

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE MATERIAIS E NANOTECNOLOGIA

EUCLYDES TROVATO NETO

CARACTERIZAÇÃO MICROMECAÂNICA DE PROPRIEDADES DE TENACIDADE À
FRATURA DE LIGAS DE ALUMÍNIO ESTRUTURAS

São Paulo
2019

EUCLYDES TROVATO NETO

CARACTERIZAÇÃO MICROMECAÂNICA DE PROPRIEDADES DE TENACIDADE À
FRATURA DE LIGAS DE ALUMÍNIO ESTRUTURAIIS

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação Stricto Sensu da Escola de
Engenharia da Universidade Presbiteriana
Mackenzie, como requisito parcial para a
obtenção do Título de Mestre em Engenharia
de Materiais e Nanotecnologia:

Orientador:

Prof. Dr. Antônio Augusto Couto

São Paulo
2019

T859c

Trovato Neto, Euclides

Caracterização micromecânica de propriedades de tenacidade à fratura de ligas de alumínio estruturais / Euclides Trovato Neto – São Paulo, 2019.

118 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia) - Universidade Presbiteriana Mackenzie - São Paulo, 2019.

Orientador: Antônio Augusto Couto.

Bibliografia: f. 91-97.

1. Caracterização de tenacidade. 2. Mecânica de fratura. 3. Ligas de alumínio estruturais. 4. Métodos micromecânicos. I. Couto, Antônio Augusto, *orientador*. II. Título.

CDD 669.722

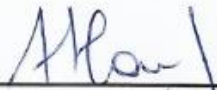
EUCLYDES TROVATO NETO

CARACTERIZAÇÃO DE PARÂMETROS MICROMECAÑICOS DE
PROPRIEDADES DE TENACIDADE A FRATURA DE LIGAS DE ALUMÍNIO
ESTRUTURAIIS

Dissertação de Mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Materiais e
Nanotecnologia da Universidade
Presbiteriana Mackenzie, como
requisito parcial para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia de
Materiais e Nanotecnologia.

Aprovado em 12 Fevereiro de 2019.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antônio Augusto Couto
Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Jan Vataavuk
Universidade Presbiteriana Mackenzie



Prof. Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade
Universidade de São Paulo - IPEN

Dedicatória

Aos meus amados pais Antônia e Jose Augusto e irmaos
A meus amados Cleide, Yan e Sophie

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antônio Augusto do Couto pelas orientações aprofundadas e pelo constante desafio e encorajamento, e decidido incentivo.

A UP Mackenzie, alma mater acadêmica.

Ao Prof. Dr. Robert Dodds Jr. por autorizar o uso do Sistema WARP3D.

Ao Prof. Dr. Jan Vatajuk e Prof. Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade pelos aprofundados e detidos comentários.

Aos grupos de desenvolvimentos do sistema WARP3D e PARAVIEW e PYTHON aplicados amplamente no desenvolvimento desta dissertação.

A todos meus estimados professores os quais, como constelações, representam nítidas referências e me indicaram rumos plenos de significados motivantes.

A todos meus queridos familiares, amigos, e colegas de trabalho e de estudos que acompanharam meus caminhos.

A Deus pela benção de sempre aprender, desenvolver e concluir este trabalho.

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AA	Aluminum Association
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABS	Associação Brasileira de Soldagem
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM	American Society for Metals
ASTM	American Society for Testing Materials
AWS	American Welding Society
CEA	Critical Engineering Assessments
CIA	Critical Integrity Assessments
CEN / NEC	Normative European Commission
Cr	Cromo
CTOA	Crack Tip Opening Angle
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
C(T)	Corpo de Prova Compacto de Trao (Constant Tension Test specimen)
Cu	Cobre
DNV	Det Norske Veritas
EAA	European Aluminium Association
EPT	Estado Plano de Tensoes
EPD	Estado Plano de Deformaoes
FCG	Fatigue Fracture Crack Growth
FSW	Friction Stir Welding Process
FSP	Friction Stir Process
GMAW	Gas Shielded Metal Arc Welding
GTAW	Gas Shielded Tungsten Arc Welding
ISO	International Standards Institute
IIW	International Institute for Welding
L	Longitudinal – direção de laminação
Li	Lithium
MBL	Modified Boundary Layer Model
MEC / BEM	Método dos Elementos de Contorno / Boundary Element Method
MEF / FEM	Método dos Elementos Finitos / Finite Element Method
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

MFLE/LEFM	Mecânica de Fratura Linear Elástica/Linear Elastic Fracture Mechanics
MFNL/NLFM	Mecânica de Fratura Não Linear/ Nonlinear Fracture Mechanics
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
PPGEMN	Programa Pós Graduação Engenharia de Materiais e Nanotecnologia
SCC	Stress Corrosion Cracking
SG	Side Grooving Chanfros
Si	Silício
SSC	Ship Structure Committee
SSY	Small Scale Yielding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
T	Transversal – direção de laminação
TALAT	Training in Aluminium Application Technologies
TWI	The Welding Institute
ZPF / FPZ	Zona de Processos de Fraturamento / Fracture Process Zone
Zn	Zinco

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Gráfico 1 – Curvas Tensão vs Deformação AL 5083-H321(n= 6.46) (DRDC, 2007)
- Gráfico 2 – Curvas Tensão vs Deformação AL 5086-H116 (n=4.96) (DRDC, 2007)
- Gráfico 3 – Curvas Tensão vs Deformação AL 5383-H116 (n=6.34) (DRDC, 2007)
- Gráfico 4 – Curvas Tensão vs Deformação AL 5083-H321 (n=11.07, $e_u = 0.19$)
- Gráfico 5 – Curvas Tensão vs Deformação AL 5086-H116 (n=8.91, $e_u = 0.24$)
- Gráfico 6 – Curvas Tensão vs Deformação AL 5383-H116 (n=10.70) $e_u = 0.23$
- Gráfico 7: Curvas Comparativas de Tenacidade JI x KI AL 5383-H116 (n=10.70) Modelos Tipo I a Tipo III e valores experimentais (DRDC, 2007)
- Figura 1: Fluxograma de procedimentos gerais de Caracterização Micromecânica de parâmetros de tenacidade ao fraturamento
- Figura 2: Características corpo de prova padrão C(T) (ASTM 1820, 2001)
- Figura 3: Ensaio de Tenacidade Não Linear ASTM E 1820 – Curvas de Resistência R (J x Δa) Ligas AL 5053; AL 5086; AL 5383 Efeito escala geométrica (DRDC, 2007)
- Figura 4: Ensaio de Tenacidade Não Linear ASTM E 1820 – Curvas de Resistência ao Fraturamento R (J x Δa) - Ligas AL5053-H321; AL5086-H116; AL5383-H116 – Efeito de escala geométrica (DRDC, 2007)
- Figura 5: Topologia Modelo SSY-MBL – (TROVATO, Ruggieri, 2001)
- a) Geometria, materiais e condições de contorno mecânicas e geométricas;
 - b) Região próxima à ponta da trinca; c) Condições de células micromecânicas
- Figura 6: Topologia Modelo C(T) – (WARP3D V17.8.2 MANUAL, 2017)
- Figura 7: Topologia Elementos L3DISOP ((KOPPENHOEFER et al, 1994)
- Figura 8: Formulação de Deformação Não linear Elástica ((KOPPENHOEFER et al, 1994)
- Figura 9: Formulação de Deformação Não Linear Elástica de V. Mises ((KOPPENHOEFER et al, 1994)
- Figura 10: Efeitos de tensões e microestrutura de defeitos na ZPF
- Figura 11: Evolução da Configuração de deformação com microestrutura de vazios, JUNHANG GUO (2013).
- Figura 12: Células Computacionais (TROVATO, RUGGIERI, 2001)
- Figura 13: – Modelo Numérico Tipo I – Vista Geral
- Figura 14: – Modelo Numérico Tipo I – Detalhes topológicos

Figura 15: – Modelo Numérico Tipo II e III – Vista Geral

Figura 16 – Modelo Numérico Tipo II e III – Detalhes topológicos

Figura 17– Deformações Principais Máximas ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 18 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 19 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 20 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 21 –Tensões σ_{YY} kN/cm^2 ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 22 –Tensões σ_{YY} kN/cm^2 ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 23 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 24 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 25 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 26 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{3/2}$)

Figura 27 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 28 –Tensões σ_{YY} kN/cm^2 ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 29 –Tensões σ_{YY} kN/cm^2 ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 30 – Deformações Principais Máx ($K_I = 37.5 \text{ MN(m)}^{3/2}$)

Figura 31 – Deformações Principais Máx ($K_I = 75 \text{ MN(m)}^{3/2}$)

Figura 32 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I = 37.5 \text{ Ma(m)}^{1/2}$)

Figura 33 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I = 37.5 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 34 –Tensões σ_{YY} kN/cm^2 ($K_I = 37.5 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 35 –Tensões σ_{YY} kN/cm^2 ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 36 – Porosidade f ($K_I = 37.5 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura 37 – Porosidade f ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

Figura Anexo IV-1 - Sistema WARP3D FEM –Fluxograma operacional e de integração (WARP3D V17.8 MANUAL, 2017)

TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos Materiais AA 5053; AA 5056; AA 5383

Tabela 2 – Sinótico de Caracterização Mecânica Ligas AA 5053; AA 5056AA 5383

Tabela 3 – Quadro Sinótico de Resultados de Ensaios de Caracterização de Tenacidade ligas AA 5053; AA 5056; AA 5383

Tabela 4 – Quadro Sinótico de ensaios de tenacidades de materiais (Sielski,2007)

Tabela 5 - Parâmetros Constitutivos Micromecânicos de Função de Plastificação de Gurson-Tvergaard (KOPPENHOEFER et alli, 1994).

Tabela 6 – Matriz de Casos de Simulação Modelos Tipo I – SSY-MBL

Tabela 7 – Matriz de Casos de Simulação Modelos Tipo II – C(T) v Mises

Tabela 8 – Matriz de Casos de Simulação Modelos Tipo III – C(T) – Gurson

Tabela 9 – Quadro Sinótico – Evolução Crítica de índice de vazios – Célula computacional - Resultado Tipo III – C(T) – Gurson

Tabela Anexo II-1 – Sistemas de Ligas de Alumínio Estruturais

Tabela Anexo II-2 – Sinótico de características de resistências mecânicas - Ligas de alumínio estruturais - (J.R. DAVYS, 2001).

Tabela III-1 – Composição química - Materiais AA 5053; AA 5086; AA 5383 (DRDC,2007)

LISTA DE SIMBOLOS

e:	Deformação de Engenharia (<i>engineering strain</i>)
ϵ_u:	Deformação de Engenharia na ruptura (<i>engineering strain at rupture</i>)
E:	Módulo de Young (kN/cm ²)
G:	Parâmetro de tenacidade de Griffith (<i>Energy Release Rate</i>);
J:	Parâmetro de tenacidade de Integral J (<i>Energy Release Rate</i>);
J_{Ic}:	Parâmetro de tenacidade Integral J Modo I iniciação de fratura Modo I;
K:	Parâmetro de tenacidade de Irwin Coeficiente de Intensidade de Tensões;
K:	Coeficiente de Resistência Mecânica (kN/cm ²)
K_I:	Parâmetro de tenacidade Irwin Coeficiente de Intensidade de Tensões Modo I;
K_{JIc}:	Coeficiente de intensidade crítico de iniciação de fratura Modo I;
R:	Curva R de Resistência ao crescimento da fratura J x Δa
s:	Tensão de Engenharia (<i>Engineering stress</i>) (MPa)
n:	Coeficiente de encruamento (<i>Strain Hardening exponent</i>)
T:	Tensões de constrição T (MPa) (<i>Constraint Stress</i>)
T_{ij}:	Tensor de tensões - formulação MEF
W_{ij}:	Densidade de energia de deformação - formulação MEF
δ:	Parâmetro de tenacidade <i>Crack Tip Opening Displacement</i> (mm)
ϵ:	Deformação verdadeira (<i>true strain</i>) = Ln(1 + e)
Δa:	Crescimento de fratura (cm)
ϵ_{ys}:	Deformação escoamento (cm/cm)
σ:	Tensão verdadeira de Cauchy (<i>true stress</i>) = s(1+e) (kN/cm ²)
$\sigma_{y,0.2}$:	Tensão de Escoamento a 0.2% de deformação (MPa)
σ_{Ult}:	Tensão Última de Ruptura (MPa)
θ:	Temperatura (Celsius)
v:	Coeficiente de Poisson

RESUMO

Este trabalho objetiva investigar aplicar metodologias numéricas para caracterização micromecânica de parâmetros de tenacidade à fratura de ligas de alumínio estruturais. Tem-se por perspectiva que o crescente uso de sistemas de estruturas de alumínio, de múltiplas tipologias construtivas, torna relevante e necessário garantir níveis adequados de segurança e confiabilidade estruturais. Com esse propósito programas estratégicos de pesquisas científicas e industriais se dedicam a investigações relacionadas a caracterização das propriedades materiais, e do comportamento mecânico das ligas de alumínio estruturais. Resulta pertinente desenvolver metodologias robustas de avaliação de parâmetros característicos de tenacidade, destinados a Avaliações Críticas de Integridade, consistentes com padrões reológicos desses materiais. São revistas metodologias de Mecânica Computacional as quais admitem formulações representativas das condições micromecânicas e microestruturais intrínsecas das ligas de alumínio, para avaliação numérica de parâmetros de tenacidade da Integral J (Rice, J.R.-1966). As correlações consideram um conjunto de dados experimentais de parâmetros característicos de tenacidade de ligas de Alumínio-Magnésio AL-5XXX (DRDC, 2007): AL-5083 H321; AL-5086 H116 e AL-5383 H116, conforme critérios (ASTM E 1820, 2001). A Metodologia de análise micromecânica (XIA, L. and SHIH, 1995), aplicada para caracterização da tenacidade ao fraturamento crítico J_{Ic} , e utiliza células computacionais para representar a distribuição de defeitos microestruturais. Considera formulações constitutivas de plasticidade dilatante (GURSON, A.L., 1981), e comportamento reológico elasto-plástico não-linear (RAMBERG-OSGOOD,1943). Através de recursos do Sistema WARP3D V 17.8.2 de elementos finitos, foram analisados modelos discretos representativos de corpos extensos (SSY-MBL), e corpos de prova de dimensões finitas de tipo (C(T)). Visualização da geometria e resultados é obtida por meio do sistema PARAVIEW, definida com recursos PYTHON. Resultados chave evidenciam que a metodologia micromecânica utilizada conduz a caracterização dos parâmetros de tenacidade da Integral J, e permitiram estabelecer correlação experimental com parâmetros de caracterização de tenacidade J_{Ic} . Os procedimentos numéricos permitiram obter a calibração de parâmetros micromecânicos, associados ao índice de vazios microestruturais f_v .

Palavras-chave:

Caracterização de Tenacidade; Mecânica de Fratura; Ligas de Alumínio estruturais; Métodos Micromecânicos.

ABSTRACT

This research work aims to investigate and apply numerical methodologies for the micromechanical characterization of fracture toughness parameters of structural aluminum alloys. It is taken into perspective that the growing use of aluminum structures systems, of multiple constructive types, makes it relevant and necessary to guarantee adequate levels of structural safety and reliability. For this purpose, strategic scientific and industrial research programs are devoted to investigations related to the characterization of materials properties and the mechanical behavior of structural aluminum alloys. It is pertinent to develop robust methodologies for evaluating characteristic toughness parameters for Critical Integrity Assessments, consistent with rheological patterns of these materials. Computational Mechanics methodologies were reviewed that admit representative formulations of the microstructural and micromechanical conditions intrinsic of aluminum alloys, to numerically assess J Integral toughness values (Rice, J.R.-1966). An experimental database of characteristic toughness parameters of AL-5XXX Aluminum-Magnesium alloys (DRDC, 2007) were employed: AL-5083 H321; AL-5086 H116 and AL-5383 H116, tested according (ASTM E 1820,2001) criteria. The Micromechanical Analysis Methodology (XIA, L. and SHIH, 1995) is applied to characterize the fracture toughness parameter J_{Ic} (critical fracture onset) and uses computational cells to represent the distribution of microstructural defects. Dilatant Plasticity constitutive formulations (GURSON, A.L., 1981), and non-linear elastoplastic rheological behavior (RAMBERG-OSGOOD, 1943) are considered. Through means of the WARP3D V 17.8.2 FEM System resources, both large scale (SSY-MBL) and finite-size test specimens of type (C (T)) discrete models were analysed. Visualization of geometry and results is achieved through the PARAVIEW system, defined with PYTHON features. Key results show that the micromechanical methodology applied leads to the characterization of the Integral J toughness parameters, and allowed to establish of experimental correlation with J_{Ic} tenacity characterization parameters. The numerical procedures allowed to obtain the calibration of micromechanical parameters, related with the microstructural voids index f_0 .

Keywords:

Fracture Toughness Characterization; Fracture Mechanics; Structural Aluminum Alloys; Micromechanical Methods.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.2	JUSTIFICATIVA	20
1.3	METODOLOGIA	24
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1	LINHAS DE PESQUISAS EM INTEGRIDADE ESTRUTURAL	28
2.2	CARACTERIZAÇÃO DE TENACIDADE LIGAS DE ALUMÍNIO ESTRUTURAL	32
2.3	MÉTODOS NUMÉRICOS PARA AVALIAÇÃO DE TENACIDADE	34
3.	PROPRIEDADES MATERIAIS E METODOLOGIAS ANALÍTICAS	39
3.1	LIGAS DE ALUMÍNIO ESTRUTURAIS AVALIADAS	39
3.2	PROCEDIMENTOS DE ANÁLISES NUMÉRICAS MEF	53
3.3	TOPOLOGIA DOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS WARP3D	63
3.4	INTERPRETAÇÃO DOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	66
4	RESULTADOS NUMÉRICOS	69
4.1	INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DE ANÁLISES	70
4.2	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DE ANÁLISES NUMÉRICAS	80
5	DISCUSSÕES	82
6	CONCLUSÕES	90
	REFERÊNCIAS	91
	ANEXO I – CV LATTES	98
	ANEXO II – LIGAS DE ALUMÍNIO DE USOS ESTRUTURAIS	99
	ANEXO III – MATERIAIS ENSAIADOS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E MICROESTRUTURAIS	109

ANEXO IV – SISTEMA DE ELEMENTOS FINITOS WARP3D.....	114
ANEXO IV – PROCEDIMENTOS INTEGRAÇÃO WARP3D - PARAVIEW.....	117

1. INTRODUÇÃO

Aplicações de ligas metalúrgicas de alumínio a distintos tipos de sistemas componentes e estruturais representam um longo desenvolvimento histórico. São entretanto cada vez mais consideradas como sistemas tecnologicamente inovadores seja de um ponto de vista de Design Industrial, seja da perspectiva de Engenharia de Materiais e Engenharia Estrutural, como também da Arquitetura entre outros.

De notar que o emprego pioneiro de ligas de alumínio a sistemas de estruturas especiais, desde então já consideradas como estratégicas, se inicia no século XIX, em 1895 com o desenvolvimento e fabricação de torpedos classe Sokol na Rússia, e pelo projeto e construção de cascos de veleiros desenvolvidos pela Marinha Norte Americana, (SKILLINBERG, 2007).

A aplicação de ligas de alumínio a sistemas estruturais tem crescido significativamente desde o início do século XX, o que prossegue contemporaneamente. Pela sua sofisticação e qualidade estética e estrutural encontra muitas aplicações arquiteturais. Como exemplificado nos consagrados trabalhos do arquiteto Otto Wagner em Viena Austria em 1903, que nos evidenciam um requintado conhecimento de Engenharia de Materiais. Além de sistemas estruturais de edificações civis e arquitetônicas, se destacam:

- Equipamentos mecânicos e de bens de capital;
- Aeronaves e sistemas aeroespaciais civis e militares;
- Infraestruturas de helidecks e heliportos;
- Sistemas de infraestrutura e unidades de processos industriais;
- Sistemas estruturais navais e oceânicos: logísticos, industrial ou militar;
- Sistemas marítimos e fluviais: pesqueiros, transporte, lazer, esportes etc.
- Infraestrutura para geração, distribuição e transmissão de energia;
- Infraestrutura para sistemas de telecomunicações, radio-astronomia etc;
- Infraestrutura de pesquisas científicas;
- Sistemas de estruturas submarinas e Offshore;
- Módulos habitacionais e estruturas modulares de alojamento;
- Estruturas de proteção contra incêndios, explosões e impactos;
- Sistemas de estruturas de fachadas e condicionamento ambiental.

De destacar também o crescente emprego de ligas de alumínio a estruturas de pontes e viadutos, passarelas, gang-ways, e sistemas de infra-estrutura de transporte, (ABDO, 1983; MAZZOLANI et alli, 2013; TROVATO, 2013).

Se ressalta a utilização de componentes estruturais e mecânicos de ligas de alumínio a múltiplos tipos de equipamentos e veículos de transportes constitui áreas de intenso desenvolvimento industrial atual, como salientado em (G.B.B. BONFITTO, 2016).

Contudo que os sistemas estruturais de alumínio são produzidos em menor escala, comparadas a outros materiais estruturais sucedâneos, devido entre outros fatores de natureza econômica a:

- Necessidades de pesquisas tecnológicas para todas as etapas de vida útil;
- Quadro normativo relativamente recente, e em processo de consolidação;
- Experiência empírica limitada, porém crescente, de desempenho em uso;
- Gerenciamento de integridade em todo o ciclo de vida útil;
- Requisitos de capacitação tecnológica (graduação, pós graduação);
- Aprofundamento de múltiplas linhas de investigações científicas.

A utilização de sistemas de estruturas de alumínio, sob condições de confiabilidade satisfatórias, são evidenciadas de modo continuado. Níveis crescentes de utilização (tempo de operação em relação a vida útil) decorrem do aperfeiçoamento de critérios de segurança estruturais melhor definidos e robustos (MAZZOLANI et alli, 2013) e aprofundamento de pesquisas.

Históricos de utilização de sistemas de estruturas de alumínio com frequência registram várias décadas de operação contínua, sem intercorrências de anomalias de patologias, ou falhas de desempenho estruturais graves.

Tal nível de desempenho de confiabilidade ocorre especialmente quando projetadas, fabricadas e mantidas adequadamente (MAZZOLANI et alli, 2013). Em contraste, continuamente se busca lhes assegurar que sejam atingidas condições de confiabilidade alvo adequadas. Especialmente no que tange a mitigar ou limitar intercorrências estatísticas de falhas, de natureza e consequências distintas, correlacionadas a utilização de sistemas de estruturas de alumínio (GWÓŹDŹ, et alli, 2014).

As patologias em sistemas estruturais de alumínio estão frequentemente relacionadas a múltiplos fatores de segurança estrutural e de critérios de desempenho e integridade, (IIS, 2006), (SIELSKY, 2007), (GWÓŹDŹ, et alli, 2014), suscintamente:

- Seleção das ligas estruturais aplicáveis a distintos tipos de estruturas;
- Aplicação de processos de fabricação e montagem qualificados;
- Condições de carregamentos e solicitações operacionais e ambientais;
- Fatores de agressão ambiental de diversas naturezas;
- Proteção contra sinistros e riscos diversos;

- Resiliência sob condições de eventos acidentais e extremos ambientais;
- Gerenciamento de condições de integridade, manutenção e inspeção;
- Critérios e parâmetros de desempenho e eficiência de sistema estrutural.

Entre os distintos procedimentos metodológicos para Avaliações Críticas de Integridade (ACI) e segurança de sistemas de estruturas de alumínio (BS7910, 2005), (FITNET, 2006), se destacariam:

- Análise de integridade de componentes estruturais com falhas;
- Avaliação de segurança e confiabilidade de sistemas estruturais;
- Extensão de vida útil de sistemas estruturais;
- Critérios de inspeção e aceitação de falhas, qualificação de materiais etc;
- Desenvolvimento de critérios de projeto e análises estruturais robustos.

Se reveste de crucial relevância garantir melhores índices de confiabilidade associados a propriedades características de resistência mecânica e tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio de uso estrutural.

Resulta pertinente desenvolver e aprofundar metodologias robustas para avaliação de parâmetros característicos de tenacidade aplicáveis a procedimentos de Avaliações Críticas de Integridade (CIA) de sistemas estruturais de alumínio, tema central da presente pesquisa.

A manifestação de defeitos estruturais de tipo fratura (*crack like*) frequentemente se associam a patologias localizadas. Entretanto, tem-se clara e aprofundada a percepção de que sua incidência ocorre sob intensa interação com condições intrínsecas de equilíbrio e integridade das estruturas em escala global, impondo-lhes estados limites de resistência e estabilidade.

Se torna essencial, para garantir a segurança de sistemas de estruturas de alumínio, avaliar as condições intrínsecas de estabilidade e mecanismos de ruptura frágil ou dúctil, e condições críticas de equilíbrio de fraturas, com esteio na caracterização robusta de parâmetros de tenacidade ao fraturamento.

Este conceito, de tenacidade ao fraturamento, em essência representa a medida da resistência do material ao processo de crescimento da fratura macroscópica (HERTZBERG, 1976).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Como objetivo geral de pesquisa desta dissertação tem-se:

Aplicar Metodologias Micromecânicas para a caracterização de propriedades de tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais.

1.1.2. Objetivos específicos

Como objetivos específicos de desenvolvimento do projeto tem-se:

- Investigar e aplicar metodologias micromecânicas para caracterização de propriedades de tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais;
- Aplicar procedimentos numérico intensivos robustos de calibração de parâmetros micromecânicos para caracterização de tenacidade ao fraturamento;
- Estabelecer correlação entre bases de dados de resultados de ensaios experimentais e resultados de procedimentos de análises numéricas

1.2 JUSTIFICATIVA

1.2.1. Justificativa e Relevância Científica

Os sistemas de estruturas, de modo geral, apresentam imperfeições (poros, falhas, defeitos, fraturas, corrosões, deformações, danos, etc), de distintas características geométricas e materiais. Tais anomalias são desenvolvidas ou adquiridas já na fase de fabricação e montagem, ou durante a vida útil. A significância de tais imperfeições, em particular as classificáveis como fraturas, necessita ser avaliada para mitigar a consequência de eventos de falhas.

Caso uma imperfeição seja detectada por inspeção dos componentes, se faz necessário sua avaliação e monitoramento, por critério normativo de aceitação e tolerância ao dano. Indicando objetivamente a condição de disposição quanto a sua remoção (ou reparo), ou se o componente deverá ser substituído, ou ainda reforçado. Na hipótese de que eventuais defeitos possam ser tolerados nos sistemas estruturais, importa determinar quais seriam as medidas complementares de monitoramento, inspeção e manutenção, e que implicações existiriam em termos de riscos.

A aplicação sistemática de tais procedimentos denomina-se Avaliação Crítica de Integridade Estrutural (ACI), vide (BS7910, 2005), (FITNET, 2006).

A aplicação de ligas de alumínio em sistemas estruturais tem sido distintamente favorecida pelo desenvolvimento de múltiplos programas estratégicos de pesquisas tecnológicas e industriais (MADDOX S.J., 2003).

Frequentemente tratados como linhas de desenvolvimento de tecnologias emergentes, tais programas de investigações científicas e tecnológicas de modo independente evidenciaram a necessidade de desenvolvimento de metodologias robustas para caracterização de propriedades mecânicas de resistência estrutural (SIELSKI, 2007); (J.K.Donald, Amy Blair et alli, 2007); (MAZZOLANI et alli, 2013).

Uma medida da crescente base de pesquisas nos últimos 30 anos, são as séries de Conferências Internacionais de Alumínio INALCO, efetuadas desde 1981 (MADDOX S.J., 2003).

Em decorrência de pesquisas sobre o comportamento de fraturamento e fadiga de ligas de alumínio, resultaram novas especificações normativas de projeto e fabricação de estruturas de alumínio, notadamente (BS 8118, 1991), (EUROCODE 9, 2000), recomendações da (Aluminum Association, 1994) nos EUA, aplicáveis a construções de edificações civis e industriais, entre outras.

No que tange a construção naval e de sistemas estruturais offshore, houve grande desenvolvimento, liderado por várias Sociedades Certificadoras. Vide por exemplo, recomendações das Regras para a Classificação de Embarcações de Alumínio, entre outras estruturas (DNV, 2011) e (DNV, 2012).

Um quadro sinóptico destes desenvolvimentos, orientado para os setores naval e offshore, foi apresentado em (TROVATO e A.A.COUTO, 2018).

Tem-se foco no desenvolvimento de metodologias para caracterização de propriedades mecânicas de tenacidade ao fraturamento e de integridade de sistemas estruturais, por afetarem sensivelmente os índices de confiabilidade e segurança de componentes e sistemas estruturais (SIELSKI,2007).

Se nota que as ligas de alumínio constituem materiais heterogêneos policristalinos, que exibem padrões microestruturais diferenciados de seus elementos constituintes. Além dos componentes de fase e das características de forma dos cristalitos, se apresenta uma distribuição complexa de microdefeitos estruturais e discordâncias. Aspectos estes que se correlacionam fundamentalmente com a variabilidade de propriedades mecânicas macroscópicas e físicas características desses materiais (MONTEIRO, W.A. e CARRIO, J.A.G. 2016), como também (CALLISTER e RETHWISCH, 2014).

Os padrões microestruturais de materiais sólidos policristalinos, relacionados a variabilidade estatística dos parâmetros de comportameneto e resistência mecânicas, constituem as características micromecânicas (AXELRAD, 1978).

Constata-se que os indicadores de dispersão estatística dos valores característicos de resistência mecânica geralmente publicados são elevados. Condição que se constata mesmo no caso de valores característicos recomendados por distintas normativas internacionais, que frequentemente não estão coordenados, para os mesmos grupos de ligas de alumínio estrutural, (SIELSKI,2007).

A dispersão estatística associada às propriedades mecânicas, e refletida em escala macroscópica, fundamentalmente decorre de aspectos micromecânicos. Está ainda associada a discrepâncias nas metodologias experimentais adotadas, e condicionadas por fatores tais como:

- Forma e variabilidade geométrica de corpos de prova amostrais;
- Características de equipamentos de ensaios;
- Aplicação de carregamentos e intensidade de deformações impostas;
- Procedimentos de testes não padronizados;
- Orientação relativa de laminação e propriedades de anisotropia;
- Estado de tensões e deformações, tensões residuais, constrição mecânica;
- Características de composição metalúrgica;
- Variáveis e padrões microestruturais;
- Tratamento termo-mecânico de endurecimento.

A maior variabilidade estatística das propriedades mecânicas, tem consequência direta sobre os índices de confiabilidade, nos fatores de segurança estruturais, e na performance em uso. Condições estas que levam ao conservadorismo das normativas de projeto de Engenharia Estrutural.

Quadro análogo se verifica na caracterização de propriedades mecânicas de tenacidade ao fraturamento, e de parâmetros de resistência à fadiga (BATISTTE, 2009). Se superpõem a carência de informações e de parâmetros relativos às propriedades características de tenacidade ao fraturamento e fadiga de ligas de Alumínio estruturais.

A influência da adoção das metodologias experimentais se correlaciona ao grau de dispersão estatística obtido nos resultados característicos de tenacidade de ligas de alumínio estruturais (J.K.DONALD, A. BLAIR et alli, 2007).

Pesquisas de (PHERSON & LANDES, 2007) confirmam a necessidade de desenvolvimento de metodologias robustas de caracterização de propriedades de tenacidade de ligas de alumínio estruturais, e comentam as implicações normativas e de avaliações de integridade.

O desenvolvimento experimental normativo se orienta no sentido de compatibilizar a interpretação de dispersão e variância estatística dos resultados com as premissas metodológicas, (Xian-Kui Zhu and James A. Joyce, 2012). Foco dessas pesquisas busca desenvolver de metodologias numéricas, de modo sistemático, para avaliação crítica das condições de integridade de sistemas de estruturas de alumínio, (ZHU et alli, 2012).

Esta dissertação preconiza aplicar procedimentos de análises estruturais intensivos, com base no método dos elementos finitos, para caracterização de parâmetros de tenacidade J_{Ic} , o parâmetro de tenacidade da Integral J (Rice, J.R.-1966), estabelecendo correlação com resultados de ensaios experimentais.

A utilização de metodologias de Mecânica Computacional, correlacionadas a resultados de ensaios de Mecânica de Fratura Experimental visa ampliar as condições de validação, e de aplicação de parâmetros característicos de tenacidade ao fraturamento a procedimentos ACI de componentes estruturais.

As correlações numéricas obtidas vem garantir maior grau de confiabilidade dos resultados experimentais, e de convalidação de propriedades características de tenacidade de tais materiais, e maior qualidade dos resultados experimentais.

Dadas as características de comportamento reológico tipicamente não lineares das ligas de alumínio estruturais, tem pertinência aplicar metodologias de caracterização de propriedades de tenacidade ao fraturamento próprias da Mecânica de Fratura Não Linear (MFNL), ou Elasto Plásticas (MFEP).

Os ensaios tecnológicos de caracterização de tenacidade, essencialmente metodologias experimentais de natureza macroscópica, refletem condições micromecânicas dos materiais (Xian-Kui Zhu and James A. Joyce, 2012).

Se torna pertinente investigar a influência de parâmetros micromecânicos na avaliação de propriedades características de tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais, (HAASEN,1995).

1.2.2. Justificativa e relevância tecnológica e industrial

O principal alcance e relevância da presente dissertação tem interesse na sua potencial aplicação tecnológica na área de Engenharia Estrutural de um modo geral, e especialmente nas Avaliações Críticas de Integridade e Segurança de sistemas estruturais (ACI).

Aspecto relevante consiste em divulgar metodologias de ACI, a pesquisadores e profissionais de engenharia e consultoria de Engenharia Estrutural. A limitada difusão de tecnologias para sistemas estruturais de alumínio, representa desafio tecnológico notável, em âmbito internacional.

As investigações fundamentais de caracterização de propriedades mecânicas das ligas de alumínio, em particular dos parâmetros de tenacidade ao fraturamento, tem por perspectiva ampliar a capacitação científica e tecnológica no setor, e seu desenvolvimento tecnológico industrial, e normativo.

Índices de confiabilidade estruturais mais elevados, aliados a melhores níveis de capacitação tecnológica, trazem potencial aperfeiçoamento qualitativo das estruturas, precluindo riscos de consequências econômicas, ambientais, e humanas severas.

O crescimento dos níveis de produção de estruturas de alumínio, analogamente ao verificado em países desenvolvidos, implica em melhor aproveitamento de recursos naturais, agregando valor, e ampliando as perspectivas econômicas com geração de postos de trabalhos qualificados. Neste sentido, estatísticas atualizadas deste setor industrial no contexto da economia nacional são referidas a (ABAL-A, 2018).

Atualmente, um importante esforço de difusão tecnológica e educacional, complementar a programas de graduação de Engenharia e Arquitetura, sobre a aplicação de sistemas estruturais de alumínio se desenvolve no Brasil pela (ABAL-B,2018) no programa Alumínio nas Escolas. Destacam-se ainda os programas desenvolvidos de capacitação de Engenharia em tecnologia de soldagem, em programas de pós-graduação conduzidos em cooperação com o Instituto Internacional de Soldagem da ABS (ABS, 2018).

1.3 METODOLOGIA

A proposição Metodológica preconiza aplicar procedimentos de análise micromecânica para caracterização de propriedades mecânicas de tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais (XIA, L. and SHIH, 1995), com esteio em duas linhas:

- Avaliações numéricas através do Método de Elementos Finitos MEF;
- Dados experimentais de caracterização de propriedades mecânicas.

Observa-se que há um conjunto de métodos experimentais aplicáveis a caracterização macroscópica de propriedades de tenacidade à fratura, eg: ASTM-B646, ASTM-B909 e ASTM-E399, as quais metodologias experimentais mantém base conceitual na Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE).

As ligas de alumínio estruturais tipicamente exibem comportamento reológico sensivelmente não linear, maior anisotropia, e sensibilidade a deformações.

