Luiz Carlos Hernandez Ricardo

Modelamento do Fenômeno de Abertura e
Fechamento de Trincas em Fadiga Pelo Método
dos Elementos Finitos

Texto apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Doutor em Engenharia junto ao
Departamento de Estruturas

São Paulo
2003

Luiz Carlos Hernandez Ricardo

Modelamento do Fenômeno de Abertura e
Fechamento de Trincas em Fadiga Pelo Método
dos Elementos Finitos

Área de Concentração:
Engenharia de Estruturas

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
Titulo de Doutor em Engenharia junto ao
Departamento de Estruturas

Orientador :
Prof.Titular
Paulo de Mattos Pimenta

São Paulo
2003

FICHA CATALOGRÁFICA

Ricardo, Luiz Carlos Hernandez

Modelamento do Fenômeno de Fechamento de Trincas por Fadiga Através do Método dos Elementos Finitos, São Paulo, 2003. 127 pp.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas.

1. Fadiga 2. Propagação de trinca 3. Abertura e fechamento de trincas 4. Método dos elementos finitos. I. Universidade de São Paulo. I Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Estruturas. II. t.

*Normalmente em dedicatória é lembrado o nome de entes queridos como esposa, filhos, pais, etc. Eu não serei diferente em dedicar esse trabalho a minha esposa Márcia e meu filho Luiz Felipe, embora a palavra “**dedico**” pode ter por traz um sentimento de amor e carinho muito maior do que o melhor dos poetas consegue expressar, além de não ter papel suficiente na natureza para conter as palavras de carinho e atenção que os dois me deram neste período, é necessário escrever algumas palavras a mais do que somente “dedico”.*

*A Márcia passou os últimos 11 anos ouvindo a palavra “pós-graduação” o que para mim foi motivo de sacrifício e dedicação para ela foi símbolo de **ausência**; é importante realmente registrar o reconhecimento desta MULHER que de sexo frágil não tem nada, e o **apoio** durante todos os bons e maus momentos passados por mim na minha carreira foram de uma importância imensurável.*

A Luiz Felipe agradecer a compreensão por não brincar com ele enquanto estava estudando e não ter fornecido a atenção que ele desejava. Agradecer por seu sorriso e seu carinho que me deram forças nos momentos difíceis deste trabalho.

*Dedico também a todas as esposas e pais que tem entes queridos passando por uma experiência de mestrado e doutorado que continuem incentivando pois, com o apoio de vocês a palavra **ausência** se transforma em **amor**.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dada saúde e força de vontade para concluir esse trabalho.

Ao orientador Prof. Dr. Paulo de Mattos Pimenta pela amizade e diretrizes seguras na condução desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Dirceu Spinelli pela colaboração e amizade na condução do trabalho, principalmente com sua experiência na área experimental.

Ao amigo Prof. Dr. Arnaldo Homobono Paes de Andrade pela colaboração no programa de doutorado e de servir de ligação entre os métodos numéricos e experimentais.

A Pró-Reitoria da Pós-Graduação na pessoa da Prof. Dra Sueli Vilela pelo apoio financeiro para participação em congressos e visitas as universidades da Europa, Estados Unidos e Brasil.

Ao Prof. Dr. Leonardo Goldefroid pela colaboração na condução do ensaio de propagação de trinca na Universidade de Federal de Ouro Preto.

Ao amigo Dr. Arnaldo de Freitas Camarão pelas discussões de modelamento dos corpos de prova no programa Ansys e pelas incansáveis e sempre produtivas discussões sobre engenharia e ciência que fizeram esse trabalho ficar mais motivante.

Aos Professores. Dr. Luis Filipe C. Pedroso de Lima, Cláudio Ruggieri e Isa Muller Spinelli pela amizade e ajuda na revisão do texto do trabalho.

Ao Prof. Dr. Jim Newman da Universidade Estadual do Mississippi, Estados Unidos, pela ajuda e apoio no desenvolvimento dos modelos de fechamento de trincas além das discussões sobre propagação de trinca.

Ao Dr. Wolf Weber do Instituto de Pesquisa Langley, NASA, Estados Unidos, pelo envio do Fastran.

Ao Prof. Dr. Tim Topper da Universidade de Waterloo, Canadá, pela amizade e ajuda sempre que solicitado.

A Smarttech do Brasil pelo apoio e suporte com o programa Ansys.

A Magneti Marelli pelo apoio e incentivo a pós-graduação

A Bibliotecária Clélia de Lourdes Lara Meguerditchian pela amizade e ajuda na pesquisa de trabalhos ao longo de 11 anos de pós-graduação

A todos que diretamente ou indiretamente tiveram alguma participação nesse trabalho o meu muito obrigado.

Modelamento do Fenômeno de Abertura e Fechamento de Trincas em Fadiga Pelo Método dos Elementos Finitos

RESUMO

O trabalho apresenta uma metodologia para a simulação de abertura e fechamento de trinca, durante o processo de propagação, utilizando um programa comercial de elementos finitos. Este programa é utilizado para determinar os fatores de intensidade de tensão de abertura e fechamento de trinca. É apresentado o modelo de Newman que serve de embasamento para o desenvolvimento da metodologia de liberação de nós na carga mínima, utilizada no trabalho para a propagação da trinca. São avaliados quatro tipos de corpos de prova SE-(B) (corpo de prova de três pontos de apoio submetido a flexão), SE-(T) (corpo de prova com trinca lateral submetido a tração), M-(T) (corpo de prova com trinca central submetido a tração) de uma liga de alumínio Al 2024-T351 e um aço bifásico (ferrita + martensita). Um corpo de prova do tipo C-(T) (corpo de prova compacto submetido a tração) de aço bifásico também foi avaliado. Os corpos de prova SE-(B), SE-(T) e M-(T) da liga de alumínio Al 2024-T351 foram submetidos a carregamentos de amplitude constante, com razões de carga $R = 0$ e $R = 0,5$. Os resultados das análises são comparados com resultados do código FASTRAN, principal código numérico utilizado para simular abertura e fechamento de trinca por plasticidade induzida, através de uma normalização dos fatores de intensidade de tensão máxima e de abertura da trinca. Os resultados numéricos com o corpo de prova C-(T) submetido a carregamento de amplitude constante, com razão de carga $R = 0,1$ foram comparados com resultados de ensaio, objetivando validar o fator de intensidade de fechamento de trinca obtido através da análise numérica. Essa comparação é feita através de normalização numérica e experimental do fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca com o fator de intensidade de tensão máxima. A metodologia de simulação de propagação de trincas, já aplicada na indústria aeronáutica, pode ser aplicada em outras áreas como, por exemplo, na indústria automotiva, uma vez que o consumidor está cada vez mais exigente e o desenvolvimento de novos critérios de projeto se faz necessário.

Modeling Fatigue Crack Opening and Closing Phenomenon by Finite Element Method

ABSTRACT

The work introduces a methodology to simulate fatigue crack opening and closing during crack propagation, using a commercial finite element code. This code is used to determine the crack opening and closure stress intensity factors. The Newman model is used as a baseline to develop the methodology. The nodes are released at the minimum load, during the crack propagation process. Four kinds of specimens SE-(T) (Single Edge Tension), SE-(B) (Single Edge Bending), M-(T) (Middle Tension) of the an aluminum alloy Al-2024-T351 and a dual phase steel (ferrite + martensite) were evaluated. A compact tension specimen C-(T) of a dual phase steel was evaluated. The aluminum alloy specimens, SE -(T), SE-(B) and M-(T), were evaluated under constant amplitude loading with load ratios $R = 0$ and $R = 0.5$. The results of these analyses are compared with the results of FASTRAN, principal numerical code used to simulate crack opening and closing plasticity induced by, normalizing the opening stress intensity factor. The numerical results from a C-(T) specimen, under constant amplitude loading and a load ratio $R = 0.1$, were compared with results from a test performed in the laboratory. The numerical and experimental closure stress intensity factors are normalized with the maximum stress intensity factor. Crack closure simulations are currently used in the aircraft industry. They are now being incorporated in same automotive and other ground vehicle fatigue analysis procedures.

SUMÁRIO

	Página
1.0 Introdução.....	1
2.0 Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Propagação de Trincas.....	4
2.2 Modelos Numéricos.....	15
3.0 Conceitos Básicos.	40
3.1 Conceitos Básicos de Mecânica de Fratura.....	40
4.0 Simulação Numérica do Mecanismo de Abertura e Fechamento de Trincas.....	52
4.1 Introdução.....	52
4.2 Corpos de Prova Analisados.....	53
4.3 Modelos de Elementos Finitos.....	55
4.4 Procedimentos Computacionais	62
5.0 Descrição do Ensaio de Propagação de Trincas	74
6.0 Resultados	79
7.0 Discussão dos Resultados	93
8.0 Conclusões	98

Anexo A : Revisão da Análise Não-Linear	100
Anexo B : Resultado Ensaio de Propagação da Trinca	104
Anexo C : Exemplo de Cálculo do Fator de Intensidade de Tensão pelo Programa Ansys.....	123
9.0 Referências.....	124

Listas de Figuras

	Página
2.1 Sistemas de Coordenadas de Tensões na Ponta da Trinca.....	6
2.2 Modelo de Faixa de Escoamento com Tensão Compressiva na Ponta da Trinca.....	9
2.3 Desenvolvimento de Zonas Plásticas em uma Trinca	11
2.4 Instrumentação do Ensaio do Fechamento de Trinca.....	11
2.5 Curva de Medição de Elber obtida por Extensômetros	12
2.6 Fator de Intensidade de Tensão K em Função da Abertura da Trinca Durante Ciclo Completo de Fadiga	14
2.7 Painel com Trinca Central	17
2.8 Modelo de Elementos Finitos de Painel com Trinca Central.....	18
2.9 Diferentes Tipos de Malha Utilizadas	18
2.10 Simulação de Propagação de Trinca por Liberação do Nó na Carga Máxima	19
2.11 Representação de Molas no Contorno da Face da Trinca.....	20
2.12 Corpo de Prova com Trinca Central, M(T).....	21
2.13 Modelo de Fechamento de Trinca Induzida Por Plasticidade	21

2.14	Mecanismos de Fechamento de Trincas.....	23
2.15	Parâmetros na Ponta da Trinca Durante Carregamento Cíclico.....	27
2.16	Normalização da Tensão de Abertura de Trinca em Diferentes Formas de Propagação	29
2.17	Corpos de Prova Modelados pelo Código Fastran	30
2.18	Posicionamento dos Extensômetros	32
2.19	Corpo de Prova Modelado pela Metade por Elementos Finitos	33
2.20	Modelo de Propagação de Trinca.....	35
2.21	Modelos de Elementos Finitos M(T) e C(T)	38
3.1	Modos de Fratura	40
3.2	Representação de Zonas Plásticas	43
3.3	Definições de Fatores de Intensidade de Tensões	44
3.4	Curva de Crescimento de Trinca.....	45
3.5	Curva Típica de Propagação de Trinca.....	46
3.6	Método de Diferenciação da Secante.....	47
3.7	Curva de Propagação de Trinca Aço AISI 4340	48
3.8	Etapas para Obtenção de Curvas da/dN - DK	50
4.1	Corpo de Prova SE(B)	53
4.2	Corpo de Prova SE(T)	53
4.3	Corpo de Prova M(T).....	53
4.4	Corpo de Prova C(T).....	54
4.5	Modelo de Elementos Finitos do Corpo de Prova SE(B).....	59
4.6	Região de Propagação da Trinca do Corpo de Prova SE(B).....	59

4.7	Modelo de Elementos Finitos do Corpo de Prova SE(T).....	60
4.8	Região de Propagação da Trinca do Corpo de Prova SE(T).....	60
4.9	Modelo de Elementos Finitos do Corpo de Prova M(T).....	60
4.10	Região de Propagação da Trinca do Corpo de Prova M(T).....	61
4.11	Modelo de Elementos Finitos do Corpo de Prova C(T).....	61
4.12	Região de Propagação da Trinca do Corpo de Prova C(T).....	61
4.13	Simulação de Propagação de Trinca por Liberação de Nós na Carga Mínima	66
4.14	Simulação de Propagação de Trinca por Liberação de Nós na Carga Máxima.....	66
4.15	Representação de Sobrecarga Aplicada aos Corpos de Prova.....	67
4.16	Procedimento de Carregamento e Descarregamento dos Modelos Numéricos, $R = 0$	68
4.17	Procedimento de Carregamento e Descarregamento dos Modelos Numéricos, $R = 0,5$	68
4.18	Curva de Material Bi-Linear	69
4.19	Sistemas de Coordenadas Local	71
4.20	Especificação do Caminho de Propagação da Trinca.....	72
5.1	Posicionamento do Corpo de Prova na Máquina MTS.....	74
5.2	Esquema dos Corpos de Prova Utilizados nos Ensaios de Fadiga.....	75
5.3	Requisitos Normalizados de Tamanho para Corpos de Prova de Fadiga.....	75
5.4	Ajustes Linear/Quadrático na Curva $P \times \delta$	77
5.5	Determinação de P_{cl}	78

6.1	Normalização das Tensões, Corpo de Prova SE(B), $R = 0$	79
6.2	Normalização das Tensões, Corpo de Prova SE(B), $R = 0,5$	80
6.3	Normalização das Tensões, Corpo de Prova SE(T), $R = 0$	80
6.4	Normalização das Tensões, Corpo de Prova SE(T), $R = 0,5$	81
6.5	Normalização das Tensões, Corpo de Prova M(T), $R = 0$	81
6.6	Normalização das Tensões, Corpo de Prova M(T), $R = 0,5$	82
6.7	Pós-Processamento Corpo de Prova SE(B)1	83
6.8	Pós-Processamento Corpo de Prova SE(B)2.....	83
6.9	Pós-Processamento Corpo de Prova SE(T)1	84
6.10	Pós-Processamento Corpo de Prova SE(T)2.....	84
6.11	Pós-Processamento Corpo de Prova M(T)1.....	85
6.12	Pós-Processamento Corpo de Prova M(T)2.....	85
6.13	Pós-Processamento Corpo de Prova C(T)1.....	86
6.14	Pós-Processamento Corpo de Prova C(T)2.....	86
6.15	Comparação de Resultados com Sobrecargas.....	85
6.16	Curva de Propagação de Trinca Por Fadiga Experimentatl Paro o Aço Bifásico.....	87
6.17	Correlação de Curvas de Propagação de Trincas Corpo de Prova C(T).	86
6.18	Extração de Valores para Cálculo das Constantes C e m	89
6.19	Normalização de K_{cl} e K_{max}	92

Listas de Tabelas

3.1	Exemplos de Valores de Constantes C e m	48
4.1	Características dos Corpos de Prova.....	56

4.2	Tamanho da Zona Plástica e Tamanho do Menor Elemento Finito.....	57
4.3	Carregamento no Corpo de Prova SE(T), $R = 0$	64
4.4	Carregamento no Corpo de Prova SE(T), $R = 0,5$	65
5.1	Propriedades do Material.....	76
6.1	Liberação na Carga Máxima e Mínima, $K_{max} = 8 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $R = 0$	87
6.2	Constantes C e m Numéricas e Experimentais.....	90
6.3	Procedimento Para Calibração de Curva Numérica e Experimental	90

Lista de Abreviaturas

SEM(T)	Corpo de Prova com Entalhe Submetido à Tração
SE(B)	Corpo de Prova para Flexão em Três Pontos
SE(T)	Corpo de Prova com Trinca Lateral sob Tração
M(T)	Corpo de Prova com Trinca Central sob Tração
C-(T)	Corpo de Prova Compacto de Tração
ASTM	American Standard Testing Materials
MFLE	Mecânica de Fratura Linear Elástica
MFEP	Mecânica de Fratura Elasto-Plástica
AISI	American Iron and Steel Institute
PLANE 2D	Elemento Triangular para o Estado Plano de Tensão do Programa Ansys
Link10	Elemento do Tipo Mola do Programa Ansys
DP – Cr	Aço bifásico
MTS	Materials Testing Systems

Lista de Símbolos

<u>Variável</u>	<u>Descrição/Significado</u>	<u>unidade</u>
DK_{th}	Fator limite de intensidade de tensão	$MPa\sqrt{m}$
s_{xx}, s_{yy}	Tensões normais e de cisalhamento nas direções x e y	MPa
t_{xy}		
s	Tensão remota aplicada normal a trinca	MPa
w	Tamanho da zona plástica	mm
$\frac{da}{dN}$	Taxa de propagação de trinca tendo como relação de unidade de comprimento de trinca a por ciclo N	$mm/ciclo$
a	Comprimento da trinca	mm
K	Fator de intensidade de tensão	$MPa\sqrt{m}$
B	Espessura do corpo de prova	mm
r_p	Raio da zona plástica na frente da trinca	mm
s_{ys}	Tensão de escoamento do material	MPa
DK	Variação do fator de intensidade de tensão máximo, K_{max} e mínimo K_{min} .	$MPa\sqrt{m}$
C	Constante do material obtido em ensaio de propagação de trinca	$\frac{mm/ciclo}{(MPa\sqrt{m})^m}$
m	Constante do material obtido em ensaio de propagação de trinca	-----
K_I	Fator de intensidade de tensão para modo I de fratura.	$MPa\sqrt{m}$
K'_I	Fator de intensidade de tensão para modo I de fratura positivo	$MPa\sqrt{m}$
K'_{II}	Fator de intensidade de tensão para modo I de fratura negativo	$MPa\sqrt{m}$
d_0	Deslocamento residual de abertura da trinca	mm
K_{op}	Fator de intensidade de tensão de abertura da trinca	$MPa\sqrt{m}$
K_{cl}	Fator de intensidade de tensão de fechamento da trinca	$MPa\sqrt{m}$
Ds_{eff}	Variação da tensão efetiva	MPa
s_{max}	Tensão máxima aplicada na estrutura	MPa

s_{op}	Tensão de abertura de trinca	MPa
DK_{eff}	Variação efetiva do fator de intensidade de tensão K_{max} e K_{min}	$MPa\sqrt{m}$
K_{sx}, k_{sy}	Rigidez de mola	N/mm
S_{max}, S_{min}	Tensão máxima e mínima aplicada na estrutura	MPa
s_r	Tensão de ruptura	MPa
S_{op}	Tensão de abertura da trinca	MPa
s_0	Tensão efetiva, média entre tensão de escoamento e a tensão de ruptura.	MPa
R	Razão de carga, tensão e fator de intensidade de tensão mínimo e máximo $R = \frac{s_{min}}{s_{max}} = \frac{P_{min}}{P_{max}} = \frac{K_{min}}{K_{max}}$	----- -
E	Modulo de elasticidade do material	MPa
H'	Modulo elasto-plástico	MPa
DP	variação de aplicação de carga P_{max} e P_{min} aplicada no corpo de prova	N
$DP_{@ 1-3}$	variação de carga aplicada de DP_1 até DP_6	N
$DS_{@ 1-3}$	variação de tensão remota aplicada de DS_1 até DS_3	MPa
W	largura do corpo de prova	mm
$\frac{a}{W}$	relação entre a largura do corpo de prova e o comprimento de trinca inicial	-----
$f\left(\frac{a}{W}\right)$	polinômio característico de cada tipo de corpo de prova	-----
a	Comprimento da trinca	mm

Δa	incremento de propagação numérico (tamanho do menor elemento)	<i>mm</i>
N	Numero do ciclo utilizado no modelo numérico para simular a propagação da trinca	
N_{exp}	Numero de ciclos experimental associado com o comprimento da trinca	
ΔN_{exp}	Variação do numero de ciclos experimental associado com o comprimento da trinca	
Δa_{min}	Tamanho do menor elemento utilizado para propagação da trinca	<i>mm</i>
$\frac{\Delta a_{min}}{\Delta N_{exp}}$	Variação do menor elemento utilizado para propagação da trinca e a variação do número de ciclos experimentais associado com o comprimento da trinca	<i>mm/ciclo</i>
$\frac{\Delta a_c}{\Delta N_c}$	Razão entre a taxa de propagação de trinca numérica e experimental calibrada obtida multiplicando $\frac{\Delta a_{min}}{\Delta N_{exp}}$ por 150, número esse obtido através de processo iterativo e sendo esta constante adimensional.	<i>mm/ciclo</i>

1.0 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia para modelar o mecanismo de abertura e fechamento de trincas de fadiga pelo método dos elementos finitos.

O método dos elementos finitos será a base da metodologia, além da utilização de conceitos de mecânica de fratura linear elástica e elasto-plástica. Esta metodologia poderá ajudar engenheiros e pesquisadores a simular o referido mecanismo sem a utilização de códigos específicos como, por exemplo, o FASTRAN, Newman (1992).

Hoje em dia, o modelo de elementos finitos desenvolvido por Newman (1974) e posteriormente o código FASTRAN não são muito utilizados na indústria em geral, pois o mesmo é propriedade da NASA (Agência Nacional de Administração Espacial dos Estados Unidos) limitando assim uma maior divulgação para a iniciativa privada. Desta forma as aplicações com o FASTRAN ficam restritas a poucas empresas aeroespaciais e universidades.

O mecanismo de fechamento de trinca em ferro fundido nodular com aplicação na indústria automotiva é observado por Dahlberg & Stenfors (2002) abordando o controle de defeitos, permitindo assim que os critérios de projetos considerando fadiga sejam otimizados e realistas, evitando assim margens de segurança na concepção do projeto do componente ou estrutura. Um projeto financiado pela Ford dos Estados Unidos, mostra que a modelagem de abertura de trincas é necessário para analisar o progresso de pequenas trincas que crescem em entalhes. Um exemplo de aplicação dos conceitos abertura de trinca de Elber e a metodologia de calcular a abertura de trinca induzida por plasticidade de Newman, foi dado por Taylor et al. (1997) que fizeram uma simulação de propagação de trinca em um eixo girabrequim de automóvel estimando a variação do fator limite de intensidade de tensão, DK_{th} , do componente.

Gualiano & Vergani (2001) verificam a propagação de trinca em dentes de engrenagens utilizando o conceito de mecanismo de fechamento de trinca através do método dos elementos finitos.

Este trabalho tem o objetivo de disponibilizar à comunidade uma metodologia, através do método dos elementos finitos, que permite simular o mecanismo de abertura e de fechamento de trincas.

O trabalho foi conduzido em quatro corpos de prova SE(B) (corpo de prova de três pontos de apoio submetido a flexão), SE(T) (corpo de prova com trinca lateral submetido a tração), M(T) (corpo de prova com trinca central submetido a tração) e C(T) (corpo de prova compacto de tração) na forma de placa, sob carregamento de amplitude constante. Também foi feito um ensaio em um corpo de prova do tipo C(T) para validação da metodologia apresentada.

No **capítulo 2** é feita uma revisão bibliográfica abordando, de forma cronológica, o estudo de propagação de trinca e o mecanismo de abertura e fechamento de trincas.

No **capítulo 3** são apresentadas as principais definições utilizadas na mecânica de fratura elástica linear, conceitos básicos de fadiga e o procedimento para a obtenção das constantes C e m do material em uma curva de propagação de trinca.

O **capítulo 4** é dividido em quatro partes, sendo a primeira uma breve introdução, na segunda são descritos os corpos de prova que serão estudados. Na terceira são apresentados os modelos de elementos finitos propostos para execução das análises de propagação de trincas. Na quarta etapa é apresentada a estratégia e os procedimentos computacionais utilizados no trabalho.

No **capítulo 5** é descrito o procedimento do ensaio de propagação de trinca, o tipo de corpo de prova utilizado e as características e propriedades do material a ser ensaiado.

No **capítulo 6** são apresentados os resultados numéricos obtidos com o método dos elementos finitos com os corpos de prova *SE(B) (corpo de prova de três pontos de apoio submetido a flexão), *SE(T) (corpo de prova com trinca lateral submetido a tração) e *M(T) (corpo de prova com trinca central submetido a tração) que serão comparados com os resultados do código FASTRAN, do trabalho de Liu & Wu (1997), através de normalização dos fatores de intensidade de tensão máximo, K_{max} , e de intensidade de tensão de abertura de trinca, K_{op} .

O resultado numérico do corpo de prova compacto de tração, C(T) gerado também pelo programa Ansys (2002) será comparado com o resultado do ensaio de propagação de trinca feito com o mesmo tipo de corpo de prova e mesma situação de carregamento. Será normalizado o valor de intensidade de tensão máximo K_{max} e o fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca K_{cl} entre os dois procedimentos, experimental e numérico.

No **capítulo 7** é feita a discussão dos resultados apresentados no capítulo anterior além da discussão da metodologia de simulação de abertura e fechamento de trinca pelo método dos elementos finitos, assim como explicar suas vantagens e limitações.

No **capítulo 8** são apresentadas as conclusões e sugestões para a continuação da pesquisa iniciada no presente trabalho.

*A nomenclatura dos corpos de prova SE(B); SE(T) e M(T) está atualizada conforme ASTM 399, nomenclatura original é SECP-B; SECP-T e MT, mencionado em Liu, J.L. & Wu, X.R “ *Study of Fatigue Crack Closure Behavior For Various Cracked Geometries*”, **Eng. Frac. Mech.**, Vol. 5, pp. 293-306, 1997

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica, apresentada de forma cronológica em duas partes; a primeira referente às contribuições à propagação de trincas e a segunda é abordada a utilização dos modelos numéricos de fechamento de trinca induzida por plasticidade na mecânica de fratura.

2.1 Propagação de Trincas

Westergaard (1939) foi um dos primeiros a estudar o campo de tensões na ponta da trinca, em uma faixa limitada de casos de trincas, em modo I de abertura, utilizando uma função complexa $Z(z)$, onde $z = x + iy$ e $i = \sqrt{-1}$, com Z podendo ser escrita na forma,

$$Z = Z(z) = Z(x + iy) = \text{Re } \overline{\overline{Z}} + y \text{Im } \overline{\overline{Z}} \quad (2.1)$$

Onde, Re e Im são as partes real e imaginária da função, respectivamente, e as barras em cima de Z representam as derivadas e integrais de primeira e segunda ordem em z ,

$$Z' = \frac{dZ}{dz}; \quad Z = \frac{d\overline{\overline{Z}}}{dz} \quad \text{e} \quad \overline{\overline{Z}} = \frac{dZ}{dz}. \quad (2.2)$$

As propriedades das derivadas são denotadas como se segue,

$$\frac{\partial \text{Re } Z}{\partial x} = \frac{\partial \text{Im } Z}{\partial y} = \text{Re } Z'; \quad \frac{\partial \text{Im } Z}{\partial x} = -\frac{\partial \text{Re } Z}{\partial y} = \text{Im } Z'. \quad (2.3)$$

As tensões normais e de cisalhamento nas direções x e y podem ser escrita da seguinte maneira,

$$\mathbf{s}_{xx} = \text{Re } Z - y \text{Im } Z', \quad \mathbf{s}_{yy} = \text{Re } Z + y \text{Im } Z' \text{ e } \mathbf{t}_{xy} = -y \text{Re } Z'. \quad (2.4)$$

Qualquer função analítica $Z(z)$ irá resultar em tensões definidas pelas equações (2.4).

