência à fadiga em conjunto com o *Shot-Peening*.
4. Avaliar o efeito do *Shot-Peening* e da anodização na resistência à fadiga em meio corrosivo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALCOA. **Aluminum company of American**. Disponível em: <<http://www.alcoa.com>>. Acesso em: 27 abr. 2016.

ALMEN, J. O.; BLACK, P.H. **Residual stresses and fatigue in metals**. New York: MacGraw Hill, 1963. 226 p.

ASM HANDBOOK. **Alloy phase diagram**. Materials Park, Ohio: ASM International, 1992. 1741 p. v.3.

ASM HANDBOOK. **Corrosion**. 9th ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1987. 3455 p. v.13.

ASM HANDBOOK. **Corrosion: fundamentals, testing, and protection**. 9th ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 2003. 2597 p. v. 13A

ASM HANDBOOK. **Fatigue and fracture**. Materials Park, Ohio: ASM International, 1996. 2592 p. v.19.

ASM HANDBOOK. **Fractography**. Materials Park, Ohio: ASM International, 1987. 857 p. v.12.

ASM HANDBOOK. **Heat treating**. Materials Park, Ohio: ASM International, 1991. 2173 p. v.4.

ASM HANDBOOK. **Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**, Materials Park, Ohio: ASM International, 1992. 3470 p.

ASM HANDBOOK. **Surface engineering**. Materials Park, Ohio: ASM International, 1996. 2535 p. v.5.

CAMARGO, J. A. M. **A influência do Shot-Peening e das anodizações crômica, sulfúrica e dura sobre a resistência à fadiga da liga Al 7050 – T 7451 de uso aeronáutico**. 2007. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

CHAMPAIGNE, J. Almen strip specifications. **The Shot Peener magazine**, Mishawaka, v. 11, n. 3, p. 6-13, sept. 1997.

CHAMPAIGNE, J. **Shot Peening: theory and application**. 1. ed. Gournay-sur-Marne: IITT-International, 1991. 274 p.

CHAUSSUMIER, M.; MABRU, C.; CHIERAGATTI, R.; SHAHZAD, M. Fatigue life model for 7050 chromic anodized aluminium alloy. **Procedia Engineering**, Maryland Heights, v. 66, p. 300-312. 2013.

CINA, B.; KAATZ, T.; ELDROR, I. The effect of heating Shot Peened sheets and thin plates of aluminium alloys. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 25, n. 9, p. 4101–4105, sept. 1990.

COSTA, Midori Yoshikawa Pitanga. **Fadiga em titânio aeronáutico revestido por PVD**. 2009. 123f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

DE LOS RIOS, E.R.; TROOL, M.; LEVERS, A. Improving the fatigue crack resistance of 2024-T351 aluminium alloy by Shot-Peening. In: CEAS Forum on Life Extension. **Aerospace Technology Opportunities**. Cambridge, United Kingdom, Royal Aeronautical Society, p. 26.1-26.8, 1999.

DEAN, W. A. Effects of alloying elements and impurities on properties. In: HATCH, J. E. (ed.). **Aluminum: properties and physical metallurgy**. Metals Park, Ohio: ASM. 1990 cap. 6, p. 200-41.

DHAFIR SADIK AL-FATTAL; SAMIR ALI AMIN AL-RABII; IBRAHIM MOUSA AL-SUDANI. Study the effect of Shot-Peening with anodizing process on the mechanical properties and fatigue life of aluminum alloy 2024-T3. **Advances in Natural and Applied Sciences**. Amã, v. 10, n. 15, p. 45-51, oct. 2016.

DIEPART, C. P. Modelling of Shot-Peening residual stresses: practical applications. **Materials Science Forum**, Dortmund, v. 163-165, p. 457- 464, 1994.

DINIZ, S. B.; PAULA, A. S.; BRANDÃO, L. P. M. **Tratamento térmico de ressolubilização em uma liga de alumínio 7475-T7351**. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 71., 2016, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABM, 2016. p. 1335-1343.

DOMINGUES, L.; FERNANDES, J. C. S.; CUNHA BELO, M.; FERREIRA, M. G. S.; GUERRA-ROSA, L. Anodising of Al 2024-T3 in a modified sulphuric acid/boric acid bath for aeronautical applications. **Corrosion Science**, Oxford, v. 45, n. 1, p. 149-160, jan. 2003.

GAO, Y. K.; WU, X. R. Experimental investigation and fatigue life prediction for 7475-T7351 aluminum alloy with and without Shot-Peening-induced residual stresses. **Acta Materialia**, Tarrytown, v. 59, n. 10, p. 3737-3747, mar. 2011.

LEE, E.; JEONG, Y.; KIM, S. S-N Fatigue behavior of anodized 7050-T7451 Produced in different electrolytes. **Metallurgical and Materials Transactions A**, Boston, v. 43, n. 8, p. 2002-2011, jun. 2012.

LEVASSEUR, G. The Growth Factor. **Metal Finishing**, Wetzikon, v. 3, p. 20-22, nov. 2002.

LUAN, W.; JIANG, C.; VICENT, J. R. Surface layer characteristics of TiB₂/ Al composite by stress peening. **Materials Transactions**, Sendai, v. 50, n. 4, p. 837-840, 2009.

