



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**UMA NOVA PROPOSTA PARA INCLUSÃO DOS EFEITOS
DA PERDA DE RESTRIÇÃO À PLASTICIDADE NA
CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO
À FRATURA DE AÇOS FERRÍTICOS**

EMERSON GIOVANI RABELLO

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear - Reatores.**

**Orientador:
Prof. Dr. Miguel Mattar Neto**

**São Paulo
2005**



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**UMA NOVA PROPOSTA PARA INCLUSÃO DOS EFEITOS DA PERDA DE
RESTRICÇÃO À PLASTICIDADE NA CARACTERIZAÇÃO DO
COMPORTAMENTO À FRATURA DE AÇOS FERRÍTICOS**

EMERSON GIOVANI RABELLO



**Tese apresentada como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de Doutor em
Ciências na Área de Tecnologia Nuclear -
Reatores**

Orientador:

Prof. Dr. Miguel Mattar Neto

**São Paulo
2005**

*À minha família: Imaculada (mãe);
José e Dagmar (avós); Anderson e
Roberta (irmãos) e querida esposa
Célia Tibi.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Miguel Mattar Neto, pela orientação, paciência, amizade e apoio na resolução de questões acadêmicas.

Ao Prof. Dr. Julio Cruz (CNEN), Prof. Dr. Carlos Alexandre (IPEN), Prof. Dr. Cláudio Ruggieri (Livre Docente - USP) e a Sebastian Cravero (M.Sc. - USP), pelas inúmeras sugestões e apoio técnico, principalmente na utilização de programas para análise por elementos finitos.

À Direção do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN) pela viabilização das atividades desenvolvidas neste trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Dr. Tanius Mansur (Chefe da Divisão de Engenharia Nuclear e Ciência dos Materiais - CDTN), pelo incentivo e apoio técnico.

Por fim, agradeço aos colegas do CDTN: Márcia Fagundes, Mônica Schwartzman, Heloísa Oliveira, Roberto Di Lorenzo, José Lúcio, Paulo de Tarso, Wagner Reis, Geraldo Martins, João Mário, Silvério Ferreira, Marco Quinan e Denis Scaldaferrri.

UMA NOVA PROPOSTA PARA INCLUSÃO DOS EFEITOS DA PERDA DE RESTRIÇÃO À PLASTICIDADE NA CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FRATURA DE AÇOS FERRÍTICOS

Emerson Giovani Rabello

RESUMO

A caracterização da tenacidade à fratura na região de transição dos aços ferríticos é uma importante questão a ser tratada pela mecânica da fratura. Assim, neste trabalho de pesquisa foram realizadas extensivas análises numéricas 3D (por elementos finitos) objetivando a compreensão dos efeitos da perda de restrição à plasticidade sobre os valores de tenacidade à fratura. Diversos parâmetros como, tamanho de trinca, espessura e geometria do corpo-de-prova e coeficiente de encruamento foram investigados para fornecer informações mais abrangentes sobre o fenômeno da perda de restrição à plasticidade. As análises realizadas revelaram a variação da Integral J e do Parâmetro Q com a espessura de cada corpo-de-prova. Esses resultados numéricos levaram à formulação de um parâmetro (Q_A) mais abrangente para a descrição do nível de restrição plástica na ponta da trinca, incluindo os efeitos da espessura. Novas Trajetórias J - Q_A foram desenvolvidas para a descrição dos efeitos da perda de restrição à plasticidade e para a formulação de um procedimento de “correção” dos valores de tenacidade à fratura. Por meio desse procedimento, pode-se tratar a grande dispersão dos resultados de tenacidade, obtidos na região de transição de um aço ferrítico, permitindo uma caracterização mais realista do nível de restrição à plasticidade na ponta da trinca, em corpos-de-prova utilizados pela mecânica da fratura.

**A NEW PROPOSAL FOR INCLUSION OF THE LOSS OF CRACK TIP
CONSTRAINT EFFECTS IN THE FRACTURE BEHAVIOR
CHARACTERIZATION OF FERRITIC STEELS**

Emerson Giovani Rabello

ABSTRACT

The characterization of the fracture toughness in the transition region of ferritic steels is an important question to be treated by the fracture mechanics. Thus, in this work, extensive 3D numerical analyses have been carried out aiming at the understanding of the loss of crack tip constraint effects on the fracture toughness values. Several parameters such as, crack size, specimen thickness and geometry, and strain hardening have been investigated to provide a comprehensive information about loss of crack tip constraint phenomenon. The accomplished analyses have revealed the variation of the J-Integral and Q-Parameter with the thickness of each test specimen configuration. These numerical results have led to the formularization of a more general parameter (Q_A) for the description of the level of crack tip constraint, including the effect of the specimen thickness. New J- Q_A trajectories have been developed for the description of the effects of the loss of crack tip constraint and for the formularization of a procedure for "correction" of the values of fracture toughness. By way of this procedure, the large dispersion of fracture toughness results in the transition region could be minimized, allowing a more realistic characterization of the behavior of fracture mechanics specimens.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Apresentação do Tema	20
1.2 Justificativa e Motivação	22
1.3 Objetivos e Originalidade	23
1.4 Organização do Trabalho	23
2. REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1 Fundamentos da Mecânica da Fratura Monoparamétrica	25
2.1.1 Mecânica da Fratura Elástica Linear	25
2.1.2 Mecânica da Fratura Elasto-Plástica	29
2.1.3 Limitações da Mecânica da Fratura Monoparamétrica	33
2.2 Fundamentos da Mecânica da Fratura Biparamétrica	35
2.2.1 Efeitos da Restrição à Plasticidade e Efeito de Tamanho	36
2.2.2 Soluções de Referência	38
2.2.3 Teoria J-T	42
2.2.4 Teoria J-Q	44
2.3 Métodos para Correção dos Efeitos da Restrição à Plasticidade	48
2.4 Considerações sobre Metodologias para Correção dos Efeitos da Espessura	53
3. METODOLOGIA E ANÁLISES NUMÉRICAS	57
3.1 Geometrias Estudadas	57
3.2 Modelos 3D	58
3.3 Modelos Constitutivos	60
3.4 Soluções Numéricas	61
3.5 Base de Dados Experimentais	62
4. RESULTADOS NUMÉRICOS	65

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	67
5.1 Comportamento Global: Distribuição dos valores da Integral J e do Parâmetro Q à Frente da Trinca	67
5.2 Trajetórias J - Q	73
5.3 Extensão 3D para as Trajetórias J - Q	75
5.4 Procedimento para Correção de J	79
5.5 Aplicação e Verificação Experimental do Procedimento de Correção	80
5.6 Importância e Coerência dos Resultados	85
6. CONCLUSÕES	86
APÊNDICE A: Resultados Numéricos	88
APÊNDICE B: Variações da Integral J com a Espessura	117
APÊNDICE C: Variações do Parâmetro Q com a Espessura	127
APÊNDICE D: Trajetórias J-Q	137
APÊNDICE E: Trajetórias J-Q_A	147
APÊNDICE F: Correção de J pelo Parâmetro Q_A	150
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais dimensões dos corpos-de-prova.	57
Tabela 2: Composição Química do Aço A508 (% peso).	63
Tabela 3: Propriedades Mecânicas do Aço A508, incluindo parâmetros de ajuste.....	63
Tabela 4: Tenacidade à fratura do Aço A508 modificado - Temperatura de Teste: -30°C.....	63
Tabela 5: Tenacidade à fratura do Aço A508 modificado - Temperatura de Teste: 25°C.....	64
Tabela 6: Tenacidade à fratura do Aço A508 modificado - Temperatura de Teste: 55°C.....	64
Tabela 7: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 5$	65
Tabela 8: Correção da tenacidade à fratura do Aço A508 - Temperatura de Teste: -30°C.....	81
Tabela 9: Correção da tenacidade à fratura do Aço A508 - Temperatura de Teste: 25°C.....	81
Tabela 10: Correção da tenacidade à fratura do Aço A508 - Temperatura de Teste: 55°C.....	82
Tabela 11: Comparação entre as metodologias para correção da tenacidade.....	84
Tabela A1: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 5$	88
Tabela A2: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 5$	88
Tabela A3: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 5$	88
Tabela A4: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 5$	89
Tabela A5: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 5$	89
Tabela A6: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 5$	89
Tabela A7: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 5$	90
Tabela A8: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 5$	90
Tabela A9: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 5$	90
Tabela A10: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 10$	91
Tabela A11: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 10$	91
Tabela A12: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 10$	91
Tabela A13: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 10$	92
Tabela A14: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 10$	92
Tabela A15: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 10$	92
Tabela A16: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 10$	93
Tabela A17: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 10$	93
Tabela A18: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 10$	93
Tabela A19: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 20$	94
Tabela A20: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 20$	94

Tabela A21:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 20$	94
Tabela A22:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 20$. ..	95
Tabela A23:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 20$	95
Tabela A24:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 20$	95
Tabela A25:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 20$	96
Tabela A26:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 20$	96
Tabela A27:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 20$	96
Tabela A28:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 5$	97
Tabela A29:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 5$	97
Tabela A30:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 5$	97
Tabela A31:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 5$	98
Tabela A32:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 5$	98
Tabela A33:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 5$	98
Tabela A34:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 5$	99
Tabela A35:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 5$	99
Tabela A36:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 5$	99
Tabela A37:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 10$. ..	100
Tabela A38:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 10$. ..	100
Tabela A39:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 10$	100
Tabela A40:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 10$. ..	101
Tabela A41:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 10$. ..	101
Tabela A42:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 10$	101
Tabela A43:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 10$. ..	102
Tabela A44:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 10$. ..	102
Tabela A45:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 10$	102
Tabela A46:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 20$. ..	103
Tabela A47:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 20$. ..	103
Tabela A48:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 20$	103
Tabela A49:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 20$. ..	104
Tabela A50:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 20$. ..	104
Tabela A51:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 20$	104
Tabela A52:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 20$. ..	105
Tabela A53:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 20$. ..	105
Tabela A54:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 20$	105
Tabela A55:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 5$	106
Tabela A56:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 5$	106
Tabela A57:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 5$	106
Tabela A58:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 5$	107

Tabela A59:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 5$	107
Tabela A60:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 5$	107
Tabela A61:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 5$	108
Tabela A62:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 5$	108
Tabela A63:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 5$	108
Tabela A64:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 10$. ..	109
Tabela A65:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 10$	109
Tabela A66:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 10$	109
Tabela A67:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 10$. ..	110
Tabela A68:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 10$. ..	110
Tabela A69:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 10$	110
Tabela A70:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 10$. ..	111
Tabela A71:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 10$	111
Tabela A72:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 10$	111
Tabela A73:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 20$. ..	112
Tabela A74:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 20$	112
Tabela A75:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 20$	112
Tabela A76:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 20$. ..	113
Tabela A77:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 20$. ..	113
Tabela A78:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 20$	113
Tabela A79:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 20$. ..	114
Tabela A80:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 20$	114
Tabela A81:	Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 20$	114
Tabela A82:	Valores de J ao longo da frente da trinca: $SC(T) - a/c = 0,166$ (Trinca rasa).	115
Tabela A83:	Valores de Q ao longo da frente da trinca: $SC(T) - a/c = 0,166$ (Trinca rasa).	115
Tabela A84:	Valores de J ao longo da frente da trinca: $SC(T) - a/c = 0,333$ (Trinca profunda).	116
Tabela A85:	Valores de Q ao longo da frente da trinca: $SC(T) - a/c = 0,333$ (Trinca profunda).	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Definição do sistema de coordenadas na ponta da trinca.	26
Figura 2: Modos de carregamento.	26
Figura 3: Efeitos da espessura no Fator Intensidade de Tensões.	28
Figura 4: Modelo da tira de escoamento de Dugdale.	29
Figura 5: Definição do contorno na ponta da trinca.	31
Figura 6: Valores experimentais de tenacidade.	35
Figura 7: Influência da Profundidade da Trinca.	37
Figura 8: Efeitos das geometrias sobre o Módulo de Cisalhamento.	38
Figura 9: Interpretação gráfica do <i>MBL</i> (Cravero, 2004).	39
Figura 10: Modelo <i>MBL</i> com campos (<i>K, T</i>) aplicados em seu contorno.	40
Figura 11: Campos de tensões para o modelo <i>MBL</i> ($n = 10$).	41
Figura 12: Campos de tensões para o modelo <i>MBL</i> ($n = 20$).	41
Figura 13: Campos de tensões obtidos pela análise do modelo <i>MBL</i>	42
Figura 14: Parâmetro de Biaxialidade para diversas geometrias.	43
Figura 15: Procedimento para determinação do Parâmetro <i>Q</i>	46
Figura 16: Curvas <i>J-Q</i> para diversas geometrias.	46
Figura 17: <i>J-Q</i> : Locus de tenacidade à fratura.	47
Figura 18: Metodologia para transferência de valores de tenacidade.	51
Figura 19: Representação da espessura efetiva, B_{ef}	52
Figura 20: Geometrias dos corpos-de-prova utilizados.	57
Figura 21: Modelos de corpos-de-prova tipo <i>SE(B)</i>	58
Figura 22: Modelos de corpos-de-prova tipo <i>SE(T)</i>	58
Figura 23: Modelos de corpos-de-prova tipo <i>C(T)</i>	59
Figura 24: Modelo de corpo-de-prova tipo <i>SC(T)</i>	59
Figura 25: Detalhe do arredondamento da ponta da trinca nos modelos.	60
Figura 26: Modelo <i>MBL</i> utilizado para obtenção das Soluções de Referência (<i>SSY</i>)...62	62
Figura 27: Distribuições de <i>J</i> e <i>Q</i> ao longo da frente da trinca.	65
Figura 28: Distribuição de <i>J</i> à frente da trinca: <i>SE(B)</i>	67
Figura 29: Distribuição de <i>J</i> à frente da trinca: <i>SE(T)</i>	67
Figura 30: Distribuição de <i>J</i> à frente da trinca: <i>C(T)</i>	68
Figura 31: Distribuição de <i>J</i> à frente da trinca: <i>SC(T)</i>	68
Figura 32: Distribuição de <i>J</i> à frente da trinca: <i>SE(B)</i> - $a/W = 0.1$ - $B = 0,25T$ e $0,5T$	69
Figura 33: Distribuição de <i>J</i> à frente da trinca: <i>SE(B)</i> - $a/W = 0.5$ - $B = 0,25T$ e $0,5T$	69

Figura 34: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0.1 - B = 0,25T e 0,5T$	70
Figura 35: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0.5 - B = 0,25T e 0,5T$	70
Figura 36: Distribuição de J à frente da trinca: $C(T) - a/W = 0.1 - B = 0,25T e 0,5T$	70
Figura 37: Distribuição de J à frente da trinca: $C(T) - a/W = 0.5 - B = 0,25T e 0,5T$	71
Figura 38: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0.1 - B = 1T e 0,5T - n = 10$.	72
Figura 39: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0.5 - B = 1T e 0,5T - n = 20$.	72
Figura 40: Trajetórias $J-Q$ para geometria $SE(B)_{EPD}$	73
Figura 41: Trajetórias $J-Q$ estratificada por espessura: $SE(B)$	74
Figura 42: Coordenadas à frente da trinca.....	76
Figura 43: Representação do Parâmetro Q_A	77
Figura 44: Trajetória $J-Q_A$: $SE(B)$	78
Figura 45: Trajetória $J-Q_A$: $SC(T)$	78
Figura 46: Esquema de correção de J baseado no Parâmetro Q_A	79
Figura 47: Metodologias para correção dos valores de tenacidade: $SE(B) - T = -30^\circ C$	83
Figura 48: Metodologias para correção dos valores de tenacidade: $SE(B) - T = 25^\circ C$	83
Figura 49: Metodologias para correção dos valores de tenacidade: $SE(B) - T = 55^\circ C$	83
Figura B1: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B) n = 5$	117
Figura B2: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B) n = 5$	117
Figura B3: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B) n = 5$	117
Figura B4: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B) n = 10$	118
Figura B5: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B) n = 10$	118
Figura B6: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B) n = 10$	118
Figura B7: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B) n = 20$	119
Figura B8: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B) n = 20$	119
Figura B9: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B) n = 20$	119
Figura B10: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T) n = 5$	120
Figura B11: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T) n = 5$	120
Figura B12: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T) n = 5$	120
Figura B13: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T) n = 10$	121
Figura B14: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T) n = 10$	121
Figura B15: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T) n = 10$	121
Figura B16: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T) n = 20$	122
Figura B17: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T) n = 20$	122
Figura B18: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T) n = 20$	122
Figura B19: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T) n = 5$	123
Figura B20: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T) n = 5$	123
Figura B21: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T) n = 5$	123