Head (1951) cronologicamente apresentou a primeira lei de propagação de trinca empregando um modelo de chapa infinita, em que foi considerado um material elasto-

perfeitamente plástico com encruamento na ponta da trinca. O modelo requer muitos cálculos e deduções para a obtenção da lei como segue,

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_1 \mathbf{s}^3 a^{3/2}}{(C_2 - \mathbf{s}) w^{1/2}}. \quad (2.5)$$

Onde, da/dN - é a taxa de propagação da trinca tendo como relação de unidade de comprimento de trinca a por ciclo N ; C_1 - módulo elasto-plástico; $\mathbf{s}$ - tensão remota aplicada normal a trinca; C_2 - tensão de escoamento do material e w - tamanho da zona plástica.

Irwin (1957) havia feito considerações entre o tamanho da zona plástica, faixa de tensão remota aplicada e o comprimento da trinca como mostrado em (2.6). Head (1958) adotou à equação (2.5) com w como lei de propagação da trinca, porém substituindo-se (2.6) em (2.5) tem-se a lei de Head corrigida representada da seguinte maneira em (2.7),

$$w \approx \mathbf{s}^2 a \quad (2.6)$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_1 \mathbf{s}^2 a}{(C_2 - \mathbf{s})}. \quad (2.7)$$

Irwin (1957) define em seu trabalho uma taxa de liberação de energia G taxa esta que é uma medida da energia disponível para provocar um incremento na trinca.

$$G = \frac{d\Pi}{dA} \quad (2.8)$$

O termo *taxa* como está sendo usado não refere a uma derivada em relação ao tempo e sim como uma mudança da taxa de energia potencial com a área da trinca. Posteriormente a definição de Irwin passou ser chamado de K , para caracterizar o campo

de tensões e deformações na ponta da trinca em corpos isotrópicos e elásticos, através de uma combinação dos trabalhos de Irwin (1957) e Wastergaard (1939). O campo de tensões na ponta da trinca tem a seguinte forma,

$$s_{ij} = K(2pr)^{-1/2} f_{ij}(\Theta) + A_2 g_{ij}(\Theta) + A_3 h_{ij}(\Theta) r^{1/2} + \dots \quad (2.9)$$

Onde,

K – fator de intensidade de tensão para o modo I de falha; r, θ – são o raio e o ângulo medido entre a ponta e o plano da trinca respectivamente; A_i – são constantes; $f_{ij}(\theta)$, $g_{ij}(\theta)$ e $h_{ij}(\theta)$ são dimensões funções de θ .

Assim, se K é conhecido, é possível obter todas as componentes de tensão, deslocamento e deformação na região em torno da ponta da trinca pela equação (2.9) onde o sistema de coordenadas é definido na Figura 2.1, para $\theta = 0$ e $s_{yy} = s_{\theta\theta}$.

Figura 2.1- Sistema de Coordenadas e Tensões na Ponta da Trinca

$$s_{xx} = \frac{K}{\sqrt{2pr}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$s_{yy} = \frac{K}{\sqrt{2pr}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

$$\begin{aligned}
t_{xy} &= \frac{K}{\sqrt{2pr}} \sin \frac{q}{2} \cos \frac{q}{2} \cos \frac{3q}{2} \\
t_{xz} &= t_{yz} = 0 \\
s_{zz} &= \begin{cases} 0 & \text{Estado Plano de Tensão} \\ n(s_{xx} + s_{yy}) & \text{Estado Plano de Deformação} \end{cases}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

Frost e Dugdale (1958) constataram em seus ensaios que o tamanho da zona plástica aumenta na mesma proporção que o comprimento da trinca. Head (1958) assumiu em seu trabalho que o tamanho da zona plástica na região da ponta da trinca apresentou um tamanho constante durante a propagação. Foi observado que os resultados da equação (2.7) dependem linearmente do comprimento de trinca a . Também foi observado pela análise dimensional que o aumento do incremento no comprimento de trinca da , para um incremento no número de ciclos dN , pode ser proporcional ao comprimento da trinca a .

$$\frac{da}{dN} = Fa \tag{2.11}$$

Onde, F – é uma função de tensões aplicadas.

Paris (1960) faz uma revisão sobre as teorias de propagação de trinca de Head (1951) entre outras, sendo discutida a similaridade entre estas teorias e as diferenças de resultados entre os ensaios isolados e em grupos. Paris sugere que, para uma variação de carga cíclica, o campo de tensões na ponta da trinca por um ciclo pode ser caracterizado por uma variação do fator de intensidade de tensão,

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} . \tag{2.12}$$

Onde, $K_{\max}$ e $K_{\min}$ são os fatores de intensidade de tensão máximo e mínimo respectivamente, durante um ciclo de fadiga coloca-se a parte linear da curva de propagação de trinca da lei de Paris e Erdogan em escala logaritmica, colocando os

valores de ΔK em escala logarítmica em no eixo x e os valores de da/dN em escala logarítmica no eixo y , obtendo,

$$\log\left(\frac{da}{dN}\right) = m \log(\Delta K) + \log C \quad (2.13)$$

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m. \quad (2.14)$$

Onde, C e m são constantes do material. A expressão (2.14) sugerida por Paris e Erdogan é a lei de propagação de trinca mais utilizada em função de sua simplicidade na aplicação.

Irwin (1960) apresenta em seu trabalho equações que podem caracterizar o tamanho da zona plástica na frente da trinca para $q = 0$, que é proporcional à raiz quadrada do fator de intensidade de tensão para o modo I como segue,

$$w = \frac{1}{3p} \left(\frac{K_I}{s_{ys}} \right)^2, \text{ estado plano de deformação,}$$

$$w = \frac{1}{p} \left(\frac{K_I}{s_{ys}} \right)^2, \text{ estado plano de tensão.} \quad (2.15)$$

Dugdale (1960) e Barenblatt (1962) assumem que existe uma longa e esbelta região de zona plástica na ponta da trinca de um material não encruado no estado plano de tensão. Uma seção de uma placa infinita foi analisada.

A zona plástica é modelada assumindo-se uma trinca de comprimento $2a + 2w$, onde w é o comprimento da zona plástica, com uma tensão de fechamento de s_{ys} presente na ponta da trinca como mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 Modelo de Faixa de Escoamento com Tensão Compressiva na Ponta da Trinca (Anderson (1995))

Este modelo aproxima o comportamento elasto-plástico por superposição de duas soluções elásticas uma solução através da trinca sob ação de tensão remota e outra através da trinca com tensão de fechamento na ponta. O modelo ‘faixa de escoamento’ é um modelo clássico de superposição de efeitos. O comprimento da zona plástica w precisa ser tal que os fatores de intensidade de tensão das tensões remotas anulem as tensões de fechamento e ainda anulem-se entre si.

No modelo de Dugdale a zona plástica w é vista como uma faixa de escoamento que se estende a uma distância r_p , sendo r_p – o raio da zona plástica na frente da ponta da trinca, e estando carregada a estrutura tem-se $\mathbf{s}_{yy} = \mathbf{s}_{ys}$. Se $\mathbf{s}_{yy}$ for zero o comprimento $|x| < a + w, y = 0$ e a tensão remota aplicada à estrutura normal à trinca $\mathbf{s}$ irá produzir um fator de intensidade de tensão $K'_I = \mathbf{s} \sqrt{p(a + w)}$ em uma placa de largura infinita. Se $\mathbf{s}_{yy} = \mathbf{s}_{ys}$ forem aplicadas simultaneamente ao longo da faixa de escoamento $a < |x| < a + w$, isso irá fazer com que haja um fator de intensidade de tensão K''_I sobre o K'_I onde,

$$K''_I = -\mathbf{s}_{ys} \sqrt{p(a + w)} + 2\mathbf{s}_{ys} \sqrt{\frac{a + w}{p}} \sin^{-1} \left(\frac{a}{a + w} \right). \quad (2.16)$$

O requisito de tensões de contorno no ponto $x = a + w$ fornece a condição que $K'_I + K''_I = 0$. Resolvendo para w tem-se,

$$\frac{w}{a} = \sec\left(\frac{ps}{2s_{ys}}\right) - 1. \quad (2.17)$$

Para $s \ll s_{ys}$ e para $w \ll a$ tem-se,

$$w = \frac{p}{8} \left(\frac{K_I}{s_{ys}} \right)^2. \quad (2.18)$$

Elber (1968) em seu trabalho de doutorado já havia constatado que carregamentos compressivos em corpos de prova com trincas provocavam o fechamento das trincas. Este fato ocorre devido à deformação plástica permanente deixada no rastro de uma trinca de fadiga.

Elber (1970 e 1971) sugere que a taxa de propagação de trinca não seja somente influenciada pelas condições na ponta da trinca, mas também pela natureza da face da trinca, resultante do contato destas faces. Tais condições acompanham o rastro da trinca como resultados dos fatores do histórico de carregamento, comprimento da trinca e do estado de tensão. Elber constata também a dependência da taxa de crescimento da trinca sob efeito de carregamentos anteriores.

Quando uma trinca por fadiga se propaga, deixa um rastro de material que foi previamente deformado plasticamente nas faces da trinca. A Figura 2.3 mostra o desenvolvimento de um rastro plástico em três diferentes comprimentos de trinca que se propagam sob uma tensão de amplitude constante de tração, portanto $DK > 0$.

Figura 2.3 Desenvolvimento de Zonas Plásticas em uma Trinca (Suresh (1998))

Elber (1970), colocou extensômetros acima e abaixo do plano da trinca, ficando a 2 mm atrás da ponta da trinca ao longo da lateral das superfícies de um corpo de prova de alumínio conforme ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 Instrumentação do Ensaio de Fechamento de Trinca (Elber (1970))

Os experimentos de Elber (1970) foram baseados em dois princípios,

- 1) A força interna atua em uma seção da estrutura e pode ser obtida cortando-se a seção em CC, como mostrado na Figura 2.4. Assim, a força do sistema necessária para reverter o deslocamento do sistema produzido pelo corte pode ser medida.
- 2) Uma trinca de um componente está fechada quando sua rigidez for a mesma que a de um componente sem trinca.

O esquema de relação entre tensão e deslocamento medidos por extensômetros é representado na Figura 2.5.

Figura 2.5 Curva de Medida de Elber obtida por Extensômetros (Suresh (1998))

Onde, na Figura 2.5a tem-se a ilustração extensômetros colocados na ponta da trinca de um corpo de prova; na Figura 2.5b tem-se uma curva σ - tensão remota aplicada por δ - deslocamento, sendo δ_0 - o deslocamento residual ocorrido no ensaio; σ_{max} é a máxima tensão remota aplicada no corpo de prova e σ_{op} é a tensão de abertura da trinca obtida experimentalmente.

No trecho A e B , Figura 2.5, é possível observar uma inclinação constante igual à rigidez medida entre as regiões A e B , na curva σ - δ , que exibe uma inclinação constante

que é igual a rigidez medida em uma chapa idêntica com entalhe sem a presença de uma trinca de fadiga.

Isto implica que a trinca está totalmente aberta até atingir a tensão nominal quando é reduzida de s_{max} para s_{op} . Como o descarregamento continua do ponto B até o ponto C , a derivada segunda da curva tensão - deslocamento, d^2s / dd^2 torna-se negativa. O fechamento das faces da trinca só é possível devido a um mecanismo que induza uma mudança no trecho BC , determinando assim o ponto da tensão de abertura da trinca como mostrado na Figura 2.5.

No estágio final de descarregamento além do ponto C , a curva tensão versus deslocamento exibe uma variação linear, com a inclinação da linha CD , sendo igual à rigidez da placa com entalhe sem trinca de fadiga conforme mostrado no trecho OE . O resultado indica que a trinca é fechada a um nível de tensão abaixo do ponto C e δ_0 é o deslocamento residual de abertura da trinca em relação ao corte 2 da chapa representada na Figura 2.4.

A Figura 2.6 ilustra uma curva típica de muitas ligas nas quais ocorre a variação do fator de intensidade de tensão durante o carregamento e descarregamento do ciclo de fadiga.

Figura 2.6 Fator de Intensidade de Tensão K em Função da Abertura da Trinca durante Ciclo Completo de Fadiga (Suresh (1998))

Na Figura 2.6a é possível observar o fator de intensidade de tensão K como uma função do deslocamento da abertura e fechamento da trinca, durante um ciclo completo de fadiga. Como o corpo de prova com trinca está sob ação de carregamento de tração, inicialmente a trinca permanece fechada até o fator de intensidade de tensão (representado pela “bolinha vazia”) ser encontrado. Neste ponto, a “bolinha vazia”, a trinca inicia a abertura até ficar totalmente aberta sendo o fator de intensidade de tensão que representa chamado de “fator de intensidade de tensão de abertura de trinca”, K_{op} . Durante o descarregamento, o primeiro contato entre as duas superfícies é chamado de “fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca”, K_{cl} . Na Figura 2.6b a variação do fator de intensidade de tensão durante um ciclo completo de fadiga.

Em medições de fechamento de trincas, não existe somente uma única definição para o fator de intensidade de fechamento de trincas, durante o descarregamento ocorre uma redução no fator de intensidade de tensão, as vezes uma média dos fatores de intensidade de tensão de abertura e fechamento é utilizado.

O nível de intensidade de tensão requerido para o primeiro contato entre as duas faces da trinca durante o descarregamento e a intensidade de tensão requerido para a completa separação das superfícies são geralmente diferentes, devido as tensões compressivas existentes no rastro da trinca.

Elber argumenta que a trinca pode se propagar somente durante a fração do carregamento positivo do ciclo de fadiga. A variação de tensão efetiva, $\mathbf{Ds}_{eff}$, e a correspondente variação do fator limite de intensidade de tensão efetiva, $\mathbf{DK}_{eff}$, são os responsáveis pelo crescimento da trinca devido a,

$$\mathbf{Ds}_{eff} = \mathbf{s}_{max} - \mathbf{s}_{op} = U\mathbf{Ds} \quad , \quad \mathbf{DK}_{eff} = K_{max} - K_{op} = U\mathbf{DK} \quad , \quad (2.19)$$

$$U = \Delta\mathbf{s}_{eff} / \Delta\mathbf{s} \quad , \quad U = \Delta K_{eff} / \Delta K \quad . \quad (2.20)$$

Onde, $\mathbf{Ds}$ e $\mathbf{DK}$ são as variações de tensão e do fator de intensidade de tensão aplicado, respectivamente e U é a razão entre as faixas de tensão efetivas e o fator de tensão de intensidade de tensão efetivo com as faixas de tensão e o fator de intensidade de tensão aplicados. A correspondente caracterização da taxa de crescimento da trinca de Elber, obtida da equação de Paris (2.11) é representada pela relação,

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff})^m \quad . \quad (2.21)$$

2.2 Modelos Numéricos

Desde o início da década de 70, vários trabalhos abordando o método dos elementos finitos e o das diferenças finitas têm sido utilizados para simular a propagação e o fechamento de trincas. Esses trabalhos foram feitos no sentido de se tentar obter um entendimento básico dos processos de crescimento e fechamento de trinca.

Willenborg (1971) e Wheeler (1972) apresentaram uma explicação sobre o crescimento da trinca após uma sobrecarga. Os autores supõem que exista um retardo na ponta da trinca, ou seja, na zona plástica. A base física desses modelos é falha, pois não é considerado o aumento da taxa de crescimento da trinca devido a cargas regulares e sobrecargas.

Kobayashi et al. (1973) e Anderson (1973) usaram pela primeira vez o método dos elementos finitos para estudar o crescimento de uma trinca sob um incremento de carregamento unitário. Nestas investigações não foram considerados os efeitos de fechamento de trinca e de carregamento cíclico. Em paralelo, modelos simples e complexos do processo de crescimento e propagação de trinca foram desenvolvidos.

A maioria desses modelos foi baseada no fenômeno de fechamento de trinca por induzida por plasticidade e outros, como o conceito de rugosidade para representar o fechamento de trinca. Newman (1974), Newman & Armen (1975) e Newman (1976) usaram também o método dos elementos finitos para a análise de extensão de uma trinca sob carregamento cíclico que inclui os efeitos de fechamento de trinca. No trabalho foi demonstrado que o fenômeno de fechamento de trinca pode ser modelado qualitativamente pelo método dos elementos finitos.

Newman discutiu como o tamanho do elemento, na malha de elementos finitos, pode influenciar no cálculo das tensões de abertura e fechamento de trinca. A taxa de crescimento de trinca utilizada foi de 0,08 mm/ciclo, para ser consistente com as observações experimentais, para alguns níveis de tensão que foram aplicados ao corpo de prova. A Figura 2.7 ilustra o painel com a trinca central, utilizado na análise.

Figura 2.7 Painei com Trinca Central $M(T)$ (Newman (1976))

O material do painel é considerado elasto-perfeitamente plástico. As tensões de abertura e de fechamento da trinca, deslocamentos das superfícies da trinca e as tensões residuais na ponta da trinca foram determinadas como função do carregamento aplicado.

Na análise elasto-plástica do painel da Figura 2.7 foi utilizado o método dos elementos finitos. O modelo de elementos finitos de um quarto do painel está mostrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 Modelo de Elementos Finitos do Painel (Newman (1976))

A Figura 2.9 ilustra três diferentes malhas utilizadas para representar a ponta da trinca, além do efeito no grau de refinamento dos modelos para a obtenção dos resultados. A malha é constituída de elementos triangulares com espessura unitária.

Figura 2.9 Diferentes Tipos de Malhas Utilizadas (Newman (1976))

A propagação da trinca é feita liberando os nós de A-F, da Figura 2.8 um de cada vez por ciclo, quando o carregamento atinge a carga máxima como ilustrado na Figura 2.10, é aplicado novamente a mesma carga e antes de ser liberado o outro nó.

Os nós ao longo da superfície da trinca são monitorados para determinar se a trinca está aberta ou fechada. Se os deslocamentos são positivos a trinca está aberta, deslocamentos negativos trinca fechada.

Figura 2.10 Simulação de Propagação de Trinca por Liberação do Nó na Carga Máxima

Para definir as condições de contorno foram utilizadas duas molas, cada uma com dois nós, como mostrado na Figura 2.11. Uma mola foi usada para restringir os graus de liberdade na direção x e outra para restringir os graus de liberdade na direção y . Todos os nós do sistema têm dois graus de liberdade. A rigidez da mola é k_{sx} ou k_{sy} , enquanto que para os nós fixos, foi considerada uma rigidez extremamente alta (10^7 vezes o módulo de elasticidade do material da placa). A Figura 2.11 mostra a representação do modelamento das molas.

**Figura 2.11 Representação de Molas no Contorno da Face da Trinca
(Newman (1976))**

O procedimento apresentado por Newman foi feito para assegurar que os incrementos das tensões e deformações totais nos elementos adjacentes satisfaçam a condição do escoamento e a lei de escoamento Prandtl-Reuss, (Johnson & Mellor (1986)), que aborda as relações tensão-deformação para um sólido elasto-perfeitamente plástico.

O início dos trabalhos utilizando o modo II de abertura de trinca ocorreu na década de 80. Na década de 90, a abordagem do problema de carregamento misto, ou seja, modo I e II de carregamento tornou-se mais intensa. Existem ainda, trabalhos que cobrem os modos I,II e III.

Schijve (1980), além de vários outros pesquisadores, apresentou modelos de fechamento de trinca baseados no conceito de retardo da trinca. Chang & Hudson (1981) demonstraram que tanto o retardo como a aceleração do crescimento da trinca são importantes para a confiabilidade do modelo.

A Figura 2.12 mostra um corpo de prova de largura finita com uma trinca central submetido a um carregamento uniforme modelado por Newman (1982). Newman (1982) modificou as hipóteses iniciais de Dugdale (1960), considerando o material plasticamente deformado no rastro da trinca.

Figura 2.12 Corpo de Prova com Trinca Central $M(T)$ (Newman (1982))

A Figura 2.13 ilustra o modelo de Newman (1982) com tensões máxima e mínima aplicadas. Segundo o modelo, o corpo de prova é dividido em três regiões, a região (1) foi modelada como um corpo elástico contínuo. As condições de carregamento nas superfícies da trinca são baseadas no modelo de Newman (1981). As regiões (2) e (3) foram modeladas considerando-se elementos barra, com propriedade de material elasto-perfeitamente plástico, para uma tensão S_o , que é a média entre a tensão de escoamento S_{ys} , e o limite de resistência, S_r . A área hachurada na Figura 2.13a e 2.13b indica que o material encontra-se no regime plástico.

**Figura 2.13 Modelo de Fechamento de Trinca por Induzida por Plasticidade
(Newman (1982))**

Para levar em conta os efeitos do estado de tensão na zona plástica, um fator α foi usado para passar de uma tensão σ_0 a uma tensão efetiva $\alpha\sigma_0$ para os elementos intactos da zona plástica. Esta tensão efetiva $\alpha\sigma_0$ simulada sob condições de estado plano de tensão tem o valor de σ_0 e sob condições de estado plano de deformação $3\sigma_0$, ou seja, para o estado plano de tensão $\alpha = 1$ e para o estado plano de deformação $\alpha = 3$.

O fator α utilizado por Newman (1982) foi desenvolvido por Newman (1976) efetuando uma análise elasto-plástica utilizando o método dos elementos finitos em corpos trincados sob estados planos de tensão e de deformação.

O modelo analítico de fechamento de trinca desenvolvido por Newman (1982), foi usado para a determinação da tensão de abertura da trinca, S_{op} , como uma função de um comprimento de trinca e de um carregamento anterior.

A tensão de abertura da trinca foi usada para calcular a faixa limite do fator de intensidade de tensão, como proposto por Elber (1968) e, conseqüentemente, a taxa de crescimento da trinca.

O primeiro estudo de fechamento de trinca utilizando modelos 3D foi o trabalho de doutorado de Chermahini (1986) até hoje pouco se avançou nesse campo, por exemplo, Newman (1993) isso é devido à complexidade de se trabalhar com fechamento de trinca em três dimensões.

Suresh et al. (1981) e Suresh & Ritchie (1982 e 1984) constataram que nas várias formas de fechamento de trinca uma variedade de fatores mecânicos, microestruturais e de meio ambiente estão embutidos do conceito de *fechamento de trinca por induzida por plasticidade*. Elber (1970 e 1971) imaginava que o fechamento ocorria no rastro da zona plástica cíclica, mas posteriormente, novas fontes de fechamento foram observadas como (1) corrosão de camadas que se formam nas superfícies da trinca (*fechamento de trinca por indução de oxido*) (2) fluido viscoso no interior da trinca atuando como cunha entre as faces (*fechamento da trinca por indução de fluido viscoso*), além de outras fontes de fechamento aplicadas à materiais não metálicos. A Figura 2.15 ilustra os principais mecanismos de fechamento de trinca.

Figura 2.14 Mecanismos de Fechamento de Trinca (Suresh (1998))

onde ,

- a) fechamento de trinca por induzida por plasticidade
- b) fechamento de trinca por indução de óxido
- c) fechamento de trinca induzido por rugosidade
- d) fechamento de trinca por indução de fluido viscoso

O significado técnico de fechamento de trinca está relacionado com o crescimento da trinca por fadiga sob históricos de carregamentos. Os históricos de carregamentos de amplitude variável muitas vezes são similares a carregamentos de amplitude constante (incluindo o carregamento médio). Em outros casos, os carregamentos de amplitude variável são mais relevantes.

Sehitoglu (1985) mostra uma abordagem matemática sobre o conceito de fechamento de trinca. O modelo de fechamento de trinca apresentado por Sehitoglu é baseado no modelo de Budianski & Hutchinson (1978). Apresenta-se aqui a definição da expressão de razão de carga R que é a razão entre carga, tensão ou fator de intensidade de tensão mínima e máxima, respectivamente, como segue,

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}}; = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}; = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}. \quad (2.22)$$

O nível de fechamento de trinca para determinados valores da razão de tensão R , varia de $-\infty$ para 1 e pode ser obtido a partir de um deslocamento residual d_R ; aplicando-se um fator de intensidade de tensão $K_{\max}$; o deslocamento na ponta da trinca pode ser calculado pela equação (2.23) e a zona plástica máxima pode ser calculada pela equação (2.24) ambos são obtidos com base no modelo de “*faixa de escoamento*” utilizando a expressão de origem elástica, Sehitoglu (1985),

$$d = \frac{K_{\max}^2}{ES_0} f\left(\frac{x}{w}\right) \quad (2.23)$$

$$w = \frac{p}{8} \left(\frac{K_{\max}}{s_0} \right)^2 \quad (2.24)$$

onde,

δ - deslocamento na ponta da trinca

E - modulo de elasticidade

$K_{\max}$ - fator de intensidade de tensão máximo

s_0 - tensão média entre a tensão de escoamento e ruptura

x - extensão da trinca

w - tamanho da zona plástica

A função $f(x/w)$ é representada por η e assim $f(\mathbf{h})$, equação (2.22), pode ser obtida de soluções elásticas ou ainda por métodos de funções peso considerando uma tensão uniforme e um tamanho máximo da zona plástica como segue,

$$f(\mathbf{h}) = \left[(1 - \mathbf{h})^{1/2} - \frac{\mathbf{h}}{2} \ln \left| \frac{1 + (1 - \mathbf{h})^{1/2}}{1 - (1 - \mathbf{h})^{1/2}} \right| \right]. \quad (2.25)$$

A equação (2.26) é valida somente para escoamento em pequena escala e condições de estado plano de tensão. Para o descarregamento o nível do fator de intensidade de tensão na ponta da trinca muda para a expressão (2.26),

$$\Delta \mathbf{d} = \frac{(K_{\max} - K)^2}{2E s_0} f(x / \Delta w) \quad . \quad (2.26)$$

A razão $x/\Delta w$ será representada por η/β , onde $\beta = \Delta w / x$ assim a expressão pode ser escrita como,

$$\frac{\Delta w}{w} = \frac{1}{4} \left(1 - \frac{K}{K_{\max}} \right)^2 \quad (2.27)$$

$$f(\mathbf{h}/\mathbf{b}) = \left[(1 - \mathbf{h}/\mathbf{b})^{1/2} - \frac{\mathbf{h}/\mathbf{b}}{2} \ln \left| \frac{1 + (1 - \mathbf{h}/\mathbf{b})^{1/2}}{1 - (1 - \mathbf{h}/\mathbf{b})^{1/2}} \right| \right]. \quad (2.28)$$

O deslocamento residual na ponta da trinca d_R associado com o fechamento da trinca ocorre quando,

$$d - Dd - d_R = 0 \quad (2.29)$$

A equação (2.29) é satisfeita para valores críticos de h e b . Os termos h_c e b_c irão indicar o primeiro contato atrás da ponta da trinca. É de interesse também determinar o fator de intensidade de tensões K quando a trinca fecha. Este procedimento pode ser obtido utilizando a equação (2.29) e fazendo $h = 0$. Normalizando a equação (2.29) com relação à d_0 obtém-se,

$$1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{K_{cl}}{K_{max}} \right)^2 - \frac{d_R}{d_0} = 0 \quad (2.30)$$

ou

$$\frac{K_{cl}}{K_{max}} = 1 - (2)^{1/2} (1 - d_R/d_0)^{1/2} \quad (2.31)$$

Entretanto, o primeiro contato das superfícies pode ocorrer em um fator de intensidade de tensão maior do que K_{cl} / K_{max} , determinada na equação (2.31), conforme mostrado na Figura 2.6. Os valores críticos de h e b no primeiro contato (representados por h_c e b_c) podem ser determinado pelo rearranjo da equação (2.30) e de sua derivada.