MENEGHESSO, A. A. **Noções básicas sobre processo de anodização do alumínio e suas ligas**. Rio de Janeiro: C&P, set./out. 2006. Disponível em: <<http://www.italteco.com.br/artigostecnicos>>. Acesso em: 22 nov.2016.

MENEGHESSO, A. A. **Noções básicas sobre processo de anodização do alumínio e suas ligas**. C&P, Rio de Janeiro, jan/fev 2007. Disponível em: www.italteco.com.br/artigos_tecnicos. Acesso em: 22/11/2016.

MINTO, T. A. **Influência da anodização sulfúrica na resistência à fadiga da liga de alumínio 7175-T74**. 2012. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

O'HARA, P. Superfinishing and Shot-Peening of surfaces to optimise roughness and stress. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, Southampton, v. 25, p. 321-330, 1999.

RODRIGUEZ, R. M. H. P. **Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica**. 2003. 121f. Tese (Doutorado Engenharia e Ciência dos Materiais) – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2003.

ROQUE, V. R.; FONSECA, L. M.; DARIVA, C. G.; PINHEIRO, M. F.; GALIO, A. F. Avaliação mecânica do alumínio anodizado. In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 5, 2013, Bagé. **Anais...** Bagé: UNIPAMPA, 2013. Disponível em: <<http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/view/5752>>. Acesso em: 20 dez. 2017.

SCURACCHIO, B. G. **Tensões residuais induzidas por Shot-Peening e durabilidade de molas em lâmina**. 2012. 130f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SARHAN, AHMED A. D.; ZALNEZHAD, E.; HAMDI, M. The influence of higher surface hardness on fretting fatigue life of hard anodized aerospace AL7075-T6 alloy. **Materials Science & Engineering A**, Lausanne, v. 560, p. 377-387, 2013.

SHAHZAD, M.; CHAUSSUMIER, M.; CHIERAGATTI, R.; MABRU, C.; REZAI-ARIA, F. Influence of anodizing process on fatigue life of machined aluminium alloy. **Procedia Engineering**, Maryland Heights, v. 2, n. 1, p. 1015-1024, 2010.

SHAHZAD, M.; CHAUSSUMIER, M.; CHIERAGATTI, R.; MABRU, C.; REZAI-ARIA, F. Surface characterization and influence of anodizing process on fatigue life of Al7050 alloy. **Materials & Design**, Oxford, v. 32, n. 6, p. 3328-3335, fev. 2011.

SHAHZAD, M.; CHAUSSUMIER, M.; CHIERAGATTI, R.; MABRU, C.; REZAI-ARIA, F. Effect of sealed anodic film on fatigue performance of 2214-T6 aluminum alloy. **Surface and Coatings Technology**, Lausana, v. 206, n. 11-12, p. 2733-2739, fev. 2012.

SHARMA, M. C. Shot-Peening and blast cleaning. 1 ed. Bhopal: Dept. of Mechanical Engineering, Maulana Azad College of Technology, 2001. 336 p.

SHOT-PEENING. **CMV Leader in blasting**. Disponível em: <<http://www.cmvblasting.com>>. Acesso em: 21/11/2016.

SHOT-PEENING STAFF. Intensity Review. **The Shot Peener magazine**, Mishawaka, v. 23, p. 101, 2009.

SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**. 4th ed. Dearborn: SME, 1998. 1433 p.

SONG, P. S.; WEN, C. C. Crack closure and crack growth behaviour in shot peened fatigued specimen. **Engineering Fracture Mechanics**, Nova York, v. 63, n.3, p. 295-304, jun. 1999.

STARKE JR., E. A.; STALEY, J. T. Application of modern aluminum alloys to aircraft. **Progress in Aerospace Sciences**, Oxford, v. 32, n. 2-3, p. 131-172, 1996.

SURARATCHAI, M.; LIMIDO, J.; MABRU, C.; CHIERAGATTI, R. Modelling the influence of machined surface roughness on the fatigue life of aluminium alloy. **International Journal of Fatigue**, Amsterdam, v. 30, n. 12, p. 2119-2126, 2008.

TORRES, M. A. S.; VOORWALD, H. J. C. An evaluation of Shot-Peening, residual stresses and relaxation on the fatigue life. **International Journal of Fatigue**, Amsterdam, v. 24, p. 877-866, 2002.

TOTTEN, G. E.; MACKENZIE, D. S. **Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes**. New York: CRC, 2003, 1296 p. v. 1.

VERMA, B. B.; ATKINSON, J. D.; KUMAR, M. Study of fatigue behavior of 7475 aluminium alloy. **Bulletin of Materials Science**, Bangalore, v. 24, n. 2, p. 231–236, apr. 2001.

ZHAO, C.; GAO, Y. ; GUO, J.; WANG, Q.; FU, L.; YANG, Q. Investigation on residual stress induced by Shot-Peening. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Novelty, v.24, n. 3, p. 1340-1346, mar. 2015.

ZHAO, X.; WEI, G.; YU, Y.; GAO, Y.; ZHANG, A. An analysis of mechanical properties of anodized aluminum film at high stress. **Surface Review and Letters**, Cingapura, v. 22, n. 1, p. 1-7, oct. 2015.

ZUPANC, U.; GRUM, J. Surface integrity of Shot Peened aluminum alloy 7075-T651. **Journal of Mechanical Engineering**, Liubliana, v. 57, n. 5, p. 379-384, 2011.

