



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

ERNANI AUGUSTO DA SILVA CORTINHAS

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO
AA5052 – H34

BELÉM
2019

ERNANI AUGUSTO DA SILVA CORTINHAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO
AA5052 – H34**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial. Área de concentração: Materiais e Metalurgia.

Orientador: Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma

BELÉM

2019

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

C829a Cortinhas, Ernani Augusto da Silva
Avaliação das propriedades mecânicas da liga de
alumínio AA5052 – H34 / Ernani Augusto da Silva Cortinhas.
— 2019.
90 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Industrial, Instituto de Tecnologia, Universidade
Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Ligas de alumínio. 2. Liga 5052. 3. Construção
naval. 4. Propriedades mecânicas. I. Título.

CDD 620

ERNANI AUGUSTO DA SILVA CORTINHAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO
AA5052 – H34**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial. Área de concentração: Materiais e Metalurgia.

Data de Aprovação: 23 de agosto de 2019.

Banca examinadora:

_____	- Orientador/Presidente
Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma	PPGEI/UFPA
_____	- Membro Interno
Prof. Dr. Laércio Gouvêa Gomes	PPGEI/UFPA
_____	- Membro Externo
Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra	PPGEE/UFPA
_____	- Membro Externo
Prof. Dr. Hilton Túlio Costi	MPEG

À família, obra fantástica de Deus, pela qual nos doamos, trabalhamos, estudamos...vivemos intensamente. Que nos ampara, nos eleva e nos faz chegar até mesmo onde Deus guardou em absoluto sigilo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Maria do Vale QUARESMA, pela dedicação paternal no tratar das coisas do GPEMAT e PPGEI. Com quem eu aprendi novas maneiras de exercer a docência. Homem perseverante na busca da perfeição acadêmica. Aquele que resume com exatidão as virtudes de um estudioso: Curiosidade e Paciência.

Aos amores incondicionais que Deus te apresenta nesta vida sob o disfarce de Família e não impõe resiliências emocionais para aceitarmos. Ao contrário, faz de cada encontro oportunidades para sermos melhores, generosos e agradecidos. CILENE, RENATA E RENAN representam esta magia da presença Divina na vida.

Ao MSc. AÉLCIO DE JESUS MONTEIRO DOS SANTOS, companheiro de longas aventuras acadêmicas nesta vida. Agradeço imensamente pelo compartilhamento de tantas informações obtidas nas pesquisas bibliográficas e nos experimentos práticos realizados.

A meus amigos Mestrandos, com vocês os momentos foram gratificantes desde a gênese de toda esta caminhada. Neste momento, nesta fase mais solitária e restrita da trajetória, olhar para trás e reviver o ambiente das salas de aula faz renovar a motivação e o compromisso com cada um de vocês.

“Quem quiser ser líder deve ser primeiro servidor.

Se você quiser liderar, deve servir.”

Jesus Cristo.

RESUMO

Neste trabalho foram avaliadas as variações dos parâmetros de resistências mecânicas da liga comercial AA5052-H34, considerando as variações das propriedades resistentes do metal, quando submetido a diferentes ângulos de aplicação da força, tendo como referência o sentido construtivo da laminação. Foram utilizados 18 (dezoito) corpos de provas, conforme a norma NBR-7549/2008, os quais foram cortados em máquinas de eletro-erosão, 6 (seis) no sentido longitudinal à laminação, 6 (seis) no sentido transversal à laminação e 6 (seis) cortados a 45° do sentido em que as chapas foram laminadas. As amostras foram analisadas macro e micro estruturalmente, depois passaram por ensaios de tração, onde foram analisados os parâmetros de resistências mecânicas para os diferentes ângulos de aplicação da força em relação ao sentido fabril da laminação e aos aspectos microestruturais das fraturas. As instabilidades de Efeito Portevin–Le Chatelier (PLC) para diferentes ângulos e diferentes taxas de deformação foram avaliados sob o ponto de vista do perfil das curvas obtidas, tempo para carregamento e relaxamento das tensões internas e variações das amplitudes de tensões obtidas. Os diferentes planos das fraturas também foram submetidos à investigação através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e as imagens fractográficas geradas foram utilizadas como recurso tecnológico para avaliação dos resultados obtidos.

Palavras-chaves: Ligas de alumínio. Liga 5052. Construção naval. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

In this work the variations of the mechanical resistance parameters of the commercial alloy AA5052-H34 were evaluated, considering the variations of the resistant properties of the metal, when subjected to different angles of force application, having as reference the constructive direction of the rolling. Eighteen (18) specimens were used, according to NBR-7549 / 2008 standard, being cut in electro-erosion machines, 6 (six) longitudinally to rolling, 6 (six) transverse to rolling and 6 (six) cut at 45 ° from the direction in which the sheets were laminated. The samples were analyzed macro and micro structurally, then underwent tensile tests, where the parameters of mechanical strength for the different angles of force application in relation to the manufacturing direction of the lamination and the microstructural aspects of the fractures were analyzed. Portevin - Le Chatelier (PLC) effect instabilities for different angles and different strain rates were evaluated from the point of view of the profile of the curves obtained, time for loading and relaxation of internal stresses and variations of the amplitude of stresses obtained. The different planes of the fractures were also subjected to investigation by Scanning Electron Microscopy (SEM) and the generated fractographic images were used as a technological resource to evaluate the results obtained.

Key words: Aluminum alloys. Alloys 5052. Shipbuilding. Mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Embarcações típicas fabricadas em alumínio naval	16
Figura 2 - Detalhe construtivo de uma embarcação convencional	17
Figura 3 - Diagrama de fases do sistema Al - Mg	23
Figura 4 - Diferentes processos de encruamento para as ligas de alumínio	24
Figura 5 - Propriedades dos elementos de composição da Liga AA 5052-H34	26
Figura 6 - Processos de conformação mecânica a frio para redução da seção transversal do metal	27
Figura 7 - Perfil do diagrama Tensão x Deformação	28
Figura 8 - (a) Modelo de OROWAN (b) Coalescência de microcavidades no plano da fratura	30
Figura 9 - (a) Movimento das discordâncias através de partículas pequenas e macias	30
Figura 10 - Difusão dos átomos de elemento de liga em direção às discordâncias	31
Figura 11 - Taxa de deformação e temperatura (faixa) para ocorrência de banda serrilhada do efeito PLC na liga Al-Mg	31
Figura 12 - Dependência do fluxo de tensão e da taxa de deformação para uma liga de Al-Mg à temperatura ambiente	32
Figura 13 - Variação do efeito PLC em função da concentração de elemento soluto e variação na taxa de deformação	34
Figura 14 - Comportamento da curva de Efeito PLC em função da concentração do elemento de liga e variação da taxa de deformação	35
Figura 15 - Gráfico variação da tensão em função do tempo para destravamento (T_w) e tempo de deslocamento (T_d) das discordâncias	36
Figura 16 - Comportamento das instabilidades e distribuição das quedas de tensão nos materiais laminados e recristalizados	38
Figura 17 - Microestrutura da fratura de um material laminado (A, C) e material recristalizado (B, D)	39

Figura 18 - Variação na densidade do efeito PLC em função da variação na taxa de deformação do material.....	40
Figura 19 - Representação das metodologias disponíveis para medição dos dimples	42
Figura 20 - Análise de composição química (A) Espectrômetro de massa (B)	45
Figura 21 - (A) Amostra embutida; (B) Politriz; (C) Estereoscópio Leica Mod:Ez446	
Figura 22 - HV-1000B para ensaios de microdureza	47
Figura 23 - Máquina de ensaio de tração modelo KRATOS	47
Figura 24 - Corpos de Prova fabricados de acordo com a Norma ABNT NBR 7549:2008	48
Figura 25 - Microscópio Ótico.....	48
Figura 26 - Microscópio Eletrônico de Varredura	48
Figura 27 - Análise macroestrutural do metal.....	49
Figura 28 - Análise Microestrutural MEV / EDS.....	50
Figura 29 - Análise de EDS e espectro da análise	51
Figura 30 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 0° e taxa de deformação de $2,5 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo	54
Figura 31 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 45° e taxa de deformação de $2,5 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo	56
Figura 32 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 90° e taxa de deformação de $2,5 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo	58
Figura 33 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 0° e taxa de deformação de $5,0 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo	60
Figura 34 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 45° e taxa de deformação de $5,0 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo	62

Figura 35 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 90° e taxa de deformação de 5,0 x 10 ⁻³ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo	64
Figura 36 - Gráficos Tensão x Tempo para o ângulo anisotrópico 0°, nas taxas de deformação 2,5 x 10 ⁻³ / min e 5,0 x 10 ⁻³ / min	68
Figura 37 - Gráficos Tensão x Tempo para o ângulo anisotrópico 45°, nas taxas de deformação 2,5 x 10 ⁻³ / min e 5,0 x 10 ⁻³ / min.	70
Figura 38 - Gráficos Tensão x Tempo para o ângulo anisotrópico 90°, nas taxas de deformação 2,5 x 10 ⁻³ / min e 5,0 x 10 ⁻³ / min.	72
Figura 39 - Macro e Micrografia da fratura de uma amostra com aspecto dúctil...75	
Figura 40 - Macro e Micrografia da fratura de uma amostra com aspecto frágil ...75	
Figura 41 - Imagens das microestruturas nos planos das fraturas da liga AA5052-H34 no ângulo 0° e perfil gráfico das oscilações de Efeito PLC.....	76
Figura 42 - Imagens das microestruturas nos planos das fraturas da liga AA5052-H34 no ângulo 45° e perfil gráfico das oscilações de Efeito PLC.....	77
Figura 43 - Imagens das microestruturas nos planos das fraturas da liga AA5052-H34 no ângulo 90° e perfil gráfico das oscilações de Efeito PLC.....	78
Figura 44 - Medição das dimensões L e W das microcavidades presentes nas imagens MEV dos diferentes ângulos anisotrópicos e na taxa de deformação 2,5 x 10 ⁻³ , utilizando o software MOTIC PLUS 07.....	79
Figura 45 - Medição das dimensões L e W das microcavidades presentes nas imagens MEV dos diferentes ângulos anisotrópicos e na taxa de deformação 5,0 x 10 ⁻³ , utilizando o software MOTIC PLUS 07.....	80
Figura 46 - Planilha de medição das dimensões L (Lenght) e W (Width) das microcavidades (2,5x10 ⁻³)	80
Figura 47 - Planilha de medição das dimensões L (Lenght) e W (Width) das microcavidades (5,0x10 ⁻³)	81
Figura 48 - Parâmetros mecânicos de resistência a tração em ensaio na taxa de 2,5 x 10 ⁻³	82
Figura 49 - Parâmetros mecânicos e curvas de resistência a tração em ensaio na taxa de 5,0 x 10 ⁻³	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Designação da ligas de alumínio.....	21
Tabela 2 - Composição química da liga 5052 - H34.....	23
Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga 5052 – H34.....	25
Tabela 4 - Propriedades físicas da liga 5052-H34.....	25
Tabela 5 - Características gerais liga 5052 - H34	26
Tabela 6 - Identificação e denominação da razão L/W	44
Tabela 7 - Composição química encontrada.....	49
Tabela 8 - Composição química encontrada no EDS.....	51
Tabela 9 - Tabela de parâmetros obtidos nos procedimentos de ensaio (Taxa 2,5 x 10 ⁻³ / min)	52
Tabela 10 - Tabela de parâmetros obtidos nos procedimentos de ensaio (Taxa 5,0 x 10 ⁻³ / min.)	52
Tabela 11 - Comparativo das propriedades mecânicas médias obtidas	53
Tabela 12 - Resumo das Taxas de Relaxação (TR) para os diferentes ângulos anisotrópicos e taxas de deformação aplicadas nos ensaios de tração	74
Tabela 13 - Comparação das propriedades mecânicas (taxa deformação 2,5x10 ⁻³).....	82
Tabela 14 - Comparação das propriedades mecânicas (taxa deformação 5,0x10 ⁻³).....	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Letras latinas

SC	Produto final obtido a partir de um processo de laminação
DC	Produto originado de um processo de recristalização ou fundição
RD	Direção linear em relação ao sentido de laminação
TD	Direção transversal em relação ao sentido de laminação
QD	Direção diagonal em relação ao sentido de laminação
NL	Número de microcavidades x mm
NI	Número de microcavidades medidas
G	Tamanho médio das microcavidades
d θ	Diâmetro de uma microcavidade
d1	Maior diâmetro de uma microcavidade
d2	Menor diâmetro de uma microcavidade
D θ	Diâmetro médio de uma microcavidade
dX	Diâmetro de uma microcavidade
DX	Diâmetro médio de uma microcavidade
L	Comprimento (length)
W	Largura (width)
L/W	Razão comprimento/largura

Abreviações e siglas

FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
GPEMAT	Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais
UFPA	Universidade Federal do Pará
LRT	Límite de resistência a Tração
NBR	Norma Brasileira
PPGEI	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial
BNVC	Base Naval de Val de Cans
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MPa	Mega Pascal (Unidade de Pressão)
PLC	Portevin – Le Chatelier

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2 MOTIVAÇÃO	17
1.3 OBJETIVOS	18
1.3.1 Objetivo Geral	18
1.3.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	19
2.2 LIGA ALUMÍNIO 5052-H34	22
2.3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO	27
2.3.1 Laminação	27
2.4 EFEITO DAS FORÇAS MECÂNICAS SOBRE AS LIGAS Al - Mg	28
2.4.1 Efeito dos esforços de tensão	29
2.4.2 Efeito Potervin-Le Chatelier (PLC)	31
2.4.3 Variação do tempo para a elevação da tensão de destravamento das discordâncias e tempo de relaxamento da tensão	35
2.4.4 Efeito da Anisotropia sobre a resistência mecânica	36
2.5 MICROESTRUTURA DAS FRATURAS	40
2.5.1 Perfil geométrico das microestruturas	41
2.5.2 Equacionamento matemático	42
3 MATERIAL E MÉTODO	45
3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA	45
3.2 EMBUTIMENTO A FRIO	45
3.3 MICRODUREZA	46
3.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO	47
3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	48
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1 ANÁLISE QUÍMICA	49
4.2 CARACTERIZAÇÃO MACROESTRUTURAL	49
4.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL	50

4.4	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	51
4.5	ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	52
4.5.1	Ensaio de tração na taxa de deformação $2,5 \times 10^{-3}$ /min	52
4.5.2	Ensaio de tração na taxa de deformação de $5,0 \times 10^{-3}$ /min	52
4.5.3	Efeito Portevin- Le Chatelier (PLC) em relação ao Perfil das Curvas.....	53
4.5.4	Avaliação das taxas de Relaxação das instabilidades de Efeito PLC	66
4.5.5	Caracterização da fratura.....	74
4.5.6	Procedimentos para medição das microcavidades	79
4.5.7	Comparativo das propriedades mecânicas	82
5	CONCLUSÕES.....	84
6	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As ligas de alumínio, cujo peso específico é 2,7 g/cm³ contra 7,8 g/cm³ do aço, passaram a ter um grande interesse desde que houve uma demanda maior por embarcações com maior capacidade de carga, mais velozes, com menor potência propulsora instalada e conseqüentemente mais econômicas, de melhor desempenho e com menor nível de emissão de gases poluentes.

Além do peso específico, outra característica importante a ser considerada são as propriedades mecânicas que o alumínio passa a ter quando são adicionados elementos de ligas a sua composição. Por exemplo, as ligas de alumínio utilizadas em estruturas com alta resistência específica apresentam uma relação de resistência/peso de 112 MPa/kg enquanto que os aços navais apresentam esta relação de apenas 76 MPa/kg. Logo, um casco ou uma superfície de alumínio, tipicamente, pesam aproximadamente a metade de seus equivalentes em aço e oferecem a mesma resistência estrutural. Ainda que o custo inicial seja bem superior para uma obra em alumínio, este custo excedente passa a ser vantajoso no tempo, em função da baixo custo de manutenção demandado por uma obra em alumínio.

Figura 1 - Embarcações típicas fabricadas em alumínio naval



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Dentre as ligas não tratadas termicamente, as mais utilizadas na indústria naval são as ligas de alumínio e magnésio (série 5000) por apresentarem elevada resistência mecânica aliada à boa soldabilidade.

1.2 MOTIVAÇÃO

A motivação desta pesquisa se deu pela percepção do grande potencial de crescimento da construção naval na região, a qual utiliza as ligas de alumínio naval como metal estruturante e de revestimento, tendo em vista aproveitar as grandes vantagens que este metal proporciona no processamento e na qualidade final da embarcação, mitigação das desvantagens conhecidas e naturalmente encontradas nos projetos navais.

Além disso, nota-se reduzido conhecimento por parte dos armadores sobre as propriedades mais específicas das ligas de alumínio e a relação de custo x benefício que vem junto com a opção de utilização desta matriz metálica, considerando este metal como alternativa direta para substituição das ligas de aço, as quais são, de longe, o material mais utilizado na construção naval moderna.

Também observa-se o desconhecimento dos construtores navais quanto à aplicação do chapeamento de revestimento e fabricação de perfis estruturais segundo a anisotropia mais favorável à resistência do material aos esforços atuantes

Figura 2 - Detalhe construtivo de uma embarcação convencional



Fonte: Escola Náutica do Guarujá (2016)

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho da liga AA5052-H34 submetida às taxas de deformação $2,5 \times 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$ e $5,0 \times 10^{-3} \text{ seg}^{-1}$.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para diferentes ângulos anisotrópicos (0° , 45° e 90°) e taxas de deformação:

- ✓ Caracterizar o Efeito Portevin-Le Chatelier (PLC) em relação ao Perfil das Curvas;
- ✓ Caracterizar o Efeito Portevin- Le Chatelier (PLC) em relação às Taxas de Relaxação;
- ✓ Avaliar o comportamento das Tensões Críticas e Tensões de Ruptura;
- ✓ Estudar as características da microestrutura cristalográfica no plano das fraturas;
- ✓ Avaliar a ocorrência de anisotropia nas aplicações reais da liga AA5052-H34;
- ✓ Avaliar os resultados obtidos nos ensaios com corpos de prova normatizados e sua aplicabilidade prática na construção naval convencional.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial. Há sete milênios, ceramistas da Pérsia já produziam seus vasos com um tipo de barro que continha óxido de alumínio, que hoje conhecemos como alumina. Trinta séculos mais tarde, egípcios e babilônios usaram uma outra substância contendo alumínio na fabricação de cosméticos e produtos medicinais (ABAL, 2006).

A produção de todos os outros metais não ferrosos é superada pela produção do alumínio atualmente, pois no mundo é o elemento metálico não ferroso mais consumido. Suas características físico-químicas estão relacionadas com a grande variedade de aplicações, com destaque para seu baixo peso específico, quando comparado com outros metais de grande consumo, resistência à corrosão e alta condutividade elétrica e térmica.

Nos primórdios, quando se conhecia pouco o alumínio e sua produção era de custo elevado, sua utilização se limitava a serviços artesanais e de alto custo como em placas comemorativas e estatuetas. Com os conhecimentos adquiridos e o desenvolvimento industrial dos processos, maiores quantidades de alumínio passaram a ser produzidas, assim a produção aumentou e o preço reduziu, sendo aplicado na fabricação de utensílios de cozinha e em algumas peças da indústria automobilística. Já no início do século XX, as indústrias começaram a trabalhar a combinação de outros elementos químicos com o alumínio visando melhorar suas propriedades mecânicas.

O alumínio é um metal relativamente macio, durável, leve, maleável e dúctil, com aparência variando de prateado a cinza fosco, dependendo da rugosidade da superfície. Não é magnético e não se inflama facilmente. O limite de elasticidade do alumínio puro é 7-11 MPa, já nas ligas de alumínio este limite varia de 200 MPa a 600 MPa. O alumínio tem cerca de um terço da densidade e rigidez do aço. É facilmente usinado, moldado e extrudado (SUNNY et al., 2013).

O número atômico do alumínio é 13. Significa que um átomo de alumínio é composto por 13 elétrons, cada um tendo uma carga elétrica negativa unitária, dispostos em três órbitas em torno de um núcleo altamente concentrado, com carga

positiva de 13. Os três elétrons na órbita externa dão ao átomo de alumínio uma camada de valência de +3.

Quando os metais passam do estado fluido para o estado sólido estes assumem uma estrutura cristalina, na qual os átomos se arranjam em padrões simétricos e organizados. Assim como o Au (Ouro), a Ag (Prata) e o Cu (Cobre), metais dúcteis, o alumínio forma uma estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada) que quer dizer em cada vértice de um cubo existe um átomo e em cada face deste cubo existe outro átomo.

A leveza é uma das principais características do alumínio. Seu peso específico é de cerca de $2,70 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre. Essa característica, aliada ao aumento da resistência mecânica por adição de elementos de liga, torna o alumínio o metal perfeito para projeto e construção de estruturas fortes e leves, particularmente vantajosas para a indústria de transporte aeroviária, terrestre e naval.

As ligas de alumínio podem, conforme sua composição, ser divididas em duas categorias, cada qual com seu próprio sistema de classificação: composições para fundição e composições para trabalho mecânico. As composições para trabalho mecânico são classificadas em séries de quatro dígitos, de acordo com o principal elemento adicionado, conforme ilustra a Tabela 1.

O significado dos 4 dígitos diferem-se entre a série 1xxx e demais séries. Na série 1xxx, o segundo algarismo, se igual a zero, indica que as impurezas presentes são as naturais do processo de fabricação. Se diferente de zero, indica que há controle especial na concentração de determinada impureza. O terceiro e quarto dígitos indicam o percentual de alumínio, além dos 99% existentes. Por exemplo, no caso de um alumínio 1045, o percentual de alumínio presente será 99,45%, sendo o restante impurezas naturais do processo.

Para as séries de 2xxx a 9xxx, o primeiro dos dígitos indica a série a qual a liga pertence e, por conseguinte o principal elemento de adição. O segundo dígito irá indicar se a composição da liga é igual à liga desenvolvida originalmente (se igual à zero) ou se a liga original sofreu alteração na sua composição química (algarismos de 1 a 9). O terceiro e quarto dígitos apenas diferenciam as ligas dentro de uma mesma série.

Dentre estas séries, é ainda possível fazer uma subdivisão quanto ao mecanismo de endurecimento ao qual as ligas respondem e que promove o aumento da dureza e da resistência mecânica. As ligas das séries 2xxx, 6xxx e 7xxx são classificadas como tratáveis termicamente, enquanto as ligas das séries 3xxx, 4xxx e 5xxx são denominadas de endurecíveis por deformação. A seguir descreve-se as características gerais de cada uma das séries de ligas de alumínio, bem como suas mais frequentes áreas de aplicação (COMPOSITION; MECHANICAL, 2016).

Tabela 1 - Designação da ligas de alumínio

SÉRIE	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	PRINCIPAIS APLICAÇÕES
1XXX	Al comercialmente puro	Contatos elétricos
2XXX	Al-Cu	Industria aeronáutica
3XXX	Al-Mn	Várias
4XXX	Al-Si	Pistões fundidos de motores
5XXX	Al-Mg	Construção naval
6XXX	Al-Mg-Si	Perfis extrudados
7XXX	Al-Zn	Industria mecânica pesada
8XXX	Al-Sn,e (Li, Fe, Cu, Mg)	Aplicações aeroespaciais

Fonte: Adaptado de ABAL [1]

A adição de metais ao alumínio visa aumentar a resistência à tração, a tensão de escoamento e a sua dureza, correspondendo também a uma redução do alongamento e, em alguns casos, uma melhoria das propriedades anticorrosivas (PEREIRA, 2010). Segundo sua composição, podem ser divididas em duas categorias, cada qual com seu próprio sistema de classificação: composições para fundição e composições para trabalho mecânico. Ligas navais são composições para trabalho mecânico e são classificadas em séries de quatro dígitos, de acordo com o principal elemento adicionado (COBDEN; BANBURY, 1994).

2.2 LIGA ALUMÍNIO 5052-H34

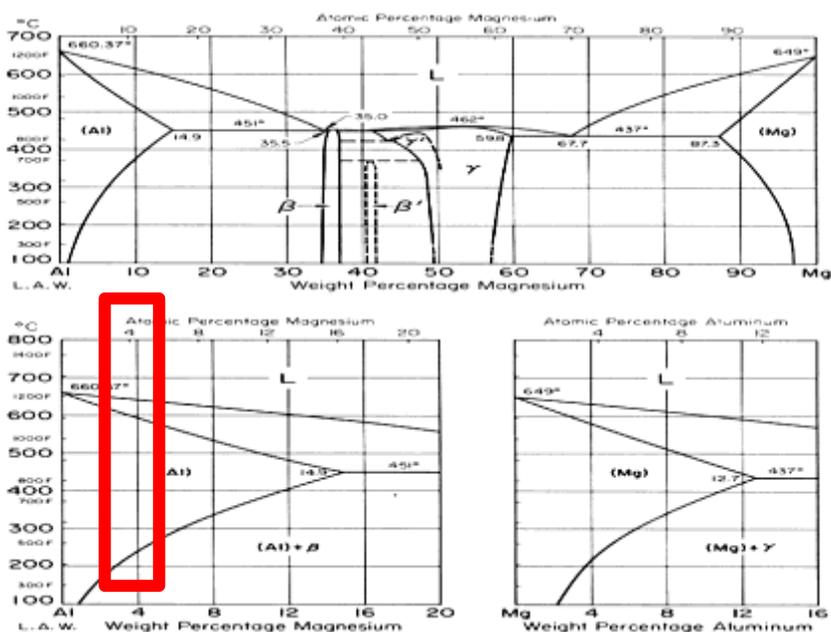
A liga de alumínio denominada 5052, aqui entendida como pertencente ao grupo da série 5000, é liga metálica de ampla aplicação na indústria naval devido à alta resistência mecânica e imunidade à ação de agentes corrosivos, comuns no ambiente marítimo e conceitos fundamentais na elaboração de um projeto naval.

Estas propriedades favoráveis são alcançadas pela introdução dos elementos de liga no interior da matriz metálica. O principal elemento de liga desta série (5000) é o Magnésio (Mg), o qual empresta seu nome para denominação técnica desta série. As ligas de alumínio da série 5000 são as ligas de Al-Mg e assim se enquadra a liga de alumínio 5052, a qual apresenta uma concentração percentual de 2.5% de Mg. Na Figura 3, a qual mostra o diagrama de fases do sistema Al-Mg, podemos visualizar o limite de solubilidade do elemento Mg na matriz metálica Al nas diversas temperaturas e valores de concentração.

Outra grande vantagem da liga de alumínio 5052 é sua boa conformabilidade a frio, possibilitando tratamento de endurecimento ou encruamento a frio, através de processos mecânicos de conformação para diversos níveis de dureza. Quando submetida a processos metalúrgicos de soldagem, outra prática muito comum na construção naval, mantém excelente resistência aos esforços mecânicos e à ação corrosiva na região de soldagem.

De acordo com Bhowmik e Mishra (2016), a liga 5052 possui excelente resistência à corrosão e elevada relação resistência/peso. Na indústria naval, são utilizadas as ligas de Al-Mg com teores de magnésio que variam de 2% a 5% (HATCH, 1990) e esta faixa de concentração está representada (retângulo vermelho) na faixa ampliada e detalhada da Figura 3, tendo a linha de solubilidade como referência para demonstração da baixa solubilidade do Mg na matriz de alumínio.