Figura B22: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 10$	124
Figura B23: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 10$	124
Figura B24: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 10$	124
Figura B25: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 20$	125
Figura B26: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 20$	125
Figura B27: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 20$	125
Figura B28: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SC(T)$ - $n = 5$:	126
Figura C1: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 5$	127
Figura C2: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 5$	127
Figura C3: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 5$	127
Figura C4: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 10$	128
Figura C5: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 10$	128
Figura C6: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 10$	128
Figura C7: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 20$	129
Figura C8: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 20$	129
Figura C9: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 20$	129
Figura C10: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 5$	130
Figura C11: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 5$	130
Figura C12: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 5$	130
Figura C13: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 10$	131
Figura C14: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 10$	131
Figura C15: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 10$	131
Figura C16: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 20$	132
Figura C17: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 20$	132
Figura C18: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 20$	132
Figura C19: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 5$	133
Figura C20: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 5$	133
Figura C21: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 5$	133
Figura C22: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 10$	134
Figura C23: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 10$	134
Figura C24: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 10$	134
Figura C25: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 20$	135
Figura C26: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 20$	135
Figura C27: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 20$	135
Figura C28: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SC(T)$ - $n = 5$:	136

Figura D1: Trajetória $J-Q SE(B) n = 5$	137
Figura D2: Trajetória $J-Q SE(B) n = 5$	137
Figura D3: Trajetória $J-Q SE(B) n = 5$	137
Figura D4: Trajetória $J-Q SE(B) n = 10$	138
Figura D5: Trajetória $J-Q SE(B) n = 10$	138
Figura D6: Trajetória $J-Q SE(B) n = 10$	138
Figura D7: Trajetória $J-Q SE(B) n = 20$	139
Figura D8: Trajetória $J-Q SE(B) n = 20$	139
Figura D9: Trajetória $J-Q SE(B) n = 20$	139
Figura D10: Trajetória $J-Q SE(T) n = 5$	140
Figura D11: Trajetória $J-Q SE(T) n = 5$	140
Figura D12: Trajetória $J-Q SE(T) n = 5$	140
Figura D13: Trajetória $J-Q SE(T) n = 10$	141
Figura D14: Trajetória $J-Q SE(T) n = 10$	141
Figura D15: Trajetória $J-Q SE(T) n = 10$	141
Figura D16: Trajetória $J-Q SE(T) n = 20$	142
Figura D17: Trajetória $J-Q SE(T) n = 20$	142
Figura D18: Trajetória $J-Q SE(T) n = 20$	142
Figura D19: Trajetória $J-Q C(T) n = 5$	143
Figura D20: Trajetória $J-Q C(T) n = 5$	143
Figura D21: Trajetória $J-Q C(T) n = 5$	143
Figura D22: Trajetória $J-Q C(T) n = 10$	144
Figura D23: Trajetória $J-Q C(T) n = 10$	144
Figura D24: Trajetória $J-Q C(T) n = 10$	144
Figura D25: Trajetória $J-Q C(T) n = 20$	145
Figura D26: Trajetória $J-Q C(T) n = 20$	145
Figura D27: Trajetória $J-Q C(T) n = 20$	145
Figura D28: Trajetória $J-Q SC(T) n = 5$:.....	146
Figura E1: Trajetórias $J-Q_A - SE(B) - B = 1T$	147
Figura E2: Trajetórias $J-Q_A - SE(B) - B = 0.5T$	147
Figura E3: Trajetórias $J-Q_A - SE(B) - B = 0.25T$	147
Figura E4: Trajetórias $J-Q_A - SE(T) - B = 1T$	148
Figura E5: Trajetórias $J-Q_A - SE(T) - B = 0.5T$	148
Figura E6: Trajetórias $J-Q_A - SE(T) - B = 0.25T$	148
Figura E7: Trajetórias $J-Q_A - C(T) - B = 1T$	149
Figura E8: Trajetórias $J-Q_A - C(T) - B = 0.5T$	149
Figura E9: Trajetórias $J-Q_A - C(T) - B = 0.25T$	149

Figura F1: Curvas para correção de $J - SE(B) - n = 5$	150
Figura F2: Curvas para correção de $J - SE(B) - n = 10$	150
Figura F3: Curvas para correção de $J - SE(B) - n = 20$	150
Figura F4: Curvas para correção de $J - SE(T) - n = 5$	151
Figura F5: Curvas para correção de $J - SE(T) - n = 10$	151
Figura F6: Curvas para correção de $J - SE(T) - n = 20$	151
Figura F7: Curvas para correção de $J - C(T) - n = 5$	152
Figura F8: Curvas para correção de $J - C(T) - n = 10$	152
Figura F9: Curvas para correção de $J - C(T) - n = 20$	152

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM: *American Society Testing Materials*

CTOD: *Crack Tip Open Displacement (abertura da ponta da trinca)*

CP: *Corpo-de-prova*

C(T): *Compact tension specimen (corpo-de-prova compacto submetido à tração)*

DBT: *Ductile-to-Brittle Transition Region (Região de transição frágil-dúctil)*

EPD: *Estado Plano de Deformação*

EPT: *Estado Plano de Tensão*

HRR: *Iniciais de Hutchinson, Rice e Rosengren*

LSY: *Large Scale Yielding (escoamento em larga escala)*

MBL: *Modified Boundary Layer (modelo de camadas elásticas)*

MFEP: *Mecânica da Fratura Elasto-Plástica*

MFEL: *Mecânica da Fratura Elástica Linear*

M(T): *Middle Tension (corpo-de-prova tipo placa, submetido à tração)*

PTS: *Pressurized Thermal Shock (Choque Térmico Pressurizado)*

RKR: *Iniciais de Ritchie, Knott e Rice*

SE(B): *Single Edge Notch Bend (corpo-de-prova para ensaio de dobramento em 3 Pontos)*

SE(T): *Single Edge Notch Tension (corpo-de-prova tipo barra submetido à tração)*

SC(T): *Surface Crack Tension (corpo-de-prova com trinca superficial submetido à tração)*

SSY: *Small Scale Yielding (escoamento em pequena escala)*

VPR: *Vaso de Pressão do Reator*

ZPF: *Zona de processamento da fratura*

LISTA DE SÍMBOLOS

- A*: Área à frente da trinca sob a qual a tensão principal excede (σ_1/σ_0)
- A_{FB}*: Área à frente da trinca, associada a um sólido finito ($Q \neq 0$)
- A_{SSY}*: Área à frente da trinca, associada à condição SSY ($Q = 0$)
- a*: Tamanho da trinca
- a_{ef}*: Tamanho efetivo da trinca (Modelo Dugdale)
- a/c*: Razão entre a profundidade da trinca e a largura do corpo-de-prova (trinca superficial)
- a/W*: Razão entre o comprimento da trinca e a largura do corpo-de-prova
- B*: Espessura de um corpo-de-prova
- b*: Ligamento remanescente ($W - a$)
- B_{ef}*: Espessura efetiva dos corpos-de-prova
- B_{ref}*: Espessura de referência dos corpos-de-prova
- B_T*: Espessura total do corpo-de-prova
- B_x*: Espessura genérica de um corpo-de-prova
- ds*: Elemento do contorno Γ
- E*: Módulo de elasticidade
- F*: Probabilidade de falha
- f(a/W)*: Fator de forma
- f_{ij}(θ)*: Função adimensional de θ
- G*: Taxa de liberação de energia de Griffith
- I_n*: Constante de integração (Modelo HRR)
- J*: Integral J
- J_c*: Valor de J crítico (fratura frágil)
- J_{FB}*: Valor de J associado a um sólido finito ($Q \neq 0$)
- J_m*: Valor médio da Integral J, computado ao longo da espessura do corpo-de-prova
- J_{SSY}*: Valor de J associado à condição SSY ($Q = 0$)
- J_{QA}*: Valor de J corrigido pelo Parâmetro Q_A
- J_{0.5}*: Valor de J determinado no centro do corpo-de-prova
- k*: Constante de proporcionalidade

K_I : Fator Intensidade de Tensões (Modo I)
 K_{II} : Fator Intensidade de Tensões (Modo II)
 K_{III} : Fator Intensidade de Tensões (Modo III)
 K_{IC} : Valor de K_I crítico (fratura frágil)
 K_{IIC} : Valor de K_{II} crítico (fratura frágil)
 K_{IIIC} : Valor de K_{III} crítico (fratura frágil)
 M : Fator para o Limite de Deformação dos corpos-de-prova
 n : Coeficiente de encruamento
 $O(r)$: Termos de ordem superior na solução de Williams
 P_i : Componente de força ($i = 1, 2$)
 Q : Parâmetro hidrostático (medida da perda de restrição à plasticidade)
 Q_A : Parâmetro para medida da perda de restrição à plasticidade, considerando os efeitos da espessura dos corpos-de-prova
 R : Raio externo (Modelo de camadas elásticas - MBL)
 r : Distância à ponta da trinca (coordenadas polares)
 R_p : Raio da zona plástica
 R_y : Raio da zona plástica (Modelo Dugdale)
 S : Distância entre pontos de aplicação do carregamento nos corpos-de-prova
 T : Tensão elástica
 T_0 : Temperatura de Referência (Curva Mestra)
 u : Deslocamento na direção do plano da trinca
 v : Deslocamento na direção normal ao plano da trinca
 $V(\sigma_1)$: Volume acumulado sob o qual a tensão principal excede (σ_1/σ_0)
 W : Largura de um corpo de prova
 x_1 : Coordenada na direção do plano da trinca
 x_2 : Coordenada na direção normal do plano da trinca
 α : Constante de ajuste (Equação de Ramberg-Osgood)
 β : Parâmetro de biaxialidade
 δ : Crack Tip Open Displacement (CTOD)
 δ_{ij} : Delta de Kroneker ($\delta_{ij} = 1$, se $i = j$ ou $\delta_{ij} = 0$ se $i \neq j$)
 δA : Variação do trabalho das forças externas (Integral J)
 δU : Variação da energia de deformação dentro do contorno (Integral J)
 δII : Variação da energia superficial (Integral J)

Δ : Incremento do comprimento de trinca (Integral J)
 ε : Deformação uniaxial
 ε_0 : Deformação de referência
 ε_{ij} : Tensor de deformações
 ϕ : Fator de restrição
 λ : Distância normalizada à frente da ponta da trinca
 ν : Coeficiente de Poisson
 θ : Ângulo em relação ao plano da trinca (coordenadas polares)
 ρ : Raio da ponta da trinca (modelos numéricos)
 σ : Tensão uniaxial
 σ_0 : Tensão de referência
 σ_e : Tensão de escoamento
 σ_I : Tensão principal
 σ_{ij} : Tensor de tensões
 $(\sigma_{ij})_{HRR}$: Tensor de tensões dado pela solução HRR
 $(\sigma_{ij})_{Dijf}$: Tensor de tensões diferencial
 σ_{rr} : Tensões na direção r (coordenada polares)
 $\sigma_{\theta\theta}$: Tensões na direção θ (coordenada polares)
 ω : Densidade de energia de deformação
 $\tau_{r\theta}$: Tensões de cisalhamento (coordenada polares)
 ψ : Termo genérico que quantifica o nível de restrição na ponta da trinca
 Γ : Caminho de integração (Integral J)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do Tema

Historicamente, muitos acidentes relacionados às falhas estruturais de componentes mecânicos motivaram as pesquisas sobre a fratura dos materiais. A necessidade de previsão e prevenção de falhas estimulou a formulação de novas abordagens para o fenômeno de fratura, em complemento ao tratamento clássico, dado pela teoria de resistência dos materiais. Assim, a Mecânica da Fratura Monoparamétrica (ou convencional) foi proposta para caracterizar o comportamento à fratura de materiais contendo defeitos ou trincas a partir de uma propriedade mecânica, denominada tenacidade à fratura, que representa a resistência à propagação da trinca ou, em outras palavras, a resistência à fratura do material.

A tenacidade à fratura é uma importante propriedade a ser considerada em metodologias para avaliação de integridade estrutural de vasos de pressão e componentes nucleares em geral. Baseando-se nos princípios da Mecânica da Fratura Monoparamétrica, foram desenvolvidos e normatizados ensaios para a determinação da tenacidade à fratura dos materiais, por meio de um único parâmetro (K_C ; J_C ou δ_C) que descreve os campos de tensões e deformações na ponta de uma trinca em situações de plasticidade restrita nas vizinhanças da mesma.

Uma vez que a realização de ensaios de tenacidade à fratura em componentes estruturais reais nem sempre é possível devido às grandes dificuldades técnicas e operacionais encontradas (por exemplo: capacidade dos equipamentos de teste, geometria do componente), o princípio da existência de similaridade entre os campos de tensões permite estabelecer uma correlação direta entre os valores de tenacidade à fratura medidos experimentalmente (em escala de laboratório) e o comportamento à fratura de um componente estrutural em serviço (Anderson, 1995).

Desta forma, as principais normas pertinentes à mecânica da fratura, estabelecem metodologias para obtenção da tenacidade à fratura de um material sob restritas condições dimensionais impostas aos corpos-de-prova utilizados. Estas restrições

dimensionais, que podem ser mais ou menos severas (dependendo do parâmetro), garantem uma condição de alta triaxialidade de tensões na ponta da trinca, com pequena plasticidade, conhecida na literatura como escoamento em pequena escala (*Small Scale Yielding - SSY*). Assim, são comuns em todas as normas para avaliação de tenacidade à fratura as exigências dimensionais para os corpos-de-prova, bem como para o comprimento de trinca, de forma a obter resultados dependentes apenas das propriedades dos materiais, e não da geometria ou dimensões da trinca.

Nesse contexto, surge um primeiro problema ao se estudar o comportamento à fratura em corpos-de-prova com pequenas dimensões ou contendo trincas rasas. Para esses casos, a plasticidade localizada na ponta da trinca afeta as tensões que controlam os mecanismos de fratura, podendo ocorrer uma relaxação dessas tensões (perda de restrição à plasticidade - *Loss of constraint*) para valores abaixo dos previstos pela Mecânica da Fratura Monoparamétrica. Um exemplo desse fato é a constatação de que corpos-de-prova tipo *SE(B)* com relação $a/W < 0,2$ frequentemente apresentam valores de tenacidade 3 a 5 vezes maiores que os obtidos para trincas profundas, considerando configurações com a mesma espessura (Nevalainen & Dodds, 1996).

Outro problema que dificulta a transferência de resultados obtidos em laboratório para a escala real relaciona-se com a forma da trinca. Em componentes estruturais, as trincas raramente são retas e passantes ao longo da espessura, como nos corpos-de-prova recomendados pelas normas para determinação da tenacidade à fratura. Geralmente, as trincas em componentes reais são longas e com formato curvo, iniciando e terminando na mesma superfície da estrutura (trincas semi-elípticas). Nesses casos, a perda da restrição à plasticidade aumenta os valores de tenacidade à fratura devido à pequena distância da frente da trinca à superfície do corpo-de-prova (Nevalainen, 1997).