Figura 2.15 Parâmetros na Ponta da Trinca Durante Carregamento Cíclico
(Sehitoglu (1985)

$$f(h_c) - 2b_c f(h_c / b_c) - \frac{d_R}{d_0} \quad (2.31)$$

$$f'(h_c) - 2f'(h_c / b_c) = 0 \quad (2.32)$$

combinando as equações (2.31) e (2.32) tem-se ,

$$(1 - h_c)^{1/2} - 2b_c (1 - h_c / b_c)^{1/2} = \frac{d_R}{d_0} \quad (2.33)$$

considerando a equação (2.31) isolada tem-se,

$$\frac{\ln \left| 1 + (1 - \mathbf{h}_c / \mathbf{b}_c)^{1/2} / 1 - (1 - \mathbf{h}_c / \mathbf{b}_c)^{1/2} \right|}{\ln \left| 1 + (1 - \mathbf{h}_c)^{1/2} / 1(1 - \mathbf{h}_c)^{1/2} \right|} = 1/2$$

ou

$$\mathbf{h}_c = -4\mathbf{b}_c^2 / (4\mathbf{b}_c - 1) \quad . \quad (2.34)$$

combinando as equações (2.31) e (2.30) tem-se $\mathbf{b}_c = \frac{\left(1 - \left(\frac{\mathbf{d}_R}{\mathbf{d}_0} \right)^2 \right)}{4}$ ou

$$\frac{K_{cl}}{K_{max}} = 1 - (1 - (\mathbf{d}_R / \mathbf{d}_0)^2)^{1/2} \quad . \quad (2.35)$$

Note que o nível de contato na ponta da trinca da equação (2.31) e o fator de intensidade de tensão K no primeiro contato das superfícies da equação (2.35) são diferentes. É sugerido que K_{cl} / K_{max} seja determinado pelas equações (2.31) ou (2.35), assim o fator de intensidade de tensões efetivo pode ser escrito da como segue,

$$\Delta K_{eff} = U \Delta K = \left(\frac{1 - K_{cl} / K_{max}}{1 - R} \right) \Delta K \quad . \quad (2.36)$$

McClung & Sehitoglu (1989a e 1989b) e McClung (1992 & 1994) apresentam trabalhos de simulação de fechamento de trincas em furos e em diferentes tipos de corpos de prova. McClung (1989a) apresenta um gráfico, Figura 2.16, onde são comparados os resultados da determinação da tensão de abertura em função da metodologia de liberação de nós durante a propagação da trinca.

O gráfico da Figura 2.16 mostra no eixo x a normalização $S_{max} / \mathbf{s}_0$ no eixo de y relaciona-se S_{op} / S_{max} . Sendo S_{op} – tensão de abertura de trinca; S_{max} – tensão máxima remota aplicada; $\mathbf{s}_0$ tensão media entre tensão de escoamento e de ruptura.

Figura 2.16 Normalização da Tensão de Abertura de Trincas em Diferentes Formas de Propagação (McClung & Sehitoglu (1989a))

Inúmeras técnicas de medidas têm sido desenvolvidas ao longo dos anos com diferentes princípios, sensibilidades de equipamento e precisão aplicadas em diferentes posições na trinca. Essa variedade de tipos e procedimentos de medidas contribui para a falta de um consenso sobre os efeitos dos carregamentos, razões de tensões, geometria do corpo de prova, microestrutura, etc. Chen (1993) e Weiss et al. (1992) apresentam um sumário dessas divergências nos respectivos trabalhos. Exemplos desta divergência podem ainda ser encontrados em Newman & Elber (1988).

Os fatores de intensidades de tensão máximo e de abertura, respectivamente $K_{máx}$, K_{op} e a variação do fator de intensidade de tensão efetiva, DK_{eff} , são apresentados como os responsáveis pelo processo de propagação e fechamento de trinca em vários materiais. Entretanto, Chen et al. (1996) discutem que parâmetros mencionados acima não explicam os efeitos de carregamento, razão de tensão, geometria do corpo de prova, microestrutura, mencionados anteriormente. Até hoje não há consenso na comunidade científica sobre o assunto.

Uma comparação entre as técnicas convencionais de medida de fechamento de trinca foi realizada pelo comitê de fadiga E.24.04.04 da ASTM (American Standards Testing Materials) para um mesmo material e mesma geometria de corpo de prova. Os resultados mostraram-se inconsistentes e as diferenças encontradas foram em função do laboratório e da técnica utilizada no ensaio. Uma das conclusões desse trabalho foi que, em função da quantidade de ensaios, não foi possível caracterizar os reais efeitos do fechamento de trinca, (Chen et al. (1996)).

Liu & Wu (1997) fazem uma revisão dos modelos de Newman e dos códigos, FASTRAN I e FASTRAN II de fechamento de trinca, em corpos de prova do tipo SE(B) (corpo de prova para flexão em três pontos), SE(T) (corpo de prova com trinca lateral para tração) M(T) (corpo de prova com trinca central para tração), SEN(T) (corpo de prova com um entalhe para tração).

Os autores utilizam uma função matemática que permite o cálculo do fator de intensidade de tensão na região da zona plástica na ponta da trinca. A Figura 2.17 ilustra os diferentes corpos de provas utilizados no trabalho.

**Figura 2.17 Corpos de Prova Modelados pelo Código FASTRAN
(Liu & Wu (1997))**

Os autores não recomendam a normalização das tensões de abertura S_{op} / S_{max} , (S_{op} tensão de abertura de trinca e S_{max} tensão máxima aplicada na estrutura) para as várias geometrias, sendo recomendado para uma melhor correlação usar K_{max} / K_{op} , sendo K_{max} , fator de intensidade tensão máximo na estrutura e K_{op} , fator de intensidade de tensão de abertura da trinca, relação essa desenvolvida por McClung (1994).

Newman (1998) apresenta uma revisão dos conceitos de propagação de trinca por fadiga e os conceitos básicos da mecânica de fratura. São revistos os principais modelos de fechamento de trinca e as várias linhas de pesquisa que cada um destes modelos originou. A revisão dos trabalhos em simulação numérica de crescimento e fechamento de trinca é feita iniciando-se pelos métodos das diferenças finitas e dos elementos finitos, sendo que neste último os trabalhos são mencionados por tipos, ou seja, trabalhos em que os modelos de elementos finitos eram bi-dimensionais (a maioria) e trabalhos cujos modelos de elementos finitos eram tri-dimensionais. São apresentados ainda modelos empíricos e de zona de escoamento de fechamento de trinca, além de uma revisão do modelo de Dugdale.

Zhang & Bowen (1998) apresentam um trabalho de fechamento de trinca, por induzida por plasticidade no qual é utilizado um modelo de corpo de prova 3D (tri-dimensional). Os autores fazem uma revisão bibliográfica dos trabalhos até então disponíveis de simulação de fechamento de trinca em 2D e 3D.

Sob o aspecto do modelamento são utilizadas quatro malhas a fim de verificar o efeito do refinamento da malha nos resultados; os modelos variam de 4000 a 8000 nós. Foi utilizado um programa comercial de elementos finitos próprio para análises não lineares chamado ABAQUS versão 5.6, para a execução das análises.

É abordado no trabalho a influência do procedimento de liberação dos nós liberação pela carga mínima, máxima e após a carga máxima. Foi constatado não ter influência significativa nos resultados a utilização do método de liberação de nós para propagar a trinca.

Foi observado um grande efeito do refinamento da malha na frente da trinca para determinar as tensões de abertura e fechamento de trinca, na obtenção dos resultados, o procedimento de elaboração das malhas precisa ser muito bem elaborado para garantir uma qualidade de resultados compatível com a precisão esperada.

Wei & James (2000a) apresentam um trabalho de simulação de fechamento de trincas em corpos de prova compacto de tração C(T). Foram estudados os efeitos de tensão e deformação plana em que os corpos de prova têm 2 e 10 mm, respectivamente, de espessura.

No procedimento experimental foram utilizadas as técnicas de fotoelasticidade e extensometria. A fotoelasticidade é utilizada para obtenção do mecanismo de fechamento de trinca por induzida por plasticidade. A extensometria é utilizada, conforme ilustra a Figura 2.18, para medir a deformação plana.

Figura 2.18 Posicionamento dos Extensômetros (Wei & James (2000a))

A Figura 2.19a ilustra metade do corpo de prova modelado pelo método dos elementos finitos. Na Figura 2.19b é possível observar o detalhe da região do corpo de prova a ser propagado pela trinca.

Figura 2.19 Corpo de Prova Modelado pela Metade por Elementos Finitos (Wei & James (2000a))

O modelo de elementos finitos foi gerado pelo programa Ansys versão 5.4 somente metade por condição de simetria. O comprimento inicial da trinca foi de 20 mm e o

tamanho do menor elemento finito foi de 0,01 mm. Seguindo sugestão de McClung e Sehitoglu que associam o incremento da trinca com o tamanho da zona plástica pela expressão,

$$\Delta a / r_p \leq 0,05 . \quad (2.37)$$

Onde, Δa – é o tamanho do incremento da trinca e r_p – é o raio da zona do tamanho da zona plástica.

Wei & James (2000a) argumentam a dificuldade de escolher elementos muito pequenos, pois acarretaria em um aumento do tempo de processamento muito grande utilizando computadores pessoais, PCs.

Entretanto foi observado que o incremento é pequeno o bastante para representar as deformações plásticas na ponta da trinca esse tamanho não afeta significativamente os efeitos de fechamentos (McClung & Sehitoglu (1989a)).

Wei & James (2000a) apresentam duas definições para determinar as cargas de abertura e de fechamento de trincas. A *primeira definição tradicional* considera que quando o primeiro nó atrás da ponta da trinca se separar das duas superfícies até então encostadas devido ao fechamento, essa carga é a **carga de abertura de trinca** e para a determinação da carga de fechamento, esta ocorre quando o primeiro atrás da ponta da trinca encostar na outra superfície da trinca, ficando assim caracterizado a **carga de fechamento da trinca**. Esta definição tem sido muito aceita no campo de pesquisa como abordado por Newman (1998). Wu & Ellyin (1996) sustentam que a primeira definição não é suficiente para atender os requisitos das condições para as tensões perpendiculares na ponta da trinca.

É apresentada uma *segunda definição* em que a carga de abertura é identificada pelo monitoramento ao longo do ciclo de carregamento e a etapa em que o deslocamento

do nó atrás da ponta da trinca passar de negativo para positivo bem como a tensão perpendicular na ponta da trinca passar de negativa para positiva, fica caracterizado a determinação da carga de abertura de trinca. Da mesma forma durante o descarregamento o deslocamento atrás da ponta da trinca se tornar negativo e a tensão perpendicular na ponta da trinca se tornar negativa tem-se a carga de fechamento de trinca.

Comparativamente à simplicidade da execução de uma análise estática, a simulação de abertura e fechamento de trinca torna-se uma tarefa de difícil execução, pois, o processo de simulação envolve a necessidade de acumular os resultados etapa por etapa, durante o carregamento e o descarregamento da estrutura.

Em problemas de engenharia, como o mencionado acima, é utilizado uma análise não-linear para simular o mecanismo de abertura e fechamento de trincas. Durante esse processo um rastro é formado por tensões residuais compressivas que terão influência no mecanismo de fechamento da trinca. A representação desta simulação precisa levar em conta a mudança das condições de contorno através da eliminação de graus de liberdade, objetivando a propagação da trinca.

Wei & James (2000b) discutem os modelos de Newman e McClung bem como as vantagens e limitações de cada um na visão dos autores. É avaliado pelo método dos elementos finitos um corpo de prova do tipo SEN4B (corpo de prova em flexão de quatro pontos de apoio) conforme British Standard, BS 6835 (1988) com a variação da inclinação da trinca entre 0° e 60° em relação ao eixo de carregamento. A Figura 2.22

ilustra o modelo de propagação de trinca.

Figura 2.20 Modelo de propagação de Trinca (Wei & James (2000))

Os autores concluem que o modelo apresentado, de fechamento de trinca por induzida por plasticidade em trincas inclinadas, pode ser simulado com bons resultados e isso é comprovado pelos seus resultados experimentais.

Pequenas variações de resultados foram encontradas na previsão para os casos de aplicação em ângulos de 45° e 60° em relação ao eixo de carga. As diferenças são de até 3% para simulação de abertura de trinca e de até 13 % para a simulação de fechamento de trinca.

Josefson et al. (2000) apresentam um trabalho de simulação de fechamento de trinca em um corpo de prova SEN4B (corpo de prova em flexão de quatro pontos de apoio), utilizando o modelo FASTRAN II de Newman . É construída uma seqüência de carregamentos que foi utilizada tanto nos experimentos, como na simulação numérica.

Com esta técnica, é possível calcular as tensões de abertura de trinca durante a seqüência de carregamentos com amplitudes variáveis. O modelo do código FASTRAN II foi ampliado para levar em conta as equações de equilíbrio para a simulação de barras na região da trinca. O carregamento de amplitude variável estabilizou o nível de fechamento de trinca sob condição de deformação plana.

Os resultados obtidos através da utilização do código FASTRAN II mostram uma boa correlação com os resultados experimentais. Os autores constataram que o código FASTRAN II é sensível à entrada de dados e isso influencia diretamente o tamanho da zona plástica na ponta da trinca, durante as simulações.

O FASTRAN II não é um código de elementos finitos e sim uma rotina de cálculo que tem como pontos principais a rapidez de fornecer resultados e permitindo com isso uma redução no tempo para avaliar novas propostas. Ele foi desenvolvido basicamente para ser utilizado em corpos de prova do tipo M(T) com trinca central submetido à tração, limitando assim para os demais corpos de provas, embora possa ser utilizado para outros corpos de prova através de fatores de correção, na comunidade científica é mais conhecido por sua aplicação em corpos de prova do tipo M(T).

O presente trabalho irá utilizar um código de elementos finitos chamado Ansys versão 6.0, cujas aplicações podem ser multidisciplinares, serão modelados diferentes corpos de provas objetivando ter a mesma precisão em todas as configurações de carga utilizadas. Um código de elementos finitos atualmente inclui tecnologia para calcular e representar graficamente os mecanismos de abertura e fechamento de trincas.

Utilizando o FASTRAN II somente tem-se somente uma listagem de resultados, enquanto que utilizando um código de elementos finitos além de representar os mecanismos já mencionados é possível obter uma variedade de informações muito maior do que o FASTRAN II podendo simular os mecanismos de abertura e fechamento de trincas de várias maneiras, como por exemplo, a utilização de elemento de contato e molas para representar a mudança de graus de liberdade durante a propagação, além de técnicas de iteração muito eficientes como o método Newton Rapson.

É proposta do presente trabalho também fornecer uma metodologia de simulação dos mencionados mecanismos de uma forma simples para possibilitar aos pesquisadores que não tenham acesso a códigos como o FASTRAN a possibilidade de simular mecanismos como o de abertura e fechamento de trincas.

Kiran et al. (2003) utilizam em seu trabalho o método dos elementos finitos para simular o mecanismo de fechamento de trinca por induzida por plasticidade nos corpos de prova C(T) (compacto de tração) e M(T) (corpo de prova com trinca central submetido à

tração). É apresentada a influência do refinamento das malhas de modelos de elementos finitos, na simulação. Os modelos são gerados no código de elementos finitos Ansys versão 5.7. Foram gerados somente modelos bi-dimensionais. As análises foram feitas considerando estados planos de tensão e deformação e material elasto-perfeitamente plástico. A Figura 2.21 ilustra os corpos de prova modelados pelo método dos elementos finitos.

(a)

(b)

Figura 2.21 Modelos de Elementos Finitos $M(T)$ e $C(T)$ (Kiran et al. (2003))

As conclusões do trabalho são que com o corpo de prova M(T) foi possível obter a tensão de abertura de trinca baseado no refinamento proposto e aplicando a condição de deformação plana. Não foi possível obter convergência no corpo de prova C(T) e nem a tensão de abertura de trinca para esse corpo de prova. Isto indica que o fenômeno de fechamento de trinca por induzida por plasticidade sob deformação plana é de difícil simulação. Na simulação utilizando os corpos de prova M(T) e C(T) no estado plano de tensão foram obtidos bons resultados no que tange à convergência e obtenção da tensão de abertura de trinca.

3.0 CONCEITOS BÁSICOS

3.1 Conceitos Básicos de Mecânica de Fratura

A mecânica da fratura procura caracterizar o campo de tensão e deformação em torno da trinca em termos de parâmetros simples que representam valores críticos no início da fratura. Estes parâmetros são denominados de tenacidade à fratura do material, e tais características permitem uma avaliação precisa do potencial de falha de uma estrutura ou componente contendo trincas.

Os conceitos básicos empregados na mecânica de fratura são:

- a) Relação de DK_{eff} e da/dN que necessita de DK de abertura da trinca para deduzir o DK_{eff} para cada ciclo da carga.
- b) O cálculo de crescimento do tamanho da trinca com ciclos usando a resistência do material em termos de K_{max} crítico que vai determinar em qual ciclo o K_{max} vai provocar a falha no componente

A intensidade do campo tensão-deformação, localizado, nas vizinhanças da ponta da trinca é descrita em função de um termo chamado de fator de intensidade de tensão, K . Frequentemente o parâmetro K inclui um subscrito, tal como I , II ou III . Estes subscritos referem-se aos três modos diferentes de carregamento de um corpo trincado, como ilustrado na Figura 3.1.

Figura 3.1 Modos de Fratura (Anderson (1995))

O Modo I é o modo de abertura onde o corpo trincado é carregado por tensões normais. O deslocamento das superfícies da trinca ocorrerão perpendiculares ao plano da trinca. O Modo II é o modo de deslizamento ou cisalhamento planar onde o deslocamento das superfícies da trinca se dá no plano da trinca e perpendicular à aresta frontal da trinca. O Modo III é o modo de rasgamento causado por um cisalhamento fora do plano da trinca. O deslocamento das superfícies da trinca se dá no plano da trinca e paralelo à aresta frontal da mesma.

Soluções pela mecânica do contínuo para carregamentos e geometrias aplicadas prescritas levam à caracterização dos campos de tensão (e deformação) próximos à ponta da trinca. A forma funcional do campo assintótico local inclui um valor de amplitude escalar de K que pode ser expresso no carregamento pelo Modo I para abertura de trinca na direção-yy como segue,

$$s_{yy} = \frac{K_I}{(2pa)^{1/2}} \text{ quando } a \rightarrow 0. \quad (3.1)$$

A magnitude de K é uma função das cargas aplicadas externamente ou da tensão nominal S , do tamanho da trinca a e da geometria da trinca e do corpo de prova. A magnitude de K aplicado pode ser calculada para diversas combinações de geometria, tamanho e formato da trinca, e do método de carregamento aplicado. Expressões para K

(fórmulas para calcular K) tem sido determinadas para diferentes geometrias de corpos trincados, configurações de trinca, e situações de carregamento. Exemplos dessas configurações podem ser achado no ASTM- STP-381 (1964).

Cada expressão de K contém todos os termos requeridos para fornecer as relações necessárias entre tensão nominal aplicada, tamanho da trinca, e condições geométricas. Diversos métodos para estabelecer uma expressão apropriada de K , para uma situação específica, estão disponíveis por exemplo: programas de computadores de elementos finitos, calibrações de flexibilidade experimentais e técnicas fotoelásticas.

Contudo, na prática, pode-se geralmente encontrar uma expressão apropriada num livro texto que aborda o assunto, como Anderson (1995), que se ajusta adequadamente à geometria do corpo trincado, ao tipo de trinca, e às condições de carregamento de interesse.

A essência da MFLE é relacionar o fator de K aplicado (força motriz da trinca) às características de crescimento da trinca e de resistência à fratura de um dado material (que também pode ser expresso em termos de níveis críticos de K). Por exemplo, ao considerar uma fratura frágil em condições de carregamento elásticas lineares (deformação-plana) um determinado material pode tolerar somente um certo nível de K aplicado (*Fator de Intensidade de Tensão*) antes que frature.

Reportando-se à Figura 3.1, para uma geometria fixa e tamanho de trinca a , o valor de K aplicado na região da ponta da trinca continuará a crescer conforme a carga aplicada (ou a tensão nominal, S) é aumentada.

A falha por fadiga em materiais de engenharia consiste de três fases: iniciação, propagação e falha final. A região de transição entre a iniciação e a propagação de uma trinca é de difícil definição. A hipótese tradicional usada em projetos de componentes ou

estruturas é a de considerar a presença de um defeito, a partir do qual se inicia o processo de propagação até a falha final.

Em uma estrutura trincada a tensão de escoamento é ultrapassada na região próxima à ponta da trinca, onde, uma zona plástica é desenvolvida e cuja extensão pode ser estimada por um critério de escoamento que caracteriza o campo de tensão localizado nesta região. O tamanho real e a forma do tamanho da zona plástica depende das propriedades do material mas, suas dimensões são proporcionais a $\left(K_I / \sigma_{ys}\right)^2$.

A relaxação das tensões causadas pelo escoamento dentro da zona plástica significa que, para manter o equilíbrio, as tensões fora da zona plástica precisam aumentar lentamente. A zona plástica aumenta com o aumento da trinca. O aumento efetivo do comprimento da trinca é chamado de raio da zona plástica sendo representado por r_p e estimado pelas expressões (3.2) para o estado plano de tensão e (3.3) para o estado plano de deformação, conforme se segue (Frost et al. (1999)),

$$r_p = \frac{1}{2\sigma} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2, \quad (3.3)$$

$$r_p = \frac{1}{6\sigma} \left(\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right)^2. \quad (3.3)$$

A Figura 3.2 ilustra as zonas plásticas no estado plano de deformação e estado plano de tensão, respectivamente.

Figura 3.2 Representação de Zonas Plásticas (Frost et al. (1999))

São representados na Figura 3.3 os principais fatores de intensidade de tensão utilizados para caracterizar a abertura e fechamento de trinca.

Figura 3.3 Definições do Fatores de Intensidade de Tensão (Schijve (1988))

onde,

$K_{m\acute{a}x},$
 $K_{m\acute{i}n}$ fatores de intensidade de tens\~ao m\~aximo e m\~inima

K_{op} fator de intensidade de tens\~ao de abertura da trinca

K_{cl} fator de intensidade de tens\~ao de fechamento da trinca. Este fator \acute{e} caracterizado pelo contato inicial entre as duas superf\~icies da trinca durante o descarregamento na estrutura.

DK Varia\~ao do fator de intensidade de tens\~ao que \acute{e} obtida por
 $DK = (K_{max} - K_{min})$

$DK_{,eff}$ Varia\~ao do fator de intensidade de tens\~ao efetiva que \acute{e} obtida por
 $DK_{,eff} = (K_{max} - K_{op})$

A taxa de crescimento da trinca expressa como uma fun\~cao da varia\~ao do fator de intensidade de tens\~oes na ponta trinca, da/dN versus DK , caracteriza a resist\~encia do material a propaga\~ao da trinca sob um carregamento c\~iclico.

Paris et al. (1961) e Paris & Erdogan (1963) sugerem, para uma varia\~ao c\~iclica do campo de tens\~oes aplicados na estrutura, a utiliza\~ao da mec\~anica de fratura linear el\~astica para a caracteriza\~ao da taxa de crescimento da trinca baseada na varia\~ao do fator de intensidade de tens\~ao,

$$DK = K_{max} - K_{min} . \quad (3.4)$$

Onde, K_{max} e K_{min} s\~ao respectivamente fatores de intensidade m\~aximo e m\~inimo de tens\~ao, durante um ciclo de fadiga. Em uma estrutura trincada tem-se,

$$\begin{aligned} K_{max} &= Y S_{max} \sqrt{pa} , \quad K_{min} = Y S_{min} \sqrt{pa} , \\ \Delta K &= Y \Delta S \sqrt{pa} , \quad \Delta S = S_{max} - S_{min} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Onde, Y \acute{e} um fator de geometria do componente, que est\~a relacionado com a geometria do componente, a raz\~ao do comprimento de trinca a , com a largura do corpo de prova W ,

$S_{m\acute{a}x}$ e $S_{m\acute{i}n}$ que s\~ao as tens\~oes m\~aximas e m\~inimas de um ciclo de fadiga. A Figura 3.4 ilustra uma curva t\~ipica de crescimento de trinca.

Figura 3.4 Curva de Crescimento de Trinca (Suresh (1998))

Paris et al. (1961) e Paris & Erdogan (1963) observam que a taxa de crescimento de uma trinca de fadiga da/dN é relacionado com a variação do fator de intensidade de tensão como segue,

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (3.6)$$

Onde, C e m são constantes do material. Estas constantes são influenciadas pela microestrutura, temperatura e razão de carga, R (Suresh (1998)).

A Figura 3.5 mostra uma curva t\~ipica de propagação de trinca ilustrando as três regiões, (a) região perto do limite abaixo da qual não há propagação, (b) região linear de propagação e (c) região de instabilidade da trinca. O ensaio de propagação de trinca de fadiga fornece uma curva de tamanho de trinca a versus número de ciclos de fadiga N . A partir desta curva é obtido o gráfico de velocidade de propagação de trinca da/dN versus variação do fator de intensidade de tensão, DK .

Figura 3.5 Curva Típica de Propagação de Trinca (Dowling (1999))

A medida do comprimento de trinca pode ser realizada pela observação visual ou pelo método indireto de uma correlação entre o tamanho da trinca e a variação da flexibilidade do corpo de prova. No segundo método, o comprimento da trinca é estimado, usando-se uma equação polinomial que correlaciona o comprimento da trinca com a rigidez do corpo de prova, ou melhor, o seu inverso – flexibilidade – para uma dada geometria de corpo de prova.