O comportamento de tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais, revela predominância de mecanismos dúcteis de ruptura e deformação. Não se verificam de fenômenos de transição frágil-dúctil. Apresentam pouca sensibilidade a efeitos de baixas temperaturas. Não se observa o fenômeno de Temperatura de Transição de Ductilidade Nula (*NDT Nil Ductility Transition Temperature*).

Ao se notar os aspectos de comportamento de fraturamento, face a condições de validações experimentais normativas, e premissas analíticas da MFLE, estas se revelam restritivas, de difícil adequação para ligas de alumínio estruturais.

Para se coadunar com as características de materiais de padrão reológico não lineares, típico das ligas de alumínio estruturais, metodologias experimentais consistentes com premissas da Mecânica de Fratura Não Linear (MFNL) tem sido desenvolvidas e aplicadas. Como exemplo, se ressalta a normativa (ASTM E-1820,2001), a qual permite avaliar experimentalmente os parâmetros de tenacidade característicos da Integral J, numérica e analiticamente definidas em (RICE, J.R., 1968).

Investigações correlatas aprofundam as metodologias experimentais de caracterização de propriedades de tenacidade à fratura (Battiste,2009), através da avaliação de resultados experimentais de distintos grupos de ligas de alumínio estruturais obtidos com a (ASTM E-1820,2001). Estas sendo desenvolvidas em duas etapas complementares, de investigações experimentais e de análises numéricas.

i) Metodologias advindas da Mecânica de Fratura Probabilística:

Estabelecem correlações estatísticas de resultados experimentais de caracterização mecânica e de tenacidade à fratura da Integral J, definidas através de análise estatística de Weibull, (LANDES & SHAFFER, 1980), possibilitando definir parâmetros estatisticamente representativos de parâmetros de tenacidade J, partir de ensaios efetuados segundo a normativa ASTM E-1820,2001);

ii) Metodologias advindas da Mecânica Computacional:

Correlações entre dados experimentais e resultados de análises numéricas intensivas. Abordagens que aplicam distintas metodologias e formulações de Mecânica de Fratura Computacional para representar processos de danificação consistentes com condições microestruturais e micromecânicas.

Consistente com o segundas linhas metodologicas, as análises numéricas sao baseadas na aplicação de Métodos de Elementos Finitos (MEF), com base em modelos

reológicos que consistentes com parâmetros micromecânicos representativos, permitem estabelecer correlações com os valores experimentais de caracterização de tenacidade.

Em essência o presente trabalho de pesquisa se desenvolverá segundo as seguintes linhas:

- Seleção e análise de base de resultados experimentais de tenacidade;
- Estudo de modelo micromecânico e parâmetros microestruturais;
- Estudo de parâmetros de modelo reológico dos materiais;
- Desenvolvimento de procedimentos de análises numéricas de referência MEF;
- Interpretação de resultados de análises numéricas e experimentais.

A figura 1 apresenta o fluxograma que delinea a metodologia a ser seguida.

No Capítulo 2 subsequente, de revisão bibliográfica, tais aspectos serão detalhados.

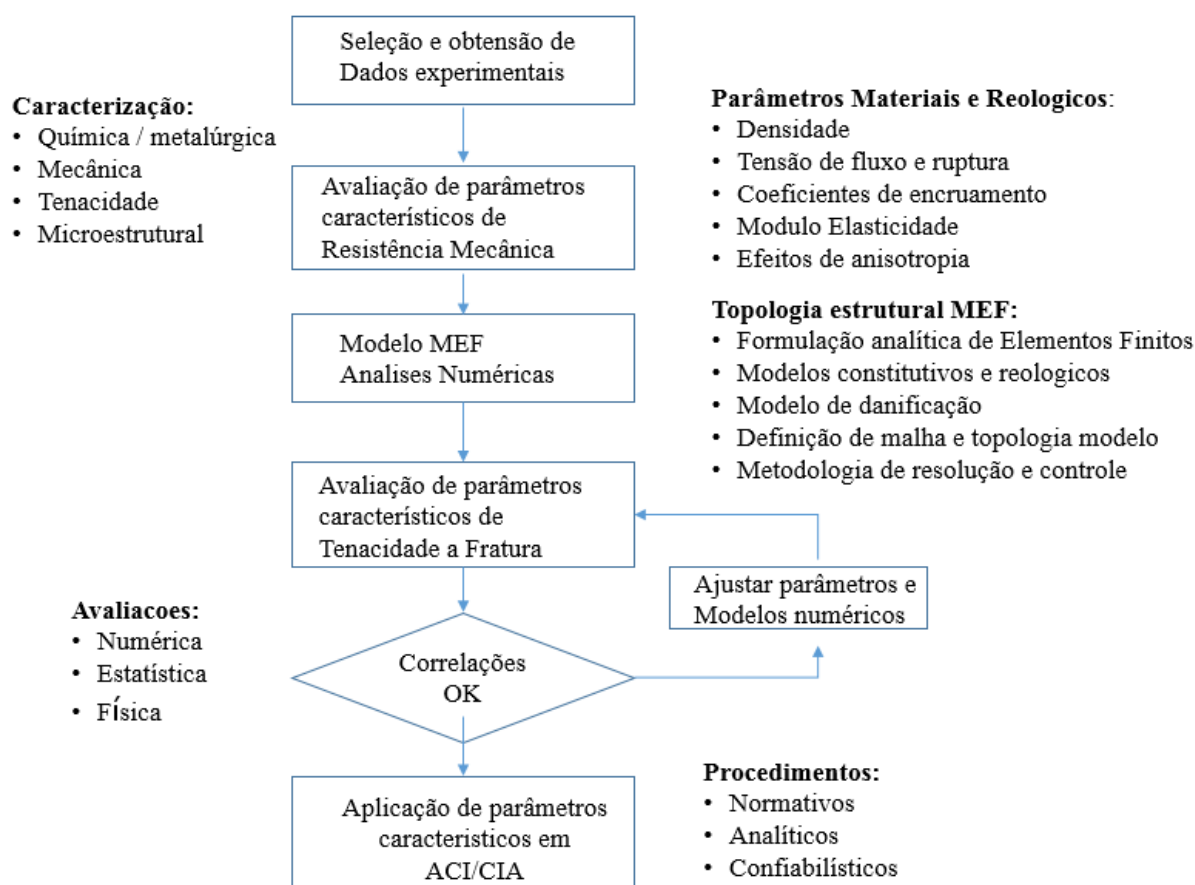


Figura 1: Fluxograma de procedimentos de Caracterização Micromecânica de parâmetros de tenacidade ao fraturamento

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo 2 se apresenta a revisão de referências bibliográficas adotadas para desenvolvimento da presente pesquisa de dissertação.

Na seção 2.1 se discorre concisamente sobre os principais programas de pesquisas científicas, tecnológicas e industriais orientados a aplicação de ligas de alumínio a sistemas estruturais. Se apresenta uma visão de panorama do estágio de desenvolvimento de Metodologias e especificações normativas cruciais, voltadas a procedimentos de Avaliações Críticas de Integridade. São destacados aspectos de caracterização de parâmetros de tenacidade ao fraturamento.

A seção 2.2 traz uma descrição sinóptica de trabalhos de pesquisas selecionados de avaliação experimental de tenacidade à fratura de ligas de alumínio aplicadas em sistemas estruturais tipicamente navais e oceânicos e de estruturas offshore. Pela rigor inerente aos procedimentos experimentais de caracterização de tenacidade conduzidos e qualidade dos resultados publicados, vem constituir base de referência experimental a ser adotada nesta dissertação .

A seção 2.3 aborda metodologias de avaliações numéricas, baseadas no método de elementos finitos, orientadas a determinação de campos de tensões e deformações em sólidos com fraturas, e avaliações de parâmetros de tenacidade. Ênfase dirigida a descrição de procedimentos de análises numéricas gerais, e aspectos representativos dos padrões reológicos de ligas de alumínio, e de parâmetros de tenacidade.

Para maior concisão, uma introdução conceitual sobre mecanismos de ruptura, modelos constitutivos reológicos, e estados limites de plastificações e critérios de danos formais, referir a (HERTZBERG, Richárd W, 1976), (LEMAITRE, CHABOCH, 1990) e JUNHANG GUO (2013).

Pela abrangência e consistência normativa e científica, será seguido nesta dissertação sistematicamente a notação e terminologias indicadas em (ASTM E1823, 2011) tanto quanto possível, tal como referida em (Zhu, Xian-Kui and Joyce, James A.,2012).

2.1 LINHAS DE PESQUISAS EM INTEGRIDADE ESTRUTURAL

Uma crescente utilização de ligas de alumínio a sistemas estruturais demanda estabelecer critérios que assegurem condições de segurança e integridade compatíveis com nível de confiabilidade estrutural requerido. Tal ocorre tanto para estruturas de tipologia diferencial com componentes unidos mecanicamente, como para os de tipologia integral (por soldagem), (TROVATO, 2013) e (TROVATO, 2015).

Concisamente, nesta seção se destacam programas de pesquisas sobre integridade de estruturas que pautam o tema desta dissertação.

Uma primeira referência normativa (BS7910, 2005) introduz metodologias normativas para Avaliação Crítica de Integridade de falhas estruturais de fratura e fadiga, corrosão e deformações lentas. Largamente utilizada em diversos setores industriais, e reconhecida como estado de referência da arte, para avaliações de estruturas de materiais de aços ferríticos, austeníticos, sendo igualmente aplicável a ligas de alumínio.

Em seu desenvolvimento, a (BS7910, 2005) adota premissas analíticas de natureza geral, baseadas precipuamente em soluções de referência da MFLE, observando critérios de simplicidade e robustez das especificações e formulações. Suas premissas metodológicas eventualmente conduziram a limitações e a adoção de simplificações relativas aos parâmetros característicos de tenacidade dos materiais metálicos.

A limitação da base experimental de resultados de caracterização de propriedades mecânicas, suscitou a adoção de critérios conservadores de avaliação de integridade de sistemas estruturais, e particularmente os das estruturas de ligas de alumínio.

Por inspeção do documento (BS7910, 2005), se observa que as bases de dados de propriedades características de tenacidade de ligas de alumínio são relativamente restritas ou limitadas, indicando a necessidade de seu desenvolvimento e validação. Aspectos os quais tem sido extensivamente comentados por pesquisadores da área de integridade estrutural, entre os quais destacaria (MADDOX S.J., 2003).

Este último pondera, no que tange a aplicação de Metodologias Mecânica de Fratura para estimar a vida residual em fadiga estrutural, que as informações e metodologias da (BS-7910,2005) provavelmente representem o atual estado da arte. No entanto, assenta ênfase particular a procedimentos de estruturas de aço.

Atingir maior abrangência demandaria maior atenção quanto ao desenvolvimento experimental requerido para permitir avaliações de crescimento de fraturas

por fadiga. Do mesmo modo se requeria a convalidação experimental de Metodologias de Mecânica de Fratura definidas para ligas de alumínio estruturais.

Concisamente, menciona-se pontos que carecem ser aperfeiçoados na (BS-7910,2005) quanto a caracterização de propriedades de mecânicas de ligas de Alumínio:

- Parâmetros de crescimento de fraturas por fadiga de ligas de Alumínio;
- Limitação de base experimental de crescimento de fratura por fadiga;
- Curvas de resistência à fadiga para distintas categorias de detalhes construtivos idênticas ou proporcionais a curvas de estruturas de aço;
- Diagramas de avaliação de dimensões máximas de fraturas, sob tensões normais e flexionais, obtidos dos valores aplicáveis aos aços;
- Efeitos de parâmetros de porosidades e microestruturais sobre a tenacidade de ligas de alumínio;
- Limitação amostral de bases de dados normativas de tenacidade;
- Significância de efeitos de parâmetros de imperfeições geométricas em ligas de Alumínio: formas, posição, desalinhamento, grupos;
- Limitação experimental de caracterização reológica e deformação lenta;
- Significância de parâmetros de mismatch em soldas de ligas de alumínio;
- Caracterização mecânica de ligas de alumínio em zonas termicamente afetadas pelo calor de soldagem (ZTA);
- Efeitos de variação de constrição mecânica (Constraint level).

Em larga medida para atingir níveis de avaliação de integridade mais robustos, com índices de confiabilidade estruturais elevados, se articularam vários programas de desenvolvimentos de pesquisas industriais (*Joint Industry Research Programs – JIRP*).

A seguir, alguns desses programas de pesquisas, de maior pertinência quanto a aplicações para estruturas de alumínio, serão abordados concisamente.

O programa de pesquisas *SINTAP Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry* (SINTAP, 1999), se destacou pela valorização da qualificação e da capacitação tecnológicas, e pela difusão e aplicação de pesquisas científicas sobre integridade. Além das bases Metodológicas analíticas fundamentais e experimentais, necessárias para Avaliações Críticas de Integridade, a capacitação tecnológica requerida constituia fator limitante. Foram delineados 5 portfólios de projetos:

- Ampliação e validação de base de dados de análise de falhas de componentes;
- Investigação de efeitos de *mismatch* na integridade de componentes soldados;
- Metodologias estatísticas e estocásticas de processos de danificação;

- Investigação de efeitos de tensões residuais na integridade de juntas soldadas;
- Procedimentos robustos de Avaliações Críticas de Integridade.

As Metodologias de Avaliações Críticas de Integridade evoluíram a partir de procedimentos orientados a setores industriais, que demandavam condições de segurança críticas. Demandando, por exemplo na área nuclear, procedimentos normativos estruturados. Sua utilização generalizada evidenciou limitações várias, que demandaram JIRP mais amplos.

Se destaca o programa temático sobre integridade (FITNET, 2006) *European Fitness for Service (FFS) Thematic Research Network*. Propiciaram a revisão do documento BS 7910 em 2013, e na aplicação de metodologias estruturadas e integradas de avaliação de integridade (MUSTAFA KOCAK et alli, 2006).

Os procedimentos de avaliações denominados “FITNET FFS” exigiram múltiplas linhas de pesquisas (MUSTAFA KOCAK et alli, 2006):

- Ampliação e validação de bases de dados de parâmetros característicos de resistência mecânica e de tenacidade de materiais;
- Procedimentos estruturados de avaliações de modos de falhas diversos: i) fraturas; ii) fadiga; iii) corrosão; iv) deformações lentas; v) efeitos térmicos;
- Validação de procedimentos específicos para distintas estruturas: dutos/tubulacoes, aeronáuticas, nucleares, marítimas, civis, etc;
- Integração estratégica entre metodologias FITNET FFS e métodos confiabilísticos de avaliação de segurança, integridade e riscos;
- Sistemáticas estruturadas para gerenciamento de integridade estruturais;
- Requisitos de instrumentação, inspeção e monitoramento em serviço;
- Condições e tratamento analítico de sinais de ensaios não destrutivos;
- Localização e identificação instrumentada de danos;
- Monitoramento de níveis de respostas estruturais estáticas e dinâmicas;
- Tratamento numérico e avaliação de níveis de constrição de tensões.

Exemplos de aplicação dessas Metodologias FITNET FFS a sistemas de estruturas de alumínio são apresentados por (S. CICERO, M. KOCAK e all, 2007). Especificamente, foram aplicados para avaliação de integridade ao fraturamento de painéis enrijecidos soldados, com material da liga AL 2XXX, sob condições de *undermatch/mismatch*, e também de painéis soldados enrijecidos de liga AL6013 (KOCAK M., CICERO S., YENI, 2007).

Programas industriais de pesquisas tecnológicas aportaram inovações em métodos e processos industriais, e trouxeram amplo aperfeiçoamento dos Métodos de

caracterização de propriedades dos materiais. Se caracterizam pela atuação coordenada de setores industriais e instituições de pesquisas, com foco em desenvolvimentos tecnológicos. Notadamente, a introdução do processo *Friction Stir Welding* (FSW) de soldagem, desenvolvido e patenteado pelo *The Welding Institute* (TWI), (W.M. THOMAS et alli, 1991) e (C. DAWES, W. THOMAS, 1995). Assim como os processos *Friction Stir Processing* (FSP), de larga aplicação para sistemas estruturais de alumínio soldados.

Estes últimos processos essencialmente consistem na fusão autógena da microestrutura dos materiais metálicos pela fricção e pressão de ferramentas, (R.S. MISHRA, Z.Y. MA, 2005). Se adaptam sobremaneira para soldagem de ligas de alumínio estruturais, encontrando crescente aplicações em setores industriais. Seu advento suscitou um caudal de linhas de pesquisas científicas e tecnológicas de metodologias micromecânicas de caracterização de parâmetros de tenacidade à fratura e fadiga.

De destacar ainda desenvolvimentos de ligas de alumínio do grupo AL-5XXX para sistemas e dutos submarinos de hidrocarbono, para condições oceânicas ultra-profundas (GELFAT et Alli, 2004) e (GELFAT e TIKHONOV, 2007). Estas se mostraram bem sucedidas para desenvolvimento de diversos tipos de Sistemas de Risers de produção, em profundidades variando entre 2000 m a 3000 m. Pioneiramente, também foram aplicadas a Sistemas de Risers de Perfuração.

As materiais selecionadas foram avaliadas quanto a critérios de desempenho ótimo sob condições de corrosão marítima, expostas a ataques de agentes agressivos de hidrocarbonos, entre outros fatores severos de natureza operacional e ambiental, tais como temperaturas médias elevadas, solicitações dinâmicas de tensões, resistência a fadiga estrutural, resposta espectral, além de soldabilidade, usinabilidade e aspectos de fabricação. As propriedades características de tenacidade investigadas por metodologias experimentais (ASTM E399, 2017), (ASTM E813, 1989), com base na MFLE.

Com foco em sistemas de estruturas navais e oceânicas, sistemas submarinos e plataformas marítimas, (SIELSKI,2007) revê as necessidades de pesquisas de aplicação robusta de ligas de alumínio a tais sistemas estruturais. Revisão a qual se insere no amplo programa de pesquisas de tecnologia industrial aplicadas a estruturas de unidades navais militares, desenvolvidos pelo *Ship Structure Committee* (SSC), do *Office of Naval Research* (ONR). Um portfólio de 10 projetos de pesquisas foi delineado (SSC, 2007), a saber:

- SSC-410, Fadiga de juntas de alumínio estruturais;
- SR-1447, Caracterização de tenacidade à fratura de ligas de alumínio;
- SR-1448, Especificações de projeto e fabricação de estruturas navais;

- SSC-438, Otimização estrutural para conversão de unidades navais militares;
- SSC-439, Requisitos estruturais de embarcações de alta velocidade;
- SR-1434, Desempenho em serviço de detalhes estruturais de alumínio;
- SR-1454, Flambagem de estruturas enrijecidas de alumínio soldadas;
- SR-1446, Ensaios de ruptura de painéis enrijecidos de alumínio navais;
- SSC-442, Proteção passiva contra incêndio de estruturas de alumínio.

Em (SIELSKI,2007) se discute aspectos metodológicos de caracterização mecânica das ligas de alumínio utilizadas em estruturas marítimas e navais. Apesar de vastos desenvolvimentos, lacunas de pesquisas e de conhecimento tecnológico tem sido evidenciadas quanto ao comportamento mecânico de ligas de alumínio estruturais, com consequências sobre parâmetros de avaliações de integridade. Se constataram importantes hiatos no desenvolvimento de pesquisas relativas propriedades de fadiga e tenacidade à fratura, em particular a tenacidade à fratura dinâmica.

Se observa que grande parte dos resultados experimentais de fratura publicados existentes, e conseqüentemente sua notada variabilidade, são provenientes de testes não padronizados, com dados considerados inválidos em relação aos requisitos de qualidade dos ensaios normalizados de tenacidade, entre outros aspectos de metodologias e técnicas experimentais aplicadas aos ensaios de caracterização (SIELSKI, 2007) .

Investigações de (SSC, 2007) identificaram carências críticas de informações para desenvolvimento avaliações de integridade, em particular para determinação de tolerância a danos de estruturas marítimas e navais de alumínio.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE TENACIDADE LIGAS DE ALUMÍNIO ESTRUTURAL

Nesta seção se abordam trabalhos de caracterização experimental de tenacidade à fratura de ligas de alumínio aplicada a sistemas estruturais.

Uma ampla e segura fundamentação de Mecânica de Fratura, com apresentação conceitual dos diferentes parâmetros de caracterização de tenacidade à fratura são referidos a (HERTZBERG, 1976), (ANDERSON, T.L.,2017) entre outros.

Uma concisa introdução a conceitos fundamentais de Mecânica de Fratura, com foco no comportamento de ligas de alumínio se referir a (KOSTEAS,D. et alli, 1994), referencia especificamente orientada a sistemas e componentes estruturais de alumínio.

Uma abrangente revisão técnica de metodologias da Mecânica de Fratura Experimental, que trata sobre aspectos relacionados de padronização dos ensaios, é efetuada a

luz de interpretação analítica de múltiplos parâmetros de tenacidade (Xian-Kui Zhu, James A. Joyce, 2012). Nestes são discutidos em detalhe os vários parâmetros de caracterização de tenacidade à fratura mais largamente aplicados, ressaltando-se a sua interpretação crítica:

- G: Taxa de liberação de energia potencial de deformação elástica;
- K: Fator de Intensidade de Tensões;
- J: Integral J Invariante do fluxo de energia de deformação total na região da fratura;
- CTOD: Parâmetro de abertura da ponta da trinca;
- CTOA: Parâmetros de ângulo de abertura da ponta da trinca.

De maneira detalhada, em (Xian-Kui Zhu, James A. Joyce, 2012), são discutidas amplamente distintas metodologias experimentais da American Society for Testing and Materials (ASTM) aplicáveis a caracterização de parâmetros de tenacidade, como:

- ASTM E399: ensaios de Fator de Intensidade de Tensões Crítico K_{Ic} (EPD);
- ASTM E561: Curva K–R (variação de K vs crescimento da fratura (EPT));
- ASTM E813: determinação J_{Ic} ;
- ASTM E115: Curva J–R (Integral J com crescimento da fratura dúctil);
- ASTM E1737: determinação conjunta de J_{Ic} e curva J–R;
- ASTM E1290: determinação do CTOD (δ) crítico (início de fratura frágil)
- ASTM E1820: medições dos parâmetros K, J and CTOD não lineares
- ASTM E2472: determinação do parâmetro CTOA (EPT)

Em (Xian-Kui Zhu, James A. Joyce, 2012), o comportamento de tenacidade à fratura em ensaios são interpretados quanto a:

- i) comportamento reológico do material; ii) estados de triaxialidade de tensões;
- iii) efeitos de constrição mecânica do campo de tensões e deformações locais sobre a tenacidade; iv) instabilidade de fratura; v) efeitos de escala de geometria.

Com foco nas avaliações de integridade de ligas de alumínio estruturais, (PHERSON & LANDES, 2007) evidenciam a necessidade de relaxação dos critérios de validação dos ensaios de caracterização de tenacidade aplicados a ligas de alumínio. De modo equivalente, de admitir maior variância estatística na convalidação de resultados de ensaios exigidos pelas normativas.

A reconsideração de determinados critérios metodológicos experimentais se revela pertinente no que tange aos regimes de fraturamento dúctil. Condições que, em certa medida foram igualmente notadas pelas revisões das especificações de ensaios normativos (Xian-Kui Zhu, James A. Joyce, 2012).

Como parte do desenvolvimento de investigações do projeto SSC-448 do *Ship Structure Committee* (SSC, 2007), foram conduzidos ensaios de caracterização, através de Métodos de Mecânica de Fratura Experimental Não Linear, do comportamento de resistência ao crescimento da fratura por fadiga (*Fatigue Crack Growth - FCG*) e de tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais do grupo AL-5XXX.

Estruturado através de programa de colaboração estratégica entre as marinhas canadense e norte americana, se consubstanciou no relatório de projeto de pesquisa de desenvolvimento tecnológico SR-1447 “*Fracture Mechanics Characterization of Aluminum Alloys for Marine Structural Applications*” (DRDC, 2007).

Os testes seguiram metodologias experimentais da especificação ASTM E 1820-01 “*Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*”.

Pela robustez inerente aos Métodos experimentais de Mecânica de Fratura adotados nos procedimentos de testes, e pela consistência estatística das amostragens, os resultados do programa SR-1447 (DRDC, 2007) serão adotados como base experimental para desenvolvimento de análises numéricas desta dissertação.

Detalhes sobre a execução de tais ensaios, são apresentados na Capítulo 3 e Anexo III.

2.3 MÉTODOS NUMÉRICOS PARA AVALIAÇÃO DE TENACIDADE

Concisamente se descrevem trabalhos de avaliações numéricas baseadas em formulações do Método de Elementos Finitos (MEF), para análise de problemas de Mecânica de Fratura. Com ênfase na descrição de procedimentos de análises numéricas, que considerem não linearidade física e geométrica, aplicáveis a ligas de alumínio estruturais.

Uma introdução a a aplicação de métodos numéricos baseada nas formulações dos MEF a problemas de Mecânica de Fratura Computacional se reporta a (ANDERSON, T.L.,2017).

Uma abrangente revisão da aplicação de metodologias numéricas para análise de condições de danificação por fraturamento sendo reportada a (GUO (2013).

Seria possível traçar um longo histórico das pesquisas sobre os fenômenos físicos relacionados a nucleação e crescimento de fraturas, conduzindo a deformação e ruptura de sólidos contínuos, a partir de condições microscópicas, linhas de pesquisas que remontam a (GRIFFITH, 1921) entre outros muitos precursores.

Avanços posteriores (McCLINTOCK, 1968) buscaram tratar o problema da nucleação e crescimento inicial da fratura como fenômeno local, tendo em conta condições microestruturais e micromecânicas. Condições que reconheciam que uma distribuição de vazios microscópicos existente na estrutura dos materiais com fraturas macroscópicas, desenvolvem crescimento dilatante. Embora sejam fenomenologicamente consistentes para descrever os mecanismos de ruptura de sólidos a partir de condições microestruturais, o tratamento matemático requerido para considerar a distribuição estatística e espacial de microdefeitos de distintas dimensões se revela um problema de tratamento complexo.

Trabalhos subsequentes (RICE-TRACY, 1969) (GURSON et alli, 1981) estabeleceram um critério macroscópico, baseado nos mecanismos microestruturais de deformação e fraturamento de sólidos por plasticidade dilatante. Neste último, a densidade de porosidade microestrutural distribuída uniformemente no sólido, quando submetida a estados de tensões triaxiais, sofre um processo de dilatação volumétrica.

O crescimento do volume de vazios controla o mecanismo de dano, em termos de fração relativa ao volume do material íntegro, favorecendo a ocorrência de deformações plásticas. Sendo pertinentes no caso de metais dúcteis, nos quais a intercorrência de ruptura por fratura se associa a um padrão microestrutural de alvéolos e coalescência de vazios, como predominantemente nas ligas de alumínio estruturais (COUTO, AA e VATAVUK, J., 2017).

Tal metodologia foi aplicada para simular condições de fratura dúctil sob pequenas deformações plásticas (*SSY Small Scale Yielding*) (TROVATO, E.T. e RUGGIERI, C., 2001). Uma terceira abordagem, fundamentada em Mecânica do Dano de Sólidos em Meios Contínuos, observa parâmetros em mesoescala, distribuídos uniformemente num volume de referência, dispensando parâmetros microestruturais como porosidades ou inclusões. Nestas, o mecanismo de ruptura vai controlado puramente por uma função de estado de danificação distribuída no contínuo (J.L. LEMAITRE and J. CHABOCH, 1990).

Recentemente, conceitos de Mecânica de Danos em Meios Contínuos foram aplicados a meios porosos, na definição de modelos constitutivos reológicos termo-viscoplásticos (GUO, 2013), fundamentados na Mecânica do Dano de (ROUSSELLIER, G., 2001), para avaliação numérica do comportamento micromecânico de fratura, por soluções do método de elementos finitos (MEF).

Metodologias de caracterização de tenacidade, consistentes com mecanismos de danificação e fraturamento dúctil de ligas de alumínio, são discutidas por (GUO, 2013). Neste último se investigam mecanismos de fratura de dois tipos de materiais da liga AL-5052. São revistos conceitos de plasticidade dilatante, e mecanismos de danificação, que controlam

o comportamento reológico dúctil dos materiais. O processo de fraturamento sendo fenomenologicamente descrito pela nucleação de uma microestrutura de defeitos, crescimento e dilatação de vazios, e progressiva coalescência. São ainda observados aspectos determinantes em processos de fraturamento de tipo transgranular e dúctil, e sua manifestação em componentes estruturais de alumínio.

Algoritmos de determinação de soluções numéricas consistentes dos campos de tensões, sob grandes deformações plásticas locais são decritos (GUO, 2013). Como também relatados procedimentos de calibração de parâmetros de dano requeridos para as análises numéricas. Ponto de destaque reside na comparação crítica com Metodologias de plasticidade dilatantes, como as apresentadas em (GURSON-TVERGAARD, 1981). Especialmente os procedimentos de calibração numérica do índice de vazios, ou densidade de vazios por unidade de volume f representativos da condição microestrutural dos materiais, a serem adotados para avaliação de parâmetros característicos de tenacidade.

Um quadro metodológico de avaliação de processos de fraturamento dúctil, com esteio no Método de Elementos Finitos, aplica modelos reológicos elastoplásticos e de plasticidade dilatante (GURSON-TVERGAARD, 1981), e utiliza o conceito de células computacionais. Estas células computacionais, topologicamente correspondem a um elemento finito, permitem ordenar espacialmente a distribuição de microdefeitos e sua densidade volumétrica relativa no sólido. Constituem uma simplificação face as heterogeneidades e não uniformidade associadas a microestrutura de defeitos. Permitem a obtenção de soluções numéricas de campos de tensão e deformação representativas de regiões na vizinhança de fraturas (XIA, L. & SHIH, 1995).

As Metodologias de células computacionais permitem efetuar análises de sólidos fraturados, cujas formulações reológicas consideram a microestrutura de vazios para a investigação de comportamento de fratura dúctil em metais.

Articuladas a formulações do Método de Elementos Finitos, são adequadas a resolução de problemas fortemente não lineares de Mecânica de Fratura Computacional, conduzem a obtenção de soluções de campos de tensões e deformações sob grandes deformações plásticas.

Os resultados conduzem a avaliação numérica consistente de valores do parâmetro de tenacidade Integral J, invariantes (independentes do domínio) em regiões próximas a fratura, entre outros parâmetros característicos de tenacidade (KOPENHOFFER et alli, 1994). Assim como a simulação de condições de nucleação, crescimento e coalescência de vazios e crescimento de fraturas. Admitem formulações de distintos modelos reológicos:

- Deformação não linear de Ramberg Osgood;
- Modelos viscoplásticos;
- Microestrutura cristalina de planos de deslizamento e discordâncias;
- Condições de plasticidade dilatante (GURSON-TVERGAARD, 1981).

Avanços subsequentes notados em trabalhos destacados de (RUGGIERI, DODDS, 1996), e (GULLERUD, A.S., et alli, 2000).

De modo similar, a estratégia acima foi adotada na avaliação micromecânica de crescimento dúctil de fraturas de chapas finas, para vários metais ferrosos e não ferrosos, incluindo ligas de alumínio do grupo AA 6082, que aplicam diretamente formulações de plasticidade dilatante (GURSON-TVERGAARD, 1981), como citam (F. HACHEZ, A. G. ATKINS, R.H. DODDS, T. PARDOEN, 2015).

Com foco nos procedimentos de Mecânica Computacional, visando obter soluções numericamente robustas, (SHÃOOFAN-KAN,PATRICK, 2011) aplicam formulações do Método dos Elementos de Contorno (MEC) para avaliação de parâmetros de tenacidade. As soluções obtidas se apresentam independentes de condições topológicas de malhas de elementos finitos (*Meshfree Finite Element Methods*). A aplicação de formulações de plasticidade dilatantes através do Modelo de Gurson-Tvergaard, permitem considerar tensões de cisalhamento de modo consistente (SHÃOOFAN-KAN,PATRICK, 2011).

Correlações satisfatórias entre resultados numéricos e experimentais, e observações microestruturais são evidenciadas. Especialmente para condições de grandes deformações plásticas distorcionais, e condições de baixa triaxialidade. Nestas os mecanismos de ruptura são controlados pelas tensões de cisalhamento e distorções, e não pelas tensões e deformações volúmicas. Resultados numéricos permitem estabelecer correlações com ensaios de fratura com amostras de ligas de alumínio em painéis soldados de estruturais navais, para avaliar de crescimento dúctil de fratura, e para condições dinâmicas de impacto. Evidenciam adicionalmente que a consideração de Metodologias de discretização independentes de topologia de malhas de elementos finitos (*Meshfree formulations*), oferece aplicação numérica robusta e estável a problemas de Mecânica de Fraturas.

Poderia comentar que o aperfeiçoamento de Métodos experimentais de caracterização de propriedades microestruturais de ligas de alumínio, permite considerar explicitamente formulações micromecânicas em aplicações de Mecânica Computacional. Consistentes com a observação experimental de estrutura de grãos, da simetria e geometria cristalinas dos metais, microestrutura de discordâncias, densidade de inclusões e vazios, partículas de inclusões e fases heterogêneas, e precipitados.

A adoção de formulações reológicas consistentes com mecanismos de deformações plásticas cristalinas, levando em conta a microestrutura de discordâncias e as observações da estrutura de granulação, foi adotada por (MESSNER, 2014) para avaliar efeitos de fraturamento dúctil por delaminação. Permitindo correlacionar resultados de análises numéricas a resultados experimentais de ligas de alumínio-lithium AA 8XXX.

Em conclusão, a consideração de micromecanismos permite efetuar análises de condições de deformações e plasticidades locais (*Local approach*), as quais dependem fortemente de condições não homogêneas e anisotrópicas, para compatibilização de campos de tensão e deformação, tipicamente manifestadas em problemas de plasticidade cristalina, em particular na região de processos de dano e próximas a ponta da fratura, como destacado por (AXELRAD,1978).

Pesquisas numérico-experimentais de (K.PEDERSEN et alli, 2015), indicam que os padrões microestruturais de várias ligas de alumínio estruturais tem influência ascentuada sobre os respectivos comportamentos de ductilidade, e no mecanismo de encruamento e endurecimento dos materiais, enquanto que as características de mecanismos de fraturamento dúctil se mantém relativamente invariantes. Estas últimas se revelam sensíveis a condições de anisotropia de plastificação, não inteiramente eliminadas nos processos de tratamento termo-mecânico e de laminação, e induzem maior variação nos padrões geométricos dos modos de fraturamento.

As metodologias analíticas descritas acima oferecem representação do comportamento resistente a fratura de materiais dúcteis, propiciando estabelecer correlações entre resultados numéricos e resultados de Mecânica de Fratura Experimental. Estabelecem destarte um quadro de referência conceitual de procedimentos analíticos e numéricos considerados na presente dissertação.

3. PROPRIEDADES MATERIAIS E METODOLOGIAS ANALÍTICAS

3.1 LIGAS DE ALUMÍNIO ESTRUTURAIS AVALIADAS

Nesta seção são apresentadas concisamente as características de resistências mecânicas e de tenacidade das ligas de alumínio estruturais investigadas no programa SR-1447 (DRDC, 2007). Será dada ênfase na descrição e discussão do comportamento reológico dos materiais, assim como na apresentação dos resultados dos ensaios de caracterização de tenacidade ao fraturamento desses materiais.

No programa SR-1447 (DRDC, 2007), foram avaliadas ligas forjáveis do grupo 5XXX, não tratáveis termicamente, com endurecimento mecânico por conformação e por solubilização, tendo como elemento primário de liga o Magnésio.

Referências fundamentais de características metalúrgicas e mecânicas dos grupos de ligas estruturais de alumínio, de modo geral são apresentadas em ASM American Society for Metals (HATCH, 1983), e (DAVIS, 2001).

No ANEXO II são descritas concisamente propriedades gerais dos principais grupos de Ligas de Alumínio de aplicação estrutural, (INACIO DOMINGUES, 2011), (HATCH, JOHN et alii, 1983) e (MAZZOLANI, 2008). Assim como, no ANEXO II são discutidos aspectos microestruturais gerais.