Além das questões relativas aos efeitos da perda de restrição à plasticidade já citadas, outros fatores devem ser considerados para a avaliação do comportamento à fratura de aços ferríticos. Os valores de tenacidade à fratura na região de transição frágil-dúctil (*Ductile-to-Brittle Transition Region - DBT*) de materiais ferríticos apresentam grande dispersão devido à natureza aleatória do mecanismo de fratura atuante. Assim, metodologias mais realistas para avaliação do comportamento à fratura frágil de materiais ferríticos devem considerar também um parâmetro probabilístico para quantificar as condições globais de falha estrutural, baseado no acoplamento da natureza aleatória da fratura com o campo de tensão local na região onde ela ocorre.

1.2 Justificativa e Motivação

O cenário delimitado pelos efeitos da perda de restrição à plasticidade e os efeitos de natureza estatística sobre a tenacidade à fratura de materiais ferríticos constitui um importante problema a ser tratado pela mecânica da fratura.

Em centrais nucleares, muitos componentes são fabricados com aços ferríticos (incluindo-se o Vaso de Pressão do Reator - VPR) que podem apresentar fratura por clivagem sob condições de operação envolvendo baixas temperaturas. Embora a temperatura normal de operação dos reatores seja suficientemente elevada para se evitar a fratura por clivagem, os efeitos da fragilização neutrônica e do envelhecimento térmico podem mudar o comportamento à fratura do material, deslocando a curva *tenacidade vs. temperatura* em direção a temperaturas mais elevadas. Essa mudança significa que, após algum tempo de operação, o material que anteriormente apresentava um comportamento dúctil passa para uma situação de comportamento frágil.

Além dos efeitos da fragilização térmica e/ou neutrônica, situações anormais de operação ou acidentes postulados na fase de projeto também podem levar o material a operar em uma região de transição entre os comportamentos dúctil e frágil. O evento de Choque Térmico Pressurizado (*Pressurized Thermal Shock - PTS*) é um exemplo de situação anormal de operação.

A busca pela extensão da vida útil de plantas nucleares em operação, por motivos econômicos e estratégicos, somada aos fatos citados anteriormente, também motiva o desenvolvimento de métodos confiáveis para a avaliação da tenacidade à fratura na região de transição. Nesse contexto, esforços têm sido empregados para a definição de uma metodologia capaz de descrever os efeitos da perda de restrição à plasticidade e os efeitos estatísticos envolvidos no processo de fratura, bem como estabelecer critérios para a transferência de resultados obtidos em escala de laboratório para componentes reais.

Assim, uma das grandes motivações para este trabalho é o suporte a metodologias existentes para avaliação de integridade estrutural de vasos de pressão de reatores nucleares, nas quais a resistência à fratura do material é determinada utilizando-se corpos-de-prova com pequenas dimensões.

1.3 Objetivos e Originalidade

Considerando os fatos apresentados em 1.1 e 1.2 (Descrição do Problema e Justificativa e Motivação), neste trabalho, de natureza teórica, pretende-se utilizar a análise por elementos finitos para:

(1) Quantificar os efeitos da restrição à plasticidade no comportamento à fratura de materiais utilizados na fabricação de VPRs, estabelecendo um parâmetro comum para intercomparação dos resultados obtidos para diversas geometrias.

(2) Estabelecer uma metodologia para correção dos valores de tenacidade à fratura em materiais ferríticos, visando a redução dos efeitos mecânicos da perda de restrição à plasticidade.

(3) Obter recomendações que possam auxiliar na elaboração de um modelo mais realista, aplicável na transferência de resultados de tenacidade à fratura obtidos em laboratório para estruturas e componentes reais.

Trata-se de uma proposta original, uma vez que será apresentada uma abordagem para correção dos efeitos da perda de restrição à plasticidade sobre a tenacidade à fratura de materiais ferríticos, baseada em uma modificação das metodologias biparamétricas já existentes, incluindo-se o efeito da espessura do corpo-de-prova.

A modificação proposta considera um parâmetro mais abrangente, denominado Q_A , para a caracterização do nível de triaxialidade de tensões na ponta da trinca. Por meio desse parâmetro é então proposto um procedimento para a correção dos valores de tenacidade à fratura dos materiais ferríticos.

1.4 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 os principais conceitos e fundamentos teóricos utilizados na elaboração desse trabalho de pesquisa são apresentados. A abordagem dada pela Mecânica da Fratura Monoparamétrica para o estudo da fratura em materiais é descrita, evidenciando suas limitações. Assim, são também apresentados os desenvolvimentos realizados pela Mecânica da Fratura Biparamétrica para contornar as limitações da abordagem monoparamétrica, incluindo-se considerações sobre os efeitos da perda de restrição à plasticidade e os “efeitos de tamanho” dos corpos-de-prova.

No Capítulo 3 são descritas a metodologia e as análises numéricas realizadas. A matriz de análise é definida, incluindo os diversos parâmetros estudados: geometrias e

espessuras de corpos-de-prova, comprimentos de trincas e comportamentos mecânicos dos materiais (dados pela variação dos coeficientes de encruamento). São também apresentados os detalhes de construção dos modelos numéricos 3D, bem como, a metodologia utilizada para a elaboração das Trajetórias J - Q , incluindo-se a obtenção das “soluções de referência”. Por tratar-se de um trabalho teórico (numérico), há a necessidade de comprovação experimental dos resultados obtidos. Dessa forma, nesse capítulo são também apresentados resultados experimentais, obtidos por outro autor, que constituem a base de dados para a verificação dos modelos propostos neste trabalho.

No Capítulo 4 e nos Apêndices A, B, e C são apresentados os resultados numéricos obtidos pelas análises por elementos finitos da matriz de análise descrita na metodologia.

As discussões dos resultados são feitas no Capítulo 5, considerando-se os resultados apresentados no Capítulo 4 e nos Apêndices A, B, C, D e E. Nesta discussão são apresentados os principais desdobramentos das análises realizadas, incluindo: (1) uma análise global do comportamento da variação da Integral J e do Parâmetro Q ao longo da espessura dos corpos-de-prova modelados; (2) as Trajetórias J - Q dos respectivos modelos; (3) a formulação de uma extensão 3D para as Trajetórias J - Q , baseada em novo parâmetro (Q_A) para medida dos efeitos da perda de restrição à plasticidade sobre a tenacidade à fratura e, (4) o desenvolvimento de uma metodologia para correção dos valores da tenacidade à fratura, considerando os efeitos da espessura dos corpos-de-prova. São mostrados ainda os resultados relativos à aplicação da metodologia proposta aos valores experimentais obtidos em uma pesquisa realizada por Faleskog e colaboradores (2004), no *Royal Institute of Technology (KTR)*, Suécia. Como foram gerados muitos resultados (expressos por gráficos e tabelas), optou-se por apresentar apenas algumas figuras (representativas do comportamento global dos fenômenos estudados), seguidas de uma breve explicação. Nos Apêndices são mostrados os resultados de todas as análises. De uma forma geral, são explicados os efeitos de cada parâmetro estudado (geometria e espessura dos corpos-de-prova, comprimento relativo de trinca e coeficiente de encruamento).

O Capítulo 6 resume as principais conclusões do trabalho e apresenta algumas sugestões para continuidade e complementação dos estudos realizados. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fundamentos da Mecânica da Fratura Monoparamétrica

A caracterização dos campos de tensões e deformações na ponta de uma trinca é fundamental em estudos de mecânica da fratura, uma vez que esses campos e as suas respectivas perturbações nas vizinhanças determinam o processo de fratura. Assim, a Mecânica da Fratura Monoparamétrica (ou clássica) emprega um parâmetro único para descrever as condições de propagação de uma trinca, sob condições de plasticidade restrita (escoamento em pequena escala - *Small Scale Yielding - SSY Conditions*).

A seguir, serão apresentados os principais fundamentos da Mecânica da Fratura Monoparamétrica tanto para materiais com um comportamento linear-elástico, quanto para materiais elasto-plásticos.

2.1.1 Mecânica da Fratura Elástica Linear

De uma forma geral, a Mecânica da Fratura Elástica Linear (MFEL) se aplica aos materiais com comportamento frágil ou quase-frágil, e fornece um procedimento analítico que relaciona os campos de tensões e deformações nas proximidades da ponta da trinca a outros parâmetros, tais como: tensão aplicada, tamanho, forma e orientação da trinca (Rolfe & Barson, 1977). Por meio dessa abordagem, torna-se possível a representação dos campos de tensões na ponta da trinca, que influi no comportamento à fratura do material, em termos de um único parâmetro, chamado Fator Intensidade de Tensões (K).

Willians (1957) determinou uma função para descrever o campo de tensões em um sólido contendo uma trinca, considerando o sistema de coordenadas originando na ponta da trinca (ver FIG.1) e assumindo um comportamento linear-elástico do material:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}} \right) f_{ij}(\theta) + \text{termos de ordem superior} \quad (1)$$

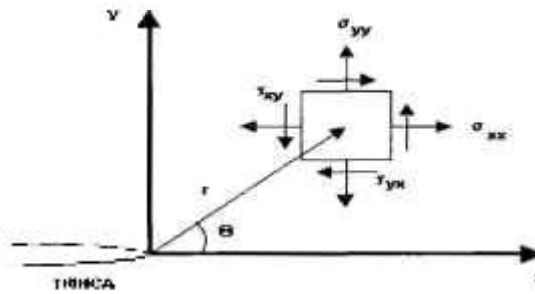


Figura 1: Definição do sistema de coordenadas na ponta da trinca (Adaptado de Anderson, 1995).

Na Eq.1, σ_{ij} é o tensor de tensões, k é uma constante de proporcionalidade e f_{ij} é uma função adimensional de θ .

Os termos de ordem superior dependem da geometria do sólido, mas a solução para uma dada configuração sempre conterá um termo proporcional a \sqrt{r} . Assim, a Eq.1 descreve uma singularidade nas tensões, pois, para $r = 0$, o termo \sqrt{r} tende para infinito e os demais termos permanecem finitos ou próximo a zero. Dessa forma, as tensões próximas à ponta da trinca variam com \sqrt{r} independente da configuração tratada.

Cada modo de carregamento produz uma singularidade na ponta da trinca, mas a constante de proporcionalidade (k) e a função adimensional (f_{ij}) dependem do modo aplicado. Na FIG.2 são apresentados os três modos de carregamento para o desenvolvimento de uma trinca. O Modo I é chamado de modo de abertura, em que a tensão de tração é normal às faces da trinca. O Modo II é o modo de deslizamento ou cisalhamento, e a tensão é normal à aresta que avança. Por fim, o Modo III chamado de rasgamento ou cisalhamento transversal que apresenta a tensão de cisalhamento paralela à aresta que avança (Meyers & Chawla, 1982).

O Modo I de carregamento é encontrado na maioria dos casos práticos de engenharia, razão pela qual a maioria dos autores e pesquisadores opta pelo seu desenvolvimento.

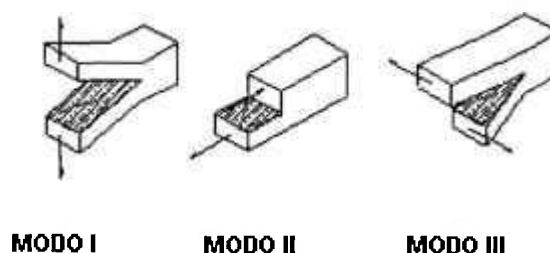


Figura 2: Modos de carregamento (Meyers & Chawla, 1982).

Irwin (1961) adotou a solução de Willians (1957) para caracterizar o campo de tensões na ponta de uma trinca submetida ao Modo I. Para uma placa infinita contendo uma trinca passante submetida a uma tração remota, o campo de tensões (em coordenadas polares) pode ser expresso por:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{5}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + O(r) \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{3}{4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + O(r) \\ \tau_{r\theta} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{1}{4} \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{4} \operatorname{sen}\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right] + O(r)\end{aligned}\quad (2)$$

Na Eq.2, K_I é o Fator Intensidade de Tensões para o Modo I obtido pela substituição: $K_I = k\sqrt{2\pi}$. $O(r)$ representa os termos de ordem superior da solução. O subíndice “I” do Fator Intensidade de Tensões (K) é utilizado para caracterizar o modo de carregamento para o qual foi determinado.

A validade da Eq.2 restringe-se ao modelo de uma placa infinita com uma trinca passante de comprimento igual a “ $2a$ ”, sujeita a uma tensão remota de tração. Para placas com dimensões finitas, deve-se considerar um fator multiplicativo, chamado fator de forma, $f(a/W)$, em que W é a largura da placa:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3)$$

Conforme apresentado anteriormente, o Fator Intensidade de Tensões (K) define a singularidade e conseqüentemente, caracteriza o campo de tensões na ponta da trinca. Este parâmetro descrevendo as condições na ponta da trinca tornou-se o mais importante conceito na mecânica de fratura (Anderson, 1995).

Assumindo que a falha de um material está associada a uma combinação de tensões e deformações, pode-se esperar que a propagação de uma trinca deva ocorrer para um determinado valor crítico do Fator Intensidade de Tensões (K_C). Esse valor crítico pode então ser utilizado para caracterizar a tenacidade à fratura do material.

Entretanto, o Fator Intensidade de Tensões Crítico (K_C) só pode ser considerado uma propriedade do material quando a zona plástica for pequena se comparada às dimensões do material. A FIG.3 ilustra os efeitos da espessura do corpo-de-prova no Fator Intensidade de Tensões para o Modo I de carregamento.

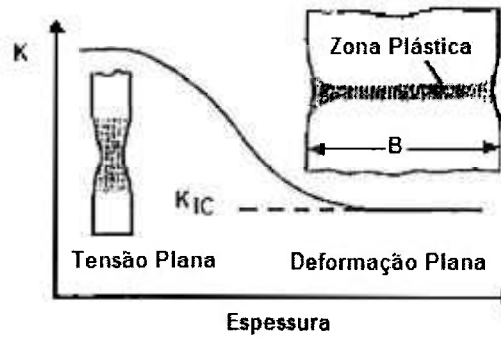


Figura 3: Efeitos da espessura no Fator Intensidade de Tensões (Adaptado de Anderson, 1995).

Conforme mostrado na FIG.3, o Fator Intensidade de Tensões é influenciado pela geometria do corpo-de-prova estudado. Para pequenas espessuras (Estado Plano de Tensão - EPT), o valor de K_I varia devido à mudança do nível de triaxialidade de tensões na ponta da trinca. À medida que se aumenta a espessura do material, atinge-se o Estado Plano de Deformação (EPD) e o valor de K_I torna-se constante. Nesse ponto, K_I se denomina K_{IC} e pode ser considerado uma propriedade para caracterizar a tenacidade à fratura do material.

Assim, de acordo com a ASTM E399-90 (1991), a determinação de K_{IC} deve obedecer aos seguintes critérios dimensionais:

$$a, B, (W - a) \geq 2,5 \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \quad (4)$$

Na Eq.4, “ a ” é o comprimento da trinca; B e W são a espessura e a largura do corpo-de-prova (respectivamente); K_I é o Fator Intensidade de Tensões (Modo I) e σ_e é a tensão de escoamento. Este critério implica que o tamanho da zona plástica, dado pela correção de Irwin, deve ser menor ou igual a 1/50 vezes as dimensões dos corpos-de-prova, a fim de se garantir a condição de deformação plana e um valor de K_{IC} independente da espessura do corpo-de-prova ensaiado (Anderson, 1995).