O cálculo da taxa de propagação da trinca da / dN é normalmente realizado pelo método de diferenciação da secante, ASTM E-647- 95, à curva tamanho de trinca versus número de ciclos, conforme ilustrado na Figura 3.6.

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (3.7)$$

Figura 3.7 Método da Diferenciação da Secante

Será mostrado a seguir como são obtidos as constantes do material C e m a partir de uma curva de propagação de trinca que esteja na escala bi-logarítmica ou log-log.

Para referência na ordem de grandeza, a Tabela 3.1 mostra alguns valores de C e m para alguns tipos de aços, uma vez que os parâmetros a serem extraídos no presente trabalho também serão de um aço.

Tabela 3.1 Exemplos de Valores de Constantes C e m (Dowling (1999))

Tipo de aço	C	m
	$\frac{mm/ciclo}{(MPa\sqrt{m})^m}$	
Ferrítico-Austenítico	6,89E-9	3,0
Martenstico	1,36E-7	2,25

Austenítico	5,61E-9	3,25
-------------	---------	------

Figura 3.7 Curva de Propagação de Trinca Aço AISI 4340 (Dowling (1999))

Será utilizado como exemplo a curva obtida para razão de carga $R= 0,1$ do material aço AISI 4340 da Figura 3.7. O processo inicia-se com a escolha dos pares de pontos $(\Delta K, da/dN)$, escolhendo os extremos da curva $(21; 1,0E-5)$ e $(155; 1,0E-2)$, denota-se os pontos da seguinte maneira,

$$\frac{da/dN_1}{da/dN_2} = \left(\frac{\Delta K_1}{\Delta K_2} \right)^m; \quad m = \frac{\log(da/dN_1) - \log(da/dN_2)}{\log(\Delta K_1) - \log(\Delta K_2)};$$

$$m = \frac{\log 1,0^{-5} - \log 1,0^{-2}}{\log 21 - \log 155}; \quad m = 3,46$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m; 1,0E-5 = C(21)^{3,46}; C = 2,66E-10 \frac{mm/ciclo}{(MPa\sqrt{m})^m}; \text{ assim as}$$

constantes do aço AISI 4340 para $R = 0,1$ são $C = 2,66E-10$ e $m = 3,46$.

A Figura 3.8 ilustra um resumo do procedimento para se executar um ensaio de propagação de trinca. Um corpo de prova é submetido a diferentes tipos de carregamentos obtendo-se, portanto, uma variedade de taxas de propagação de trincas. De posse dessas informações constrói-se a curva $da/dN - DK$. Estas informações podem mais tarde ser utilizadas no projeto de componentes que admitam trincas fornecendo uma estimativa do desenvolvimento de comprimento da trinca. O comprimento da trinca versus números de ciclos pode ajudar a estimar o número dos ciclos para atingir o comprimento crítico de uma trinca, em uma estrutura mecânica, e também na elaboração de um programa de inspeção em estruturas, como aeronaves ou plataformas marítimas.

Figura 3.8 Etapas para Obtenção de Curvas $da/dN - DK$ (Dowling(1999))

Onde,

DK – variação do fator de intensidade de tensões para o modo I de abertura da trinca

DP – variação de aplicação de carga $P_{m\acute{a}x}$ e $P_{m\acute{i}n}$ aplicada no corpo de prova

$DP_{\textcircled{R} 1-3}$ variação de carga aplicada de DP_1 até DP_6

S – tensão remota aplicada no corpo de prova

$DS_{\textcircled{R} 1-3}$ variação de tensão remota aplicada de DS_1 até DS_3

B – espessura do corpo de prova

a – comprimento de trinca

W – largura do corpo de prova

$\frac{a}{W}$ – relação entre a largura do corpo de prova e o comprimento de trinca inicial

$f\left(\frac{a}{W}\right)$ polinômio característico de cada tipo de corpo de prova
-

$\frac{da}{dN}$ – taxa de propagação de trinca

C e m – constantes do material

N – número de ciclos

4.0 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO MECANISMO DE ABERTURA E FECHAMENTO DE TRINCA

4.1 Introdução

O presente capítulo irá apresentar a metodologia desenvolvida para simular o mecanismo de abertura e fechamento de trincas pelo método dos elementos finitos utilizando um programa comercial. As análises serão feitas dentro da dominância K , ou seja, será abordado escoamento em pequena escala. Os modelos levam a determinação da tensão, e posteriormente o valor de K , de abertura e fechamento de trinca para cada configuração de carregamento e tipo de corpo de prova, utilizando a técnica de liberação do nó na carga mínima, no processo de propagação.

Os resultados serão comparados com dados experimentais e da literatura. Serão avaliados quatro tipos de corpos de prova submetidos a carregamentos de amplitude constante, SE(T), SE(B) e M(T) da liga de alumínio Al- 2024-T351 e um C(T) de aço bifásico (ferrita + martensita). Será analisado uma situação de sobrecarga nos corpos de prova. É apresentado também o procedimento para determinação do fator de intensidade de tensão pelo programa de elementos finitos Ansys (2002). Serão calibradas curvas numéricas de propagação de trincas na região da equação de Paris com base em curva experimental, com intuito de se obter as constantes do material C e m do aço bifásico (ferrita + martensita) e estas constantes foram comparadas com as constantes obtidas experimentalmente.

4.2 Corpos de Provas Analisados

Foram utilizados os seguintes corpos de prova de uma liga de alumínio Al- 2024-T351 e aço bifásico (ferrita+martensita), com espessura de 25 mm SE(B), (corpo de prova com trinca para ensaio de flexão em três pontos) Figura 4.1 SE(T), (corpo de prova com trinca para ensaio de tração), Figura 4.2; M(T), (trinca central em tração), Figura 4.3. Também foi modelado o corpo de prova C(T), (compacto em tração) com espessura de 3,8 mm e feito com aço bifásico, Figura 4.4.

4.1 Corpo de Prova SE(B) (Anderson (1995))

Figura 4.2 Corpo de Prova SE(T) (Anderson (1995))

4.3 Corpo de Prova M(T) (Anderson (1995))

Figura 4.4 Corpo de Prova C(T) (Anderson (1995))

Cada corpo de prova está relacionado a um polinômio característico que é utilizado na equação para a determinação do fator de intensidade de tensão, da equação (4.1), para o modo I de propagação,

$$P_{\max} = \frac{KBW}{f\left(\frac{a}{W}\right)} \quad (4.1)$$

onde,

K – fator de intensidade de tensões para o modo I de abertura da trinca

$P_{\max}$ – carga máxima aplicada no corpo de prova

B – espessura do corpo de prova

a – comprimento de trinca

W – largura do corpo de prova

$\frac{a}{W}$ – relação entre a largura do corpo de prova e o comprimento de trinca inicial

$f\left(\frac{a}{W}\right)$ polinômio característico de cada tipo de corpo de prova

-

Os polinômios utilizados no presente trabalho são os seguintes,

a) SE(B)

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(1,124 - 1,16349 * \left(\frac{a}{W}\right) + 7,3168 * \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 18,7746 * \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 31,8028 * \left(\frac{a}{W}\right)^4 - \right.}{\left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right)^{\frac{3}{2}}} \left. - 33,2295 * \left(\frac{a}{W}\right)^5 + 19,1286 * \left(\frac{a}{W}\right)^6 - 4,6091 * \left(\frac{a}{W}\right)^7 \right) \quad (4.2)$$

b) SE(T)

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(1,124 - 1,16349 * \left(\frac{a}{W}\right) + 7,3168 * \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 18,7746 * \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 31,8028 * \left(\frac{a}{W}\right)^4 - \right.}{\left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right)^{\frac{3}{2}}} \left. - 33,2295 * \left(\frac{a}{W}\right)^5 + 19,1286 * \left(\frac{a}{W}\right)^6 - 4,6091 * \left(\frac{a}{W}\right)^7 \right) \quad (4.3)$$

c) M(T)

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(1,0 - 0,4999 * \left(\frac{a}{W}\right) + 0,4593 * \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 0,3017 * \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 0,2051 * \left(\frac{a}{W}\right)^4 - 0,0371 * \left(\frac{a}{W}\right)^5 \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{W}\right)}} \quad (4.5)$$

d) C(T)

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left(\frac{2 + \frac{a}{W}}{1 - \frac{a}{W}}\right) * \left[0,866 + 4,64 * \left(\frac{a}{W}\right) - 13,32 * \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14,72 * \left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5,60 * \left(\frac{a}{W}\right)^4\right] \quad (4.6)$$

4.3 Modelos de Elementos Finitos

Foram modelados somente metade dos corpos de prova SE(-B), SE(T) e C(T) enquanto que o corpo de prova M(T) foi modelado um quarto do mesmo.

Os modelos de elementos finitos do presente trabalho foram gerados no programa Ansys versão 6.1 (2002), conforme as Figuras 4.5; 4.7; 4.9 e 4.11, utilizando-se

elementos do tipo triangular estado plano de tensão, PLANE2D, e as Figuras 4.6; 4.8; 4.10 e 4.12 ilustram os elementos LINK10, do tipo mola que trabalham em compressão e serão utilizados no processo de simulação dos mecanismos de abertura e fechamento de trinca.

Os corpos de prova utilizados, SE(B), SE(T) e M(T) são de uma liga de alumínio Al- 2024 –T351 e um aço bifásico. O corpo de prova C(T) é feito também de aço bifásico. A Tabela 4.1 ilustra as propriedades de material dos modelos elementos finitos relacionando por tipo de corpo de prova.

Tabela 4.1 Características dos Corpos de Prova

Material	Tipo de Corpo de Prova			Propriedades do Material				
				σ_{YS}	σ_r	E	H'	v
				MPa	MPa	MPa	MPa	
Al-2024 T351	SE(B)	SE(T)	M(T)	364	457	7,0E4	700	0,3
Aço bifásico	C(T)			409	624	2,1E5	21000	0,3

Onde, σ_{ys} - tensão de escoamento; σ_r - limite de ruptura; E módulo de elasticidade; H' - módulo elasto-plástico e v - coeficiente de Poisson 0,3. Os resultados obtidos com os corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T) feitos com a liga de alumínio Al- 2024-T351 serão comparados com os resultados obtidos com o código FASTRAN do trabalho de Liu e Wu (1997). Os resultados numéricos do C(T) serão comparados com resultados de ensaio.

Foram utilizadas as seguintes geometrias para os corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T), $a/W = 0,0375$; B= 25,0 mm, W =100,0 mm e para o corpo de prova C(T) foi utilizado $a/W = 0,26$; B=3,8 mm e W = 50,0 mm.

As condições de contorno variam para cada tipo de corpo de prova e como somente metade do modelo será utilizado em três tipos de corpo de prova, SE(B), SE(T), C(T), e um quarto do modelo M(T), faz-se necessária à utilização de condições de simetria, para se considerar o efeito das outras partes dos corpos de prova.

Os modelos de elementos finitos foram feitos a partir da região de propagação da trinca, ou seja, região que o menor elemento tem dimensão de 0,05 mm, para os corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T). Para o corpo de prova C(T) foi utilizado o valor de 0,025 mm com intuito de uma melhor precisão nos resultados quando comparados com dados experimentais.

O gradiente da malha de elementos finitos foi gerado de forma controlada, especificando mais ou menos elementos dependendo das superfícies de interesse em observar os resultados e poder ter uma qualidade de resultados condizente com o esperado. Este controle também está associado em reduzir o tempo de processamento evitando regiões dos modelos muito refinadas sem interesse.

Na Tabela 4.1 são mostrados os valores estimados e utilizados como referência para a obtenção do tamanho da zona da zona plástica, w , e a determinação do tamanho do elemento utilizado em cada modelo. Para tanto, foi usada a equação de Irwin 4.7, substituindo-se s_{ys} por s_0 que é o valor médio entre s_{ys} e s_r , essa substituição é feita para os dois materiais que foram utilizados no trabalho conforme mostrado abaixo,

$$w = \frac{1}{P} \left(\frac{K_{máx}}{s_0} \right)^2. \quad (4.7)$$

Tabela 4.2 Tamanho da Zona Plástica e do Menor Elemento Finito

		Situação de Carregamento K_{max} ($MPa\sqrt{m}$)			
		Tamanho Zona Plástica (mm)			
Corpo de Prova		8($MPa\sqrt{m}$)	11($MPa\sqrt{m}$)	15($MPa\sqrt{m}$)	19 ($MPa\sqrt{m}$)
SE(B), SE(T) e M(T)	estimada	0,12 mm	0,25 mm	0,46 mm	Al –2024 – T351
	utilizada	0,50 mm	0,50 mm	0,50 mm	
C(T)	estimada	aço bifásico (ferrita + martensita)			0,48 mm
	utilizada				0,10 mm
		Situação de Carregamento K_{max} ($MPa\sqrt{m}$)			
Corpo de Prova		8($MPa\sqrt{m}$)	11($MPa\sqrt{m}$)	15($MPa\sqrt{m}$)	19($MPa\sqrt{m}$)
		Tamanho do Menor Elemento Finito (mm)			
SE(B),SE(T) e M(T)	estimado	0,012 mm	0,025 mm	0,046 mm	Al –2024 – T351
	utilizado	0,05 mm	0,05 mm	0,05 mm	
C(T)	estimado	aço bifásico (ferrita + martensita)			0,048 mm
	utilizado				0,025 mm

Para representar o fenômeno de fechamento de trinca é necessário que se tenha pelo menos quatro elementos em escoamento na zona plástica reversa. McClung & Sehitoglu (1989b) e Wei & James (2000a) recomendam que o elemento menor elemento é calculado por $\Delta a/r_p \leq 0,05$ onde, r_p é o raio da zona plástica. Em função da adequação de recursos computacionais e tendo como objetivo reproduzir a zona plástica, o menor elemento da zona plástica será de $0,01 \cdot w$.

Como é possível observar na Tabela 4.1, para os corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T), será necessário considerar uma região maior de propagação da trinca para que haja condições de formar uma zona plástica reversa e monotônica proporcional a estimada pela equação de Irwin.

As forças a serem aplicadas e as propriedades de material utilizadas nos modelos de alumínio como do aço são suficientemente representativas para reproduzir as zonas plásticas proporcionais as estimadas pela equação de Irwin.

Na inviabilidade de se elaborar modelos muitos refinados, fazendo com que aumentasse muito o tempo de processamento para se obter o mesmo resultado, trabalha-se com uma malha mais simples, porém com o compromisso de uma propagação maior da trinca, para a obtenção de resultados semelhantes ao estimado.

Figura 4.5 Modelo de Elementos Finitos do Corpo de Prova SE(B)
(Ansys (2002))

Figura 4.6 Região de Propagação da Trinca do Corpo de Prova SE(B)
(Ansys (2002))

Figura 4.7 Modelo de Elementos Finitos do Corpo de Prova SE(T)
(Ansys (2002))

Figura 4.8 Região de Propagação da Trinca do Corpo de Prova SE(T)
(Ansys (2002))

Figura 4.9 Modelo de Elementos Finitos do Corpo de Prova M(T)
(Ansys (2002))

Figura 4.10 Região de Propagação da Trinca do Corpo de Prova M(T)
(Ansys (2002))

Figura 4.11 Modelo de Elementos Finitos do Corpo de Prova C(T)
(Ansys (2002))

***Figura 4.12 Região de Propagação da Trinca do Corpo de Prova C(T)
(Ansys (2002))***

4.4 Procedimentos Computacionais

Os modelos são compostos por elementos triangular para o estado plano de tensão e formulação quadrática com nome PLANE2D, também foi utilizado um elemento do tipo mola LINK10. As análises foram feitas considerando-se os carregamentos com três valores de K_{max} (8 ; 11, e 15 $MPa\sqrt{m}$) sob uma razão de carga aplicada de $R = 0$ e $R = 0,5$ para os corpos de prova SE(-B), SE(T) e M(T) com a liga de alumínio Al- 2024-T351 e $K_{max} = 19 MPa\sqrt{m}$ para o corpo de prova C(T) com uma razão de carga de $R = 0,1$. Os resultados dos corpos de prova SE(-B), SE(T) e M(T) serão normalizados, K_{op}/K_{max} , e comparados com os resultados do trabalho de Liu & Wu (1997) utilizando o código FASTRAN. Os resultados do corpo de prova C(T) serão comparados com resultados de um ensaio de propagação de trinca para obter os valores normalizados de K_{cl}/K_{max} , e as constantes do material C e m .

Serão mostrados exemplos de carregamentos utilizados nas análises para cada corpo de prova. As tabelas abaixo foram confeccionadas tendo como base as cargas máxima e mínima obtidas pela expressão 4.1 e utilizadas em cada configuração de corpo de prova e carregamento.

Assim, para a razão de carga $R = 0$ somente a carga máxima essa será dividida em 9 etapas para o carregamento e 9 etapas para o descarregamento conforme mostrado na Tabela 4.3, onde as forças representadas nas Tabelas 4.3 e 4.4 estão em N. Isso é feito com intuito de se determinar em qual etapa do carregamento ou descarregamento a trinca abrirá ou fechará.

O monitoramento durante o processo de carregamento e descarregamento para achar as tensões de abertura e fechamento de trinca e o respectivo K , será feito conforme procedimentos utilizado por Wei & James (2000a) já descrito no capítulo 2, onde será observado o deslocamento do primeiro nó atrás da ponta da trinca tanto para o carregamento como para o descarregamento além de se observar a tensão perpendicular a ponta da trinca. Quando o deslocamento no nó atrás da trinca for positivo no carregamento e a tensão perpendicular na ponta da trinca for positiva estará determinado em qual das nove etapas do carregamento ocorreu à abertura da trinca. Procedimento semelhante é usado durante o descarregamento para determinar o fechamento, quando o nó atrás da ponta trinca for negativo e a tensão perpendicular na ponta da trinca for negativa ter-se a etapa em que houve o primeiro contato entre as duas superfícies da trinca iniciando o fechamento da trinca. Para a razão de carga $R = 0,5$ o procedimento é semelhante, porém com a inclusão da carga mínima. Dessa maneira a diferença entre as cargas máxima e mínima são divididas em 9 etapas tanto para o carregamento como para o descarregamento.

Um exemplo desse procedimento pode ser observado na Tabela 4.3. Ricardo et al. (2002) apresentam a metodologia de liberação de nós na carga mínima e essa metodologia será utilizada no presente trabalho conforme mostrado na Figura 4.17.

Tabela 4.3 Carregamento do Corpo de Prova SE(B)**R= 0 SECPB Po – Pmax (N)**

Po									Pmax
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190
0	305	610	915	1220	1525	1830	2135	2440	2745

R= 0 SECPB Pmax - Po (N)

Pmáx									Po
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0
131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0

171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
2440	2135	1830	1525	1220	915	610	305	0	0

Tabela 4.4 Carregamento do Corpo de Prova SE(T)

R = 0,5 SE(T) Po – Pmax (N)

Pmin									Pmax
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486
101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486
121	122	123	124	125	126	127	128	129	130
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486
141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486
161	162	163	164	165	166	167	168	169	170
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486
181	182	183	184	185	186	187	188	189	190
2741	3046	3351	3656	3961	4266	4571	4876	5181	5486

R = 0,5 SE(T) Po - Pmax (N)

Pmáx									Pmin
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre
111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre
131	132	133	134	135	136	137	138	139	140
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre
151	152	153	154	155	156	157	158	159	160
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre
171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
5181	4876	4571	4266	3961	3656	3351	3046	2741	livre

Newman (1974) utiliza a liberação dos nós na carga máxima (Figura 4.18), para propagação da trinca. No presente trabalho serão comparados resultados utilizando as duas metodologias, liberando os nós na carga mínima, Figura 4.13, e máxima, Figura 4.14, sob uma condição de $K_{max} = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ e razão de carga $R = 0$; para os três tipos de corpos de prova estudados SE(B), SE(T) e M(T) da liga de alumínio Al- 2024-T351. A força máxima aplicada em cada modelo é calculada pela expressão 4.1.

Figura 4.13 Simulação de Propagação de Trinca por Liberação de Nós na Carga Mínima

Figura 4.14 Simulação de Propagação de Trinca de Nós na Carga na Máxima (Newman (1974))

Uma situação de sobrecarga foi analisada considerando-se uma carga nominal de $K_{max} = 8 \text{ MPa}\sqrt{m}$ e um pico de $K_{max} = 15 \text{ MPa}\sqrt{m}$ no quinto ciclo de um total de dez aplicados nos três corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T), para liga de alumínio Al- 2024-T351, conforme ilustrado na Figura 4.15, para uma razão de carga $R = 0$.

Figura 4.15 Representação da Sobrecarga Aplicada aos Corpos de Prova

Um corpo de prova compacto de tração, C(T), também foi modelado para a condição de $K_{max} = 19 \text{ MPa}\sqrt{m}$ inicial de uma razão de carga $R = 0,1$. O resultado desta análise será comparado com resultados de um ensaio em laboratório.

Newman (2002) reconhece que a liberação dos nós no carregamento máximo pode acarretar problemas de convergência, dependendo dos incrementos de carregamento e descarregamento utilizados, no processo de propagação de trinca quando o método dos elementos finitos é empregado. Ricardo et al.(2002) mostram em simulações de três diferentes tipos de corpos de prova que a utilização da técnica de liberação de nós no carregamento mínimo, fornece resultados satisfatórios quando comparados com os resultados obtidos de Liu & Wu (1997).

No presente trabalho será utilizada a técnica de liberação de nós no carregamento mínimo, objetivando-se uma maior precisão de resultados em termos de convergência, pelo do método de elementos finitos para a simulação do processo de propagação de trinca.

A liberação do nó na ponta da trinca irá ocorrer quando o fator de intensidade de tensões chegar a K_{min} , o processo segue $K_{min} \rightarrow K_{max} \rightarrow K_{min}$ para cada situação de carregamento ou seja 8, 11 e 15 $MPa\sqrt{m}$. Para aplicar as condições mencionadas acima nos modelos numéricos os fatores de intensidade de tensões (8, 11 e 15 $MPa\sqrt{m}$) são convertidos em cargas e calculadas pela expressão 4.1.

A variação da intensidade de carregamento, $DP = P_{max} - P_{min}$ permanece constante e as razões de cargas empregadas foram de $R = 0$ e $R = 0,5$. Foi utilizado um incremento de trinca de 0,05 mm, que também é o menor elemento da malha para os corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T). As Figuras 4.16 e 4.17 ilustram os procedimentos utilizados para aplicação das cargas nos modelos mencionados.

Figura 4.16 Procedimento de Carregamento e Descarregamento dos Modelos Numéricos, $R = 0$

Figura 4.17 Procedimento para Carregamento e Descarregamento para os Modelos Numéricos, $R = 0,5$

O tamanho do incremento de propagação da trinca está associado com o tamanho do menor elemento finito utilizado no modelo numérico, que por sua vez é associado com o tamanho da zona plástica calculada pela equação já definida (2.13), para as situações dos fatores de intensidade de tensões mencionados anteriormente.

O corpo de prova compacto de tração C(T) foi modelado para uma condição inicial de $K_{max} = 19 \text{ MPa}\sqrt{m}$, que está dentro da faixa de validade de dominância K , ou seja, uma variação da relação a/W de 0,25 a 0,60 conforme ASTM E-647 (1995) do material, aço bifásico (ferrita + martensita), além da utilização de uma razão de carga $R = 0,1$. O resultado desta análise será comparado com resultado de um ensaio em laboratório utilizando uma razão de carga $R = 0,1$.

A relação tensão-deformação cíclica é modelada considerando-se encruamento isotrópico, conforme ilustrada na Figura 4.18, onde no eixo x tem-se deformações em microstrain no eixo y tem-se, s_{ys} – tensão de escoamento e s_{max} – tensão máxima aplicada, tensões em MPa . As equações não-lineares na análise de elementos finitos serão resolvidas usando-se o método de iteração de Newton-Rapson.

Figura 4.18 Curva de Material Utilizada nos Modelos de Elementos Finitos (Ansys (2002))

A aplicação da carga será feita utilizando-se 10 etapas no carregamento e 20 no descarregamento, uma vez que, o equipamento da MTS mede somente os dados de carga/fator de intensidade de tensão de fechamento da trinca o procedimento de medição será mostrado no capítulo 5.

Por isto, um maior número de etapas no descarregamento se faz necessário objetivando-se um aumento na precisão da determinação da carga / fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca. O tamanho do menor elemento da malha utilizado foi de 0,025 mm.

O processo de simulação de propagação da trinca será realizado conforme procedimento já apresentado. A pré-trinca é feita com uma taxa de 0,25 mm /ciclo até 2,5 mm, ou 10 ciclos com intuito de reproduzir um campo de tensões inicial semelhante ao corpo de prova. No ensaio experimental esta pré-trinca foi propagada até 2,5 mm também. A simulação da pré-trinca é feita com base na diminuição de DK , ou seja, à medida que a trinca se propaga a carga aplicada diminui, foi feito com 9 etapas para o carregamento e descarregamento, e como consequência tem-se a diminuição do fator de intensidade de tensão. Esse procedimento experimental é feito com o intuito de calibrar e criar efetivamente uma trinca no corpo de prova a ser ensaiado.

Após a confecção da pré-trinca, a propagação da trinca efetivamente é feita em dois estágios. Dos ciclos 11 a 18, a taxa de propagação utilizada foi de 0,25 mm/ciclo e dos ciclos 19 a 30 a taxa foi de 0,5 mm/ciclo. Estas taxas foram adotadas em função da adequação dos recursos computacionais disponíveis com os dados experimentais.

É numericamente inviável utilizar a mesma taxa de propagação experimental nos modelos numéricos, pois seria necessário um tempo muito grande de processamento o que tornaria a análise numérica desnecessária, pois o tempo de processamento poderia ter a mesma duração ou menor do que tempo total da execução de um ensaio e um dos objetivos é reproduzir o ensaio de forma mais rápida e de forma consistente quando comparados dados numéricos e experimentais, em função do tempo de execução de um ensaio de propagação de trinca semelhante, em laboratório.

Será mostrado como o programa empregado de elementos finitos, Ansys (2002), a partir do cálculo das tensões calcula o fator de intensidade de tensões, K . Este procedimento será utilizado para o cálculo dos valores de K_{max} , K_{op} e K_{cl} . Para isto, é necessário definir o sistema de coordenadas na ponta da trinca. Se a trinca for paralela ao eixo x do sistema global assume-se que o sistema local é o mesmo que o global. Caso contrário, é necessário criar um sistema local de forma que o eixo x esteja na mesma direção da propagação da trinca. A Figura 4.19 ilustra a representação do sistema local de coordenadas.