Figura 3 - Diagrama de fases do sistema Al - Mg



Fonte: Adaptado de INFOMET (2018)

A Tabela 2 abaixo traz à mostra a composição química teórica completa esperada para uma liga de alumínio 5052 disponível no mercado.

Tabela 2 - Composição química da liga 5052 - H34

Al	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Zn	Cu
96 - 97%	2,2 – 2,8%	0,10%	0,40%	0,25%	0,15 – 0,35%	0,10%	0,10%

Fonte: Adaptado de Atlas Steels – Al Alloy Data Sheet – 5052 – H34 (COMPOSITION; MECHANICAL, 2016)

A denominação H34 está relacionado ao processo de tratamento de endurecimento a frio. O primeiro dígito com valor 3 se aplica a produtos encruados nos quais as propriedades mecânicas são estabilizadas por um tratamento térmico de baixa temperatura ou como resultado de um aquecimento durante a fabricação, melhorando a ductilidade. A Figura 4 detalha estes diferentes processos de encruamento concedidos apenas a produtos encruados ou envelhecidos naturalmente à temperatura ambiente.

Uma característica fundamental das ligas Al-Mg de série 5XXX submetidas a processos de endurecimento mecânico é que, após alguns dias em temperatura ambiente, ocorre uma perda de propriedades mecânicas do material deformado. Um tratamento térmico leve, com temperaturas em torno de 150° C, é aplicado para

contornar esse inconveniente. Este tratamento alivia a tensão residual dos materiais encruados e aumenta a resistência à corrosão das ligas de Al-Mg.

Figura 4 - Diferentes processos de encruamento para as ligas de alumínio

Designação	Descrição
H1	Endurecida por encruamento simples
H2	Endurecida por encruamento seguida de um recozimento parcial. Aplica-se em ligas cujo encruamento foi excessivo e necessitam de um recozimento a baixas temperaturas para amaciarem até um nível de dureza e resistência desejados.
H3	Endurecida por encruamento seguido de uma estabilização, a baixa temperatura com o objectivo de aumentar a ductilidade e estabilizar as propriedades das ligas.
H4	Endurecido por encruamento seguido de uma pintura ou lacagem. Esta designação assume que os efeitos do processo de revestimento afecta o endurecimento por encruamento ^[12] .

Quadro 1.7 – Designação da quantidade de trabalho mecânico sofrido.

1	1/8 duro	6	¾ duro
2	¼ duro	8	Totalmente duro
4	½ duro	9	Extra duro

Fonte: Adaptado de INFOMET (2018)

A liga 5052 tem a mesma elevada resistência à corrosão que outras ligas de alumínio não tratáveis termicamente. Também possui maior resistência às condições ligeiramente alcalinas, comuns às ligas da série 5000.

A resistência à corrosão, a qual é excelente nas ligas de alumínio 5000, depende de um filme de óxido protetor que atua na superfície do metal, passivando na superfície o mecanismo da ação corrosiva. Quando danificada, esta passivação é prontamente restaurada pela reação rápida entre o alumínio e o oxigênio. Entretanto, não podemos ignorar que o alumínio, metal base da liga, apresenta alta reatividade e pode provocar uma rápida corrosão se o filme não puder ser restabelecido. Essas ligas podem ser anodizados para melhorar a resistência à corrosão, aumentando-se a espessura da película de superfície de proteção (COBDEN; BANBURY, 1994).

A Figura 4 também ilustra o significado do segundo dígito da denominação H34. Representa a condição final de endurecimento após a estabilização ou grau de encruamento. O valor 4 do segundo dígito indica um valor mediano. É aplicada aos produtos trabalhados endurecidos por tratamento mecânico por deformação plástica com ou sem tratamento térmico posterior para controle do grau de endurecimento.

Esta letra é seguida de até três dígitos para indicar a condição específica de tratamento (PEREIRA, 2010).

A Tabela 3 relaciona algumas das principais propriedades mecânicas de liga 5052-H34 e de interesse para a engenharia de projetos. Os limites de resistências mecânicas superiores tabelados estão compatíveis com as necessidades dos projetos de engenharia, proporcionando uma elevada aplicabilidade das ligas de alumínio 5052-H34, seja na indústria naval ou na fabricação de estruturas metálicas nobres.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga 5052 – H34

Propriedades mecânicas	Min – Max
Limites de Resistência à Tração (MPa)	235 – 285
Limite de escoamento (MPa)	180
Alongamento mínimo em %	3 – 8
Dureza Brinell	67 HB

Fonte: Adaptado de Atlas Steels – Al Alloy Data Sheet – 5052 – H34 (COMPOSITION; MECHANICAL, 2016)

A liga de alumínio 5052 pode ser soldada usando os processos de soldagem TIG e MIG. Estes processos, apesar de serem tecnologicamente mais exigentes em relação ao processo tradicional de soldagem elétrica, proporcionam uma excelente qualidade no produto acabado, além da manutenção da resistência mecânica do metal na linha de soldagem. As Tabelas 4 e 5 demonstram pontos físicos bem definidos e de interesse aos processos metalúrgicos e de trabalhabilidade da liga metálica AA5052-H34.

Tabela 4 - Propriedades físicas da liga 5052-H34

Propriedades mecânicas	Min – Max
Densidade	2680 Kg/m ³
Ponto de fusão	650 °C
Módulo de elasticidade	69,3 GPa
Resistividade elétrica	0.050x10 ⁻⁶ Ωm
Condutibilidade térmica	138 W/mK
Expansão térmica	23,75x10 ⁻⁶ m/K

Fonte: Adaptado de Atlas Steels – Al Alloy Data Sheet – 5052 – H34 (COMPOSITION; MECHANICAL, 2016)

Tabela 5 - Características gerais liga 5052 - H34

Qualidade	Classificação
Resistência à corrosão	Excelente
Resistência à fadiga	Muito bom
Resistência à tração	Bom
Condutividade térmica	Excelente
Soldabilidade	Bom

Fonte: Adaptado de Atlas Steels – Al Alloy Data Sheet – 5052 – H34 (COMPOSITION; MECHANICAL, 2016)

Sabemos que os elementos de liga, quando introduzidos na estrutura cristalina de um metal, promovem a melhoria das qualidades mecânicas da matriz original. São poucas as ligas Al-Mg estritamente binárias, pois a maioria das ligas modernas já apresentam em suas composições elementos formadores de dispersóides, tais como o cromo, o manganês e o titânio, em um total que pode variar de 0,25 a 1 %.

Produtos trabalhados mecanicamente de ligas Al-Mg estão sempre disponíveis na tempera O (recozido) e em uma ou mais das têmperas H1, H2 e H3 (trabalhadas com diferentes níveis de encruamento). As ligas Al-Mg combinam uma ampla faixa de níveis de resistência mecânica com a facilidade de serem conformadas e soldadas (inclusive processos de soldagem a arco), além da elevada resistência à corrosão. As Figuras 4 e 5 demonstram a contribuição de cada componente na melhoria das qualidades mecânicas, bem com o nível de dureza obtido nos processos de conformação a frio.

Figura 5 - Propriedades dos elementos de composição da Liga AA 5052-H34

Silício	Aumenta resistência mecânica e a ductilidade. Quando combinado com o Mg produz endurecimento por precipitação.
Cobre	Aumenta muito a resistência mecânica permitindo o endurecimento por precipitação. Reduz a resistência à corrosão, a ductilidade e a soldabilidade.
Magnésio	Aumenta a resistência mecânica e melhora a capacidade de endurecimento por trabalho mecânico.
Manganês	Aumenta a resistência mecânica e melhora a capacidade de endurecimento por trabalho mecânico.
Zinco	Aumenta a resistência mecânica, permite o endurecimento por precipitação e pode causar corrosão sob tensão.

Fonte: Adaptado de INFOMET (2018)

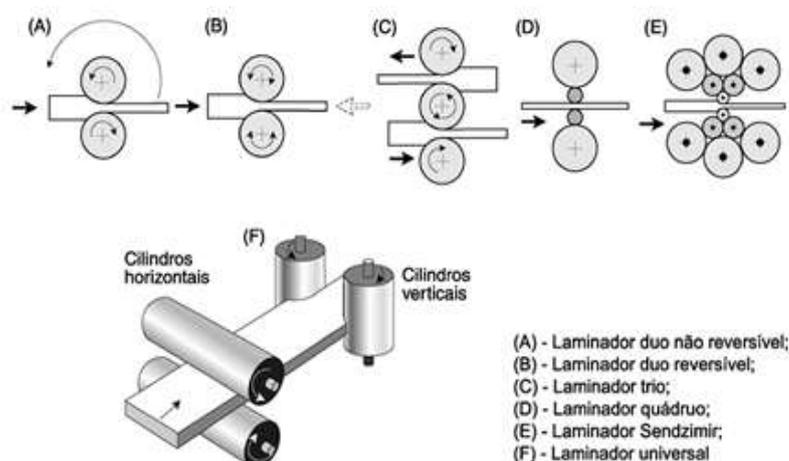
2.3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO

2.3.1 Laminação

Procedimento industrial adotado em escala comercial para conformação de perfis, de forma a transformar mecanicamente um perfil metálico por processo de conformação metálica. Este processo de transformação possibilita maior adensamento da estrutura, gerando maiores dureza mecânica e, conseqüentemente, maiores estresses internos.

Este procedimento, por não adotar nenhuma forma de intervenção térmica, é dito ser “a frio” e utiliza arranjo mecânico para redução da seção transversal da peça, adotando diversas formas geométricas finais. Roletes de aço arranjados mecanicamente são largamente adotados para promover esta redução de área, através da passagem dos perfis por entre roletes previamente ajustados na dimensão final pretendida. A Figura 6 demonstra detalhadamente este processo manual utilizado para encruamento das ligas metálicas.

Figura 6 - Processos de conformação mecânica a frio para redução da seção transversal do metal



Fonte: Associação Brasileira de Alumínio – ABAL (2017)

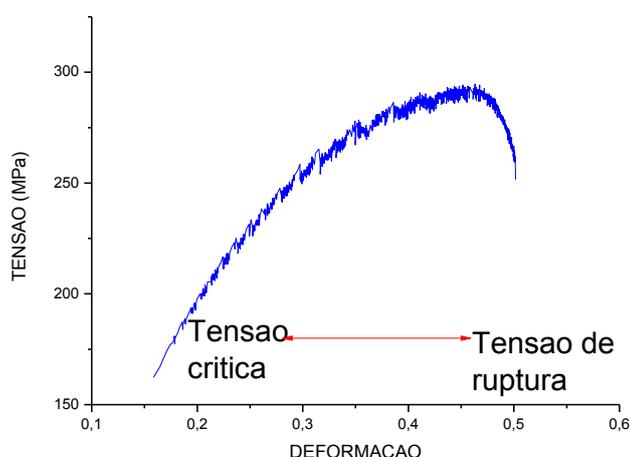
Processos industriais mais modernos utilizam laminação em regime contínuo porque esta formatação de processo garante maior produtividade e menores custos de implantação. As chapas bobinadas, da forma como costumamos encontrar no mercado, são produzidas diretamente do metal fundido e esta é uma grande vantagem em termos de produtividade, qualidade e praticidade.

2.4 EFEITO DAS FORÇAS MECÂNICAS SOBRE AS LIGAS Al - Mg

Os processos que impõem aos materiais metálicos alguma forma de esforço de tensão e que levam a um processo de deformação gradual da estrutura cristilana - inicialmente um comportamento elástico e, em seguida, um perfil plástico na curva tensão x deformação do material antes do colapso total - estão entre os mais importantes nos processos de manufatura dos metais. Isto, entre outras coisas, devido ao fato de gerar diferentes microestruturas no material deformado.

A Figura 7 demonstra o comportamento plástico no gráfico Tensão Vs Deformação de uma espécie metálica. Ressalta a tensão crítica como marco inicial do processo de instabilidade ao longo do período de escoamento metálico, culminando com a tensão de ruptura do metal (menor que a tensão máxima obtida) que caracteriza a tensão de colapso do material.

Figura 7 - Perfil do diagrama Tensão x Deformação



Fonte: Arquivo pessoal do autor

Nas ligas de Alumínio – Magnésio, liga metálica em estudo neste trabalho, a presença do elemento de liga Mg tem um efeito determinante sobre as características do comportamento mecânico quando a liga está submetida à tensão ou a estresse estrutural. De acordo com os trabalhos de Cai et al. (2016), o teor de Mg na liga tem um efeito pronunciado nas características das instabilidades na região plástica da curva tensão x deformação. O teor de magnésio tende a interferir nas relações interatômicas da liga.

2.4.1 Efeito dos esforços de tensão

No caso das ligas de alumínio à base de Magnésio, como no caso aqui tratado, o elemento de liga Magnésio atua como uma espécie de elemento soluto substitucional e responsável pelas interações dinâmicas com as discordâncias. O Magnésio em si afeta a concentração do soluto e, conseqüentemente, a magnitude da queda de tensão e o comportamento da deformação. Estas interações entre soluto e discordâncias dão origem a dois tipos de deslocamentos durante deformação plástica do material: as bandas de Luders e Portevin-Le Chatelier (PLC), cujas origens são provocadas por fenômenos SSA¹ e DSA², respectivamente.

A interação existente entre o soluto e discordâncias, interação esta do tipo elástico, elétrico ou químico faz com que o soluto se difunda para a discordância, criando em torno desta uma certa concentração de átomos de soluto, a qual é chamada de atmosfera de Cottrell. Conforme a discordância se movimenta a atmosfera tende a ficar para trás e exerce uma força de arrastamento na discordância, dificultando a sua movimentação.

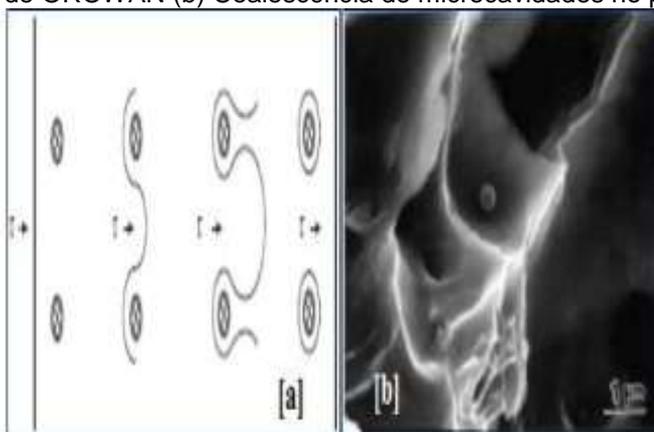
Meyers e Chawla (2009), fizeram uso do modelo de OROWAN para explicar o movimento das discordâncias quando uma liga está submetida à ação de forças mecânicas e suas interações intermoleculares.

As Figuras 8 e 9 representam graficamente este modelo citado.

¹ “DSA (Dynamic Strain Aging) e SSA (Static Strain Aging) são fenômenos bem conhecidos capazes de gerar perda de ductibilidade nos materiais metálicos” (TAMIMI et al., 2015).

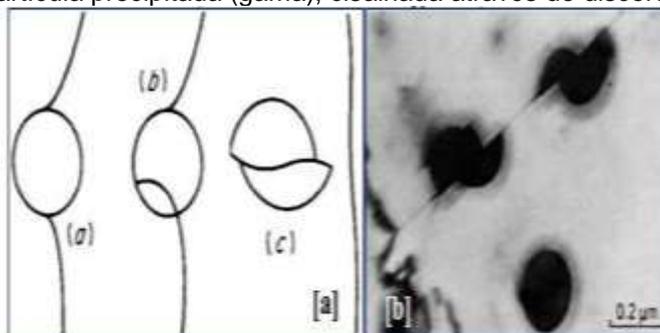
² DSA é um fenômeno que ocorre em muitas ligas metálicas como resultado da interação entre os átomos de soluto e as discordâncias, durante a deformação plástica do material. SSA, ao contrário do fenômeno DSA, é uma interação soluto-discordância que ocorre somente após a deformação plástica (TAMIMI et al., 2015).

Figura 8 - (a) Modelo de OROWAN (b) Coalescência de microcavidades no plano da fratura



Fonte: MEYERS e CHAWLA (2009)

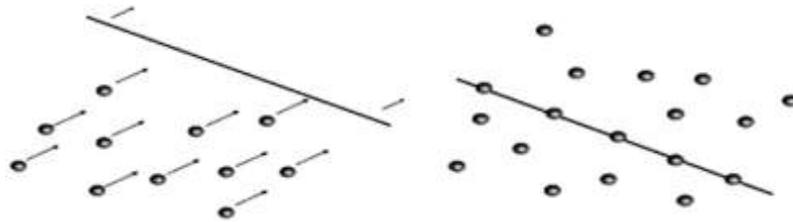
Figura 9 - (a) Movimento das discordâncias através de partículas pequenas e macias (b) Partícula precipitada (gama), cisalhada através de discordâncias



Fonte: MEYERS e CHAWLA (2009)

Segundo Tamimi et al. (2015), do ponto de vista microscópico, a estrutura molecular circundante à discordância fica distorcida e gera um campo de tensão elástica que atua nos átomos do soluto vizinhos. Na deformação plástica, quando as discordâncias são travadas por um conjunto ou emaranhado de deslocamentos, uma nuvem de átomos de soluto é formada no entorno das discordâncias com o propósito de reduzir as distorções na estrutura cristalina. Assim, o deslocamento é efetivamente travado e este travamento só pode ser vencido ou destravado com o aumento da tensão aplicada. Este novo destravamento, combinado com as interações de travamento, conforme referido anteriormente, provoca a queda de tensão na curva de deformação plástica. A Figura 10 representa este mecanismo e complementa o entendimento apresentado pelas Figuras 8 e 9.

Figura 10 - Difusão dos átomos de elemento de liga em direção às discordâncias

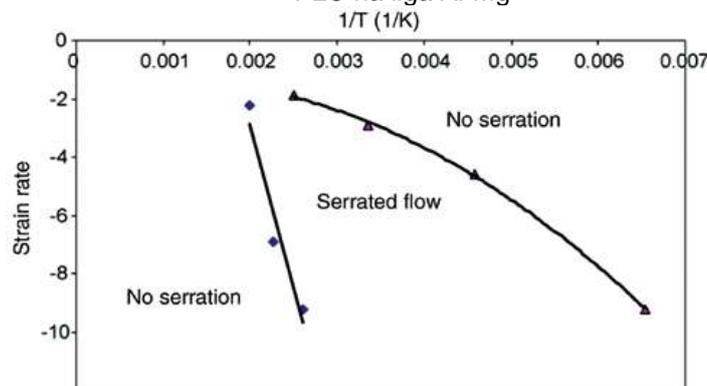


Fonte: TAMIMI et al. (2015)

2.4.2 Efeito Potervin-Le Chatelier (PLC)

O efeito PLC, caracterizado na curva tensão x deformação por uma região serrilhada na zona plástica, ocorre quando uma amostra contendo um elemento de liga é carregada até a região de deformação plástica. Neste ponto, um comportamento descontínuo ocorre devido a uma sequência de queda de tensão e recarga. Estas sequências de carga e recarga estão diretamente relacionadas com o processo de nucleação de uma determinada discordância e que ocorre dentro de uma determinada faixa de taxa de deformação e temperatura. A Figura 11 demonstra a faixa para uma determinada taxa de deformação e temperatura para manifestação do fenômeno PLC e a Figura 12 estabelece a dependência do fluxo de tensão com a taxa de deformação adotada sobre uma determinada liga de alumínio.

Figura 11 - Taxa de deformação e temperatura (faixa) para ocorrência de banda serrilhada do efeito PLC na liga Al-Mg



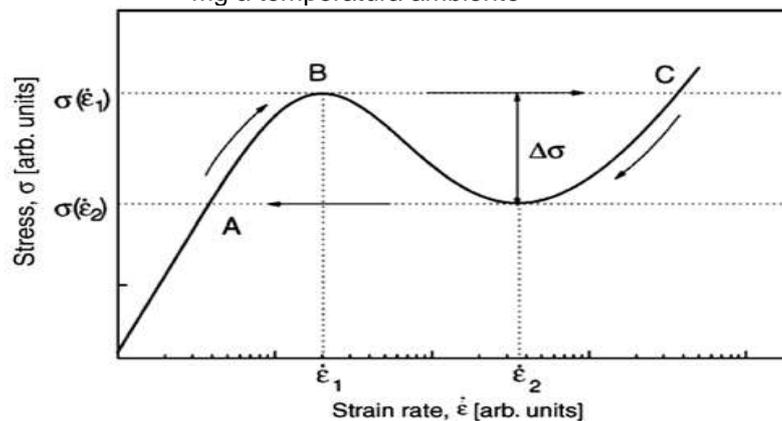
Fonte: TAMIMI et al. (2015)

Cai et al. (2016) afirmam que o efeito PLC é uma instabilidade espasmódica na zona plástica da curva tensão x deformação do material, que surge mesmo em condições ambientais de temperatura. Esta instabilidade plástica também pode ser

observada em condições de compressão e torção do material. Como são instabilidades provocadas por deslocamentos e travamentos das placas, torna-se razoável entender que as forças de diversos sentidos de incidências tragam à mostra as características peculiares do fenômeno.

O teor do elemento de liga Magnésio tende a enfraquecer a correlação espacial da banda de propagação. A amplitude da alternância do gráfico (Figura 12) aumenta linearmente com a máxima tensão da banda PLC. Resumindo, alto teor de Magnésio produz maior tensão e uma determinada amplitude nas instabilidades do gráfico (serrilhas), quando comparado com amostras de menores teores de magnésio. Podemos entender que o teor de Magnésio atua como regulador da tensão máxima aplicada e também do nível de retração elástica.

Figura 12 - Dependência do fluxo de tensão e da taxa de deformação para uma liga de Al-Mg à temperatura ambiente



Fonte: TAMMI et al. (2015)

Ait-Mokhtar et al. (2006) investigaram o aspecto espaço-temporal e a tensão crítica do fluxo irregular na zona de deformação plástica, provocada pelo teor de magnésio na liga. Deduziram que as características de instabilidades são influenciadas pelos teores de Magnésio presentes na liga, enquanto que a taxa de deformação crítica (mínima tensão crítica aplicada x curva de taxa de deformação) não desloca o valor com aumento do teor de Magnésio na liga. Afirmaram, ainda, que este comportamento variante em função do teor do elemento Magnésio na liga pode levar ao entendimento de que o domínio da taxa de deformação tem comportamento inverso da tensão crítica.

Kang et al. (2012) desenvolveram trabalhos com perfis de liga de Alumínio-Magnésio e constataram que todas as amostras analisadas seguem uma relação

linear com o carregamento aplicado, o que revela o comportamento linear independente do teor de soluto de Magnésio na solução.

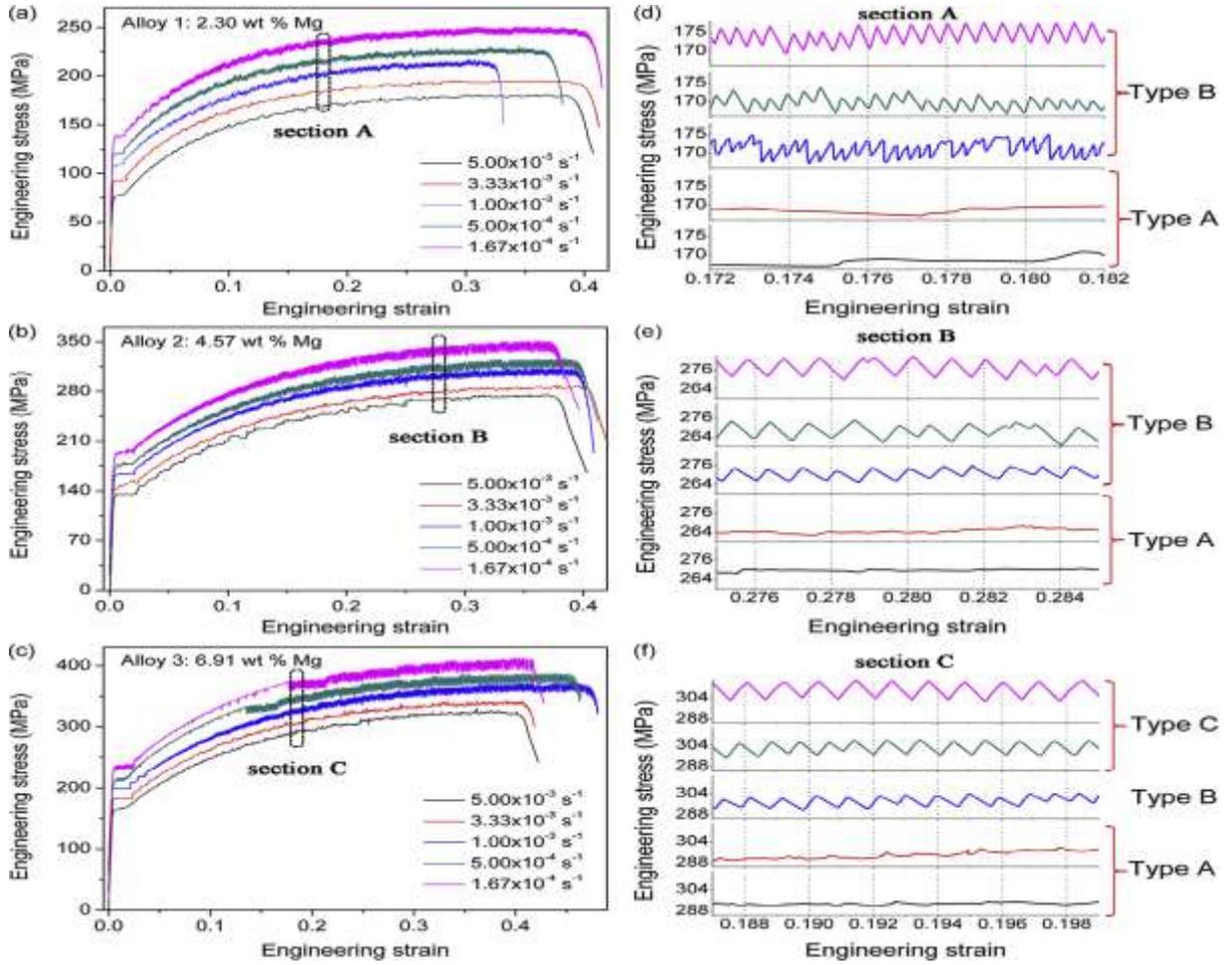
Ma et al. (2015) estudaram o efeito dos elementos de liga e dos parâmetros de processamento nas propriedades mecânicas, bem como o efeito PLC nas ligas de Alumínio-Magnésio. Constataram que a adição dos elementos Magnésio e Zinco aumentam a taxa de dureza, resiliência e ductibilidade da liga.