WOOD, W. A. **Some Basic Studies of Fatigue in Metals: in fracture**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1959. Inc. New York, 1959.

APÊNDICE A – TABELAS DE RUGOSIDADE

Os valores de rugosidade detalhados em μm de cada corpo de prova estão apresentados nas tabelas abaixo:

Tabela 26: Valores da rugosidade - material base

Corpo de Prova	Ra			Média	Rz			Média	Rt			Média
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1	1,517	1,254	1,268	1,346	7,957	5,900	6,289	6,715	11,420	7,459	8,271	9,050
2	1,227	1,299	1,299	1,275	5,702	5,884	5,858	5,815	6,928	7,801	7,349	7,359
3	0,9974	0,901	0,917	0,938	4,761	4,441	4,516	4,573	6,909	4,968	6,964	6,280
4	0,929	1,04	0,914	0,961	4,678	4,845	4,684	4,736	6,183	7,666	5,329	6,393
5	1,197	1,159	1,226	1,194	5,763	5,936	6,002	5,90	8,032	8,228	8,100	8,120
6	1,178	1,259	1,231	1,223	5,253	5,957	5,674	5,628	8,032	8,179	7,385	7,865
7	1,150	1,263	1,273	1,229	5,452	5,723	5,569	5,581	7,349	6,751	7,538	7,213
8	1,037	1,29	1,092	1,14	5,844	5,543	5,236	5,541	8,338	6,311	6,586	7,078
9	0,902	0,922	0,890	0,905	4,714	4,725	4,578	4,672	5,463	5,164	5,371	5,333
10	0,925	0,933	0,923	0,927	4,744	4,758	4,583	4,695	5,463	5,536	5,701	5,567
11	1,226	1,219	1,236	1,227	5,578	5,531	5,580	5,563	5,969	6,391	6,305	6,222
12	0,90	0,916	0,890	0,902	4,674	4,747	4,282	4,568	5,292	5,298	4,84	5,143
13	1,265	1,159	1,232	1,219	5,34	5,128	5,849	5,439	6,281	5,689	10,5	7,490
14	0,893	0,939	0,894	0,909	4,463	4,631	4,337	4,477	5,09	5,347	5,493	5,310
15	1,22	1,069	1,049	1,113	5,647	5,037	4,946	5,21	6,299	5,744	5,811	5,951

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 27: Valores da rugosidade - material anodizado

Corpo de Prova	Ra			Média	Rz			Média	Rt			Média
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1	1,171	1,118	1,096	1,128	6,657	6,228	6,134	6,340	7,556	7,642	7,965	7,721
2	1,069	1,069	0,972	1,037	5,473	5,067	4,738	5,093	6,946	6,153	5,219	6,106
S	0,956	0,842	0,853	0,884	4,662	4,153	4,412	4,409	5,573	4,627	4,999	5,066
4	1,143	1,25	1,309	1,234	5,437	5,717	6,161	5,772	6,970	6,543	7,123	6,879
5	1,105	0,962	1,119	1,062	5,160	4,592	4,998	4,917	6,189	5,426	6,104	5,906
6	1,171	0,976	0,961	1,036	4,821	4,419	4,533	4,591	5,481	5,906	7,05	6,146
7	0,947	0,833	0,872	0,884	4,517	3,903	4,850	4,423	6,952	4,578	7,135	6,222
8	0,899	0,941	0,835	0,892	4,297	5,066	4,190	4,518	4,779	5,945	5,353	5,359
9	1,115	1,284	1,107	1,169	5,132	5,626	4,751	5,170	6,171	6,244	5,225	5,880
10	0,937	1,021	0,915	0,958	4,741	6,265	4,541	5,182	6,366	7,889	6,043	6,766
11	1,017	0,974	1,055	1,015	5,056	4,642	4,918	4,872	7,282	5,89	6,03	6,401
12	0,876	0,816	0,905	0,866	4,522	4,442	4,494	4,486	5,261	4,773	5,261	5,098
13	1,149	1,002	1,14	1,097	5,209	5,496	5,315	5,340	6,299	8,869	6,281	7,150
14	0,827	0,913	0,883	0,874	4,165	4,382	4,382	4,310	5,103	5,774	5,194	5,357
15	1,038	1,078	1,094	1,070	6,121	5,399	5,532	5,684	8,014	6,201	7,105	7,107
16	0,907	0,966	0,931	0,935	4,476	5,215	4,667	4,786	5,731	7,349	6,122	6,401

Corpo de Prova	(conclusão)											
	Ra			Média	Rz			Média	Rt			Média
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
17	0,886	0,86	0,901	0,882	4,522	4,566	4,616	4,568	5,969	5,652	6,073	5,898
18	1,144	1,203	1,091	1,146	5,092	5,458	5,735	5,428	5,902	7,129	8,625	7,219
19	1,003	1,131	0,915	1,016	4,588	5,281	4,893	4,921	5,225	5,725	6,995	5,982
20	1,174	1,043	1,262	1,160	5,509	4,799	5,737	5,348	6,525	5,487	7,392	6,468
21	1,964	1,232	1,462	1,553	13,1	8,45	8,255	9,935	28,89	13,43	11,92	18,080

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 28: Valores da rugosidade - material com *Shot-Peening*