É possível especificar tanto a metade, como o caminho completo da trinca conforme mostrado na Figura 4.20. Como a maioria dos corpos de prova foi modelada pela metade, também a trinca será modelada pela metade.

Figura 4.19 Sistema de Coordenadas Local (Ansys (2002))

Figura 4.20 Especificação do Caminho de Propagação da Trinca (Ansys (2002))

É necessário a escolha de três nós ao longo da face da trinca sendo, que o primeiro deve estar necessariamente na ponta da trinca e os demais escolhidos na face da trinca, como ilustrado na Figura 4.20a. Este procedimento é válido tanto para o estado plano de tensão como para o estado plano de deformação.

Para o cálculo do fator de intensidade de tensão em estruturas que contenham trincas representadas de forma completa o procedimento é ilustrado na Figura 4.20b. Serão construídas curvas de propagação de trincas $da/dN - DK$; para o corpo de prova C(T) feitos com aço bifásico e submetidos a uma razão de carga $R = 0,1$, com variação do tamanho do menor elemento ou seja será utilizado modelo com tamanho de elemento 0,025 e 0,05 mm. O objetivo dessa variação de tamanho do menor elemento é mostrar que a elaboração de malhas muito refinadas não tem influência no cálculo das constantes da lei de Paris das curvas numéricas calibradas.

Essa calibração tem como objetivo determinar qual o menor elemento que deverá ser utilizado nos modelos de elementos finitos em projetos de componentes sujeitos a trincas, onde as características observadas em laboratório com corpos de prova poderá ser reproduzido em modelos de elementos finitos de componentes reais desde que as

condições de ensaio e de propriedades de material sejam as mesmas tanto nos corpos de prova como nos componentes mecânicos.

Da curva numérica de propagação de trinca do corpo de prova C(T) serão obtidas as constantes do material C e m . Esses valores serão comparados com os valores obtidos pela curva experimental do corpo de prova correspondente, C(T).

Serão obtidas tensões da análise com o corpo de prova C(T) e calcula-se o fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca K_{cl} , pelo programa Ansys (2002) que será normalizado com K_{max} sendo em seguida comparado com a normalização experimental. A correlação numérico – experimental será colocado em um gráfico $K_{cl}/K_{max} - a/W$.

5.0 DESCRIÇÃO DO ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA

A seguir irá ser descrito o ensaio de propagação de trinca feito para a obtenção do fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca. O método de flexibilidade foi utilizado para a execução da pré-trinca no corpo de prova ensaiado e servirá de parâmetro de calibração do modelo numérico, sendo a pré-trinca também simulada pelo método dos elementos finitos.

A carga de ensaio sob carregamento de amplitude constante foi de 3,43 KN e a carga a ser utilizada para executar o ensaio da pré-trinca foi de 5,57 KN conforme anexo B. A frequência de ensaio foi de 30 Hz e uma razão de carga de 0,1 obtendo um comprimento final de pré-trinca foi de 12,5 mm, tendo sido utilizada no ensaio com uma onda de carga do tipo senoidal.

O ensaio de propagação de trinca foi feito em um corpo de prova compacto tração de um aço bifásico (ferrita+martensita) com tensão de escoamento de 401 MPa e 610 MPa tensão de resistência, com objetivo de obter os valores de fechamento de trinca em regime II na curva $da/dN - DK$. A máquina utilizada no ensaio foi da marca MTS, modelo 810 com capacidade de 10 KN conforme ilustrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 Posicionamento do Corpo de Prova na Máquina MTS

A orientação dos corpos de prova em relação à conformação mecânica das placas originárias foi LT, isto é, carregamento na direção da conformação e propagação da trinca na direção transversal à conformação. A espessura do corpo de prova foi de 3,8 mm. Todas as outras dimensões dos corpos de prova são função da largura, como mostrado na Figura 5.2.

Figura 5.2 Esquema do Corpo de Prova Utilizado no Ensaio de Fadiga.

No ensaio, a carga máxima foi calculada de tal forma a se ter a propagação da trinca sempre no regime elástico-linear, com a relação a/W entre 0,25 e 0,6. Para tal, utilizou-se o gráfico apresentado na Figura 5.3.

Figura 5.3 Requisitos Normalizados de Tamanho para Corpos de Prova de Fadiga (ASTM E647 (1995))

A medida do comprimento de trinca foi realizada pelo método indireto na determinação da variação da flexibilidade do corpo de prova. No lugar da observação visual, o comprimento da trinca é estimado, usando-se uma equação polinomial que correlaciona o comprimento da trinca com a rigidez do corpo de prova, ou melhor, o seu inverso – flexibilidade – para uma dada geometria do corpo de prova.

A aquisição de dados foi realizada a cada 0,05 mm de propagação da trinca conforme mostrado no anexo B. Está apresentado neste anexo a carga de fechamento de trinca, os fatores de intensidade máxima e mínima de tensão aplicada no corpo de prova bem como a contagem dos ciclos após cada aquisição.

A direção de propagação pode ser controlada por um entalhe do tipo chevron (ASTM E-647) que orienta a propagação da trinca, os requisitos da pré-trinca para os corpos de prova compacto de tração são de no mínimo 10 % da espessura do corpo de prova ou maior do que 1,0 mm. Estão apresentados na Tabela 5.1 dados da composição química do aço bifásico especificado como DP-Cr (% em peso).

Tabela 5.1 Composição Química

Código	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cr
--------	---	----	----	---	---	----	---	----

DP-Cr	0,08	0,03	1,24	0,06	0,002	0,024	0,0054	0,58
-------	------	------	------	------	-------	-------	--------	------

A determinação da carga de fechamento de trinca, P_{cl} , é realizada por meio de um ajuste linear e quadrático da curva carga aplicada versus COD, para um dado ciclo de fadiga, conforme esquematizado na Figura 5.4.

Figura 5.4 Ajustes Linear/Quadrático na Curva $P \times d$.

A união entre os dois ajustes, linear e quadrático é chamado de “joelho”, sendo o valor de carga para o ponto designado por P_k . O objetivo é determinar um valor particular para P_k que melhor se ajuste na união entre as duas curvas, e este valor particular será então a carga de fechamento de trinca, P_{cl} . Para encontrar o melhor valor de P_k , determina-se então uma série de valores de P_k entre P_{max} e P_{min} , e também a soma dos quadrados dos resíduos e que são calculados pela seguinte expressão,

$$e = \frac{1}{(v_{max} - v_{min})^2} \sum_{i=1}^N \left\{ \left(v_Q(P_i) - v_i \right)^2, P_i < P_k; \right.$$

$$e = \frac{1}{(v_{max} - v_{min})^2} \sum_{i=1}^N \left\{ \left(v_{ref}(P_i) - v_i \right)^2, P_i \geq P_k; \right.$$
(5.1)

Onde, e - é soma dos resíduos quadrados, v_{max} , v_{min} - deslocamentos máximo e mínimo perpendiculares a superfície, N - número de ciclos, v_Q - deslocamento obtido durante o ensaio e utilizado no ajuste da curva linear quando $(P_i, v_i; P_i^3 P_k)$, v_{ref} - deslocamento referência obtido no ajuste na curva quadrática quando $(P_i, v_i; P_i < P_k)$; P_i, v_i - carga e deslocamento iniciais do ensaio. Dessa maneira a carga de fechamento P_{cl} será o valor P_k obtido pelo menor valor de e .

O algoritmo do programa MTS garante a convergência para um P_k correspondente ao mínimo e calculado. A figura 5.5 ilustra a representação da carga de fechamento P_{cl} .

Figura 5.5 Determinação de P_{cl}

De posse carga de fechamento o programa associa o comprimento de trinca, propriedades de material, razão entre largura do corpo de prova e comprimento da trinca para calcular o fator de intensidade de fechamento de trinca na região linear da curva de propagação de trinca.

6.0 RESULTADOS

São apresentados nas Figuras 6.1 a 6.6 a normalização de resultados entre K_{op} – fator de intensidade de tensão de abertura de trinca e K_{max} em função do fator de intensidade de tensão máximo no corpo de prova para as razões de carga $R = 0$ e $R = 0,5$. Os resultados numéricos obtidos com o Ansys (2002) são comparados com resultados obtidos pelo FASTRAN (1992) do trabalho de Liu e Wu (1997), nas mesmas condições de carga, para os seguintes corpos de prova (SE(B), SE(T) e M(T)) da liga de alumínio Al- 2024-T351. Os resultados numéricos do corpo de prova C(T) foram comparados com resultados experimentais obtidos em laboratório na Universidade Federal de Ouro Preto.

Figura 6.1 Normalização das Tensões, Corpo de Prova SE(B), $R = 0$

Figura 6.2 Normalização das Tensões, Corpo de Prova SE(B), $R = 0,5$

Figura 6.3 Normalização das Tensões, Corpo de Prova SE(T), $R = 0$

Figura 6.4 Normalização das Tensões, Corpo de Prova SE(T), $R = 0,5$

Figura 6.5 Normalização das Tensões, Corpo de Prova M(T), $R = 0$

Figura 6.6 Normalização das Tensões, Corpo de Prova M(T), $R = 0,5$

Nas Figuras 6.7 a 6.12 são mostrados exemplos de pós-processamento de análises feitas com os corpos de prova SE(B); SE(T) e M(T), para a liga de alumínio Al-2024-T351, em que foi aplicado um K_{max} de $8 \text{ MPa}\sqrt{m}$ e uma razão de carga $R = 0$, sendo que a primeira figura mostrada é uma vista global do campo de tensões e a segunda figura representa o campo de tensões na ponta trínca em MPa.

O campo de tensões é apresentado em s_{xx} para os corpos de prova SE(B) e SE(T) e s_{yy} para o M(T) e C(T), sendo que o fator de intensidade de tensão máximo inicial aplicado para o C(T), foi de $19 \text{ MPa}\sqrt{m}$ e $R = 0,1$. Os resultados podem ser observados nas Figuras 6.13 e 6.14.

Figura 6.7 Pós-Processamento Corpo de Prova SE(B) 1 (Ansys (2002))

Figura 6.8 Pós-Processamento Corpo de Prova SE(B) 2(Ansys (2002))

Figura 6.9 Pós-Processamento Corpo de Prova SE(T) 1(Ansys (2002))

Figura 6.10 Pós-Processamento Corpo de Prova SE(T) 2(Ansys (2002))

Figura 6.11 Pós-Processamento Corpo de Prova M(T) 1(Ansys (2002))

Figura 6.12 Pós-Processamento Corpo de Prova M(T) 2(Ansys (2002))

Figura 6.13 Pós-Processamento Corpo de Prova C(T) 1(Ansys (2002))

Figura 6.14 Pós-Processamento Corpo de Prova C(T) 2 (Ansys (2002))

A Tabela 6.1 apresenta uma comparação de resultados de K_{op} utilizando técnicas de simulação de propagação de trincas liberando os nós na carga máxima e mínima. É mostrado na Figura 6.15 uma comparação de resultados de uma situação de sobrecarga nos corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T). O objetivo desta comparação é determinar que não há diferença significativa entre as duas metodologias. Os pesquisadores, McClung & Sehitoglu (1989a) já haviam feito um estudo comparando estas e outras metodologias normalmente utilizadas para liberação de nós na ponta da trinca.

Tabela 6.1 Liberação na Carga Máxima e Mínima, $K_{max} = 8 \text{ MPa}\sqrt{m}$, $R = 0$

Modelo	Liberação Máxima	Liberação Mínima	FASTRAN
	K_{op}	K_{op}	K_{op}
	$\text{MPa}\sqrt{m}$	$\text{MPa}\sqrt{m}$	$\text{MPa}\sqrt{m}$
SE(B)	3,57	3,57	3,20
SE(T)	3,63	3,63	3,20
M(T)	3,55	3,55	2,72

A Figura 6.15 mostra uma comparação do fator de intensidade de tensão de abertura de trinca com os corpos de prova SE(B); SE(T) e M(T) submetidos a uma sobrecarga. Isso foi feito com intuito de se verificar em qual dos corpos de prova estudados tem-se o maior e menor efeito de sobrecarga e tendo como consequência uma deformação residual maior.

Figura 6.15 Comparação de Resultados com Sobrecargas

A Figura 6.16 apresenta o resultado experimental do ensaio de propagação de trinca por fadiga realizado em um aço bifásico no corpo de prova C(T). É possível observar ainda na Figura 6.16 a região de validade da equação de Paris.

Figura 6.16 Curva de Propagação de Trinca por Fadiga Experimental para o Aço-Bifásico

A Figura ilustra 6.17 correlaciona curvas de propagação de trincas numéricas e experimentais na região de Paris. Os modelos numéricos contem dois tamanhos de incremento mínimo por ciclo 0,025 e 0,05 mm.

Figura 6.17 Correlação de Curvas de Propagação de Trincas
Corpo de Prova C(T)

Será mostrado, na Figura 6.18, o procedimento para o cálculo das constantes do material C e m da curva de propagação de trinca por fadiga. Apresenta-se como exemplo o cálculo das constantes do material bifásico utilizado no corpo C(T) experimental.

Figura 6.18 Extração de Valores para Cálculo de C e m

O processo inicia-se com a escolha dos pares dos pontos (ΔK , da/dN), escolhendo os extremos da curva (27;9,06E-5) e (48; 6,0E-4), denota-se os pontos da seguinte maneira,

$$\frac{da/dN_1}{da/dN_2} = \left(\frac{\Delta K_1}{\Delta K_2} \right)^m; m = \frac{\log(da/dN_1) - \log(da/dN_2)}{\log(\Delta K_1) - \log(\Delta K_2)};$$

$$m = \frac{\log 9,06 \cdot 10^{-5} - \log 6,11 \cdot 10^{-4}}{\log 27 - \log 48}; m = 3,3$$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m; 9,06E-5 = C(27)^{3,3}; C = 1,62E-9 \frac{mm/ciclo}{(MPa\sqrt{m})^m};$$

Assim as constantes do aço bifásico para $R = 0,1$ são $C = 1,62E-9$ e $m = 3,3$. A Tabela 6.2 mostra as constantes C e m calculadas pelo processo mostrado acima tendo como base as curvas de calibração do corpo de prova compacto de tração C(T).

Tabela 6.2 Constantes C e m Numéricas e Experimentais

corpo de prova	$C, \frac{mm/ciclo}{(MPa\sqrt{m})^m}$	m
C(T), $R = 0,1$		
<i>Experimental</i>	<i>1,62E-9</i>	<i>3,30</i>
Numérico- tamanho do elemento 0,025 mm	1,29E-9	3,50
Numérico- tamanho do elemento 0,05 mm	1,10E-9	3,76

Será mostrado a seguir como foi feito a correlação de valores numéricos e experimentais das constantes C , m os valores são mencionados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3 Procedimento Para Calibração de Curva Numérica e Experimental

A	N	N_{exp}	DN_{exp}	Da_{min}	Da_{min}/DN_{exp}	Da_c/DN_c	DK
---	---	-----------	------------	------------	---------------------	-------------	----

M m	-	-	-	mm	mm/ciclo	mm/ciclo	$MPa\sqrt{m}$
12,5	1	2247					
13	2	161604	159357	0,025	1,57E-07	2,35E-05	18,0
13,5	3	214343	54986	0,025	4,55E-07	6,82E-05	20,4
14	4	244279	29936	0,025	8,35E-07	1,25E-04	24,0

Onde,

- a Comprimento da trinca
- N Numero do ciclo utilizado no modelo numérico para simular a propagação da trinca
- N_{exp} Numero de ciclos experimental associado com o comprimento da trinca
- ΔN_{exp} Variação do numero de ciclos experimental associado com o comprimento da trinca
- Δa_{min} Tamanho do menor elemento utilizado para propagação da trinca
- $\frac{\Delta a_{min}}{\Delta N_{exp}}$ Variação do menor elemento utilizado para propagação da trinca e a variação do número de ciclos experimentais associado com o comprimento da trinca
- $\frac{\Delta a_c}{\Delta N_c}$ Razão entre a taxa de propagação de trinca numérica e experimental calibrada obtida multiplicando $\frac{\Delta a_{min}}{\Delta N_{exp}}$ por 150, número esse obtido através de processo iterativo e sendo esta constante adimensional.

Conforme foi descrito no capítulo 4 foi propagado uma trinca de 22 mm após a confecção da pré-trinca tanto no modelo numérico como no experimental. O procedimento experimental na determinação da carga de fechamento e posteriormente o fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca foi descrito no capítulo anterior. O procedimento numérico para obtenção dos fator de intensidade de fechamento de trinca será descrito a seguir. Após a propagação das trincas em 20 ciclos numéricos obtendo com isso as tensões e deslocamentos ao longo de todo histórico de carregamento das 600 etapas analisadas, sendo 200 no carregamento e 400 no descarregamento. Passa-se agora a determinar as tensões de fechamento de trinca em cada ciclo, para posteriormente fazer o cálculo do fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca e normalizar com o fator de intensidade de tensão máximo aplicado.

Como descrito no capítulo 2 o procedimento, é baseado no trabalho de Wei & James (2000a), para a determinação da tensão de fechamento de trinca é feito observando etapa por etapa no descarregamento o deslocamento do nó atrás da ponta da trinca ao longo de 20 ciclos quando passar de positivo para negativo, além de observar a tensão perpendicular na ponta da trinca quando ficar negativa, atendendo estes dois requisitos ter-se a o primeiro contato entre as duas superfícies da trinca caracterizando a tensão de fechamento de trinca e em seguida aplica-se o procedimento mencionado no capítulo 4 para o cálculo do fator de intensidade de tensão pelo programa Ansys (2002), fator este agora que será chamado fator de intensidade de fechamento de trinca.

Este procedimento repete-se nos 20 ciclos obtendo desta maneira 20 fatores de intensidade de fechamento de trincas que serão normalizados com os fatores de intensidade de tensão máximo e comparados com os resultados experimentais.

A Figura 6.19 mostra uma comparação de resultados numéricos e experimentais através de uma normalização dos fatores de intensidade de tensão máximo K_{max} e o fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca K_{cl} e a variação do fator de intensidade de tensão DK . Os pontos para construção do gráfico correspondem as mesmas coordenadas ao longo da face da trinca nos respectivos modelos numérico e experimental.

Figura 6.19 Normalização de K_{cl} e K_{max}

7.0 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nas Figuras 6.1 a 6.6 são mostradas as normalizações de resultados entre Ansys e FASTRAN com os corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T). Nas Figuras 6.1 a 6.3 observa-se que para $R = 0$ os resultados mostram-se com um excelente nível de correlação entre os dois códigos numéricos. Para a razão de carga $R = 0,5$ os resultados mostrados nas Figuras 6.4 a 6.6 para os mesmos corpos de prova mostram também uma boa correlação entre Ansys e FASTRAN. Nota-se de uma forma geral nas duas razões de carga utilizadas ($R = 0$ e $R = 0,5$) uma diferença de resultados em torno de 10%, diferença

essa que está razoável em se tratando de simulação numérica, assumindo que o FASTRAN é um código que se aproxima bem com dados experimentais.

As Figuras 6.7 a 6.13 ilustram o campo de tensões na ponta da trinca nos corpos de prova avaliados de aço bifásico, ficando evidente atrás da trinca o rastro formado, rastro de deformação plástica este que ira contribuir para o fechamento da trinca.

A Tabela 6.1 ilustra a comparação dos resultados dos três modelos, SE(B), SE(T) e M(T) de uma liga de alumínio Al- 2024-T351, utilizando as metodologias de liberação de nós na carga mínima e máxima, na determinação do fator de intensidade de tensão de abertura da trinca , K_{op} .

A comparação dos procedimentos utilizados por Newman (1974) e Ricardo et al.(2002) para os corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T) utilizando a liga de alumínio Al- 2024-T351, Tabela 6.1, não mostrou diferença na determinação do fator de intensidade de tensão de abertura de trinca utilizando o programa Ansys (2002), já quando se compara com o resultado do código FASTRAN (1992) tem-se uma diferença em torno de 10 % para o corpo de prova SE(B); 12 % para o SE(T) e 23 % para o M(T).

A diferença entre as metodologias (liberação mínima e máxima dos nós) e o FASTRAN precisariam ser confirmada experimentalmente com intuito de verificar de qual metodologia (método dos elementos finitos x experimental) se mostra mais próxima.

A metodologia de liberação dos nós na carga mínima, para o processo de propagação de trinca, foi avaliada para os três corpos de prova em uma situação de sobrecarga, Figura 6.15. Os resultados mostram que o corpo de prova SE(B) apresentou um fator de intensidade de tensão de abertura maior do que aquele atingido antes da evidente sobrecarga. Para os corpos de prova SE(T) e M(T) não houve alteração no nível do fator de intensidade de tensão de abertura de trinca, ficando evidenciado que a sobrecarga aplicada para essa situação não foi suficiente para provocar um aumento da

tensão residual de abertura/fechamento como no caso do corpo de prova SE(B) da liga de alumínio Al- 2024-T351.

A Figura 6.17 mostra a curva de propagação de trinca da/dN - DK comparando resultados numéricos e experimentais. Constatou-se não haver diferenças significativas de resultados com a variação do tamanho do elemento na simulação do processo de propagação de trincas utilizando o método dos elementos finitos.

A Figura 6.18 ilustra a curva de propagação de trinca obtida através de ensaio, onde é possível observar a região de Paris no regime II do processo de propagação de uma trinca.

A Figura 6.22 ilustra a comparação dos resultados experimental e numérico através da normalização da intensidade de tensão de fechamento de trinca do corpo de prova compacto de tração, C(T). O gráfico mostra uma boa correlação entre a abordagem numérica e experimental na faixa de relação a/w de 0,32 a 0,40.

Acima de 0,40 os fatores de intensidade de tensões máximo e de fechamento de trinca tanto experimental como numérico começam a aumentar em função do aumento do tamanho da zona plástica na ponta da trinca, ficando mais evidente este na parte experimental esse aumento.

É fato que a taxa de propagação da/dN ($5,0E10^{-2}$ mm /ciclo ou $5,0E10^{-5}$ m/ciclo) não representa a realidade, e a mesma está na região III da curva de propagação da/dN - DK , região essa que é caracterizada por ser uma região onde a trinca já se encontra em um nível instável; vale ressaltar que o tamanho do menor elemento é da ordem de 10^{-5} m e, portanto a taxa possível de se aplicar nos modelos de elementos finitos seria de 10^{-5} m/ciclo, enquanto que em ensaios convencionais de propagação de trinca a

taxa de propagação é de 10^{-7} m/ciclo, portanto a taxa de simulação é na ordem de 100 vezes maior do que a taxa utilizada em ensaios.

Para se elaborar e processar modelos com características reais seriam necessário um trabalho muito grande tanto de equipamento como mão de obra na elaboração dos modelos e inviabilizariam a execução de simulações de propagações de trinca utilizando métodos numéricos. Adiante serão discutidos com detalhes os resultados comparativos experimentais e numéricos com o corpo de prova compacto de tração.

O objetivo da simulação numérica é reproduzir a estrutura em serviço, caso não seja possível, deve-se procurar soluções qualitativas que podem reproduzir esse comportamento além de poder extrair informações e extrapolar os resultados dos mesmos para situações de serviço. As limitações da metodologia apresentada são, taxa de propagação 10^{-5} m/ciclo, estratégia de trinta etapas de iterações, limitando a quinze tanto no carregamento como no descarregamento. Com esses parâmetros não é possível propagar mais do que 1,5 mm de trinca em corpos de prova e estruturas mecânicas. Essas limitações são em função de equipamento e dos programas utilizados de múltiplas aplicações de elementos finitos.

No corpo de compacto de tração, C(T), foi feito com dez incrementos de carregamento e vinte no descarregamento objetivando uma melhor determinação do fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca. Para os corpos de prova SE(B), SE(T) e M(T) foram utilizados nove etapas no carregamento e descarregamento.

Constatou-se grande a influência na especificação das etapas de carregamentos /descarregamentos na obtenção de maior precisão na determinação do fator de intensidade de tensão de fechamento de trinca.

O presente trabalho identificou como adequado à utilização de 9 etapas de carregamentos e descarregamentos além de uma taxa de propagação de 10^{-5} m / ciclo.

Utilizando as duas definições apresentadas por Wei & James (2000a) foi possível determinar os fatores de intensidade de abertura e fechamento de trinca, constatando que as definições apresentadas pelos autores funcionam de forma simples e precisa. Uma vez determinado à etapa do carregamento ou descarregamento que ocorre abertura e fechamento da trinca respectivamente, faz-se o cálculo dos fatores de intensidade de tensão de abertura e fechamento de trinca pelo procedimento descrito no capítulo 4.

Existem outras maneiras de simular o mecanismo de abertura e fechamento de trinca, entre eles está o FASTRAN, porém esse código não é um código de elementos finitos e tem aplicação específica e limitada, pois o FASTRAN foi desenvolvido para corpo de prova com trinca no centro. A proposta do trabalho foi a de apresentar uma metodologia que utilizando o método dos elementos finitos seja possível reproduzir os mecanismos de abertura e fechamento de trinca.

Hucker & Farris (1993) utilizam o método dos elementos de contorno para representar o mecanismo de fechamento de trinca além de desenvolverem uma integral de contorno para o cálculo da taxa de liberação da energia para um corpo de prova M(T).

Hucker & Farris (1993) e vários outros autores encontraram diferentes maneiras para resolver problemas de abertura ou fechamento de trinca, porém são códigos ou rotinas específicas e limitadas que na maioria das vezes não estão a disposição dos engenheiros de estruturas ou de materiais.

Embora o método dos elementos finitos tenha sua limitação é a ferramenta numérica com maior probabilidade de estar à disposição nas indústrias e universidades para os engenheiros e pesquisadores desenvolverem soluções gerais para a comunidade científica e industrial.

8.0 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia para simular o processo de propagação de trincas e os mecanismos de abertura e fechamento de trincas utilizando o método dos elementos finitos.

Foram avaliados quatro tipos de corpo de prova, sendo que os resultados numéricos de três deles (SE(B), SE(T) e M(T)), da liga de alumínio Al- 2024-T351, foram comparados com os resultados numéricos obtidos com o FASTRAN, e os resultados numéricos de um corpo de prova compacto de tração C(T) com um ensaio experimental.

Foram abordados casos no estado plano de tensão e sob carregamento de amplitude constante tanto na comparação com o FASTRAN como no ensaio realizado.

Utilizando o método dos elementos finitos, liberando os nós na carga mínima, foi possível determinar as tensões, deslocamentos e posteriormente os fatores de intensidade de tensões de abertura e fechamento de trincas, ao longo de todo o histórico de carregamento evitando possíveis problemas de convergência da análise numérica.