Cai et al. (2016) estudaram três tipos de ligas Al-Mg (2,3% Mg; 4,57% Mg e 6,91% Mg) para avaliar o efeito PLC sob diversas taxas de deformação aplicadas à temperatura ambiente e a influência da concentração de Magnésio no comportamento da deformação (características espaço-temporal), a dependência da amplitude das serrilhas e o domínio do efeito PLC no teor de Magnésio. As observações experimentais concluídas no estudo indicaram que o comportamento de Luders (região de perfil serrilhado no final da zona plástica da curva tensão x deformação) é observado sistematicamente com tendência crescente com o aumento da taxa de deformação. Além disso, a morfologia do serrilhamento também apresentou aparência diferenciada para diferentes teores de Mg e taxas de deformação aplicadas. O fluxo instável na zona plástica (efeito PLC) foi observado em todos os experimentos, além de uma certa tensão crítica na região inicial da instabilidade e que se torna bem aparente na liga com alto teor de Mg. Concluiu-se que variações do teor de Mg e na taxa de deformação leva a um cruzamento do tipo de instabilidade na zona plástica e, conseqüentemente, a mudanças correspondentes no perfil do serrilhamento da curva. A densidade do serrilhamento, definida como o número de serrilhas por 100% de tensão, diminuiu com o aumento do teor de Mg, o que atribuiu no aumento do tempo de recarga. De outro ponto de vista, a tensão crítica, ou seja, o início de serrilhas nas curvas de carga, também foi fortemente afetado pelo teor de Mg presente na liga em prova.

As Figuras 13 e 14 demonstram a variação da tensão aplicada vs taxas de deformação de $1,67 \times 10^{-4}$ – $5,00 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ para 2,30% em peso de adição de Mg (a), 4,57% em peso de Mg adição (b) e 6,91% em peso de adição de Mg (c).

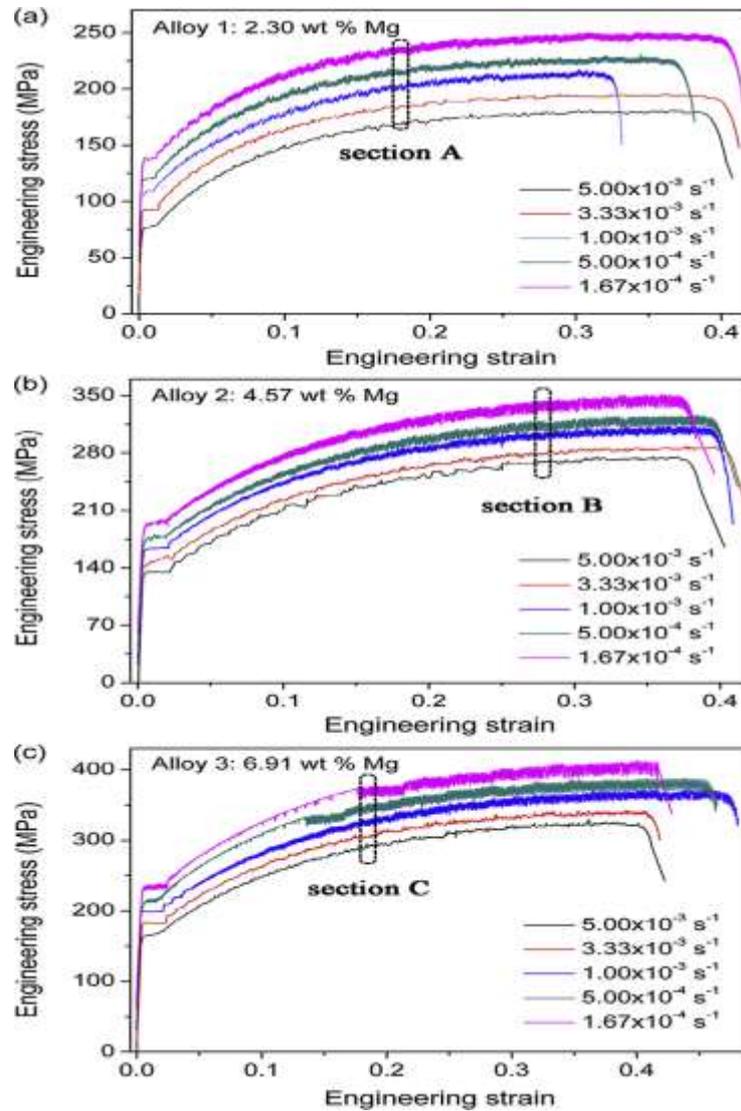
Na Figura 13 as visualizações ampliadas dos dados nas seções A, B e C são mostradas nas imagens (d), (e) e (f), respectivamente. Para maior clareza, todas as curvas são separadas verticalmente por um intervalo de tensão de 15 MPa.

Figura 13 - Variação do efeito PLC em função da concentração de elemento soluto e variação na taxa de deformação



Fonte: CAI et al. (2016)

Figura 14 - Comportamento da curva de Efeito PLC em função da concentração do elemento de liga e variação da taxa de deformação



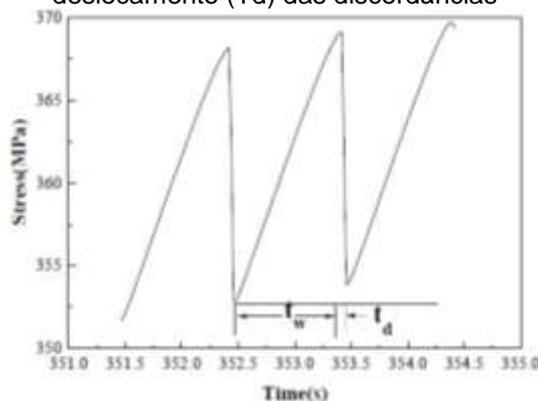
Fonte: CAI et al. (2016)

2.4.3 Variação do tempo para a elevação da tensão de destravamento das discordâncias e tempo de relaxamento da tensão

Tian et al. (2018) estudaram o comportamento do Efeito PLC na região pástica do gráfico de limite de resistência à tração para ligas de alumínio e magnésio. Neste estudo, foram abordados o tempo consumido para elevação da tensão necessária para destravamento dos movimentos das discordâncias e, conseqüentemente, o tempo gasto durante a relaxação da tensão por ocasião do deslocamento das discordâncias.

A Figura 15 representa o gráfico Tensão x Tempo e demonstra a variação do tempo (T_w) consumido no processo de elevação da tensão necessária para destravamento dos movimentos das discordâncias e tempo de queda da tensão (T_d) durante o período de deslocamento das discordâncias.

Figura 15 - Gráfico variação da tensão em função do tempo para destravamento (T_w) e tempo de deslocamento (T_d) das discordâncias



Fonte: TIAN et al. (2018)

Tian et al. (2018) afirmam que o teor de elemento de liga magnésio (Mg), presente nas matrizes de alumínio (Al), atua de forma a alterar a tensão necessária para iniciar ou reiniciar o deslocamento das discordâncias nos planos discordantes do metal. O aumento na concentração de magnésio presente na liga implica maiores resistências aos deslocamentos e, conseqüentemente, maiores tensões para promover o destravamento do movimento. Esta afirmação também está de acordo com os resultados divulgados por Cai et al. (2016). Por sua vez, o aumento na taxa de deformação dos ensaios produziu tempos menores para travamento (elevação das tensões) e liberação dos movimentos (relaxação das tensões).

2.4.4 Efeito da Anisotropia sobre a resistência mecânica

Segundo CHENG e MORRIS (2000), são bem poucos os trabalhos científicos desenvolvidos considerando a influência do sentido da laminação do material sobre o efeito PLC na zona plástica e, conseqüentemente, na resistência mecânica da liga metálica. Muitos trabalhos científicos abordam o perfil da instabilidade na zona plástica considerando a influência da temperatura, taxa de deformação, tensão, átomos de soluto, tamanho de grãos etc. Esta insuficiência de estudos abordando esta característica mecânica do material é explicada pelo fato de sempre se considerar que

a direção de laminação tem pouco efeito sobre o comportamento da curva no gráfico tensão x deformação.

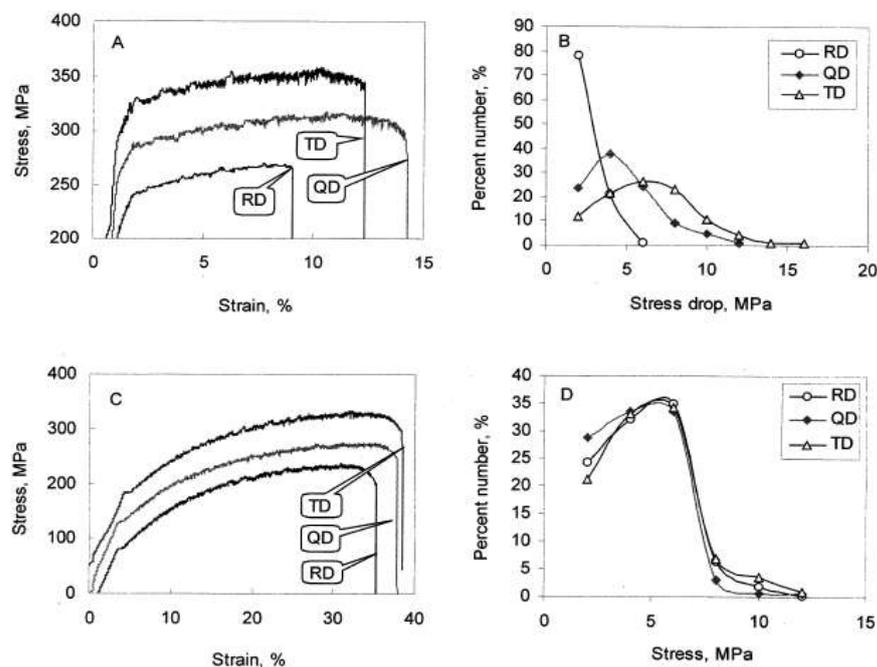
No caso deste estudo, cujo objetivo principal é averiguar o comportamento da resistência à tração aplicada sobre o material, considerando os fatores de anisotropia do material, torna-se relevante avaliar esta resistência também pelo comportamento da curva de tração na zona de deformação plástica do material.

Cheng e Morris (2000) testaram o comportamento de ligas fundidas e laminadas quando submetidas ao ambiente de tração, principalmente sob o ponto de vista do comportamento do diagrama de tensão x deformação na zona de deformação plástica dos materiais. A liga Al-Mg laminada foi tratada termicamente e depois foi tracionada de acordo com a orientação de sua laminação, considerando os ângulos de tensão em 0° , 45° e 90° . O comportamento do efeito PLC é aparentemente bastante influenciado pela orientação da força de tração, em função do sentido de orientação da laminação

De acordo com Cheng e Morris (2000), a distribuição da concentração de queda de tensão concentra-se estatisticamente em valores maiores quando a força de tensão é aplicada numa direção de 90° do sentido da laminação, quando comparada com a força aplicada no mesmo sentido da laminação. Quando a força de tração é aplicada no ângulo de 45° , esta apresentou um valor intermediário, porém mais próximo do valor registrado para o sentido transversal (90°) da laminação.

A Figura 16 ilustra o comportamento das instabilidades (serrilhas) e as correspondentes distribuições de quedas de tensões para materiais laminados (SC) e recristalizados (DC) na taxa de deformação de $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Para uma melhor visualização, a curva de RD (0°) na Figura 16 (A) foi movida para baixo 90 MPa, enquanto na Figura 16 (C), a curva de RD foi movida para baixo 50 MPa e a curva de TD (90°) foi movida para cima 50 MPa para não ocorrer sobreposição com a curva QD (45°).

Figura 16 - Comportamento das instabilidades e distribuição das quedas de tensão nos materiais laminados e recristalizados



Fonte: CHENG e MORRIS (2000)

Constata-se, então, que de fato a anisotropia do material afeta o comportamento mecânico da liga submetida ao carregamento de trabalho. Sabe-se que toda estrutura metálica quando submetida aos esforços de tração e compressão, situação muito cotidiana numa obra de engenharia, pode desencadear numa mesma estrutura comportamental de perfil tracionado e perfil comprimido, separados por uma linha neutra limítrofe que define as regiões sujeitas a Momento Fletor positivo e a Momento Fletor negativo.

Momentos fletores impõem carregamentos de natureza tracionada ou comprimida, dependendo da posição da linha neutra dentro da estrutura carregada. No caso de estruturas metálicas dimensionadas para suportar cargas, busca-se sempre uma configuração de dimensionamento que favoreça a incidência de esforços resistentes à carga de tração sobre o perfil. Desta forma, entender as vantagens das características anisotrópicas pode produzir bons resultados práticos e financeiros.

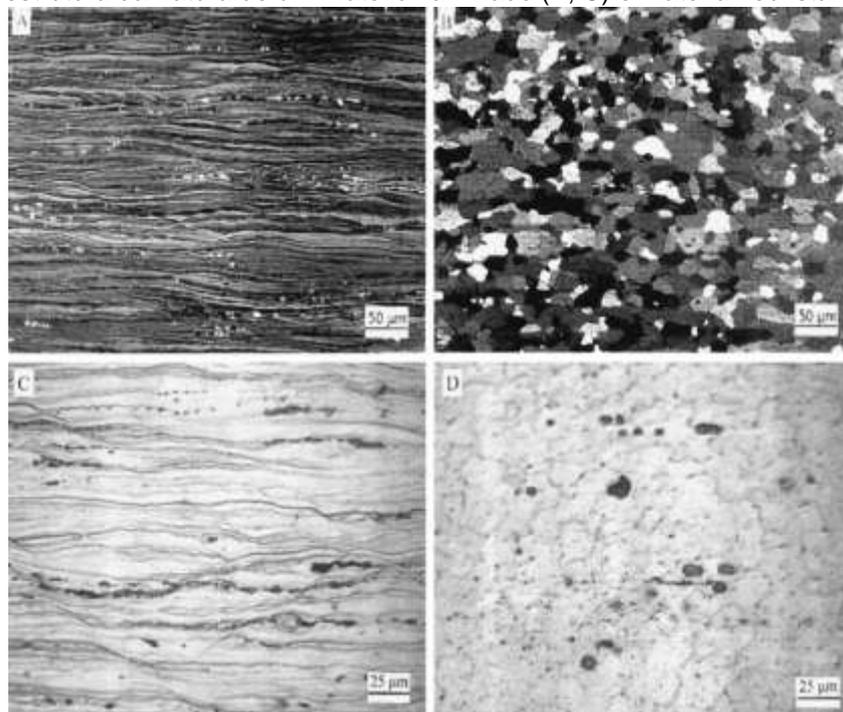
A anisotropia verificada no gráfico tensão x deformação está diretamente associada à microestrutura do material. Então, alinhado à literatura consultada, materiais com estrutura laminada apresentam anisotropia na zona plástica do perfil da

curva tensão x deformação. Enquanto materiais com microestrutura recristalizada não apresentam esta propriedade.

As características anisotrópicas das ligas laminadas, observadas no gráfico tensão x deformação, seja pela observação da variação na tensão de escoamento ou nas características particulares das serrilhas na região plástica (Efeito PLC), direcionam ao entendimento de que existe relevância considerar o sentido das laminações como fator de resistência às solicitações de projeto estrutural.

A natureza peculiar da microestrutura de uma liga laminada explica a razão do comportamento instável na zona plástica. Enquanto materiais laminados apresentam estruturalmente superfícies deslizantes que favorecem o movimento das discordâncias, materiais produzidos como consequência de um processo de recristalização são mais resistentes aos movimentos internos. Além disso, as partículas dos laminados estão localizadas ao longo dos limites dos grãos, já nos recristalizados são distribuídos. A Figura 17 (A) e (B) apresenta planos das fraturas para materiais laminados e recristalizados, onde fica bem ilustrado o perfil deslizante das chapas laminadas e comportamento travante das chapas fundidas.

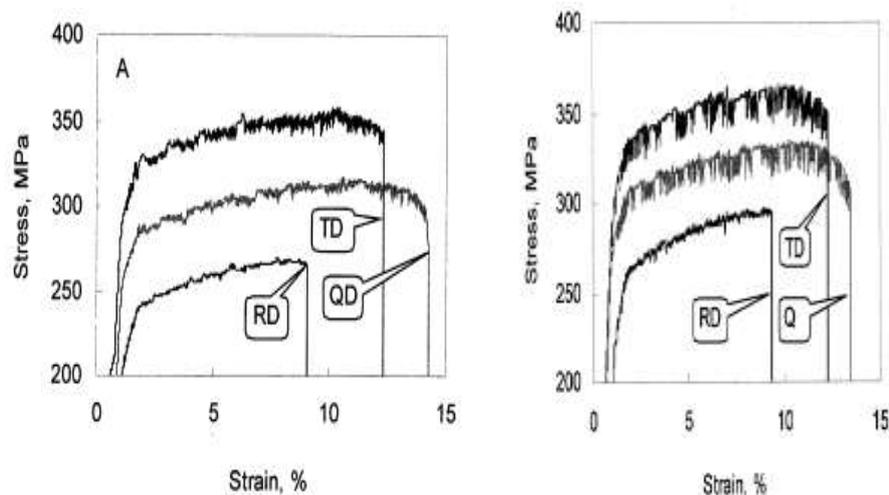
Figura 17 - Microestrutura da fratura de um material laminado (A, C) e material recristalizado (B, D)



Fonte: CHENG e MORRIS (2000)

Experiências conduzidas num cenário controlado de tensão aplicada e deformação dos materiais laminados revelam que a intensidade de instabilidade (efeito PLC) para cada uma das três direções (RD, QD e TD) aumenta com a diminuição da taxa de deformação. Contudo, o aumento de intensidade das serrilhas em RD é menor que em QD e TD. A diferença de concentração entre QD e TD também se torna bem menor. Como resultado, a anisotropia das serrilhas torna-se ainda mais proeminente numa taxa de deformação menor. A Figura 18 resume todo o comportamento descrito anteriormente.

Figura 18 - Variação na densidade do efeito PLC em função da variação na taxa de deformação do material



Fonte: HENG e MORRIS (2000)

2.5 MICROESTRUTURA DAS FRATURAS

Caetano et al. (2008) afirmam que os tamanhos dos grãos componentes de um determinado material é o componente principal da microestrutura. Porém, a quantificação deste componente não é tarefa fácil, sujeita às falhas humanas naturais e lentidão dos processos. Neste aspecto, as técnicas da microscopia se torna uma ferramenta poderosa para estudo dos planos cristalográficos, pois possibilita a nitidez e precisão nas leituras das falhas e microconstituintes presentes.

Lopes e Santana (2009) afirmam que as medidas efetuadas trazem percentuais de erro associado e a precisão das medidas depende da utilização das variáveis normais associadas aos parâmetros estatísticos. Logo, ao analisar uma fratura, a

microestrutura varia estatisticamente ao longo do plano analisado e a validade da observação somente é garantida quando as ferramentas estatísticas estão presentes.

Askeland e Phulé (2008) ressaltam que nos metais com comportamento dúctil e boa tenacidade, a fratura dúctil ocorre normalmente de forma transgranular, propagando-se a partir dos grãos. A fratura ocorre com muita deformação plástica, ocorrendo, inclusive, estrição antes da fratura. A deformação plástica ocorre antes da fratura final. Ao realizarem ensaio de tração, os autores afirmam que a fratura dúctil tem início com a nucleação, crescimento e coalescência de microcavidades (dimples, em inglês) dentro da amostra. Tais estruturas formam-se quando uma tensão elevada causa uma fratura localizada nos contornos dos grãos ou nas interfaces entre o metal e pequenas inclusões. Quanto mais a tensão local aumenta, mais as microcavidades crescem e coalescem, formando cavidades maiores. Por fim, a seção resistente é reduzida demais para suportar a carga presente, então, a fratura ocorre.

2.5.1 Perfil geométrico das microestruturas

Tvergaard (1981), em seus trabalhos sobre fraturas e a geometria dos “*dimples*” (microestruturas), considerou as cavidades como sendo de perfil esférico ao longo de todo o processo de crescimento e coalescência.

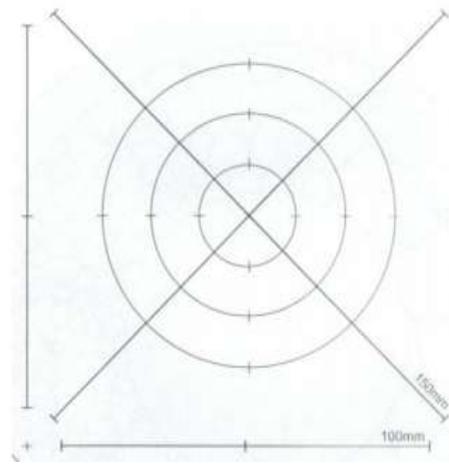
Benzerga et al. (1999) afirmam que as fraturas são fortemente influenciadas pelo formato das microcavidades e processo de encruamento submetido.

Acredita-se que as tensões macroscópicas sejam uma justificativa razoável para explicar a evolução do crescimento e coalescência dos “*dimples*” durante a fratura e que o perfil esférico citado por Tvergaard (1981) pode sofrer alteração e assumir um perfil mais ovalizado, seja na direção horizontal ou na vertical, dependendo da natureza das tensões aplicadas.

Os procedimentos para averiguação da natureza geométrica dos “*dimples*” e seus procedimentos estão estabelecidos em Normas Técnicas disponíveis na literatura. A Norma ASTM E 112 – 96 é largamente a mais adotada para caracterização do perfil das microcavidades no plano da fratura. Esta Norma estabelece como procedimento a interceptação de linhas pelo contorno dos grãos na periferia das cavidades. Este procedimento autoriza diversos métodos de medição,

cada um fazendo uso de diferentes recursos geométricos. O método de HEYN utiliza 04 linhas retas posicionadas sobre a imagem da microcavidade. O método de ABRANS faz uso de 03 circunferências também posicionadas sobre a imagem da microcavidade. Tem ainda o método de HILLIARD que também adota posicionamento de circunferências sobre a imagem. A Figura 19 demonstra os métodos de ABRANS e de HILLIARD com o posicionamento das circunferências sobre um dimples presentes no plano da fratura, conforme estabelecido pela NORMA ASTM E 112 - 96.

Figura 19 - Representação das metodologias disponíveis para medição dos dimples



Fonte: NORMA ASTM E 112 – 96

2.5.2 Equacionamento matemático

Um tratamento matemático compatível aos 04 (quatro) métodos citados também é proposto. Está fundamentado nos termos das equações 01 e 02, conforme descreve-se a seguir:

$$NL = N_i / (L/M) \quad (\text{Eq. 01})$$

$$G = (6,6438) \times \log_{10}(NL) - 3,288 \quad (\text{Eq. 02})$$

Sendo:

NL= Número de dimples x mm

N_i = Número de dimples medidos

L = Comprimento total adotado na medição

M = Escala da imagem

G = Tamanho médio final dos dimples

Uma forma adaptada da metodologia proposta pela Norma ASTM E 112 – 96, consiste no método de interseção das linhas. Traçam-se duas linhas perpendiculares entre si (d1 e d2) que alcançam as bordas dos dimples. Este método possibilita duas formas de medição da geometria dos dimples:

- a) Método da Raiz Quadrada: Cálculo da raiz quadrada do produto entre d1 e d2 (Eq 03 e 04);

$$d_{\theta} = \sqrt{d1 \times d2} \quad (\text{Eq. 03})$$

$$D_{\theta} = \left[\frac{\sum_{n=1}^n \left[\sqrt{(d1 \times d2)} \right]}{n} \right] \quad (\text{Eq. 04})$$

Sendo:

d θ = Diâmetro de um dimples

d1 = Maior diâmetro de um dimples

d2 = Menor diâmetro de um dimples

n = Número de dimples medidos

D θ = Diâmetro médio dos dimples

- b) Cálculo da média aritmética simples entre os diâmetros dos dimples (Eq. 05 e 06);

$$dx = (d1 + d2)/2 \quad (\text{Eq. 05})$$

$$D_x = \left[\frac{\sum_{n=1}^n \left[(d1+d2)/2 \right]}{n} \right] \quad (\text{Eq. 06})$$

Sendo:

dx = Diâmetro de um dimples

d1 = Maior diâmetro de um dimples

d2 = Menor diâmetro de um dimples

n = Número de dimples medidos

Dx = Diâmetro médio de um dimples

Narayanasamy et al. (2008) e Parthasarathi et al. (2009) propuseram uma metodologia mais objetiva e bem mais simplificada para obtenção da dimensão diametral média de um Dimples. Com base no fator de forma geométrica, traça-se

duas linhas perpendiculares entre si, uma vertical (LENGTH = L) e outra horizontal (WIDTH = W). Estas linhas são posicionadas dentro das microcavidades, tendo as bordas como pontos referenciais para início e final das linhas. Com as dimensões L e W definidas, obtém-se a razão L/W. Esta razão é utilizada para determinar a esfericidade ou ovalização das microcavidades presentes no plano em estudo. A Tabela 6 ilustra as denominações desta proposição.

$$\phi = \frac{L}{W} \quad (\text{Eq. 07})$$

Tabela 6 - Identificação e denominação da razão L/W

VALOR DA RAZÃO "L/W"	PERFIL DA MICROCAVIDADE	DENOMINÇÃO
> 1	Ovalizada no sentido vertical	Oblata
= 1	Circular	Esférica
< 1	Ovalizada no sentido horizontal	Prolata

Fonte: Arquivo pessoal do autor

De acordo com a definição proposta, uma microcavidade com aspecto ovalizado pode apresentar um perfil achatado (prolata) ou alongado (oblata), dependendo da maior dimensão medida.

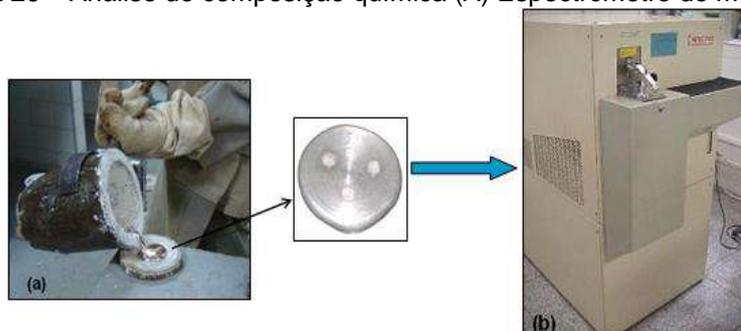
3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Para a realização deste estudo, foi utilizada uma amostra de chapa de alumínio de 500mm x 500mm fornecida pela BNVC, Base Naval de Val-de-Cães, com sua respectiva data sheet.