Corpo de Prova	Ra			Média	Rz			Média	Rt			Média
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1	2,805	2,459	3,781	2,805	16,340	13,980	18,510	16,340	23,070	19,700	22,840	22,840
2	3,798	4,195	3,977	3,977	17,180	20,800	15,810	17,180	23,760	29,160	19,970	23,760
3	2,886	3,453	3,405	3,405	16,120	19,610	15,810	16,120	23,850	27,010	19,970	23,850
4	3,915	3,901	4,178	3,915	22,530	17,510	22,860	22,530	37,450	22,930	31,590	31,590
5	3,416	3,334	4,077	3,416	17,910	20,000	20,090	20,000	25,060	27,830	23,630	25,060
6	4,690	4,419	3,580	4,419	23,240	20,390	16,560	20,390	35,340	26,200	22,330	26,200
7	4,060	4,072	3,907	4,060	21,620	19,480	21,620	21,620	24,920	26,840	36,220	26,840
8	3,832	4,324	3,119	3,832	17,770	19,940	15,590	17,770	21,300	24,050	18,550	21,300
9	3,275	3,450	3,629	3,450	17,820	18,720	16,660	17,820	23,680	28,780	20,810	23,680
10	2,595	3,551	3,932	3,551	14,680	18,850	18,780	18,780	23,570	24,520	26,250	24,520
11	1,694	4,354	2,675	2,675	10,540	19,970	13,340	13,340	22,270	33,550	19,080	22,270
12	4,000	3,686	4,479	4,000	22,320	19,140	22,380	22,320	30,160	25,410	28,660	28,660
13	3,706	4,584	3,112	3,706	16,560	17,870	19,030	17,870	22,900	27,440	26,600	26,600
14	5,125	4,248	2,745	4,248	27,360	21,790	14,180	21,790	43,750	27,270	20,170	27,270
15	4,296	4,236	3,144	4,236	18,930	21,340	16,450	18,930	30,010	27,710	20,730	27,710
16	4,982	3,466	4,937	4,937	23,860	19,580	23,290	23,290	33,080	32,720	30,200	32,720
17	3,922	2,960	4,265	3,922	19,350	14,920	19,830	19,350	24,880	18,140	26,400	24,880

Fonte: Produção do próprio autor

Tabela 29: Valores da rugosidade - material com *Shot-Peening* e anodização

Corpo de Prova	Ra			Média	Rz			Média	Rt			Média
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
1	7,087	7,271	7,771	7,376	39,45	35,65	39,09	38,063	54,26	44,35	56,38	51,663
2	5,928	4,95	5,128	5,335	32,37	26,9	31,98	30,417	39,36	28,92	42,21	36,830
3	5,793	4,151	5,787	5,244	36,22	24,56	33,27	31,350	50,47	30,77	39,47	40,237
4	6,716	7,433	6,995	7,048	41,41	33,87	41,62	38,967	55,77	40,69	51,79	49,417
5	7,628	6,351	6,864	6,948	39,89	32,32	42,18	38,130	47,86	44,5	54,39	48,917
6	5,511	6,025	5,159	5,565	32,17	38,64	28,91	33,240	40,34	45,3	54,39	46,677
7	5,494	5,87	6,395	5,920	33,31	29,99	35,37	32,890	42,71	37,3	40,74	40,250
8	6,974	5,405	6,205	6,195	39,08	30,07	39,2	36,117	47,51	31,28	45,72	41,503
9	5,312	5,793	5,737	5,614	32,81	33,34	31,62	32,590	39,38	40,13	42,87	40,793

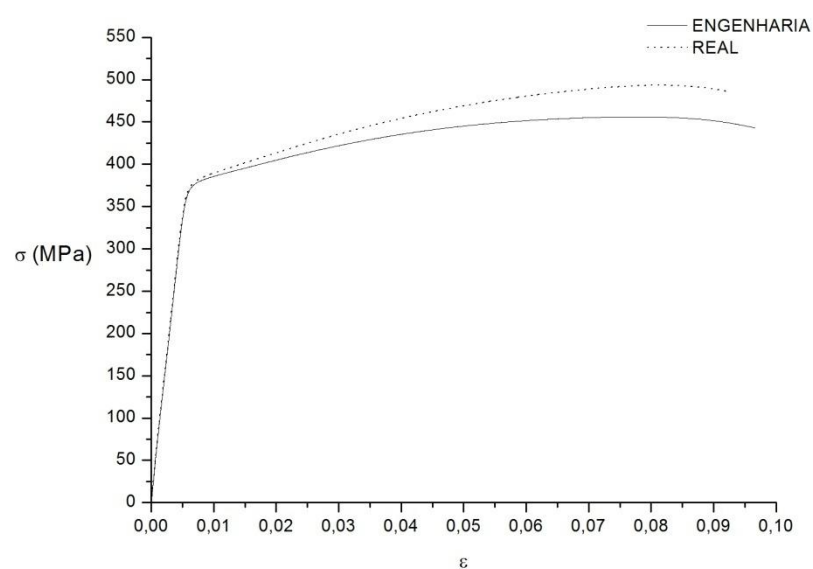
Corpo de Prova	(conclusão)											
	Ra			Média	Rz			Média	Rt			Média
	1	2	3		1	2	3		1	2	3	
10	6,573	5,984	6,024	6,194	32,91	32,53	37,93	34,457	42,75	40,64	43,69	42,360
11	6,558	6,754	6,156	6,489	32,58	29,23	34,52	32,110	49,96	41,98	44,69	45,543
12	6,336	6,417	6,468	6,407	34,19	37,65	33,46	35,100	43,65	46,61	41,38	43,880
13	6,737	6,506	6,086	6,443	40,54	38,44	34,79	37,923	49,71	51,48	41,36	47,517
14	6,289	5,934	6,031	6,085	35,93	32,44	34,19	34,187	44,35	40,82	40,16	41,777
15	5,758	6,75	6,844	6,451	37,06	36,61	35,39	36,353	41,83	51,8	43,85	45,827
16	6,151	5,707	6,479	6,112	36,99	34,43	37,36	36,260	41,75	39,27	45,63	42,217
17	5,929	7,051	5,58	6,187	32,8	37,43	32,93	34,387	44,71	45,27	41,83	43,937