Outra consideração importante refere-se à diferença entre os valores críticos do Fator Intensidade de Tensões obtida pelos distintos modos de carregamento, isto é:

$$K_{IC} \neq K_{IIC} \neq K_{IIIC}.$$

Como a maioria dos materiais é mais susceptível à fratura pela ação de tensões normais do que cisalhantes, o Modo I tem maior importância prática. Os outros modos de carregamento são mais empregados em estudos de interfaces, como por exemplo, em compósitos.

2.1.2 Mecânica da Fratura Elasto-Plástica

A Mecânica da Fratura Elástica Linear é válida apenas para materiais que apresentam deformações confinadas em uma pequena região ao redor da ponta da trinca. Para os materiais que possuem média ou baixa resistência mecânica, em que o tamanho da zona plástica é significativo em relação à espessura, utiliza-se um outro tratamento baseado em relações não-lineares entre a tensão e a deformação, chamado Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP). Os dois principais parâmetros considerados pela MFEP são: o *CTOD* (Deslocamento da abertura da ponta da trinca - *Crack Tip Opening Displacement*) e a Integral *J*.

CTOD:

A análise do comportamento linear-elástico conduz a tensões infinitas na ponta da trinca ($r \rightarrow 0$). Na verdade, estas tensões elevadas não são observadas devido à deformação plástica sofrida pelo material. Assim, é esperada a criação de uma zona plástica na ponta da trinca.

Dugdale (1960) propôs um modelo para determinação do tamanho da zona plástica desenvolvida na ponta de uma trinca (modelo da tira de escoamento - FIG.4). Em suas análises, admite-se que toda a deformação plástica concentra-se em uma faixa à frente da trinca. A zona plástica é introduzida a partir de um tamanho de trinca efetivo (a_{ef}) expresso por:

$$a_{ef} = a + r_y \quad (5)$$

Sendo r_y o comprimento da zona plástica em que atua uma tensão igual ao limite de escoamento σ_e , aplicada nas duas pontas da trinca.

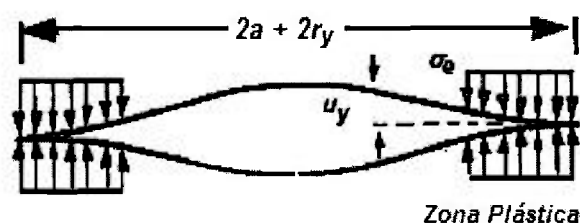


Figura 4: Modelo da tira de escoamento de Dugdale (Adaptado de Anderson, 1995).

O deslocamento das superfícies da trinca obtida pela correção de Dugdale é uma característica deformacional (natureza geométrica) do estado do corpo, chamada “abertura da trinca” (Revisão em Pastoukhov & Voorwald, 1995).

Wells (1961) observou que a deformação plástica causava um “adoçamento” na ponta da trinca, e que este era proporcional à tenacidade do material. Assim, ele propôs a abertura da ponta da trinca como um parâmetro para medição da tenacidade à fratura, chamado *CTOD* (δ). Posteriormente (Wells, 1963) mostrou-se que o conceito de deslocamento da abertura da trinca era análogo ao conceito de força de extensão da trinca crítica (G_C) e assim, os valores de *CTOD* deveriam estar relacionados à tenacidade à fratura em estado plano de deformação (K_{IC}).

Utilizando o modelo da tira de escoamento de Dugdale, chega-se à seguinte expressão para a solução do deslocamento, u_y :

$$\delta = 2 \cdot u_y = \frac{8\sigma_e a}{\pi E} \ln \sec \left(\frac{\pi \sigma}{2\sigma_e} \right) \quad (6)$$

Sendo σ_e a tensão de escoamento do material; “ a ” metade do comprimento da trinca inicial; “ E ” o módulo de elasticidade do material e σ a tensão nominal.

Considerando $\sigma \ll \sigma_e$ (solicitação no regime elástico) e expandindo em série o termo logarítmico na Eq.6, chega-se à:

$$\delta = \frac{\pi \sigma^2 a}{E \sigma_e} = \frac{K_I^2}{E \sigma_e} \quad (7)$$

As equações anteriores consideram as condições do estado plano de tensão e materiais não encruáveis. Uma relação mais genérica englobando o estado de tensão e a capacidade do material em sofrer encruamento pode ser expressa por:

$$\delta = \frac{K_I^2}{m \sigma_e E} \quad (8)$$

Na Eq.8, “ m ” é uma constante adimensional cujo valor é aproximadamente 1 para condições de estado plano de tensão e $m = 2$, para o estado plano de deformação.

A vantagem da utilização do parâmetro *CTOD* é que sua determinação pode ser realizada mesmo quando existe uma deformação plástica considerável em regiões próximas à frente da trinca, enquanto os valores de K_{IC} são obtidos somente para o estado plano de deformação.

Integral J :

Rice (1968) utilizou o conceito de integrais invariantes para caracterização do estado de tensões e deformações em um corpo contendo uma trinca. Em seus trabalhos originais, foi introduzida uma integral que representa a intensidade do trabalho mecânico na ponta de uma trinca.

Para um corpo com uma trinca ao longo do eixo x_1 , mostrado na FIG.5, a Integral J é definida por:

$$J = \iint_{\Gamma} \left(w dx_2 - p_i \frac{du_i}{dx_1} ds \right) \quad (9)$$

Sendo: Γ um contorno simples em torno da ponta da trinca; “ ds ” um elemento de contorno; $p_i = \sigma_{ij} n_j$ as componentes da força que representam a ação do domínio externo em relação ao contorno e a densidade de energia de deformação (w), é dada por:

$$w = w(\varepsilon) = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad (10)$$

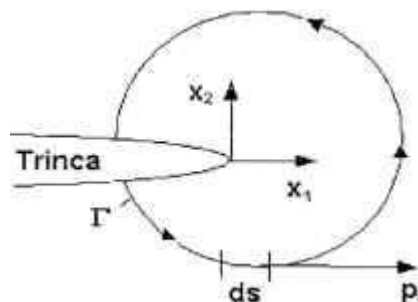


Figura 5: Definição do contorno na ponta da trinca (Pastoukhov & Voorwald, 1995).

O sentido físico da Integral J é analisado considerando-se o balanço de energia para a parte do corpo limitada pelo contorno. Considerando que as superfícies da trinca são livres de tensões, a variação do trabalho das forças externas (δA) em relação do incremento do comprimento da trinca ($\delta \ell$), é expressa pela integral de contorno:

$$\delta A = \int p_i \frac{du_i}{d\ell} \delta \ell ds \quad (11)$$

A variação da energia de deformação (δU) dentro do contorno é dada por:

$$\delta U = \iint_S \frac{dw}{d\ell} \delta\ell dx_1 dx_2 \quad (S \text{ é a área restrita pelo contorno } \Gamma) \quad (12)$$

Aplicando-se o Teorema de Green para a transformação da integral de área em uma integral de contorno, chega-se à expressão que fornece a variação da energia superficial, $\delta \Pi$:

$$\delta \Pi = \delta A - \delta U = - \iint_{\Gamma} \left(p_i \frac{du_i}{d\ell} \delta\ell ds - w \delta\ell dx_2 \right) \quad (13)$$

Comparando-se as Eq.9 e 13, tem-se:

$$J = - \frac{\partial \Pi}{\partial \ell} \quad (14)$$

Desse modo, a Integral J representa a intensidade do trabalho mecânico (da energia que é aplicada na propagação da trinca) na área considerada.

Independentemente, Hutchinson (1968), Rice e Rosengren (Rice & Rosengren, 1968) mostraram que a Integral J caracteriza os campos de tensões e deformações em um material que segue uma lei exponencial para caracterizar a resposta à tração uniaxial, dada pela equação:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} &= \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad \text{para } \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} &= \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad \text{para } \varepsilon \geq \varepsilon_0 \end{aligned} \quad (15)$$

Na Eq.15, ε_0 e σ_0 são deformações e tensões de referência*; “ n ” representa o coeficiente de encruamento e α é uma constante adimensional.

Hutchinson, Rice e Rosengren mostraram que para manter a integral de linha independente do caminho de integração é preciso que as tensões e deformações variem com $(1/r)^{1/n+1}$. Para materiais linear-elásticos, $n = 1$, e as tensões variam com $(1/\sqrt{r})$, consistente com MFEL. Aplicando as condições de contorno apropriadas, os campos de tensões e deformações podem ser expressos por:

* Em geral, são utilizados os limites que definem o comportamento linear para os valores de referência. Assim, neste trabalho serão utilizados: $\sigma_0 = \sigma_e$ e $\varepsilon_0 = E/\sigma_e$.

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \sigma_0 \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{n-1}} \tilde{\sigma}_{ij}(n, \theta) \\ \epsilon_y &= \frac{\alpha \sigma_0}{E} \left(\frac{EJ}{\alpha \sigma_0^2 I_n r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \tilde{\epsilon}_{ij}(n, \theta)\end{aligned}\quad (16)$$

Na Eq.16, I_n é uma constante de integração dependente do coeficiente de encruamento “ n ”; $\tilde{\sigma}_{ij}$ e $\tilde{\epsilon}_{ij}$ são funções adimensionais de “ n ” e θ . Esses parâmetros também são dependentes do estado de tensões (EPT ou EPD).

A Eq.16 fornece uma nova interpretação para a Integral J , pois, analogamente ao Fator Intensidade de Tensões (K) da MFEL, a Integral J também caracteriza os campos de tensões e deformações na ponta de uma trinca. Assim, como acontece com K , a Integral J pode ser utilizada como critério de fratura em um material.

Partindo-se da interpretação física da Integral J (Eq.14), vê-se que a Integral J se iguala à densidade de energia (G), introduzida por Griffith, para a extensão da trinca, em condições de comportamento linear-elástico.

$$J = G \quad (17)$$

Por outro lado, sabe-se da MFEL que existe uma relação entre G e K . Dessa forma, tem-se:

$$\begin{aligned}J = G &= \frac{K^2}{E} && (Tensão Plana) \\ J = G &= \frac{(1 - \nu^2) K^2}{E} && (Deformação Plana)\end{aligned}\quad (18)$$

Aplicando-se um critério de fratura na Eq.18, isto é, tomando-se $K = K_C$ (início da propagação instável da trinca – MFEL) e $J = J_C$ (início da propagação estável da trinca – MFEP), vê-se que J atingirá o seu valor crítico quando G e K também atingirem seus valores críticos.

2.1.3 Limitações da Mecânica da Fratura Monoparamétrica

Apesar da utilidade e emprego generalizado, os métodos descritos pela Mecânica da Fratura Monoparamétrica vêm sendo questionados devido as suas deficiências como procedimento robusto para avaliação de integridade estrutural (Betegón et al., 1996).

A validade de um único parâmetro para caracterização das condições de fratura em componentes estruturais se baseia na propriedade de tal parâmetro descrever os campos de tensões e deformações na ponta da trinca (ou na Zona de Processamento da Fratura – ZPF). Esta propriedade só é obtida quando são obedecidos alguns requisitos dimensionais, mais ou menos exigentes, dependendo do parâmetro escolhido para essa caracterização.

A utilização de K_I é muito limitada, devido à sua definição ser obtida em materiais com comportamento linear-elástico. Em um aço estrutural, no momento da propagação de uma trinca, a suposição de comportamento linear-elástico é fortemente violada na região próxima à ponta da trinca devido à intensa deformação plástica. Mesmo com as considerações de comportamento elásto-plástico, a utilização da Integral J também possui limitações. Segundo a norma ASTM E1820-99 (1999), os requisitos dimensionais para obtenção de valores válidos de (J_C) são:

$$M \leq \frac{(W - a)\sigma_e}{J} \quad e \quad M \leq \frac{B\sigma_e}{J} \quad (19)$$

Na Eq.19, W é a largura do corpo-de-prova, B é a espessura, “ a ” é o comprimento inicial da trinca e σ_e é a tensão de escoamento.

Considerando um aço estrutural típico de classe nuclear (com tensão de escoamento de 400MPa e resistência à fratura de $100\text{MPa}\sqrt{m}$), os requisitos dimensionais dados pela Eq.4 e Eq.19 e um valor de M inferior a 30 (Hutchinson, 1983), as espessuras de corpos-de-prova necessárias à obtenção de valores válidos de K_C e J_C são: 156mm e 3,2mm, respectivamente. As dimensões obtidas revelam dificuldades operacionais na realização de ensaios para a determinação de K_C ; e mesmo para o caso de testes de J_C , não há garantias que os valores de tenacidade à fratura dos corpos-de-prova possam ser utilizados em estruturas com dimensões e condições de carregamento muito diferentes (Exemplo discutido em: Cravero, 2004).

Além das dificuldades dimensionais que restringem a aplicabilidade dos métodos em certas condições, observações experimentais revelam significativos efeitos da geometria do corpo-de-prova, do tamanho da trinca e do modo de carregamento sobre os valores de tenacidade à fratura (Cravero & Ruggieri, 2003).

Na FIG.6 são apresentados dados ilustrativos para aços estruturais típicos testados na região de transição frágil-dúctil (DBT), os quais mostram uma elevação

significativa dos valores experimentais de tenacidade à fratura (J_c) para corpos-de-prova $SE(B)$ com entalhe raso. Este aumento “aparente” da tenacidade para aços estruturais possui importantes implicações práticas sobre procedimentos de avaliação de defeitos, particularmente, programas de reparos e extensão da vida útil de estruturas em serviço.

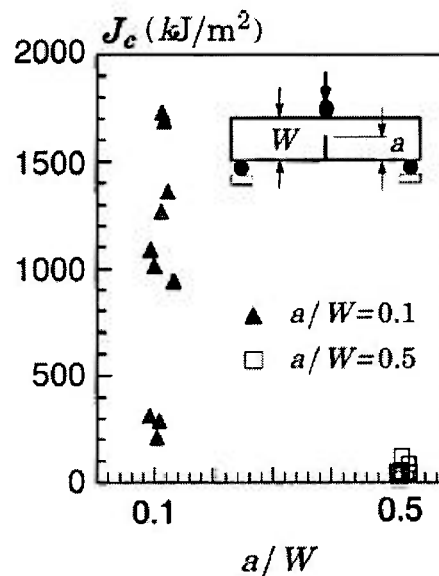


Figura 6: Valores experimentais de tenacidade para corpos-de-prova $SE(B)$ testados na região de transição DBT (Cravero & Ruggieri, 2003).

O comportamento apresentado na FIG.6 ocorre devido a extensão generalizada da plasticidade para regiões suficientemente remotas das vizinhanças da trinca (escoamento em larga escala - *Large Scale Yielding - LSY Conditions*), violando as condições *SSY*, o que provoca um relaxamento acentuado do campo de tensões nas proximidades da trinca. Este fenômeno, denominado perda de restrição na ponta da trinca, invalida a utilização do tratamento monoparamétrico para descrição das condições de fratura, uma vez que valores maiores da Integral J são necessários para provocar a fratura frágil em relação à condição de elevada triaxialidade, caracterizada pelo regime *SSY* (Cravero & Ruggieri, 2003).

2.2 Fundamentos da Mecânica da Fratura Biparamétrica

Para se avaliar a tenacidade à fratura de um material, a Mecânica da Fratura Monoparamétrica considera duas hipóteses fundamentais, que englobam tanto o comportamento linear-elástico, quanto elásto-plástico: (1) O domínio da singularidade

relevante na ponta da trinca sobre os efeitos de escala microestruturais. (2) A utilização de um único parâmetro (K ou J) para a caracterização dos campos de tensões próximos à ponta da trinca (Dodds et al., 1993).

Quando essas hipóteses são válidas, o valor do parâmetro crítico na ponta da trinca representa uma medida da tenacidade à fratura independente das dimensões dos corpos-de-prova (Betegón et al., 1996).