A primeira etapa da análise passou pelo corte de uma amostra de 50mm x 25mm para a confirmação da composição química. Essa etapa consiste em verificar se as composições químicas estão de acordo com a data sheet fornecida. A amostra, previamente cortada, tem uma de suas superfícies faceadas, para ser submetida à análise química através do espectrômetro óptico modelo “Q4 TASMAN”, onde os resultados são obtidos a partir da média de no mínimo três leituras da composição química da amostra. Este processo todo está ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Análise de composição química (A) Espectrômetro de massa (B)



Fonte: Arquivo do autor

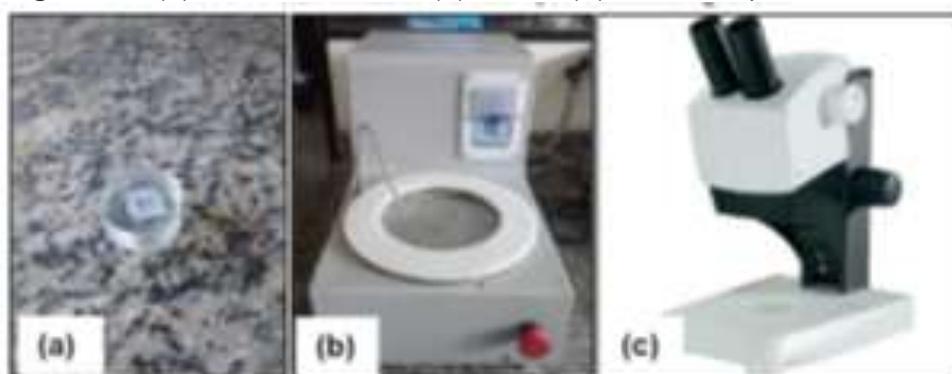
3.2 EMBUTIMENTO A FRIO

Na sequência, foram cortadas duas amostras do metal, uma de 20mm x 20mm cortada no sentido da superfície da chapa, e outra de 20mm x 8mm cortada no sentido lateral (espessura) da chapa. Estas passaram por um processo de embutimento a frio, no qual utilizou-se um molde preenchido com resinas sintéticas de polimerização rápida. O embutimento dessas peças se justifica pela garantia de melhoria do manuseio nos processos de polimento e metalúrgico. Este processo de tratamento está demonstrado na Figura 21.

As amostras foram, então, lixadas com auxílio de uma lixadeira politriz metalográfica, passando pelas lixas d'água 80, 120, 220, 320, 400, 600, 1200 e 1500. Posteriormente foram polidas com Alumina de 1,0; 0,5 e 0,3 μ m com auxílio de um pano de polimento metalográfico.

Com os corpos de provas polidos, estes foram atacados quimicamente pelo reagente Tuckers (2ml HF+3ml HCl+5ml HNO₃+190ml H₂O) em imersão por 5-10 seg com o objetivo de revelar as linhas de deformação e a textura dos grãos.

Figura 21 - (A) Amostra embutida; (B) Politriz; (C) Estereoscópio Leica Mod:Ez4



Fonte: Arquivo do Autor

3.3 MICRODUREZA

Após o registro micrográficos das peças, os mesmos corpos de provas foram utilizados para a realização dos testes de microdureza Vickers. Tal ensaio foi realizado com uma carga de 50 gf e tempo de endentação de 10 segundos. A distância entre as endentações foi de aproximadamente 2,0 mm. A Figura 22 mostra a máquina de leitura de dureza utilizada no processo de medição.

Os procedimentos utilizados para estes ensaios estão em concordância com o padrão normativo ASTM E 384-2004. Para o cálculo das médias de cada distância relativa à interface metal/molde, utilizou-se, para as amostras, 10 medições. Cada medição foi realizada por observação em aumentos de 100 a 400X. As dimensões das marcações horizontais e verticais foram inseridas no computador do equipamento, que calculou a dureza.

Figura 22 - HV-1000B para ensaios de microdureza



Fonte: Arquivo do Autor

3.4 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Para a caracterização mecânica da liga foram preparados 18 (dezoito) corpos de provas de acordo com a Norma ABNT NBR 7549:2008, as quais foram submetidas a ensaios de tração realizados em uma máquina de ensaio universal da marca KRATOS, com velocidade de ensaio de 02 e 04 mm/min, temperatura de 25°C e umidade relativa 60%. No ensaio adotou-se o mesmo critério de análise proposto por Cheng e Morris (2000), qual seja um conjunto de 03 corpos de prova (CP) da liga Al-Mg foi tomado e tracionado de acordo com a orientação de sua laminação, considerando os ângulos de tensão em 0°, 45° e 90° para cada conjunto de provas e nas velocidades de 2 e 4 mm / min. A Figura 23 mostra a máquina de tração utilizada nos ensaios dos corpos de prova demonstrados na Figura 24.

Figura 23 - Máquina de ensaio de tração modelo KRATOS



Fonte: Arquivo do Autor

Figura 24 - Corpos de Prova fabricados de acordo com a Norma ABNT NBR 7549:2008



Fonte: Arquivo do Autor

3.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Após a realização dos ensaios de tração, foram retiradas amostras próxima à fratura dos corpos de provas e preparadas para caracterização estrutural realizada via Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV. Para a limpeza da superfície, essas amostras foram submetidas ao ultrassom em solução de limpeza (Álcool etílico absoluto, P.A. 99,99 e Acetona P.A. $(CH_3)_2CO$).

As Figuras 25 e 26 mostram os equipamentos utilizados na caracterização metalográfica na qual pode ser visto tanto o Microscópio Ótico para análise de Imagem como o Microscópio eletrônico de Varredura, onde foram realizadas análises de espectrometria de energia dispersiva de raios X - EDS. A caracterização, nesta etapa, teve a preocupação de avaliar o aspecto das fraturas macro e microscopicamente da secção transversal das peças ensaiadas.

Figura 25 - Microscópio Ótico



Fonte: Arquivo do Autor

Figura 26 - Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Arquivo do Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE QUÍMICA

Na Tabela 7 está representada a composição percentual dos elementos presentes na liga comercial utilizada como corpo de prova neste trabalho. Esta composição foi obtida por espectroscopia de massa e comparada com a composição química citada na literatura técnica. Os resultados obtidos, os quais estão tabelados a seguir, estão alinhados com o previsto no Atlas Steel (ALLOY; SHEET, 2013).

Tabela 7 - Composição química encontrada

Al	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Zn	Cu
96%	2,7%	0,10%	0,40%	0,25%	0,35%	0,10%	0,10%

Fonte: Arquivo do Autor

4.2 CARACTERIZAÇÃO MACROESTRUTURAL

A microestrutura externa, após receber o tratamento metalográfico citado na seção 3.2, foi analisada por microscopia ótica para obtenção das características macroestruturais dos grãos e ordenamento direcional da laminação. Observa-se grãos bastante refinados em função do processo de fabricação da chapa metálica. A Figura 27 mostra este perfil externo da liga metálica.

Figura 27 - Análise macroestrutural do metal

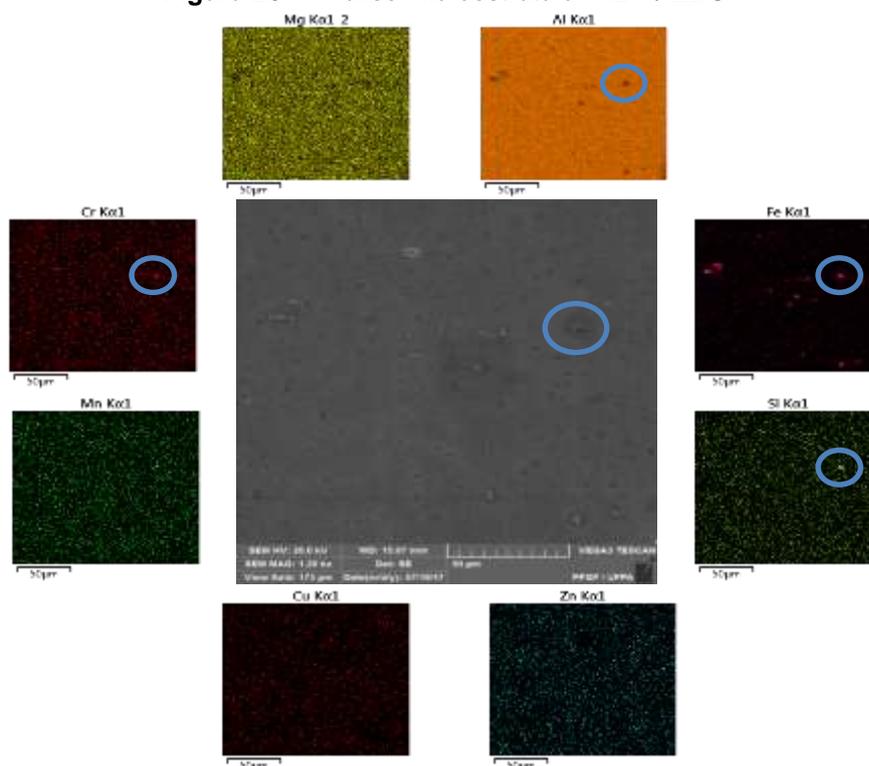


Fonte: SANTOS, et al. (2017)

4.3 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Os planos das fraturas dos 18 corpos de provas foram submetidos à análise via microscopia eletrônica de varredura (MEV) na ampliação máxima de 2K, com objetivo de melhor visualizar as particularidades dos mecanismos das fraturas, coalescências e geometria dos dimples para os diferentes ângulos anisotrópicos. A microestrutura da liga também foi submetida à investigação microscópica, complementada por uma análise EDS para determinação de composição química do corpo de prova no ponto de abordagem da sonda. A Figura 28 apresenta o perfil completo desta investigação e nos permite concluir que ocorre predominância do elemento Fe dissolvido na solução sólida. Possivelmente trata-se do eutético Al_3Fe devido a sua baixa solubilidade, visto que a concentração de 0,40% para o elemento Fe, determinada e demonstrada na Tabela 7, ultrapassa o limite de solubilidade para o elemento Fe na matriz alumínio. A análise EDS confirma a presença dos demais elementos constituintes da liga AA5052-H34, conforme anteriormente verificada por espectroscopia de massa – Tabela 7 - e na literatura técnica.

Figura 28 - Análise Microestrutural MEV / EDS



Fonte: SANTOS et al. (2017)

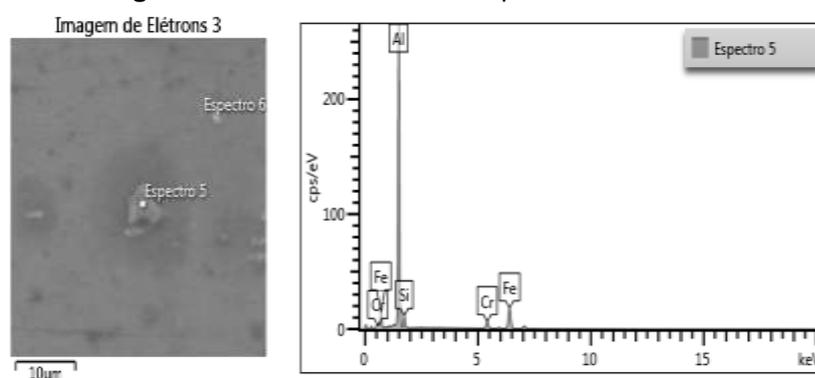
A Tabela 8 e a Figura 29 agrupam e demonstram o percentual dos elementos encontrados numa análise pontual via sonda EDS na superfície do corpo de prova.

Tabela 8 - Composição química encontrada no EDS

Espectro 5				
Elemento de liga	Fe	Si	Cr	Al
Composição química (%p)	24,2	4,64	5,5	65,66

Fonte: SANTOS et al. (2017)

Figura 29 - Análise de EDS e espectro da análise



Fonte: SANTOS et al. (2017)

Apesar de a análise EDS apontar a composição dos elementos encontrados pela sonda, a natureza ou forma deste elemento dissolvido na matriz não é possível confirmar com exatidão. Neste caso, necessitaria um maior aprofundamento da investigação via análise DRX³.

4.4 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

Foram ensaiados à tração 06 (SEIS) conjuntos compostos por 03 (TRÊS) corpos de prova cada conjunto, tracionados segundo um ângulo de incidência da força em relação ao sentido de laminação do corpo de prova. Um conjunto de corpo de prova foi ensaiado segundo a direção uniaxial (0°), outro conjunto segundo uma direção transversal (90°) e ainda um terceiro conjunto tracionado segundo um ângulo de 45°. Foram consideradas duas velocidades de deslocamento da máquina de tração

³ Análise DRX: Método de investigação e análise baseada na dispersão do raio X.

(2 mm/min e 4 mm/min), as quais são equivalentes a duas taxas de deformação de $2,5 \times 10^{-3} / \text{min}$ e $5,0 \times 10^{-3} / \text{min}$, respectivamente.

As curvas obtidas a partir dos dados de ensaios são mostradas num plano tensão x deformação e os valores de referência destacados nas Tabelas 9 e 10. Foram planilhados os valores de limite de resistência à tração, força máxima até a ruptura, limite de escoamento, força até o escoamento e alongamentos percentual e linear na ruptura para cada corpo de prova.

4.5 ANÁLISE DE RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO

4.5.1 Ensaio de tração na taxa de deformação $2,5 \times 10^{-3} / \text{min}$

Tabela 9 - Tabela de parâmetros obtidos nos procedimentos de ensaio (Taxa $2,5 \times 10^{-3} / \text{min}$)

RESUMO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS MEDIDAS							
VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS MECÂNICOS							
ÂNGULO (°)	TENSÃO RUPTURA (MPa)	TENSÃO ESCOAMENTO (MPa)	RELAÇÃO TR / TE	RELAÇÃO TE / TR	DEFORM. LINEAR (mm)	DEFORM. RUP. (%)	DEFORM. MAX. (%)
00.0	295,18	161,81	1,82	0,55	16,21	0,207	0,063
45.0	290,94	158,33	1,84	0,54	16,93	0,217	0,058
90.0	297,04	163,27	1,82	0,55	16,18	0,207	0,066
MÉDIA	294,39	161,14	1,827	0,547	16,44	0,211	0,062
VARIÂNCIA	7,194	4,293	0,00008	0,00002	0,12	0,000057	0,00011
DESVIO PADRÃO	2,682	2,072	0,0094	0,0047	0,347	0,0075	0,0033

Fonte: Arquivo do Autor

4.5.2 Ensaio de tração na taxa de deformação $5,0 \times 10^{-3} / \text{min}$

Tabela 10 - Tabela de parâmetros obtidos nos procedimentos de ensaio (Taxa $5,0 \times 10^{-3} / \text{min}$.)

VALORES MÉDIOS DOS PARÂMETROS MECÂNICOS							
ÂNGULO (°)	TENSÃO RUPTURA (mpa)	TENSÃO ESCOAMENTO (mpa)	REL. tr / te	REL. te / tr	DEFORM. LINEAR (MM)	DEFORM. RUP. (%)	DEFORM. MAX. (%)
00.0	293,39	164,58	1,78	0,56	16,77	0,215	0,064
45.0	288,48	159,42	1,81	0,55	16,99	0,217	0,058
90.0	295,18	165,97	1,78	0,56	16,47	0,211	0,067
MÉDIA	292,35	163,32	1,79	0,556	16,74	0,214	0,063
VARIÂNCIA	8,022	7,939	0,0002	0,00002	0,045	0,00001	0,0000063
DESVIO PADRÃO	2,832	2,817	0,014	0,0047	0,213	0,0032	0,00251

Fonte: Arquivo do Autor

A Tabela 11 relaciona as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração e estabelece um critério de comparação entre os valores médios obtidos nos ensaios de tração nas diferentes taxas de deformação adotadas ($2,5 \times 10^{-3}$ / min e $5,0 \times 10^{-3}$ / min), em relação aos valores referenciais encontrados na literatura para a liga de alumínio 5052-H34.

Tabela 11 - Comparativo das propriedades mecânicas médias obtidas

Propriedades Mecânica	Valor Máximo	Valor Médio Ensaio $2,5 \times 10^{-3}$			Valor Médio Ensaio $5,0 \times 10^{-3}$		
		0°	45°	90°	0°	45°	90°
		Resist. max. à tração (Mpa)	285	295.18	290.98	297.04	293.39
Tensão no escoamento (Mpa)	180	161.81	158.33	163.27	164.58	159.42	165.97
Alongamento linear max. (mm)	8	16,21	16,93	16,18	16,77	16,99	16,47
Deformação max. (% em 50 mm)	10	49,02	49,53	48,93	49,31	50,61	49,72

Fonte: Arquivo do Autor

Os resultados de limite de resistência à tração obtidos para todos os ângulos anisotrópicos estudados e demonstrados na Tabela 11 estão ligeiramente superiores ao valor descrito pelo Atlas Steel e demonstrado na Tabela 3.

4.5.3 Efeito Portevin- Le Chatelier (PLC) em relação ao Perfil das Curvas

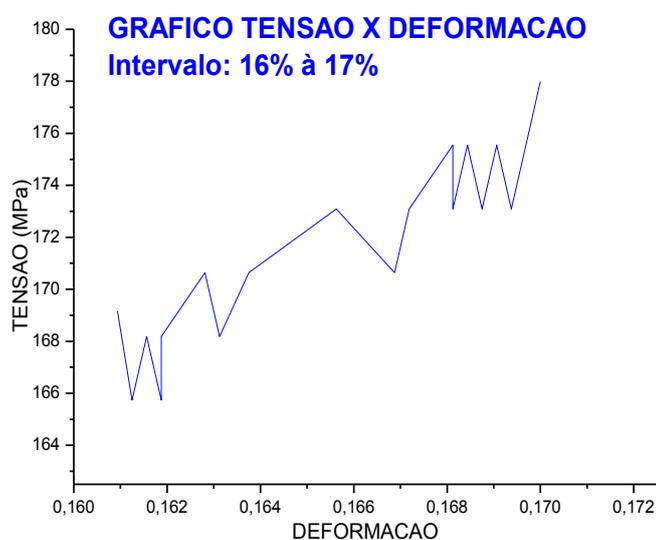
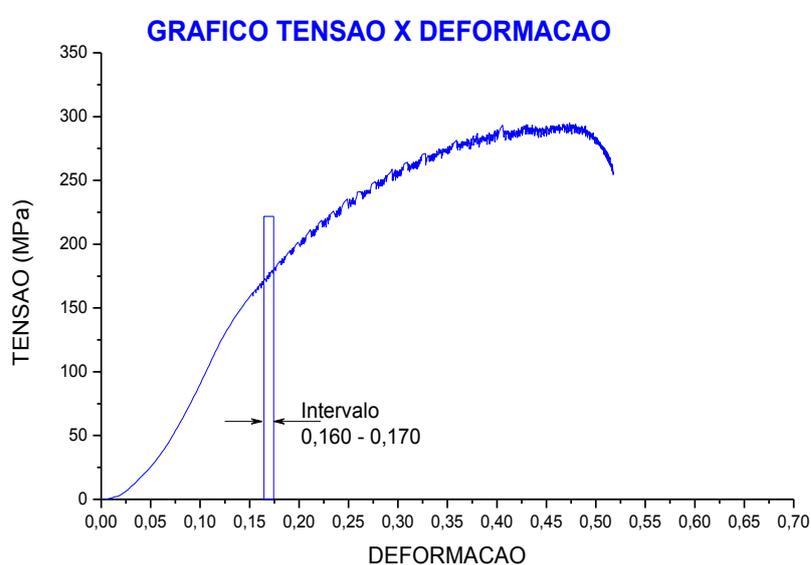
O comportamento das instabilidades de Efeito Portevin-Le chatelier (PLC), analisadas nos três ângulos anisotrópicos em estudo (0° , 45° e 90°), nas duas taxas de deformação ensaiadas e tomando como referência as regiões de deformação nas proximidades da tensão crítica e tensão de ruptura (respectivamente, 16% a 17% e 35% a 36%), não apresentam variações relevantes. As imagens gráficas do Efeito PLC mostram que as instabilidades não sofreram grandes alterações nos perfis das curvas em todos os ângulos e taxas estudados, mantendo um perfil de curva bem definido em ambas as regiões de deformação estudadas, apresentando um perfil de curva semelhante ao tipo “C”.

O aumento na taxa de deformação aplicada resultou em perfis com instabilidades de menor amplitude, porém mantendo o mesmo perfil característico. As tensões na região crítica dos gráficos nos diferentes ângulos anisotrópicos são

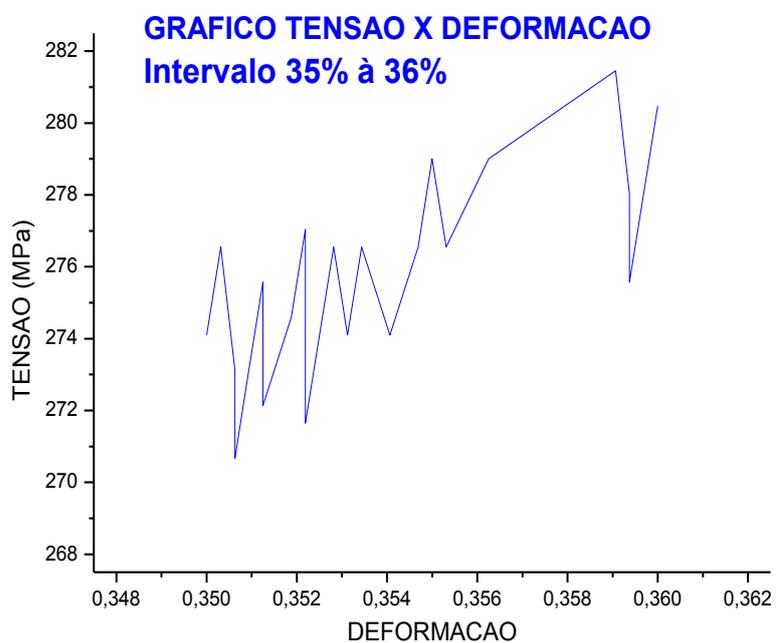
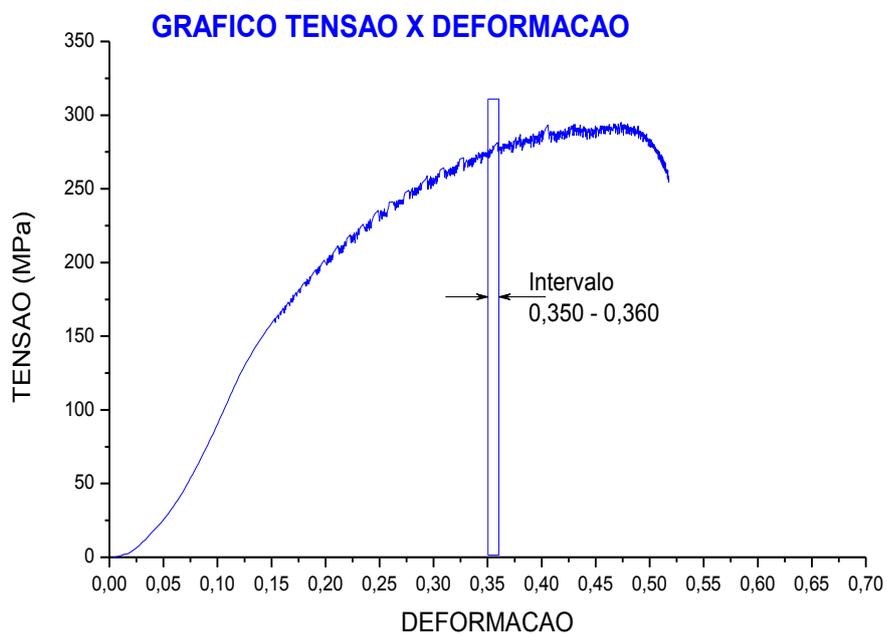
deslocadas para níveis mais altos de tensão com o aumento na taxa de deformação aplicada. As Figuras 30, 31 e 32 mostram as variações nas instabilidades, obtidas após plotagem dos dados gerados nos ensaios de tração, considerando os diferentes ângulos anisotrópicos estudados e a taxa de deformação mais baixa ($2,5 \times 10^{-3}$ / min). Da mesma forma, as Figuras 33, 34 e 35 abordam os mesmos parâmetros, porém considerando a velocidade de deformação de $5,0 \times 10^{-3}$ / min.