Fonte: Produção do próprio autor

APÊNDICE B – CURVAS DE TENSÃO X DEFORMAÇÃO

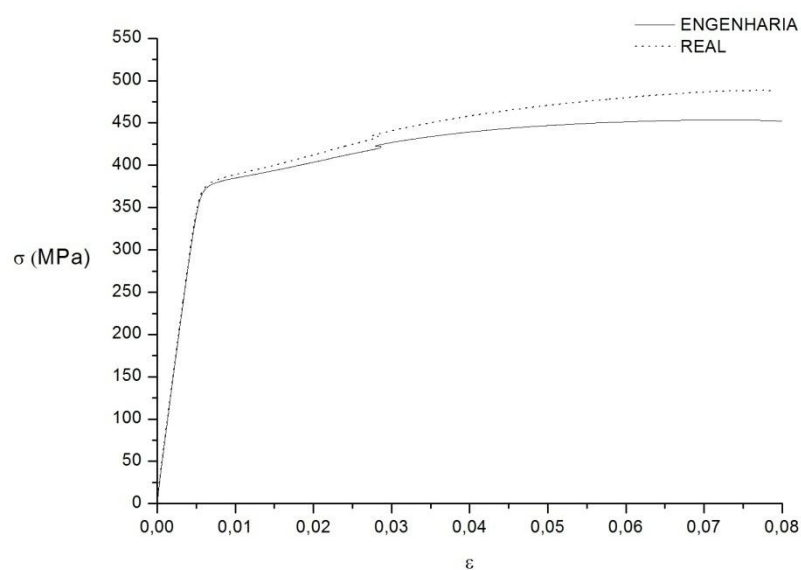
Os gráficos de Tensão x Deformação do ensaio de tração estão apresentados nas figuras abaixo:

Figura 97: Tensão x Deformação - material base - CDP 1



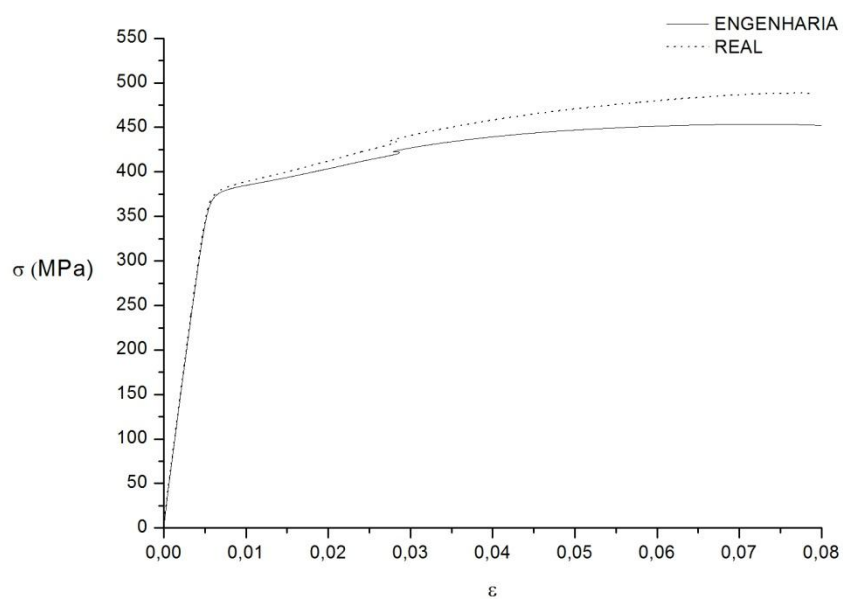
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 98: Tensão x Deformação - material base -CDP 2



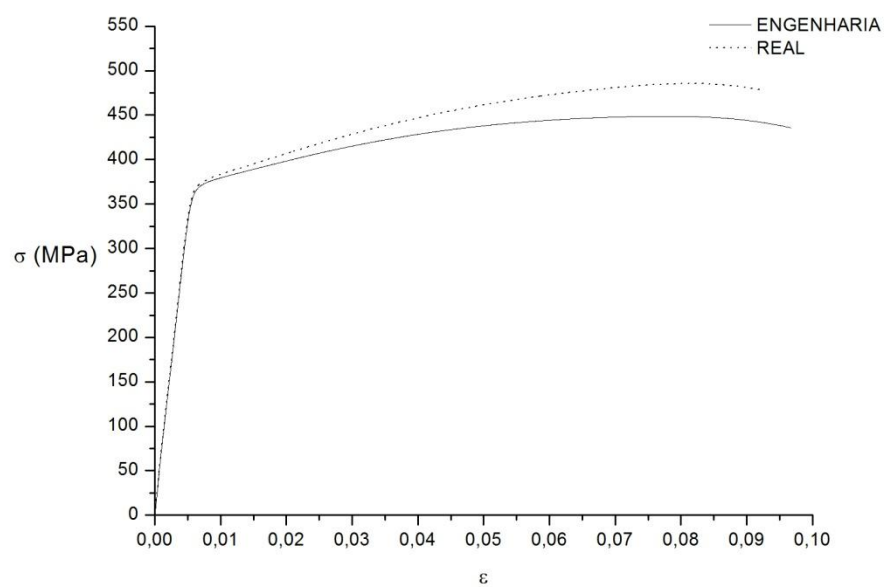
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 99: Tensão x Deformação - material base - CDP 3