Por concisão, no Anexo III são reportadas características químicas e microestruturais dos materiais ensaiados, obtidas no âmbito do Programa de Investigação SR-1447 (DRDC, 2007), consideradas nesta dissertação, para referência. Nas seções subsequentes, o foco se orienta aos aspectos de caracterização mecânica, reologia e de tenacidade ao fraturamento dos materiais investigados no programa SR-1447 (DRDC, 2007).

Conquanto os mesmos ofereçam base de dados experimentais para o presente trabalho de pesquisa, se anota que a responsabilidade da apresentação, tabulação e interpretação independente, seja analítica, numérica ou qualitativa dos mesmos dados, e transformações de unidades, na forma apresentada é de inteira responsabilidade deste autor.

Os materiais considerados correspondem nominalmente a metais das ligas:

- 5083 H321 fornecido como 5083 H321
- 5086 H116 fornecido como 5086 H321
- 5383 H116 fornecido como 5383/5083 H116

3.1.1. Características mecânicas dos materiais ensaiados (DRDC, 2007)

Um quadro sinótico de ensaios de caracterização de propriedades mecânicas dos materiais considerados nesta dissertação, se apresenta na Tabela 2, referida ao programa SR-1447 (DRDC, 2007). Os ensaios mecânicos atendem a requisitos da especificação (ASTM B209M, 2001), e (ASTM B 928, 2015).

Os lotes de materiais ensaiados, são constituídos de chapas planas com espessuras 12.7 mm e dimensões 609.6 mm x 609.6 mm, das quais foram extraídas amostras para ensaios de caracterização de propriedades químicas, metalúrgicas e ensaios de caracterização de propriedades mecânicas e de tenacidade ao fraturamento e fadiga.

São apresentados resultados de 18 testes de caracterização mecânica, efetuados para ligas: AL 5083-H321; AL5086-H116; AL-5383-H116. Para cada liga destes foram ensaiadas 3 amostras, segundo duas direções de laminação das chapas (Transversal T, Longitudinal L), sendo registradas as tensões de escoamento $\sigma_{y,0.2}$ (MPa) e Tensão última de ruptura σ_{Ult} (MPa), assim como deformação relativa e estrição seccional. Na Tabela 2 se apresentam ainda valores de médias amostrais, das tensões de escoamento, ou Tensão de Fluxo, $\sigma_{y,0.2}$ (MPa), e demais parâmetros mecânicos dos conjuntos amostrais para cada direção (T e L), inteiramente tabulados e avaliados neste trabalho.

Parâmetros do comportamento reológico de Tensão x Deformação, foram avaliados para as amostras ensaiadas segundo a direção transversal, caracterizando formulações constitutivas não lineares de Ramberg-Osgood, representando condições reológicas não lineares (SR-1447, 2007).

A consideração dos valores de parâmetros reológicos na direção transversal T, reflete características de moderada anisotropia das ligas de alumínio estruturais.

No presente trabalho, as análises numéricas efetuadas também manterão a mesma premissa consistentemente, de modo justificadamente conservador.

Na tabela 2 são apresentados os dados dos ensaios de caracterização mecânica efetuados no âmbito do programa (SR-1447, 2007).

Tabela 2 –Quadro sinótico de propriedades mecânicas ligas AL 5053; AL 5056; AL 5383 ensaiadas - Ref. SR-1447 (DRDC, 2007)

Amostra	Material	Orientação	$\sigma_{y,0.2}$ MPa	σ_u MPa	Elongação %	Redução area %
5083-L-1	5083-H321	L	262.50	363.19	12.10	21.10
5083-L-2	5083-H321	L	262.50	368.06	14.30	20.50
5083-L-3	5083-H321	L	265.28	366.67	16.80	22.40
Média amostral			263.43	365.97	14.40	21.33
5083-T-1	5083-H321	T	238.89	361.11	21.50	36.90
5083-T-2	5083-H321	T	238.89	358.33	19.00	34.60
5083-T-3	5083-H321	T	238.19	359.72	18.40	36.80
Média amostral			238.66	359.72	19.63	36.10
5086-L-1	5086-H116	L	187.50	318.06	14.80	17.40
5086-L-1	5086-H116	L	186.81	317.36	15.10	16.80
5086-L-2	5086-H116	L	187.50	319.44	15.30	16.10
Média amostral			187.27	318.29	15.07	16.77
5086-T-1	5086-H116	T	187.50	317.36	17.10	27.40
5086-T-2	5086-H116	T	186.81	320.83	21.10	36.60
5086-T-3	5086-H116	T	187.50	320.14	19.90	38.70
Média amostral			187.27	319.44	19.37	34.23
5383-L-1	5383-H116	L	272.92	377.78	14.10	16.20
5383-L-2	5383-H116	L	272.22	375.69	14.40	17.20
5383-L-3	5383-H116	L	270.83	375.00	12.90	15.60
Média amostral			271.99	376.16	13.80	16.33
5383-T-1	5383-H116	T	245.83	368.06	17.50	35.00
5383-T-2	5383-H116	T	245.83	371.53	16.40	24.80
5383-T-3	5383-H116	T	246.53	370.14	18.10	23.30
Média amostral			246.06	369.91	17.33	27.70
Ref.: (DRDC,2007)						

Sendo:

$\sigma_{y,0.2}$:Tensão de Escoamento a 0.2% de deformação (MPa)

σ_{UH} :Tensão Última de Ruptura (MPa)

As ligas de alumínio estruturais em consideração, em função de suas características microestruturais, apresentam comportamento reológico que admite representação através de modelos constitutivos não lineares de Ramberg-Osgood, (RAMBERG-OSGOOD, 1943), (HERTZBERG, 1976).

A tabela 3 abaixo apresenta o quadro sinótico dos parâmetros característicos de formulação reológica de Ramberg-Osgood dos Materiais testados (Sielski,2007).

Tais parâmetros são relativos a condições de deformação verdadeira (*True Strain*), com amostras ensaiadas na direção transversal a laminação das chapas. O coeficiente de encruamento n (*Strain Hardening exponent*) assim como o coeficiente de ajuste de escala de resistência k (*Strength Coefficient*), com formulação reológica exponencial do modelo de Ramberg-Osgood (HERTZBERG,1976).

No âmbito da presente dissertação, foi possível estabelecer comparação entre os parâmetros de Coeficiente de Encruamento n obtido experimentalmente, tal como indicado na tabela 3, com a formulação analítica específica recomendada por (RAMBERG-OSGOOD, 1943).

Tabela 3 – Quadro Sinótico de parâmetros reológicos da formulação de Ramberg-Osgood ligas AL 5053; AL 5056; AL 5383 - SR-1447 (DRDC, 2007)

Liga ensaiada	Deformação escoamento ϵ_{ys} cm/cm	Módulo Young, E kN/cm ²	Coeficiente de Encruamento, n	Coeficiente de Resistência, K kN/cm ²
AL-5083 H321	5.05E-03	7847	6.45	55
AL-5086 H116	4.22E-03	8472	4.96	53.75
AL-5383 H116	5.05E-03	7986	6.33	56.8
Propriedades Mecânicas – Parâmetros da Formulação de Ramberg-Osgood Obs: Resultados p. amostras ensaiadas na direção transversal Ref. SR-1447 (DRDC, 2007)				

A curva Tensão Deformação descrita pela formulação de Ramberg-Osgood, descrita pela equação (1) abaixo, (RAMBERG-OSGOOD, 1943):

$$\varepsilon = \sigma/E + (\sigma/k)^{1/n} \quad (1)$$

Sendo:

ε = Deformação verdadeira (*true strain*) = $\text{Ln}(1 + e)$

e = Deformação de Engenharia (*engineering strain*)

e_u = Deformação de Engenharia na ruptura (*engineering strain at rupture*)

σ = Tensão verdadeira de Cauchy (*true stress*) = $s(1+e)$ (kN/cm²)

s = Tensão de Engenharia

E = Módulo de Young (Módulo de Elasticidade)

k = Coeficiente de Resistência Mecânica (kN/cm²)

$\sigma_{y,0.2}$ MPa a Tensão de Escoamento a 0.2% de deformação

σ_{Ut} MPa a Tensão Última de Ruptura

n = Coeficiente de Encruamento

A equação (2) a seguir permite determinar analiticamente o coeficiente n :

$$n = \text{Ln}(E_u/0.2) / \text{Ln}(F_u/F_y) \quad (2)$$

Como resultados das avaliações de características mecânicas dos materiais obtidas no âmbito do programa SR-1447 (DRDC, 2007), uma comparação entre curvas de Tensão vs Deformação de Engenharia (*Engineering Strain*) e Deformação Verdadeira (*True Strain*) para as ligas AL 5053 H321; AL 5056 H116; AL 5383 H116 se apresenta nos Gráficos 1 a 3, para a direção transversal.

Nesta dissertação, as propriedades de características mecânicas reológicas traduzidas pela formulação de Ramberg-Osgood mantém maior relevância e aderência aos resultados obtidos ao se conduzirem os procedimentos de análises numéricas pelo MEF. Tais aspectos serão melhor tratados e discutidos na seção 3.2.

Em correspondência, nos Gráficos 4 a 6 abaixo, são reavaliados os parâmetros reológicos obtidos no programa experimental (SR-1447, 2007), recalculados os parâmetros dos Coeficientes de Encruamento n . Aplicando-se diretamente a definição analítica acima baseada em (RAMBERG-OSGOOD, 1943), considerando dados para a direção transversal T.

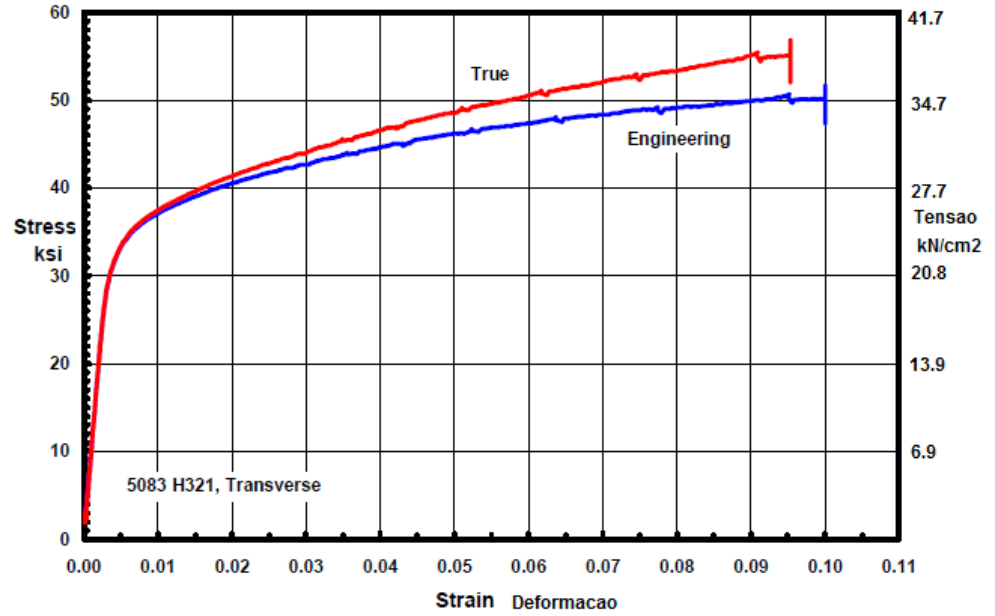


Gráfico 1: Curvas Tensão vs Deformação AL 5083-H321 (n= 6.46)
(DRDC, 2007)

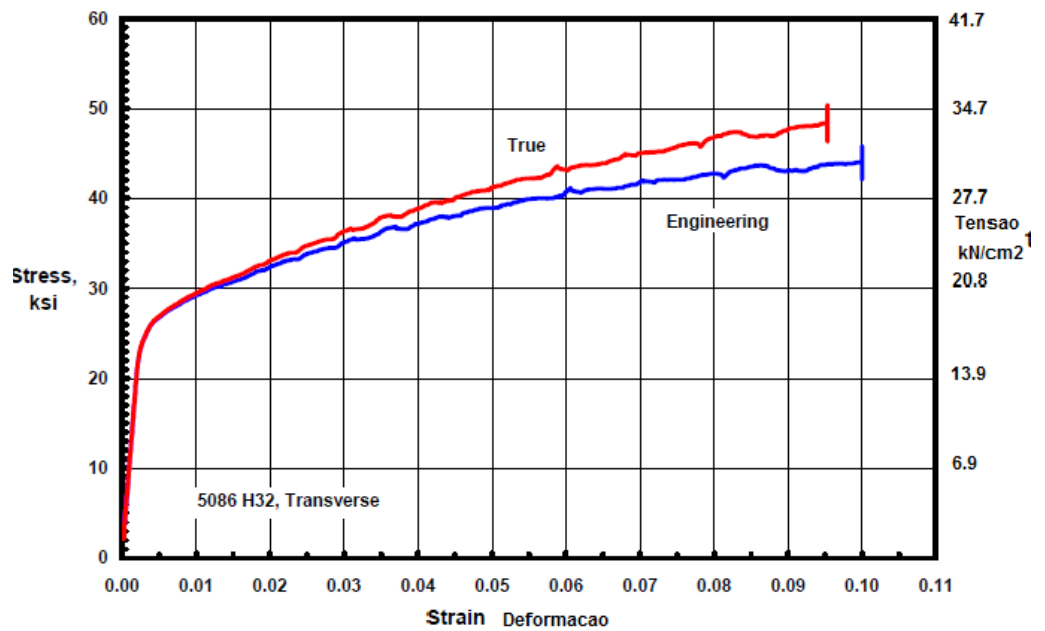


Gráfico 2: Curvas Tensão vs Deformação AL 5086-H116 (n=4.96)
(DRDC, 2007)

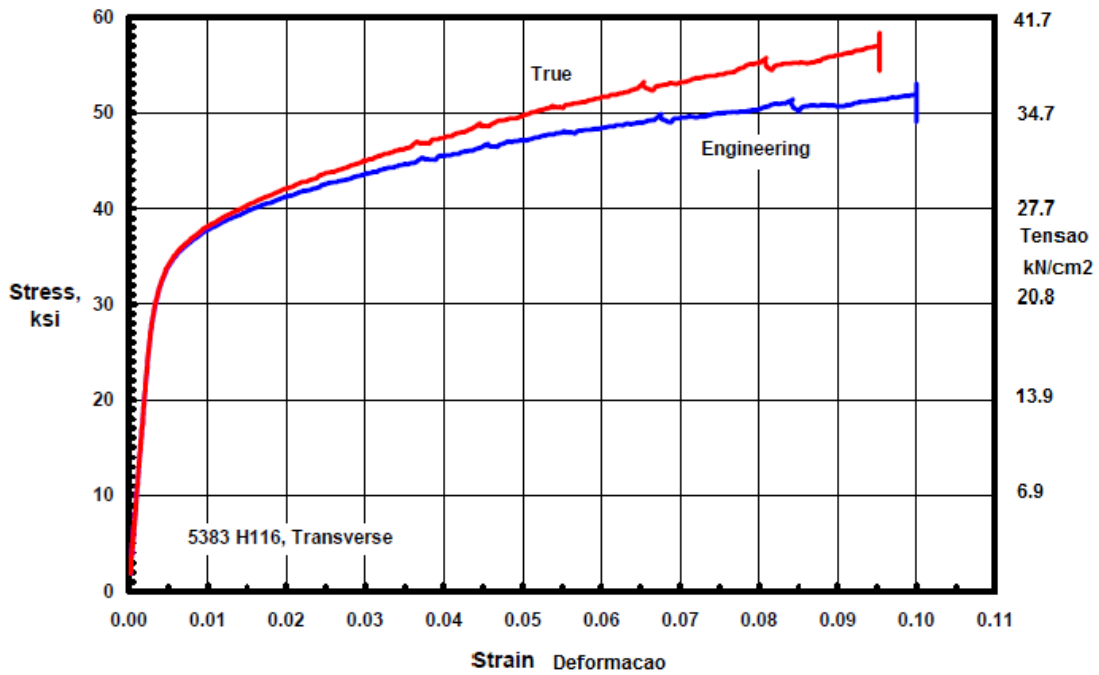


Gráfico 3: Curvas Tensão vs Deformação AL 5383-H116 (n=6.34)
(DRDC, 2007)

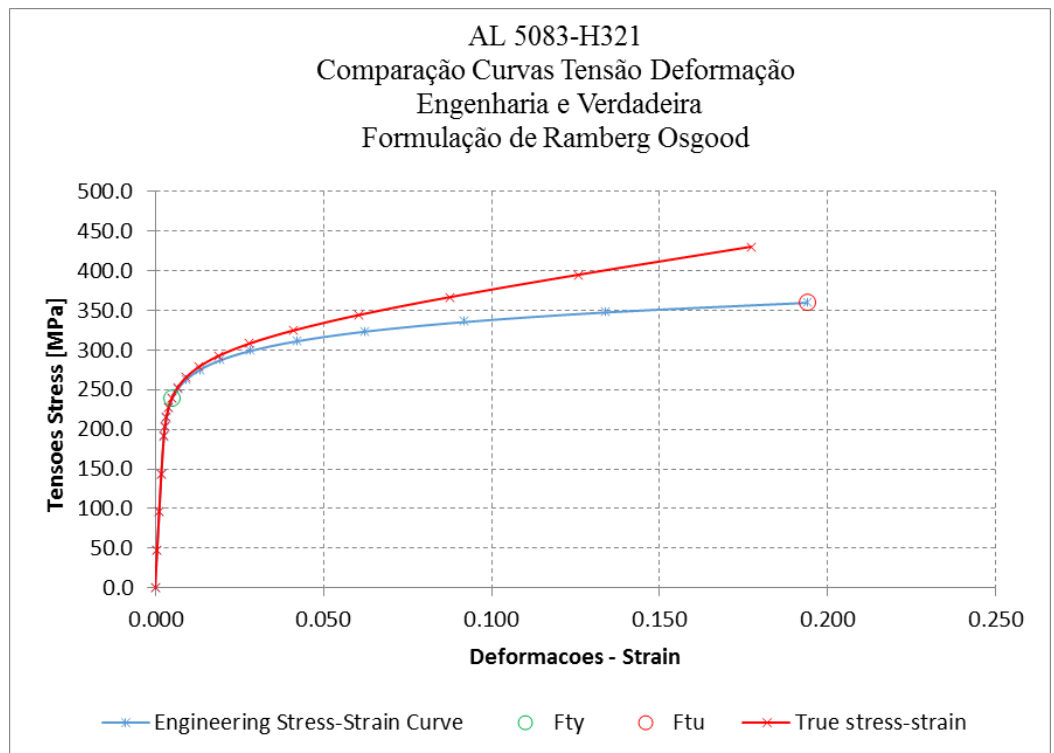


Gráfico 4: Curvas Tensão vs Deformação AL 5083-H321 (n=11.07) $e_u = 0.194$

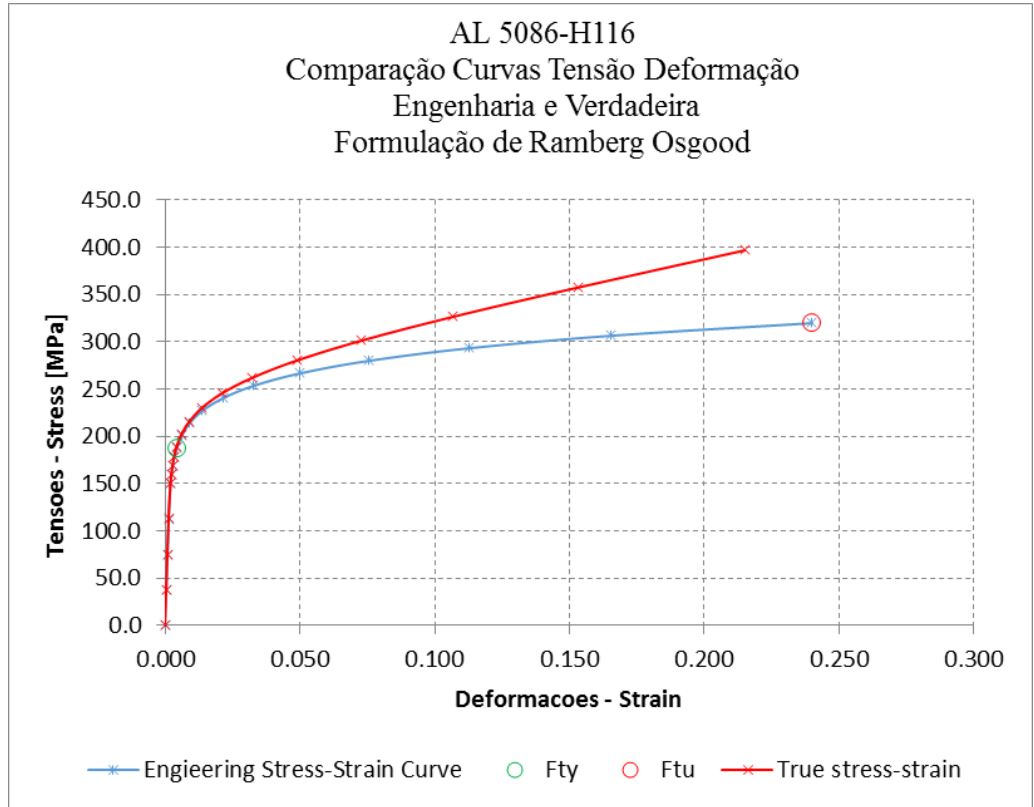


Gráfico 5: Curvas Tensão vs Deformação AL 5086-H116 (n=8.91) e_u

=0.24

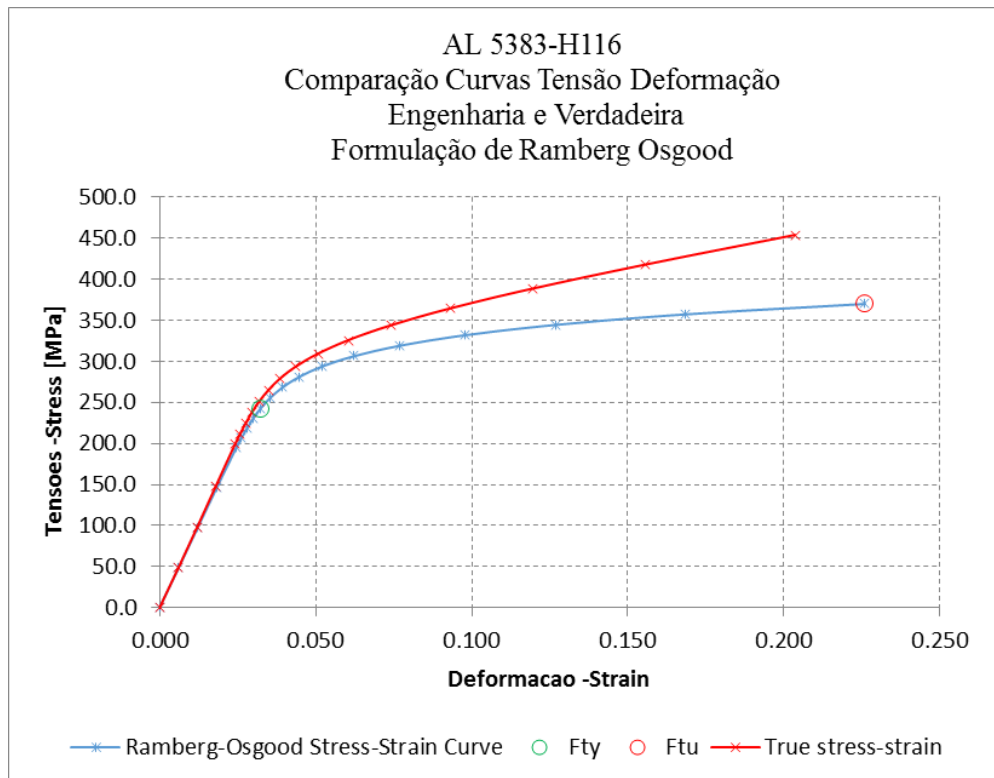


Gráfico 6: Curvas Tensão vs Deformação AL 5383-H116 (n=10.70) e_u

0.23

3.1.2. Características de tenacidade dos materiais ensaiados (DRDC, 2007)

Nesta seção se apresentam características de tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais consideradas nesta dissertação.

Dados específicos do sortimento de materiais aplicados aos ensaios de caracterização de tenacidade são referidos a (DRDC, 2007), (SSC, 2007) e (SIELSKI, 2007).

Os testes de caracterização de tenacidade seguiram Metodologia da especificação (ASTM E 1820-01, 2001) “*Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*”, atendendo requisitos de qualificação.

Os ensaios de resistência à fratura não linear (NLFT) foram efetuados com amostras tipo C(T), para provete compacto solicitado sob tração, obtidos de três distintas ligas de alumínio designadas AA 5083-H321, AA 5086-H116 e AA 5383-H116. Um provete de tipo C(T) “*Compact Tension Specimen*” com largura de 50 mm (2T) e espessura de 12.75 mm (0.5 T) em todos os testes.

Uma amostra de tipo CT com largura de 101 mm (4T) e espessura de 12.7 mm (0.5T), avalia a influência da escala geométrica nos resultados de tenacidade.

Para os materiais avaliados, dois testes adicionais foram realizados (replicas), usando amostras de mesma espessura, sem chanfros, ou ranhuras laterais.

Em um terceiro conjunto de amostras foram usinados chanfros (Side Groove SG), e avaliar efeitos de Construção Mecânica (*Mechanical Constraint effect*).

As amostras foram usinadas nos sentidos transversal T e Longitudinal L de orientação relativamente a direção de laminação, e testadas em laboratório, em atmosfera seca, sem salinidade, sob temperatura ambiente $\theta = 23.8$ C.

A descrição do procedimento de ensaio se apresenta em (DRDC,2007) e discutida em (SIELSKI,2007), conforme (ASTM E1820, 2001).

A preparação das amostras tipo C(T) atende requisitos construtivos e geometria da especificação de ensaios de caracterização de tenacidade não linear da (ASTM1820, 2001).

A Figura 2 delinea as características dimensionais construtivas dos provetes considerados (ASTM E1820, 2001). A tabela 4 apresenta quadro sinótico de resultados de ensaios de caracterização de tenacidade à fratura conforme a mesma especificação, (DRDC,2007).

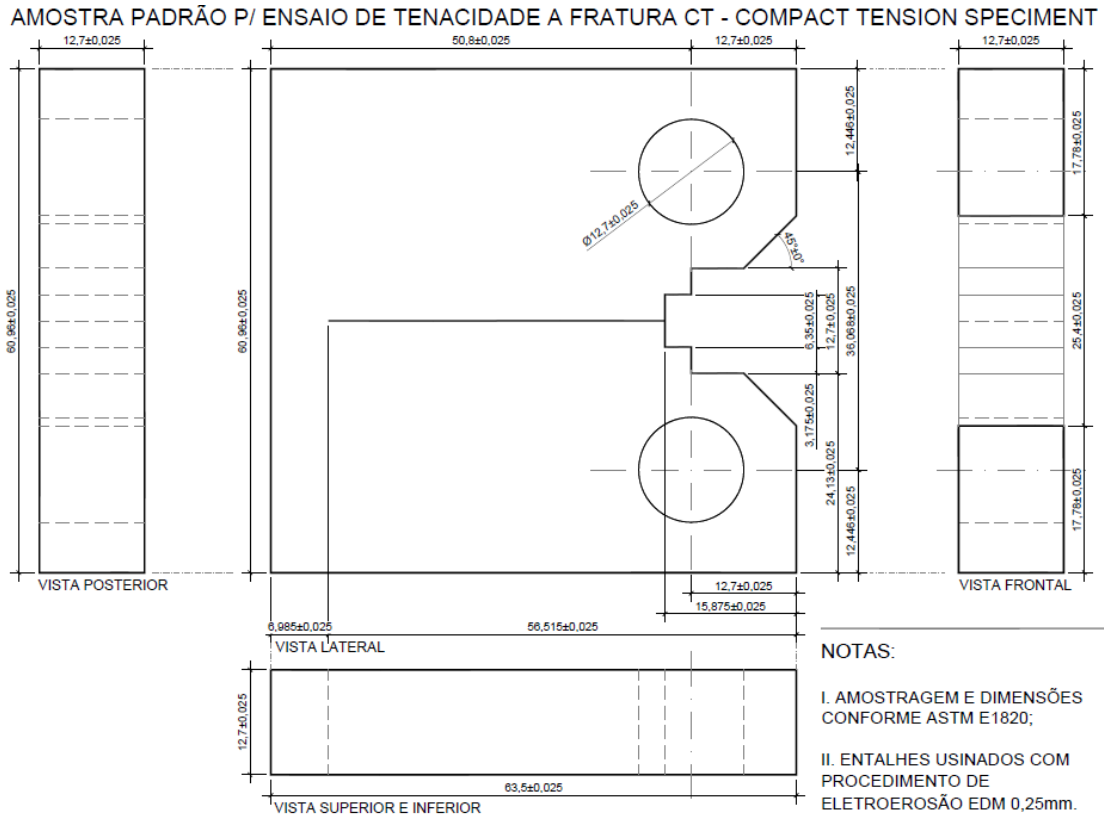


Figura 2: Características corpo de prova padrão C(T) (ASTM 1820, 2001)

Resultados chave de ensaios de tenacidade à fratura, indicados na tabela 4, são representativos de valores de parâmetros de tenacidade J no início da fratura (J_{Ic}), consistentes com procedimentos (ASTM E 1820, 2001).

São apresentados, complementarmente, valores equivalentes dos parâmetros de tenacidade Fator de Intensidade de Tensões K representativos do início de fraturamento K_{IIc} .

Uma inspeção direta dos resultados da tabela 4, indica que parâmetros de tenacidade no início do crescimento de fratura, para os grupos de ligas testadas, para amostras sem e com entalhes, apresentam menor sensibilidade a condição de constrrição. Os corpos de prova de maior escala geométrica apresentam maiores valores de tenacidade. Entretanto, estes seriam pouco sensíveis ao efeito de entalhe, para níveis iniciais de carregamentos.

Todos os conjuntos amostrais indicam tendência uniforme de variação dos valores de tenacidade.

Materiais das ligas AL 5086- H116 atingem maiores valores de tenacidade J no início da fratura (J_{Ic}), seguidos de AL5083-H321 e amostras das ligas AL5383-H116 mantendo menores valores de tenacidade, (DRDC, 2007).

Tais resultados são resumidos na Tabela 4 a partir de dados (DRDC, 2007). Observa-se a manifestação de dois tipos de formação de frente de fratura:

a) em regiões de elevada constrição local (frente reta tipo ii) com entalhes;

b) em regiões com perda de constrição e maior nível de deformações plásticas (frente com tunelamento tipo i), sem execução de entalhes.

Tabela 4 – Quadro Sinótico de Ensaio de Tenacidade Ligas AL5053-H321; AL5056-H116; AL5383-H116 SR 1447 (DRDC, 2007)

Sample	Material	Entalhe	Tamanho W mm	J _{ic} kJ/m ²	K _{jic} MPa(m) ^{0.5}	Notas
5083-FT1	5083-H321	Não	50	16.9	36.7	i
5083-FT2	5083-H321	Não	50	16.1	35.8	i
5083-FT3	5083-H321	Sim	50	19.5	39.4	ii
5083-FT5	5083-H321	Não	100	25.7	45.3	i
Média amostral				19.6	39.3	
5086-FT1	5086-H116	Não	50	27.2	46.5	i
5086-FT2	5086-H116	Não	50	25.8	45.4	i
5086-FT3	5086-H116	Sim	50	27.2	46.5	ii
5086-FT5	5086-H116	Não	100	35.2	53.0	i
Média amostral				28.9	47.8	
5383-FT1	5383-H116	Não	50	15.2	34.7	i
5383-FT2	5383-H116	Não	50	15.1	34.6	i
5383-FT3	5383-H116	Sim	50	15.8	35.5	ii
5383-FT5	5383-H116	Não	100	17.5	37.4	i
Média amostral				15.9	35.5	
Ref.: (DRDC,2007)						
Notas						
i	Tunelamento sigificativo fratura - Crack tunneling					
ii	Frente de fratura reta - straight crack front					

Os efeitos de entalhe se distinguem mais significativamente comparando-se resultados das Curvas R de resistência ao fraturamento com o parâmetro de tenacidade J (kJ/m²) e crescimento da fratura Δa (cm), (DRDC, 2007).

As figuras 2 a 5 a seguir apresentam Curvas R obtidas para as ligas de materiais e amostras testadas, com tenacidade expressa em J (in-lbf/in²) e J (kJ/m²) e, Δa o crescimento de fratura no plano da trinca expresso em unidades (in) e (cm).

As amostras entalhadas ensaiadas exibem curvas de resistência ao fraturamento R que atingem níveis de tenacidade J significativamente menores, para um mesmo crescimento da fratura Δa , quando comparado ao das amostras não entalhadas. Observa-se que para as réplicas das amostras não entalhadas as curvas R são praticamente idênticas. Entre as ligas de alumínio avaliadas, o grupo AL5083 H321 atinge maior nível de resistência ao fraturamento. Os materiais AL 5083 H116 atingem valores intermediários, e AL5383 H116 níveis menores de tenacidade, independentemente de apresentarem entalhes. Tendências diretamente refletidas na figura 2 (DRDC, 2007).

Interpreta-se que a execução de entalhes impõem construtivamente condições mecânicas mais severas, pelo efeito de concentração geométrica de tensões. Estes evidenciam o efeito de constrição mecânica sobre o campo de tensões e deformações (*Constraint Level*) na vizinhança da fratura. Maiores referências dos efeitos de constrição mecânica sobre os campos locais de tensões e deformações influenciados pela fratura (TROVATO, E.; RUGGIERI, C. 1999).

As amostras sem entalhes, com espessura de ensaio 12.5 mm (0.50T), apresentaram maior resistência ao fraturamento, compatíveis com espessuras mais finas, e condições mecânicas correspondentes ao estado plano de tensões (EPT). Evidenciaram ainda tendência a formação de tunelamento da frente da fratura (Frente tipo I), denotando maior perda de constrição mecânica, com desenvolvimento de plastificação na frente da fratura.

As amostras com entalhes e espessuras (0.5T), sob maior constrição mecânica, apresentaram comparativamente menores capacidades de resistência ao fraturamento, consistente com amostras de maiores espessuras, cujas condições mecânicas correspondentes ao estado plano de deformações (EPD). Evidenciaram ainda tendência a formação de frente de fratura reta (Frente tipo II), sob maior nível de constrição mecânica, e com plastificação restrita.

Os resultados obtidos denotam uma capacidade de resistência com crescimento estável da fratura, e conseqüentemente de tenacidade, a níveis significativamente superiores ao máximo esperado pelas especificações (ASTM E1820,2001).