Porém, as interações da zona plástica na ponta da trinca com as superfícies livres de tração e com a zona plástica global afetam fortemente as tensões que controlam os mecanismos de fratura frágil. Assim, para condições de escoamento em larga escala (LSY) em sólidos finitos, as relações entre o parâmetro de escala, por exemplo, J , e os campos de tensões e deformações na ponta da trinca perdem a correspondência unívoca estabelecida nas hipóteses da mecânica da fratura convencional, provocando um aumento aparente da tenacidade à fratura (Nevalainen e Dodds, 1996). Desta forma, métodos alternativos têm sido propostos para descrever o campo de tensões e deformações na ponta de uma trinca, em especial, as metodologias biparamétricas.

A principal característica dessas metodologias é a utilização de dois parâmetros escalares para quantificar a magnitude do campo de tensões e o seu nível de triaxialidade, em relação a uma solução de referência. De uma forma geral, o campo de tensões pode ser expresso por:

$$\sigma_{ij} = f_{ij} \left(\frac{r}{J/\sigma_0}; \Psi \right) \quad (20)$$

Sendo ψ , o termo que quantifica o nível de triaxialidade (ou restrição à plasticidade) na ponta da trinca.

Dentre os principais procedimentos de caracterização biparamétrica do campo de tensões e deformações, destacam-se as teorias $J-T$ (Revisão em Wang, 1993) e $J-Q$ (O'Dowd & Shih, 1991, 1992, 1993).

2.2.1 Efeitos da Restrição à Plasticidade e Efeito de Tamanho

O aumento “aparente” da resistência à fratura observado em certos componentes estruturais ocorre devido à redução do nível de tensões na zona de processamento da fratura (região próxima à ponta da trinca). Este fenômeno é conhecido

como “perda de restrição à plasticidade na ponta da trinca” (*loss of crack-tip constraint*), ou simplesmente, “perda de restrição”.

Assim, o nível de restrição à plasticidade na ponta da trinca pode explicar o comportamento descrito anteriormente: Quanto maior a restrição, menor será o nível de tensões e deformações na ponta da trinca, aumentando-se, assim, a probabilidade de ocorrência da fratura por clivagem (redução de J_C , por exemplo).

Para uma mesma espessura, a restrição será maior nos casos de trincas profundas, nos quais se tem uma maior quantidade de material elástico envolvendo a ponta da trinca, limitando sua plastificação. A FIG.7 ilustra a influência da profundidade da trinca sobre a tenacidade à fratura.

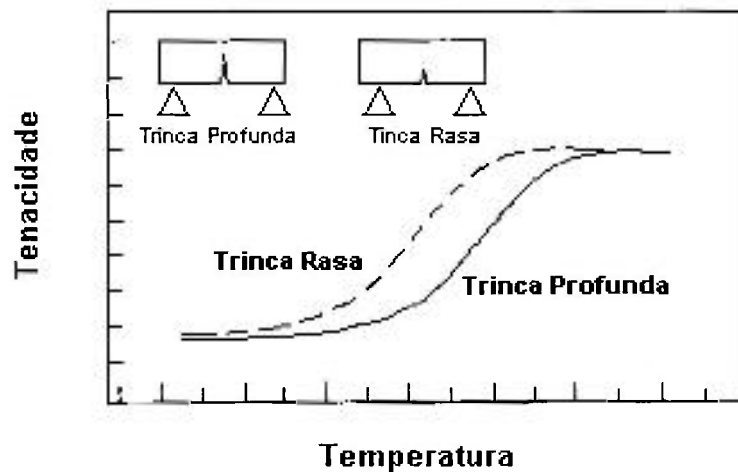


Figura 7: Influência da Profundidade da Trinca (Miranda, 1999).

Observa-se também que o nível de restrição na ponta da trinca varia com a geometria do corpo-de-prova utilizado. Por meio de análises numéricas elásto-plásticas (por elementos finitos) para corpos-de-prova do tipo DE(T), Joyce e Link observaram uma significativa perda de restrição à plasticidade para essa geometria, que é consistente com o elevado Módulo de Cisalhamento apresentado na FIG.8 (Exemplo apresentado em Anderson, 1995)

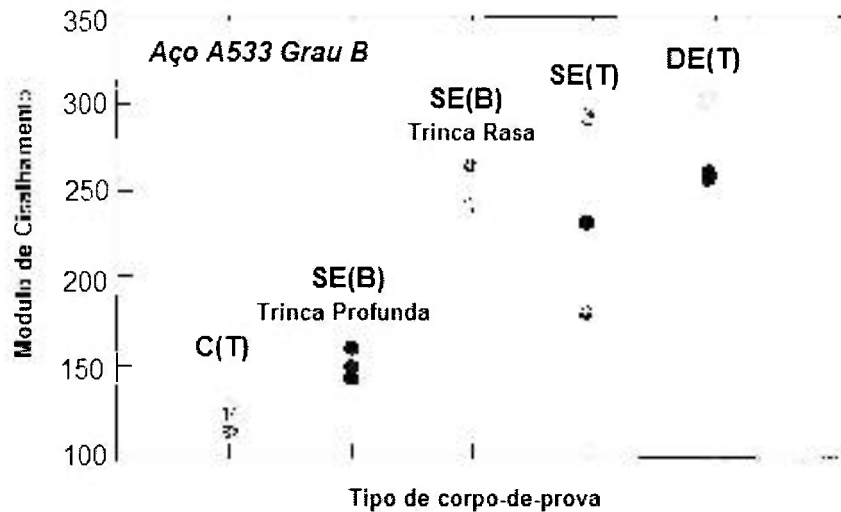


Figura 8: Efeitos das geometrias dos corpos-de-prova sobre o Módulo de Cisalhamento para $\Delta a = 1\text{mm}$ (Adaptado de Anderson, 1995).

Miranda (1999) também afirma que o “efeito de tamanho”, associado à espessura, está relacionado à gradual transição entre a condição de estado plano de tensão para o estado plano de deformação, e explica parcialmente a variação dos valores de J_C , quando se utilizam corpos-de-prova com espessuras diferentes. De fato, quando a região vizinha à superfície da trinca (em que prevalece o EPT) é relativamente pequena, se comparada à espessura, sua influência pode ser desprezada e o comportamento se torna independente da espessura.

2.2.2 Soluções de Referência

Conforme mencionado anteriormente, a característica central das metodologias biparamétricas é a utilização de dois parâmetros para a descrição dos campos de tensões e deformações na ponta de uma trinca. Um desses parâmetros determina a amplitude dos campos elasto-plásticos de tensões (alta triaxialidade) em regiões suficientemente próximas à trinca; enquanto o segundo parâmetro determina o nível de triaxialidade associado à perda de restrição na ponta da trinca, em relação a um campo de tensões de referência. Dessa forma, para a implementação das metodologias biparamétricas é necessária à obtenção de campos de tensões independentes do carregamento, que possam ser considerados uma solução de referência.

A solução de referência utilizada para a determinação do parâmetro relativo ao nível de triaxialidade provém do campo de tensões obtido por análises numéricas para o modelo de camadas elásticas - *MBL (Modified Boundary Layer)*. Considerando uma placa de dimensões infinitas contendo uma trinca, submetida a tensões remotas (FIG.9), o campo de tensões e deformações em qualquer ponto da placa pode ser representado pelos primeiros dois termos da solução linear-elástica de Willians (1957):

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \right) f_{ij}(\theta) + T \delta_{ij} \delta_{1j} \quad (21)$$

Na Eq.21, r e θ são coordenadas polares centradas na ponta da trinca ($\theta = 0$ corresponde ao plano de propagação da trinca sob o Modo I de carregamento); f_{ij} são funções angulares adimensionais; K_I é o Fator Intensidade de Tensões (para o Modo I); δ_{ij} é o delta Kronecker ($\delta_{ij} = 0$ para qualquer $i \neq j$) e T representa uma tensão não singular aplicada paralelamente ao plano da trinca.

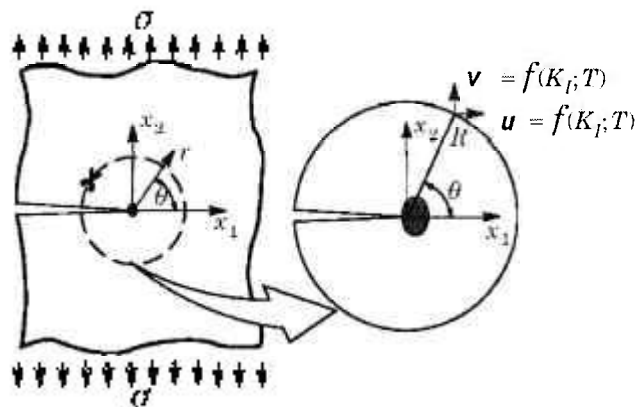


Figura 9: Interpretação gráfica do *MBL* (Cravero, 2004).

Willians (1957) também deduziu os deslocamentos (u e v) nas bordas do modelo, para condições nas quais as dimensões da zona plástica sejam suficientemente pequenas para que os efeitos da plasticidade não afetem a solução linear-elástica.

$$\begin{aligned} u(r, \theta) &= K_I \frac{1-\nu}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) (3-4\nu - \cos\theta) + T \frac{1-\nu^2}{E} R \cos\theta \\ v(r, \theta) &= K_I \frac{1-\nu}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) (3-4\nu - \cos\theta) + T \frac{\nu(1-\nu^2)}{E} R \sin\theta \end{aligned} \quad (22)$$

O modelo (por elementos finitos) representativo da placa infinita simplifica a geração de soluções numéricas para trincas estacionárias, sob condições de escoamento limitado (*SSY*). A simetria do carregamento permite a análise de apenas uma metade da placa, conforme apresentado na FIG.10. A limitação da plasticidade na ponta da trinca é obtida pela utilização de um raio externo, R , suficientemente maior que as dimensões da zona plástica. Trovato e Ruggieri (1999, 2001) demonstraram que os campos de tensões obtidos por esse modelo são estacionários independentes do nível de carregamento (medido convenientemente por K_I ou J), quando predominam as condições *SSY* em uma pequena região ao redor da ponta da trinca.

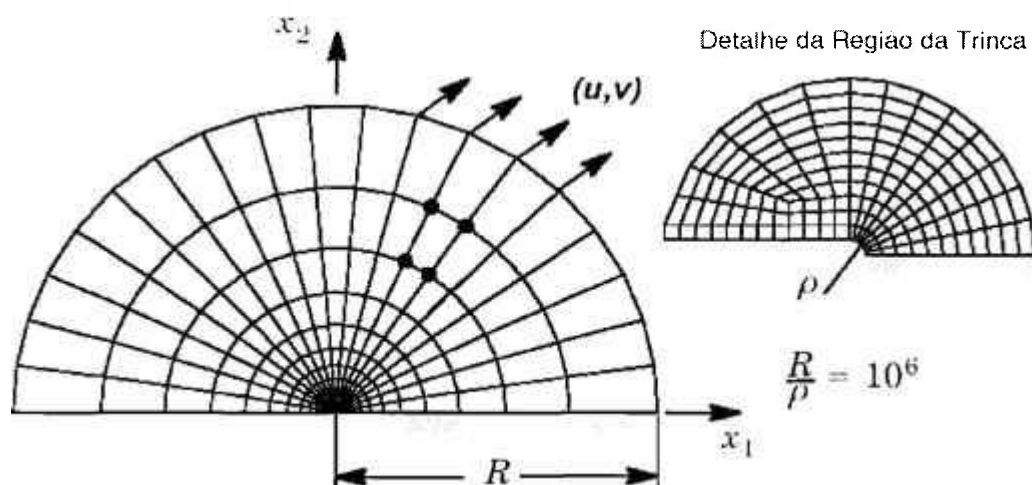


Figura 10: Modelo *MBL* com campos (K, T) aplicados em seu contorno (Trovato & Ruggieri, 2001).

Nas FIG.11 e 12 são apresentadas as evoluções das tensões de abertura (σ_{22}), normalizadas por uma tensão de referência (σ_0), com a distância da ponta da trinca, normalizada por $(K/\sigma_0)^2$, para dois materiais elasto-plásticos descritos pela equação de Ramberg-Osgood ($n = 10$ e $n = 20$). Observa-se, portanto, que após um regime transitório inicial ($K \approx 20-40 MPa\sqrt{m}$), os campos de tensões independem do nível de carregamento aplicado e, conseqüentemente, podem ser associados a um estado de tensões de referência correspondente ao modelo da placa infinita (*MBL*). Estas soluções de referência dependem das propriedades de encruamento do material: para $n = 10$, o valor da tensão máxima é aproximadamente $3,8x \sigma_0$; enquanto para o material com $n = 20$, o valor da tensão máxima é cerca de $3,2x \sigma_0$ (Cravero & Ruggieri, 2002).

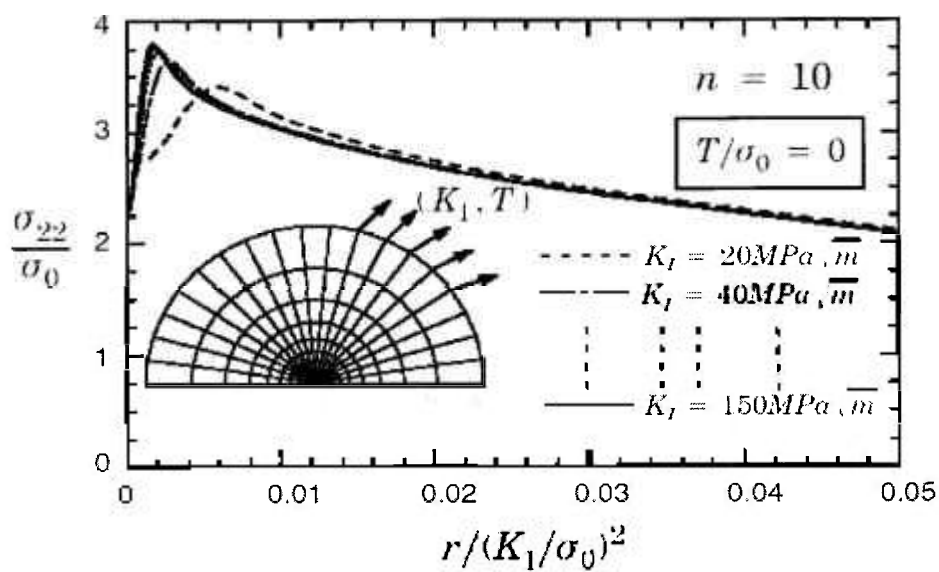


Figura 11: Campos de tensões para o modelo *MBL* ($n = 10$) (Cravero & Ruggieri, 2002).

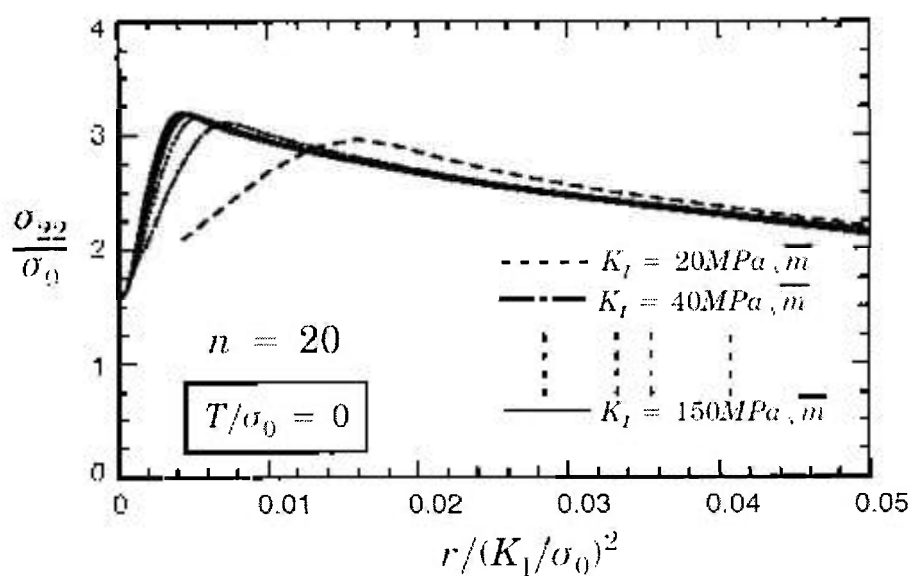


Figura 12: Campos de tensões para o modelo *MBL* ($n = 20$) (Cravero & Ruggieri, 2002).