Para materiais como ligas de alumínio a estabilidade da intensidade de tensões de abertura/fechamento é atingida para valores de propagação da trinca da ordem de 0,25 mm.

Foi possível reproduzir de forma qualitativa as curvas de propagação de trincas $da/dN - DK$ e as constantes do material C e m obtidas através de análise numérica. É possível notar a consistência dos resultados numéricos quando os mesmos são comparados com os dados experimentais.

Essas curvas associam o tamanho do menor elemento que o componente real sujeito a trincas terá quando for modelado pelo método dos elementos finitos e espera-se que a curva de propagação do componente real tenha comportamento similar ao modelo de corpo de prova C(T) utilizado no trabalho.

A metodologia de simulação de abertura e fechamento de trincas é utilizada na indústria aeronáutica e aeroespacial, ela também pode ser aplicada em áreas como a indústria automotiva entre outras para caracterização de propriedades de materiais. O uso desta metodologia requer que critérios de projeto sejam revistos e que haja uma integração

muito grande entre as áreas de manufatura, qualidade e projeto, pois sabe-se que a fadiga é muito sensível às variações de qualidade da matéria prima e da manufatura.

Proposta Para Trabalhos Futuros

A continuidade desse trabalho se faz necessário com intuito de pesquisar os efeitos dos mesmos tipos de corpo de prova sob carregamento de amplitude variável. É necessário estudar também a validade da metodologia para o estado plano de deformação bem como elaborar nova metodologia para estudar os efeitos dos mesmos tipos de carregamentos (constante e variável) em corpos de prova em três dimensões.

Existe também a necessidade de se verificar a metodologia quando o interesse na região I de uma curva $da/dN - DK$.

Foram apresentados aqui alguns tópicos de continuidade da pesquisa iniciada com este trabalho, espera-se que o mesmo contribua para a comunidade científica brasileira e a indústria nacional.

Anexos A : Revisão de Análise Não-Linear

A.1.1 Encruamento

Após o início do escoamento, o nível de tensões para o qual deformação plástica adicional ocorre pode ser dependente do grau corrente de deformação plástica. Desse modo, o fenômeno é denominado encruamento. Nesse caso a superfície de plastificação variará para cada estágio de deformação plástica.

Alguns modelos com a ocorrência de encruamento no material são ilustrados na Figura A1. Um material dito perfeitamente plástico é mostrado na Figura A1.a onde o nível de tensão de escoamento independe do grau de plastificação.

Se a superfície de plastificação subsequente é uma expansão uniforme da superfície de plastificação original, sem translação, como mostra a Figura A1.b o encruamento é dito isotrópico. Por outro lado, se a superfície de plastificação subsequente preserva sua forma e orientação mas translada no espaço das tensões como um corpo rígido, como mostra a Figura A1.c o encruamento é dito cinemático.

Para alguns materiais, a superfície de plastificação pode não endurecer, mas ao contrário, amolecer. Portanto, para um modelo isotrópico, a superfície de plastificação se contrai progressivamente sem translação.

O desenvolvimento progressivo da superfície de plastificação pode ser definido relacionando a tensão de escoamento k à deformação plástica por meio do parâmetro de encruamento k . Isto pode ser efetuado de dois modos. Primeiro, o grau de encruamento pode ser postulado como uma função do trabalho plástico, W_p , apenas. Então ,

$$k = W_p \quad (A.1)$$

Figura A3 Modelos para Representação do Encruamento (Hencky (1924))

$$Wp = \sigma_{ij} (d \epsilon_{ij}) p \quad (A.2)$$

no qual $(d\epsilon_{ij}) p$ são os componentes plásticos da deformação que ocorre num incremento de deformação. Alternativamente k pode ser relacionada a medida de deformação plástica total denominada efetiva, generalizada ou deformação plástica equivalente que é definida incrementalmente como ,

$$d\bar{\epsilon}p = \sqrt{2/3} [(d\epsilon_{ij}p)(d\epsilon_{ij}p)]^{1/2} \quad (A.3)$$

então , o parâmetro de encruamento k é , por hipótese, definido como ,

$$k = \bar{\epsilon} p \quad (A.4)$$

onde $\bar{\epsilon}p$ o resultado da integração de $d\bar{\epsilon}p$ no caminho de deformação. Este comportamento é denominado encruamento.

O estado de tensões onde $f = k$ representa o estado plástico. O comportamento elástico é caracterizado por $f < k$. No estado plástico , $f = k$ a mudança incremental na função devido a mudança incremental de tensões é ,

$$df = (\partial f / \partial \epsilon_{ij}) d \epsilon_{ij} \quad (A.5)$$

então se ,

$df < 0$ - descarregamento elástico ocorre (comportamento elástico) e a "tensão" retorna para dentro da superfície de plastificação.

$df = 0$ carregamento neutro (comportamneto plástico para um material perfeitamente plástico) e a " tensão " permanece sobre a superfície de plastificação.

A.1.2 Curva para um Material Elásto-Plástico

Considere um ensaio de tração de um material elasto-plástico que produz a curva apresentada na Figura A2.

O comportamento é inicialmente elástico, caracterizado pelo módulo de elasticidade E , até que o escoamento se inicie para a tensão uniaxial de tração σ_y . Posteriormente a resposta do material é elasto-plástica com a tangente local à curva tensão-deformação variando continuamente é denominada módulo elasto-plástico ou tangente E_T .

Figura A2 Representação de um Ensaio de Tração Uniaxial Curva Tensão x Deformação

A lei de encruamento $K = K(k)$ pode ser expressa em termos de tensão efetiva (já que é proporcional à J_2) pois pela hipótese de encruamento,

$$\bar{s} = K(k) = H(p) \quad (A.6)$$

ou diferenciando

$$\bar{s} / d\bar{e}p = H'(\bar{e}p) \quad (A.7)$$

No caso uniaxial considerado $\sigma_1 = \bar{\sigma}$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ e desse modo,

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3/2} \cdot [\sigma_{ij} \cdot \sigma_{ij}]^{1/2} \quad (A.8)$$

Se o incremento de deformação plástica na direção de carregamento é $d\epsilon_p$ então, $(d\epsilon)_p = d\epsilon_p$ e já que a deformação plástica é por hipótese incompressível, o módulo de Poisson é efetivamente 0.5 e $(d\epsilon_2)_p = -0.5 d\epsilon_p$ e $(d\epsilon_3)_p = -0.5 d\epsilon_p$. A deformação plástica efetiva fica,

$$d\bar{\epsilon}_p = \sqrt{2/3} [(\epsilon_{ij})_p (\epsilon_{ij})_p]^{1/2} = d\epsilon_p \quad (\text{A.9})$$

As duas expressões acima explicam as constantes arbitrárias empregadas nas definições de $\bar{\sigma}$ e $\bar{\epsilon}_p$, já que estes termos são requeridos para se obter as tensões deformações reais para o ensaio uniaxial.

Manipulando as equações (A.7), (A.8) e (A.9) tem-se,

$$H'(\epsilon_p) = d\sigma / d\epsilon_p = d\sigma / (d\epsilon - d\epsilon_e) = 1 / [d\epsilon / d\sigma - (d\epsilon_e / d\sigma)]$$

$$H' = E_T / (1 - E_T / E) \quad (\text{A.10})$$

Desse modo a função do encruamento H' pode ser determinada experimentalmente a partir de um ensaio de tração uniaxial.

Anexo B: Resultados do Ensaio Experimental

Report, <Untitled>
 Operator, GODEFROID
 Date, Fri Aug 02 22:24:45 2002
 Template, Fatigue Crack Growth

Procedure, luizcarlos1
Batch, luizcarlos1

Batch Summaries , <luizcarlos1>

Number of Specimens	10
Number of Specimens Precracked	1
Number of Specimens Executed	1
Specimen Geometry	FFC(T)
Batch Comments	Aco bifasico
Cr	
-- Compliance Coefficients --	
C0	1 (none)
C1	-4.5
(none)	
C2	13.157
(none)	
C3	-172.551
(none)	
C4	879.944
(none)	
C5	-1514.67
(none)	
-- K Calibration Coefficients --	
Calibration coeff. 0	0.886
(none)	
Calibration coeff. 1	4.64
(none)	
Calibration coeff. 2	-13.32
(none)	
Calibration coeff. 3	14.72
(none)	
Calibration coeff. 4	-5.6
(none)	
-- Specimen <cindmb07> --	
Precrack Status	Not
Precracked	
Test Status	Test Defined
-- Specimen <cindms03> --	
Precrack Status	Not
Precracked	
Test Status	Test Defined
-- Specimen <cindmb03> --	
Precrack Status	Not
Precracked	
Test Status	Test Defined
-- Specimen <cindmb031> --	

```

Precrack Status      Not
Precracked
Test Status          Test Defined
    -- Specimen <felcrl03> --
Precrack Status      Not
Precracked
Test Status          Test Defined
    -- Specimen <felcrt03> --
Precrack Status      Not
Precracked
Test Status          Test Defined
    -- Specimen <felsil03> --
Precrack Status      Not
Precracked
Test Status          Test Defined
    -- Specimen <felcrl03> --
Precrack Status      Not
Precracked
Test Status          Test Defined
    -- Specimen <felcrl06> --
Precrack Status      Not
Precracked
Test Status          Test Defined
    -- Specimen <luizcarlos1> --
Precrack Status      Precrack
Completed
Test Status          Test
Executed

```

```

Report,      <Untitled>
Operator,    GODEFROID
Date,        Fri Aug 02 22,26,52 2002
Template,    Fatigue Crack Growth
Procedure,   luizcarlos1
Batch,       luizcarlos1

```

Test Summary , <Untitled 9>

```

    -- Identification --
Template      FCG
Procedure     luizcarlos1
Comment,
    Luiz Carlos

Operator , Leonardo
Job Number , 120857

```

```

      Date of Test , 8/02/02
Batch                                     luizcarlos1
Batch Comments                           Aco bifasico
Cr
Specimen                                 luizcarlos1
Specimen Comments                         Aco bifasico
Cr
      -- Geometry --
Specimen Geometry                       FFC(T)
Width                                   50    mm
Notch Length                           10    mm
Notch Height (h)                        3    mm
Net Thickness                           3.8  mm
Modulus of Elasticity                   205000
      N/mm^2
Yield Strength                          401.092
      N/mm^2
Ultimate Tensile Strength                612.719
      N/mm^2
Poisson's Ratio                         0.3  (none)
Crack Plane Orientation                  LT
      -- Compliance Coefficients --
C0                                       1    (none)
C1                                      -4.5
      (none)
C2                                      13.157
      (none)
C3                                      -172.551
      (none)
C4                                      879.944
      (none)
C5                                      -1514.67
      (none)
      -- K Calibration Coefficients --
Calibration coeff. 0                    0.886
      (none)
Calibration coeff. 1                    4.64
      (none)
Calibration coeff. 2                   -13.32
      (none)
Calibration coeff. 3                   14.72
      (none)
Calibration coeff. 4                   -5.6
      (none)
      -- Precrack Parameters --
Final Kmax                              655.673
      N/mm^1.5
Load Ratio, R   (min/max)              0.1  (none)

```

Test Frequency	30	Hz
Final Crack Length	12.5	mm
Cycle Limited	Off	
Maximum Number of Cycles	10000	
Crack Length Monitoring	compliance	
Upper LSF data range	90	
Lower LSF data range	10	
Automatic Inspection Hold	Off	
Inspection Interval (cycles)	10000	
-- Precrack Setup --		
PCR Load Signal	Load	
PCR Load Range	10000	N
PCR COD Signal	COD	
PCR COD Range	3	mm
-- Precrack Results --		
Precrack Cycles	140123	
Precrack Kmax	907.35	
N/mm ^{1.5}		
Precrack Final K	672.35	
N/mm ^{1.5}		
Precrack Pmax	5576	N
Precrack Final P	3668.4	N
Precrack crack length	12.501	mm
-- Precrack Crack Lengths --		
Precrack length 1	12.501	mm
Precrack length 2	12.501	mm
Precrack length 3	12.501	mm
Precrack length 4	12.501	mm
Precrack length 5	12.501	mm
-- Execution Parameters --		
Test Method	Constant	
Load Amplitude		
Endlevel 1	3432.33	N
Endlevel 2	343.233	N
Normalized K Gradient (C)	-0.0787402	
1/mm		
Load Ratio, R (min/max)	0.1	(none)
Test Frequency	30	Hz
Waveshape	Sine	
Crack Length Monitoring	compliance	
Automatic Inspection Hold	Off	
Inspection Interval (cycles)	10000	
-- Test Setup --		
Load Channel Name	Load	
COD Channel Name	COD	
Load Signal	Load	
COD Signal	COD	

```

User Test Modulus                205000
    N/mm^2
    -- Data Storage --
Crack length update interval      0.05      mm
Manual/Visual                     Off
External                           Off
Compliance                         On
Upper LSF data range              90
Lower LSF data range              10
Display Closure Information        On
Store Timed Data                   On
Event logging                      On
Event Log Filename
    luizcarlos1.txt
    -- Test Termination --
Crack Length Limited               On
Final Crack Length                 40      mm
Crack Growth Rate Limit            Off
Target Crack Growth Rate           3e-007
    mm/cycle
Measurements Outside of Target     3
Cycle Limited                      Off
Maximum Number of Cycles           1000000
Crack Length Tolerance             Off
Crack Length Measurement Tolerance 0.5      mm
Crack Gage Tolerance               Off
Crack Gage Measurement Tolerance   0.5      mm
Hydraulic Shutdown at Termination  No
    -- Test Results --
FCG Cycle Count                    484128
FCG Crack Length                    34.7769   mm
FCG K Max                          2667.33
    N/mm^1.5
FCG P Max                          4737.16   N
    -- FCG Crack Lengths --
Final crack length 1                34.7769   mm
Final crack length 2                34.7769   mm
Final crack length 3                34.7769   mm
Final crack length 4                34.7769   mm
Final crack length 5                34.7769   mm
    -- Calculation Information --
Crack Length Data                  Compliance
Measurements
Crack Length Correction            No
Correction
da/dN Curve Fit                    Secant
Effective Yield Strength            Yield
Strength

```


Closure Calculation	Do Closure
Calculations	
Closure Calculation Method	Linear
Quadratic Closure	
-- Apparent Threshold Parameter --	
LSF Starting da/dN	1e-007
mm/cycle	
LSF Ending da/dN	1e-006
mm/cycle	
da/dN Value	1e-007
mm/cycle	
-- Results using Delta K Applie --	
App. Thresh. Equation,	
da/dN (mm/cycle) =	
c * (Delta K (N/mm ^{1.5}))^n	
ERROR	999
MRLogFitRange, Need 1 or more points in range	
-- Results using Delta K Effect --	
App. Thresh. Equation,	
da/dN (mm/cycle) =	
c * (Delta K (N/mm ^{1.5}))^n	
ERROR	999
MRLogFitRange, Need 1 or more points in range	
-- Validity Results --	
Is Notch Length >= 0.2W?	
10 mm >= 10 mm	No
Is precrack extension from notch	
>= 0.10B, h or 1 mm?	
2.501 mm	
>= 0.38 mm, 3 mm or 1 mm	No
Is final precrack Kmax	
<= initial test Kmax?	
672.35 N/mm ^{1.5} <= 625.121 N/mm ^{1.5}	No
Diff. b/w surface precrack lengths,	
Is this diff. <= 0.025W or 0.25B?	
0 mm <= 1.25 mm or 0.95 mm	Yes
Diff. b/w surface final crack lengths,	
Is this diff. <= 0.025W or 0.25B?	
0 mm <= 1.25 mm or 0.95 mm	Yes

Report, <Untitled>
 Operator, GODEFROID
 Date, Fri Aug 02 22,21,19 2002
 Template, Fatigue Crack Growth
 Procedure, luizcarlos1
 Batch, luizcarlos1

Test History Tables , <Untitled 8

Specimen <luizcarlos1>

Cycles	Crack Length mm/cycle	Crack Length Validity	Max K N/mm ^{1,5}	Min K N/mm ^{1,5}	Closure K N/mm ^{1,5}	Closure Load N	Max Load N	Min Load N	delta K N/m ^{1,5}	Max K N/m ^{1,5}	Min K N/m ^{1,5}	Closure K N/m ^{1,5}
579	12,42	Valid	625,121	60,9804	264,087	1447,05	3425,32	334,14	16,92	18,75	1,83	7,92
2247	12,48	Valid	629,797	66,4669	242,359	1323,97	3440,49	363,10	16,90	18,89	1,99	7,27
28251	12,53	Valid	639,11	64,826	245,029	1334,65	3481,17	353,10	17,23	19,17	1,94	7,35
76113	12,58	Valid	653,134	69,3921	253,985	1379,47	3547,37	376,89	17,51	19,59	2,08	7,62
97877	12,64	Valid	658,002	69,4276	291,242	1576,68	3562,19	375,86	17,66	19,74	2,08	8,74
115193	12,69	Valid	634,499	60,2286	267,573	1444,63	3425,67	325,18	17,23	19,03	1,81	8,03
126260	12,75	Valid	641,204	64,1752	276,712	1489,8	3452,21	345,52	17,31	19,24	1,93	8,30
137654	12,81	Valid	644,293	62,3321	287,136	1540,82	3457,38	334,48	17,46	19,33	1,87	8,61
147402	12,86	Valid	653,051	64,8964	285,971	1530,14	3494,27	347,24	17,64	19,59	1,95	8,58
153949	12,91	Valid	648,359	63,0046	287,519	1534,27	3459,8	336,21	17,56	19,45	1,89	8,63
161604	12,96	Valid	642,497	67,1366	295,661	1573,23	3418,77	357,24	17,26	19,27	2,01	8,87
168321	13,02	Valid	645,944	70,5829	288,795	1532,2	3427,05	374,48	17,26	19,38	2,12	8,66
173810	13,09	Valid	655,491	64,9007	296,089	1565,3	3465,31	343,10	17,72	19,66	1,95	8,88
182265	13,14	Valid	642,415	62,9306	287,662	1516,35	3386,36	331,73	17,38	19,27	1,89	8,63
187726	13,20	Valid	656,068	68,1373	292,335	1535,65	3446,35	357,93	17,64	19,68	2,04	8,77
191633	13,27	Valid	656,427	70,0782	285,875	1496,69	3436,7	366,89	17,59	19,69	2,10	8,58
197998	13,32	Valid	663,933	68,8137	300,773	1570,47	3466,69	359,31	17,85	19,92	2,06	9,02
202167	13,37	Valid	658,839	64,5701	297,444	1548,75	3430,49	336,21	17,83	19,77	1,94	8,92

206495	13,42	Valid	667,333	67,7464	288,35	1497,04	3464,62	351,72	17,99	20,02	2,03	8,65
210211	13,48	Valid	670,035	66,8075	281,979	1459,8	3468,76	345,86	18,10	20,10	2,00	8,46
214343	13,53	Valid	664,64	67,2023	278,928	1439,81	3430,84	346,90	17,92	19,94	2,02	8,37
217731	13,59	Valid	672,204	70,5677	283,844	1460,49	3458,76	363,10	18,05	20,17	2,12	8,52
221382	13,65	Valid	663,846	67,0203	279,606	1434,29	3405,32	343,79	17,90	19,92	2,01	8,39
226513	13,70	Valid	676,065	69,9691	259,151	1325,69	3458,42	357,93	18,18	20,28	2,10	7,77
228290	13,76	Valid	674,076	68,2695	276,49	1410,5	3438,77	348,27	18,17	20,22	2,05	8,29
232809	13,81	Valid	678,17	68,2546	274,27	1395,33	3450,14	347,24	18,30	20,35	2,05	8,23
235749	13,86	Valid	683,448	67,2817	272,693	1383,61	3467,73	341,38	18,48	20,50	2,02	8,18
238658	13,91	Valid	679,7	71,3463	267,907	1355,68	3439,46	361,03	18,25	20,39	2,14	8,04
240953	13,96	Valid	679,616	67,9927	265,445	1339,48	3429,46	343,10	18,35	20,39	2,04	7,96
244279	14,02	Valid	680,784	65,7868	265,372	1335,34	3425,67	331,04	18,45	20,42	1,97	7,96
247834	14,07	Valid	687,923	69,4146	263,606	1322,59	3451,52	348,27	18,56	20,64	2,08	7,91
250132	14,13	Valid	689,988	72,1113	261,39	1307,42	3451,18	360,69	18,54	20,70	2,16	7,84
254270	14,18	Valid	693,438	68,6495	246,982	1231,91	3458,76	342,41	18,74	20,80	2,06	7,41
256179	14,24	Valid	686,279	68,9021	245,84	1222,95	3413,94	342,76	18,52	20,59	2,07	7,38
258699	14,29	Valid	686,913	69,1539	246,838	1224,67	3408,08	343,10	18,53	20,61	2,07	7,41
261833	14,34	Valid	696,005	71,0815	250,079	1237,43	3443,94	351,72	18,75	20,88	2,13	7,50
264384	14,39	Valid	694,394	69,045	250,641	1236,74	3426,36	340,69	18,76	20,83	2,07	7,52
267226	14,44	Valid	697,752	67,0541	249,196	1226,4	3433,94	330,00	18,92	20,93	2,01	7,48
269683	14,49	Valid	700,075	72,091	246,878	1211,57	3435,66	353,79	18,84	21,00	2,16	7,41
273302	14,56	Valid	704,33	70,8036	232,2	1135,38	3443,94	346,21	19,01	21,13	2,12	6,97
276601	14,62	Valid	701,034	69,8669	238,422	1162,61	3418,43	340,69	18,94	21,03	2,10	7,15
278348	14,67	Valid	706,549	70,5667	232,027	1128,14	3435,32	343,10	19,08	21,20	2,12	6,96
281289	14,73	Valid	709,864	72,7609	227,433	1102,63	3441,53	352,76	19,11	21,30	2,18	6,82
284258	14,78	Valid	706,648	68,8863	232,231	1122,97	3417,05	333,11	19,13	21,20	2,07	6,97
286584	14,83	Valid	721,671	72,1497	221,644	1068,84	3480,14	347,93	19,49	21,65	2,16	6,65
288491	14,89	Valid	713,544	75,8682	232,741	1119,17	3431,18	364,82	19,13	21,41	2,28	6,98
290979	14,94	Valid	716,22	68,815	221,95	1064,36	3434,63	330,00	19,42	21,49	2,06	6,66
293100	14,99	Valid	717,927	71,8905	228,551	1092,97	3433,25	343,79	19,38	21,54	2,16	6,86
295259	15,04	Valid	720,932	72,9503	226,705	1081,25	3438,42	347,93	19,44	21,63	2,19	6,80

297053	15,10	Valid	725,763	72,9282	229,051	1089,52	3452,21	346,90	19,59	21,77	2,19	6,87
298647	15,15	Valid	726,422	69,4193	222,623	1056,08	3446,01	329,31	19,71	21,79	2,08	6,68
300904	15,20	Valid	722,414	74,4826	214,242	1013,68	3418,08	352,41	19,44	21,67	2,23	6,43
302828	15,26	Valid	726,76	73,2428	226,207	1067,11	3428,42	345,52	19,61	21,80	2,20	6,79
305351	15,32	Valid	729,764	71,4924	219,29	1031,26	3431,87	336,21	19,75	21,89	2,14	6,58
307112	15,37	Valid	733,684	75,2836	226,56	1062,63	3441,18	353,10	19,75	22,01	2,26	6,80
309302	15,42	Valid	732,192	72,9062	219,578	1027,12	3424,98	341,03	19,78	21,97	2,19	6,59
311159	15,48	Valid	727,979	72,8315	217,878	1016,09	3394,98	339,66	19,65	21,84	2,18	6,54
312952	15,53	Valid	741,011	74,5794	210,445	978,854	3446,7	346,90	19,99	22,23	2,24	6,31
315139	15,58	Valid	742,641	74,9372	216,09	1002,3	3444,63	347,59	20,03	22,28	2,25	6,48
316600	15,64	Valid	746,664	79,5373	217,717	1007,12	3453,94	367,93	20,01	22,40	2,39	6,53
318423	15,69	Valid	739,322	77,5162	205,617	948,514	3410,5	357,58	19,85	22,18	2,33	6,17
320115	15,75	Valid	743,055	74,9617	200,501	922,312	3418,08	344,83	20,04	22,29	2,25	6,02
322005	15,80	Valid	747,989	72,9773	211,767	971,614	3431,87	334,83	20,25	22,44	2,19	6,35
323565	15,85	Valid	750,239	75,2842	199,757	914,037	3432,91	344,48	20,25	22,51	2,26	5,99
325623	15,90	Valid	755,814	76,5376	195,29	891,283	3449,45	349,31	20,38	22,67	2,30	5,86
327377	15,95	Valid	752,43	74,0959	202,794	923,001	3424,63	337,24	20,35	22,57	2,22	6,08
329535	16,00	Valid	755,087	75,3611	195,143	885,767	3427,39	342,07	20,39	22,65	2,26	5,85
330729	16,06	Valid	761,776	76,5551	212,731	962,994	3448,42	346,55	20,56	22,85	2,30	6,38
332653	16,11	Valid	760,12	76,7571	205,503	927,828	3431,87	346,55	20,50	22,80	2,30	6,17
334409	16,16	Valid	758,91	81,0173	196,092	883,008	3417,39	364,82	20,34	22,77	2,43	5,88
336301	16,21	Valid	760,005	75,8591	187,939	844,05	3413,25	340,69	20,52	22,80	2,28	5,64
337796	16,26	Valid	770,154	77,374	207,925	931,276	3449,45	346,55	20,78	23,10	2,32	6,24
340117	16,32	Valid	769,579	77,217	194,644	869,218	3436,7	344,83	20,77	23,09	2,32	5,84
341577	16,37	Valid	765,435	76,6484	202,051	899,902	3409,12	341,38	20,66	22,96	2,30	6,06
343272	16,43	Valid	769,572	75,9991	196,381	872,321	3418,43	337,59	20,81	23,09	2,28	5,89
344934	16,48	Valid	775,537	76,4528	204,5	905,763	3434,97	338,62	20,97	23,27	2,29	6,14
346859	16,53	Valid	781,43	77,7493	197,631	873,01	3451,87	343,45	21,11	23,44	2,33	5,93
348121	16,59	Valid	788,262	77,0933	197,213	868,873	3472,9	339,66	21,34	23,65	2,31	5,92
349915	16,64	Valid	786,182	76,3628	197,125	866,115	3454,28	335,52	21,29	23,59	2,29	5,91
351775	16,69	Valid	782,138	78,9262	187,657	822,329	3427,39	345,86	21,10	23,46	2,37	5,63