Figura 30 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 0° e taxa de deformação de $2,5 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo

a) Região de deformação 16% a 17% (Tensão Crítica)



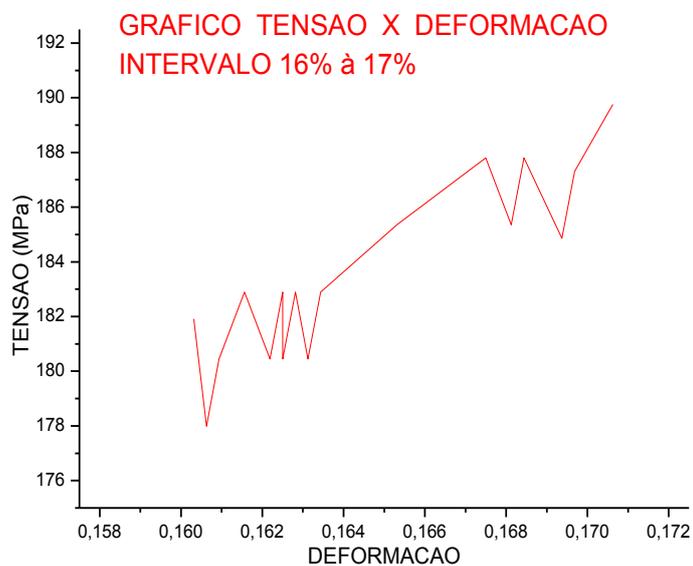
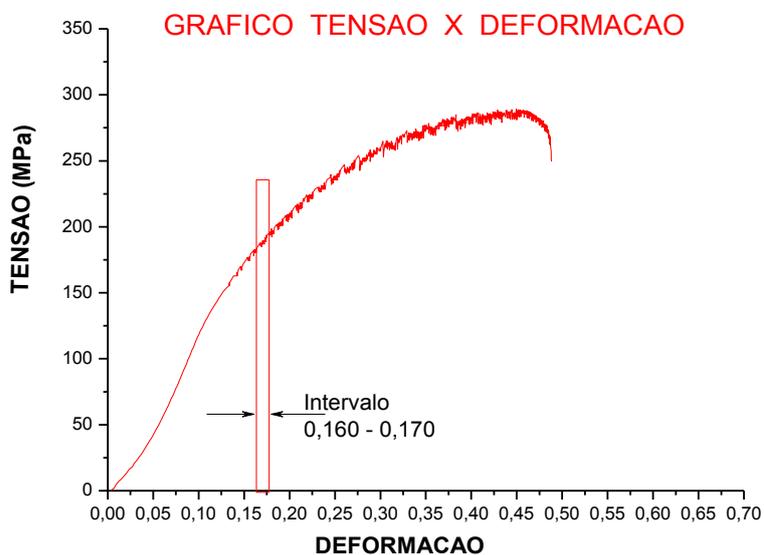
b) Região de deformação 35% a 36% (Tensão Ruptura)



Fonte: Arquivo do Autor

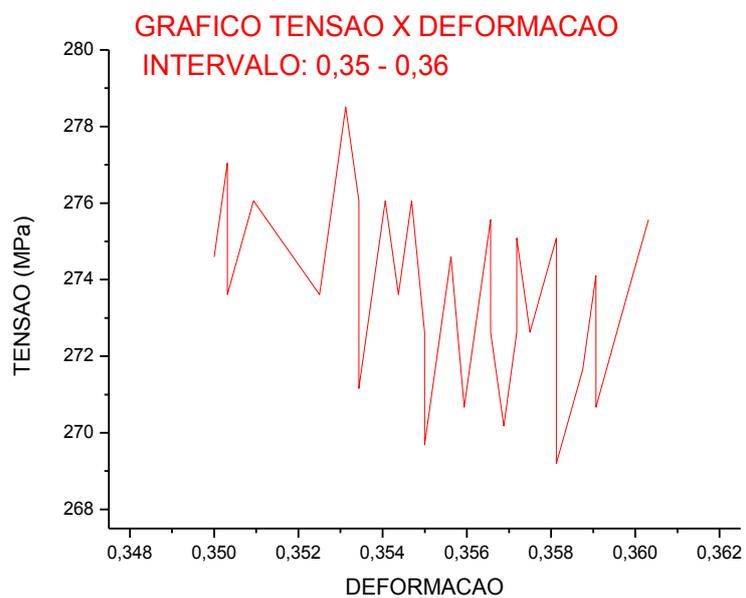
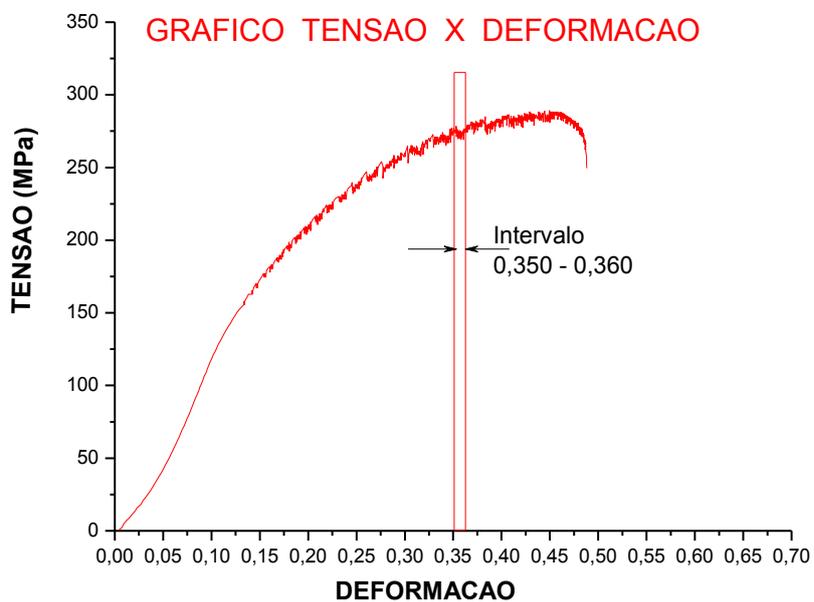
Figura 31 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 45° e taxa de deformação de $2,5 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo

a) Região de deformação 16% a 17% (Tensão Crítica)



Fonte: Arquivo do Autor

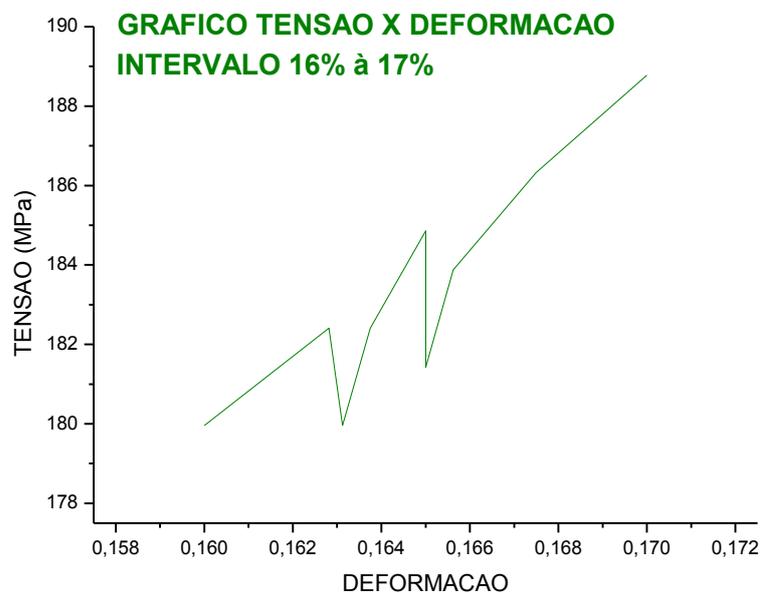
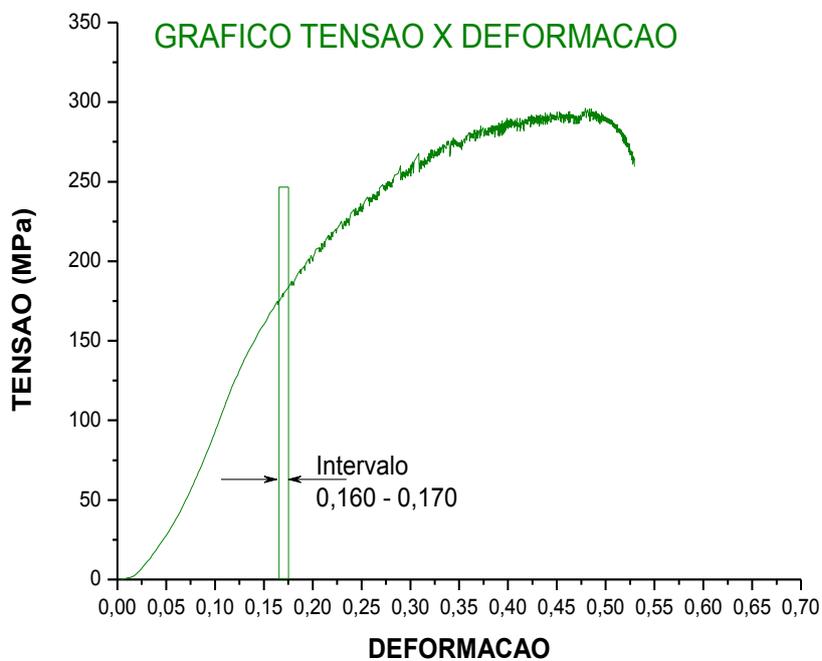
b) Região de deformação 35% a 36% (Tensão Ruptura)



Fonte: Arquivo do Autor

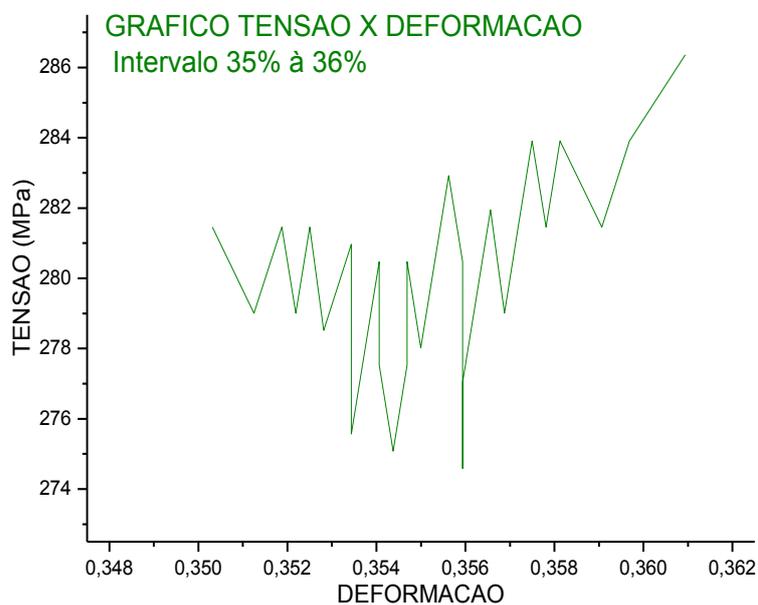
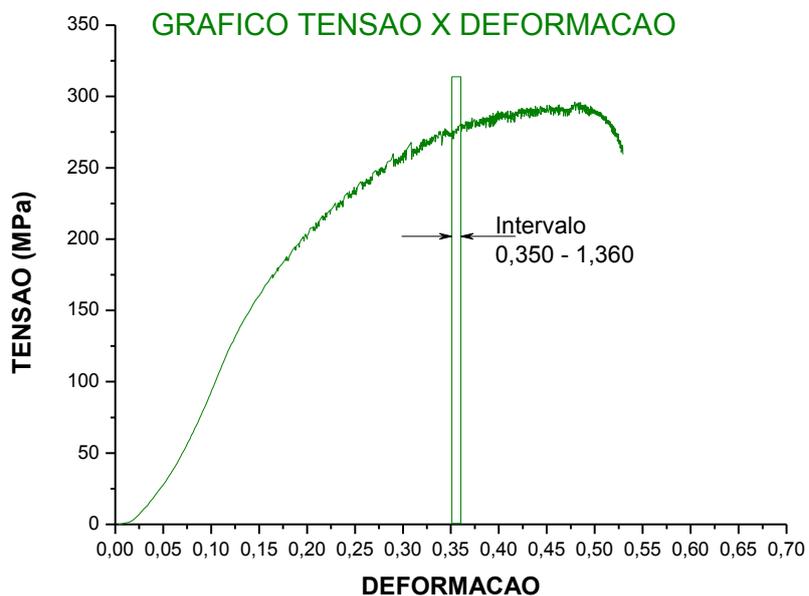
Figura 32 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 90° e taxa de deformação de $2,5 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo

a) Região de deformação 16% a 17% (Tensão Crítica)



Fonte: Arquivo do Autor

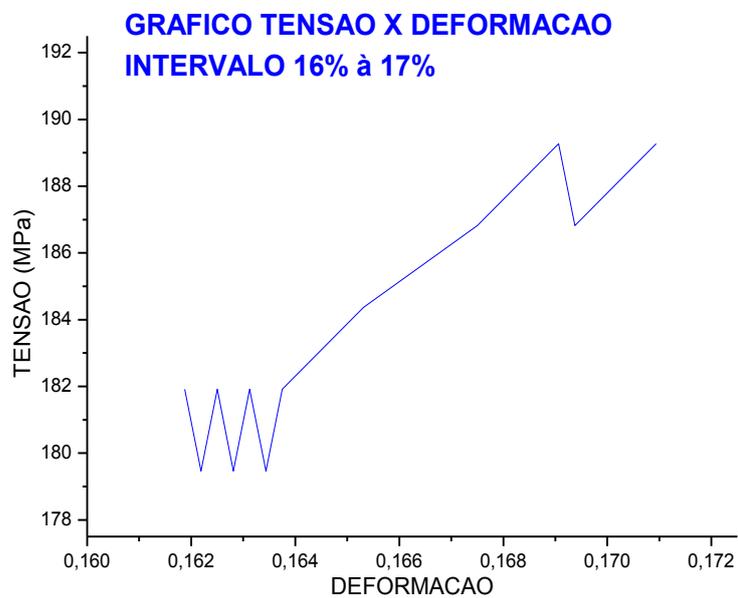
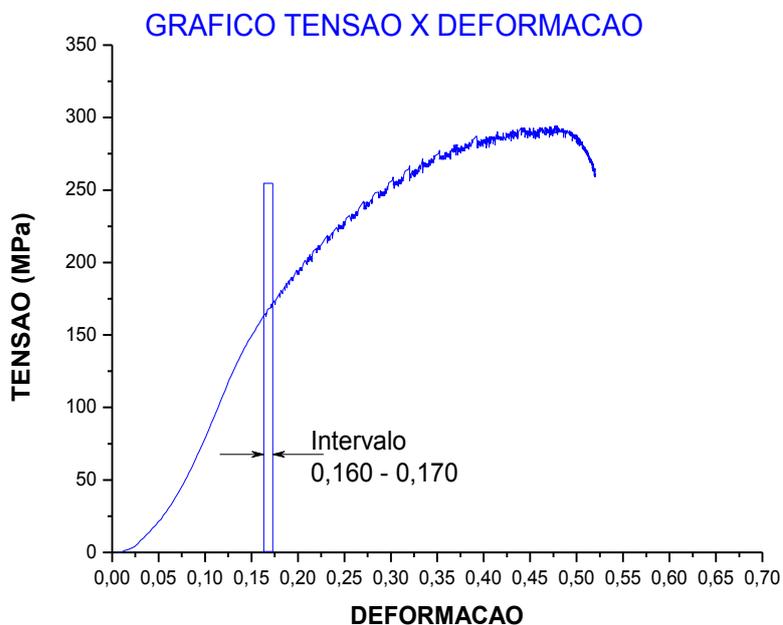
b) Região de deformação 35% a 36% (Tensão Ruptura)



Fonte: Arquivo do Autor

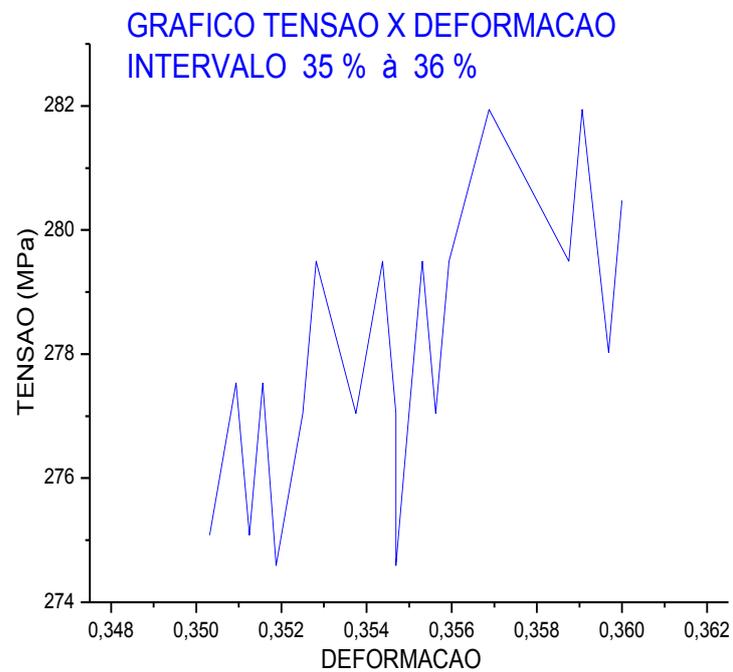
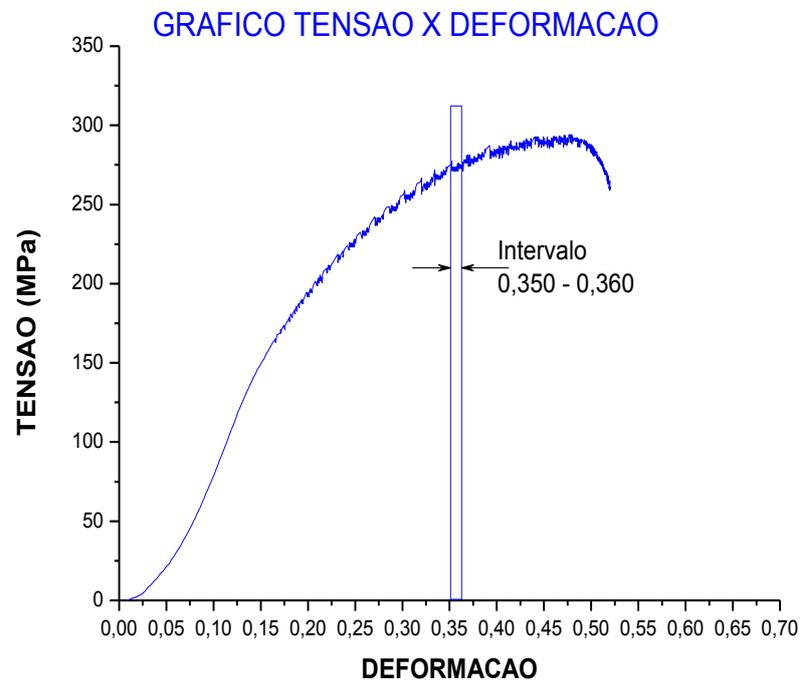
Figura 33 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 0° e taxa de deformação de $5,0 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo

a) Região de deformação 16% a 17% (Tensão Crítica)



Fonte: Arquivo do Autor

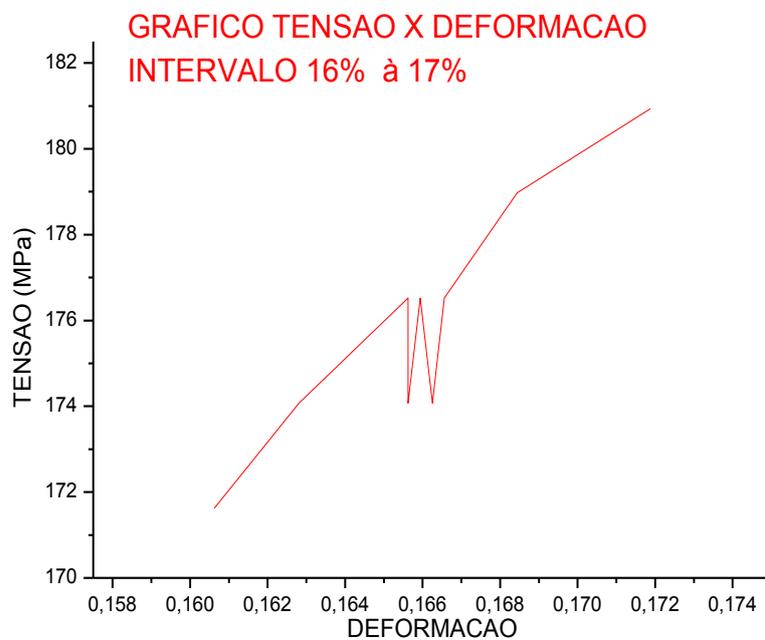
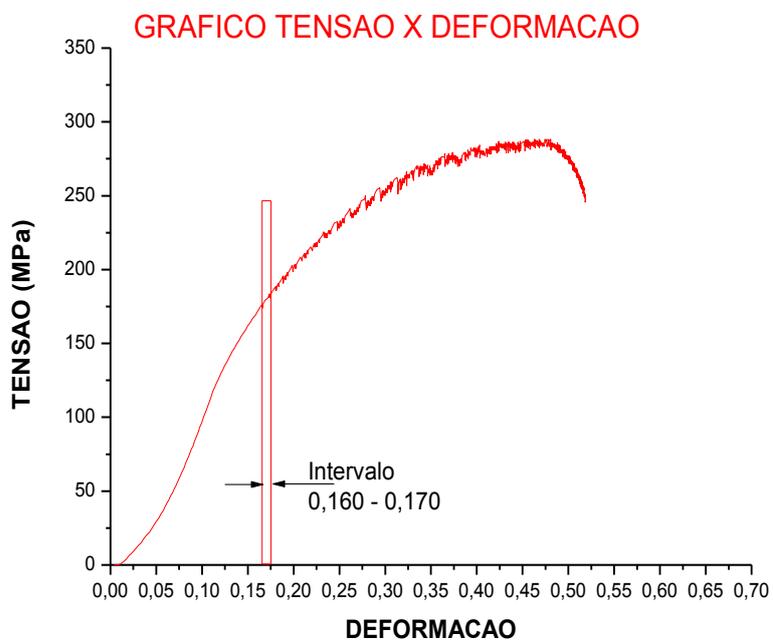
b) Região de deformação 35% a 36% (Tensão Ruptura)



Fonte: Arquivo do Autor

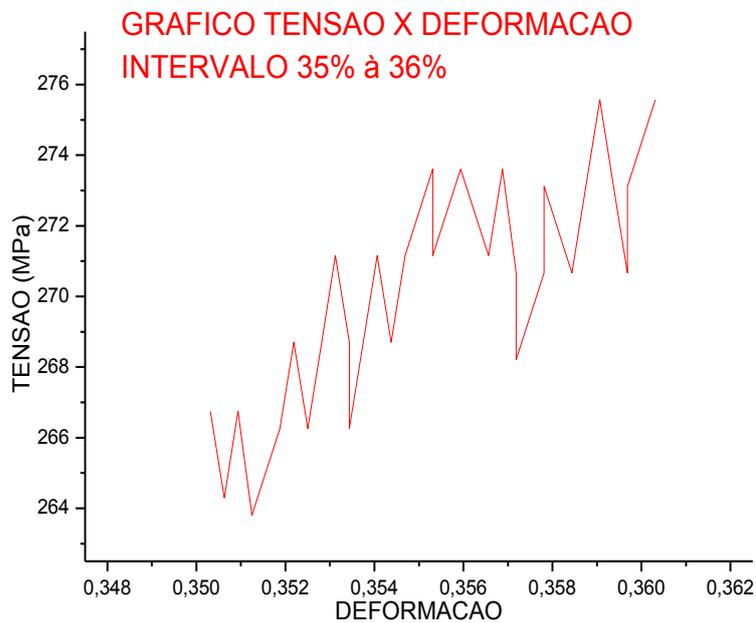
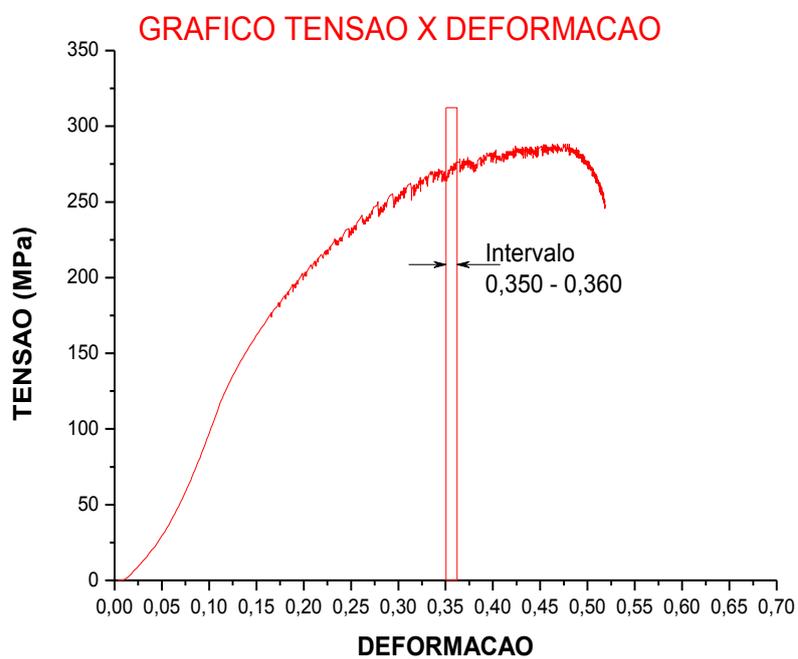
Figura 34 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 45° e taxa de deformação de $5,0 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo

a) Região de deformação 16% a 17% (Tensão Crítica).



Fonte: Arquivo do Autor

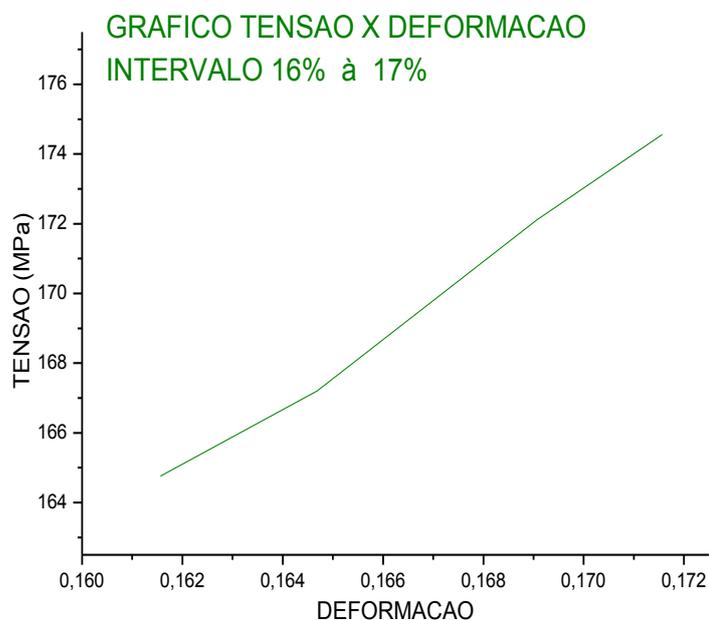
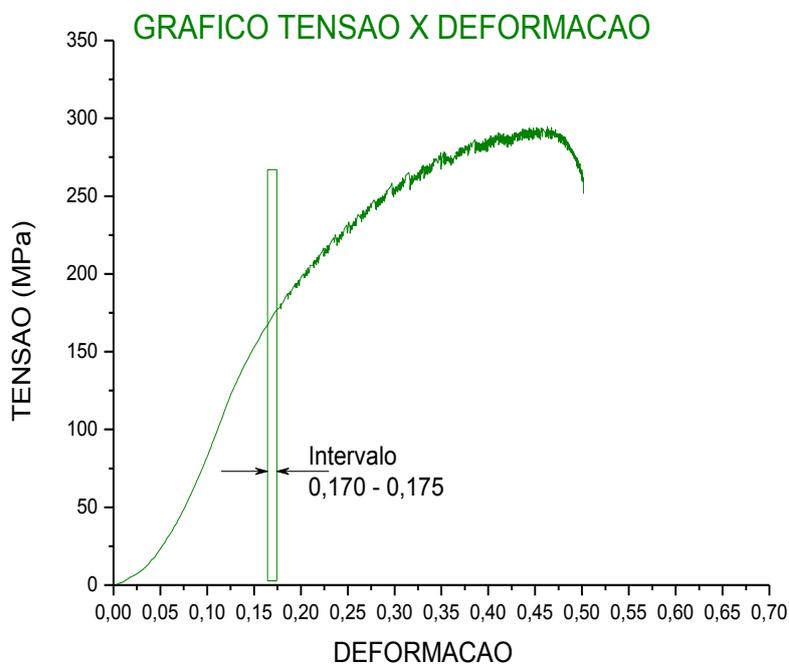
b) Região de deformação 35% a 36% (Tensão Ruptura)



Fonte: Arquivo do Autor

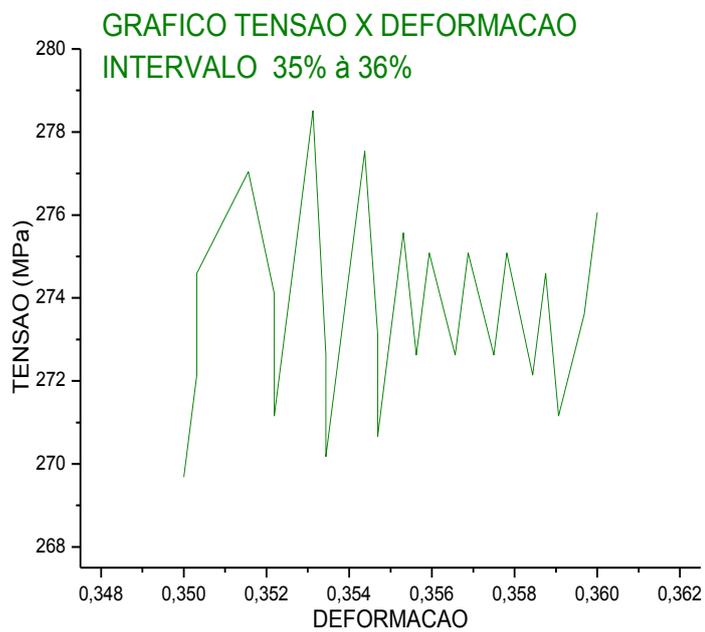
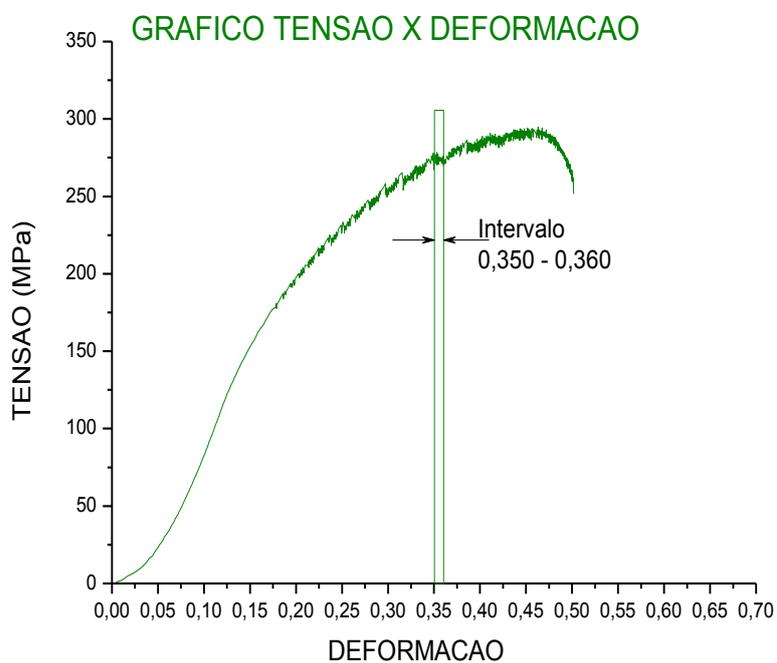
Figura 35 - Gráficos comparativos da variação de perfil do Efeito PLC, ângulo anisotrópico de 90° e taxa de deformação de $5,0 \times 10^{-3}$ / min, considerando a variação na região de deformação em estudo

a) Região de deformação 16% a 17% (Tensão Crítica).