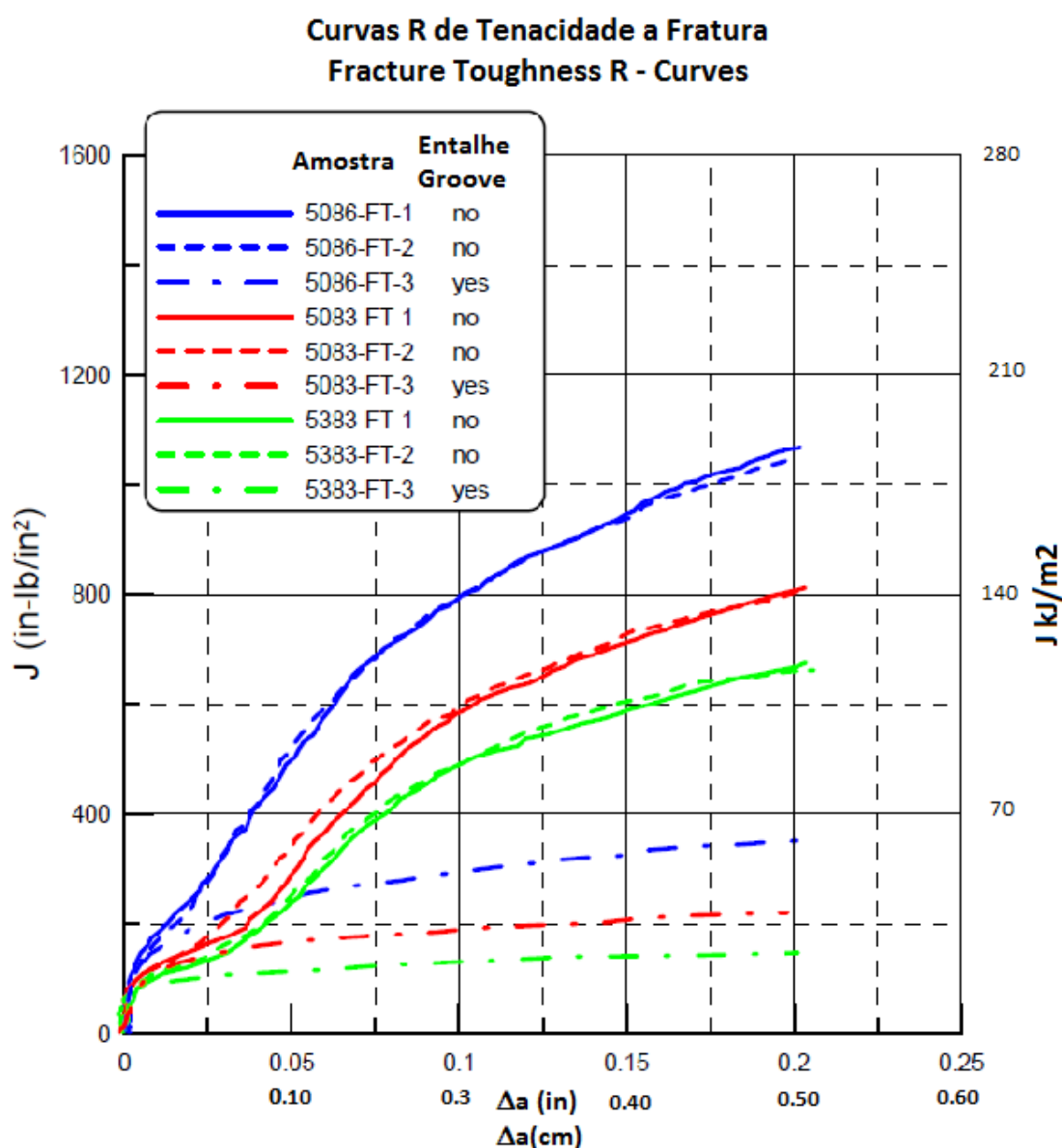


Figura 3 Ensaio de Tenacidade Não Linear ASTM E 1820 – Curvas de Resistência à Fratura R (J vs Δa) Ligas AL 5053 H321; AL 5086 H116; AL 5383 H116 – Efeito de entalhes (DRDC, 2007)

O efeito de escala geométrica sobre as Curvas R de resistência ao crescimento da fratura revelam níveis de tenacidade J_I (kJ/m^2) ligeiramente maiores para amostras de maiores escalas, para um mesmo nível de crescimento da fratura Δa (cm), quando comparado ao das amostras de menores dimensões. Tal tendência pode ser diretamente interpretada na figura 4 abaixo (DRDC, 2007).

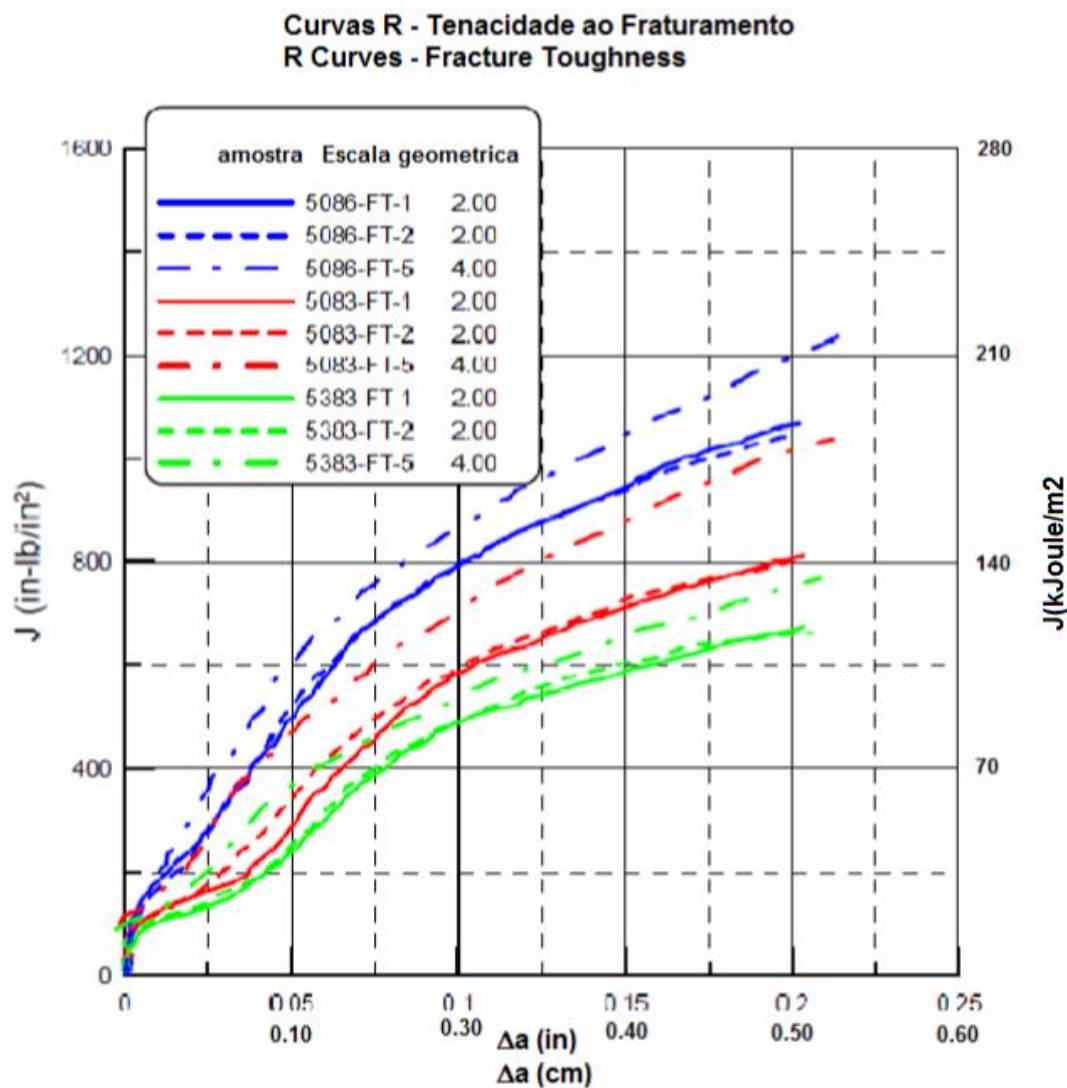


Figura 4 Ensaio de Tenacidade Não Linear ASTM E 1820 – Curvas de Resistência ao Fraturamento R ($J \times \Delta a$) - Ligas AL5053-H321; AL5086-H116; AL5383-H116 – Efeito de escala geométrica (DRDC, 2007)

3.1.3. Condições laboratoriais de instrumentação dos ensaios (DRDC, 2007)

As condições laboratoriais de instrumentação e de equipamentos adotadas nos ensaios de caracterização de propriedades mecânicas e de tenacidade e fratura, e sobretudo procedimentos experimentais adotados no programa SR 1447 (DRDC, 2007) apresentados no Anexo III, para melhor documentação.

No presente trabalho, os procedimentos de análises numéricas desenvolvidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), tanto quanto a topologia dos modelos numéricos elaborados, buscam representar as condições mecânicas e manter correspondência com

condições laboratoriais pertinentes aos ensaios, características dimensionais e materiais amostrais, descrito detalhadamente na próxima subseção.

3.2 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISES NUMÉRICAS MEF

O Sistema de análises de elementos finitos utilizado no desenvolvimento desta dissertação, WARP3D V 17.8.2, foi especialmente desenvolvido para investigações de Mecânica de Fratura Computacional e Mecânica do Dano (KOPPENHOEFER et alli, 1994).

Detalhes sobre as formulações analíticas e de elementos finitos, assim como parâmetros de topologias estrutural e mecânica associadas aos modelos desenvolvidos com o sistema WARP3D são referidas a (KOPPENHOEFER et alli, 1994) e (WARP3D V17.8.2 MANUAL, 2017). Algoritmos desenvolvidos no Sistema WARP3D oferecem soluções numéricas de elevada eficiência e estabilidade computacionais, e principalmente de robustez de condições de convergência. No ANEXO IV se apresentade um breve descritivo da operação do sistema WARP3D.

As análises e modelos desenvolvidos mantém foco em representar as condições dos ensaios de Mecânica de Fratura referidos acima em 3.1, investigados do programa SR-1447 (DRDC, 2007).

Um conjunto de casos distintos de análises numéricas foi desenvolvido, o qual considera propriedades mecânicas características dos grupos de ligas acima: AL 5053 H321 AL 5086 H116 e AL 5383 H116, com suficiente abrangência.

As matrizes de casos de análises numéricas de elementos finitos refletem condições topológicas representativas dos ensaios efetuados, e definidas segundo três modelos discretos de elementos finitos.

O tratamento do conjunto dos ensaios de caracterização através das matrizes de análises numéricas por distintos modelos, permite aprofundar a interpretação quantitativa e qualitativa dos resultados dos ensaios empíricos, corroborando na consolidação dos parâmetros característicos de tenacidade ao fraturamento. Igualmente, a adoção de tal procedimento permite de modo abrangente avaliar comparativa e quantitativamente os resultados e soluções de campos de tensões e deformações locais, para distintas condições de topologia, materiais etc.

Concisamente os seguintes tipos de modelos foram desenvolvidos:

- I - Modelo discreto (MBL- *Modified Boundary Layer*)

Definido em escala geométrica finita, e representativo de condições de placa de extensão infinita, com espessura nominal $1T = 25.4$ mm. As formulações reológicas adotam parâmetros de Ramberg-Osgood, sob pequenas deformações plásticas (*Small Scale Yielding*). Simula condições locais de trincas agudas (*Sharp crack*).

- II - Modelo discreto tipo C(T) – *Compact Tension Test Specimen*

Definido em escala geométrica finita, e representativo de dimensões construtivas dos corpos de prova padronizados de tipo C(T) conforme dimensões previstas em (ASTM E1820,2001). Considera parâmetros da formulação reológica de Ramberg-Osgood, e comportamento não linear representativo de deformações plásticas finitas, definidas segundo o critério de plastificação de V. Mises.

- III - Modelo discreto tipo C(T) – Formulação micromecânica de Gurson

Definido igualmente em escala geométrica finita, e representativo de dimensões construtivas dos corpos de prova padronizados de tipo C(T) conforme dimensões previstas em (ASTM E1820,2001). Considera parâmetros da formulação reológica de Ramberg-Osgood, e comportamento não linear representativo de deformações plásticas finitas, definidas segundo o critério de plastificação de v. Mises. Aplica formulação constitutiva micromecânica de plasticidade dilatante de Gurson-Tvergaard.

A cada qual desses três tipos de modelos estruturais correspondem topologias de definição de geométricas e mecânicas e reológicas que representam:

- Geometria e detalhes construtivos do corpo de prova;
- Representação geométrica da região de ponta da trinca/ fratura;
- Condições de contorno de solicitações e carregamento;
- Condições de vínculos aplicados ao corpo de prova;
- Representação de condições micromecânicas e macromecânicas;
- Representação dos mecanismos constitutivos e condições reológicas;
- Comportamentos mecânicos de danificação e processo de fraturamento.

Em sequência são descritos detalhes de formulação dos respectivos tipos de modelos, como ênfase nos parâmetros de topologia adotados.

O modelo discreto MBL – *Modified Boundary Layer* permite investigar condições de fraturas em corpos extensos (simulando dimensões infinitas), sob pequenas deformações e plastificação limitada na ponta da fratura (SSY – *Small Scale Yielding*). Corresponde a condições representativas de elevada constrição (*High Constraint*) e estado plano de deformações (EPD). Permite simular condições geométricas iniciais de fraturas com extremidades agudas (*Sharp crack tip*), ou embotadas (*Blunt crack*), ver figura 5 abaixo.

Efeitos de variação de condições de constrição mecânica sobre campos de tensões e deformações locais, com o crescimento de fratura dúctil, sob condição de plastificação limitada SSY (*Small Scale Yielding*), são descritos e tratados por (TROVATO e Ruggieri, 1999) e (TROVATO e Ruggieri, 2001), com modelos discretos de tipo MBL, e referindo ainda (J. R. RICE, 1973).

Pelas características geométricas e topológicas com definição de malha de elementos finitos regular, com foco na representação da região de fratura local, os modelos de tipo MBL – *Modified Boundary Layer*, são amplamente aplicados em análises de Mecânica de Fratura Computacional.

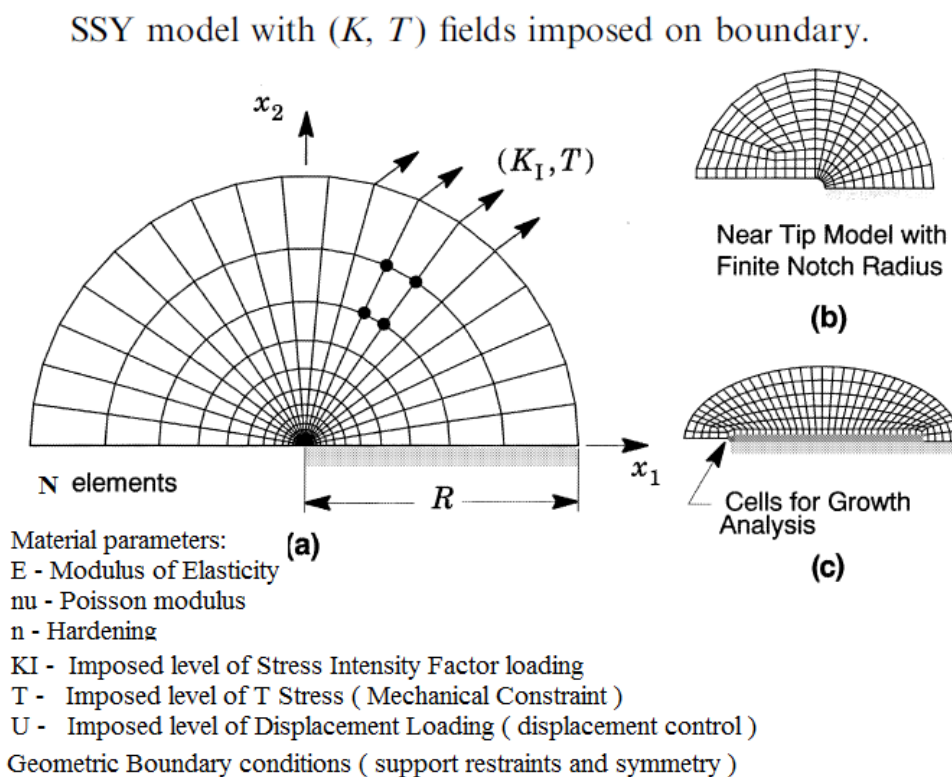


Figura 5 Topologia Modelo SSY-MBL – (TROVATO, Ruggieri, 2001)

a) Geometria, materiais e condições de contorno mecânicas e geométricas;

b) Região próxima a ponta da trinca; c) Condições de células micromecânicas

O modelo discreto de tipo C(T), representa corpos com definição de escala geométrica finita, permite investigar diretamente condições de fraturas correspondentes as de corpos de prova de tipo (*Compact Test Specimen*) para ensaios padronizados (ASTM E1820, 2001). Tem por fito a correlação dos ensaios experimentais com os resultados de análises numéricas.

Permite representar detalhes dos sólidos fraturados, como: execução de entalhes; efeitos de escala geométrica; condições macrofractográficas; e aspectos de caracterização mecânica e microestrutural dos materiais.

O modelo C(T) faculta avaliar efeitos de grandes deformações e plastificação na ponta da trinca (*Large Strain Plasticity*), e correspondente evolução do processo de deformação e danos. Igualmente, corresponde a condições de elevada constrição (*High Constraint*) e estado plano de deformações (EPD), para corpo de prova de dimensões finitas, simulando fraturas com embotamento e plastificação na ponta da trinca (*Crack Tip Blunt*).

Na figura 6 tem-se os principais parâmetros descritivos da topologia estrutural do modelo C(T), as quais foram aplicadas a dois subconjuntos de análises: i) Modelos tipo II; ii) Modelo C(T) tipo III.

FEM mesh topology - C(T) type model Topologia de malha p/ Modelo de Elementos Finitos tipo C(T)

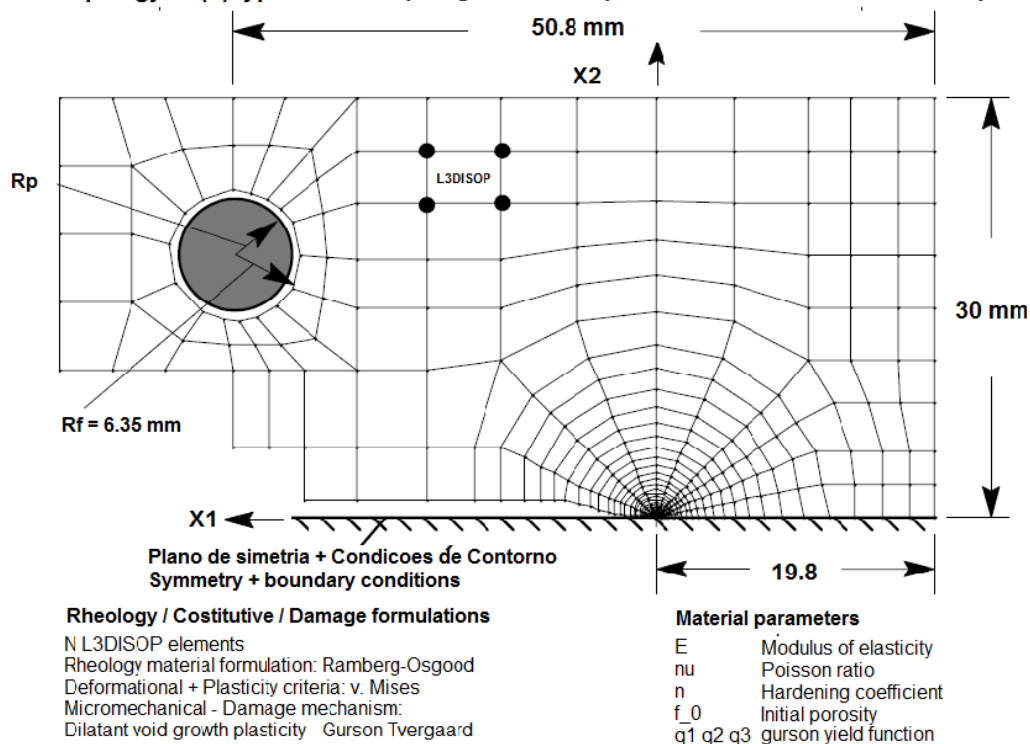
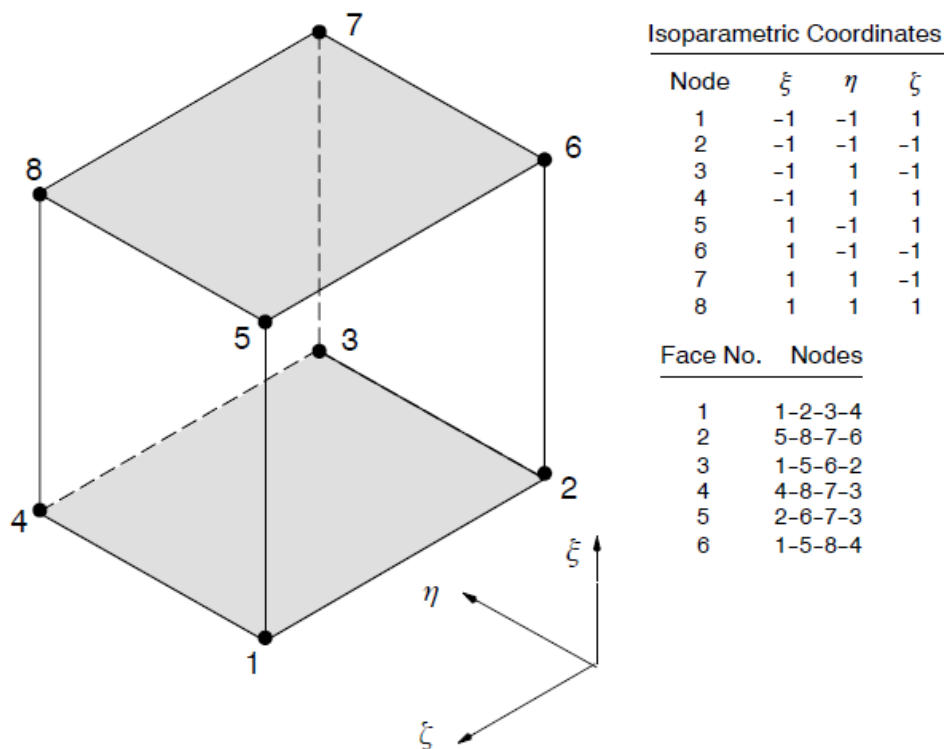


Figura 6 Topologia Modelo C(T) – (WARP3D V17.8.2 MANUAL, 2017)

Para a formulação de elementos finitos, com base em (KOPPENHOEFER et alli, 1994) e (WARP3D V17.8.2 MANUAL, 2017), foram aplicados elementos de tipo hexaédricos de 8 nos, de formulação de interpolação isoparamétrica tri-linear, definida sobre campos de deslocamentos. Tais elementos são de tipo L3DISOP que, com a formulação algorítmicas de compatibilizações de deformações, exibem mínimos problemas de travamento (*Locking*), e condicionamento numérico sob deformações plásticas finitas (grandes deformações). Asseguram obtenção de respostas robustas, especialmente para regiões locais em sob discontinuidades, grades deformações, em regiões próximas a fraturas. As formulações constitutivas possibilitam representar várias classes de problemas de não-linearidades físicas (não linearidade materiais) e geométricas (grandes deslocamentos, rotações e deformações finitas), seja de modo isolado ou combinadamente.

Para as condições de análises dos modelos de tipo SSY-MBL com trinca aguda, os elementos L3DISOP facultam simular elementos colapsados em cunha na ponta da fratura, sob deformações plásticas moderadas. A figura 7 representa as condições topológicas dos elementos L3DISOP, com identificação local de nos e superfícies, e sistemas de coordenadas locais.



WARP3D - L3DISOP type tri-trimimensional FEM - Topology elements and local geometry parameters

Figura 7 Topologia Elementos L3DISOP ((KOPPENHOEFER et al, 1994)

A formulação relativa ao comportamento reológico material, que descreve os critérios de fluxo de deformação e estado de plásticação, e mecanismos de danificação, aplicadas aos modelos numéricos, tem por base (KOPPENHOEFER et alii, 1994) e (WARP3D V17.8.2 MANUAL, 2017), sendo concisamente tratadas aqui.

Na seção 3.1 acima, os resultados de ensaios de caracterização mecânicas foram traduzidos e comparados com a formulação reológica de Ramberg-Osgood, que exprime as tensões como função não linear elástica da deformação, aplicável a sólidos inviscidos, cujas transformações materiais ocorrem sob volumes constantes. Tal embasa o conceito de Critério de Plastificação Incremental, aplicado aos modelos de Tipo I SSY-MBL.

Os parâmetros aplicados ao modelo estrutural são descritos na figura 8 abaixo:

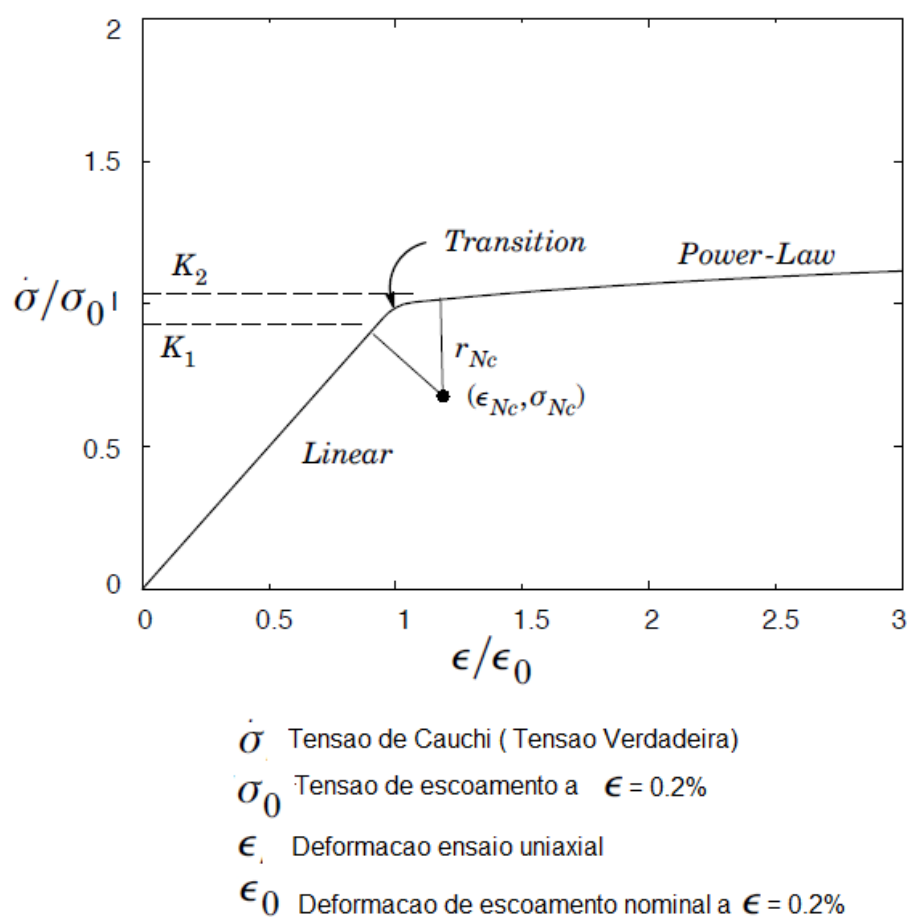
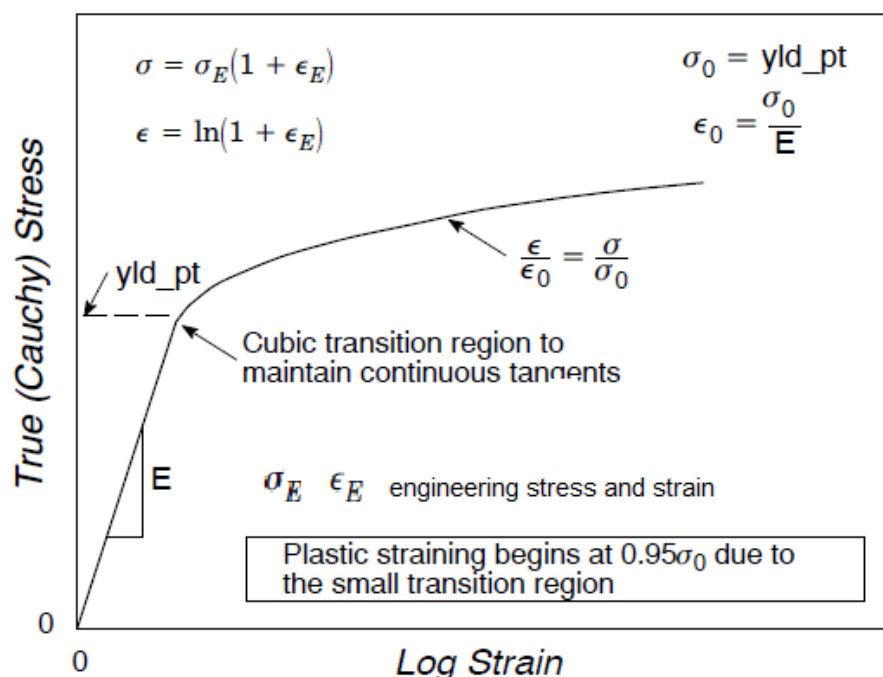


Figura 8 Formulação de Deformação Não linear Elástica ((KOPPENHOEFER et al, 1994)

Do ponto de vista numérico tal formulação se mostra eficaz quanto a critérios de convergência e eficiência algorítmica para obtenção de soluções.

Uma segunda formulação de comportamento reológico foi adotada para os modelos de Tipo II C(T) *Finite Scale Tension Test*, estende o conceito de Material Não-linear Elástico e Inviscido, e efeitos de encruamento isotrópico constante e linear.

Parâmetros da Formulação Reológica Não-linear Elástica Isotrópica de v. Mises se apresentam na figura 9. Este faculta representar parâmetros característicos consistentes com os resultados de ensaios considerados na Seção 3.1 acima.



Power-law form of the inviscid uniaxial (tensile) stress-strain curve for the "mises" plasticity material model. For finite-strain analysis, input the Cauchy stress and log strain description.

Figura 9 Formulação de Deformação Não linear Elástica de V. Mises ((KOPPENHOEFER et al, 1994)

Numericamente, tal formulação se mostra eficiente quanto a critérios de convergência e estabilidade algorítmicas para obtenção de soluções robustas, sob deformações plásticas finitas, em regiões próximas a zona de processos de fraturamento.

Limites de aplicabilidade se evidenciam sob grandes deformações e distorções plásticas, nas quais prevaescem condições fortemente anisotrópicas.

Nas análises conduzidas com os Modelos de Tipos I a III foram consideradas condições reológicas correspondentes a materiais isotrópicos, e encruamento constante. Para as ligas de alumínio aqui tratadas, tal constitui uma aproximação, dada a moderada anisotropia evidenciada nos ensaios uniaxiais.

Uma terceira formulação de comportamento reológico foi considerada nos modelos de Tipo III C(T) – Gurson-Tvergaard. Estende o conceito de Material da Formulação Reológica Não-linear Elástica Isotrópica de v. Mises. Considera efeitos micromecânicos associados a distribuição de vazios característicos da microestrutura das ligas, e os processos de danificação sob influência da fratura.

Faculta portanto desenvolver numericamente a caracterização micromecânica de parâmetros de tenacidade consistentes com os ensaios de Ligas de Alumínio Estruturais abordadas na Seção 3.1. Uma sucinta descrição fenomenológica dos mecanismos de danos microestruturais, na extensão da zona de processos se apresenta em (TROVATO, RUGGIERI, 2001), representada na figura 10.

Nesta dissertação, se considera que a microestrutura de defeitos presentes na matriz metálica dos materiais analisados, seja correlacionada a densidade relativa de vazios f , ou ainda a inclusões não metálicas, microfraturas, ou precipitados de fases intergranulares.

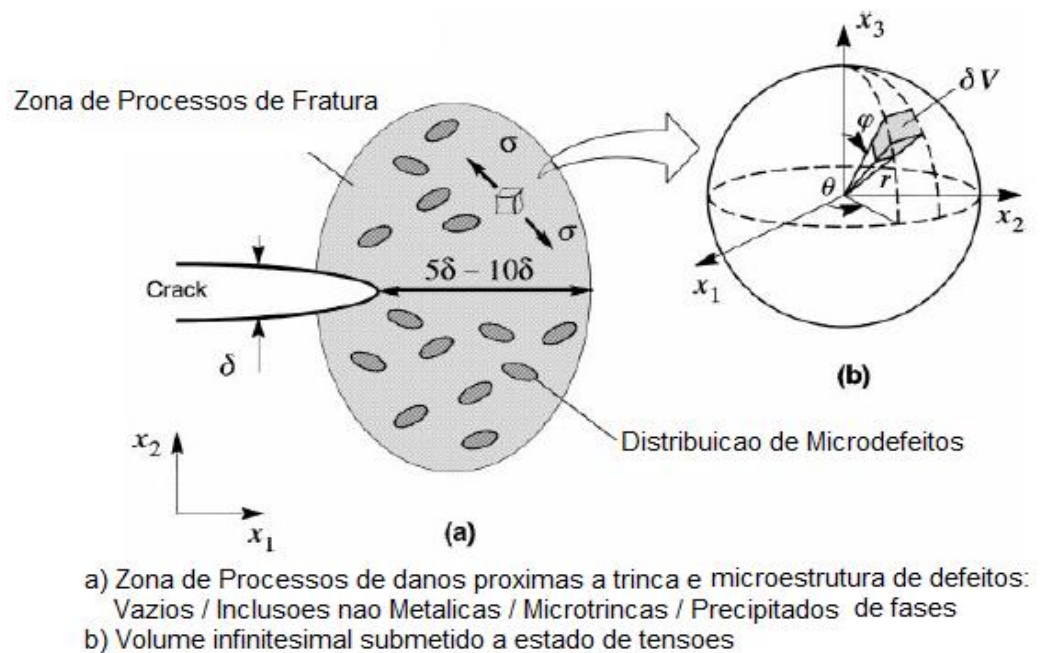
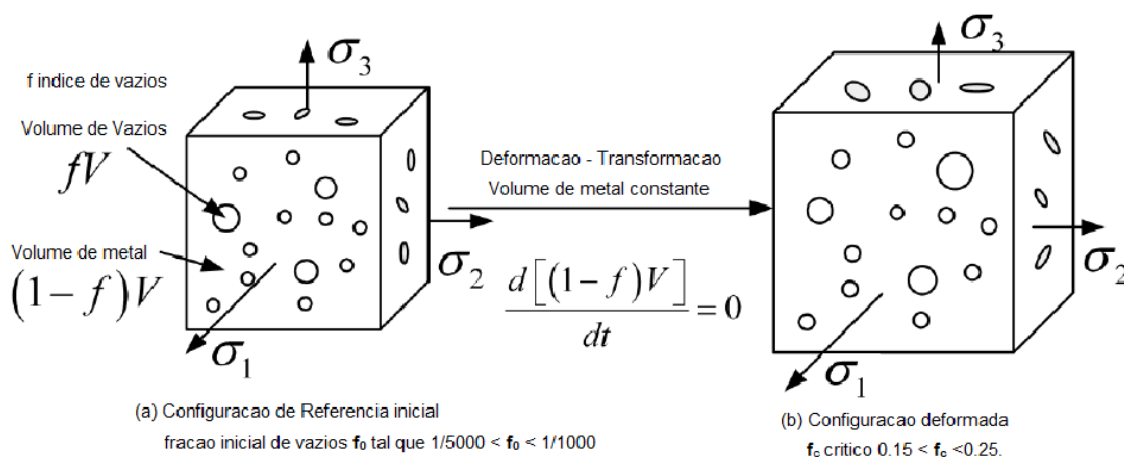


Figura 10 Efeitos de Tensões e Microestrutura de Defeitos na ZPF

O modelo de dano preconizado por Gurson e Tvergaard estabelece um potencial de deformação elasto-plástico relacionado a vazios de forma esférica.

A fração de vazios f relativa ao volume V unitário, se transforma sob influência de um estado de tensão triaxial σ ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$). Com a evolução da transformação do sólido da configuração de referência inicial para a condição final de deformação, o índice de vazios se expande de um valor inicial f_0 tal que $1/5000 < f_0 < 1/1000$ tipicamente, atingindo um valor f_c crítico $0.15 < f_c < 0.25$.

A figura 11 abaixo, referida a JUNHÁNG GUO (2013), ilustra tais conceitos. Se nota ainda que a expansão do índice de vazios f , ocorre sob volume constante de material, observando princípio de conservação de massa. O sistema físico entretanto seria dissipativo, pois parte da energia total de deformação se perde com as deformações plásticas irreversíveis na ZPF.



The deformation of metal with voids, noticing that metal obeys mass conservation's law.

Figura 11 Evolução da Configuração de Deformação com Microestrutura de Vazios, JUNHÁNG GUO (2013).