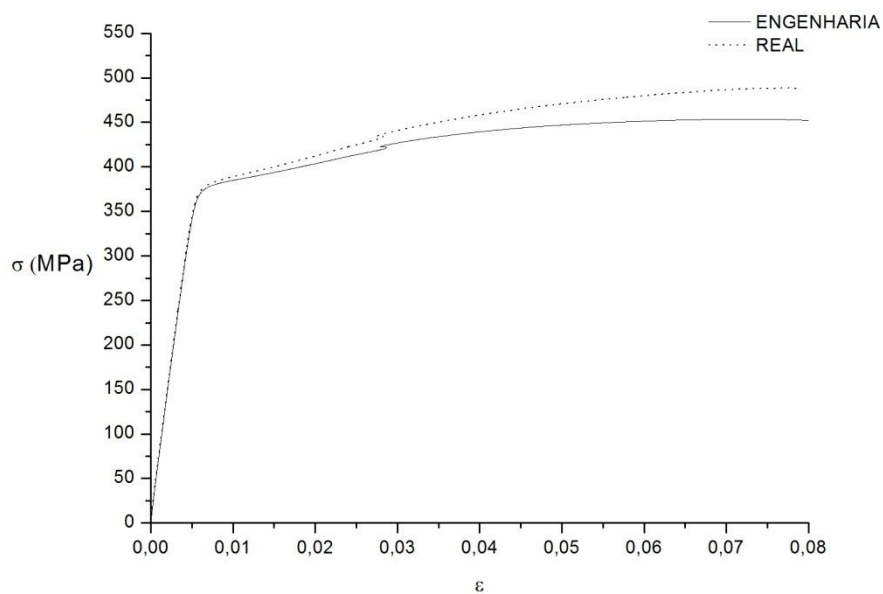
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 100: Tensão x Deformação - anodizado - CDP 1



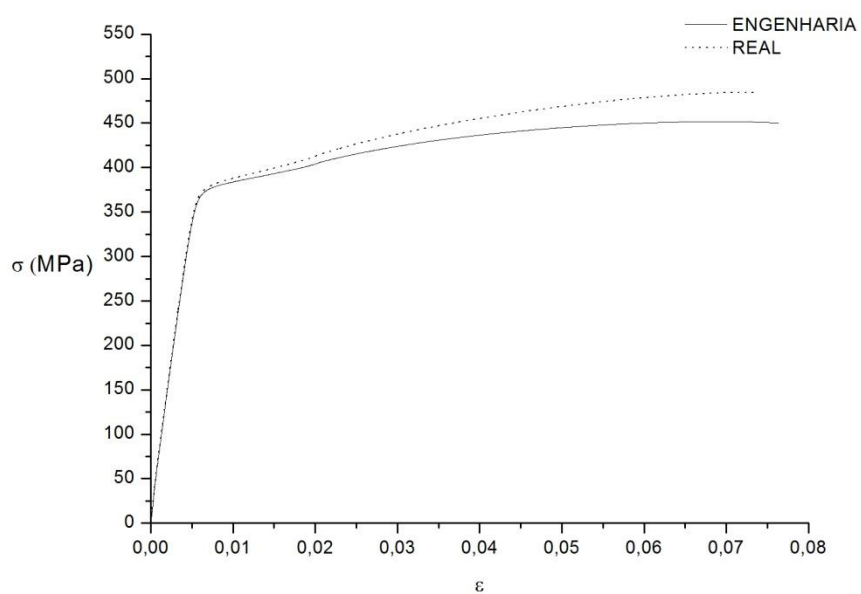
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 101: Tensão x Deformação - anodizado - CDP 2