Fonte: Arquivo do Autor

b) Região de deformação 35% a 36% (Tensão Ruptura)



Fonte: Arquivo do Autor

4.5.4 Avaliação das taxas de Relaxação das instabilidades de Efeito PLC

Uma variável importante observada nos gráficos de Efeito PLC que, de certa forma, diferencia o comportamento de uma fenomenologia para outra, é a variação do tempo consumido para elevação da tensão e seu consequente descarregamento. Esta variável temporal depende das condicionantes da tensão sob as quais está submetido o metal ao longo de todo o processo de deformação plástica. O tempo gasto para elevação da tensão depende da resistência do metal ao escoamento a qual é diretamente influenciada por fatores internos e externos ao fenômeno. O tempo necessário para alívio da tensão e relaxamento das tensões internas também recebe influência direta de fatores internos e externos.

O entendimento fundamental que recai sobre a análise da variável temporal do fenômeno está relacionado ao tempo de travamento do movimento das discordâncias e o tempo gasto para destravamento deste movimento das placas deslizantes. Sendo assim, durante o tempo em que a tensão está em elevação, dentro da região plástica do gráfico tensão x deformação, os movimentos das discordâncias estão travados até que a tensão atinja um patamar superior necessário ao destravamento do movimento.

Por outro lado, o tempo consumido para promover a queda subsequente das tensões internas representa o tempo necessário para os escorregamentos internos das discordâncias acontecerem e, com isso, haja o relaxamento das tensões internas. O tempo consumido na elevação da tensão para destravamento do movimento pode ser entendido como um reflexo da resistência do material ao escoamento e, conseqüentemente, maiores tensões resistentes. Da mesma forma, menor tempo consumido na queda das tensões, durante o período de escorregamento das discordâncias e relaxamentos internos, pode caracterizar um cenário de maiores resistências às tensões atuantes.

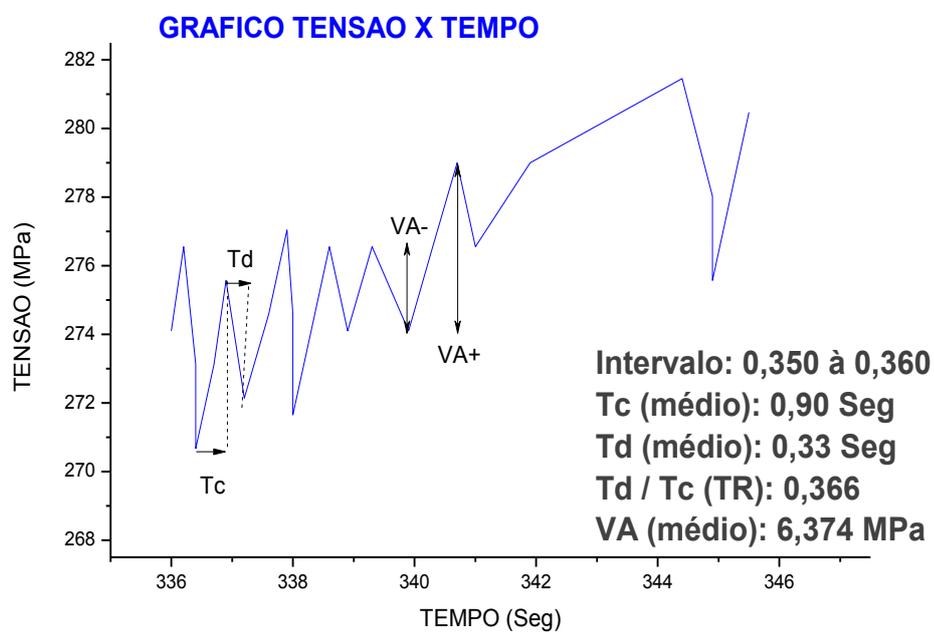
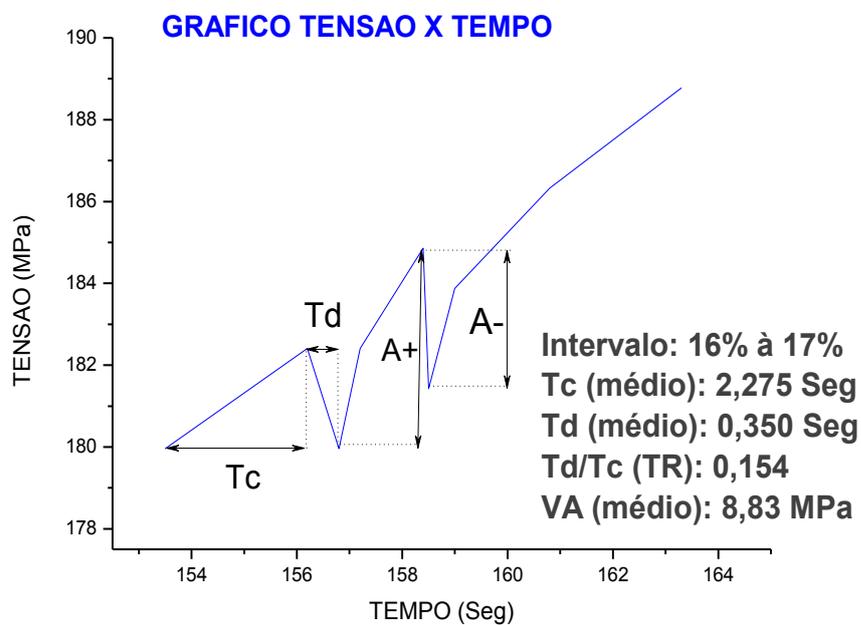
Nas Figuras 36, 37 e 38 define-se como “Tc” (Tempo de Carga) o tempo médio gasto para elevação das tensões internas para os diferentes ângulos anisotrópicos e para as diferentes taxas de deformação abordadas neste estudo. Define-se ainda “Td” (Tempo de Descarga) como sendo o tempo médio consumido durante o processo de escoamento e relaxação das tensões internas nos diferentes ângulos de anisotropia e taxa de deformação adotados. A Taxa de Relaxação, aqui denominada como “TR”

(T_d/T_c), é a razão entre o tempo de descarga (T_d) e o tempo de carga (T_c) e propõe-se ser um indicador do cenário mais resistente às tensões aplicadas. Logo, menores TRs são indicativos de condições mais favoráveis e mais resistentes. Neste estudo, onde o ângulo de incidência da força é o fator preponderante e variável de controle mais objetiva em aplicações reais de estruturas metálicas, observa-se que as resistências mecânicas verificadas são maiores para o ângulo anisotrópico de 90° e menores para 45° . Ficando o ângulo de 0° num valor intermediário, porém mais próximo de 90° . As resistências mecânicas verificadas em todos os ângulos anisotrópicos sofreram pouca influência da Taxa de Deformação aplicada.

As amplitudes positivas ($VA+$) e amplitudes negativas ($VA-$) foram obtidas na forma de somatórios positivos (crescimento) e negativo (decaimento) e apurado o saldo (VA médio) como forma de observação da tendência final da tensão dentro dos intervalos de abordagem (16% à 17% e 35% à 36%). As Figuras 38, 39 e 40 apresentam os gráficos tensão x tempo demonstrando as médias dos tempos de carga (T_c), médias de tempo de descarga (T_d), amplitude média de tensão (VA) e taxa de relaxação (TR); obtidas para os diferentes ângulos anisotrópicos estudados, nas taxas de deformação (a) $2,5 \times 10^{-3}$ e (b) $5,0 \times 10^{-3}$, intervalo de deformação 16% a 17% (próximo tensão crítica) e 35% a 36% (próximo tensão de ruptura).

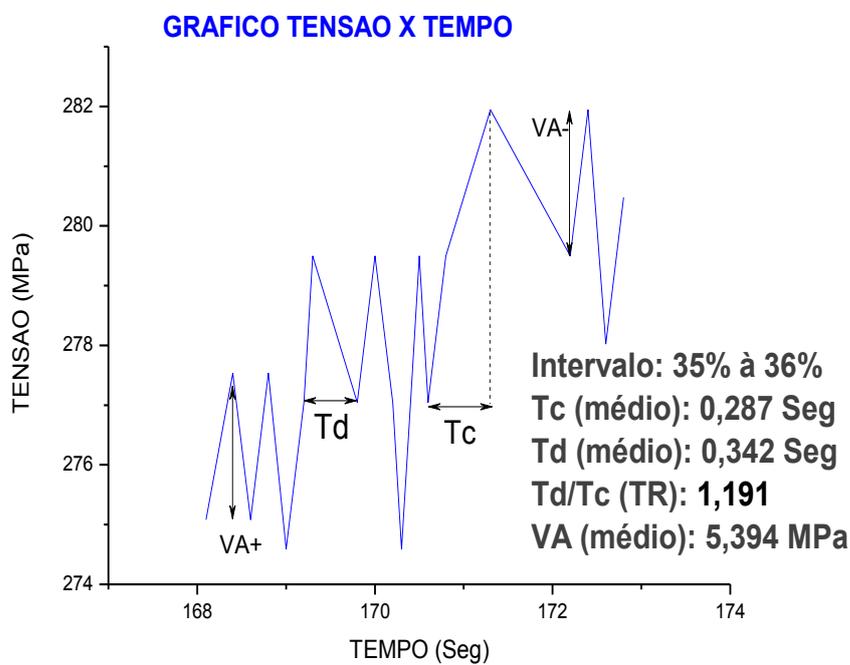
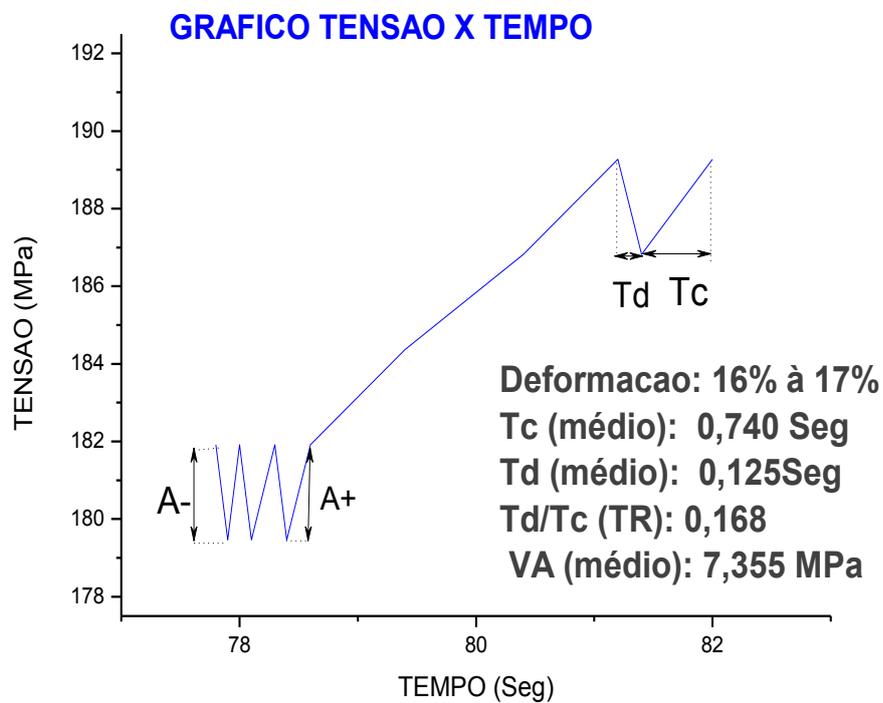
Figura 36 - Gráficos Tensão x Tempo para o ângulo anisotrópico 0° , nas taxas de deformação $2,5 \times 10^{-3} / \text{min}$ e $5,0 \times 10^{-3} / \text{min}$

a) Taxa de Deformação $2,5 \times 10^{-3} / \text{min}$



Fonte: Arquivo do Autor

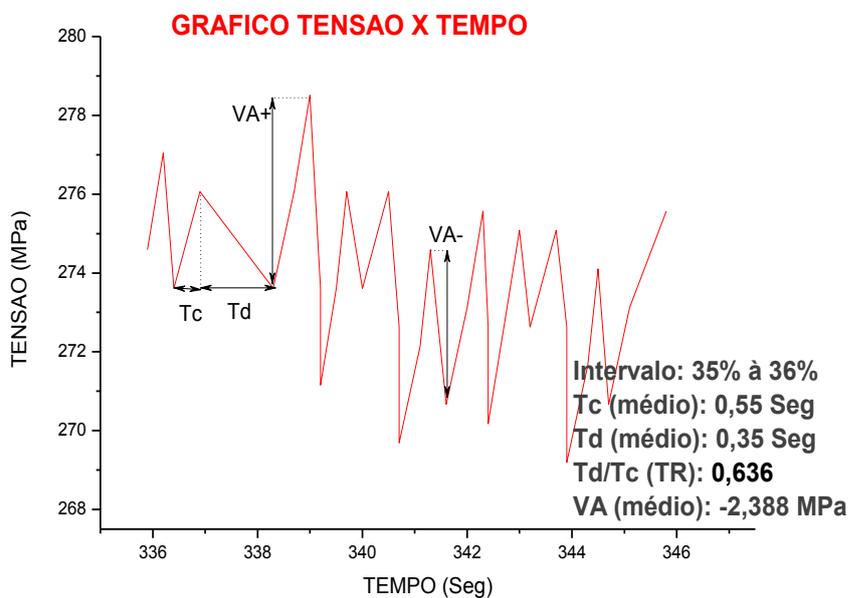
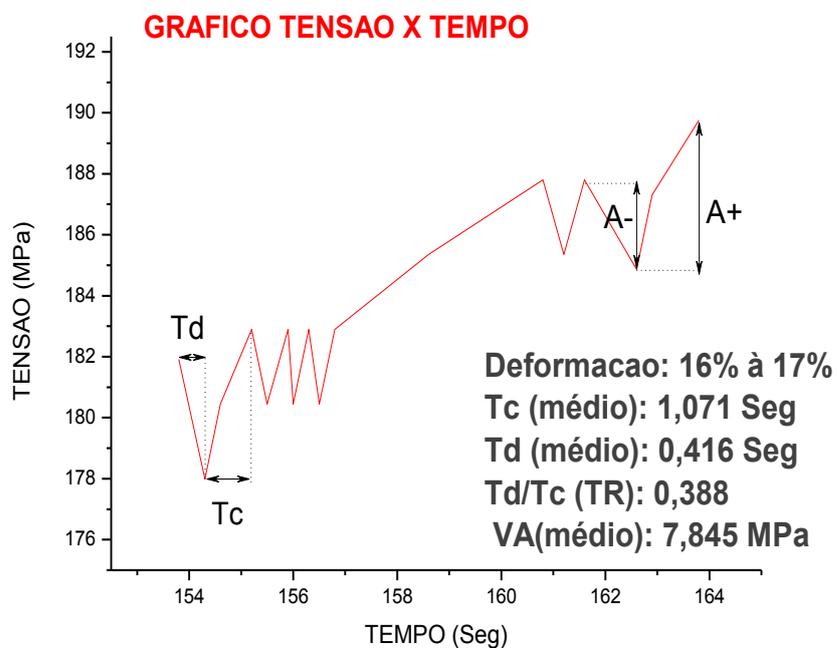
b) Taxa de Deformação $5,0 \times 10^{-3}$ / min



Fonte: Arquivo do Autor

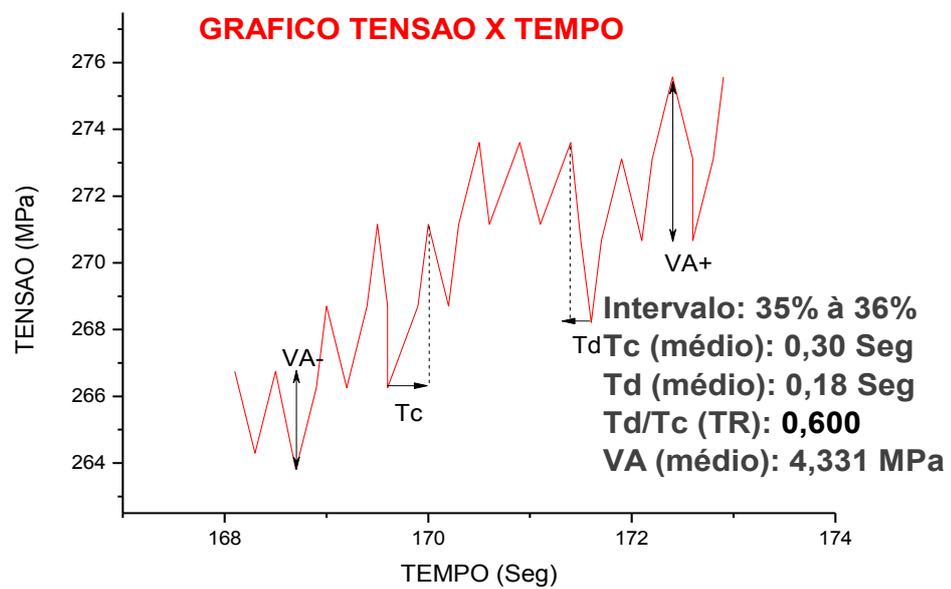
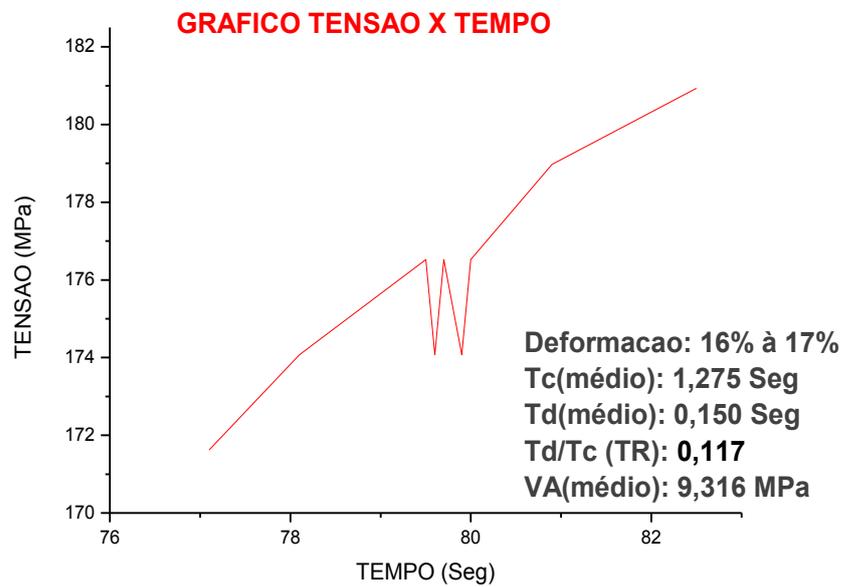
Figura 37 - Gráficos Tensão x Tempo para o ângulo anisotrópico 45° , nas taxas de deformação $2,5 \times 10^{-3} / \text{min}$ e $5,0 \times 10^{-3} / \text{min}$.

a) Taxa de Deformação $2,5 \times 10^{-3} / \text{min}$



Fonte: Arquivo do Autor

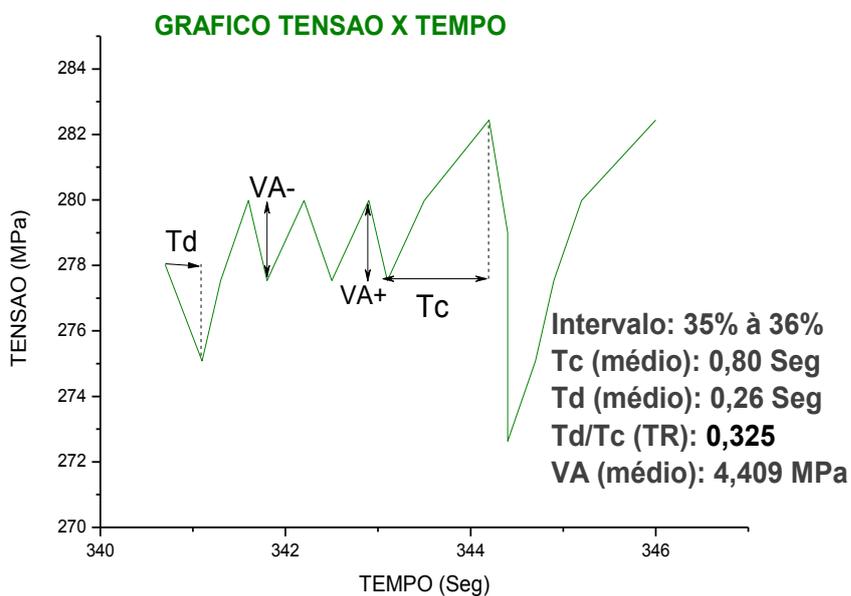
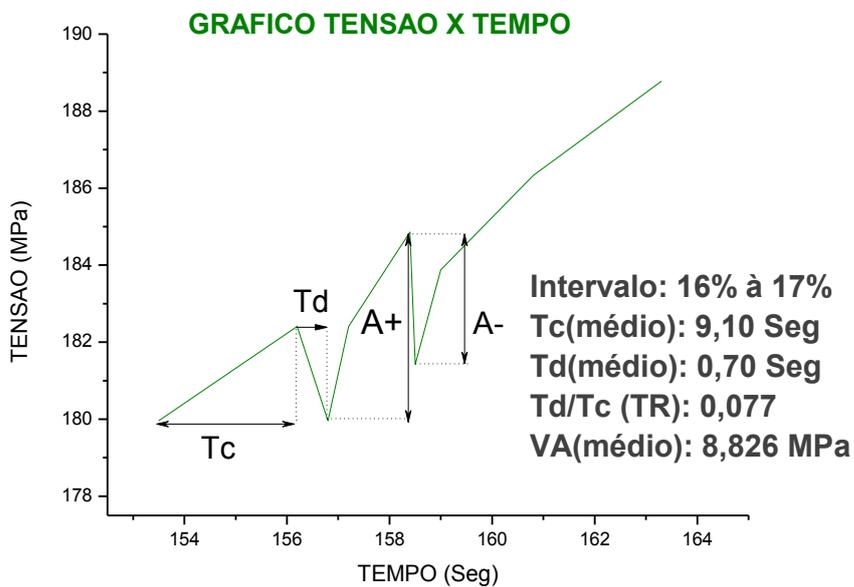
b) Taxa de Deformação $5,0 \times 10^{-3}$ / min



Fonte: Arquivo do Autor

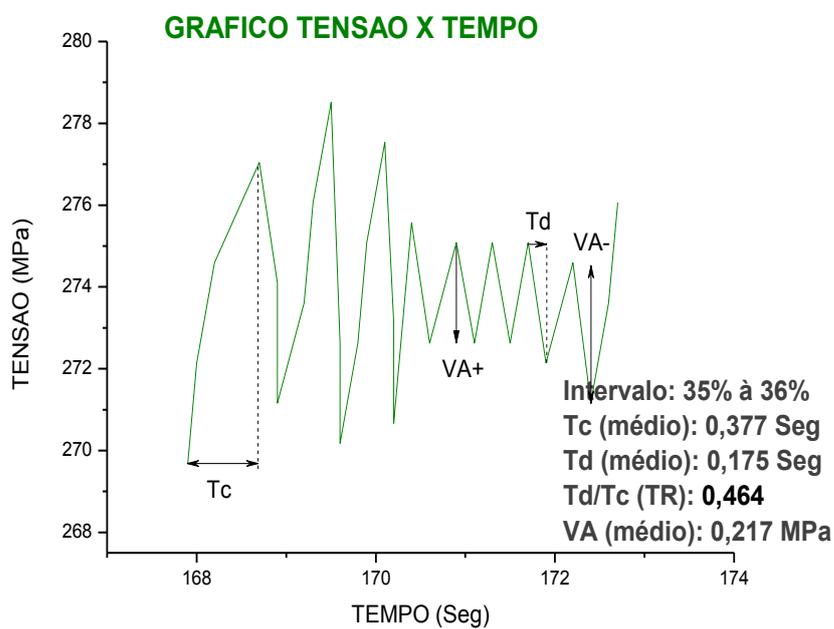
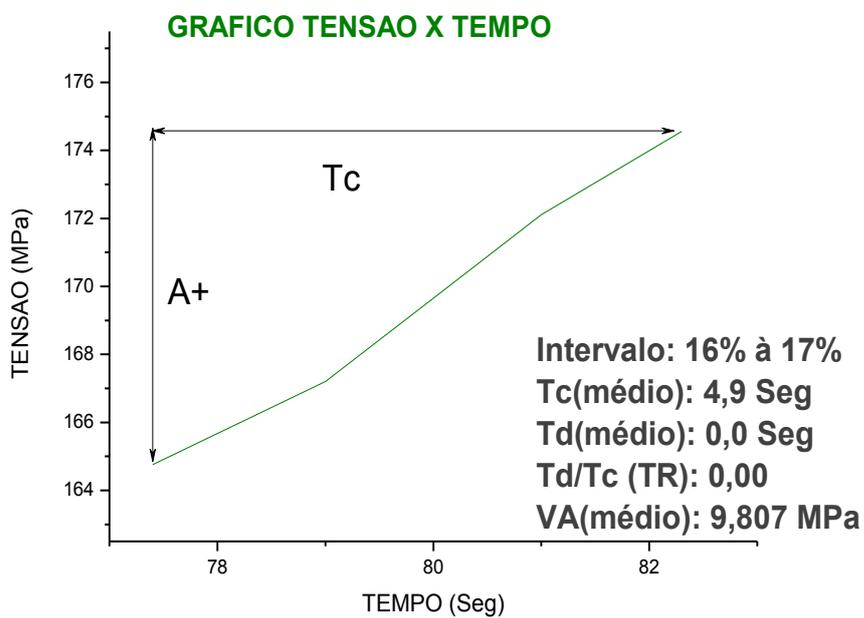
Figura 38 - Gráficos Tensão x Tempo para o ângulo anisotrópico 90° , nas taxas de deformação $2,5 \times 10^{-3} / \text{min}$ e $5,0 \times 10^{-3} / \text{min}$.

a) Taxa de Deformação $2,5 \times 10^{-3} / \text{min}$



Fonte: Arquivo do Autor

b) Taxa de Deformação $5,0 \times 10^{-3}$ / min



Fonte: Arquivo do Autor

Tabela 12 - Resumo das Taxas de Relaxação (TR) para os diferentes ângulos anisotrópicos e taxas de deformação aplicadas nos ensaios de tração

ÂNGULO ANISOTRÓPICO	2.5 X 10 ⁻³		5.0 X 10 ⁻³	
	TENSÃO CRÍTICA (16%-17%)	TENSÃO RUPTURA (35%-36%)	TENSÃO CRÍTICA (16%-17%)	TENSÃO RUPTURA (35%-36%)
0°	0,154	0,366	0,168	1,191
45°	0,388	0,636	0,117	0,6
90°	0,077	0,325	0	0,484

Fonte: Arquivo do Autor

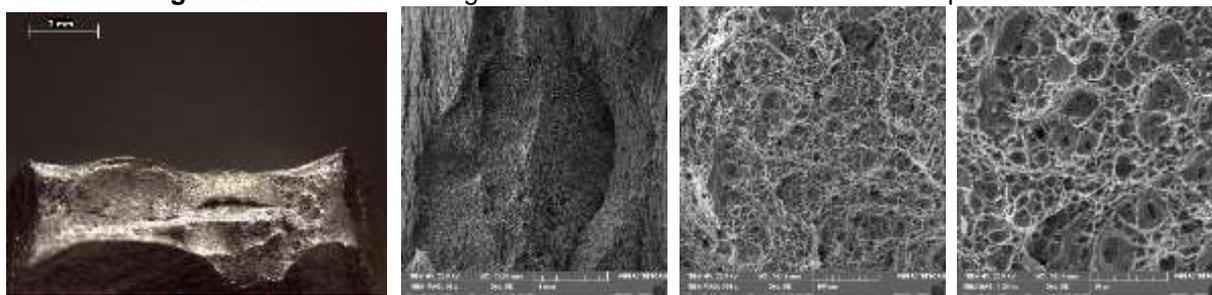
A Tabela 12 dispõe as diferentes taxas de relaxação obtidas nas diferentes taxas de deformação e ângulos anisotrópicos adotados neste estudo. A taxa de relaxação (TR) é um parâmetro indicador das resistências ao deslocamento das discordâncias. Sendo que sistemas mais travados ou resistentes ao escoamento apresentam baixas taxas de relaxação. Podemos observar, assim, que a liga AA5052-H34 oferece maior resistência aos escoamentos no início da manifestação do efeito PLC, na região de tensão crítica para todos os ângulos e taxas de deformação adotados.