Numericamente, se mostra eficiente quanto a critérios de convergência e eficiência algorítmicas para obtenção de soluções robustas, sob deformações plásticas finitas, em regiões próximas da fratura.

Limites de aplicabilidade se evidenciam sob grandes deformações e distorções plásticas, nas quais prevalecem condições fortemente anisotrópicas.

Nas análises conduzidas para os Modelos de Tipos I a III foram consideradas condições reológicas correspondentes a materiais isotrópicos, e encruamento constante. Para as ligas de alumínio aqui tratadas, tal constitui uma aproximação, dada a moderada anisotropia evidenciada nos ensaios uniaxiais.

Para os modelos de Tipo III C(T) *Compact Tension* – Gurson-Tvergaard, tais formulações constitutivas foram aplicadas segundo a abordagem descrita em (TROVATO, RUGGIERI, 2001) com esteio na Metodologia de Células Computacionais (XIA e SHI, 1995), como indicado na figura 12.

Foram adotados parâmetros $f_0 = 1/2500$, $f_c = 0.15$ e $10 \mu\text{m} < D < 250 \mu\text{m}$.

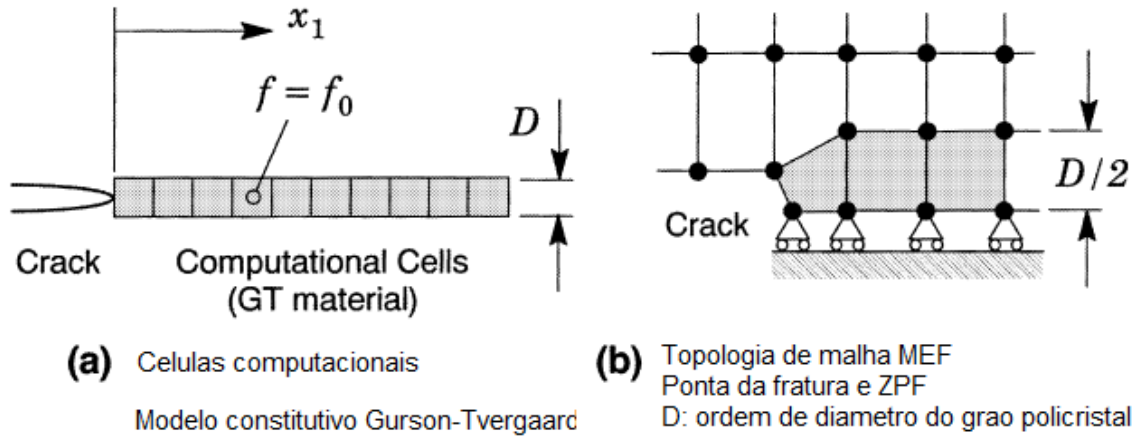


Figura 12 Células Computacionais (TROVATO, RUGGIERI, 2001)

A Metodologia de Células Computacionais (XIA e SHI, 1995), desenvolvida por meio do Sistema WARP3D (KOPPENHOEFER et alli, 1994), permite ajustar os parâmetros de potencial de deformação plástica dilatante, através da função de plastificação e forma.

Os coeficientes de função de plastificação e forma q_1 , q_2 e q_3 , constituem constantes do modelo constitutivo micromecânico. Na tabela 5 são definidos pela razão σ_0/E entre a tensão de fluxo σ_0 e o Módulo de Elasticidade E . Na tabela 5 são definidos pela razão σ_0/E entre a tensão de fluxo σ_0 e o Módulo de Elasticidade E .

Tabela 5 Parâmetros Constitutivos Micromecânicos de Função de Plastificação de Gurson-Tvergaard (KOPPENHOEFER et alli, 1994).

Optimal values for micromechanics parameters (q_1, q_2)

Hardening (n)	$\sigma_0/E = 0.001$		$\sigma_0/E = 0.002$		$\sigma_0/E = 0.004$	
	q_1	q_2	q_1	q_2	q_1	q_2
5	1.96	0.781	1.87	0.800	1.71	0.836
6.7	1.78	0.833	1.68	0.856	1.49	0.901
10	1.58	0.902	1.46	0.931	1.29	0.982
13.3	1.52	0.937	1.45	0.960	1.33	1.004
20	1.63	0.950	1.57	0.974	1.48	1.013

Nos modelos de Tipo III – C(T) – Gurson-Tvergaard, para avaliação dos coeficientes q_1 , q_2 e q_3 , foi mantida a premissa de padrão reológico de v. Mises, segundo as constantes de caracterização mecânicas σ_0 e Módulo de Elasticidade E tomadas para a direção transversal T conservadoramente.

3.3 TOPOLOGIA DOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS WARP3D

As tabelas 6 a 8 apresentam as matrizes de casos de avaliação numérica para modelos correspondentes aos ensaios de tenacidade discutidos em 3.1 e 3.2.

I - Modelo discreto (MBL- *Modified Boundary Layer*)

Tabela 6 – Matriz de Casos de Simulação Modelos Tipo I – SSY-MBL

Modelo Tipo I - SSY-MBL - Trinca aguda / Sharp crack tip							
Topologia	Material Liga AL	Deformação fluxo e_0 cm/cm	Tensão fluxo σ_0 MPa	Poisson nu	Modulo Young, E MPa	Encruamento n	
Nos: 3838 Elementos: 1800	AL-5383 H-116	5.05E-03	246.06	0.3	78470	6.45	10.7
	AL-5086 H-116						
	AL-5053 H-321	4.22E-03	187.2	0.3	84720	4.96	8.91
		5.05E-03	238.7	0.3	79860	6.33	11.07
Notas: i – Elementos finitos L3DISOP 8 nos ii – Formulacao constitutiva: Deformacao Nao linear iii – Encruamento corresponde a valores experimentais e analiticos iv – Total de casos de analises: 6 (3 ligas x 2 n)							

Condições de contorno de sollicitação:

Cada passo incremental de carregamento aplica um campo de deformação equivalente a uma variação de Coeficiente de Intensidade de Tensões ΔK_I , no modo I de abertura de fratura, tal que:

$$\Delta K_I = 1.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

O nível máximo de sollicitação aplicada equivale a $K_I = 150.0 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Não foram consideradas variações devidas a Tensões de constricção T simplificada (T = 0.0 MPa).

Modelos numéricos elaborados:

SSY-AL-5083 H321 n=10.7 (*)

SSY-AL-5086 H-116 n=8.91 (*)

SSY-AL-5383 H-116 n=11.07 (*)

SSY-AL-5083 H321 n=6.45

SSY-AL-5086 H-116 n=4.96

SSY-AL-5383 H-116 n=6.33

(*) – Valores de n, expoente de encruamento, analiticamente determinados

A resolução de escala geométrica na região da trinca, tem raio $\rho_0 = 2.5 \mu\text{m}$.

II - Modelo discreto (C(T)- *Compact Tension Test*)**Tabela 7** – Matriz de Casos de Simulação Modelos Tipo II – C(T) v Mises

Modelo Tipo II - C(T) - Compact Tension Test Specimen -v. Mises / Blunted Crack-tip							
Topologia	Material Liga AL	Deformação fluxo ϵ_0 cm/cm	Tensão fluxo σ_0 MPa	Poisson nu	Modulo Young, E MPa	Encruamento n	
Nos: 26754	AL-5383	5.05E-03	246.06	0.3	78470	6.45	10.7
	H-116						
	AL-5086 H-116	4.22E-03	187.2	0.3	84720	4.96	8.91
Elementos: 23055	AL-5053 H-321	5.05E-03	238.7	0.3	79860	6.33	11.07
Dimensions: a = 25,4 mm B = 25.4 mm W = 50.8 mm H = 60.0 mm	Notas: i – Elementos finitos L3DISOP 8 nos ii – Formulacao constitutiva: Não-linear Elastica Isotropica de v. Mises iii – Encruamento corresponde a valores experimentais e analíticos iv – Total de casos de analises: 6 (3 ligas x 2 n)						

Modelos Numéricos elaborados:

C(T)-AL-5083 H321 n=10.7 (*)

C(T)-AL-5086 H-116 n=8.91 (*)

C(T)-AL-5383 H-116 n=11.07 (*)

C(T)-AL-5083 H321 n=6.45

C(T)-AL-5086 H-116 n=4.96

C(T)-AL-5383 H-116 n=6.33

(*) – Valores de n, expoente de encruamento analíticamente determinados

III - Modelo discreto tipo C(T) – Formulação micromecânica de Gurson

Tabela 8 – Matriz de Casos de Simulação Modelos Tipo III – C(T) – Gurson

Modelo Tipo III - C(T) - Compact Tension Test Specimen -Gurson / Blunted Crack-tip							
Topologia	Material Liga AL	Deformação fluxo ϵ_0 cm/cm	Tensão fluxo σ_0 MPa	Poisson nu	Modulo Young, E MPa	Encruamento	
						n	
Nos: 26754	AL-5383	5.05E-03	246.06	0.3	78470	6.45	10.7
	H-116						
	AL-5086 H-116	4.22E-03	187.2	0.3	84720	4.96	8.91
Elementos: 23055	AL-5053 H-321	5.05E-03	238.7	0.3	79860	6.33	11.07
Dimensions: a = 25,4 mm B = 25.4 mm W = 50.8 mm H = 60.0 mm	Notas: i – Elementos finitos L3DISOP 8 nos ii – Formulacao constitutiva: Não-linear Elastica Isotropica v. Mises Micromecanica Gurson-Tvergaard iii – Encruamento corresponde a valores experimentais e analíticos iv – Total de casos de analises: 6 (3 ligas x 2 n)						

Modelos numéricos elaborados:

C(T) Gurson-AL-5083 H321 n=10.7 (*)

C(T)-Gurson-AL-5086 H-116 n=8.91 (*)

C(T)-Gurson-AL-5383 H-116 n=11.07 (*)

C(T)-Gurson-AL-5083 H321 n=6.45

C(T)-Gurso-AL-5086 H-116 n=4.96

C(T)-Gurson-AL-5383 H-116 n=6.33

(*) – Valores de n, expoente de encruamento analiticamente determinados

3.4 INTERPRETAÇÃO DOS MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

A interpretação gráfica da topologia e resultados obtidos através dos modelos de análises de elementos finitos do Sistema WARP3D V. 17.8.2 (KOPPENHOEFER et ali, 1994) foi conduzida neste trabalho de modo independente e externo ao sistema de análises. Sua arquitetura necessita ser complementada por sistemas de Interfaces gráficas, por meio de sistema auxiliar de visualização de dados numéricos científicos.

Muito embora o WARP3D seja compatível com interfaces para sistemas de elementos finitos de aplicação geral, tal como PATRAN e FEMAP, neste trabalho de dissertação foi preconizada a aplicação do sistema Paraview V 5.5, (UTKARSH,A., 2017). Tal sistema de visualização de bases de dados científicos foi selecionado pela sua robustez e aplicação geral a múltiplas categorias de problemas físicos.

Esta integração entretanto se efetua de modo intermediado, através da geração e preparo de uma base de dados para visualização geométrica, em formatação binária, a qual se desenvolve para cada modelo estrutural elaborado. Esta segunda estratégia foi seguida no desenvolvimento deste trabalho, tendo tomado um esforço e dedicação intensas para lograr obter bases de dados de visualização PARAVIEW consistentes e estáveis.

A geração das bases se efetua por intermédio do sistema WARP3D2EXII, aplicativo algorítmico elaborado pelo próprio grupo de desenvolvimento do sistema WARP3D (KOPPENHOEFER et ali, 1994).

Este aplicativo WARP3D2EXII é desenvolvido em linguagem PYTHON de programação computacional (PYTHON, V2.7-10, 2018), e necessita portanto de um ambiente apropriadamente definido de linguagem de programação e gerenciamento computacional.

As bases de dados de visualização científicas integradas ao Sistema WARP3D, possibilitam detalhada interpretação de modelagem topológica e geométrica.

Topologicamente, a partir do conjunto de dados de geometria, elementos finitos e materiais do modelo estrutural, e sobre a base de dados de resultados de análises numéricas, se define um Atlas de representação em variedades matemáticas de variáveis de estado correspondentes aos conjuntos de resultados de análises estruturais elaboradas.

No que se segue, os modelos WARP3D desenvolvidos de Tipo I a Tipo III são representados através do sistema de bases de dados de visualização PARAVIEW.

A figura 12 e 13 abaixo, se apresentam vistas gerais do Modelo Tipo I – SSY-MBL, Tipo II C(T) e Tipo III C(T) - Gurson obtidas com Sistema Paraview.

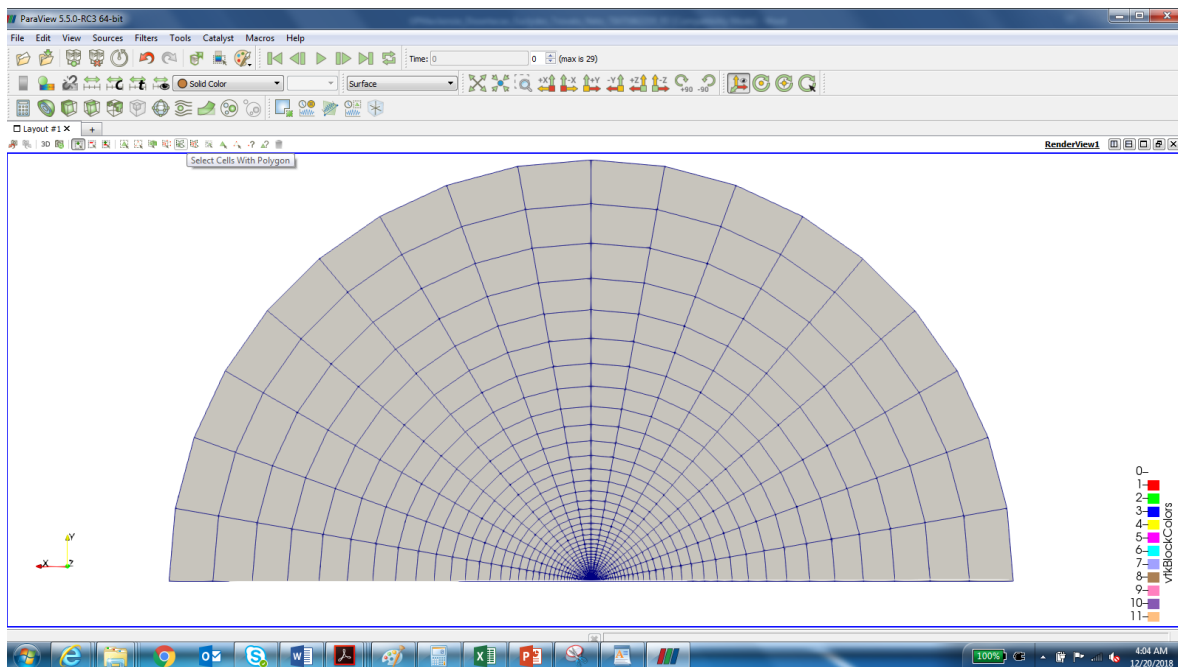


Figura 13 – Modelo Numérico Tipo I SSY-MBL – Vista Geral – Sistema Paraview

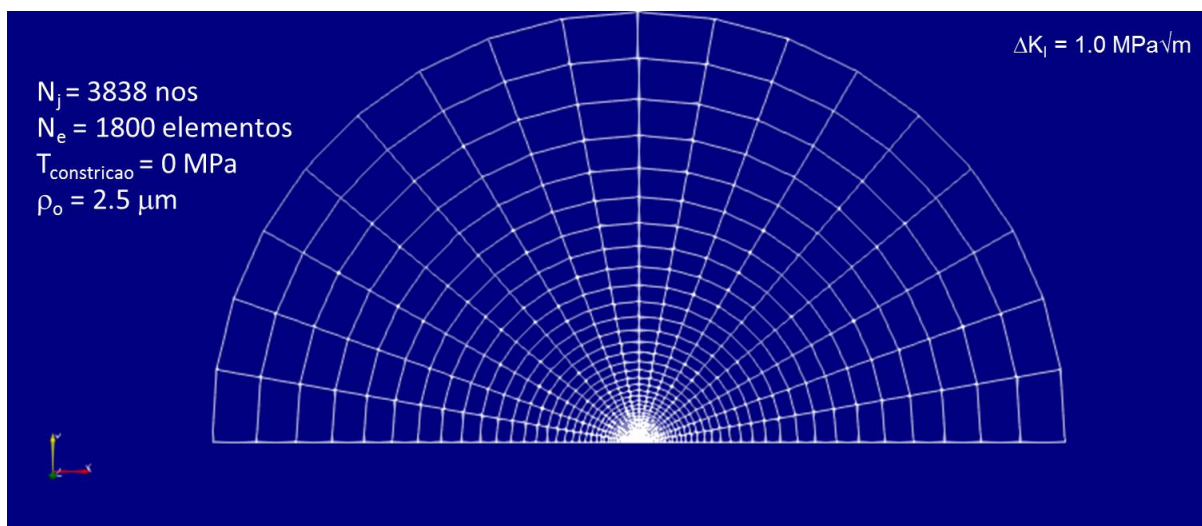


Figura 14 – Modelo Numérico Tipo I SSY-MBL – Detalhes topológicos

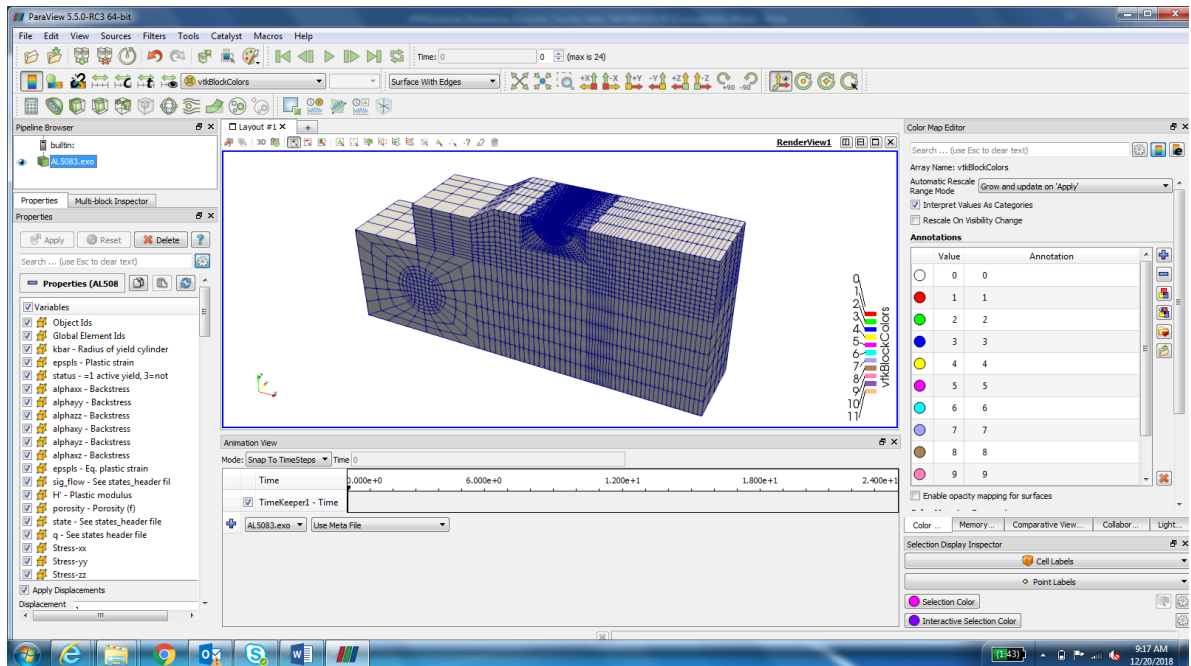


Figura 15 – Modelo Numérico Tipo II e III – Vista Geral

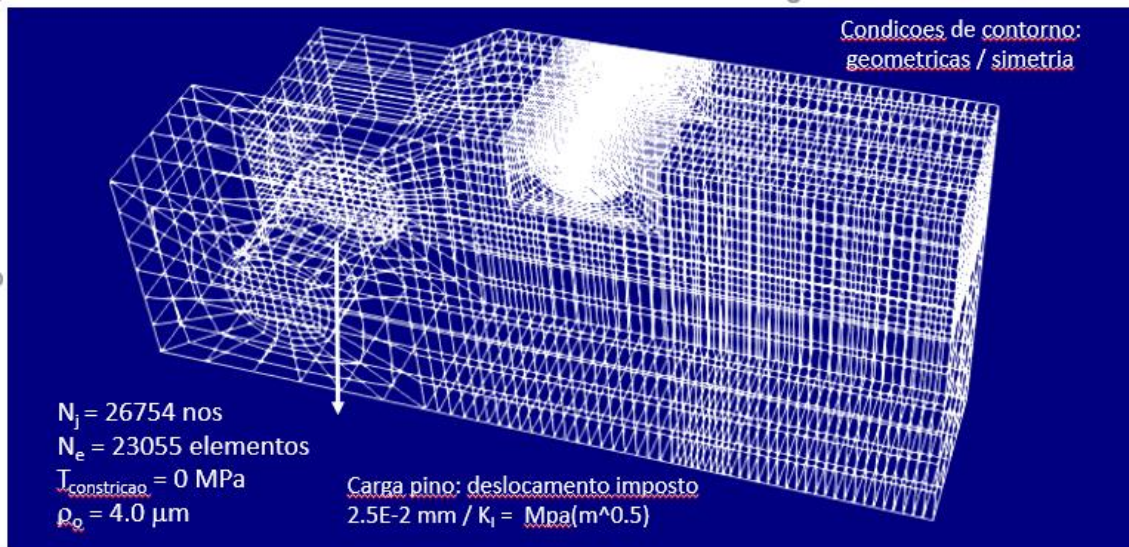


Figura 16 – Modelo Numérico Tipo II e III – Detalhes topológicos

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Resultados das análises numéricas do presente trabalho de dissertação, são concisamente apresentados. Se observa a sequência de ordem por Modelos de Tipos I, II, e III acima descritos, e para as ligas de alumínio: AL 5053 H321 AL 5086 H116 e AL 5383 H116.

Serão destacados resultados numéricos chave para regiões em escalas próximas a zona de processos de fraturamento para melhor definição gráfica, segundo parâmetros de encruamento n derivados analiticamente, são eles:

- i) Campo de Deformações
- ii) Estado de Tensão Equivalente de v. Mises: σ_{vm} ,
- iii) Tensão de abertura transversal a frente de fratura: σ_{YY} ,

Sem perda de generalidade quanto a elaboração dos processamentos e procedimentos de análises numéricas seguidos, serão apresentados casos selecionados para apenas uma das ligas.

Na qual o carregamento unitário corresponde ao fator de intensidade de tensões aplicado incrementalmente de $K_I = 1 \text{ MPa(m)}^{1/2}$

Na avaliação dos resultados numéricos da Integral J de contorno, obtidos do Sistema WARP3D, são observadas correlações com demais parâmetros de tenacidade G, CTOD (δ) e K, válidos sob condições de pequenas deformações plásticas (SSY) em estado plano de deformações (EPD), como abaixo:

$$J = \int_C \left(W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \dots \dots \text{integral_de_contorno}$$

$$W \dots \text{strain_energy / density} \rightarrow \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$$

$$ds \dots \text{incremento_linha}$$

$$T \dots \text{Tensor_tensões}$$

$$J = G = K^2 / E(1 - \nu^2) \cong \sigma_Y \delta$$

$$J \rightarrow \text{crack_tip_driving_force} \dots (\text{força_condutora})$$

Nas quais:

G: parâmetro de tenacidade de Griffith (*Strain Energy Release Rate*);

CTOD (δ): parâmetro de tenacidade Crack Tip Opening Displacement;

K: parâmetro de tenacidade de Irwin Fator de Intensidade de Tensões

4.1 INTERPRETAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS DE ANÁLISES

Modelo Tipo I - Modelo discreto (MBL- *Modified Boundary Layer*):
SSY-AL-5083 H321 n=10.7

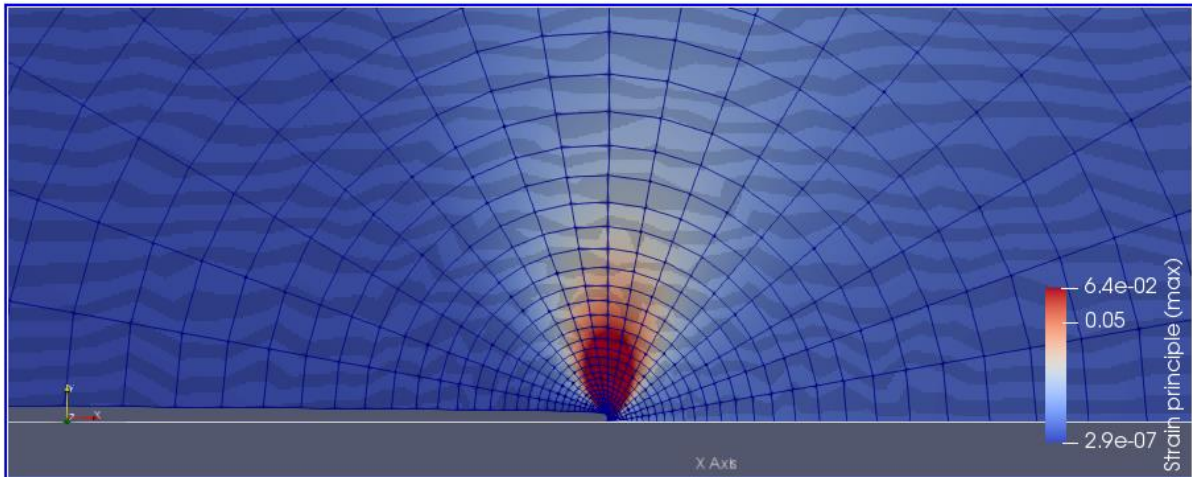


Figura 17– Deformações Principais Máximas ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

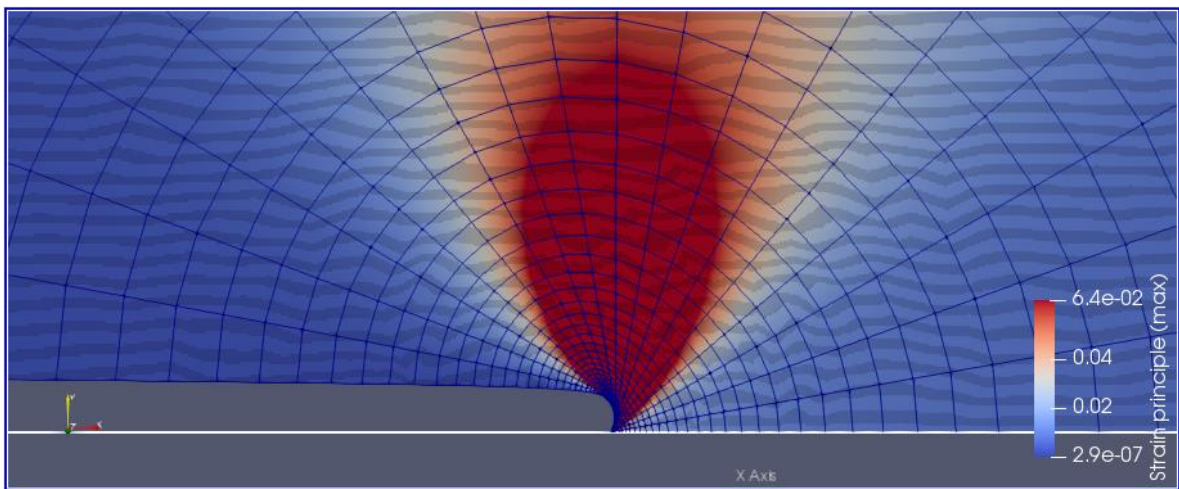


Figura 18 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

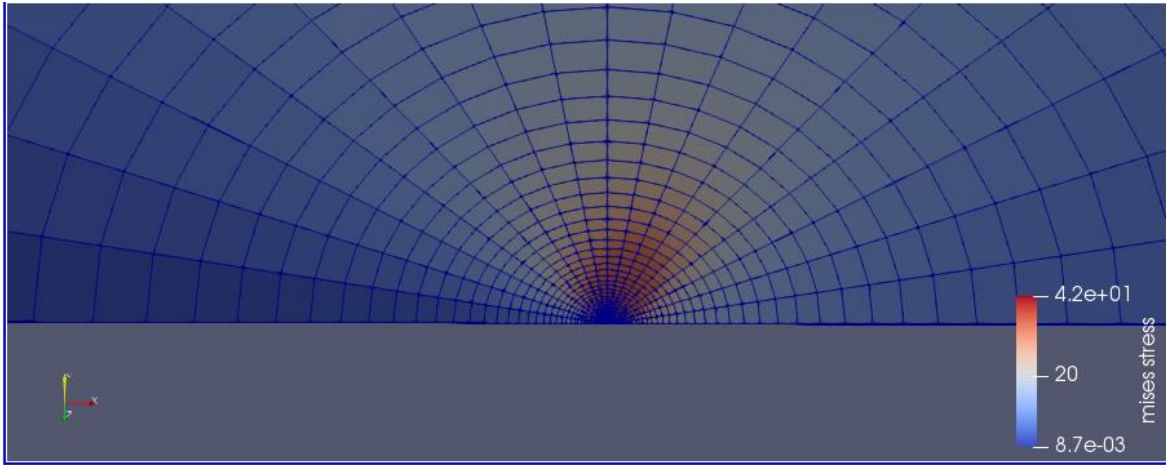


Figura 19 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I=75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

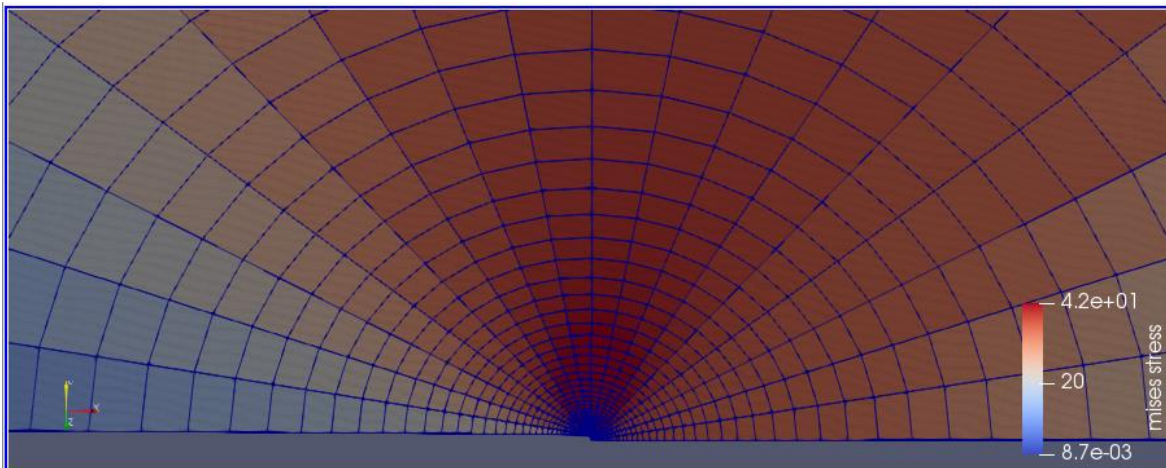


Figura 20 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I=150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

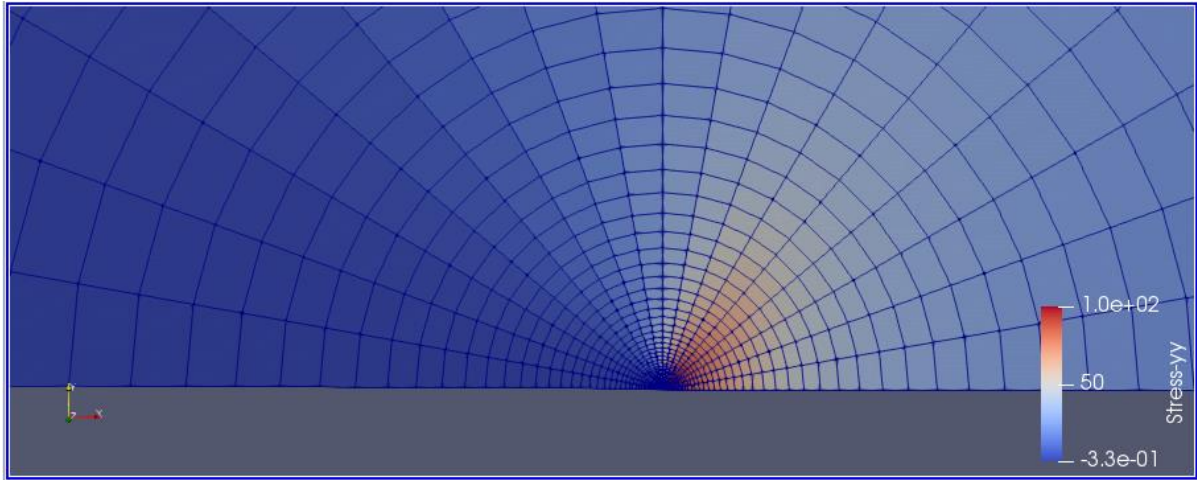


Figura 21 –Tensões σ_{YY} kN/cm² ($K_I = 75 \text{MPa(m)}^{1/2}$)

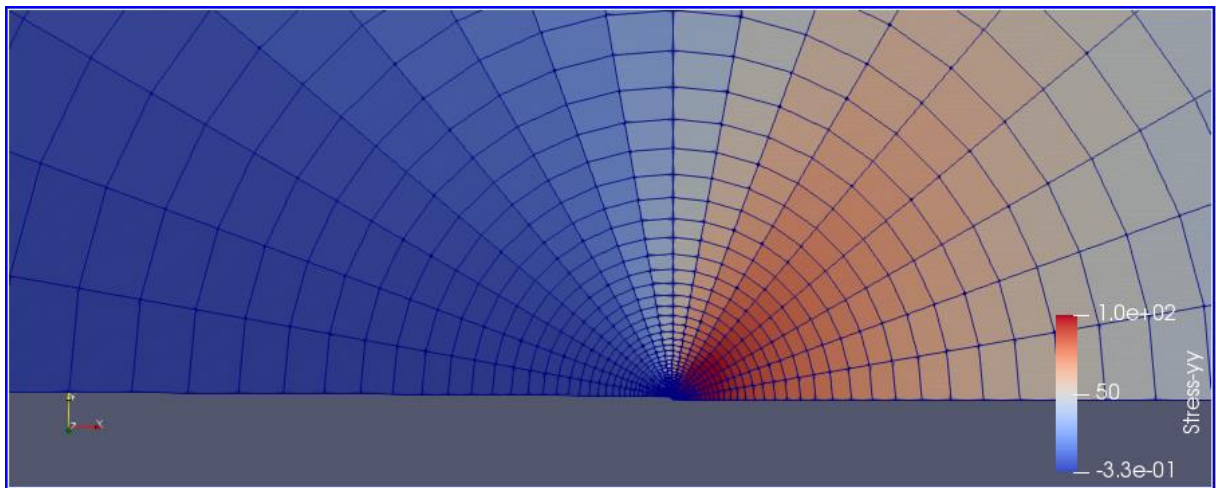


Figura 22 –Tensões σ_{YY} kN/cm² ($K_I = 150 \text{MPa(m)}^{1/2}$)

Tipo II - Modelo discreto (C(T)- *Compact Tension Test*)
 C(T)-AL-5083 H321 n=10.7