2.2.3 Teoria J-T

Alguns trabalhos apresentam uma forma alternativa para descrever o fenômeno da perda de restrição à plasticidade, baseados na tensão elástica T definida pelos termos de ordem superior na solução de Willians (1957) (Betegón & Hancock, 1991; Du & Hancock, 1991; Parks, 1992).

Campos de tensões na ponta da trinca com diferentes níveis de triaxialidade podem ser gerados a partir da variação da tensão T aplicada ao modelo MBL . Assim, esses campos podem ser representados por curvas parametrizadas pelo parâmetro de carga T/σ_0 , na forma:

$$\sigma_{ij} = \sigma_0 f_{ij} \left(\frac{r}{J/\sigma_0}; \theta; \frac{T}{\sigma_0} \right) \quad (23)$$

Sendo que T/σ_0 quantifica o nível de triaxialidade de tensões na ponta da trinca. Portanto, este parâmetro pode ser utilizado para caracterizar a restrição para diferentes configurações estruturais.

Na FIG.13 são apresentados os resultados obtidos por análises numéricas em um modelo MBL ($n = 10$) para diversos valores de T/σ_0 .

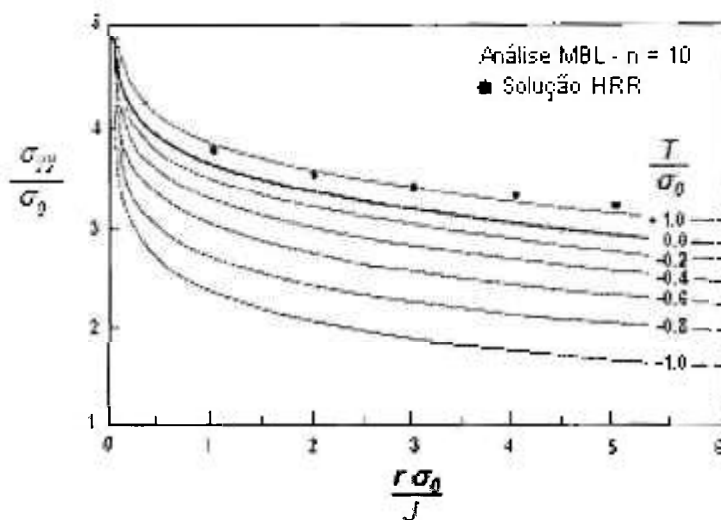


Figura 13: Campos de tensões obtidos pela análise do modelo MBL (Adaptado de Anderson, 1995).

A utilização de $T = 0$ na Eq.22 representa a solução elástica clássica, correspondente a condição SSY , na qual a dimensão da zona plástica é desprezível se

comparada ao comprimento da trinca. Nessa situação, o parâmetro K_I é suficiente para caracterizar os campos de tensões na ponta da trinca.

Para uma tensão T positiva, uma alta triaxialidade no campo elásto-plástico é introduzida, elevando os valores de tensões acima dos previstos na condição SSY . Para T negativa, a triaxialidade diminui com o aumento da carga. Essa direta relação entre o parâmetro elástico T e o campo elásto-plástico torna possível o conhecimento do nível de tensões para uma determinada distância (fixa) da ponta da trinca.

Leevers e Radon (1982) propuseram um parâmetro de biaxialidade (β) para relacionar a tensão T com o Fator Intensidade de Tensões:

$$\beta = \frac{T\sqrt{\pi a}}{K_I} \quad (24)$$

O parâmetro de biaxialidade pode ser utilizado para comparar (qualitativamente) o nível de restrição à plasticidade em diversas configurações de corpos-de-prova e diferentes comprimentos relativos de trincas (FIG.14). Valores positivos de β correspondem a condições SSY , enquanto $\beta < 0$, representa um relaxamento de tensões, e conseqüentemente, a perda de restrição na ponta da trinca.

A utilização da tensão T , como parâmetro descritor do nível de restrição à plasticidade, é limitada aos casos de pequenas deformações plásticas. Para configurações sob condições generalizadas de escoamento e plasticidade (LSY), a tensão T perde o significado físico, uma vez que a sua definição parte de considerações puramente elásticas para o comportamento do material e condições de escoamento limitado (SSY).

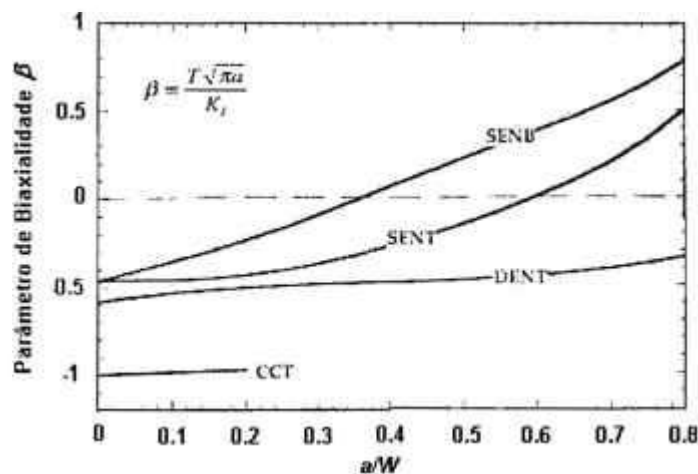


Figura 14: Parâmetro de Biaxialidade para diversas geometrias

(Adaptado de Anderson, 1995).

2.2.4 Teoria J-Q

Devida às limitações da aplicabilidade da Teoria $J-T$, O'Dowd e Shih (1991, 1992, 1993) propuseram uma descrição biparamétrica aproximada para os campos de tensões e deformações na ponta da trinca, utilizando um parâmetro para descrição do nível de triaxialidade mais geral e aplicável a condições de escoamento generalizado (LSY).

Assumindo uma teoria de pequenas deformações, as tensões na ponta da trinca podem ser expressas por uma série de potências, na qual a solução de referência é o termo principal. Os outros termos da série podem ser agrupados em um campo diferencial na forma:

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij})_{HRR} + (\sigma_{ij})_{DIF} \quad (25)$$

Caso seja adotado o campo HRR (ver Eq.16) como solução de referência, ou alternativamente:

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij})_{MBL:T=0} + (\sigma_{ij})_{DIF} \quad (26)$$

Caso seja adotada a formulação MBL com $T = 0$, como solução de referência.

O'Dowd e Shih (1991, 1992) observaram que o campo diferencial é relativamente constante com a distância e a posição angular em uma região à frente da ponta da trinca. Eles também notaram que as componentes de tensão de cisalhamento são desprezíveis em relação às componentes normais.

$$(\sigma_{yy})_{DIF} \approx (\sigma_{xx})_{DIF} \gg (\sigma_{xy})_{DIF} \quad \text{para } |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \quad (27)$$

Assim, o campo diferencial corresponde aproximadamente a um campo hidrostático na ponta da trinca. O'Dowd e Shih designaram a amplitude do campo diferencial como Q e, desta forma, a Eq.26 torna-se:

$$\sigma_{ij} \approx (\sigma_{ij})_{T=0} + Q \sigma_0 \delta_{ij} \quad \text{para } |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \quad (28)$$

Na Eq.28, δ_{ij} é o delta Kronecker e $Q\sigma_0$ corresponde a uma tensão hidrostática uniforme, que representa a diferença de tensões em relação a um campo de elevado nível de triaxialidade.

Assim, Q pode ser operacionalmente definido pela Eq.29, cuja interpretação relaciona-se à diferença normalizada entre o campo de tensões de uma configuração real e o campo de referência, obtido na condição de alta restrição à plasticidade(SSY).

$$Q \equiv \frac{\sigma_{xx} - (\sigma_{yy})_{SSY; T=0}}{\sigma_0} \quad \text{para } \theta = 0 \quad \text{e} \quad r = \frac{2J}{\sigma_0} \quad (29)$$

Na Eq.29, o parâmetro Q é avaliado para uma distância da ponta da trinca, $r = 2J/\sigma_0$; entretanto, O'Dowd e Shih também mostraram que, para fins práticos, o parâmetro Q é independente da distância r , no intervalo $1 \leq r/(J/\sigma_0) \leq 5$.

O procedimento para obtenção do parâmetro Q inclui duas etapas. Na primeira, a geometria real é modelada numericamente (por elementos finitos) com uma malha refinada na ponta da trinca. Os valores da Integral J são calculados para cada valor de carga aplicada. Estes valores de J , expressos em termos do fator de intensidade tensões equivalente, são transformados em deslocamentos $u(r, \theta)$ e $v(r, \theta)$, conforme Eq.22.

Os deslocamentos obtidos são aplicados na segunda etapa, quando se realiza uma análise com uma geometria que reproduz o mesmo modelo na ponta da trinca e que tem um elevado nível de restrição à plasticidade pela colocação de diversas camadas (circulares) de elementos que permanecem elásticos, mesmo para a mais elevada carga aplicada (*MBL*). O parâmetro Q é então calculado pela diferença entre os campos de tensão real e o obtido pelo modelo elástico, para um dado carregamento, a uma distância normalizada, λ . Na FIG.15 é apresentada a distribuição de tensões na frente da trinca para diferentes carregamentos (expressos pela Integral J) e a determinação de Q , conforme procedimento descrito anteriormente.

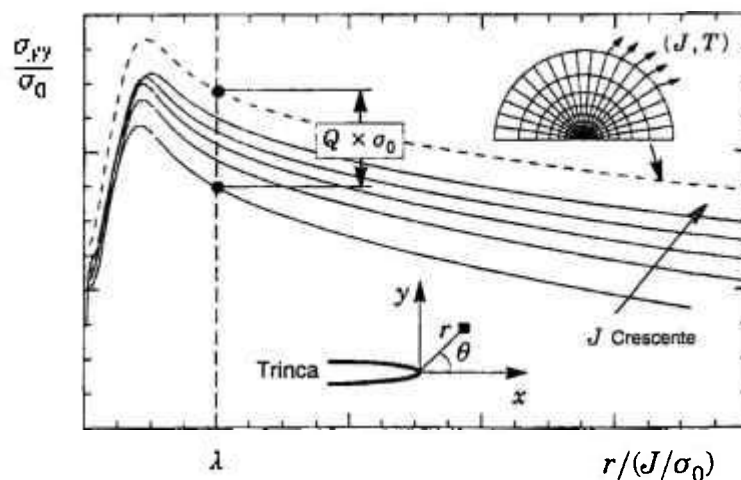


Figura 15: Procedimento para determinação do Parâmetro Q (Cravero e Ruggieri, 2002).

O parâmetro Q obtido para um dado valor de E/σ_0 pode ser representado por uma família de curvas J - Q para diferentes geometrias, tamanhos de trinca (dados pela relação a/W) e coeficientes de encruamento, “ n ”, da equação de Ramberg-Osgood. Na FIG.16, são apresentadas as curvas J - Q para diferentes comprimentos relativos de trinca.

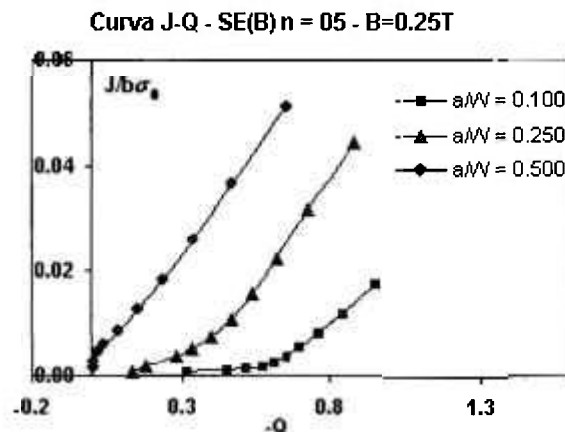


Figura 16: Curvas J - Q para diversas geometrias (Adaptado de Rabello et.al, 2004).

Pela FIG.16 pode-se perceber que há uma evolução do nível de restrição à plasticidade quando se passa de uma situação de pouca plasticidade ($SSY - Q \approx 0$), até uma condição com alta plasticidade (baixo nível de restrição), quando a MFEL não seria mais aplicável. À medida que se perde a restrição pelo aumento da carga aplicada (expressa pelo valor da Integral J), o parâmetro Q se torna negativo. Este comportamento é mais pronunciado para configurações contendo trincas rasas ($a/W < 0,25$).

Em contraposição à abordagem monoparamétrica, que assume a resistência à fratura como uma propriedade do material, independente da geometria e modo de carregamento, a Teoria J - Q introduz um grau de liberdade adicional, o qual implica que o valor crítico de J depende do parâmetro de triaxialidade Q :

$$J_c = J_c(\text{material}; Q) \quad (30)$$

Assim, enquanto a Mecânica da Fratura Monoparamétrica considera que os valores de tenacidade à fratura obtidos em corpos-de-prova de laboratório podem ser transferidos diretamente para aplicações estruturais, a Mecânica da Fratura Biparamétrica

implica que tanto a estrutura quanto o corpo-de-prova devem possuir o mesmo nível de restrição à plasticidade para um dado valor de tenacidade à fratura.

Partindo dessa abordagem, a Teoria $J-Q$ estabelece uma metodologia para caracterização da resistência à fratura de um material, por meio de curvas $J-Q$ e resultados experimentais ($J-Q$ Material Toughness Locus).

Nessa metodologia, uma série de experimentos considerando diversas geometrias de corpos-de-prova (diferentes níveis de triaxialidade) é utilizada para estabelecer uma região característica para a fratura por clivagem. A usual dispersão dos valores experimentais de J_C define essa região (limites superior e inferior). Assim, por meio da curva $J-Q$ obtida numericamente para a geometria de interesse, pode-se conhecer o comportamento à fratura do material, uma vez que a fratura ocorrerá quando a curva do material atingir a região de clivagem. A FIG.17 ilustra a aplicação da metodologia.

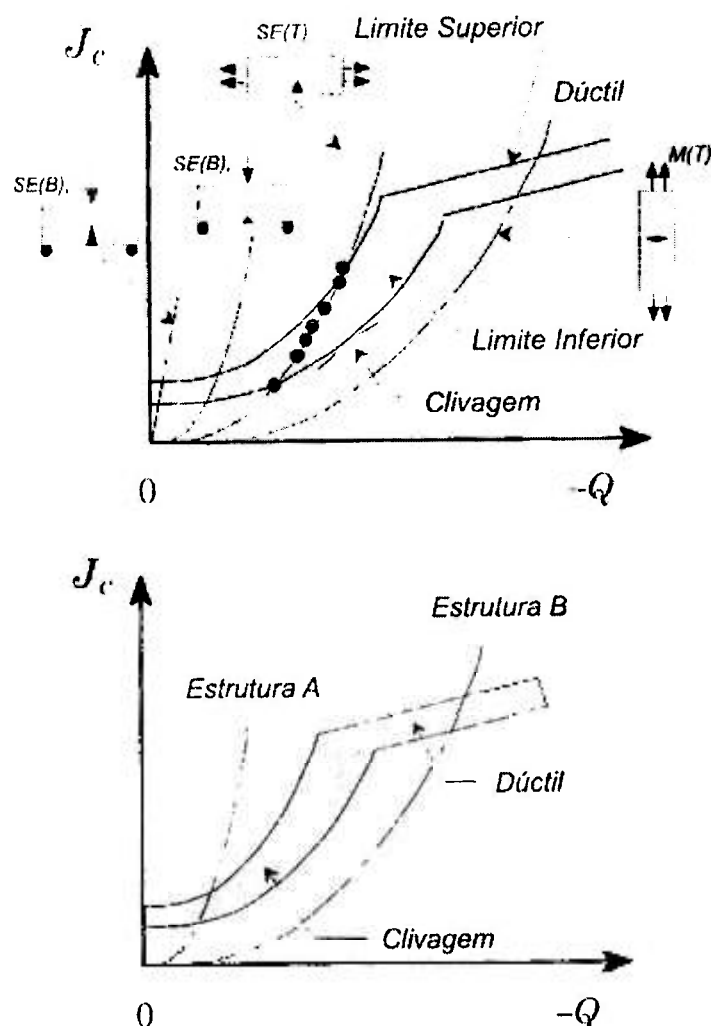


Figura 17: $J-Q$: Locus de tenacidade à fratura (Adaptado de Dodds et al., 1993).