353203	16,74	Valid	785,187	79,7615	193,507	845,774	3431,87	348,62	21,16	23,56	2,39	5,81
354299	16,80	Valid	796,843	78,6445	192,794	840,257	3472,9	342,76	21,55	23,91	2,36	5,78
356258	16,85	Valid	801,25	85,6197	193,203	839,568	3481,86	372,06	21,47	24,04	2,57	5,80
357716	16,90	Valid	793,252	81,7082	197,13	854,393	3438,08	354,14	21,35	23,80	2,45	5,91
359112	16,96	Valid	791,469	80,8903	197,419	853,358	3421,18	349,65	21,32	23,74	2,43	5,92
360737	17,01	Valid	801,679	82,0677	180,916	779,923	3456,01	353,79	21,59	24,05	2,46	5,43
362430	17,06	Valid	793,473	80,1296	196,494	844,739	3411,19	344,48	21,40	23,80	2,40	5,89
363858	17,12	Valid	804,189	81,4769	195,348	837,499	3447,73	349,31	21,68	24,13	2,44	5,86
365454	17,17	Valid	800,69	78,6302	182,565	780,613	3423,6	336,21	21,66	24,02	2,36	5,48
366748	17,22	Valid	805,129	80,4526	184,821	788,197	3433,6	343,10	21,74	24,15	2,41	5,54
367875	17,28	Valid	810,51	83,277	188,997	803,712	3446,7	354,14	21,82	24,32	2,50	5,67
369470	17,33	Valid	806,596	79,5993	204,871	868,873	3420,84	337,59	21,81	24,20	2,39	6,15
370867	17,38	Valid	809,477	77,692	178,355	754,41	3423,94	328,62	21,95	24,28	2,33	5,35
371864	17,43	Valid	812,491	81,507	176,078	742,688	3427,05	343,79	21,93	24,37	2,45	5,28
373093	17,49	Valid	812,355	78,2814	195,478	822,329	3417,39	329,31	22,02	24,37	2,35	5,86
374720	17,54	Valid	809,609	73,3075	193,19	810,607	3397,05	307,59	22,09	24,29	2,20	5,80
375817	17,59	Valid	813,353	84,2976	180,198	754,065	3403,6	352,76	21,87	24,40	2,53	5,41
377145	17,64	Valid	826,498	85,2733	182,264	760,616	3449,11	355,86	22,24	24,79	2,56	5,47
378240	17,69	Valid	826,61	81,6053	185,81	773,372	3440,49	339,66	22,35	24,80	2,45	5,57
379603	17,75	Valid	829,391	84,3142	189,876	788,197	3442,9	350,00	22,35	24,88	2,53	5,70
380528	17,80	Valid	838,783	88,4549	184,724	764,753	3472,55	366,20	22,51	25,16	2,65	5,54
381790	17,85	Valid	840,306	84,3525	199,921	825,432	3469,45	348,27	22,68	25,21	2,53	6,00
382948	17,90	Valid	828,729	82,7355	189,904	781,992	3412,56	340,69	22,38	24,86	2,48	5,70
384011	17,96	Valid	836,187	79,0223	194,805	799,919	3433,6	324,49	22,71	25,09	2,37	5,84
385107	18,01	Valid	831,134	78,3028	200,618	821,64	3403,95	320,69	22,58	24,93	2,35	6,02
386040	18,06	Valid	844,278	86,6188	204,454	835,086	3448,42	353,79	22,73	25,33	2,60	6,13
387501	18,12	Valid	847,371	86,1219	187,215	762,34	3450,49	350,69	22,84	25,42	2,58	5,62
388661	18,17	Valid	839,139	82,6963	178,111	723,381	3408,08	335,86	22,69	25,17	2,48	5,34
389624	18,23	Valid	856,098	83,6305	169,801	687,525	3466,35	338,62	23,17	25,68	2,51	5,09
390652	18,28	Valid	855,974	85,7301	198,936	803,367	3456,7	346,21	23,11	25,68	2,57	5,97
391744	18,33	Valid	864,096	92,3717	191,149	769,925	3480,48	372,06	23,15	25,92	2,77	5,73

392906	18,38	Valid	860,195	83,9642	178,386	716,486	3454,97	337,24	23,29	25,81	2,52	5,35
393969	18,43	Valid	853,557	84,2677	182,806	732,345	3419,46	337,59	23,08	25,61	2,53	5,48
395065	18,49	Valid	856,127	86,0577	175,811	702,35	3420,15	343,79	23,10	25,68	2,58	5,27
396060	18,54	Valid	855,808	84,824	180,884	720,623	3409,46	337,93	23,13	25,67	2,54	5,43
397059	18,59	Valid	861,729	88,4337	190,823	758,203	3423,94	351,38	23,20	25,85	2,65	5,72
398124	18,65	Valid	869,669	87,111	153,934	609,953	3446,01	345,17	23,48	26,09	2,61	4,62
398988	18,70	Valid	882,022	86,122	147,278	582,027	3485,66	340,35	23,88	26,46	2,58	4,42
399928	18,75	Valid	869,305	88,6235	217,469	857,151	3426,36	349,31	23,42	26,08	2,66	6,52
400925	18,80	Valid	872,495	89,1404	186,512	733,035	3429,11	350,34	23,50	26,17	2,67	5,60
401856	18,86	Valid	873,951	86,0454	195,562	766,477	3425,32	337,24	23,64	26,22	2,58	5,87
402890	18,91	Valid	885,383	88,1374	168,85	659,944	3460,49	344,48	23,92	26,56	2,64	5,07
403789	18,96	Valid	888,909	86,6139	204,349	796,472	3464,62	337,59	24,07	26,67	2,60	6,13
404588	19,01	Valid	889,043	90,8337	209,323	813,71	3456,01	353,10	23,95	26,67	2,73	6,28
405288	19,07	Valid	891,158	94,3676	216,554	839,568	3454,97	365,86	23,90	26,73	2,83	6,50
406220	19,12	Valid	888,401	90,1027	193,926	749,583	3433,94	348,27	23,95	26,65	2,70	5,82
407417	19,18	Valid	891,363	84,2753	213,08	821,295	3435,66	324,83	24,21	26,74	2,53	6,39
408283	19,23	Valid	891,487	89,6201	226,045	868,873	3426,7	344,48	24,06	26,74	2,69	6,78
409129	19,29	Valid	901,295	93,481	237,052	908,521	3454,28	358,27	24,23	27,04	2,80	7,11
409927	19,34	Valid	897,883	90,4787	215,215	822,674	3432,22	345,86	24,22	26,94	2,71	6,46
410729	19,39	Valid	905,249	88,287	264,649	1008,85	3450,83	336,55	24,51	27,16	2,65	7,94
411659	19,44	Valid	904,66	90,2443	247,124	939,55	3439,46	343,10	24,43	27,14	2,71	7,41
412391	19,49	Valid	913,536	89,4946	292,458	1108,83	3463,59	339,31	24,72	27,41	2,68	8,77
413156	19,55	Valid	912,671	94,5824	286,726	1084,01	3450,49	357,58	24,54	27,38	2,84	8,60
414018	19,60	Valid	911,146	88,3404	264,349	996,782	3435,66	333,11	24,68	27,33	2,65	7,93
414917	19,65	Valid	912,352	90,4151	273,322	1027,81	3430,84	340,00	24,66	27,37	2,71	8,20
415713	19,70	Valid	916,592	94,0636	280,597	1052,29	3437,39	352,76	24,68	27,50	2,82	8,42
416648	19,76	Valid	915,845	89,561	365,39	1366,03	3423,94	334,83	24,79	27,48	2,69	10,96
417545	19,82	Valid	919,728	93,634	362,924	1352,58	3427,73	348,96	24,78	27,59	2,81	10,89
418475	19,87	Valid	926,581	94,4443	352,591	1310,52	3443,94	351,03	24,96	27,80	2,83	10,58
419307	19,93	Valid	933,725	93,2381	330,107	1223,29	3460,14	345,52	25,21	28,01	2,80	9,90
420170	19,98	Valid	924,377	90,3251	362,744	1340,51	3416,01	333,79	25,02	27,73	2,71	10,88

421000	20,04	Valid	929,794	92,9284	305,699	1126,41	3426,01	342,41	25,11	27,89	2,79	9,17
421666	20,09	Valid	927,587	95,7098	297,512	1093,32	3408,77	351,72	24,96	27,83	2,87	8,93
422401	20,14	Valid	947,154	97,4961	374,411	1371,89	3470,49	357,24	25,49	28,41	2,92	11,23
423203	20,19	Valid	940,05	93,4253	369,028	1348,44	3434,97	341,38	25,40	28,20	2,80	11,07
423935	20,25	Valid	936,898	93,6857	379,708	1383,61	3413,94	341,38	25,30	28,11	2,81	11,39
424666	20,30	Valid	944,633	92,3429	377,292	1370,85	3432,22	335,52	25,57	28,34	2,77	11,32
425364	20,35	Valid	953,28	94,7053	342,705	1241,57	3453,59	343,10	25,76	28,60	2,84	10,28
426230	20,40	Valid	946,507	98,3013	344,966	1246,39	3419,8	355,17	25,45	28,40	2,95	10,35
426928	20,46	Valid	964,003	92,5496	367,564	1324,31	3473,24	333,45	26,14	28,92	2,78	11,03
427592	20,51	Valid	955,343	93,3899	338,482	1216,05	3432,22	335,52	25,86	28,66	2,80	10,15
428258	20,57	Valid	958,975	95,5852	386,622	1384,99	3435,32	342,41	25,90	28,77	2,87	11,60
429023	20,62	Valid	961,367	98,2556	387,376	1383,96	3434,63	351,03	25,89	28,84	2,95	11,62
429623	20,67	Valid	961,823	96,6909	368,231	1311,9	3426,7	344,48	25,95	28,85	2,90	11,05
430256	20,72	Valid	970,771	103,264	386,61	1373,61	3449,11	366,89	26,03	29,12	3,10	11,60
430923	20,77	Valid	971,737	99,1639	439,903	1558,75	3443,25	351,38	26,18	29,15	2,97	13,20
431622	20,82	Valid	972,573	96,1308	364,08	1286,39	3436,35	339,66	26,29	29,18	2,88	10,92
432322	20,88	Valid	977,548	96,8109	413,032	1454,98	3443,59	341,03	26,42	29,33	2,90	12,39
432951	20,94	Valid	978,838	96,4264	380,254	1335,34	3437,39	338,62	26,47	29,37	2,89	11,41
433615	20,99	Valid	987,324	98,4722	353,373	1237,43	3457,38	344,83	26,67	29,62	2,95	10,60
434314	21,04	Valid	979,682	97,9542	358,297	1251,22	3421,18	342,07	26,45	29,39	2,94	10,75
434878	21,09	Valid	993,045	102,28	382,339	1331,55	3458,42	356,20	26,72	29,79	3,07	11,47
435580	21,14	Valid	990,66	96,7185	367,562	1276,39	3440,15	335,86	26,82	29,72	2,90	11,03
436244	21,20	Valid	993,889	101,376	403,758	1398,09	3441,53	351,03	26,78	29,82	3,04	12,11
436974	21,25	Valid	992,533	99,0691	365,871	1263,29	3427,05	342,07	26,80	29,78	2,97	10,98
437609	21,31	Valid	1002,72	96,0712	355,888	1225,02	3451,52	330,69	27,20	30,08	2,88	10,68
438308	21,36	Valid	1004,64	98,3596	331,006	1136,07	3448,08	337,59	27,19	30,14	2,95	9,93
438918	21,42	Valid	1009	107,536	391,197	1338,45	3452,21	367,93	27,04	30,27	3,23	11,74
439570	21,47	Valid	1004,13	96,8413	364,975	1245,01	3425,32	330,35	27,22	30,12	2,91	10,95
440220	21,53	Valid	1011,19	96,624	329,575	1120,9	3439,11	328,62	27,44	30,34	2,90	9,89
440813	21,58	Valid	1011,76	99,9417	429,397	1456,36	3431,53	338,97	27,35	30,35	3,00	12,88
441454	21,63	Valid	1016,69	103,173	472,372	1597,71	3438,77	348,96	27,41	30,50	3,10	14,17

441986	21,68	Valid	1017,38	99,4941	355,087	1197,44	3430,84	335,52	27,54	30,52	2,98	10,65
442569	21,74	Valid	1021,88	99,5164	352,57	1185,02	3434,63	334,48	27,67	30,66	2,99	10,58
443153	21,80	Valid	1033,78	102,612	411,63	1379,13	3463,59	343,79	27,94	31,01	3,08	12,35
443707	21,85	Valid	1032,65	100,629	323,419	1080,56	3450,14	336,21	27,96	30,98	3,02	9,70
444259	21,90	Valid	1026,14	103,313	389,186	1296,38	3418,08	344,14	27,68	30,78	3,10	11,68
444779	21,96	Valid	1041,64	104,969	423,25	1405,68	3459,45	348,62	28,10	31,25	3,15	12,70
445201	22,01	Valid	1039,63	102,573	439,704	1456,01	3442,56	339,66	28,11	31,19	3,08	13,19
445754	22,06	Valid	1039,22	104,116	442,617	1461,53	3431,53	343,79	28,05	31,18	3,12	13,28
446177	22,11	Valid	1042,42	100,75	382,526	1259,49	3432,22	331,73	28,25	31,27	3,02	11,48
446696	22,17	Valid	1043,67	104,205	439,658	1443,25	3426,01	342,07	28,18	31,31	3,13	13,19
447119	22,22	Valid	1055,86	108,604	468,061	1532,2	3456,35	355,52	28,42	31,68	3,26	14,04
447577	22,28	Valid	1054,17	103,162	433,623	1414,64	3439,11	336,55	28,53	31,63	3,09	13,01
448064	22,33	Valid	1056,49	105,464	502,133	1633,57	3437,04	343,10	28,53	31,69	3,16	15,06
448526	22,39	Valid	1055,97	104,422	525,546	1704,24	3424,29	338,62	28,55	31,68	3,13	15,77
448915	22,44	Valid	1064,95	109,732	434,393	1404,64	3443,59	354,83	28,66	31,95	3,29	13,03
449351	22,49	Valid	1068,13	108,979	440,031	1418,78	3443,94	351,38	28,77	32,04	3,27	13,20
449822	22,54	Valid	1073,11	104,281	487,974	1568,41	3449,11	335,17	29,06	32,19	3,13	14,64
450256	22,60	Valid	1072,21	104,72	404,403	1295,69	3435,32	335,52	29,02	32,17	3,14	12,13
450690	22,65	Valid	1076,37	109,888	476,189	1521,17	3438,42	351,03	28,99	32,29	3,30	14,29
451191	22,72	Valid	1080,44	110,943	548,789	1746,65	3438,77	353,10	29,08	32,41	3,33	16,46
451657	22,77	Valid	1073,34	109,306	511,256	1622,53	3406,36	346,90	28,92	32,20	3,28	15,34
452157	22,82	Valid	1083,75	104,622	514,1	1626,67	3429,11	331,04	29,37	32,51	3,14	15,42
452592	22,88	Valid	1086,48	107,463	520,188	1640,81	3427,05	338,97	29,37	32,59	3,22	15,61
453028	22,93	Valid	1097,13	110,542	502,965	1581,51	3449,8	347,59	29,60	32,91	3,32	15,09
453462	22,98	Valid	1097,38	108,457	460,497	1443,6	3440,15	340,00	29,67	32,92	3,25	13,81
453892	23,04	Valid	1102,63	110,545	562,023	1756,65	3446,35	345,52	29,76	33,08	3,32	16,86
454357	23,10	Valid	1109,89	114,028	481,401	1499,45	3457,04	355,17	29,88	33,30	3,42	14,44
454760	23,15	Valid	1106,83	112,633	467,353	1450,84	3436,01	349,65	29,83	33,20	3,38	14,02
455162	23,21	Valid	1112,41	115,425	540,401	1672,53	3442,9	357,24	29,91	33,37	3,46	16,21
455564	23,26	Valid	1117,86	114,441	446,307	1377,06	3449,11	353,10	30,10	33,54	3,43	13,39
455929	23,31	Valid	1117,59	115,027	550,059	1691,83	3437,39	353,79	30,08	33,53	3,45	16,50

456295	23,37	Valid	1118,25	115,024	553,008	1695,97	3429,46	352,76	30,10	33,55	3,45	16,59
456696	23,42	Valid	1132,48	114,81	490,981	1501,18	3462,56	351,03	30,53	33,97	3,44	14,73
457130	23,47	Valid	1116,51	109,757	477,887	1456,36	3402,57	334,48	30,20	33,50	3,29	14,34
457464	23,53	Valid	1128,03	116,327	576,789	1752,51	3427,39	353,45	30,35	33,84	3,49	17,30
457797	23,58	Valid	1138,66	118,277	537,696	1628,74	3449,11	358,27	30,61	34,16	3,55	16,13
458198	23,64	Valid	1135,46	110,616	463,428	1398,44	3426,36	333,79	30,75	34,06	3,32	13,90
458598	23,69	Valid	1136,26	110,596	504,203	1517,04	3418,77	332,76	30,77	34,09	3,32	15,13
458898	23,74	Valid	1147,58	116,787	604,428	1813,19	3442,56	350,34	30,92	34,43	3,50	18,13
459299	23,80	Valid	1152,16	112,674	573,553	1714,93	3444,97	336,90	31,18	34,56	3,38	17,21
459634	23,86	Valid	1157,91	119,072	524,009	1561,51	3450,49	354,83	31,17	34,74	3,57	15,72
459967	23,91	Valid	1151,16	118,987	492,136	1461,87	3419,46	353,45	30,97	34,53	3,57	14,76
460335	23,96	Valid	1163,29	118,885	571,527	1692,52	3444,97	352,07	31,33	34,90	3,57	17,15
460666	24,02	Valid	1161,57	116,596	413,294	1219,85	3428,42	344,14	31,35	34,85	3,50	12,40
461000	24,08	Valid	1173,21	113,014	468,053	1376,71	3450,83	332,42	31,81	35,20	3,39	14,04
461367	24,13	Valid	1173,71	116,19	643,536	1886,97	3441,53	340,69	31,73	35,21	3,49	19,31
461669	24,18	Valid	1167,55	112,669	544,507	1591,5	3412,56	329,31	31,65	35,03	3,38	16,34
462002	24,24	Valid	1172,33	119,098	558,122	1625,64	3414,63	346,90	31,60	35,17	3,57	16,74
462303	24,29	Valid	1188,19	120,048	507,197	1472,9	3450,49	348,62	32,04	35,65	3,60	15,22
462636	24,34	Valid	1182,11	116,014	380,989	1102,97	3422,22	335,86	31,98	35,46	3,48	11,43
462904	24,40	Valid	1189,53	119,999	497,977	1436,7	3431,87	346,21	32,09	35,69	3,60	14,94
463238	24,46	Valid	1197,3	115,6	583,435	1677,7	3442,9	332,42	32,45	35,92	3,47	17,50
463570	24,51	Valid	1197,1	118,61	553,637	1587,02	3431,53	340,00	32,35	35,91	3,56	16,61
463837	24,56	Valid	1206,9	121,385	567,268	1621,15	3449,11	346,90	32,57	36,21	3,64	17,02
464104	24,61	Valid	1203,98	121,047	592,804	1688,73	3429,8	344,83	32,49	36,12	3,63	17,78
464405	24,67	Valid	1207,56	118,905	582,053	1652,53	3428,42	337,59	32,66	36,23	3,57	17,46
464705	24,72	Valid	1213,4	125,488	999,857	2829,91	3434,29	355,17	32,64	36,40	3,76	30,00
464974	24,77	Valid	1219,32	120,742	582,729	1644,25	3440,49	340,69	32,96	36,58	3,62	17,48
465208	24,82	Valid	1225,42	119,41	592,553	1666,66	3446,7	335,86	33,18	36,76	3,58	17,78
465510	24,88	Valid	1221,84	120,714	603,24	1690,45	3423,94	338,28	33,03	36,66	3,62	18,10
465811	24,94	Valid	1224,13	120,642	662,262	1849,39	3418,43	336,90	33,10	36,72	3,62	19,87
466078	25,00	Valid	1233,48	127,655	758,14	2109,34	3431,87	355,17	33,17	37,00	3,83	22,74

466345	25,05	Valid	1233,14	123,582	658,223	1825,6	3420,15	342,76	33,29	36,99	3,71	19,75
466580	25,10	Valid	1251,86	126,589	750,199	2074,18	3461,18	350,00	33,76	37,56	3,80	22,51
466813	25,15	Valid	1237,08	123,865	642,754	1771,47	3409,46	341,38	33,40	37,11	3,72	19,28
467081	25,20	Valid	1250,81	121,374	862,286	2368,95	3436,35	333,45	33,88	37,52	3,64	25,87
467316	25,25	Valid	1258,17	127,171	772,612	2115,9	3445,66	348,27	33,93	37,75	3,82	23,18
467583	25,31	Valid	1262,26	126,864	797,084	2175,2	3444,63	346,21	34,06	37,87	3,81	23,91
467818	25,36	Valid	1263,48	122,705	843,469	2294,48	3437,04	333,79	34,22	37,90	3,68	25,30
468087	25,42	Valid	1259,25	124,825	840,315	2277,25	3412,56	338,28	34,03	37,78	3,74	25,21
468320	25,48	Valid	1271,41	127,225	895,041	2416,19	3432,22	343,45	34,33	38,14	3,82	26,85
468553	25,54	Valid	1280,04	125,358	852,895	2294,48	3443,59	337,24	34,64	38,40	3,76	25,59
468823	25,60	Valid	1284,93	124,912	763,506	2046,6	3444,28	334,83	34,80	38,55	3,75	22,91
469088	25,65	Valid	1284,88	120,958	615,413	1643,91	3432,22	323,11	34,92	38,55	3,63	18,46
469323	25,70	Valid	1290,69	133,258	846,958	2255,18	3436,7	354,83	34,72	38,72	4,00	25,41
469558	25,76	Valid	1289,85	128,823	729,806	1935,93	3421,53	341,72	34,83	38,70	3,86	21,89
469760	25,81	Valid	1304,23	129,4	819,066	2165,2	3447,73	342,07	35,24	39,13	3,88	24,57
469994	25,87	Valid	1311,8	136,816	886,627	2335,17	3454,97	360,34	35,25	39,35	4,10	26,60
470229	25,92	Valid	1303,79	128,719	1092,5	2868,18	3422,91	337,93	35,25	39,11	3,86	32,78
470431	25,98	Valid	1314,27	130,894	816,221	2135,2	3438,08	342,41	35,50	39,43	3,93	24,49
470665	26,03	Valid	1311,59	127,529	811,224	2114,52	3418,77	332,42	35,52	39,35	3,83	24,34
470868	26,09	Valid	1319,4	134,588	816,837	2122,1	3427,73	349,65	35,54	39,58	4,04	24,51
471103	26,14	Valid	1321,92	133,212	889,989	2303,79	3421,87	344,83	35,66	39,66	4,00	26,70
471270	26,19	Valid	1325,06	135,521	837,195	2160,03	3418,77	349,65	35,69	39,75	4,07	25,12
471504	26,25	Valid	1325,64	129,836	892,752	2295,17	3408,08	333,79	35,87	39,77	3,90	26,78
471705	26,31	Valid	1342,49	139,025	773,959	1981,09	3436,35	355,86	36,10	40,27	4,17	23,22
471940	26,37	Valid	1340,72	129,389	864,892	2205,88	3419,46	330,00	36,34	40,22	3,88	25,95
472107	26,42	Valid	1347,82	135,508	910,31	2314,14	3426,36	344,48	36,37	40,43	4,07	27,31
472308	26,47	Valid	1361,75	135,978	656,253	1662,53	3449,8	344,48	36,77	40,85	4,08	19,69
472511	26,53	Valid	1363,93	139,502	729,245	1840,43	3442,21	352,07	36,73	40,92	4,19	21,88
472712	26,59	Valid	1368,67	138,67	867,972	2182,09	3440,84	348,62	36,90	41,06	4,16	26,04
472914	26,64	Valid	1364,03	129,667	704,943	1765,96	3417,05	324,83	37,03	40,92	3,89	21,15
473116	26,70	Valid	1369,56	134,297	721,396	1800,43	3418,08	335,17	37,06	41,09	4,03	21,64

473318	26,75	Valid	1380,86	144,179	1151,05	2863,01	3434,63	358,62	37,10	41,43	4,33	34,53
473486	26,81	Valid	1386,89	142,063	777,971	1928	3437,04	352,07	37,34	41,61	4,26	23,34
473653	26,86	Valid	1384,58	141,579	940,791	2323,45	3419,46	349,65	37,29	41,54	4,25	28,22
473820	26,91	Valid	1391,61	138,413	1079,68	2657,52	3425,32	340,69	37,60	41,75	4,15	32,39
474021	26,97	Valid	1393,24	137,264	1161,08	2846,8	3416,01	336,55	37,68	41,80	4,12	34,83
474191	27,02	Valid	1407,47	143,86	1004,47	2453,42	3437,73	351,38	37,91	42,22	4,32	30,13
474357	27,08	Valid	1411,47	138,732	946,179	2302,41	3434,63	337,59	38,18	42,34	4,16	28,39
474525	27,13	Valid	1415,45	139,79	1119	2713,38	3432,22	338,97	38,27	42,46	4,19	33,57
474693	27,19	Valid	1422,28	144,619	1125,95	2719,58	3435,32	349,31	38,33	42,67	4,34	33,78
474894	27,25	Valid	1429,96	147,692	1013,33	2436,87	3438,77	355,17	38,47	42,90	4,43	30,40
475062	27,31	Valid	1431,3	141,958	805,126	1928,34	3428,08	340,00	38,68	42,94	4,26	24,15
475230	27,37	Valid	1436,13	139,329	937,291	2236,22	3426,36	332,42	38,90	43,08	4,18	28,12
475365	27,42	Valid	1446,78	145,324	1298,72	3087,79	3439,8	345,52	39,04	43,40	4,36	38,96
475532	27,48	Valid	1450,8	139,845	1054,94	2497,21	3434,29	331,04	39,33	43,52	4,20	31,65
475700	27,54	Valid	1454,24	140,666	1269,01	2992,64	3429,46	331,73	39,41	43,63	4,22	38,07
475869	27,59	Valid	1456,78	146,053	255,683	600,644	3422,22	343,10	39,32	43,70	4,38	7,67
476003	27,65	Valid	1465,74	146,788	1256,35	2939,54	3429,46	343,45	39,57	43,97	4,40	37,69
476171	27,71	Valid	1469,06	144,606	1207,57	2813,36	3422,56	336,90	39,73	44,07	4,34	36,23
476339	27,77	Valid	1479,09	146,52	1253,85	2909,55	3432,22	340,00	39,98	44,37	4,40	37,62
476475	27,83	Valid	1473,04	145,448	1271,68	2939,54	3404,98	336,21	39,83	44,19	4,36	38,15
476641	27,90	Valid	1493,04	152,071	1098,98	2526,86	3432,91	349,65	40,23	44,79	4,56	32,97
476776	27,95	Valid	1494,96	144,944	1352,3	3098,14	3424,98	332,07	40,50	44,85	4,35	40,57
476910	28,01	Valid	1504,66	151,275	1245,22	2841,29	3433,25	345,17	40,60	45,14	4,54	37,36
477045	28,07	Valid	1503,38	154,139	1331,06	3025,39	3417,05	350,34	40,48	45,10	4,62	39,93
477180	28,12	Valid	1511,67	153,216	445,282	1008,16	3422,56	346,90	40,75	45,35	4,60	13,36
477315	28,18	Valid	1519,33	147,017	1237,13	2788,54	3424,63	331,38	41,17	45,58	4,41	37,11
477451	28,24	Valid	1526,51	149,817	1322,02	2966,78	3425,67	336,21	41,30	45,80	4,49	39,66
477585	28,30	Valid	1530,32	153,642	1260,26	2817,15	3420,84	343,45	41,30	45,91	4,61	37,81
477721	28,35	Valid	1530,49	152,191	440,265	980,577	3408,77	338,97	41,35	45,91	4,57	13,21
477856	28,41	Valid	1535,32	140,461	1270,47	2816,46	3403,6	311,38	41,85	46,06	4,21	38,11
477990	28,48	Valid	1564,7	167,542	430,222	949,204	3452,21	369,65	41,91	46,94	5,03	12,91