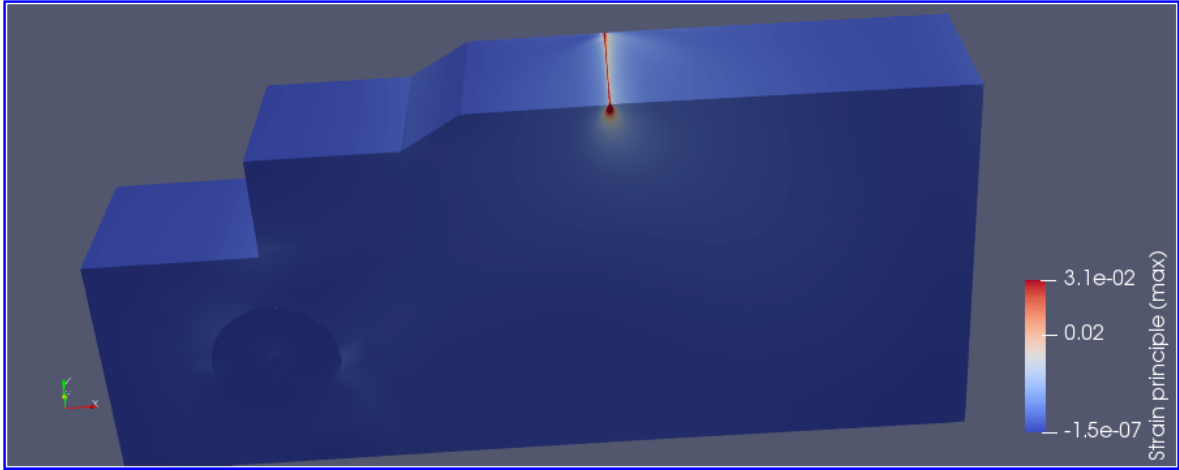


Figura 23 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

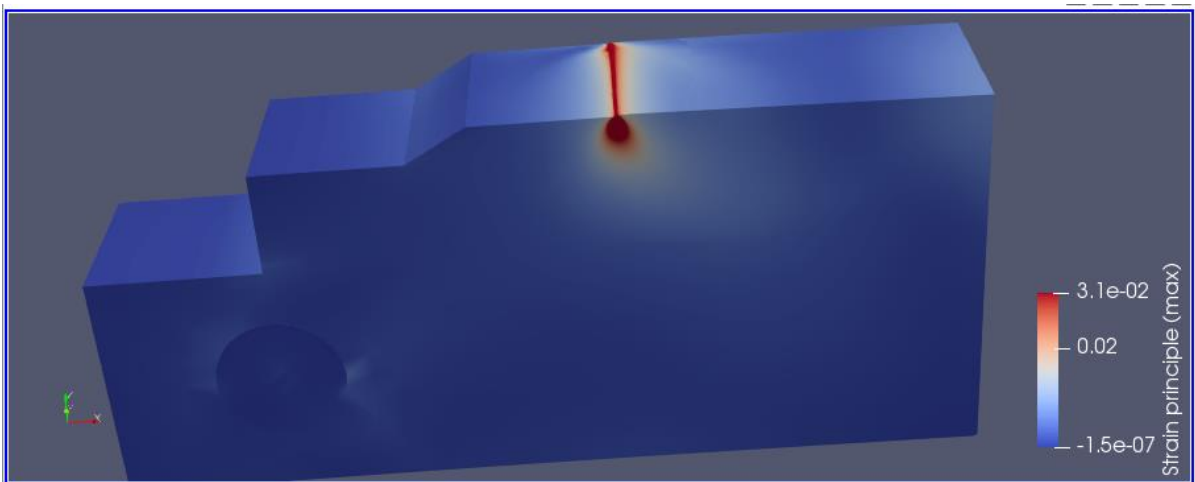


Figura 24 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

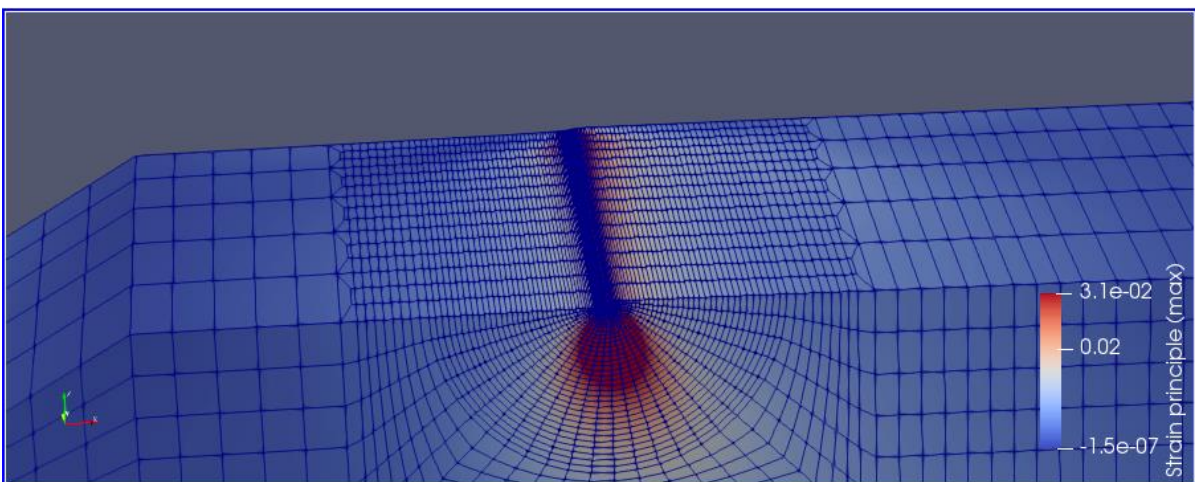


Figura 25 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

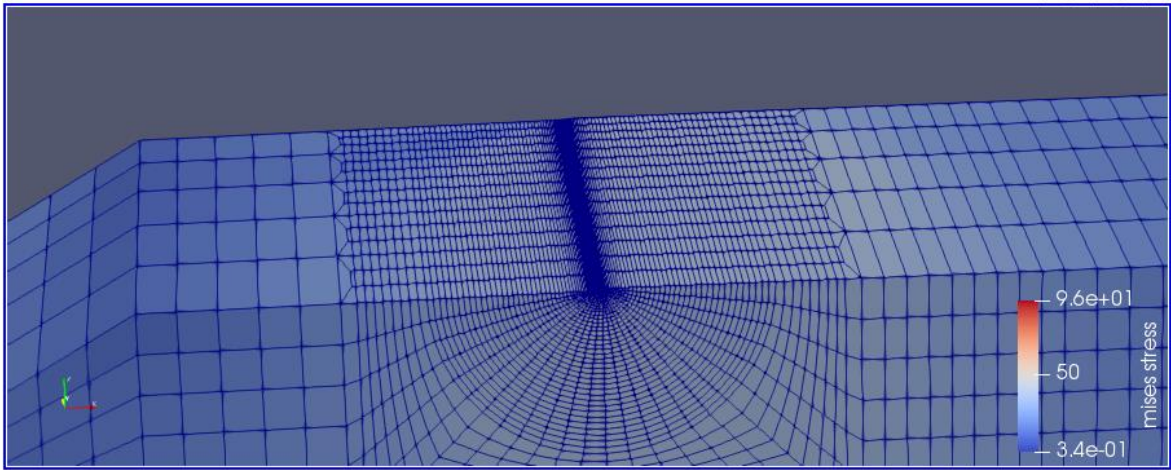


Figura 26 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I=75 \text{ MPa(m)}^{3/2}$)

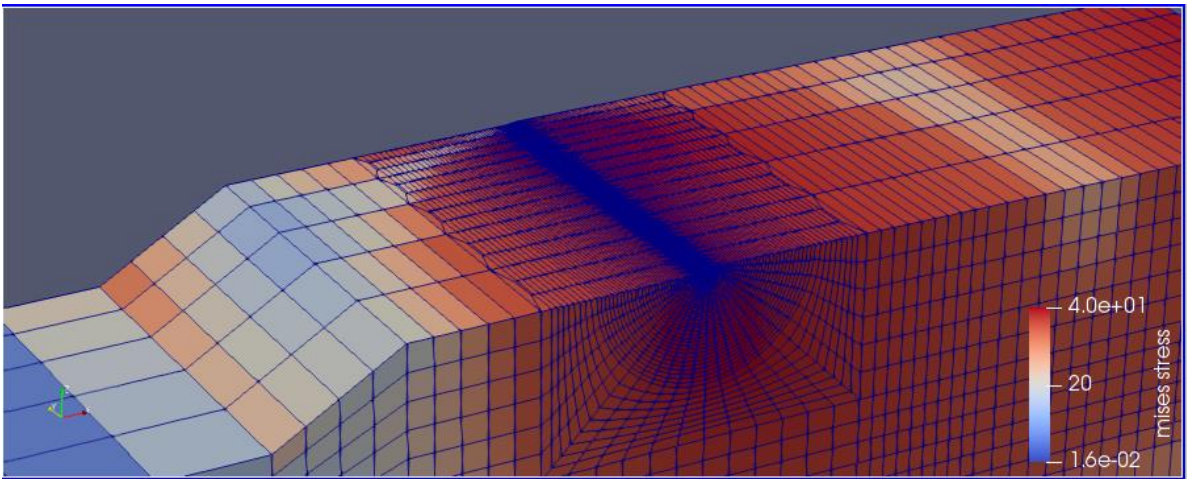


Figura 27 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I=150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

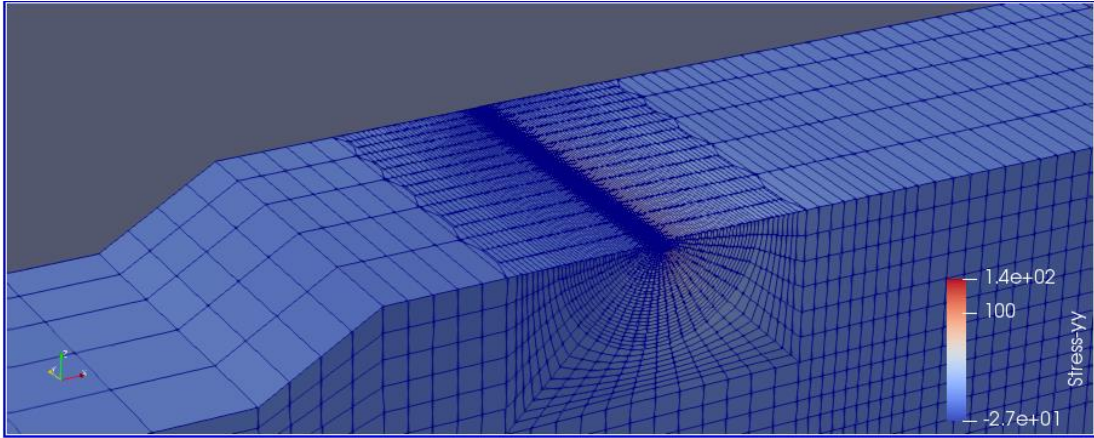


Figura 28 –Tensões σ_{yy} kN/cm² ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

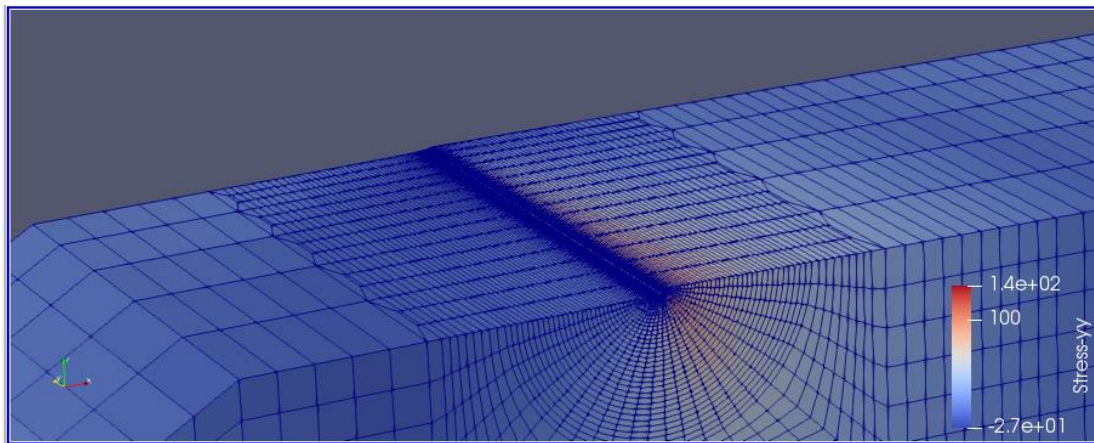


Figura 29 –Tensões σ_{yy} kN/cm² ($K_I = 150 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

III - Modelo discreto tipo C(T) – Formulação micromecânica de Gurson
C(T) Gurson-AL-5083 H321 n=10.7

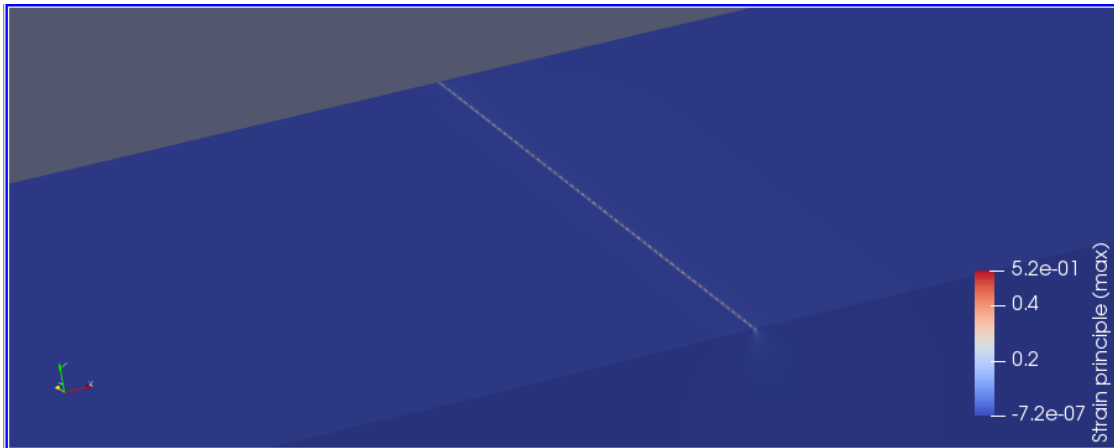


Figura 30 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 37.5 \text{ MN(m)}^{3/2}$)

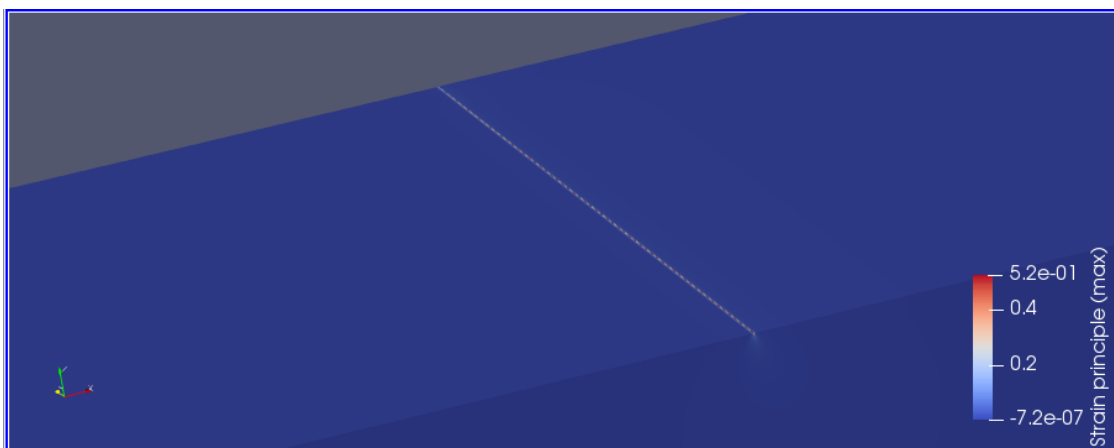


Figura 31 – Deformações Principais Máximas ($K_I = 75 \text{ MN(m)}^{3/2}$)

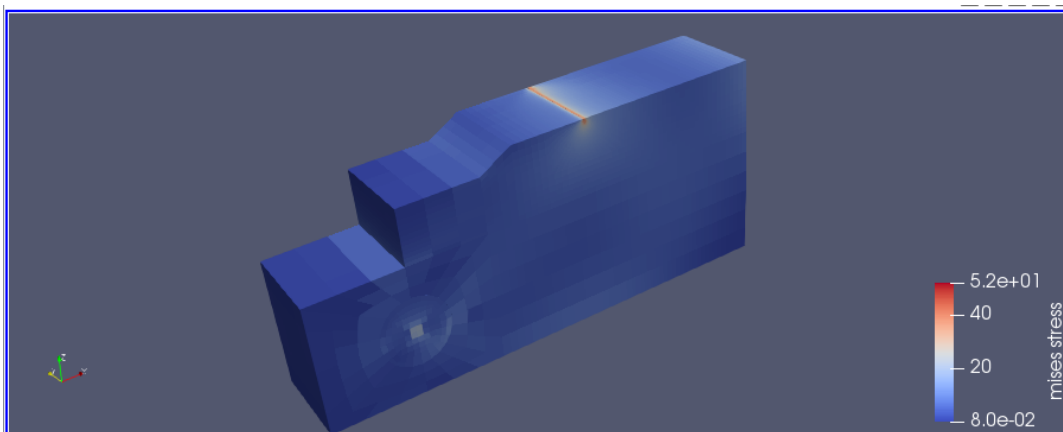


Figura 31 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I=37.5 \text{ Ma(m)}^{1/2}$)

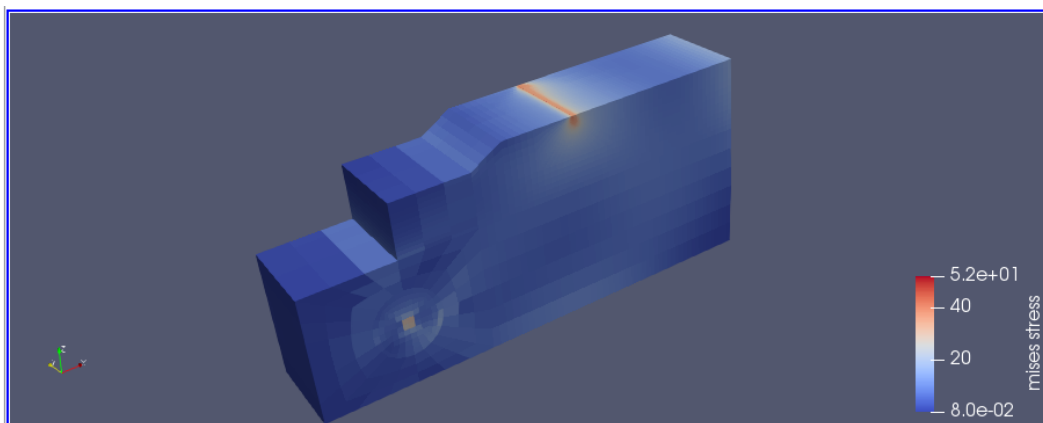


Figura 32 –Estado de Tensões v. Mises kN/cm^2 ($K_I=37.5 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

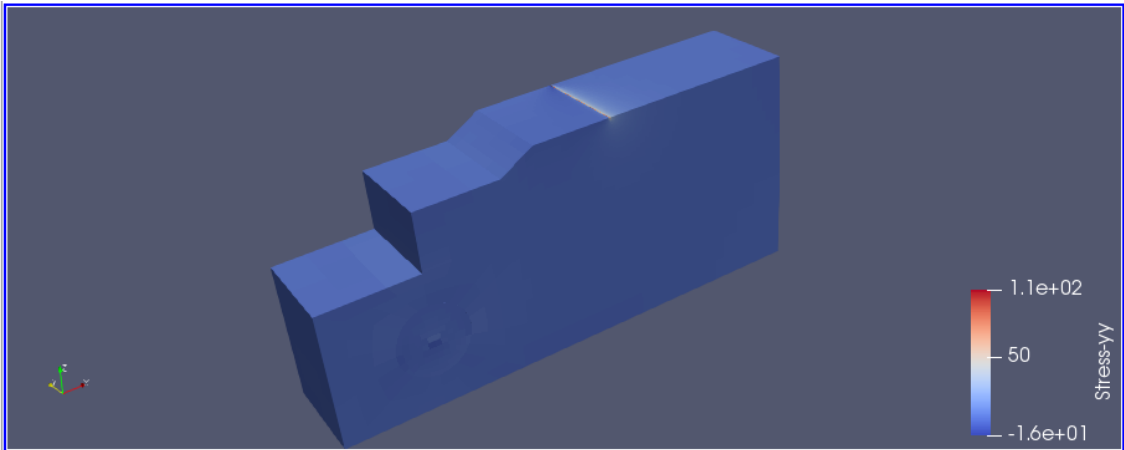


Figura 33 –Tensões σ_{YY} kN/cm² ($K_I = 37.5 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

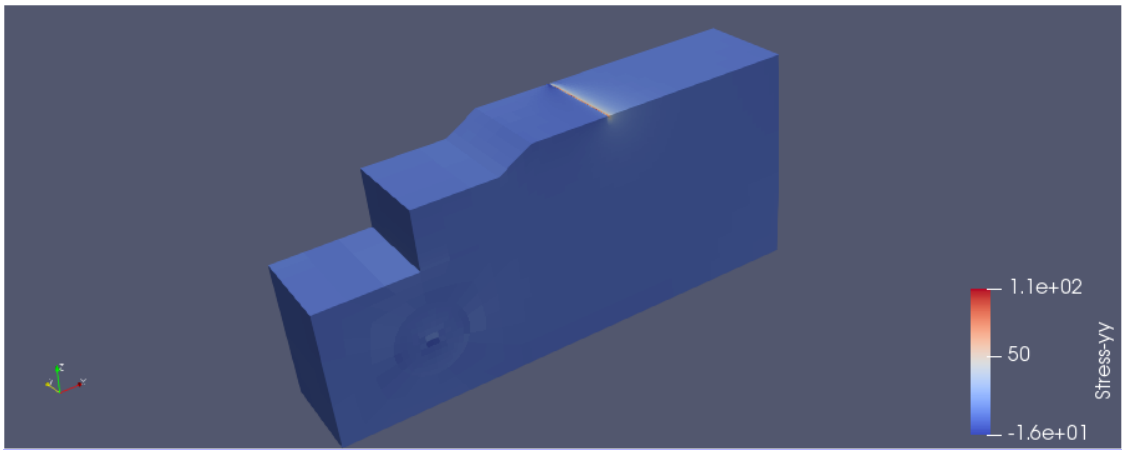


Figura 34 –Tensões σ_{YY} kN/cm² ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

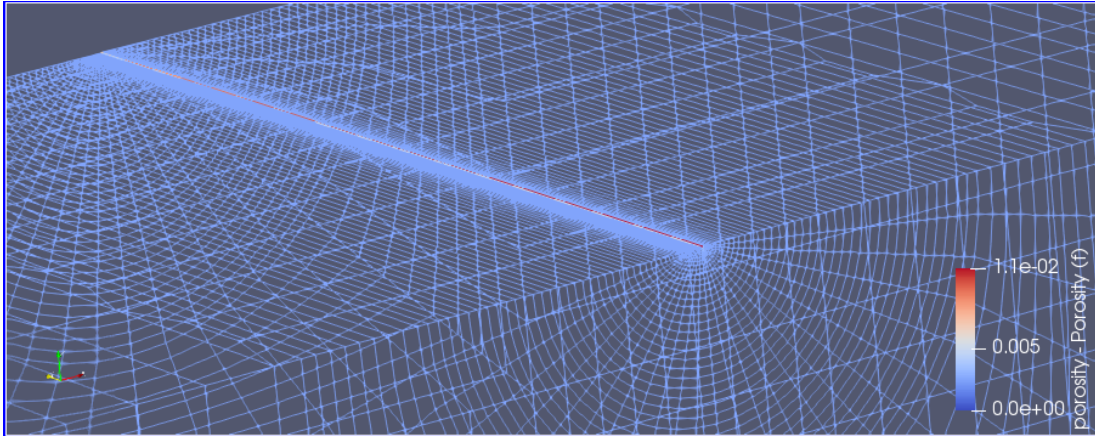


Figura 35 – Porosidade f ($K_I = 37.5 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

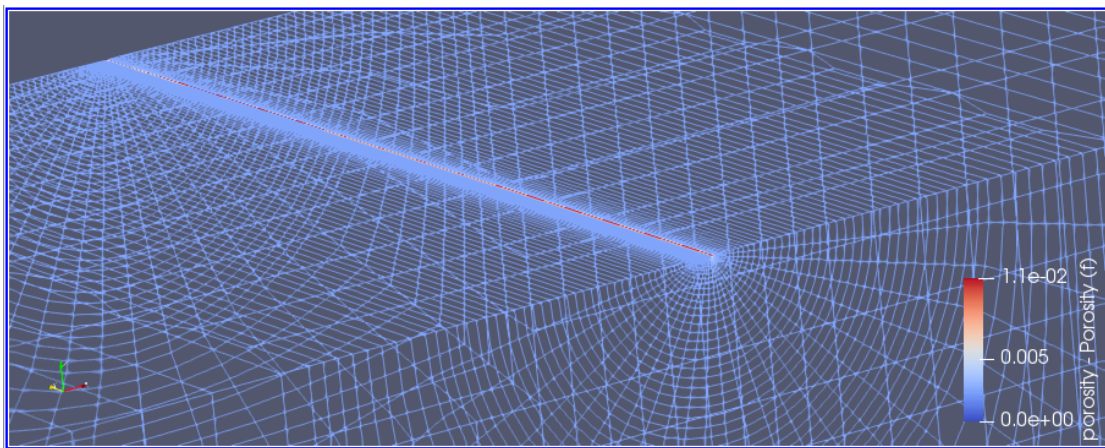


Figura 36 – Porosidade f ($K_I = 75 \text{ MPa(m)}^{1/2}$)

4.2 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS DE ANÁLISES NUMÉRICAS

Por concisão apenas resultados chave foram apresentados, para a Liga AL-5283 H-116 concisamente, com o fito de se evidenciar os procedimentos elaborados.

O gráfico 7 abaixo, apresenta os resultados de curvas de valores de tenacidade J_I (kJoules/m²) vs K_I Mpa^{0.5} obtidos numericamente através do Sistema WARP3D, para os Modelos de Análise de Tipo I a III, como acima descritos. São aduzidos resultados dos respectivos ensaios de tenacidade (DRDC,2007).

Pode ser interpretado que os resultados obtidos pelo Modelo Tipo I de tipo MBL-SSY, sob pequenas deformações plásticas, apresentam resposta relativamente mais rígida, atingindo valores maiores de J_I . Enquanto que os resultados obtidos através do Modelo Tipo II CT, de dimensões finitas e com plasticidade limitada segundo modelo de v. Mises constitui um limitante inferior. Os resultados para o Modelo Tipo III CT, de dimensões finitas que adota plasticidade dilatante segundo a formulação constitutiva de Gurson-Tvergaard estabelece resultados característicos de assintótica intermediária.

Observa-se ainda que, para os valores ensaiados de referência dos parâmetros de tenacidade J_{Ic} , de início de crescimento de fratura, os resultados numéricos apresentam relativamente boa correlação com os valores dos ensaios laboratoriais SR-1447(DRDC,2007).

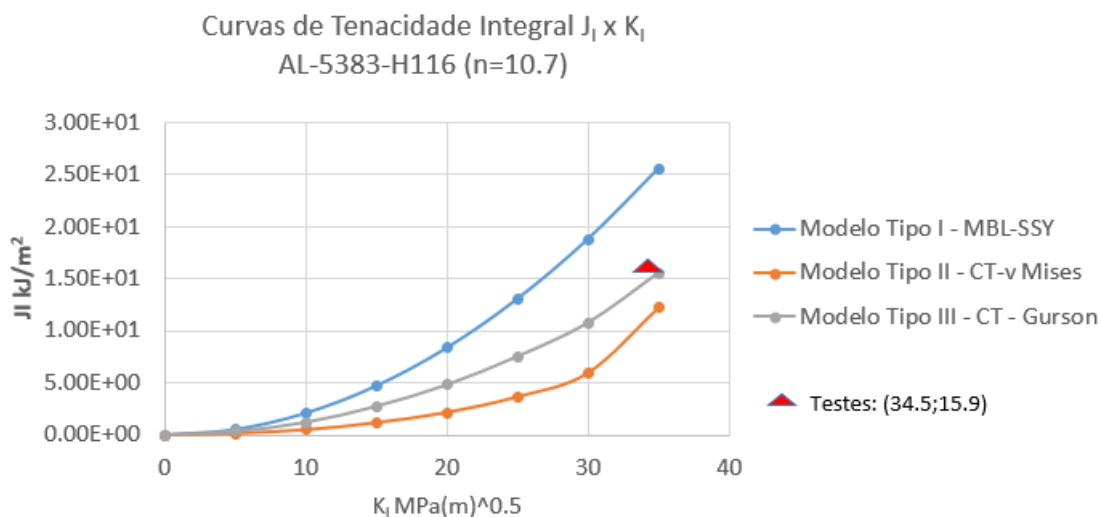


Gráfico 7: Curvas Comparativas de Tenacidade $J_I \times K_I$ AL 5383-H116 (n=10.7) Modelos Tipo I a Tipo III e valores experimentais (DRDC,2007)

Os resultados obtidos através do Modelo Tipo III C(T) com formulação micromecânica de Gurson permitem notar que a porosidade inicial, a qual apresentava índice de vazios $f_0 = 0.0025$, atingiu o valor crítico $f_c = 0.1$ em pontos locais na região sob influência da fratura. Tal condição se correlaciona a grandes deformações e distorções dos elementos na região de processos de fraturamento.

Não se observaram crescimento das fraturas, nas análises efetuadas, com o nível de solitação correspondente ao limiar de iniciação de fratura J_{Ic} .

Foram constatados desligamentos de um número discreto de elementos finitos na frente de fraturamento, totalizando cinco células computacionais que atingiram o limiar de índice de vazios máximos f crítico (f_{crit}).

Tal ocorre quando os índices de porosidade f relativas em elementos na ZPP cresceram acima do valor crítico $f_{crit} = 0.10$. Reflete a ocorrência de processo de crescimento excessivo de vazios plásticamente, numa célula computacional, sem contudo acarretar coalescência entre elementos ou células adjacentes. O crescimento e dilatação dos vazios se correlaciona fenomenologicamente, e antecede ao processo nucleação e crescimento de fraturas macroscópicas, como visto acima.

Para os modelos discretos de dimensão finita tipo C(T), as análises conduzidas permitiram acompanhar o crescimento de fratura, sob grandes deformações plásticas na frente da fratura. Aspecto este que se observa também para os modelos de C(T) que adotam formulação de Gurson-Tvergaard, que experimentaram crescimento sensível da porosidade.

As análises dos modelos de tipo III, que adotam formulação micromecânica de dilatação plástica de Gurson-Tvergaard, permite interpretar o crescimento do índice de vazios relativo nos sólidos. Os resultados indicam que os índices de porosidade ultrapassaram o limiar crítico de vazios $f_{crit} = 0.10$ localmente. O quadro abaixo resume os resultados típicos da evolução da condição de índice de vazios para uma determinada célula computacional.

Tabela 9 – Quadro sinótico – Evolução Crítica de índice de vazios – Célula computacional - Resultado Tipo III – C(T) – Gurson.

element	inital f	current f	Ep	sigma bar kN/cm2	mean stress kN/cm2	mises stress kN/cm2
425	0.0025	0.1153	4.79E-01	3.89E+01	4.36E+01	1.56E+01

5 DISCUSSÕES

Este trabalho de dissertação tem por objetivo de pesquisa aplicar metodologias micromecânicas para a caracterização de propriedades de tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais. De um modo específico:

- Investigar e aplicar metodologias micromecânicas para caracterização de propriedades de tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais;
- Aplicar procedimentos numérico intensivos robustos de calibração de parâmetros micromecânicos para caracterização de tenacidade ao fraturamento;
- Estabelecer correlação entre bases de dados de resultados de ensaios experimentais e resultados de procedimentos de análises numéricas.

Tem-se por perspectiva que o crescente uso de sistemas de estruturas de alumínio, de múltiplas tipologias construtivas, torna relevante e necessário garantir níveis adequados de segurança e confiabilidade estruturais, como visto no Capítulo 2.

Resulta pertinente desenvolver e aperfeiçoar metodologias robustas para avaliação de parâmetros característicos de tenacidade aplicáveis a procedimentos de Avaliações Críticas de Integridade (CIA) dos sistemas estruturais de alumínio.

As ligas de alumínio aplicáveis a sistemas estruturais constituem materiais heterogêneos policristalinos, que exibem padrões microestruturais diferenciados de seus elementos. Tais padrões estão intrínsecamente associados à variabilidade estatisticamente observada dos valores de parâmetros de tenacidade e de comportamento mecânicos macroscópicos. Se nota igualmente que os mecanismos de danificação, que se manifestam em escala microestrutural, se relacionam diretamente com as características micromecânicas.

No que tange as propriedades mecânicas de tenacidade ao fraturamento, a variabilidade estatística esta relacionada às propriedades mecânicas, igualmente reflete condicionantes das próprias metodologias experimentais normativas.

O desenvolvimento experimental normativo atual busca compatibilizar tais aspectos metodológicos, através de pesquisas que integrem metodologias numéricas.

No que se segue os tópicos principais dos estudos desenvolvidos nesta dissertação são discutidos apresentados nas seções subseqüentes.

Da aplicação da Metodologia Micromecânica adotada:

Nesta dissertação, uma revisão de metodologias de Mecânica Computacional, que admitem formulações representativas das condições micromecânicas e microestruturais intrínsecas das ligas de alumínio, que conduzam a avaliações numéricas de parâmetros de tenacidade da Integral J (Rice, J.R.,1966) com base no Método dos Elementos Finitos, foi elaborada e apresentada nas seções 2.2 e 2.3.

A metodologia de análise micromecânica (XIA, L. and SHIH, 1995) é aplicada para avaliar parâmetros de tenacidade da Integral J, possibilitando estabelecer correlações com resultados experimentais de caracterização da tenacidade ao fraturamento de ligas de alumínio estruturais.

O quadro metodológico adotado, foi descrito na seção 2.2 e na seção 3.2, e se orienta para a avaliação de processos de fraturamentos dúcteis, com esteio no MEF, e utiliza formulações constitutivas de plasticidade dilatante de Gurson-Tvergaard (GURSON A.L., 1981) para materiais de comportamento mecânico reológicos não-linear (RAMBERG-OSGOOD,1943). São definidas células computacionais, que permitem definir modelos numéricos discretos para análises de sólidos fraturados, através das quais se considera explicitamente a microestrutura de vazios, representada pelo parâmetro de densidade volumétrica de vazios f .

Poderia ser discutido que a mesma metodologia, tem natureza fenomenológica, pois a microestrutura intrínseca de discordâncias, e de heterogeneidades dos materiais policristalinos das ligas de alumínio avaliadas seria representada tão somente de modo aproximado, através do parâmetro de índice de porosidade f .

Se contrasta contudo que, o mecanismo de danificação microestrutural de fratura dúctil que predomina nas ligas de alumínio estruturais consideradas, tipicamente envolve a nucleação de alvéolos e microvazios. A aplicação de procedimentos de caracterização de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), ou de caracterização fractográfica, poderiam ser admitidos para estabelecer uma correlação experimental representativa do parâmetro micromecânico de densidade de vazios f .

Entretanto, as metodologias correlatas, discutidas na seção 2.3, tais como a utilização de Metodologias de Mecânica do Dano, e ou a simulação direta de mecanismos de discordâncias e de deformações cristalinas se provariam ainda de desenvolvimento ainda mais complexas, do ponto de vista computacional, e de ajuste de parâmetros microestruturais e micromecânicos a serem requeridos.

Da utilização de resultados das bases de dados experimentais:

Esta dissertação tomou por base experimental o conjunto de ensaios de características de propriedades mecânicas e de tenacidade à fratura de ligas de alumínio estruturais do programa de pesquisas tecnológicas SR-1447 (DRDC, 2007).

A pertinência da seleção desta base de dados experimentais foi tratada no Capítulo 2 de revisão bibliográfica. A descrição da estrutura e dos dados experimentais se apresentam no Capítulo 3 e Anexo III, e sua relevância tecnológica foi discutida recentemente em detalhe em trabalhos de (TROVATO, E. A.A. COUTO, 2018).