4.5.5 Caracterização da fratura

A análise microscópica do plano da fratura é uma técnica largamente utilizada para avaliação de causas e efeitos do colapso de uma peça. Evidentemente que este recurso, bastante utilizado pela engenharia de manutenção, demanda o aporte de tecnologia de ponta comumente disponibilizado sob a forma de ferramental eletrônico.

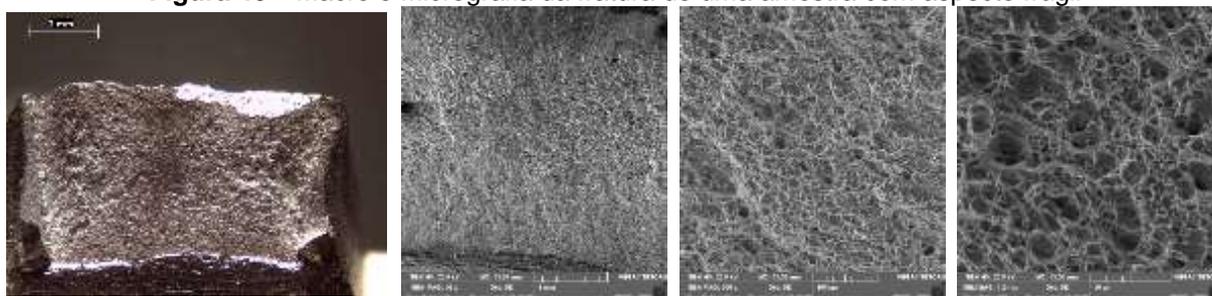
Nas Figuras 39 e 40, são apresentadas as imagens dos planos de fratura de duas amostras ensaiadas, revelando as particularidades do processo de fratura que são imperceptíveis no olhar livre do técnico. Analisando as imagens obtidas através de um microscópio eletrônico, podemos deduzir o mecanismo presente no processo de fratura e verificar o comportamento resistente do material, avaliando o comportamento dúctil ou frágil da fratura e ângulo da ruptura das três amostras observadas. Neste caso, as imagens revelam duas fraturas de aspecto frágil com formação de ângulo de 45° (Fig. 39), e uma amostra com aspecto dúctil (Fig. 40).

Figura 39 - Macro e Micrografia da fratura de uma amostra com aspecto dúctil



Fonte: SANTOS et al. (2017)

Figura 40 - Macro e Micrografia da fratura de uma amostra com aspecto frágil



Fonte: SANTOS et al. (2017)

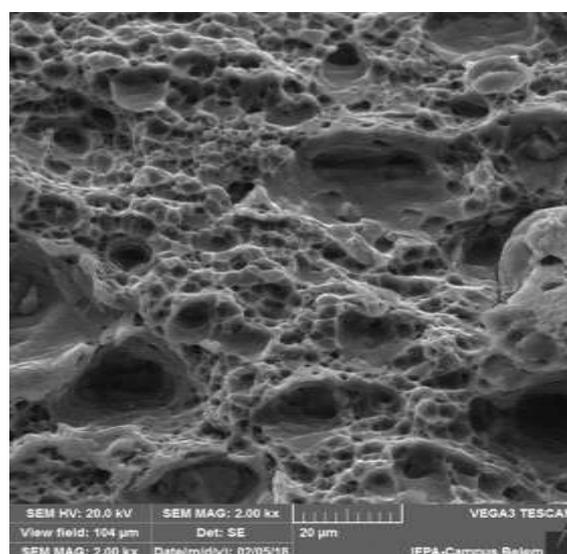
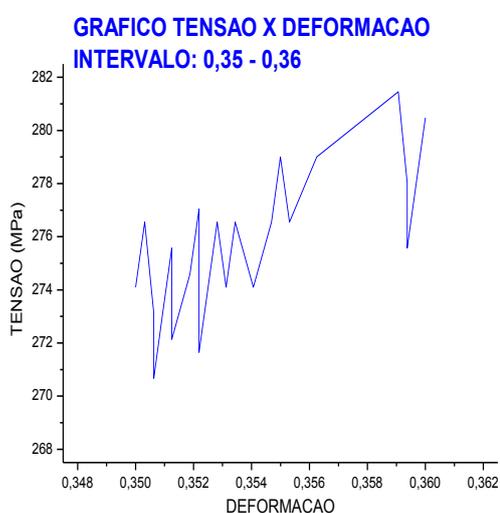
Quando observamos as micrografias das fraturas obtidas por MEV, com a ampliação da imagem, podemos observar que ambas as fraturas apresentam microcavidades, inclusive com a presença de coalescimento. Essas microcavidades e o coalescimento das microcavidades são um indício de que, apesar de duas fraturas aparentemente apresentarem um aspecto frágil, observado macroscopicamente, a liga apresenta características dúcteis, o que justifica o valor percentual de alongamento apresentado obtidos nos ensaios nas diferentes velocidades de avanço.

Observa-se também que na taxa de deformação mais elevada, ou seja, $5,0 \times 10^{-3}$ / min, o coalescimento das microcavidades fica bem mais evidenciado em todos os ângulos anisotrópicos. Particularmente, o ângulo anisotrópico 90° oferece um plano de fratura com as microcavidades mais evidenciadas nas imagens por microscopia por varredura (MEV), o qual é também o ângulo anisotrópico que demonstrou ser o mais resistente nos ensaios de tração da liga, em ambas as taxas de deformação adotadas neste estudo. Considerando que quanto maior a tensão aplicada, mais as microcavidades crescem e coalescem, formando cavidades maiores (ASKELAND; PHULÉ, 2008), podemos supor que as imagens MEV para o ângulo 90° estão alinhadas ao comportamento observado nos ensaios de tração, onde o ângulo anisotrópico 90° também se mostrou mais favorável em termos de resistência.

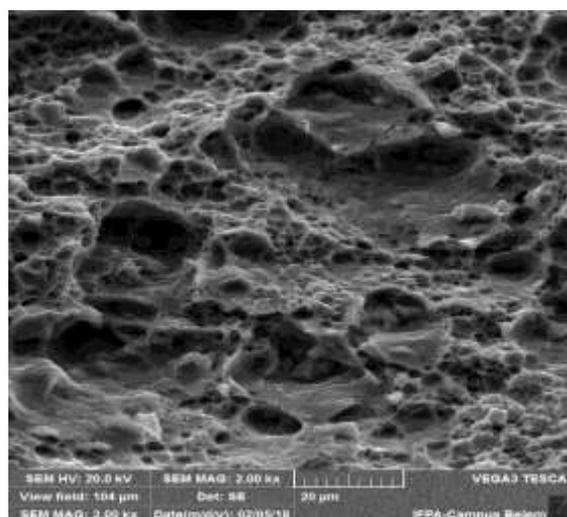
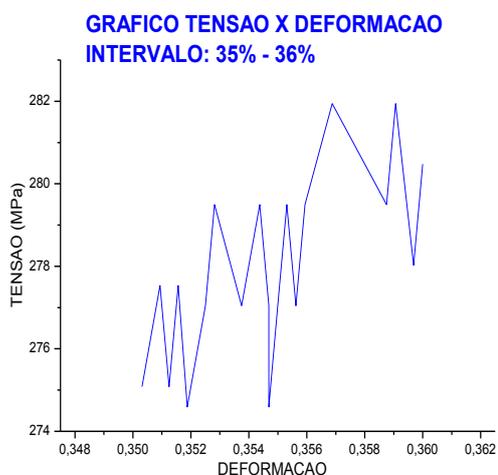
A Figura 41, 42 e 43 apresentam uma visão das microestruturas nos planos das fraturas da liga AA5052-H34 nos diferentes ângulos anisotrópicos aqui estudados e nas taxas de deformação de $2,5 \times 10^{-3}$ / min (a) e $5,0 \times 10^{-3}$ /min (b), comparada com o comportamento dos Efeitos PLC nas regiões de deformação próximas à tensão de ruptura.

Figura 41 - Imagens das microestruturas nos planos das fraturas da liga AA5052-H34 no ângulo 0° e perfil gráfico das oscilações de Efeito PLC

a) Taxa de Deformação $2,5 \times 10^{-3}$ /min



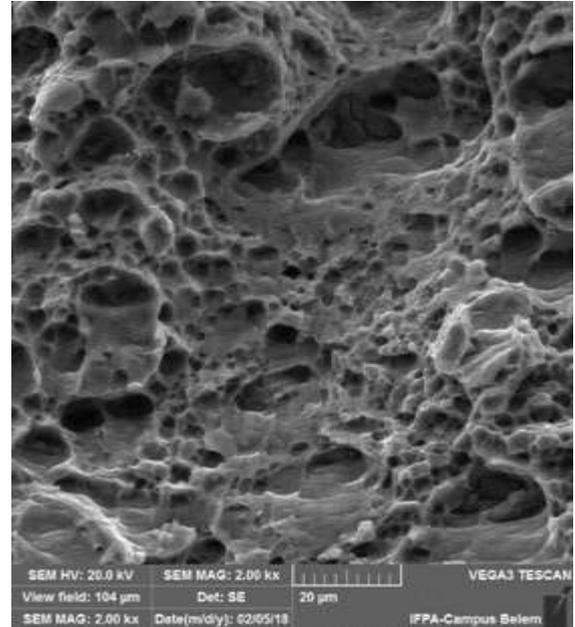
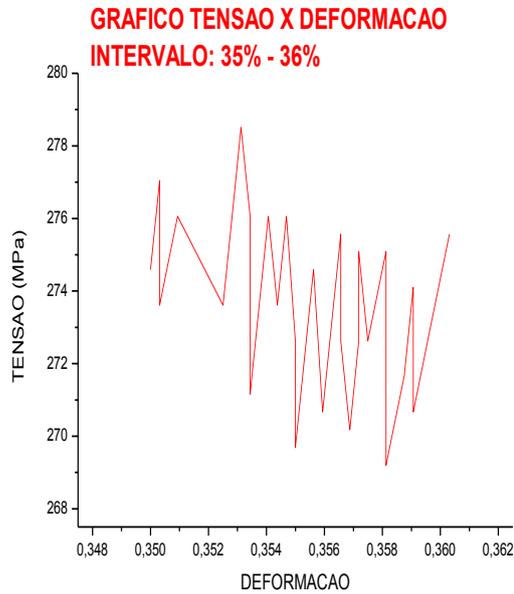
b) Taxa de Deformação $5,0 \times 10^{-3}$ / min



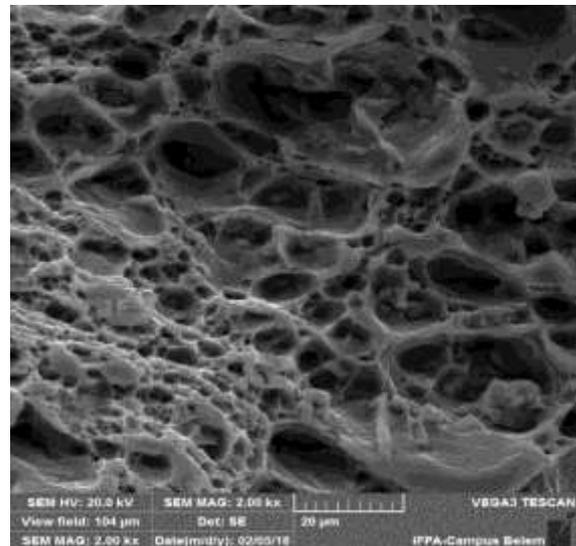
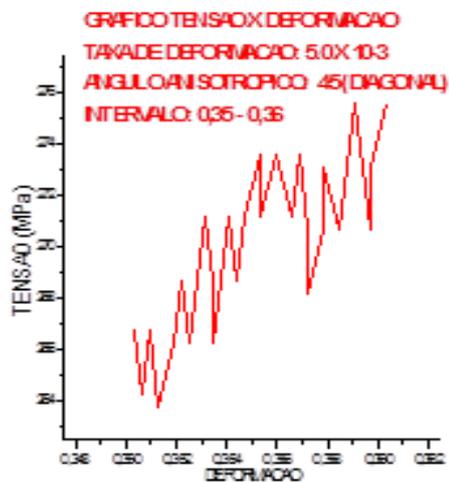
Fonte: Arquivo do Autor

Figura 42 - Imagens das microestruturas nos planos das fraturas da liga AA5052-H34 no ângulo 45° e perfil gráfico das oscilações de Efeito PLC

a) Taxa de Deformação $2,5 \times 10^{-3}$ / min



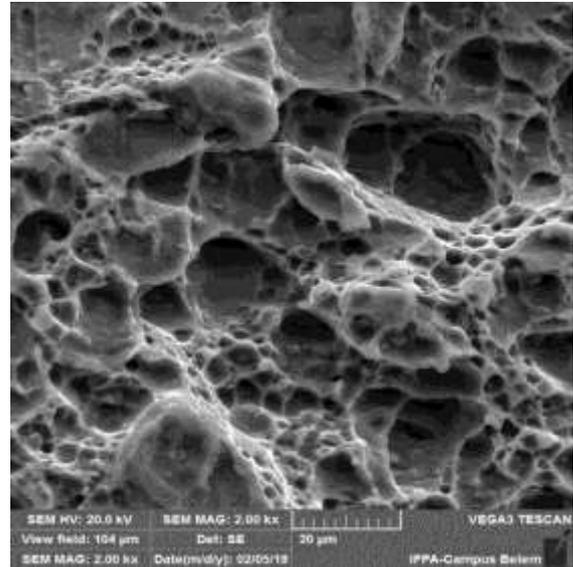
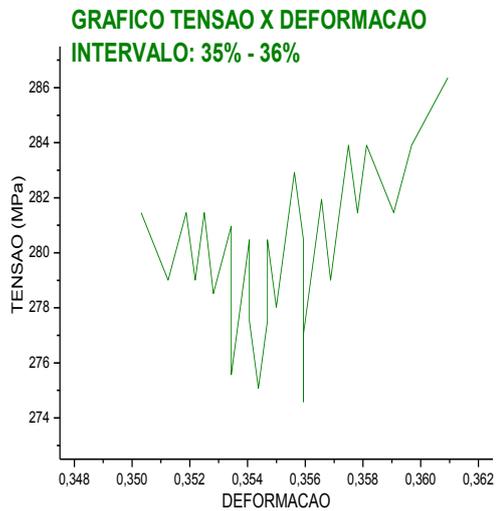
b) Taxa de Deformação $5,0 \times 10^{-3}$ / min



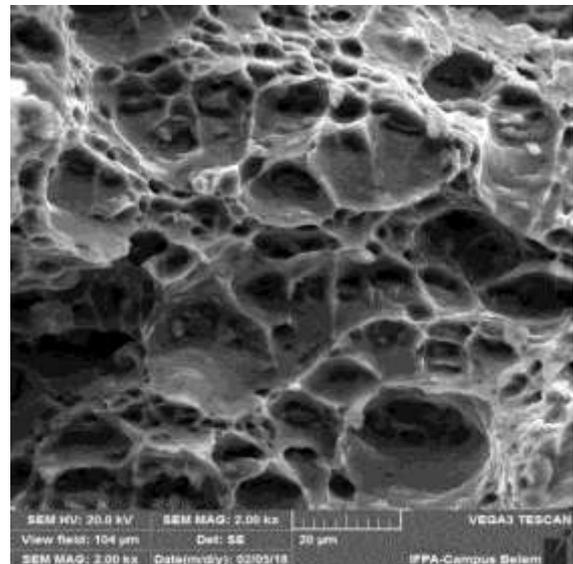
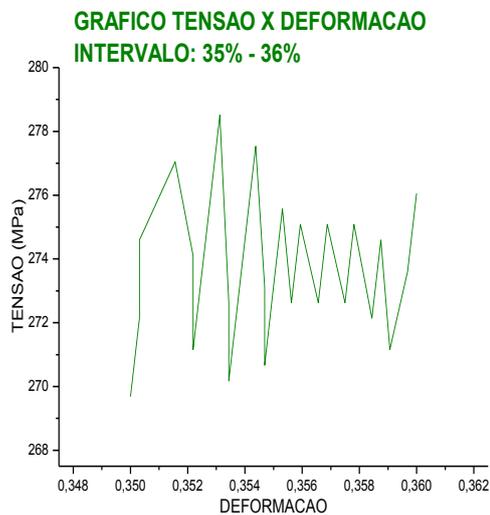
Fonte: Arquivo do Autor

Figura 43 - Imagens das microestruturas nos planos das fraturas da liga AA5052-H34 no ângulo 90° e perfil gráfico das oscilações de Efeito PLC

a) Taxa de Deformação $2,5 \times 10^{-3}$ / min



b) Taxa de Deformação $5,0 \times 10^{-3}$ / min



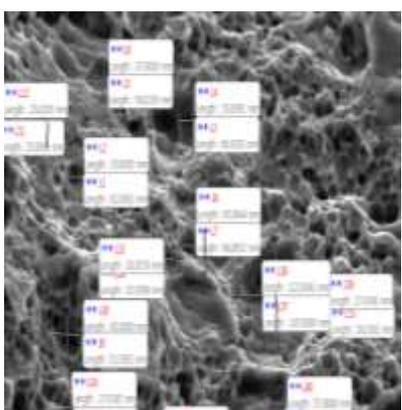
Fonte: Arquivo do Autor

4.5.6 Procedimentos para medição das microcavidades

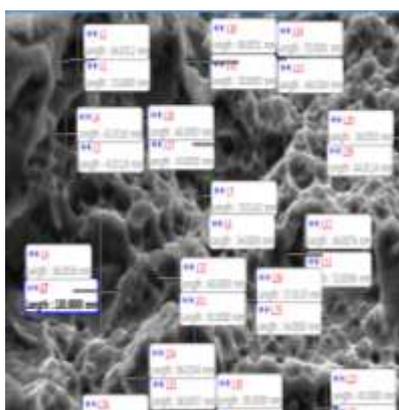
Na seção 2.13.2 deste trabalho foram abordados os procedimentos matemáticos para estabelecer o padrão geométrico das microcavidades. Com base na fundamentação teórica mostrada naquela seção, a qual adota a razão entre as dimensões “L” e “W” de uma microcavidade (Equação 07), efetuou-se medições de 20 microcavidades para cada ângulo anisotrópico e taxas de deformação adotados neste estudo. Com os dados de medição disponibilizados, foram lançados em planilha para apuração de valores médios e parâmetros estatísticos (média, desvio padrão e variância). Utilizando-se também o recurso tecnológico disponibilizado pelo software MOTIC PLUS 7.0, as medições das microcavidades foram conduzidas diretamente sobre a imagem do plano da fratura fornecida pela microscopia de varredura (MEV), nos diferentes ângulos anisotrópicos e taxas de deformação. Esta metodologia é uma variante simplificada do procedimento proposto pela Norma ASTM E 112-96. As Figuras 44 e 45 apresentam as imagens das microcavidades medidas em seus diâmetros, conforme a adaptação da Norma ASTM E 112-96, utilizando-se o software MOTIC Plus como ferramenta eletrônica de medida.

Figura 44 - Medição das dimensões L e W das microcavidades presentes nas imagens MEV dos diferentes ângulos anisotrópicos e na taxa de deformação $2,5 \times 10^{-3}$, utilizando o software MOTIC PLUS 07

a) 0°



b) 45°

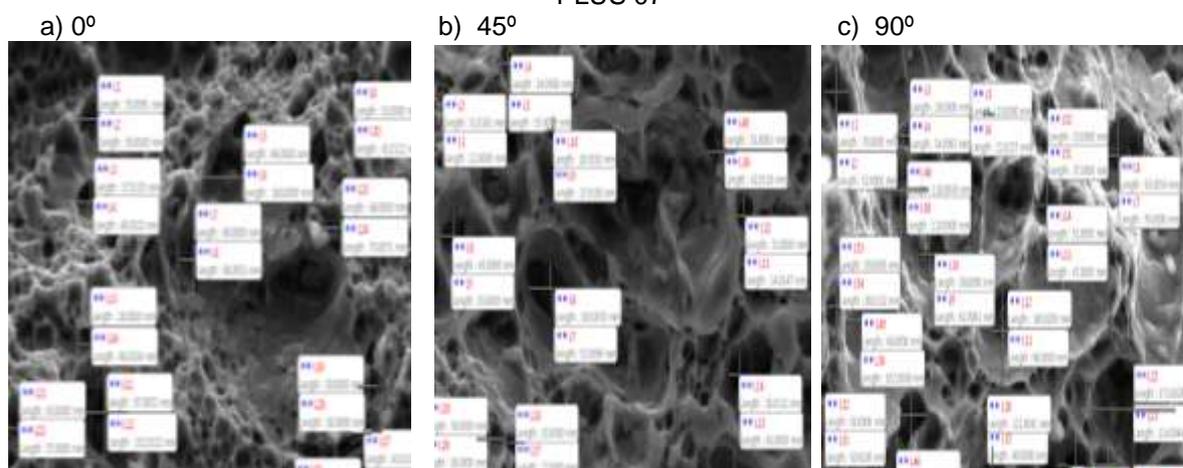


c) 90°



Fonte: Arquivo do Autor

Figura 45 - Medição das dimensões L e W das microcavidades presentes nas imagens MEV dos diferentes ângulos anisotrópicos e na taxa de deformação $5,0 \times 10^{-3}$, utilizando o software MOTIC PLUS 07



Fonte: Arquivo do Autor

Todos os dados dos diâmetros dos dimples obtidos pela utilização da ferramenta eletrônica MOTIC Plus foram lançados em planilha de cálculo para obtenção da esfericidade dos dimples. Estas planilhas estão claramente mostradas nas Figuras 46 e 47.