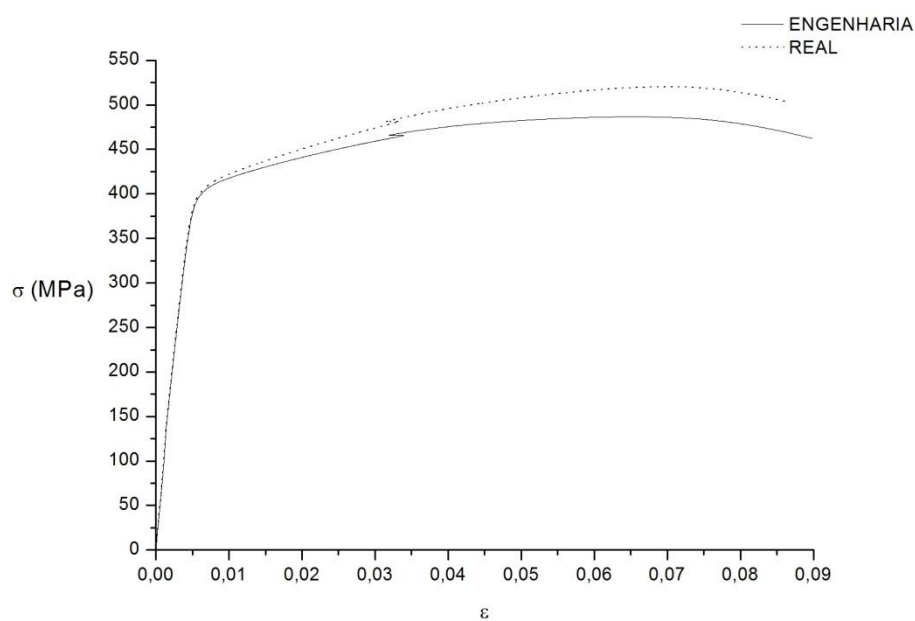


Fonte: Produção do próprio autor

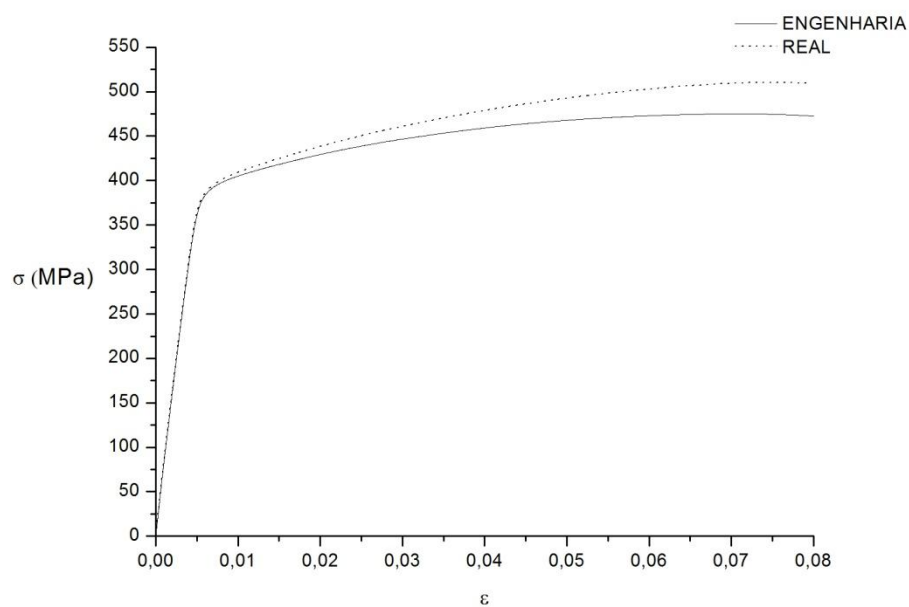
Figura 102: Tensão x Deformação - anodizado - CDP 3



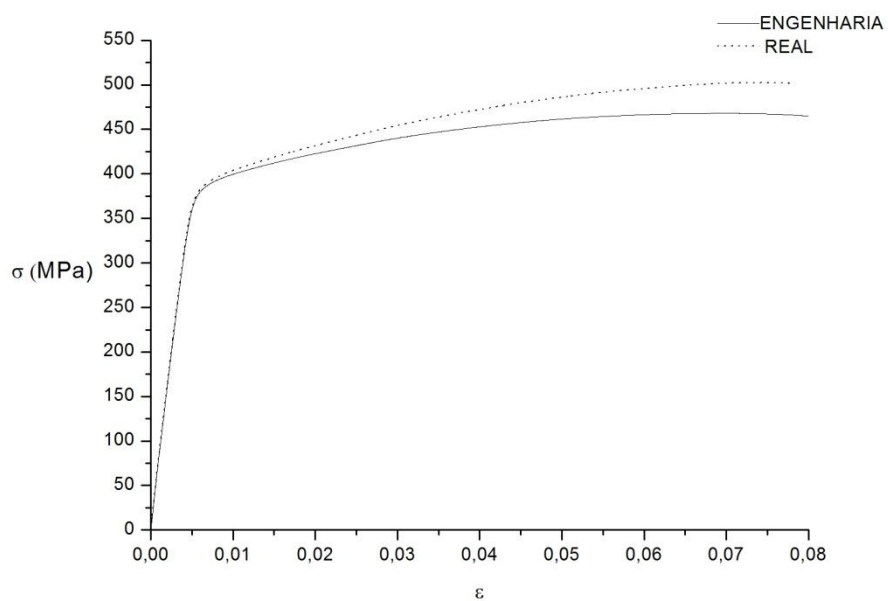
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 103: Tensão x Deformação - *Shot-Peening* - CDP 1