Nesta dissertação foram consideradas ligas de alumínio do grupo 5XXX, forjáveis e não tratáveis termicamente, com endurecimento mecânico por encruamento e solubilização, e elemento primário o Magnésio: AL-5083 H321; AL-5086 H116 e AL-5383 H116. Este conjunto de ensaios, como visto na seção 2.2, atende qualificadamente a metodologias de MFNL e metodologias experimentais para caracterizações de parâmetro de tenacidade da especificação (ASTM E 1820,2001) (Sielski,2007).

Da análise dos dados da base experimental SR-1447 (DRDC, 2007) foi possível avaliar parâmetros reológicos estatisticamente representativos dos materiais ensaiados, tais como: Módulo de Elasticidade E , Tensão de Fluxo $\sigma_{y,0.2}$, e Tensão de Ruptura σ_{Ult} , apresentados na Tabela 2. Estes consideram variações direcionais de propriedades mecânicas indicativa do moderado grau de anisotropia observado nestas ligas, como abordado em 3.1.1. Tais resultados permitiram estabelecer comparações, de natureza qualitativa e quantitativa das propriedades mecânicas dos materiais avaliados.

Da aplicação do Modelo reológico não linear de Ramberg-Osgood:

Um estudo dos parâmetros modelos reológicos de Ramberg-Osgood apresentado sub seção 3.1.1, derivados das condições experimentais, permitiu estabelecer comparações entre valores experimentais e parâmetros obtidos nas formulações analíticas conforme (RAMBERG, W and OSGOOD, R. W, 1943).

Os valores de n experimentais, apresentados em SR-1447 (DRDC, 2007) foram determinados considerando diretamente as medidas de reduções de áreas seccionais. Tal abordagem, embora simples e frequentemente adotada, se revela relativamente limitada.

Poderia ser discutido que, para os metais das ligas de alumínio examinadas nesta dissertação evidenciam condições de anisotropia moderadas entre direções de laminação T e L, como indicado em 3.1.1. Apresentando comportamento reológico de não linearidade direcional, o qual se apresenta influenciado tanto pelas condições locais de orientação dos cristalitos, como pelo estado de tensões e deformações locais.

A influência dos parâmetros do coeficiente de encruamento n sobre o comportamento mecânicos das ligas de alumínio caracteriza forte não-linearidade material e direcional relacionadas ao desenvolvimento de grandes deformações plásticas localizadas.

A determinação dos coeficientes de encruamento n , característicos do comportamento reológico não linear das ligas de alumínio, tem significativa influência sobre a determinação dos campos mecânicos de tensões e deformações obtidos pelo MEF.

Com esteio nestes aspectos, os valores analíticos dos coeficientes de encruamento n aplicados aos modelos reológicos de Ramberg-Osgood foram adotados para desenvolvimento dos procedimentos de análises numéricas conduzidos nesta dissertação.

Se observou que, nas análises numéricas efetuadas, a aplicação de coeficientes de encruamento obtidos da formulação analítica clássica (RAMBERG, W and OSGOOD, R.W, 1943) demonstrou oferecer soluções numéricas mais consistentes dos campos locais de tensão e deformação obtidos através do MEF para os modelos Tipo I II e III. Tal permitiu garantir melhor convergência em termos de ordem de grandeza numérica, e tendência assintótica uniforme de tenacidade do parâmetro da integral J (Rice, J.R., 1966).

Dos parâmetros micromecânicos e microestruturais considerados:

Se interpreta que os aspectos micromecânicos, tais como nucleação e crescimento dúctil da microestrutura de vazios, estão diretamente relacionados aos processos de danificação que ocorrem na vizinhança da fratura e na ZPF. Estes são essencialmente condicionados por parâmetros microestruturais relevantes (eg índice de porosidade, heterogeneidades de fases, etc).

A condição de avaliação dos parâmetros micromecânicos, condicionados pelo índice de porosidade f , foi apresentada no item 4.2 com resultados indicados na Tabela 9, obtidos através do Modelo Tipo III C(T) que adotam formulação micromecânica de Gurson-Tvergaard.

Os resultados numéricos da Tabela 9 permitem notar que o parâmetro microestrutural de porosidade inicial f_0 adotado, caracteriza um índice de vazios $f_0 = 0.0025$.

Para uma determinada célula computacional, a evolução do índice de vazios f atingiu o valor crítico $f_c = 0.1$, em pontos locais na região sob influência da fratura. Tal condição se correlaciona a grandes deformações e distorções locais dos campos de tensões e deformações na vizinhança da fratura, quando em determinadas células computacionais atingem localmente o regime plástico de estricção.

Se nota que nas condições de carregamento adotadas, não se buscou observar o crescimento do comprimento da fratura, mas tão somente a determinação do valor J_{Ic} característico do início do crescimento de fratura no modo I.

Entretanto se verificou desligamento de elementos finitos, em regiões esparsas, revelando que localmente os índices de porosidade f em elementos fora da ZPF cresceram acima de valores críticos $f_{crit} = 0.10$.

Tal aspecto pode estar correlacionado a determinação dos parâmetros da equação de Gurson-Tvergaard. Estes controlam a função de plastificação e forma associadas a distribuição de vazios nas matrizes metálicas das distintas ligas de alumínio avaliadas.

Observa-se que os resultados numéricos, dos campos de tensões e deformações na vizinhança da fratura, são muito sensíveis ao valor inicial parâmetro de índice de porosidade relativa por unidade de volume f_0 .

Na presente dissertação, a calibração do parâmetro f_0 , foi determinada consistente com os resultados numéricos obtidos através da solução MEF de modo a se obter valores de Integral J compatíveis com os valores experimentais J_{Ic} .

Todavia, a calibração do parâmetro f_0 pode ser avaliada ou calibrado tendo por base resultados experimentais de caracterização metalúrgica das ligas de alumínio.

A adoção de outros valores do parâmetro f_0 , tipicamente considerados na literatura referida (KOPPENHOEFER et alli, 1994), não ofereceram boa condição de convergência dos valores numéricos da Integral J para os modelos efetuados e ensaios.

De salientar que no programa SR- 1447 (DRDC, 2007) não foram efetuadas investigações acerca de propriedades micromecânicas ou microestruturais relacionadas a propriedades de tenacidade. Igualmente, não foram avaliados parâmetros de densidade de vazios, ou porosidade, microestruturais.

As avaliações dos aspectos da microestrutura de vazios dos materiais considerados, e resultados das investigações constituem contribuição de investigação direta desta dissertação.

Dos procedimentos de análises do Método dos Elementos Finitos

A aplicação da metodologia de Elementos Finitos com recursos do Sistema WARP3D (Koppenhofer et alli, 1994), permitiu ter em detalhada consideração os dados de resultados chave do programa de investigação experimental de caracterização de tenacidade à fratura (Sielski, 2007) do programa de investigação tecnológica SR-1447 (DRDC, 2007).

Os resultados obtidos conduziram a avaliações numéricas de valores dos parâmetros de tenacidade da Integral J (Rice, J.R., 1966), invariantes em regiões próximas da fratura (KOPENHOFFER et alli, 1994) apresentados. Permitiram avaliar condições de nucleação, crescimento e coalescência de vazios microestruturais relacionados ao processo de crescimento dúctil de fraturas.

A metodologia de análises numéricas utilizada, e descritas na seção 3.3 acima, considera as propriedades mecânicas características dos grupos de ligas: AL 5053 H321 AL 5086 H116 e AL 5383 H116.

As matrizes de casos de análises numéricas de elementos finitos refletiram condições topológicas representativas dos ensaios efetuados, definidas segundo três tipos de modelos discretos do MEF, e correspondem a um total de 18 casos de análises. Os quais correspondem a 3 condições de topologia, 3 ligas de materiais, e 2 parâmetros reológicos.

- Modelo discreto (MBL- *Modified Boundary Layer*)
- II - Modelo discreto tipo C(T) – *Compact Tension Test Specimen*
- III - Modelo discreto tipo C(T) – Formulação micromecânica de Gurson

Os modelos discretos de dimensões finitas também permitiram simular condições micromecânicas relacionadas a microestrutura de vazios dos materiais das amostras, explicitamente representadas pelo índice de vazios f .

Assim como indiretamente representar condições microestruturais associadas aos valores do coeficientes de encruamento n .

Resultados numéricos obtidos do Sistema WARP3D são interpretados por intermédio do sistema de visualização de dados científicos PARAVIEW, na seção 4.1. São indicados resultados chave representativos dos campos de tensões e deformações, através de gráficos em regiões próximas a zona de processos de fraturamento.

A visualização dos resultados dos modelos discretos do MEF de Tipos I, II, e III, para as ligas de alumínio: AL 5053 H321 AL 5086 H116 e AL 5383 H116, é apresentada pelas Figuras 17 a Figura 36. Os seguintes conjunto de variáveis são destacados:

- i) Campo de Deformações
- ii) Estado de Tensão Equivalente de v. Mises: σ_{vm} ,
- iii) Tensão de abertura transversal a frente de fratura: σ_{YY} ,
parâmetros de modelo reológico

A utilização do Sistema de visualização de dados científicos PARAVIEW permitiu observar diretamente, para a sequência de carregamentos aplicados, toda a evolução dos campos de tensões e deformações na vizinhança da fratura.

A visualização oferecida permitiu interpretar com destaque para os padrões das regiões de deformações plásticas.

Localmente nas pontas das trincas, se observa a evolução das deformações plásticas consistentes que evidenciam condições de embotamento (*Crack tip blunting*).

Enquanto que nos modelos de Tipo III se observa a evolução da densidade de vazios nas células computacionais na frente de fraturamento pelo parâmetro f .

A avaliação dos resultados numéricos foi apresentada no Capítulo 4.

Dos resultados de caracterização de parâmetros de tenacidade à fratura J :

Mantendo foco na metodologia de caracterização micromecânica de tenacidade à fratura, foi dado destaque a apresentação de resultados da Integral J (Rice, J.R.,1966) obtidos numericamente através de recursos do Sistema WARP3D.

Resultados chave para o material AL-5083 H321 $n=10.7$, apresentados no Gráfico 7, representam curvas de valores de tenacidade J_I (kJoules/m²) vs K_I (MPam^{0.5}) obtidos através dos resultados de análises dos Modelos de Tipo I a III.

Foram aduzidos resultados de ensaios de tenacidade J_{Ic} de iniciação de fraturamento do Programa SR-1447(DRDC,2007), permitindo efetuar comparação direta com os resultados de análises numéricas.

Se interpreta que a curva de tenacidade J vs K representativa do Modelo Tipo I MBL-SSY, sob pequenas deformações plásticas, tem resposta relativamente mais rígida, atingindo valores maiores de J_{Ic} , e estabelece um limitante superior dos valores de J .

Notando que este modelo Tipo I, apresenta uma escala volumétrica maior de corpo extenso, e estabelece uma assintótica de convergência numérica de ordem inferior.

De modo análogo, a respectiva Curva J vs K do Modelo Tipo II C(T), de dimensões finitas e com plasticidade limitada segundo modelo de v. Mises, atinge valores menores de J_{Ic} e estabelece limitantes inferiores dos valores de J numéricos.

O modelo de Tipo II MBL-C(T), apresenta uma escala volumétrica de dimensões finitas, e estabelece uma assintótica convergência numérica de ordem superior.

Os resultados para o Modelo Tipo III C(T)-Gurson, de dimensões finitas e com formulação micromecânica de Gurson-Tvergaard, estabelece resultados característicos de assintótica intermediária. Este igualmente apresentou melhor resultado comparativo em relação aos valores de J_{Ic} .

Os resultados obtidos através do Modelo Tipo III C(T)-Gurson, com, permitem notar que a porosidade inicial, a qual apresentava índice de vazios $f_0 = 0.0025$, atinge o valor crítico $f = 0.1$ em pontos locais na região sob influência da fratura.

A consideração do índice de vazios inicial $f_0 = 0.0025$ representativo das ligas de alumínio estruturais, foi estabelecida nesta dissertação de modo determinista, com base em literatura de referência. Observa-se que os resultados numéricos obtidos, dos campos de tensões e deformações na vizinhança da fratura, são igualmente muito sensíveis ao valor inicial do parâmetro f_0 , do índice de porosidade relativa por unidade de volume.

Infere-se que seria pertinente que o mesmo valor f_0 seja igualmente avaliado para as ligas de alumínio tendo por base resultados experimentais de caracterização metalúrgica microestrutural, tal como discutido em 5.3.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos apresentados na seção 4.2, evidenciam que a aplicação da metodologia micromecânica (XIA, L. and SHIH, 1995) e discutida na seção 5.1, estabelece procedimentos numéricos relevantes para avaliação da Integral J (Rice, J.R.,1966), para as ligas de alumínio descritas na seção 3.1.

Os resultados numéricos permitiram estabelecer correlação experimental com parâmetro de caracterização de tenacidade J_{Ic} de iniciação de fratura, para as ligas de alumínio consideradas, como indicado na seção 4.2 e Gráfico 7.

Os procedimentos numéricos conduzidos permitiram obter a calibração de parâmetros micromecânicos, associados ao índice de vazios microestruturais f_0 , para caracterização de tenacidade à fratura sob condições reológicas não lineares da integral J_{Ic} .

As curvas de tenacidade R J vs K representativas dos modelos numéricos de Tipo I de (MBL-SSY), Tipo II C(T) e Tipo III C(T) – Gurson, estabelecem padrões assintóticos de convergência numérica em relação ao parâmetro de caracterização de tenacidade J_{Ic} experimentais, como indicado no Gráfico 7, e discutido em 5.4.

Os resultados numéricos de valores de tenacidade da Integral J obtidos através do Modelo Tipo III C(T) - Gurson, são característicos de assintótica intermediária, e apresentaram melhor convergência numerica em relação aos valores de J_{Ic} .

Os resultados numéricos obtidos através da formulação do MEF, permitem caracterizar os campos de tensões e deformações nas vizinhanças da fratura, e portanto concorrem para um nível aprofundado de avaliação da interpretação do comportamento mecânico dos corpos de prova dos ensaios de caracterização de tenacidade à fratura.

A utilização do sistema de visualização de dados científicos efetuadas através da elaboração de bases de dados do sistema PARAVIEW, apresentados na seção 4.1 e Anexo IV, estabelece interface gráfica com o sistema MEF WARP3D, e faculta observar diretamente a evolução dos campos de tensões e deformações na região sob influência da fratura, entre outros efeitos mecânicos de embotamento, bem como de crescimento de vazios, etc.

Finalmente, demonstra-se que as metodologias numéricas aplicadas permitem desenvolver procedimentos de caracterização de propriedades de resistência ao fraturamento, e concorrem para a aplicação dos mesmos parâmetros de tenacidade a procedimentos de Avaliação Críticos de Integridade (ACI). Particularmente, as Metodologias se coadunam com Métodos Avançados de Avaliação de Integridade (Advanced Assessment Level III da BS-7910).

REFERÊNCIAS

- ABAL Associação Brasileira do Alumínio (2018): Estatísticas 2018. Disponível em: <http://abal.org.br/estatísticas/nacionais/perfil-da-industria>. Acesso em 28/11/2018.
- ABAL Associação Brasileira do Alumínio (2018): Estatísticas 2018. Disponível em: <http://abal.org.br/projeto-abal-alumínio-nas-escolas>. Acesso em 28/11/2018.
- ABDO, N.A.(1983) “Estruturas de Alumínio” Editora Pini , São Paulo SP Brazil
- ALUMINUM ASSOCIATION, (2006): “International Alloy Designations and Chemical Composition Limits for Wrought Aluminum and Wrought Aluminum Alloys”
- ALUMINUM ASSOCIATION, (1994): “Specifications for aluminium structures- Aluminum Design Manual”, 2 Vols, Washington DC.
- AMERICAN WELDING SOCIETY. “AWS D1.2/D1.2M (2008): Structural Welding Code—Aluminum”. Miami FL. USA: American Welding Society, 5 ed..
- ANDERSON, T.L.,(2017): “Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications”, CRC Press, 4th ed. 2017.
- ANSI H35.1, (2017): “American National Standard Alloy and Temper Designation Systems for Aluminum Alloys”, American National Standards Institute, Washington DC, USA.
- APPOLINÁRIO, F. (2012) “Metodologia da ciência: filosofia e prática da pesquisa”.São Paulo SP Brazil, 2^a Edição.
- ASTM - ASTM E 1820 (2001) “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”, American Society for Material Testing and Materials Annual Book of Standards, Vol.03.01, PA USA.
- ASTM – ASTM B209-14 (2014) “Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate” American Society for Material Testing and Materials Annual Book of Standards, Vol. 02.02, PA USA
- ASTM – ASTM B928 (2015) “Standard Specification for High Magnesium Aluminum-Alloy Products for Marine Service and Similar Environments”. American Society for Material Testing and Materials Annual Book of Standards, Vol.03.01, PA USA
- ASTM E399-17 (2017)” Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{Ic} of Metallic Materials” American Society for Material Testing and Materials Annual Book of Standards, Vol. 03.01, PA USA
- ASTM E 813 (1989), “Standard Test Method for an Improved Definition of J_{Ic} Using New Blunting-Line Equation” American Society for Material Testing and Materials Annual Book of Standards, PA USA
- ASTM E1823 (2011) “Standard terminology relating to fatigue and fracture testing. American Society for Testing and Materials”; op cit (Zhu, Xian-Kui and Joyce, James A.

AXELRAD, D.R. (1978) “Micromechanics of Solids” Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, The Netherlands

BATTISTE, T. J. (2010) “Fracture Toughness: Evaluation of Analysis Procedures to Simplify JIC Calculations” MSc Thesis University of Tennessee, Knoxville USA

BARRAGAN, V. Neto (2011) “Simulação Computacional em Camisas de Motor Construídas em Ligas de Alumínio Silício” Dissertação (Mestrado Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo.

BONFITTO, Guilherme Bruno Barroso (2016), “Estudo do Comportamento Mecânico da Liga de Al-Mg-Si 6005-A Solubilizada e Envelhecida”. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia Universidade Presbiteriana Mackenzie- São Paulo SP.

BS 7910 British Standard Institute (2005) “ Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”, London UK.

BS 8118: British Standard Institute (1991) 'Structural use of aluminium - Part 1 Code of practice for design', BSI, London UK 1991.

B.P. PHERSON and J.D. LANDES (2007) “A Direct Estimate of J_{Ic} from the Load x Displacement Record”. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 30, No. 2, pp. 73-86

CALLISTER, W.D.JR e RETHWISCH, D.G (2016 ed.)”Ciencia e Engenharia de Materiais – Uma introdução” 9ª ed. 2014 – Livros Tecnicos Científicos Ed. Ltda, Rio de Janeiro.

CICERO, S. CINAR, Y., M.Kocac (2007)”Aplicación del procedimiento Europeo FITNET al análisis a fractura de paneles de aluminio soldados.” Anales de la Mecánica de Fractura, Vol 2.

C. DAWES, W. THOMAS, TWI Bulletin 6 (1995) , The Welding Institute London U.K. November, p. 124.

COUTO, A.A e VATAVUK, J. (2017):”Comportamento Mecânico dos Materiais II – Notas de Disciplina” UP Mackenzie, Programa de Pós Graduação Stricto Sensu – Engenharia de Materiais e Nanotecnologia.

DAVIS, J.R. (2001) “Alloying: Understanding the Basics – pp 351-416 Aluminum and Aluminum Alloys”, – ASM American Society for Metals, Ohio USA.

DOMINGUES, N.I. Jr (2011) “Estudo do Comportamento Mecânico de Ligas Alumínio Cobre 2024 Solubilizada e Envelhecida para Aplicações Aeronáuticas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia Universidade Presbiteriana Mackenzie- São Paulo SP.

DNV Det Norske Veritas (2011): “Rules for Classification of High Speed, Light Craft and Naval Surface Crafts”, Høvik, Norway

DNV Det Norske Veritas OS-E-401 (2012): “Helicopter Decks”, Høvik, Norway

DRDC Defence Research and Development – Ministry of Defense Canada (2007) “SR-1447 Fracture Mechanics Characterization of Aluminum Alloys for Marine Structural Applications”.

EAA European Aluminium Association (1994) “Applied Fracture Mechanics – Talat Lecture 2403”.

EN 1999-1-1:2000, Eurocode 9: “Design of aluminium structures”. CEN European Committee for Standardization, Geneva, Suica.

F. HACHEZ, A. G. ATKINS, R.H. DODDS, T. PARDOEN: “ Micromechanics-based Modelling of Ductile Tearing in Thin Plates”.

GELFAT, M.Y., TIKHONOV, V.(2007) “RUSIAN ALUMINIUM ALLOYS FOR ULTRA DEEP WATER PRODUCTION RISERS”, International Conference on Subsea Technologies SubSeaTech’ 2007, St. Petersburg, Russia.

M. GELFAT, N. GREBETSOV, A. PODRAZHÁNSKY, B. VYGODSKY and V. TIKHONOV, V. SHAPOSHNIKOV, V. CHIZHIKOV (2004): ” High-Strength Aluminum Alloys for Deepwater Riser Applications” OTC 16185 paper – Offshore Technology Conference -2004 – Houston Texas USA

GIANFRANCO DE MATTEIS, G. BRANDO, S.PANICO, F. MAZZOLANI (2010): “Pure aluminium, an innovative material in structural engineering” Università Degli Studi di Naples. Construction and Building Materials, Vol 26 (2012) pp 677–686, Elsevier

GRIFFITH, A.A.:1921” The phenomena of rupture and flow in solids”. Phil.Trans. Royal Society. Vol. 221 A, pp 163-198 London UK.

GULLERUD, A.S., XIǃOSHENG Gǃo, DODDS, Robert H., R. HAJ-ALI (2000) *Simulation of ductile crack growth using computational cells: numerical aspects*. Engineering Fracture Mechanics. **66**(1): p. 65-92.

GURSON, A.L. (1981) “Continuum Theory of Ductile Rupture by void nucleation and growth: Part I – Yield Criteria and Flow rules for porous ductile media”. Journal of Engineering Materials and Technology, vol.99, pp. 2-15.

GUO, J. (2013) “An experimental and numerical investigation on damage evolution and ductile fracture mechanism of Aluminum Alloy” PhD Thesis, The University of Tokushima, Tokushima Japan.

GWÓŹDŹ, M.(2014) , “Differentiating the Reliability of Aluminium Structures” Technological Transactions, Institute for Building Materials and Structures, Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology – Poland.

HATCH, JOHN et alli (1983): “Aluminum Properties and Physical Metallurgy”, American Society for Metals Ohio USA.

HERTZBERG, Richárd W (1976) "Deformation and fracture mechanics of engineering materials". John Wiley & Sons, New York USA, 4th.

ISO-209 (2007) “Wrought aluminium and aluminium alloys - Chemical composition and forms of products - Part 1: Chemical composition” International Standards Institute ISO, Vernier, Geneva, Switzerland.

J.K.DONALD, AMY BLAIR et alli (2007) “SR-1447 Fracture Mechanics Characterization of Aluminum Alloys for Marine Structural Applications”. Defence R&D Canada – Atlantic Contract Report DRDC Atlantic CR 2007-019.

J. R. RICE (1968) “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks” Journal of Applied Mechanics, vol. 35, pp. 379-386.

J. R. RICE (1973) “Limitations of Small Scale Yielding Approximation for Crack Tip Plasticity” Journal of Mechanics & Physics of Solids, vol. 22, Pergamon Press UK, 1974

J.R. DAVYS (2001) “Alloying – Understanding the Basics, Aluminum Alloys, p351-416, ASM International – American Society of Materials

GUO, J. (2013) “An experimental and numerical investigation on damage evolution and ductile fracture mechanism of Aluminum Alloy” PhD Thesis, The University of Tokushima, Tokushima Japan.

J.L. LEMAITRE and J. CHABOCH (1990) “Mechanics of Solid Materials” Cambridge University Press, New York NY USA

K.C. KOPPENHOEFER, A.C. GULLERUD, C. RUGGIERI, R.H. DODDS, B.E. HEALY (1994) “WARP3D: Dynamic Nonlinear Analysis of Solids Using a Preconditioned Conjugate Gradient Software Architecture. University of Illinois at Urbana-Champaign Department of Civil Engineering- Urbana, Illinois USA.

K. O PEDERSEN, I. WESTERMANN, T.FURU, T. BORVIK, O.S. HOPPERSTAD, (2016) “Influence of microstructure on work-hardening and ductile fracture of aluminium alloys” Technical Publication Centre for Research-based Innovation (CRI) at the Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim Norway.

KOSTEAS, DIMITRI et alli (1994). “Applied Fracture Mechanics” TALAT – Training in Aluminium Application Technologies -Lecture 2403, European Aluminum Association, Bruxelles - Belgica

LANDES JD, SHAFFER D.H. (1980) “Statistical characterization of fracture in the transition region”. In: Fracture mechanics: 12th conference. ASTM STP-700. American Society for Testing and Materials;. p. 368–82

MALAVAZI, Jefferson. Caracterização microestrutural dos compostos intermetálicos e seu efeito no comportamento mecânico nas ligas de Al-9%Si com adições de Fe e Mn. 2013. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014

MADDOX, S.J. (2003), Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures, International Journal of Fatigue, Vol. 25, Issue 12, 1359-1378

MAZZOLANI, Federico et alli (2008) “Eurocode 9: Design of aluminium structures”. CEN/TC 250/SC 9 – Comité European Normative.

McCLINTOCK, F.A. (1968): “A criterion for Ductile Fracture by the Growth of holes” J. Appl. Mech. 35, 363-371

MESSNER, M.C. (2014) “Micromechanical Models of Delamination in Aluminum-Lithium Alloys” PHD Thesys, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois USA.

MISHRA R.S. Mishra, MA Z.Y. (2005) “Friction stir welding and processing”, Materials Science and Engineering R 50 pp. 1-78

MONTEIRO, W.A. e CARRIO, J.A.G. (2016) “Caracterização de Materiais – Notas de Aula” – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais e Nanotecnologia – U.P. Mackenzie.

MUSTAFA KOCAK et alii (2006), “FITNET Final Technical Report”. GKSS Research Center, Institute for Materials Research D-21502 Geesthacht, GERMANY

MUSTAFA KOCAK, S. CICERO, C.YENI (2007), “Aplicación del procedimiento europeo FITNET al análisis a fractura de paneles de aluminio soldados” Anales de la Mecánica de Fractura, Vol 2 -24-II, pp 573-580.

MTS (2015):” Servohydraulic Material Testing Standard Frame”, MTS Systems Corporation – Technology Drive Minnesota USA available at <https://www.mts.com>

DE ALUMÍNIO SOLDADOS”. GKSS Research Center, Institute for Materials Research D-21502 Geesthacht, GERMANY

PAZ GONZALES, FERNANDO, J. (2016) “Análise do Comportamento em Fadiga da Liga de Alumínio 7075 Solubilizada e Envelhecida”, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Materiais, Universidade Presbiteriana Mackenzie- São Paulo SP

PYTHON, V2.7-10 <https://www.python.org/downloads/release/python-2710/>
Acessada em 22/04/2018

SIELSKI, R.A. (2007) “Research Needs in Aluminum Structures”, 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures Houston, Texas, United States of America

RAMBERG, W and OSGOOD, R.W (1943):” Description of stress-strain curves by three parameters” NACA TN-902 -National Advisory Committee for Aeronautics; Washington, DC, USA.

RICE, J.R. and TRACY, D.M. (1969) “On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. J. Mech. Phys. Solids 17.201-217.

ROUSELLIER, G. (2001) Dissipation in porous metal plasticity and ductile fracture. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 49(8): p. 1727-1746. Op. Cit. (Guo, 2013)

RON COBDEN, et alii (1994) “Aluminium: Physical Properties, Characteristics and Alloys” EAA European Aluminum Association TALAT Lecture 1501

RUGGIERI, C; DODDS, R.H. (1996) “Numerical Modelling of Ductile Crack Growth in 3-D using computational cell elements, International Journal of Fracture Vol.82, pp.67-95.

R. ZHANG, S.P. KNIGHT, R.L. HOLTS, R. GOSWAMI, C.H.J. DAVIES, N. BIRBILIS, (2016): “A Survey of Sensitization in 5xxx Series Aluminum Alloys”, CORROSION;72(2):144-159. NACE International Houston, Texas USA.

SHĀOFAN, L., REN, B., HU, P. (2011) “Meshfree Method for Ductile Fracture with Modified Gurson’s Model” University of California Berkeley, CA USA, Published Papers ASME/ASCE Structural Dynamics and Materials Conference

SINTAP (1999) “Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry : SINTAP; Final Report”, ENC European Normative Comiteee Project No. BE95-1426, Report No. BE95-1426/FR/7

SIELSKI, R.A. (2007) “Research Needs in Aluminum Structures” 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures – American Bureau of Shipping ABS, Houston, TX, United States of America.

SKILINGBERG, M.H. (2007) “Aluminum at Sea – Speed Endurance and Affordabiity”. Marine Log Aluminum Association.

SSC - Ship Structure Committee (2007) “SSC-448 SR-1447 Fracture Mechanics Characterization of Aluminum Alloys for Marine Structural Applications”, US-Coast Guard Washington USA.

SUNDAY, S. et alli (2005) “Aluminum Design Manual: Specifications & Guidelines for Aluminum Structures”. Arlington: The Aluminum Association, Inc.

TROVATO, E.; RUGGIERI, C. (1999) ”A Framework to Correlate Effects of Constraint Loss and Ductile Tearing on Fracture Toughness - Part II: Fracture Under Small Scale Yielding Conditions.” 15 Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM 99 (Congresso), Aguas de Lindoia SP ISBN: 85-85769-03-3 CDD 19 - 620.1.

TROVATO, ET e RUGGIERI, C.(2001): “Micromechanics Characterization of Constraint and Ductile tearing effects in Small Scale Yielding fracture.” International J. of Solid and Structures, 38(10-13):2171-87.

TROVATO, Euclides. “Potencial de aplicação do Alumínio em Estruturas de Engenharia” Revista Alumínio e Cia – Alcoa – Dezembro 2013.

TROVATO, Euclides (2010) “Avaliação de Ductilidade de Componentes Estruturais de Alumínio – Meodologia Pushover” - IV Congresso Internacional do Alumínio – ABAL Associação Brasileira do Alumínio, São Paulo SP.

TROVATO, E. (2015): “Projeto de Sistemas de Estruturas de Alumínio Soldadas”. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Soldagem – Instituto Mauá de Tecnologia ITM– International Welding Institute (IIW) – São Caetano do Sul SP

TROVATO, E. A.A. COUTO (2018): “ Micromechanical Characterization of Fracture Toughness Parameter of Aluminum Alloys of Naval application” – Proceedings of the 27th Water Transportation, Naval and Offshore Construction Congress - Brazilian Naval Engineering Society SOBENA.

UTKARSH, A. "PARAVIEW V5.5 Users Guide Manual, Kitware Inc, 2017 disponível em <https://www.paraview.org/downloads>, acessível em 20/12/2018

UP Mackenzie, Programa de Pos Graduação Stricto Sensu – Engenharia de Materiais e Nanotecnologia. Disponível em: < <http://up.mackenzie.br/stricto-sensu/Engenharia-de-materiais-e-nanotecnologia/grupos-e-projetos-de-pesquisa>>. Acesso em: 25 agosto 2016

WARP-3D (2017), HEALY,B, A. GULLERUD, K. KOPPENHOEFER et alli, "WARP3D-Release 17.8.2 3-D Dynamic Nonlinear Fracture Analyses of Solids Using Parallel Computers" University of Illinois at Urbana-Champaign – USA – June 2017.

W.M. THOMAS, E.D. NICHOLAS, J.C. NEEDHAM, M.G. MURCH, P. TEMPLESMITH, C.J. DAWEW, G.B. (1991) Patent Application No. 9125978.8.

XIA, L.; SHIH, C.F.(1995) "Ductile Crack Growth - I. A numerical study using computational cells with microstructurally-based length scales", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol.43, pp.233-259.

XIA, L.; SHIH, C.F. (1995) "Ductile Crack Growth - II. Void nucleation and geometry effects on macroscopic fracture behavior", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol.43, pp.1953-1981.

ZHU, XIAN-KUI, JOICE, J. A. 2012 ("Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization". U.S.Navy Research paper 49.

ANEXO I – CV LATTES

Curriculum Lattes:

Euclides TROVATO Neto

Acessível em:

<http://lattes.cnpq.br/8693132162440544>

ANEXO II LIGAS DE ALUMÍNIO DE USOS ESTRUTURAIS

Neste anexo são apresentadas concisamente características gerais dos sistemas de ligas de alumínio de aplicação estrutural.

Como discutido em (MAZZOLANI, 2008), as ligas de alumínio para aplicações estruturais constituem uma família de distintos grupos de ligas, cujas características metalúrgicas e propriedades mecânicas variam amplamente de um grupo para outro. Variam sobremaneira dentro de cada grupo isolado, em função de distintas composições de ligas, assim como de processos de tratamentos termo-mecânicos, e de padrões microestruturais. Descrições mais abrangentes, são referidas a (INACIO DOMINGUES, 2011), (HATCH, JOHN et alli, 1983), assim como em (RON COBDEN, 1994), e referências neles citadas.

Informações complementares são referidas a literatura técnica tais como ASM American Society for Metals (HATCH, 1983), e (DAVIS, 2001), com descrições de metalurgia física e microestruturais detalhadas de distintos grupos de ligas de alumínio.

Sistemas de designações normativa de ligas de Alumínio:

A nomenclatura internacionalmente reconhecida para designação de ligas de alumínio estruturais forjáveis, tem por referência a normativa (ANSI H35.1, 2017).

Em (ALUMINUM ASSOCIATION, 2006) se referenciam quadros de ligas correspondentes identificadas com a notação internacional (ISO-209, 2007).

Do ponto de vista de aplicações tecnológicas e estruturais, as ligas de alumínio forjáveis podem ser agrupadas em oito séries de AL-1XXX a AL-8XXX, ou grupos de composições metalúrgicas, e mais uma série livre AL-9XXX, na classificação da Aluminum Association.

Cada liga sendo tipicamente denotada por uma sequência de 4 algarismos. O primeiro dos quatro caracteriza o elemento de liga principal. O segundo número se refere ao sequencial de modificação da liga original, e os dois últimos números se referem ao sequencial variante (ou ao percentual de alumínio no caso da liga AL-1XXX), (HATCH, JOHN et alli (1983).

Por exemplo, considere a liga AL 5183:

O primeiro algarismo se refere ao grupo de ligas Al-Mg AL-5XXX, enquanto que o segundo se refere primeira modificação, da variante 83 da liga original AL-5083.


Para ligas fundidas utiliza-se simplificada o conceito de 3 algarismos sequenciais de identificação, e um sequencial indicial complementar. Igualmente, o primeiro dos três dígitos indica o elemento de liga principal. O segundo e terceiro algarismos, arbitrariamente designam a sequência da liga, enquanto que o sufixo indicial denota que o componente seja fundido (1) ou um lingote (2).


No presente contexto, será dedicada maior atenção aos grupos de materiais forjáveis (*wrought alloys*), por concisão.

A denominação dos sistemas de ligas de alumínio forjáveis, e seus componentes constituintes principais, referidas a (ALUMINUM ASSOCIATION, 2006), e condições de endurecimento e tratamento termomecânico, descrições mais detalhadas sendo reportadas a (INACIO DOMINGUES, 2011). A tabela abaixo, apresentada com notações complementares desta dissertação, indica características gerais de sistemas de ligas forjáveis e fundidas, em relação aos elementos principais, mecanismos de endurecimento e tratamento termo-mecânico, a (ALUMINUM ASSOCIATION, 2006).