Figura 46 - Planilha de medição das dimensões L (Length) e W (Width) das microcavidades ($2,5 \times 10^{-3}$)

ANÁLISE MICROCAVIDADES: 2,5 X 10-3 (45º)						ANÁLISE MICROCAVIDADES: 2,5 X 10-3 (0º)						ANÁLISE MICROCAVIDADES: 2,5 X 10-3 (90º)					
L		W		Razão (L/W) (X-Média)²		L		W		Razão (L/W) (X-Média)²		L		W		Razão (L/W) (X-Média)²	
L1	0,053	W1	0,064	0,8281	-	L1	0,03	W1	0,062	0,4839	-	L1	0,145	W1	0,14	1,0357	-
L2	0,043	W2	0,043	1,0000	0,0125	L2	0,055	W2	0,0662	0,8308	0,1491	L2	0,096	W2	0,046	2,0870	0,0041
L3	0,034	W3	0,035	0,9714	0,0036	L3	0,037	W3	0,059	0,6271	0,0015	L3	0,093	W3	0,042	2,2143	0,9741
L4	0,13	W4	0,086	1,5116	0,0010	L4	0,045	W4	0,096	0,4688	0,0590	L4	0,021	W4	0,043	0,4884	1,2416
L5	0,099	W5	0,09	1,1000	0,3268	L5	0,045	W5	0,051	0,8824	0,1610	L5	0,04	W5	0,033	1,2121	0,3741
L6	0,052	W6	0,066	0,7879	0,0256	L6	0,025	W6	0,025	1,0000	0,0002	L6	0,086	W6	0,061	1,4098	0,0126
L7	0,048	W7	0,055	0,8727	0,0231	L7	0,028	W7	0,0251	1,1155	0,0169	L7	0,077	W7	0,061	1,2623	0,0960
L8	0,03	W8	0,099	0,3030	0,0045	L8	0,0271	W8	0,026	1,0423	0,0603	L8	0,123	W8	0,09	1,3667	0,0263
L9	0,043	W9	0,046	0,9348	0,4057	L9	0,027	W9	0,041	0,6585	0,0297	L9	0,05	W9	0,071	0,7056	0,0711
L10	0,044	W10	0,0361	1,2188	0,0000	L10	0,073	W10	0,109	0,6697	0,0447	L10	0,088	W10	0,089	0,9888	0,1555
L11	0,043	W11	0,045	0,9556	0,0777	L11	0,052	W11	0,043	1,2093	0,0401	L11	0,113	W11	0,092	1,2283	0,0124
L12	0,088	W12	0,098	0,8980	0,0002	L12	0,034	W12	0,0331	1,0272	0,1151	L12	0,071	W12	0,093	0,7634	0,0165
L13	0,034	W13	0,037	0,9189	0,0018	L13	0,064	W13	0,099	0,6465	0,0247	L13	0,072	W13	0,08	0,9000	0,1133
L14	0,029	W14	0,039	0,7436	0,0004	L14	0,04	W14	0,078	0,5128	0,0500	L14	0,061	W14	0,059	1,0339	0,0400
L15	0,036	W15	0,063	0,5714	0,0386	L15	0,092	W15	0,08	1,1500	0,1276	L15	0,067	W15	0,068	0,9853	0,0044
L16	0,05	W16	0,066	0,7576	0,1358	L16	0,079	W16	0,065	1,2154	0,0784	L16	0,043	W16	0,056	0,7679	0,0132
L17	0,077	W17	0,043	1,7907	0,0333	L17	0,051	W17	0,061	0,8361	0,1193	L17	0,047	W17	0,056	0,8393	0,1103
L18	0,048	W18	0,048	1,0000	0,7237	L18	0,017	W18	0,017	1,0000	0,0012	L18	0,057	W18	0,044	1,2955	0,0680
L19	0,036	W19	0,046	0,7826	0,0036	L19	0,122	W19	0,147	0,8299	0,0169	L19	0,046	W19	0,052	0,8846	0,0382
L20	0,047	W20	0,059	0,7966	0,0248	L20	0,057	W20	0,048	1,1875	0,0016	L20	0,045	W20	0,076	0,5921	0,0464
MÉDIA DAS RAZÕES				0,9372	0,0206	MÉDIA DAS RAZÕES				0,8697	0,1008	MÉDIA DAS RAZÕES				1,10	0,2580
VARIÂNCIA				0,0932		VARIÂNCIA				0,0599		VARIÂNCIA				0,1838	
DESVIO PADRÃO				0,3052		DESVIO PADRÃO				0,2447		DESVIO PADRÃO				0,4287	
PERFIL: PROLATA						PERFIL: PROLATA						PERFIL: OBLATA					

Fonte: Arquivo do Autor

Figura 47 - Planilha de medição das dimensões L (Lenght) e W (Width) das microcavidades (5,0x10-3)

ANÁLISE MICROCAVIDADES: 5,0 X 10-3 (45º)					ANÁLISE MICROCAVIDADES: 5,0 X 10-3 (0º)					ANÁLISE MICROCAVIDADES: 5,0 x 10-3 (90º)															
L	W	Razão (L/W) (X-Média) ²			L	W	Razão (L/W) (X-Média) ²			L	W	Razão (L/W) (X-Média) ²													
L1	0,022	W1	0,031	0,7097					L1	0,0550	W1	0,0590	0,9322					L1	0,07	W1	0,052	1,3462			
L2	0,035	W2	0,0341	1,0264	0,0039	L2	0,0370	W2	0,0490	0,7551	0,0350	L2	0,188	W2	0,202	0,9321	0,1000	L2	0,188	W2	0,202	0,9321	0,1000		
L3	0,035	W3	0,045	0,7778	0,0648	L3	0,0660	W3	0,1680	0,3929	0,0001	L3	0,23	W3	0,173	1,3295	0,0096	L3	0,23	W3	0,173	1,3295	0,0096		
L4	0,052	W4	0,1	0,5200	0,0000	L4	0,0900	W4	0,0990	0,9091	0,1241	L4	0,037	W4	0,033	1,1212	0,0897	L4	0,037	W4	0,033	1,1212	0,0897		
L5	0,027	W5	0,026	1,0385	0,0635	L5	0,0330	W5	0,0410	0,8049	0,0269	L5	0,062	W5	0,058	1,0690	0,0083	L5	0,062	W5	0,058	1,0690	0,0083		
L6	0,034	W6	0,031	1,0968	0,0711	L6	0,0970	W6	0,1520	0,6382	0,0036	L6	0,098	W6	0,1	0,9800	0,0015	L6	0,098	W6	0,1	0,9800	0,0015		
L7	0,043	W7	0,038	1,1316	0,1055	L7	0,0280	W7	0,0480	0,5833	0,0114	L7	0,11	W7	0,11	1,0000	0,0025	L7	0,11	W7	0,11	1,0000	0,0025		
L8	0,05	W8	0,09	0,5556	0,1294	L8	0,0490	W8	0,0770	0,6364	0,0262	L8	0,049	W8	0,122	0,4016	0,0009	L8	0,049	W8	0,122	0,4016	0,0009		
L9	0,022	W9	0,035	0,6286	0,0468	L9	0,0430	W9	0,0720	0,5972	0,0118	L9	0,072	W9	0,114	0,6316	0,3948	L9	0,072	W9	0,114	0,6316	0,3948		
L10	0,033	W10	0,049	0,6735	0,0205	L10	0,0390	W10	0,0380	1,0263	0,0219	L10	0,067	W10	0,057	1,1754	0,1587	L10	0,067	W10	0,057	1,1754	0,1587		
L11	0,038	W11	0,55	0,0691	0,0097	L11	0,0630	W11	0,0570	1,1053	0,0791	L11	0,114	W11	0,173	0,6590	0,0212	L11	0,114	W11	0,173	0,6590	0,0212		
L12	0,029	W12	0,044	0,6591	0,4939	L12	0,0480	W12	0,0700	0,6857	0,1297	L12	0,071	W12	0,07	1,0143	0,1377	L12	0,071	W12	0,07	1,0143	0,1377		
L13	0,03	W13	0,029	1,0379	0,0127	L13	0,0800	W13	0,1060	0,7547	0,0035	L13	0,059	W13	0,038	1,5526	0,0002	L13	0,059	W13	0,038	1,5526	0,0002		
L14	0,055	W14	0,091	0,6044	0,0708	L14	0,0480	W14	0,0640	0,7500	0,0001	L14	0,116	W14	0,103	1,1262	0,2731	L14	0,116	W14	0,103	1,1262	0,2731		
L15	0,036	W15	0,056	0,6429	0,0281	L15	0,0560	W15	0,0810	0,6914	0,0000	L15	0,044	W15	0,037	1,1892	0,0093	L15	0,044	W15	0,037	1,1892	0,0093		
L16	0,061	W16	0,074	0,8243	0,0167	L16	0,0440	W16	0,0850	0,5176	0,0029	L16	0,05	W16	0,056	0,8929	0,0253	L16	0,05	W16	0,056	0,8929	0,0253		
L17	0,087	W17	0,111	0,7838	0,0027	L17	0,0520	W17	0,0840	0,6190	0,0517	L17	0,074	W17	0,147	0,5034	0,0188	L17	0,074	W17	0,147	0,5034	0,0188		
L18	0,046	W18	0,06	0,7667	0,0001	L18	0,0660	W18	0,0620	1,0645	0,0159	L18	0,064	W18	0,046	1,3913	0,2773	L18	0,064	W18	0,046	1,3913	0,2773		
L19	0,053	W19	0,047	1,1277	0,0000	L19	0,0760	W19	0,1040	0,7308	0,1020	L19	0,092	W19	0,12	0,7667	0,1305	L19	0,092	W19	0,12	0,7667	0,1305		
L20	0,042	W20	0,055	0,7636	0,1266	L20	0,0170	W20	0,0240	0,7083	0,0002	L20	0,102	W20	0,068	1,5000	0,0693	L20	0,102	W20	0,068	1,5000	0,0693		
MÉDIA DAS RAZÕES				0,7719	0,0001	MÉDIA DAS RAZÕES				0,7451	0,0014	MÉDIA DAS RAZÕES				1,03	0,2209								
VARIÂNCIA				0,0633		VARIÂNCIA				0,0324		VARIÂNCIA				0,0975									
DESVIO PADRÃO				0,2517		DESVIO PADRÃO				0,1799		DESVIO PADRÃO				0,3122									
PERFIL: PROLATA						PERFIL: PROLATA						PERFIL: OBLATA													

Fonte: Arquivo do Autor

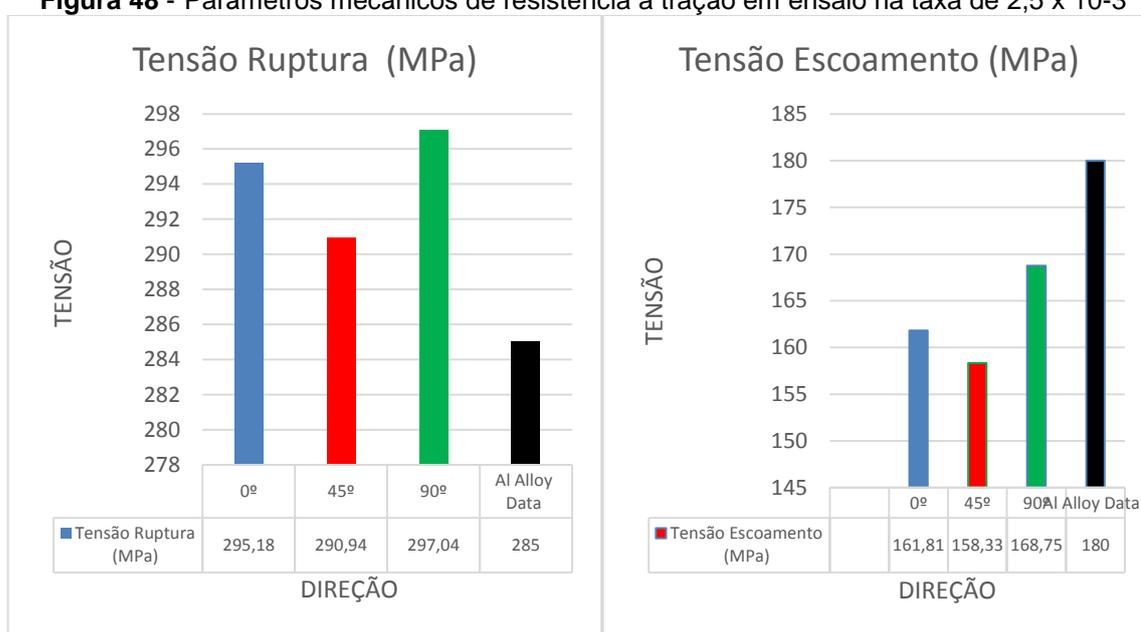
A Tabela 6 define o formato do perfil geométrico das microcavidades em função do valor numérico obtido nesta razão matemática.

Neste caso, com base nos valores fornecidos pelas planilhas das Figuras 46 e 47, temos microestruturas PROLATAS nas direções 0º e 45º para ambas as taxas de deformação e microestrutura OBLATA na direção 90º, também em ambas as taxas de deformação aplicadas. Então, nas direções 0º e 45º, a razão entre os diâmetros vertical e horizontal são menores que o valor unitário (1), logo as microcavidades são deformadas pela ação da força de tração e estrição da seção de ruptura do material, apresentando um perfil ovalizado na direção horizontal no plano de ruptura (PROLATA). Na direção 90º, as razões entre os diâmetros resultaram em valor maior que a unidade (01), implicando em microcavidades ovalizadas na direção vertical no plano de ruptura do corpo de prova (OBLATA).

4.5.7 Comparativo das propriedades mecânicas

Os parâmetros mecânicos médios obtidos a partir dos ensaios de tração dos corpos de prova na máquina Krattos são colocados em planilha para melhor visualização das grandezas numéricas. Ainda nestas planilhas, os dados obtidos são confrontados com os valores existentes na literatura técnica como sendo os esperados para uma liga de alumínio AA5052-H34. As Figuras 48 e 59 e as tabelas 13 e 14 apresentam os dados citados para as diferentes velocidades de deformação.

Figura 48 - Parâmetros mecânicos de resistência a tração em ensaio na taxa de $2,5 \times 10^{-3}$



Fonte: Arquivo do Autor

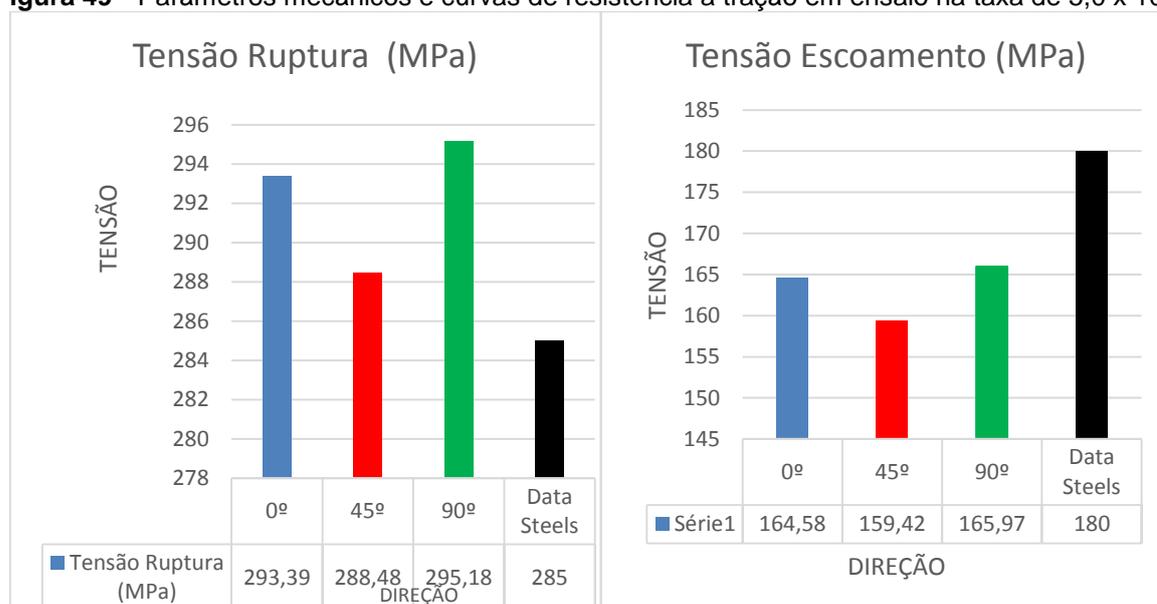
Tabela 13 - Comparação das propriedades mecânicas (taxa deformação $2,5 \times 10^{-3}$)

TABELA COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

TAXA DE DEFORMAÇÃO $2,5 \times 10^{-3}$

ORIGEM DOS DADOS	Tensão Ruptura (MPa)	Tensão Escoamento (MPa)	Alongamento Linear Max. (mm)	Deformação Ruptura (%)
0°	295,18	161,81	16,21	20,7
45°	290,94	158,33	16,93	21,7
90°	297,04	163,27	16,18	21,1
Al Alloy Data	285	180	18	10

Fonte: Arquivo do Autor

Figura 49 - Parâmetros mecânicos e curvas de resistência a tração em ensaio na taxa de $5,0 \times 10^{-3}$ 

Fonte: Arquivo do Autor

Tabela 14 - Comparação das propriedades mecânicas (taxa deformação $5,0 \times 10^{-3}$)

TABELA COMPARATIVA DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

TAXA DE DEFORMAÇÃO $5,0 \times 10^{-3}$

ORIGEM DOS DADOS	Tensão Ruptura (MPa)	Tensão Escoamento (MPa)	Alongamento Linear Max. (mm)	Deformação Ruptura (%)
0°	293,39	164,58	16,77	21,57
45°	288,48	159,42	16,99	21,7
90°	295,18	165,97	16,47	21,11
Al Alloy Data	285	180	18	10

Fonte: Arquivo do Autor

As planilhas evidenciam com bastante clareza o ângulo anisotrópico de 90° como a direção mais favorável aos parâmetros mecânicos desejáveis num projeto de estrutura metálica. Sobretudo, as maiores resistências as tensões de ruptura e escoamento.

5 CONCLUSÕES

5.1 EFEITO PORTEVIN – LE CHATELIER

- ✓ As instabilidades do efeito PLC não sofreram grandes alterações nos perfis das oscilações nos ângulos estudados. O aumento na taxa de deformação resultou em serrilhas com menores amplitudes, porém mantendo o mesmo perfil característico;
- ✓ As tensões críticas não sofreram notáveis deslocamentos nos diferentes ângulos estudados. Mas são deslocadas para níveis mais altos de tensão com o aumento da taxa de deformação;
- ✓ Os perfis do fenômeno PLC apresentam pequenas variações no início das instabilidades (tensão crítica). Entretanto, nas proximidades da tensão de ruptura são muito semelhantes. Isto reflete a presença de microcavidades com características coalescentes. Particularmente, esta fenomenologia é mais evidente no ângulo de 90°;
- ✓ Levando em conta que TR é um índice de resistência ao escoamento, pode ser considerado o que segue:
 - a) quanto MENOR a TR, MAIOR a resistência ao escoamento, independente da Taxa de Deformação aplicada;
 - b) fica mais evidente para o ângulo anisotrópico de 90°.
- ✓ Taxas de relaxação (TR) são menores nas proximidades da tensão crítica e maiores nas proximidades da tensão de ruptura para ambas as taxas de deformação e ângulos anisotrópicos estudados. Os perfis do fenômeno PLC apresentam pequenas variações no início das instabilidades (tensão crítica). Entretanto, nas proximidades da tensão de ruptura, são muito semelhantes. Isto reflete na presença de microcavidades com características coalescentes. Particularmente, esta fenomenologia é mais evidente no ângulo de 90°.

5.2 MICROCAVIDADES NO PLANO DA FRATURA

- ✓ O aumento na Taxa de Deformação nos ensaios favoreceu o aumento da coalescência das microcavidades, principalmente para o ângulo de 90° . De tal sorte que o ângulo anisotrópico 90° apresentou microcavidades com características ligeiramente OBLATAS.

5.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO

- ✓ As resistências mecânicas verificadas demonstraram ser maiores para o ângulo anisotrópico de 90° . Sofreram pouca influência da Taxa de Deformação aplicada. Sendo assim, pode-se considerar o perfil da liga como apresentando comportamento ISOTRÓPICO.

6 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Estudar a liga AA5052-H34 num ambiente de salinidade marinha, submersa em água do mar e interagindo eletricamente com matérias de diferentes potenciais elétricos.
- ✓ Avaliar a resistência aos mecanismos de corrosão eletrolítica da liga de alumínio naval.

REFERÊNCIAS

- ABAL. **Características físico-químicas**. Disponível em: <http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas>. Acesso em: 02 mar 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7549**. 2008.
- AIT-MOKHTAR, H.; Boudrahem, S.; Fressengeas, C. On the effects of the Mg content on the critical strain for the jerky flow of Al–Mg alloys. **Mater. Sci. Eng. A** 631 (2015) 209–213.
- Aluminium Alloy Data Sheet 5052. **Atlas Steel**. October, p. 1–3, 2013.
- ALMEIDA, D. T. **Estudo dos parâmetros no processo de soldagem de mistura por atrito (fsw) da liga de alumínio 5083-O**. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ). Departamento de Ciências Exatas e Engenharias Curso de Engenharia Mecânica (DCEEng). Campus Panambi. p. 1–57, 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR METALS - ASM Handbook, 1998. ASM INTERNATIONAL. **Aluminum and Aluminum Alloys**.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM E 112-96. **Standard Test Methods for Determining Average Grain Size**. 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM E 384.
- ASKELAND, D.; PHULÉ, P. **Ciência e Engenharia de Materiais**. Cengage Learning. São Paulo, 2008.
- ASM INTERNATIONAL. MICROSTRUCTURE OF ALLOYS Chapter 3. **Aluminium Properties and Physical Metallurgy**, p. 58–104, 1984.
- BARBOSA, C.; BASTIAN, F.; ACSELRAD, O. Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e Dureza da Liga 6063 (Al-Mg-Si). **Anais do 46 ° Congresso Anual da ABM**, v.3, p. 177-188, 1990.
- BERZERGA, A. A.; BENSON, J.; PINEAU, A. Coalescence - Controlled Anisotropic Ductile Fracture. **Ecole des Mines de Paris**, Centre des Materiaux, v. 121, p. 221-229, 1999.
- BHOWMIK, A.; MISHRA, D. **A Comprehensive Study of an Aluminum Alloy Al-5052**. Chouksey Engineering College, Bilaspu, p. 20–22, 2016.
- CAETANO, Francisco Roger L.; SANTOS, Magnaura M.; QUEIROZ-NETO, Jose Pinheiro. **Desenvolvimento de um Programa Computacional para Medição do Tamanho dos Grãos Metálicos**. Sibgrapi. Conferência Internacional de

Computação Gráfica. Padrões e Imagens, 2008.

CAI, Y.; YANG, S; FU, S; ZHANG, D.; ZHANG, Q. Investigation of Portevin–Le Chatelier Band Strain and Elastic Shrinkage in Al-Based Alloys Associated with Mg Contents. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 31, n. 6, p. 1-7, 2016.

CALLISTER Jr, W. D. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. Fifth Edition. John Wiley & Sons. New York, 2001.

CH.GRAS, M.MEREDITH, K.GATENBY, J. D. H. Defect formation in twin roll-cast AA 3xxx and 5xxx series aluminium alloys. **Materials Science Forum**, v. 396–402, p. 89–94, jan. 2002.

COBDEN, R.; BANBURY, A. Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys. **Talal**, p. 60, 1994.

PRODUCT DATA SHEET AA 5052-H34. MECHANICAL COMPOSITION. **Aluminium Alloys**. 2016. Disponível em: <http://asm.matweb.com>. Acesso em: fev 2019.

CORDIER, H.; GRUHL, W. Beitrag zur Frage der Entmischung bei Al-Mg-Si Legierungen aufgrund Elektronmikroskopischer Beobachtungen. **Zeitschrift für Metallkunde**, v. 56, p. 669-674, 1965.

COTTRELL, A. H. **A Note on the Portevin-Le Chatelier Effect**. Lond. Edinb.. Dublin Philos. Mag. J. Sci. v. 44 (1953), p. 822-832.

DIETRICH ALTENPOHL. Aluminium von innen. **Aluminum-Verlag, Düsseldorf**, 1994.

GOMES, M. R.; FILHO, E. B. **Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos**. ABM - SÃO PAULO, 1987.

H. Ait-Amokhtar, C. Fressengeas, K. Bouabdallah. On the effects of the Mg content on the critical strain for the jerky flow of Al–Mg alloys. **Mater. Sci. Eng. A** 631, p. 209–213, 2015.

HATCH, J. E. Aluminum: Properties and Physical Metallurgy. **ASM, Metals Park - USA**, 1990.

KANG, J.; MISHRA, R. K.; WILKINSON, D. S.; HOPPERSTAD, O. S. **Philos. Mag. Lett.** v. 22 , n. 2, p. 175 - 183. 2015.

LOPES, M. R.; FONTANA, R. **Estudo do Tamanho do Grão Austenítico Aço ABNT 1020 em Função do Processo Mcquaid-Ehn e Evolução da Profundidade da Camada Cementada**. Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia de Metalurgia e Materiais), Curso Superior em Metalurgia e Materiais. Instituto Federal do Espírito Santo. Vitória, 2009.

LUTTS, A. Pre-precipitation in Al-Mg-Ge and Al-Mg-Si. **Acta Metallurgica**, v.9, p. p. 577-586, 1961.

CHENG, M.; MORRIS, J. G. The Anisotropy of the Portevin-Le Chatelier Effect in Aluminum Alloys. **Scripta Materialia**, v. 43, n. 7, p. 651 - 658, ano 2000.

MA, P.; ZHANG, D.; ZHUANG, L; ZHANG, J. Effect of Zn addition on the precipitation behaviors of Al–Mg–Si–Cu alloys for automotive applications. **Int. J. Min. Met. Mater.** v. 52, p. 175-183, 2015.

MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behavior of Materials**. Ed. Cambridge University Pres, São Paulo, 2009.

NARAYANASAMY, R.; PARTHASARATHI, N. L.; SATHIYA NARAYANAN, C. **Analysis of Fracture Limit Curves and Void Coalescence in High Strength Intestinal FreeSteel Sheets Formed under Different Stress Conditions**. Springer Science Business Media. LCC, 2008.

OZAWA, E.; KIMURA, H. Excess Vacancies and the Nucleation of Precipitates in Aluminum-Silicon. **Acta Metallurgica**, v.18, p. 995-1004, 1970.

PEREIRA, J. M. M. V. **Estudo das ligas de alumínio aplicadas em construção naval nomeadamente na resistência à corrosão em estruturas navais soldadas**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. 2010.

RACK, H. J. The Influence of Prior Strain upon Precipitation in a High Purity 6061 Aluminum. **Materials Science and Engineering**, v.29,p.179-188, 1977.

SANTOS, A. J. M.; OHANA, G. J.; LOBATO, M. Q.; QUARESMA, J. M. V. **Análise Micro e Macro Estrutural e Avaliação das Propriedades Mecânicas da Liga de Alumínio 5052 - H34**. ENCONTRO DE BELÉM, 2017.

SHCHEGOLEVA, T. V. Ageing Mechanism of the Alloy Al-Mg-Si. **The Physics of Metals and Metallography**, v. 25, n. 2, p. 56-64, 1968.

SHERCLIFF, H.R.; ASHBY, M. F. A Process for Age Hardening of Aluminum Alloys - I the Model. **Acta Metallurgica et Materialia**, v. 38, n. 10, p. 1789-1802, 1990.

SINGH, D.; RAO, P. N.; JAYAGANTHAN, R. Effect of deformation temperature on mechanical properties of ultrafine grained Al–Mg alloys processed by rolling. **Materials & Design**, v. 50, p. 646-655, 2013.

SOUZA, F. M. et al. Um estudo comparativo entre chapas produzidas pelos processos de lingotamento contínuo e de lingotamento semicontínuo da liga AA4006: microestrutura e textura cristalográfica. **Infomet - Metalurgia e Materiais**, v. 65, n. 3, p. 327-333, 2012.

SUNNY, K. T. et al. a Review on Mechanical & Microstructural Property Evaluation of Aluminium 5083 Alloy Weldment. **Trans Stellar Journal**, v. 3, n. 4, p. 119-128, 2013.

TAMIMI, S. et al. Modelling the Portevin-Le Chatelier effects in aluminium alloys: a review. **J. Mech. Behav. Matter**. v. 24, n. 3-4, p. 67-78, 2015

TIAN, N. et al. Study of Portevin - Le Chatelier (PLC). Characteristic of a 5083 Aluminum Alloy Sheet in Two Heat Treatment States, **MDPI Materials 2018**, n. 11, p. 1-16, 2018.

TVERGAARD, V. Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Conditions. **Int. J. Frac.** v. 17, p. 389-407, 1981.

UNOCIC, K. et al. Microstructural Analysis of 5XXX Series Aluminum Alloys for Optimal Strength and Corrosion Resistance. **Microscopy and Microanalysis**, v. 11, n. S02, p. 700-701, 2005.

VAN HORN, K. R. Aluminum. **ASM**, Metals Park, Ohio (USA), v. 1, p. 324-327, 1967.

WANG, B. et al. Effects of cold rolling and heat treatment on microstructure and mechanical properties of AA 5052 aluminum alloy. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 25, n. 8, p. 2481-2489, 2015.

WEN, W.; ZHAO, Y.; MORRIS, J. G. The effect of Mg precipitation on the mechanical properties of 5xxx aluminum alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 392, n. 1-2, p. 136-144, 2005.