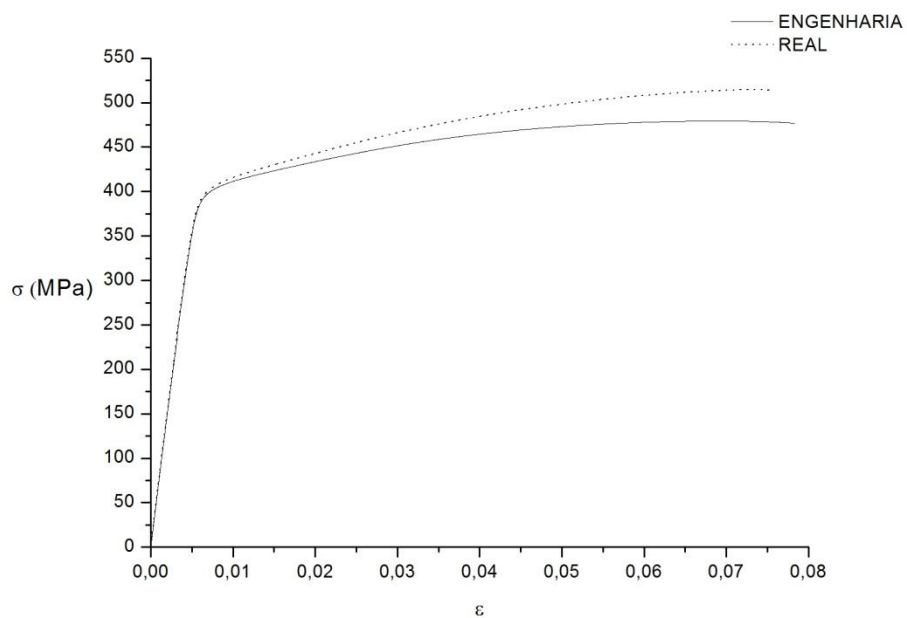
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 104: Tensão x Deformação - *Shot-Peening* - CDP 2

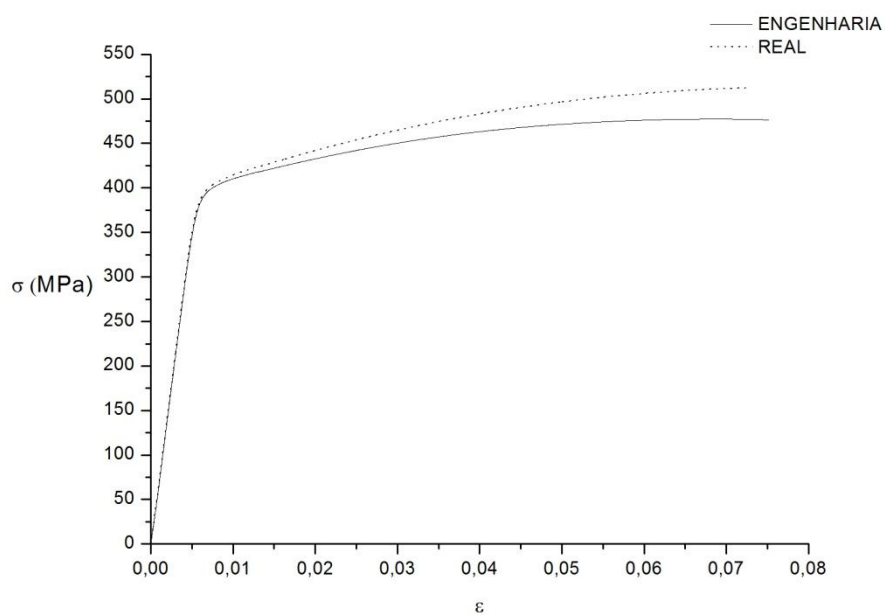
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 105: Tensão x Deformação - *Shot-Peening* - CDP 3

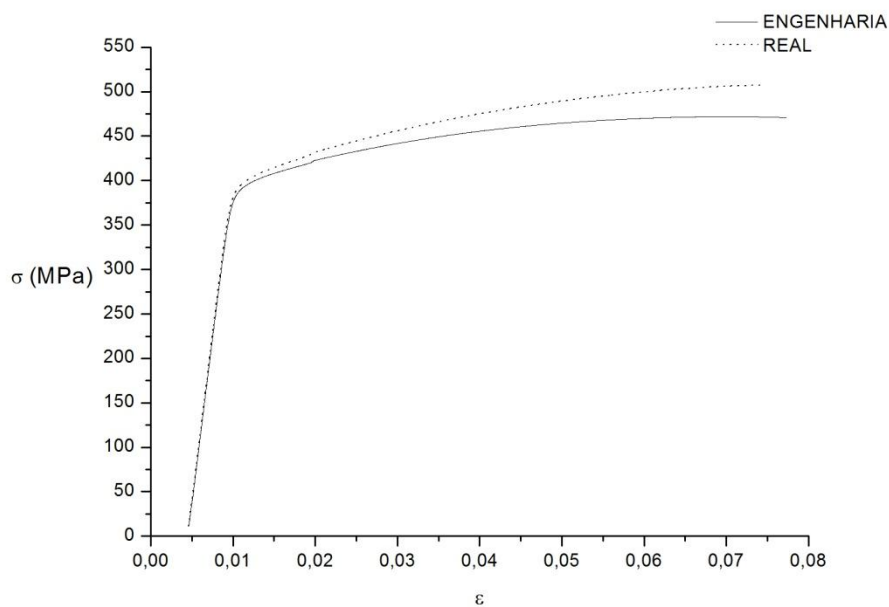
Fonte: Produção do próprio autor

Figura 106: Tensão x Deformação - *Shot-Peening* + anodizado - CDP 1

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 107: Tensão x Deformação - *Shot-Peening* + anodizado - CDP 2

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 108: Tensão x Deformação - *Shot-Peening* + anodizado - CDP 3

Fonte: Produção do próprio autor