Tabela Anexo II-1 – Sistemas de Ligas de Alumínio Estruturais

Designação de ligas de Alumínio (*)

		AA	Major Alloying Element	Atoms in Solution	Work Hardening	Precipitation Hardening	
FORJÁVEIS	Wrought Alloys	1xxx	None		X		Non-Heat Treatable Alloys 
		3xxx	Mn				
		4xxx	Si	X	X		
		5xxx	Mg				
	6xxx	Mg + Si		(X)		Heat Treatable Alloys 	
	2xxx	Cu	X		X		
	7xxx	Zn					
	8xxx	Other					
FUNDIDOS	Casting Alloys	1xx.x	Min. 99% Al				Non-Heat Treatable Alloys 
		4xx.x	Si				
		5xx.x	Mg	X			
		3xx.x	Si + Mg (Cu)				Heat Treatable Alloys 
		2xx.x	Cu				
		7xx.x	Zn	X		X	
8xx.x	Sn						
9xx.x	Unused						

 Tratáveis Termicamente  Não Tratáveis Termicamente

(*) Aluminum Association - ADM ASTM B-209

Tabela Anexo II-2 – Sinóptico de características de resistências mecânicas - Ligas de alumínio estruturais - (J.R. DAVYS, 2001).

Strength ranges of various wrought aluminum alloys			
Aluminum Association series	Type of alloy composition	Strengthening method	Tensile strength range
			MPa
1xxx	Al	Cold work	70–175
2xxx	Al-Cu-Mg (1–2.5% Cu)	Heat treat	170–310
2xxx	Al-Cu-Mg-Si (3–6% Cu)	Heat treat	380–520
3xxx	Al-Mn-Mg	Cold work	140–280
4xxx	Al-Si	Cold work	105–350
5xxx	Al-Mg (1–2.5% Mg)	Cold work	140–280
5xxx	Al-Mg-Mn (3–6% Mg)	Cold work	280–380
6xxx	Al-Mg-Si	Heat treat	150–380
7xxx	Al-Zn-Mg	Heat treat	380–520
7xxx	Al-Zn-Mg-Cu	Heat treat	520–620
8xxx	Al-Li-Cu-Mg	Heat treat	280–560

Em sequência se descrevem as características gerais e aplicações das ligas:

Série 1000: Alumínio puro

A porcentagem de alumínio é muito alta (98,8% a 99%). Em função do teor de impurezas, os padrões microestruturais exibem fases de Alumínio-Ferro e Alumínio-Ferro-Silício.

Típicamente seu limite elástico é relativamente baixo ($\sigma_{0,2} \cong 30 \text{ Nmm}^{-2}$), mas sua ductilidade é excelente, sendo o alongamento final $\epsilon_u \cong 30\%$ a 40%. Este sistema de ligas não sendo tratáveis termicamente, tem mecanismo de endurecimento por encruamento.

Em termos de aplicações, as indústrias elétricas e químicas usam em cabos e tanques.

Estes materiais até recentemente eram pouco utilizados estruturalmente. Todavia este cenário se modifica radicalmente com o desenvolvimento de novas ligas.

A liga de alumínio tratada EN-AW 1050A H24, que é um alumínio quase puro, é proposta como material base para a fabricação de componentes passivos para dissipação de energia, propiciando proteção sísmica de edifícios. O emprego de tal material é

uma novidade no campo da engenharia civil. Por esta razão, as principais propriedades mecânicas características tem sido pesquisadas (Gianfranco de Matteis, F. Mazzolani et alli, 2008).

Entretanto, há aplicações notáveis para construção de cascos de embarcações leves, de alta velocidade. Pode ser usado em estruturas de placas e painéis.

Série 2000: ligas de Alumínio-Cobre

O cobre representa um dos elementos de liga mais importantes para o alumínio, devido a sua grande solubilidade, em concentrações entre 1% e 10%, propiciando incremento de resistência mecânicas. Microestruturalmente tais sistemas de ligas apresentam padrões bastante complexos, em múltiplas fases, em função da combinação do cobre com adição de elementos para melhorar a resistência mecânicas, ou propriedades de resistência a corrosão, e controle de granulação, usinabilidade.

Tais ligas são tratáveis termicamente, e admitem tanto mecanismo de endurecimento por solubilização, quanto por encruamento e por precipitação.

Quando submetido a tratamento térmico, o limite elástico $f_{0,2}$ pode aumentar significativamente até $\sigma_{0,2} \cong 300.0 \text{ Nmm}^{-2}$, com ductilidade suficiente, sendo $\varepsilon_u \cong 10$ por cento. Apresenta boas condições de resistência mecânicas e ductilidade a baixas temperaturas, como também apreciável resistência mecânica a deformações lentas em altas temperaturas. Como a resistência à corrosão dessas ligas não é muito alta, é necessário protegê-las, especialmente em ambientes corrosivos.

Sua soldabilidade comumente apresenta dificuldades, devido a sensibilidade a ocorrência de fraturas durante a soldagem por efeito de solidificação (*solidification cracking sensitivity*), limitando as aplicações de Engenharia estrutural.

Estas ligas são geralmente produzidas sob a forma de perfis, chapas e tubos.

São aplicadas nas indústrias aeronáuticas e aeroespaciais, e em conexões mecânicas.

Série 3000: ligas de Alumínio-Manganês

Estas ligas em geral, contendo aproximadamente 1% de teor de Manganês, não podem ser tratadas termicamente e evidenciam mecanismos de endurecimento por solução e por encruamento. Atingem nível de resistência mecânica moderados, ligeiramente maior do que os de ligas de alumínio puro, mantendo ductilidade elevada. O elemento de liga Manganês propicia maior resistência mecânica. Todavia formando componentes intermetálicos não dissolvidos, que concorrem para limitar a ductilidade, e também limitam a resistência a corrosão intergranular.

Eles são entretanto relativamente bem resistentes à corrosão, sendo por isso aplicadas a tanques e vasos de pressão em indústrias químicas. Aplicações estruturais específicas são painéis de chapas em estruturas de unidades navais leves de alta velocidade, sujeitas a impactos, assim como telhas para sistemas de coberturas de edificações civis.

Série 4000: ligas de Alumínio-Silício

As propriedades dessas ligas são semelhantes às da série 3000. Não sendo tratáveis termicamente e apresentando mecanismos de endurecimento por solução sólida e por encruamento.

No entanto, eles não são frequentemente usados em estruturas e componentes, exceto em aplicações arquitetônicas, exceto como materiais de deposição de soldagem e ou brasagem.

Série 5000: Ligas de Alumínio-Magnésio

O magnésio apresenta elevada solubilidade no alumínio sólido. Embora tais sistemas de ligas binárias não apresentem substancial acréscimo de endurecimento por solubilização para teores de concentração menores que 7%, as características de endurecimento mecânico por encruamento permitem maior incremento da resistência mecânicas e ductilidade. Não são tratáveis termicamente. Suas propriedades mecânicas podem ser comparativamente mais altas do que os correspondentes às séries 1000, 3000 e 4000.

A resistência mecânicas pode ser aumentada, devido a influência de componentes de liga Magnésio e Manganês, quando são deformados a frio (encruados), atingindo níveis de limite elástico tipicamente $\sigma_{0,2}$ até $\cong 200 \text{ Nmm}^{-2}$ e sua ductilidade se mantém ainda bastante elevada ($\epsilon_u \cong$ até 10%).

A resistência à corrosão também é alta, especialmente em ambientes marítimos, quando a quantidade de Mg é inferior a 6%.

Microestruturalmente, tais sistemas de ligas apresentam padrões complexos em função da concentração de Magnésio, ocorrendo como solução sólida, e como eutético fases β (Mg_2Al_3) com o crescimento do teor de concentração de Magnésio. Do mesmo modo, com o crescimento da concentração são formados componentes Mg_2Si de baixa solubilidade. Quando a concentração do Magnésio excede a 3.5% as fases estáveis e metaestáveis de Mg_2Al_3 formam precipitados no contorno dos grãos e no interior dos grãos (HATCH, 1983).

O encruamento a frio das ligas do grupo 5000 induz a formação de bandas de deformações, entre as quais se depositam precipitados ricos em Magnésio, ao redor dos grãos.

- A adição de Manganês (Mn) propicia maior precipitação de fases de Magnésio, aumentando a resistência mecânica e estabilidade da liga.

Melhora sensivelmente as propriedades de resistência a corrosão intergranular, e corrosão sob tensão. Entretanto, quando o Mn se apresenta como componente intermetálico não dissolvido concorre para diminuir a ductilidade;

- Cromo (Cr) em pequenas concentrações (<0.35%) melhora as propriedades de resistência ao fraturamento sob tensão (*Stress Corrosion Cracking*);
- Zinco (Zn) em pequenas concentrações, incrementa a resistência mecânica, e em combinação com Cr melhora as características de resistência a corrosão, conferindo uma proteção eletrolítica;
- Cobre (Cu) e Ferro (Fe) tendem a diminuir tanto a resistência mecânica quanto a performance de corrosão. Em particular a concentração do elemento Fe tende a ser limitada a 1%, por representar impurezas pela produção de distintos componentes em fases terciárias $FeAl_3$, e Fe_2Al_7 que potencialmente constituem zonas locais de fragilização.
- Silício (Si) em pequenas concentrações propicia relativa melhora nas propriedades de retração especialmente na soldagem, como também relativa resistência ao desgaste e abrasão superficiais.
- Ferro (Fe) e Silício (Si) combinadamente podem ser produzir constituintes de fases terciárias Fe_2SiAl_7 (α), $FeSiAl_5$ (β), $FeSiAl_4$ (δ) e $FeSiAl_3$ (γ) que igualmente induzem padrões microestruturais de plaquetas aciculares, que representam uma distribuição de fraturas microscópicas locais.

As ligas do grupo AL-5XXX são frequentemente usadas em estruturas soldadas. Quando soldadas, estas ligas podem perder os efeitos do endurecimento por encruamento, o que resulta no amolecimento da HAZ adjacente à solda.

Em geral tais ligas apresentam boa soldabilidade e alta produtividade com processo GMAW (Gas Metal Arc Welding) sob atmosferas de soldagem de gas Argônio, ou atmosferas de Argônio e Hélio. Se garante tipicamente 80% a 90% da resistência ao escoamento $\sigma_{Y,0.2}$ do metal base. Como também com processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) (AWS D1.2, 2015).

Aplicações típicas são conjuntos de painéis de chapas soldadas, de grande volume e espessura, típicos de estruturas navais e oceânicas, embarcações militares, e plataformas marítimas, infraestruturas de pontes entre outras tais como tanques, vasos sob pressão, e componentes para aplicações criogênicas.

Em relação as ligas consideradas nesta dissertação, a liga 5083 é uma das ligas de alumínio mais utilizadas para componentes da cascos enrijecidos em unidades flutuantes de alta velocidade, submetidas a condições dinâmicas de solicitações severas. Embora os materiais da liga 5083 apresentem adequado desempenho em aplicações marinhas, não foram desenvolvido especificamente para esta condição ambiental. A liga 5383 foi positivamente desenvolvida para aperfeiçoar o desempenho e comportamento do alumínio no meio marinho (DRDC, 2007). Materiais da liga AA 5086 são alternativos, pela sua resistência a corrosão marinha e atmosférica.

A forma e densidade dos elementos de fases β (Mg_2Al_3) dependem da concentração relativa de Mg, como também do histórico de tratamento termo-mecânico durante a produção da liga, assim como da espessura. Enquanto que transformações de encruamento a frio induzem a formação de bandas de deformação plásticas demarcadas por precipitados. Os padrões de formação destes precipitados variam desde partículas dispersas isoladas nas fronteiras de grãos, agrupamentos adensados formando linhas de precipitados, ou aglomerados globulares grosseiros.

Ocorrem em escalas da ordem de 5 nm a 15 nm na fronteira dos grãos, β (Mg_2Al_3), zonas de fragilidade locais (*local brittle zones*), de maior microdureza e menor ductilidade, que formam distribuições de microdefeitos na forma de microtrincas.

Trabalhos de (ZHANG, KNIGHT et alli, 2016) descrevem tais características, em relação ao tratamento térmico dessas ligas, composição e sua microestrutura.

As fases β (Mg_2Al_3) dispersas, sendo mais resistentes a corrosão intergranular, enquanto as fases em linhas exibem propensão a corrosão intergranular.

Estas ligas portanto podem revelar maior susceptibilidade a corrosão intergranular, e ao fraturamento sob efeito de corrosão sob tensão (*SSC Stress Corrosion Cracking*), e corrosão lamelar ou exfoliação, que caracterizam o efeito de sensitização.

A sensitização se refere ao efeito da formação de precipitados de fases β (Mg_2Al_3), que frequentemente representa potencial efeito deletério quando presentes na fronteira dos grãos. A fase β sendo eletroquimicamente ativa, anódica, pode ser consumida e ou dissolver como eletrólito.

Série 6000: Ligas de Alumínio-Silício-Magnésio

A combinação dos principais elementos de liga pseudo-binária Al-Mg₂Si forma fases de silicato de magnésio, concorrendo para aumento da resistência mecânica.

Tais sistemas de ligas, tratáveis termicamente, permitem ativar mecanismos de endurecimento por solução sólida, por precipitação e por encruamento. Pelo tratamento térmico, sua resistência é aumentada tipicamente até $\sigma_{0,2} \cong 250 \text{ Nmm}^{-2}$, com relativamente boa ductilidade, normalmente até $\varepsilon_u \cong 12\%$.

Estudos de caracterização de comportamento mecânico de ligas do Grupo 6XXX (BONFITTO, 2016) apresentam minuciosas observações de padrões metalúrgicos e microestruturais, e constatações sobre seu comportamento micromecânica e reológico, que estabelecem uma referência qualitativa e conceitual para o presente trabalho.

A Liga AL-6XXX apresenta em geral boa resistência a corrosão. No entanto, podem diferir nas distintas ligas do grupo, quando se as utilizam em ambientes atmosféricos úmidos, sob elevada salinidade, ou marítimos submersos.

Tais ligas são particularmente adequadas para perfís e componentes obtidos pelo processo de extrusão, mas também podem ser produzidos tubos laminados, tubos extrudados, assim como em chapas de várias espessuras.

Essas ligas são usadas tanto em estruturas soldadas (integrals) e em conexões aparafusadas ou rebitadas (diferenciais). Em estruturas mecânicas de veículos e aeronáuticas, assim como em múltiplas aplicações arquiteturas, e em edificações civis e industriais etc.

Série 7000: ligas de Alumínio-Zinco

Tais sistemas de ligas do grupo 7000, tratáveis termicamente, permitem ativar mecanismos de endurecimento por solução sólida, por precipitação e por encruamento. O elemento Zinco, sendo altamente solubilizado no Alumínio sólido, não altera apreciavelmente a microestrutura do alumínio (por exemplo AL7072).

Eles pode ser subdividido em duas subfamílias, dependendo da porcentagem de Magnésio e Cobre como o terceiro elemento de liga, e também de aditivos como Cromo, Manganês e Zircônio etc:

- As ligas AlZnMg atingem uma resistência elevada, com limite elástico $f_{0.2}$ superior a $f_{0.2} = 250.0 \text{ Nmm}^{-2}$ a $f_{0.2} = 500.0 \text{ Nmm}^{-2}$, e boa ductilidade ($\epsilon_u \cong$ até 10 %). Tais ligas apresentam bom desempenho e resistência à corrosão.

Este grupo de ligas encontra vastas aplicações estruturais, sendo particularmente adequadas em estruturas soldadas devido ao comportamento de auto-recuperação, que permite recuperar parcialmente resistência na zona afetada pelo calor de soldagem.

- AlZnMgCu ligas são as ligas de maior resistência após o tratamento térmico, atingindo $f_{0.2} = 500.0 \text{ Nmm}^{-2}$ até $f_{0.2} = 700.0 \text{ Nmm}^{-2}$. Por outro lado, tem relativa baixa soldabilidade, e não são resistentes à corrosão, pela presença de Cobre, exigindo proteção complementar por anodização ou pintura etc.

Os padrões microestruturais destas ligas são frequentemente de complexa diferenciação, variando os padrões singularmente com as condições de resfriamento, concentração de elementos de fase, acúmulo de deformações, entre outros fatores.

As ligas do grupo 7000 são produzidas sob a forma de perfis tratados termicamente, extrudados e laminados. Encontram crescentes aplicações estruturais em sistemas de estruturas aeronáuticas, pela maior relação resistência/peso, assim como em outros setores industriais. Por exemplo componentes mecânicos em veículos, entre outros.

Apresentam também boas propriedades de resistência a corrosão, devido a ação do Zinco, conferindo as ligas de Alumínio-Zinco propriedades de proteção eletrolítica contra corrosão.

Série 8000: ligas de alumínio-ferro-silício

Os componentes de Ferro e Silício são frequentemente identificados como impurezas nas ligas de alumínio. Duas fases ternárias principais entretanto podem manter equilíbrio com Alumínio, quais sejam Fe_2SiAl_8 (α) e FeSiAl_8 (β). Há várias outras fases coexistem, com as fases principais, estabelecendo padrões de formas microestruturais complexos, de difícil distinção, tanto os denominados “escrita chinesa” quando os padrões em lamelas ou plaquetas.

Esta série de ligas, devido às suas vantagens em fabricação, encontra mais e mais aplicação na indústria da construção, especialmente para estruturas de fachadas, todavia crescentes aplicações em estruturas aeronáuticas.

ANEXO III – MATERIAIS ENSAIADOS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E MICROESTRUTURAS

Neste anexo são descritas concisamente as principais características de composição química e microestruturais dos materiais ensaiados durante o desenvolvimento do programa de pesquisas SR-1447 (DRDC,2007), os quais foram adotados como base empírica desta dissertação. Ao fazê-lo toma-se o cuidado de priorizar a apresentação das características mecânicas e de parâmetros de tenacidade, assim como reológicos na seção 3.2 acima.

Os materiais considerados atendem nominalmente as ligas:

- 5083 H321 fornecido como 5083 H321
- 5086 H116 fornecido como 5086 H321
- 5383 H116 fornecido como 5383/5083 H116

III-1 Características de composição química dos materiais (DRDC, 2007)

A composição química dos materiais é indicada na Tabela III-1 (DRDC, 2007). Os lotes de sortimento de materiais ensaiados, são constituídos de chapas planas com espessuras 12.7 mm e dimensões 609.6 mm x 609.6 mm das quais foram extraídas amostras para ensaios de caracterização de propriedades químicas, metalúrgicas e ensaios de caracterização de propriedades mecânicas e de tenacidade ao fraturamento e fadiga.

Tabela III-1 – Composição química - Materiais AA 5053; AA 5086; AA 5383

(*)

Amostra	Material	Al %	Cr %	Cu%	Fe%	Mg%	Mn%	Si%	Ti%	Zn%	Zr%
5083-C-1	5083-H321	residuo	0.08	0.06	0.31	4.82	0.5	0.15	0.03	0.09	—
5086-C-1	5086-H116	residuo	0.19	0.07	0.31	3.79	0.45	0.14	0.03	0.03	—
5383-C-1	5383-H116	residuo	0.1	0.06	0.29	4.76	0.53	0.13	0.03	0.08	0.01

Ref.: (DRDC,2007)

De modo conciso, tendo em conta dados da Tabela 1, as características de composições de ligas acima serão comentadas qualitativamente, relativamente as características mecânicas dos metais ensaiados, com referência a (DRDC, 2007), com base em (HATCH, JOHN et alli, 1983).

Mais detalhes sobre os componentes de ligas do Grupo 5XXX, e também de ligas de outros grupos de ligas estruturais, são apresentados no Anexo II.

Magnésio (Mg):

Mg em concentrações entre 4.5% a 6% melhora as propriedades de resistência mecânica, e aumenta o nível de Tensão última de ruptura $\sigma_U < 430$ MPa, enquanto concentrações maiores diminuem a ductilidade dessas ligas.

A resistência a corrosão marinha dessas ligas se apresenta ótima, com concentrações relativas de Mg entre 4.5% a 5%, mesmo após soldagem.

Manganês (Mn) e Zircônio (Zr):

Melhoram as características de resistência mecânica de juntas soldadas e evitam o fraturamento durante a soldagem (*Cold cracking ou Hot short*), incrementando sensivelmente as propriedades de resistência a corrosão sob Tensão;

Cromo (Cr):

Cr em pequenas concentrações (<0.35%) melhora as propriedades de resistência ao fraturamento sob tensocorrosão (*Strêss Corrosion Cracking*);

Zinco (Zn):

Zn em pequenas concentrações, incrementa a resistência mecânica e, em combinação com Cr, beneficia as características de resistência a corrosão;

Cobre (Cu) e Ferro (Fe):

Tendem a diminuir tanto a resistência mecânica quanto a performance de corrosão. A concentração de Fe deve ser em geral limitada a 1%, por representar a presença de impurezas que constituem zonas locais de fragilização;

Silício (Si):

Em pequenas concentrações, melhora as propriedades de retração especialmente na soldagem, e na resistência ao desgaste e abrasão. Da combinação dos elementos Si e Fe, frequentemente formam padrões microestruturais de plaquetas aciculares, que podem representar ou ocasionar uma distribuição de fraturas microscópicas.

Características microestruturais dos materiais ensaiados (DRDC, 2007)

As características metalúrgicas microestruturais interpretação de macrografias são descritas em maior detalhe em (DRDC, 2007).

Na produção das ligas do grupo AL 5XXX de Alumínio Magnésio, são gerados partículas de Mg_2Al_3 como produtos eutéticos. Quando o teor de Magnésio Mg excede 3.5% as partículas de Mg_2Al_3 metaestáveis, se precipitam na fronteira ou no interior dos grãos (HATCH, 1983).

A forma e densidade destes elementos de fases β (Mg_2Al_3) depende da concentração relativa de Mg, como também do histórico de tratamento termo-mecânico ocorrido na produção do metal, assim como da espessura, e estado ou grau de encruamento a frio. Os padrões de formação destes precipitados variam desde partículas dispersas isoladas nas fronteiras de grãos, a agrupamentos adensados formando linhas de precipitados, ou a aglomerados globulares grosseiros.

Ocorrem em escalas da ordem de 5 nm a 15 nm na fronteira dos grãos, β (Mg_2Al_3), zonas de fragilidade locais (local brittle zones), de maior microdureza e menor ductilidade, que formam distribuições de microdefeitos na forma de microtrincas.

Se nota que fases β (Mg_2Al_3) dispersas sendo mais resistentes a corrosão intergranular, enquanto as fases em linhas exibem propensão a corrosão intergranular.

Estas ligas portanto podem revelar maior susceptibilidade a corrosão intergranular, e ão fraturamento sob efeito de corrosão sob Tensão (SSC Strêss Corrosion Cracking), e corrosão lamelar ou exfoliação, que caracterizam o efeito de sensitização.

A observação destes efeitos sobre o comportamento das ligas suscitou desenvolvimento em 2003 da especificação mais rigorosa (ASTM B928 2015) em, comparativamente as convencionais (ASTM B 209 2001). A primeira caracteriza as propriedades de ligas de Alumínio Magnésio do grupo AL-5XXX aplicáveis a estruturas primarias navais, e demais aplicações marítimas, expostas a contato frequente ou constante com agua marinhá, ou sob condições ambientais semelhântes.

No âmbito dos testes efetuados pelo programa SR-1447 (DRDC, 2007) observa-se:

A liga Al-5083 H321, atende ãos requisitos da especificação (ASTM B 928, 2015) quanto a propriedades mecânicas e de composição química. O tratamento H321, variante do H32, confere estabilização a baixa temperatura, apos execução de encruamento, com intensidade um pouco menor em relação a H32.

A inspeção metalográfica destas ligas indica que não são propensas a sensitização. Todavia evidenciam maior densidade de partículas de segunda fase β (Mg_2Al_3) e exibiram padrões de perdas de massa relativa por corrosão.

A liga Al-5086 H116, atende ãos requisitos da especificação (ASTM B 928, 2015) quanto a propriedades mecânicas e de composição química, exceto por maior variância em relação a Tensão de escoamento minima exigida.

Sendo H116 este material foi somente encruado.

Sob inspeção metalográfica, esta liga exibiu menores índices de fase β (Mg_2Al_3), não tendo evidenciado sensitização, entretanto exibiu tendência a exfoliação.

A liga Al-5383 H116 atende aos requisitos da especificação (ASTM B 928, 2015) quanto a propriedades mecânicas, e químicas. Exceto no que tange aos requisitos de níveis máximos admissíveis de Fe e Mn, e susceptibilidade a exfoliação. Em termos de exame metalográfico esta liga exibiu maiores índices de fase β (Mg_2Al_3) do que as demais ligas avaliadas. Sendo H116 este material também foi somente encruado.

Condições laboratoriais de instrumentação dos ensaios (DRDC, 2007)

Pertinente registrar as condições laboratoriais de instrumentação e de equipamentos adotadas nos ensaios de caracterização de tenacidade.

Os trabalhos experimentais foram efetuados por equipamento de ensaio tipo MTS Standard de atuação unidirecional, com pórtico de carga servo hidráulico, e célula de carga de capacidade $Q = 22.25$ kN (5000 lbf). O sistema de sensores eletrônicos apresenta interface para sistema computacional Adwind-Gold FTA de monitoramento e controle, com arranjo de instrumentação e aquisição de dados para execução de testes de tenacidade à fratura (MTS, 2015).

Sensores de tipo Clip Gage, modelo MTS 632.03B-30 (opt 006), aplicados para monitoramento de deslocamentos da linha de atuação da força aplicada (MTS, 2015).

Tal aprestamento vem garantir precisão e acurácia nas medições de *Compliance* (Força Aplicada x Deslocamento), nos suportes tipo pino (*Needle bearings*) fixados aos furos das amostras, minimizando efeitos de não linearidade na aplicação da carga, especialmente a atenuação e interferência por atrito no sinal. As condições de temperatura e umidade relativa mantidas constantes durante todo o ensaio.

A aplicação dos carregamentos nos ensaios, como preconizado pela (ASTM E1820, 2001), observa procedimentos para etapas de nucleação da fratura (pre-fraturamento), e crescimento inicial, com sequências de carregamentos e descarregamentos, até se atingir a condição estável de crescimento com controle da execução (etapa de crescimento estável).

Nota-se que cada ensaio tem interrupção quando se observa crescimento estável da trinca de aproximadamente 5.0 mm.

Maiores detalhes dos procedimentos experimentais referir a (DRDC, 2007).

No presente trabalho os procedimentos de análises numéricas desenvolvidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) buscam representar mecânicamente tais condições laboratoriais e construtivas amostrais estabelecidas pelos ensaios.

Tal ocorre especialmente no caso de modelos representativos de amostras de dimensões finitas de corpos de prova padrão ASTM E1820.

ANEXO IV – SISTEMA DE ELEMENTOS FINITOS WARP3D

De modo resumido, neste anexo são descrito de modo abrangente, características do Sistema de análises numéricas que aplicam o Método dos Elementos Finitos (MEF) WARP3D V 17.8.0. Tal sistema permite obter soluções numéricas para problemas de Mecânica dos Sólidos sob condições de não linearidade física e geométrica, possibilitando a aplicação de vários modelos de caracterização de comportamento mecânico e constitutivo de materiais, e a representação de parâmetros microestruturais consistente com os modelos reológicos, permitindo representar processos de danificação.

Detalhes sobre as formulações de elementos finitos aplicadas com auxílio do sistema WARP3D nesta dissertação, são referidas a WARP3D V 17.8.0 (KOPPENHOEFER et alli, 1994) e (WARP3D V17.8 MANUAL, 2017).

As equações de equilíbrio dinâmico são definidas segundo procedimento não-linear rigoroso, e as soluções de deformações são obtidas utilizando-se o método implícito incremental-iterativo, com iterações completas de Newton, aplicando algoritmos de controle de convergência de definição linearizada (*Line Search*). Aplicadas de modo adaptativo, tal permite eliminar efeitos de erros de condicionamento numérico, e condições de convergência em termos de balanços de energéticos de deformação e de equilíbrio de forças, e minimizando desequilíbrios de forças residuais nodais. A evolução de integração das equações não-lineares de equilíbrio e movimento é conduzida através do algoritmo de Newmark.

O sistema WARP3D exhibe satisfatórias condições assintóticas e variacionais de estabilidade e robustez numérica, evidenciadas mesmo sob condições de grandes solicitações e deformações impostas aos sólidos analisados, e eficiência algorítmica computacional. (WARP3D V17.8 MANUAL, 2017)

Efeitos de variação de condições de restrição mecânica sobre os campos de tensões e deformações locais, com o desenvolvimento de fratura dúctil, sob condição de plastificação limitada (SSY-Smal Scale Yielding, tratados e discutidos por (RUGGIERI e TROVATO, 1999). utilizando modelos discretos em escala geométrica finita de tipo Modified Boundary Layer.

A figura a seguir representa o fluxograma de execução do Sistema de Análises de Elementos Finitos WARP3D, e sequência de atividades tipicamente conduzidas na elaboração dos processamentos dos modelos de análises estruturais desta dissertação. Indicando ainda as interfaces com os sistemas e recursos máquina de processamento, e estrutura de gerenciamento de arquivos.

Neste conjuga-se com demais aplicativos de elaboração de arquivos de entrada de dados, assim como sistemas CAE auxiliares para modelagem e visualização de resultados das análises numéricas.

A arquitetura do Sistema WARP3D necessita ser complementada por sistemas de interfaces de visualização. Nesta dissertação foram utilizados recursos do sistema PARAVIEW de visualização de dados numéricos científicos, que consiste em aplicativo PYTHON de ambiente de interpretação computacional.

A seguir se descreve sucintamente os principais recursos.

O arquivo de WARP3D input, elaborado em formato de texto padrão ASCII através de editor convencional. Este contém o conjunto de dados de topologia estrutural, propriedades mecânicas e materiais, assim como especifica os comandos de execução do Sistema de Elementos Finitos, requeridos para os procedimentos de análises numéricas. A elaboração da topologia estrutural, geometria de nós, incidência de elementos finitos, especificações de condições de contorno essenciais (geométricas) e naturais (forças e deslocamentos impostos), frequentemente pode ser efetuada por sistema auxiliar externo tal como PATRAN ou FEMAP. Todavia, seria também possível elaborar programas específicos por exemplo em linguagem FORTRAN e ou C++ para gerar a topologia estrutural.

O processamento do Sistema WARP3D.EXE se executa em ambiente de comando DOS e especificando-se o arquivo de entrada de dados <input.inp> e de resultados <output.out>.

O Sistema WARP3D.EXE após o processamento, gera um conjunto de arquivos de resultados solicitados de tensões e deformações, queira em formato binário queira em formato texto/ASCII. Igualmente, elabora bases de dados de pós-processamento e integração com interfaces gráficas tipo PATRAN.

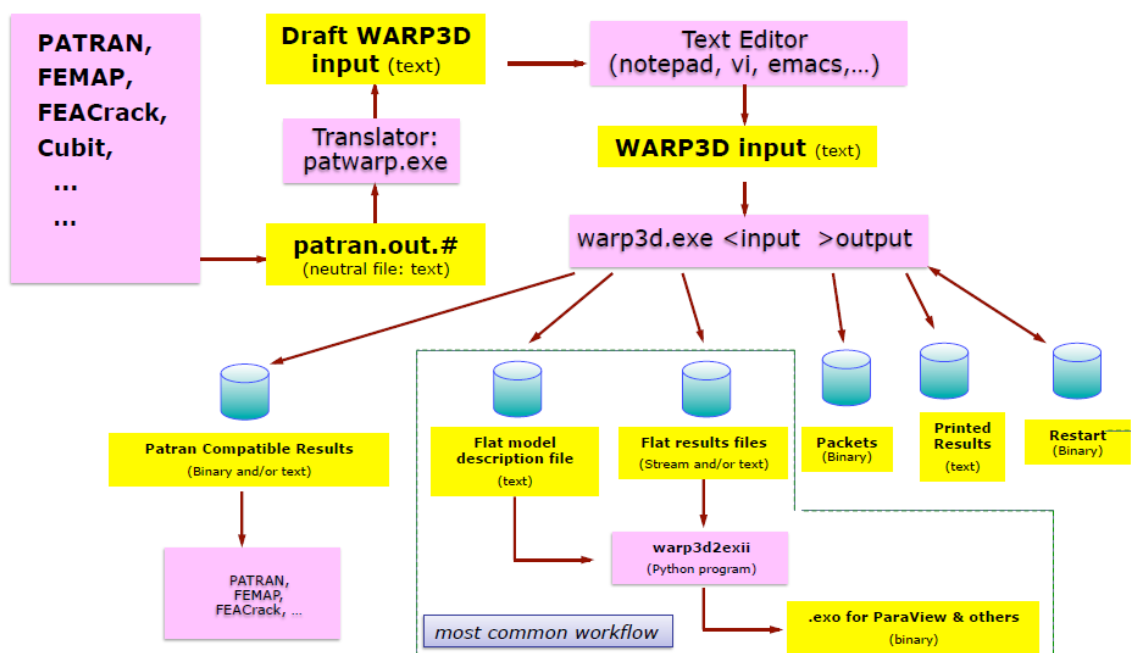


Figura Anexo IV-1 Sistema WARP3D FEM –Fluxograma Operacional e de Integração (WARP3D V17.8 MANUAL, 2017)

ANEXO IV – PROCEDIMENTOS INTEGRAÇÃO WARP3D - PARAVIEW

Um aspecto de importância no trabalho desenvolvido, constitui o tratamento e elaboração de bases de dados numéricas, através do sistema PARAVIEW de visualização de dados científicos.

As análises numéricas consideram relações constitutivas de material homogêneo, com a consideração de efeitos microestruturais, presentes nos ensaios experimentais, e topologia espacial da malha de elementos finitos de geometria complexa.

Igualmente prevem sequência evolutiva, de tratamento dos conjuntos de resultados numéricos dos campos de tensões e deformações.

Um vasto conjunto de resultados de variáveis numéricas permite ser prontamente avaliada pela inspeção dos resultados na base de dados PARAVIEW.

O grande volume de resultados obtidos pela aplicação do sistema WARP3D, se mostra melhor tratado, de modo integrado, quando aplicados a uma base de dados científica, consistente com variedades topológicas de estrutura complexa. Tal conjunto de variedades, caracteriza um espaço de representação, sendo matematicamente denominado Atlas de Variedades Variacionais.

Tais variedades variacionais constituem parâmetros generalizados, que possam ter tratamento numérico em análises científicas tais como:

geometria, detalhes e modelos reológicos, formulações constitutivas, parâmetros microestruturais e micromecânicos, além das condições descritivas de campos, de tensões e deformações e estados de tensões equivalentes, invariantes tensoriais, e sequência evolutiva.

A execução de tais análises numéricas com um sistema avançado de elementos finitos, e elaboração das respectivas bases consistiram num dos pontos destacados do trabalho proposto, permitindo a investigação de um extenso conjunto de resultados de ensaios do Programa SR-1447 (DRDC, 2007).

A seguir uma breve sequência de procedimentos computacionais se apresenta para desenvolvimento das condições de interface entre os sistemas WARP3D E PARAVIEW.

1. Download o ambiente de linguagem de programação ANACONDA Distribution (<http://www.anaconda.com/distribution>)
2. Download Python 2.7 Version

3. Download WARP3D (<http://www.warp3d.net/downloads/>)
4. Instalar Sistema WARP3D em subdiretório local em c:/ WARP3D
5. Download Sistema de Visualização Científica Paraview (www.paraview.org)
6. Instalar Sistema PARAVIEW em subdiretorio local em c:/paraview
7. Ativar ambiente de linguagem de programação ANACONDA Navigator
8. Ativar ENVIRONMENTS dentro do sistema ANACONDA
9. Em Environment selecionar/ativar Open Terminal (abre interface MS-DOS)
10. Executar os seguintes comandos :
 1. conda install numpy scipy
 2. pip install fortranformat
11. Execute WARP3D no diretório de análise do modelo FEM
 1. WARP3D.exe < input_file > output_file
 2. especificar no arquivo input WARP3D arquivos de resultados em formatação binária p/ gerar bases de dados PARAVIEW
12. Execute o algoritmo PYTHON WARP3D2EXII p/ gerar base PARAVIEW.
13. Acessar o modelo/base de dados de visualização PARAVIEW