Supondo que a resistência à fratura de um material sob condições de serviço seja caracterizada pelas regiões de fratura por clivagem e fratura dúctil apresentadas na FIG.17, a curva da força motriz ($J-Q$) representativa de uma estrutura com alta restrição (Estrutura A) atinge rapidamente a região de clivagem. Por outro lado, uma geometria com baixa restrição (Estrutura B) apresenta uma gradual elevação da força motriz, conduzindo à fratura dúctil. (Exemplo apresentado em Dodds et al., 1993).

Na formulação da Teoria $J-Q$ está implícito que a mesma não se aplica ao caso de trincas crescentes. Varias & Shih (1993) observaram que o crescimento dúctil da trinca altera o campo de tensões à frente da região do “adoçamento” (*blunting*), devido ao reaguçamento da ponta da trinca, aumentando a tensão máxima. O’Dowd et al. (1995) também mostraram que o campo de tensão de uma trinca crescente apresenta tensão máxima mais elevada na região próxima da ponta da trinca. Assim, quando houver um significativo crescimento de trinca antes da clivagem, a validade do parâmetro Q associado ao nível de restrição à plasticidade desaparece.

2.3 Métodos para Correção dos Efeitos da Restrição à Plasticidade

As Teorias $J-T$ e $J-Q$ apresentadas anteriormente não resolvem totalmente o problema da avaliação da integridade de componentes estruturais, uma vez que elas apenas caracterizam o nível de restrição à plasticidade na ponta de uma trinca mas não relacionam os efeitos dos campos de tensões e deformações sobre a resistência à fratura dos materiais. Assim, critérios micromecânicos de falha devem ser introduzidos para relacionar os campos na ponta da trinca com a tenacidade à fratura.

Ritchie, Knott e Rice (Ritchie et al., 1973) elaboraram um modelo teórico para definição de um critério para ocorrência da fratura frágil nos materiais (Modelo RKR). Este modelo estabelece que a fratura frágil é produzida quando as tensões à frente da trinca (a uma determinada distância) superam um valor crítico (σ_c), que é suficiente para promover o crescimento de uma microtrinca nas vizinhanças da trinca macroscópica. Este modelo não considera fenômenos probabilísticos e supõe que exista uma microtrinca orientada na posição mais favorável para produzir o seu crescimento. Apesar dessas limitações o modelo RKR introduz um importante princípio que relaciona as tensões à frente da trinca com a ocorrência da fratura frágil.

Assim, a maioria dos critérios de falha para fratura frágil (ou clivagem) envolve uma instabilidade local de uma microtrinca que se forma a partir de um “defeito microestrutural”, como a presença de carbonetos e inclusões. O balanço de energia de Griffith é satisfeito quando uma tensão crítica é atingida nas proximidades dessa microtrinca.

O critério de instabilidade de Griffith mostra que a fratura ocorre para um valor crítico das tensões normais à frente de uma trinca. A reconhecida natureza aleatória da fratura frágil, expressa pela grande dispersão de resultados experimentais de tenacidade à fratura, decorre da probabilidade de se encontrar um “defeito microestrutural” nas proximidades da ponta da trinca. Dessa forma, o volume amostrado nas vizinhanças de uma trinca se torna importante na descrição da fratura por clivagem. A probabilidade de ocorrência de fratura por clivagem em sólidos contendo trincas pode ser expressa por:

$$F = F [V(\sigma_1)] \quad (31)$$

Na Eq.31, F é a probabilidade de falha por clivagem, σ_1 é a tensão principal máxima em um ponto e $V(\sigma_1)$ é o volume acumulado amostrado, no qual a tensão principal excede o valor de σ_1 . Para amostras sujeitas ao estado plano de deformação, $V = BA$, sendo B a espessura e A , a área no plano x-y (Anderson, 1995).

Anderson, Dodds e colaboradores (Anderson & Dodds, 1991; Dodds et al., 1991) quantificaram os efeitos da restrição na tenacidade à fratura por meio de um parâmetro global de fratura (J_C) aliado a um critério de falha aplicado à clivagem transgranular. Em suas análises, a tensão principal (σ_1) na ponta da trinca pode ser expressa por:

$$\sigma_1 = f \left(\frac{J}{\sigma_0 r}, \theta, Q \right) \quad (32)$$

A Eq.32 implica que os campos de tensões na ponta da trinca dependem de J . Quando o domínio de J é perdido, há um relaxamento na triaxialidade e a tensão principal se torna menor que o valor previsto para condição SSY, para um mesmo r e θ .

Reescrevendo a Eq.32 obtém-se uma expressão da distância r em função de θ e (σ_1/σ_0) :

$$r = \frac{J}{\sigma_0} g_1(\theta; \sigma_1/\sigma_0; Q) \quad (33)$$

Considerando um nível particular para a tensão principal (σ_1/σ_0), a área, A , sob a qual a tensão principal excede (σ_1/σ_0) é dada por:

$$A = \frac{J^2}{\sigma_0^2} h(\sigma_1/\sigma_0; Q) \quad h = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} g_1^2(\theta; \sigma_1/\sigma_0; Q) d\theta \quad (34)$$

A área definida pelo contorno (σ_1/σ_0) depende de J , bem como o nível de triaxialidade definido por Q . Nomeando A_{SSY} e J_{SSY} para designar a área e o valor de J associados à condição SSY ($Q = 0$) e A_{FB} e J_{FB} para a área e J associados a um sólido finito contendo uma trinca ($Q \neq 0$), tem-se:

$$A_{SSY} = \frac{J_{SSY}^2}{\sigma_0^2} h_{SSY}(\sigma_1/\sigma_0) \quad h_{SSY} = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} g_1^2(\theta; \sigma_1/\sigma_0; Q = 0) d\theta \quad (35)$$

$$A_{FB} = \frac{J_{FB}^2}{\sigma_0^2} h_{FB}(\sigma_1/\sigma_0) \quad h_{FB} = \frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} g_1^2(\theta; \sigma_1/\sigma_0; Q) d\theta \quad (36)$$

Para um carregamento inicial, o sólido finito apresenta $Q = 0$ e h_{FB} se iguala a h_{SSY} . Entretanto, para cargas crescentes, a plasticidade aumenta no sólido e Q se torna diferente de zero. Conseqüentemente, h_{FB} se desvia para valores inferiores a h_{SSY} . Igualando as Eq.35 e Eq.36, obtém-se uma razão entre as duas condições (sólido finito e SSY) que estabelece o desvio ocorrido devido a perda de restrição à plasticidade:

$$\frac{J_{FB}}{J_{SSY}} = \frac{\sqrt{h_{SSY}(\sigma_1/\sigma_0)}}{\sqrt{h_{FB}(\sigma_1/\sigma_0)}} = \sqrt{\frac{A_{SSY}}{A_{FB}}} = \sqrt{\frac{1}{\phi}} \quad (37)$$

Na Eq.37, ϕ é um fator de restrição, cujo valor é sempre inferior ou igual a 1.

Na Eq.37, o termo J_{SSY} pode ser interpretado como a força motriz efetiva para a clivagem, enquanto J_{FB} é a força motriz aparente. A razão entre esses valores quantifica os efeitos da restrição (dependência do tamanho e geometria) na tenacidade à fratura. Considerando, por exemplo, um corpo-de-prova que falha para $J_C = 200 \text{kJ/m}^2$. Supondo uma razão $J/J_{SSY} = 2$, então um corpo-de-prova mais espesso (condição SSY) feito do mesmo material e testado na mesma temperatura irá falhar para um valor $J_C = 100 \text{kJ/m}^2$. Uma razão equivalente pode ser realizada para valores de $CTOD$ (exemplo apresentado em Dodds & Anderson, 1994).

Anderson e Dodds (Anderson & Dodds, 1993) também apresentaram uma expressão similar para o tratamento da restrição em corpos-de-prova com dimensões reduzidas (*Subsize Fracture Toughness Specimens*):

$$\frac{J}{J_{SSY}} = 1 + \phi \left(\frac{J}{b \sigma_c} \right)^\gamma \quad (38)$$

Sendo:

$$\phi = 0,8425(n)^{2,262} \quad (39)$$

$$\gamma = 1,126 + 0,01925n - 8,333 \times 10^{-5}(n)^2 \quad (40)$$

Nas Eq.39 e 40, “n” é o coeficiente de encruamento dado pela Eq. (15).

Da mesma forma que ocorre na Teoria J - Q , a implementação de uma metodologia para previsão (intercomparação) da tenacidade à fratura, incluindo os efeitos da perda de restrição à plasticidade, também requer a análise numérica por elementos finitos das configurações de interesse. Os contornos das tensões principais (para uma dada relação σ_1/σ_0) devem ser construídos e as respectivas áreas comparadas com as soluções de referência obtidas para $T = 0$ nas análises do *MBL*. Pode-se então construir um gráfico da *força motriz efetiva* (J_{SSY}) vs. J , para diversas configurações a serem estudadas. Na FIG.18 é mostrada esquematicamente a utilização da metodologia. Esta metodologia é conhecida como: Correção para Escoamento em Pequena Escala (*Small scale yielding Correction - SSYC*).

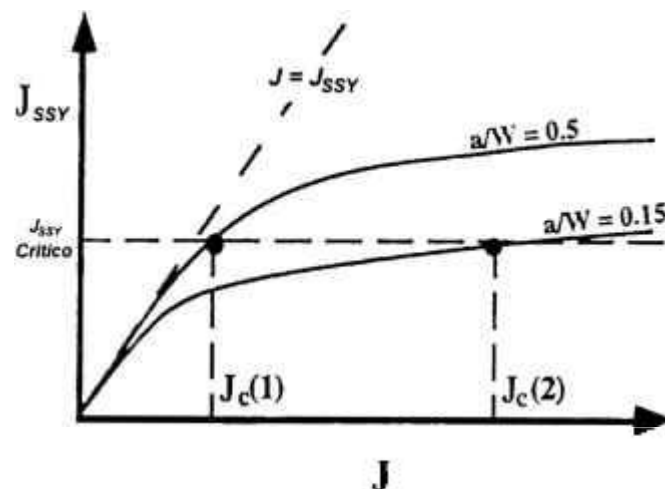


Figura 18: Metodologia para transferência de valores de tenacidade (Adaptado de Anderson, 1995).

Conforme o comportamento descrito na FIG.18, para pequenas deformações, as curvas (J_{SSY} - J) possuem uma relação 1:1, porém, há um desvio desse comportamento quando a geometria estudada sofre um carregamento crescente. Quando $J \approx J_{SSY}$, os campos de tensões são próximos ao limite definido pela condição $Q = 0$, e a tenacidade à fratura não sofre influência da geometria do corpo-de-prova. Para grandes deformações, $J > J_{SSY}$, a tenacidade aumenta devido à perda de restrição à plasticidade. Essa perda de restrição é mais pronunciada em geometrias contendo trincas rasas. No exemplo apresentado na FIG.18, o corpo-de-prova com $a/W = 0,15$ tende a falhar para um valor de J_C maior que o de um corpo-de-prova com $a/W = 0,5$ ($J_{C(2)} > J_{C(1)}$).

O modelo descrito anteriormente considera áreas à frente da trinca nas quais a tensão principal supera um valor crítico. Esta consideração parte de uma análise bidimensional (plano x-y) e torna o modelo incompleto, pois o volume amostrado à frente da trinca possui grande influência sobre a tenacidade. Uma forma de contornar essa limitação é a definição de uma espessura efetiva, conforme mostrado na FIG.19.

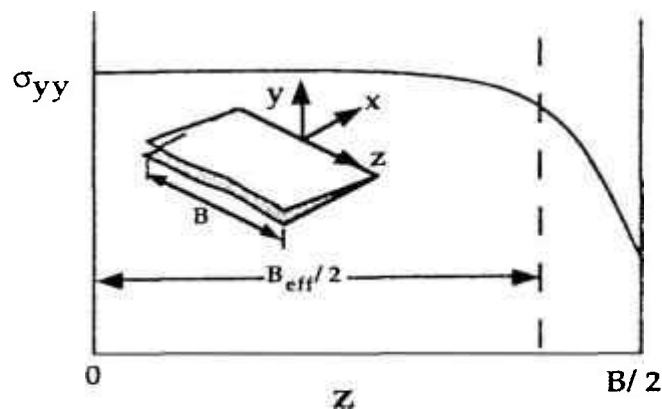


Figura 19: Representação da espessura efetiva, B_{ef} (Anderson, 1995).

Para um dado nível de tensões escolhido (σ_1/σ_0) as áreas dos contornos construídos no plano x-y irão variar ao longo da frente da trinca, pois a região central do corpo-de-prova tem maior restrição à plasticidade do que as extremidades (efeitos da espessura). Assim, o volume pode ser obtido pela soma das áreas dos contornos ao longo da espessura do corpo-de-prova:

$$V = 2 \cdot \int_0^{B/2} A(\sigma_1; z) dz = B_{ef} A_C(\sigma_1) \quad (41)$$

Sendo A_C a área do contorno no centro do corpo-de-prova e B_{ef} a espessura efetiva.

A espessura efetiva, B_{ef} , influi na força motriz para clivagem pelo efeito do volume amostrado: frentes de trincas muito longas (grandes espessuras) têm maior probabilidade de fraturar por clivagem, uma vez que há maior chance de se encontrar um “defeito microestrutural”. A seguir serão discutidos os efeitos da espessura que implicam em importantes considerações no tratamento da tenacidade à fratura dos materiais, especialmente naqueles que apresentam uma grande dispersão dos resultados experimentais de fratura por clivagem na região de transição frágil-dúctil, como é o caso dos aços ferríticos.

2.4 Considerações sobre Metodologias para Correção dos Efeitos da Espessura

Resultados experimentais e modelos metalúrgicos para clivagem em aços ferríticos mostram a existência de um efeito absoluto da espessura sobre a tenacidade à fratura, que não está relacionado à perda de restrição à plasticidade (Nevalainen & Dodds, 1996). Assim, há um interesse em desenvolvimentos de modelos micromecânicos de falha baseados na interpretação probabilística do fenômeno de fratura.

Para a fratura frágil dos aços ferríticos, alguns modelos baseiam-se na Teoria do Elo-mais-fraco (*Weakest Link Theory*), em que se distinguem duas situações ou locais para se iniciar a clivagem: os pontos críticos e os pontos fracos, espalhados na matriz do material. Para ocorrência da clivagem, basta que um deles (denominado “elo-mais-fraco”) seja ativado por uma tensão crítica (σ_c). Dessa forma, a distribuição dos “elos-mais-fracos” à frente da trinca explicam a dispersão dos valores de J_c medidos na região de transição (Revisão em Miranda, 1999).