478127	28,55	Valid	1568,67	162,074	1314,93	2887,14	3444,28	355,86	42,20	47,06	4,86	39,45
478260	28,61	Valid	1569,24	156,507	533,508	1166,06	3429,8	342,07	42,38	47,08	4,70	16,01
478395	28,67	Valid	1575,22	156,723	424,802	924,38	3427,73	341,03	42,55	47,26	4,70	12,74
478497	28,72	Valid	1572,52	154,795	1318,02	2856,8	3408,43	335,52	42,53	47,18	4,64	39,54
478598	28,78	Valid	1594,57	166,798	1362,94	2941,61	3441,53	360,00	42,83	47,84	5,00	40,89
478700	28,83	Valid	1601,06	167,748	1428,53	3071,59	3442,56	360,69	43,00	48,03	5,03	42,86
478835	28,90	Valid	1600,6	157,073	260,804	558,238	3426,01	336,21	43,31	48,02	4,71	7,82
478938	28,95	Valid	1600,47	159,943	1555,53	3316,72	3412,56	341,03	43,22	48,01	4,80	46,67
479038	29,01	Valid	1614,14	161,683	1395,46	2961,26	3425,32	343,10	43,57	48,42	4,85	41,86
479139	29,07	Valid	1624,27	166,727	1360,04	2874,73	3433,25	352,41	43,73	48,73	5,00	40,80
479241	29,12	Invalid	1631,68	161,622	501,508	1056,08	3436,01	340,35	44,10	48,95	4,85	15,05
479344	29,18	Valid	1618,33	147,731	1455,34	3050,56	3392,22	309,66	44,12	48,55	4,43	43,66
479446	29,23	Invalid	1643,77	177,088	368,351	768,89	3431,18	369,65	44,00	49,31	5,31	11,05
479547	29,30	Invalid	1658,67	165,827	1401,43	2911,27	3445,66	344,48	44,79	49,76	4,97	42,04
479649	29,36	Invalid	1661,89	168,599	1482,65	3065,73	3436,35	348,62	44,80	49,86	5,06	44,48
479750	29,41	Invalid	1660,36	168,959	1419,27	2922,65	3419,12	347,93	44,74	49,81	5,07	42,58
479852	29,48	Invalid	1680,53	170,451	462,339	947,48	3443,94	349,31	45,30	50,42	5,11	13,87
479954	29,54	Invalid	1669,79	160,294	1350,28	2753,71	3405,32	326,90	45,28	50,09	4,81	40,51
480055	29,61	Invalid	1690,43	178,297	1473,75	2989,88	3429,46	361,72	45,36	50,71	5,35	44,21
480156	29,66	Invalid	1687,47	164,508	1456,45	2942,99	3409,81	332,42	45,69	50,62	4,94	43,69
480225	29,71	Invalid	1704,48	174,055	1456,46	2931,61	3430,84	350,34	45,91	51,13	5,22	43,69
480326	29,78	Invalid	1716,58	172,201	281,875	564,444	3437,39	344,83	46,33	51,50	5,17	8,46
480428	29,84	Invalid	1720,85	172,58	492,238	980,577	3428,08	343,79	46,45	51,63	5,18	14,77
480529	29,91	Invalid	1726,07	173,696	1489,41	2950,92	3419,8	344,14	46,57	51,78	5,21	44,68
480597	29,96	Invalid	1728,63	174,043	1461,14	2883,35	3411,19	343,45	46,64	51,86	5,22	43,83
480665	30,02	Invalid	1751,8	177,365	1506,24	2960,58	3443,25	348,62	47,23	52,55	5,32	45,19
480767	30,08	Invalid	1744,97	173,008	273,338	534,449	3411,88	338,28	47,16	52,35	5,19	8,20
480835	30,14	Invalid	1768,39	184,356	313,615	610,642	3443,25	358,96	47,52	53,05	5,53	9,41
480936	30,21	Invalid	1756,34	171,725	266,656	516,176	3399,81	332,42	47,54	52,69	5,15	8,00
481004	30,26	Invalid	1784,95	184,801	1694,62	3266,38	3440,49	356,20	48,00	53,55	5,54	50,84
481073	30,32	Invalid	1798,71	184,93	1654,24	3173,99	3451,18	354,83	48,41	53,96	5,55	49,63

481175	30,40	Invalid	1793,04	172,387	1524,1	2905,41	3418,08	328,62	48,62	53,79	5,17	45,72
481243	30,46	Invalid	1817,68	196,966	1697,95	3222,25	3449,45	373,79	48,62	54,53	5,91	50,94
481312	30,51	Invalid	1808,16	180,699	296,764	560,651	3416,01	341,38	48,82	54,24	5,42	8,90
481380	30,57	Invalid	1820,08	176,556	1628,16	3062,28	3423,25	332,07	49,31	54,60	5,30	48,84
481447	30,62	Invalid	1842,77	192,939	1739,33	3257,76	3451,52	361,38	49,49	55,28	5,79	52,18
481516	30,68	Invalid	1835,42	178,743	1654,68	3083,66	3420,49	333,11	49,70	55,06	5,36	49,64
481585	30,75	Invalid	1853,29	189,915	1747,1	3238,8	3435,66	352,07	49,90	55,60	5,70	52,41
481653	30,81	Invalid	1853,72	193,012	1613,99	2975,74	3417,74	355,86	49,82	55,61	5,79	48,42
481721	30,88	Invalid	1868,84	188,624	1713,52	3141,92	3426,7	345,86	50,41	56,07	5,66	51,41
481789	30,95	Invalid	1878,88	190,073	1824,8	3327,06	3425,67	346,55	50,66	56,37	5,70	54,74
481857	31,01	Invalid	1901,51	193,375	1756,08	3184,67	3448,42	350,69	51,24	57,05	5,80	52,68
481926	31,08	Invalid	1888,95	181,987	1601,11	2888,17	3407,39	328,28	51,21	56,67	5,46	48,03
481994	31,14	Invalid	1907,13	193,588	1602,67	2874,73	3420,84	347,24	51,41	57,21	5,81	48,08
482063	31,22	Invalid	1926,64	200,738	384,813	686,146	3435,32	357,93	51,78	57,80	6,02	11,54
482131	31,28	Invalid	1926,98	197,006	1618,98	2870,59	3416,7	349,31	51,90	57,81	5,91	48,57
482199	31,36	Invalid	1950,58	202,389	1822,4	3210,53	3436,35	356,55	52,45	58,52	6,07	54,67
482269	31,43	Invalid	1957,55	197,321	1649,8	2888,86	3427,73	345,52	52,81	58,73	5,92	49,49
482337	31,49	Invalid	1961,9	196,201	444,429	774,062	3417,05	341,72	52,97	58,86	5,89	13,33
482405	31,59	Invalid	1987,49	204,546	1611,19	2784,05	3434,29	353,45	53,49	59,62	6,14	48,34
482474	31,66	Invalid	1997,22	206,599	1319,91	2266,9	3430,15	354,83	53,72	59,92	6,20	39,60
482543	31,73	Invalid	2016,31	203,906	220,07	375,511	3440,49	347,93	54,37	60,49	6,12	6,60
482612	31,81	Invalid	2002,18	194,677	1279,55	2168,99	3393,95	330,00	54,23	60,07	5,84	38,39
482680	31,89	Invalid	2042,2	214,02	262,755	442,396	3438,42	360,34	54,85	61,27	6,42	7,88
482749	31,96	Invalid	2048,27	203,91	218,34	365,168	3425,67	341,03	55,33	61,45	6,12	6,55
482817	32,05	Invalid	2079,11	215,736	336,262	557,893	3449,45	357,93	55,90	62,37	6,47	10,09
482885	32,13	Invalid	2071,21	213,747	227,562	374,822	3411,53	352,07	55,72	62,14	6,41	6,83
482953	32,21	Invalid	2090,32	215,219	393,729	644,085	3419,46	352,07	56,25	62,71	6,46	11,81
482988	32,27	Invalid	2105,49	221,173	292,342	475,838	3427,05	360,00	56,53	63,16	6,64	8,77
483058	32,36	Invalid	2115,39	210,954	420,162	678,561	3416,36	340,69	57,13	63,46	6,33	12,60
483093	32,42	Invalid	2128,83	217,726	289	464,116	3418,77	349,65	57,33	63,86	6,53	8,67
483161	32,50	Invalid	2139,85	212,526	489,713	780,268	3409,46	338,62	57,82	64,20	6,38	14,69

483196	32,57	Invalid	2175,64	223,322	391,329	619,951	3446,7	353,79	58,57	65,27	6,70	11,74
483264	32,65	Invalid	2170,34	220,531	364,094	572,718	3413,94	346,90	58,49	65,11	6,62	10,92
483300	32,73	Invalid	2190,2	219,762	233,453	364,479	3419,46	343,10	59,11	65,71	6,59	7,00
483368	32,84	Invalid	2221,98	229,395	253,267	391,37	3433,6	354,48	59,78	66,66	6,88	7,60
483437	32,92	Invalid	2229,48	236,089	394,355	604,781	3419,12	362,07	59,80	66,88	7,08	11,83
483472	33,00	Invalid	2238,49	228,729	243,221	370,34	3408,43	348,27	60,29	67,15	6,86	7,30
483541	33,11	Invalid	2270,76	236,354	274,328	413,435	3422,22	356,20	61,03	68,12	7,09	8,23
483575	33,16	Invalid	2282,67	232,351	270,993	406,195	3421,53	348,27	61,51	68,48	6,97	8,13
483610	33,25	Invalid	2291,5	235,4	254,879	378,959	3407,05	350,00	61,68	68,75	7,06	7,65
483645	33,33	Invalid	2332,15	256,568	265,446	391,715	3441,53	378,61	62,27	69,96	7,70	7,96
483680	33,39	Invalid	2319,21	238,399	249,681	366,202	3401,53	349,65	62,42	69,58	7,15	7,49
483716	33,47	Invalid	2357,62	248,02	702,764	1022,98	3431,87	361,03	63,29	70,73	7,44	21,08
483751	33,56	Invalid	2358,16	247,938	509,686	735,793	3404,29	357,93	63,31	70,74	7,44	15,29
483786	33,65	Invalid	2366,02	229,171	400,958	573,752	3385,67	327,93	64,11	70,98	6,88	12,03
483822	33,72	Invalid	2380,68	236,189	266,526	378,614	3381,88	335,52	64,33	71,42	7,09	8,00
483857	33,84	Invalid	2457,25	275,003	280,649	394,129	3450,83	386,20	65,47	73,72	8,25	8,42
483892	33,91	Invalid	2457,19	271,493	333,546	465,151	3426,7	378,61	65,57	73,72	8,14	10,01
483928	34,02	Invalid	2471,05	263,991	581,427	801,988	3408,43	364,13	66,21	74,13	7,92	17,44
483963	34,19	Invalid	2520,28	279,956	295,465	400,679	3417,74	379,65	67,21	75,61	8,40	8,86
483998	34,34	Invalid	2560,54	288,533	411,47	549,274	3418,08	385,17	68,16	76,82	8,66	12,34
484033	34,47	Invalid	2557,25	256,628	281,214	370,684	3370,85	338,28	69,02	76,72	7,70	8,44
484068	34,69	Invalid	2644,18	280,517	1589,2	2047,29	3406,36	361,38	70,91	79,33	8,42	47,68
484104	34,78	Invalid	2667,34	304,425	1604,04	2047,63	3404,98	388,61	70,89	80,02	9,13	48,12

Anexo C: Exemplo de Cálculo do Fator de Intensidade de Tensões Pelo Programa Ansys

**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS

ASSUME PLANE STRESS CONDITIONS

ASSUME A HALF-CRACK MODEL WITH SYMMETRY BOUNDARY
CONDITIONS (USE 3 NODES)

EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:
865 864 980
WITH NODE 865 AS THE CRACK-TIP NODE

USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER 1
EX = 0.20500E+06 NUXY = 0.30000
AT TEMP = 0.0000

PRINT THE LOCAL CRACK-TIP DISPLACEMENTS

CRACK-TIP DISPLACEMENTS:
UXC = -0.55790E-03 UYC = 0.0000
UZC = 0.78886E-30

	NODE	CRACK FACE	RADIUS	UX-UXC
UY-UYC		UZ-UZC		
	865	TIP	0.0000	0.0000
0.0000		0.0000		
	864	TOP	0.29844	-0.70890E-03
0.0000		0.0000		
	980	TOP	0.59687	-0.11284E-02
0.35085E-02		0.0000		

LIMITS AS RADIUS (R) APPROACHES 0.0 (TOP FACE) ARE:
(UX-UXC)/SQRT(R) = -0.11347E-02
(UY-UYC)/SQRT(R) = -0.45413E-02
(UZ-UZC)/SQRT(R) = 0.0000

**** KI = 583.40 , KII = 0.0000, KIII = 0.0000 , $MPa\sqrt{mm}$ ****

9.0 REFERÊNCIAS

Anderson, H. “*The Steadily Growing, Elastic-Plastic Crack Tip in a Finite Element Treatment*”, **International Journal of Fracture**, Vol. 9, pp.231-233, 1973

Anderson, T.L.” **Fracture Mechanics**”, CRC Press, USA, 1995

Ansys Inc, *Ansys Version 5.0*, USA, 2002

ASTM, “*Fracture Toughness Testing and Its Applications*”, STP-381, 1964

ASTM, “ *Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials* ”, E399-95, USA, 1995

ASTM, “ *Standard Terminology Relating to Fracture Testing* ”, E616-94, USA, 1994

ASTM, “ *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*”, E647 –95^a, 1995

Baik, J.M.; Herman, L. & Arseno, R.J. “ *Mechanics of Fatigue*”, AMD, vol.47, **ASTM**, pp. 33-51, 1981

Barenblatt G.I. “ *The Formation of Equilibrium Cracks During Brittle Fracture General Ideas on Hypothesis Axially-Symmetric Cracks*”, **Adv. Appl. Mech.**, n.0 7, pp. 55 – 129, 1962

BSI, “*British Standard Method for Determination of the Rate of Crack Growth in Metallic Materials*” , **BS 6835**, **British Standard Institution**, UK, 1988

Burdekin, F.M. & Stone, D.E.W. “ *The Crack Opening Displacement Approach to Fracture Mechanics in Yielding Materials*”, **Journal of Strain Analysis**, Vol. 1, pp. 145-153, 1966

Budianski, B. & Hutchinson, J.W. “*Analysis of Closure in Fatigue Crack Growth*”; **J. Appl. Mech**, N° 45, pp. 267-276, 1978.

Chang, J.B. & Hudson, C.M. “ *Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth Under Random Loading* ”, **ASTM STP 748**, 1981

Chen, D.L.; Weiss, B. & Stickler, R. “*A Model For Crack Closure*”, **Eng. Fract. Engng. Mater. Structures**, Vol. 53, N.o 4, pp. 493-509, 1996

Chen, D.L; “*New Considerations on The Near- Threshold Fatigue Crack Closure Effect(T)*”, **Dr. rer. nat. Dissertation**, University of Viena, 1993

Chermahini, R.G. “ *Three Dimensional Elastic Plastic Finite Element Analysis of Fatigue Crack Growth and Closure* ”, **PhD Thesis**, Old Dominion University, USA, 1986

Dahlberg, M. & Stenfors, S.E. “*Examination of The Fracture Mechanics Approach to Fatigue Design of Nodular Cast Iron*”, In, Blom, **Fatigue 2002**, Vol. 4/5, West Lands, Emas, pp. 2393-2400.

Dowling, N.E. “ **Mechanical Behavior of Materials** ”, Prentice Hall, USA, 1999

Dugdale D.S. “*Yielding of Steel Sheets Containing Slits*”, **Journal Mech. Phys. Solids**, n.0 8, pp. 100 – 104, 1960

Edwards, P.R. & Newman, J.C., Jr (eds.) “ *Shorts Crack Growth Behavior in Various Aircraft Materials*”, **AGARD**, Report N0. 767, 1990

Elber, W. “ *Fatigue Crack Propagation*”, **PhD Thesis**, University of New South Wales, Australia, 1968

Elber, W. “ *Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension* ”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 2, pp. 37 - 45, 1970

Elber, W. “ *Damage Tolerance in Aircraft Structures*”, **ASTM STP 486**, pp. 230-242, 1971

Frost, N.E. ; Marsh, K.J. & Pook, L.P., “**Metal Fatigue**”, Dover Publications, USA, 1999

Guagliano, M. & Vergani, L. “ *Effect of Crack Closure on Gear Crack Propagation*”, **Int. Journal of Fatigue**, N° 23, pp. 65-73, 2001

Head, A.K. “*The Growth of Fatigue Cracks*”, The Philosophical Magazine, Series 7, 1953, pp.925.

Hencky, H. Z. , **Mathematical Mechanics**, vol. 4 , USA, 1924

Hucker, S.A. & Farris, T.N, “ *Modified Crack Closure Method Using Boundary Element* ”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 46, N° 5, pp. 763 – 772, 1993

Irwin, G.R, “*Plastic Zone Near a Crack and Fracture Toughness*”; **Sagamore Research Conference Proceedings**, Vol. 4, 1961

Irwin, G.P. “*Analysis and Stresses and Strains Near The End of Crack Traversing a Plate*”, **Journal of Applied Mechanics**, Vol. 24, Trans. Asme, Vol. 79, 1957, pp. 361.

Josefson, B.L.; Svensson, T.; Ringsberg, J.W.; Gustafsson, T. & Maré, J. “*Fatigue Life and Crack Closure in Specimens Subjected to Variable Amplitude Loads under Plane Strain Conditions*”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 66, pp. 587-600, 2000

Johnson, W. & Mellor, P.B. “ **Engineering Plasticity** ”, John Wiley & Sons, USA, 1986

Liu, J.Z. & Wu, X. R. “*Study on Fatigue Crack Closure Behavior For Various Cracked Geometries*”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 57, N°5, pp. 475-491, 1997.

Kiran, S., Daniewicz, & Newman, J.C. Jr., “*Finite Element Modeling of Plasticity-Induced Crack Closure with Emphasis on Geometry and Mesh Refinements Effects*”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 5, N°2, 1973

Kobayashi, A., Chiu, S.T. & Beuwkes, R. “ *A Numerical and Experimental Investigation on the Use of The J- Integral*”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 5, N°2, 1973

McClung, R.C “ *Finite Element Modeling of Fatigue Crack Growth*” – **Theoretical Concepts and Numerical Analysis of Fatigue** ” In , Blom A, Beevers, C. Editors, West Midlands, EMAS, Ltda, pp. 153-172, England, 1992

McClung, R.C. “ *Finite Element Analysis of Specimen Geometry Effect on Fatigue Crack Closure*”, **Fatigue Fract. Eng. Mater. Structures**, n° 17, pp. 861-872, 1994

McClung, R.C & Sehitoglu, H. “*On The Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure-1 Basic Concepts*”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 33, N.o 2, pp. 237-252, 1989

McClung, R.C & Sehitoglu, H “ *On The Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure-2 Numerical Results* ”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 33, N.o 2, pp. 253-272, 1989

Newman , J.C. Jr., “*The Merging of Fatigue and Fracture Mechanics Concepts, A Historical Perspective*”, **Progress in Aerospace Sciences**, N.o 34, pp. 347-390, 1998

Newman, J.C. Jr., “ *A Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure* ”, **ASTM 490**, pp. 281-301, 1976

Newman, J.C. Jr. “ *Prediction of Fatigue Crack Growth under Variable – Amplitude and Spectrum Loading Using a Closure Model*”, **ASTM STP 761**, pp. 255-77, 1982

Newman, J.C. Jr. “ *FASTRAN II – A Fatigue Crack Growth Structural Analysis Program*”, **NASA TM-10459**, 1992

Newman J. C. Jr. “*Finite Element Analysis of Fatigue Crack Propagation, Including the EffeC(T) of Crack Closure*”, **PhD Thesis**, Virginia Polytechnic Institute, 1974

Newman, J.C. Jr.; Armen, H. Jr. “ *Elastic-Plastic Analysis of Fatigue Crack Under Cyclic Loading*”, **AIAA Journal**, n° 13, pp. 1017-1023, 1975

Newman, J.C. Jr., Bigelow C.A. & Shivakumar, K.N. “*Three Dimensional Elastic – Plastic Finite Analysis of Constraint Variations in Cracked Bodies*”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 46, pp. 1-13, 1993.

Newman, J.C. Jr & Elber, W. “*Mechanics of Fatigue Crack Closure*”, **ASTM STP 982**, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1988

Owen, D.R.J. e Hinton, E.; **Finite Elements in Plasticity**, Pineridge Press Limited, Swansea, U.K. 1980.

Paris, P.C. ; Gomez, M.P.& Anderson, W.E., “*A Rational Analytical Theory of Fatigue*”, **The Trend in Engineering**, Vol. 13, N° 1, 1961

Paris, P.C. & Erdogan F. “*Critical Analysis of Crack Propagation Laws*”, **Journal Basic Engineering**, n.º 85, pp. 528 – 534, 1963

Park, S. J.; Earmme, Y. & Song, J. H. “*Determination of The Most Appropriate Mesh Size for a 2-D Finite Element Analysis of Fatigue Crack Closure Behavior*”, **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, N.º 20, pp. 533-545, 1997

Ricardo, L.C.H.; Pimenta, P.M.; Andrade, A.H.P. & Spinelli, D., “*Crack Closure Simulation by Finite Element*” In, Blom, A.F. “**Fatigue 2002**”, Vol. 4/5, West Midlands, Emas, pp. 2293 – 2300, 2002

Schijve, J.” *Fatigue Crack Growth Closure, Observations and Technical Significance*”, **ASTM STP 982**, pp. 5-34, 1988

Schijve, J. “*Prediction Methods for Fatigue for Fatigue Crack Growth in Aircraft Material* ”, **ASTM STP 700**, pp. 3-34, 1980

Schijve, J, “ *Differences Between the Growth of Small and Large Fatigue Cracks in Relation to Threshold K Values*”, (Eds) Backlund, J., Blom, A. F. & Beevers, C.J. In, **Fatigue Thresholds**, Vol. 2, pp. 881-908, USA, 1982

Sehitoglu, H. “*Crack Opening and Closure in Fatigue*”; **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 21, N.º 2, pp. 329-339, 1998

Suresh, S. & Ritchie, R. O. “ *A Geometric Model for Fatigue Crack Closure Induced by Fracture Surface Morphology*”, **Metallurgical Transactions**, n.º 13^A, pp 1627 – 1631, 1982

Suresh, S. “*Fatigue of Metals* ”, **Academic Press, USA**, 1998

Suresh, S. & Ritchie, R. O . “ *Propagation of Shorts Cracks*”, **Int. Metals Reviews**, Vol. 29, n.º 6, pp. 445 – 476, 1984

Suresh, S., Zamiski, G.F. & Ritchie, R. O . “ *Oxide Induced Crack Closure, An Explanation for Near Threshold Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior* ”, **Metallurgical Transactions**, n.º 12^A, pp. 1435 – 1453, 1981

Taylor, D; Ciepalowicz, A.J. ; Rogers, P. & Develukia, J., “ *Prediction of fatigue Failure in a Crankshaft Using The Technique Crack Modeling* ”, **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, Vol. 20, N.º 1, pp. 13-21, 1997

Wastergaard, H.M, “ *Bearing Pressures and Cracks* ” , **Journal of Applied Mechanics**, Vol. 6, pp. 49-53, 1939.

Wei, L.W. & James, M.N., “ *A Study of Fatigue Crack Closure in Polycarbonate C(T) Specimens* ”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 66, pp. 223-242, 2000a

Wei, L.W. & James, M.N. “*Finite Element Analysis of Plasticity Induced Crack Closure for Inclined Cracks*”, **ECF-13**, 6-9 September, San Sebastian, Spain, 2000b

Weiss, B; Chen, D.L.; & Stickler “*Tests Procedures and a New Concept for Near-Threshold Fatigue Closure*”; **Theoretical Concepts and Numerical Analysis of Fatigue**; In , Blom A, Beevers, C. Editors, West Midlands, EMAS, Ltda, pp. 173-199, England, 1992

Wheeler, O. E. “*Spectrum Loading and Crack Growth* ”, **Journal Basic Engineering**, vol. 94, n.0 1, pp. 181 – 186, 1972

Wilenborg, J.D., Engle, R.M. & Wood, H.A. “ *A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept* ”, **AFFDL – TM-71-1-FBR**, 1971

Wu, J. & Ellyin, F. “*A Study of Fatigue Crack Closure by Elastic-Plastic Finite Element Analysis for Constant Amplitude Loading*”, **Eng. Fracture Mechanics**, Vol. 82, N^a. 2, 1996, pp.43-65

Zienkiewicz, O.C., Valliapan, S & King, I.P.” *Elasto-Plastic Solutions of Engineering Problems ‘ Initial Stress’ Finite Element Approach*”, **Int. Journal Meth. Engineering**, Vol. 1, N^o. 75, pp. 75-100, 1969

Zhang, J.Z. & Bowen, P. “*On The Finite Element Simulation of The Three Dimensional Semi-Circular Fatigue Crack Growth and Closure*”, **Eng. Frac. Mechanics**, Vol. 60, N.o 3, pp. 341-360, 1998