Outro avanço no estudo da tenacidade à fratura na região de transição refere-se à introdução de um tratamento estatístico dos valores de J_c , por meio da Distribuição de Weibull (Landes & Shaffer, 1980). Por esta distribuição, que pode ser expressa em termos do fator intensidade de tensão (K), pode-se calcular a probabilidade de falha (P_f) por meio de um ajuste de dois parâmetros conforme os resultados obtidos em ensaios experimentais. Algumas alterações foram introduzidas neste tratamento, incluindo a adoção de um terceiro parâmetro, representando um valor limiar de K (ou J), abaixo do qual a probabilidade da ocorrência de clivagem é desprezível (Landes & McCabe, 1984). Trabalhos posteriores mostraram uma melhor adequação da utilização da distribuição modificada de Weibull

(com três parâmetros) na avaliação de resultados de tenacidade na região de transição (Anderson & Stienstra, 1989; Stienstra et al., 1990).

Também na linha de tratamentos estatísticos, o trabalho de Beremin (1983) forneceu uma importante base para o estabelecimento de uma relação entre o microregime de fratura e a força motriz macroscópica (por exemplo, a Integral J) ao introduzir um parâmetro probabilístico de fratura, denominado Tensão de Weibull (σ_w). A utilização da Tensão de Weibull tem servido como base para estudos de trincas estacionárias e propagação de trincas, incluindo os efeitos do estado de triaxialidade na ponta da trinca e a extensão dúctil da trinca sobre os valores de tenacidade (Ruggieri & Dodds, 1996a,b,c).

Dentre os modelos estatísticos, destaca-se a metodologia da Curva Mestre (Master Curve), estudada por Wallin (1991a,b), posteriormente normatizada pela ASTM (1997). Nessa metodologia, obtém-se uma expressão para caracterização do comportamento mediano dos valores de tenacidade à fratura com a temperatura, por meio de estudos estatísticos, fazendo uso da distribuição de Weibull (três parâmetros), da hipótese do “elo-mais-fraco” e considerando sempre os valores de tenacidade expressos em termos do Fator Intensidade de Tensões obtidos a partir de J_C (K_{JC}). A expressão proposta para a Curva Mestre faz uso da chamada “Temperatura de Referência” (T_0), que corresponde à temperatura de ensaio na qual o valor de K_{JC} mediano possui o valor de $100\text{MPam}^{1/2}$. Um grande avanço desta metodologia é a possibilidade da utilização de pequenos corpos-de-prova para execução dos ensaios e a aplicação de métodos estatísticos para o tratamento da dispersão dos dados, permitindo, assim, estabelecer níveis de confiabilidade para os resultados.

Wallin (1991) empregou análises estatísticas para derivar uma correção de Weibull (três Parâmetros) para dados de tenacidade à fratura em corpos-de-prova com mesma relação a/W , mas com diferentes espessuras (B_1 e B_2), que rompiam por clivagem, sem nenhum crescimento dúctil. Considerando uma distribuição aleatória dos defeitos microestruturais à frente da trinca, os efeitos da espessura foram quantificados por:

$$K_{JC(B_2)} = K_{min} + (K_{JC(B_1)} - K_{min}) \sqrt[4]{\frac{B_1}{B_2}} \quad (42)$$

Sendo K_{min} a tenacidade limite do material para uma frente de trinca infinita.

Reescrevendo a Eq.42 em termos de J :

$$J_{C(B_2)} \approx J_{C(B_1)} \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} \quad (43)$$

Na Eq.43 o termo de J equivalente a K_{min} não aparece por ser muito pequeno e com pouca influência na Distribuição Acumulada de Weibull.

O desenvolvimento das Eqs.42 e 43 assume que cada ponto ao longo da trinca possui o mesmo J aplicado. Conseqüentemente, a correção reflete diferentes volumes de material amostrados ao longo da frente da trinca, devido exclusivamente à diferença de espessuras. Como a existência de “defeitos microestruturais” controla o processo de clivagem, a tenacidade à fratura diminui com o aumento da probabilidade de se encontrar esse “defeito”, ou seja, aumentando-se a espessura, obtém-se menores valores de tenacidade à fratura.

Porém, em sólidos contendo uma trinca, a Integral J e as tensões variam ao longo da frente da trinca, podendo ocorrer o relaxamento das tensões devido à perda da restrição à plasticidade. Assim, a espessura, as dimensões dos corpos-de-prova, o tamanho da trinca e as propriedades do material interagem de uma maneira complexa sob o aumento da deformação plástica. Conseqüentemente, o uso das correções previstas pelas Eqs.42 e 43 se torna válido apenas para condições muito particulares de baixas deformações, grandes dimensões dos corpos-de-prova e moderado coeficiente de encruamento (Nevalainen & Dodds, 1996).

Motivados pelas questões apresentadas anteriormente, Nevalainen e Dodds (Nevalainen & Dodds, 1996; Nevalainen, 1997) propuseram um novo método para avaliação da tenacidade à fratura (*Toughness Scaling Mode-3D*) que considera tanto os efeitos estatísticos dos volumes amostrados (devido às diferenças de espessuras entre as geometrias estudadas), como também, os efeitos da perda da restrição à plasticidade, devido às condições de escoamento em grande escala (*LSY*).

Nevalainen e Dodds sugeriram a substituição da espessura do corpo-de-prova (B_2) por uma “espessura efetiva” (B_{ef}), na Eq.43. Este novo valor representa a porção da espessura sobre a qual as tensões na frente da trinca atingem níveis suficientes para disparar a clivagem. Também foi proposta a substituição do termo $J_{C(B_1)}$ por $J_{SSY}(J_{C(B_1)})$, sendo J_{SSY} determinado pela metodologia proposta por Anderson e Dodds (1991), apresentada no subcapítulo 2.3 deste trabalho. Esta última proposição tem por objetivo

acomodar a forte influência da perda de restrição à plasticidade nos valores de tenacidade à fratura.

Assim, um novo parâmetro de tenacidade à fratura (\bar{J}_0) é obtido pela Eq.44 e representa uma correção dos valores de tenacidade, tanto pelos efeitos da perda de restrição à plasticidade, quanto pelos efeitos da espessura.

$$\bar{J}_0 = J_{SSY} \left(J_{C(B_1)} \right) \sqrt{\frac{B_{ef}}{B_{ref}}} \quad (44)$$

A “espessura de referência” (B_{ref}) na Eq.44 é representada por um conveniente valor de 25,4 mm para o Sistema Internacional ou uma polegada para o Sistema Inglês.

A princípio, o conceito de B_{ef} pode ser ampliado para correlacionar configurações contendo trincas superficiais (semi-elípticas) e trincas passantes (trincas retas) por meio de análises por elementos finitos (Nevalainen & Dodds, 1996).

3. METODOLOGIA E ANÁLISES NUMÉRICAS

3.1 Geometrias Estudadas

Neste trabalho foram estudados corpos-de-prova do tipo $SE(B)$, $SE(T)$, $C(T)$ e Placa Plana contendo uma trinca superficial - semi-elíptica ($SC(T)$), conforme apresentado na FIG.20. Para o estudo dos efeitos da restrição à plasticidade sobre a tenacidade à fratura, diversos tamanhos relativos de trinca (dados pela relação a/W) e espessuras (expressas por frações da espessura unitária $1T = 25,4\text{mm}$) foram analisadas. Na TAB.1 são apresentadas as principais dimensões dos corpos-de-prova.

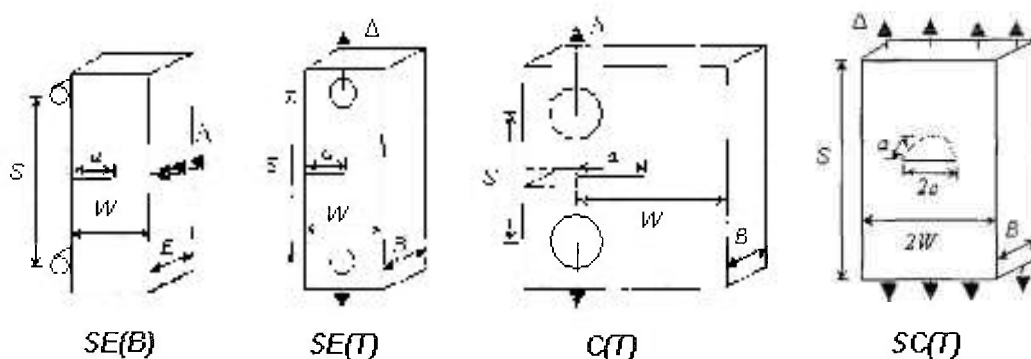


Figura 20: Geometrias dos corpos-de-prova utilizados.

Tabela 1: Principais dimensões dos corpos-de-prova.

<i>CP</i>	<i>a</i>	<i>B</i>	<i>W</i>	<i>S</i>	<i>a/W</i>	<i>a/c</i>
<i>SE(B)</i>	5,08	0,25T	50,8	101,6	0,100	-
	12,7	0,5T			0,250	
	25,4	1T			0,500	
<i>SE(T)</i>	5,08	0,25T	50,8	38,10	0,100	-
	12,7	0,5T			0,250	
	25,4	1T			0,500	
<i>C(T)</i>	5,08	0,25T	50,8	101,6	0,100	-
	12,7	0,5T			0,250	
	25,4	1T			0,500	
<i>SC(T)</i>	6,35	25,4	50,8	101,6	-	0,333
	3,175					0,166

3.2 Modelos 3D

Utilizando o programa *MSC PATRAN* foram construídos os modelos 3D para análise por elementos finitos. Nas FIG.21-24 são apresentados alguns desses modelos.

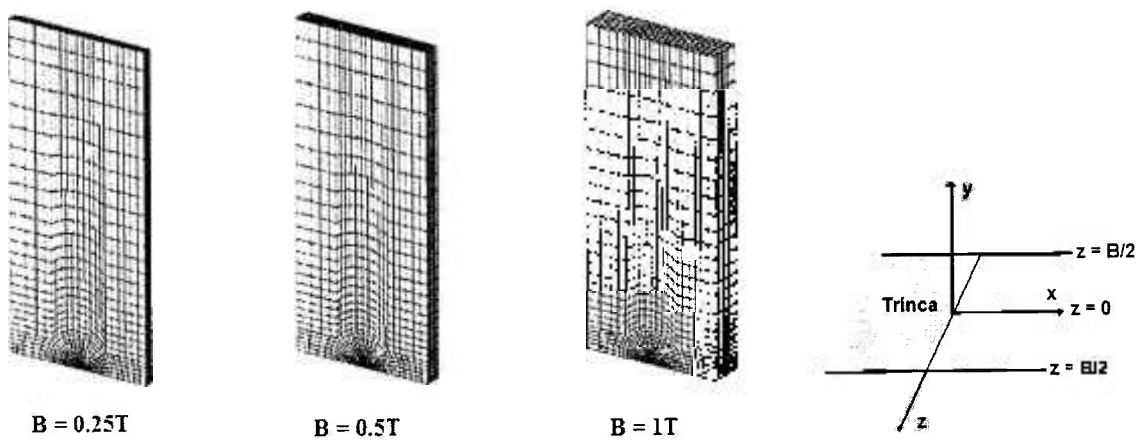


Figura 21: Modelos de corpos-de-prova tipo $SE(B)$.

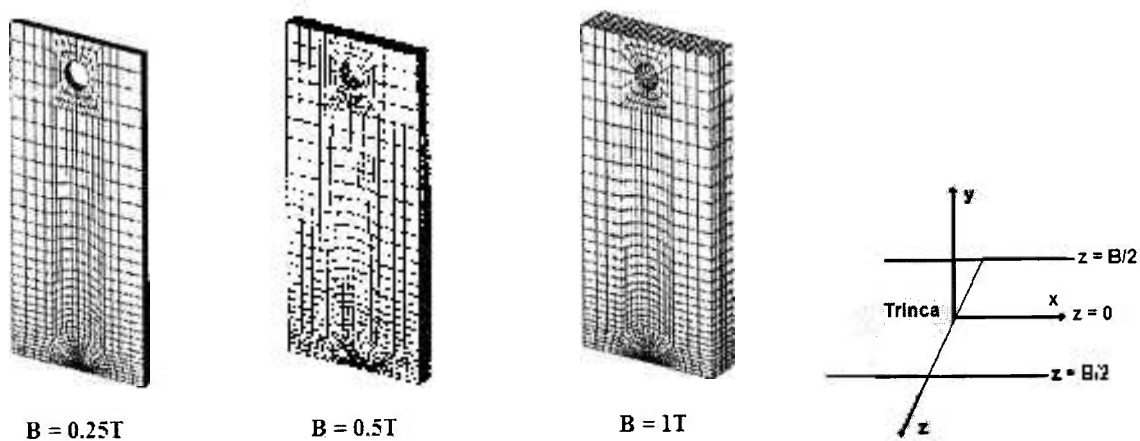


Figura 22: Modelos de corpos-de-prova tipo $SE(T)$.

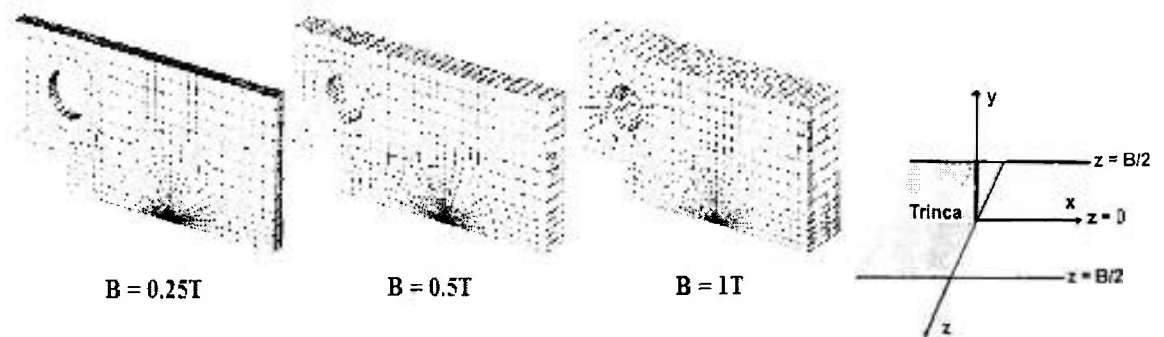


Figura 23: Modelos de corpos-de-prova tipo $C(T)$.

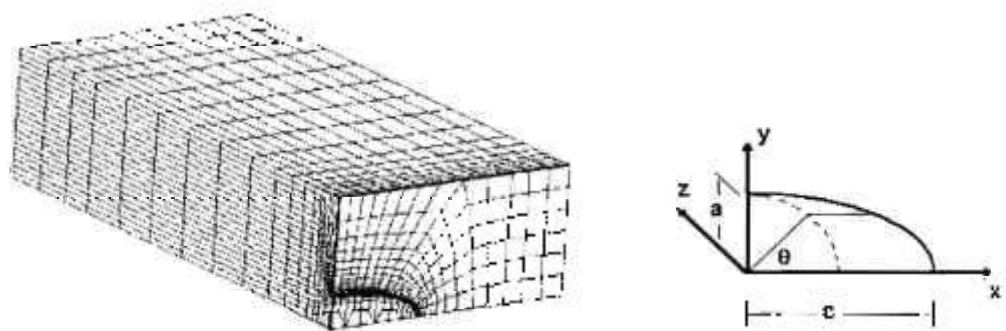


Figura 24: Modelo de corpo-de-prova tipo $SC(T)$.

Os modelos 3D criados possuem, em média, 12000 elementos hexaédricos de 8 nós. Em todos os modelos foram aproveitadas as condições de simetria existentes (Planos xy e xz), permitindo que apenas $\frac{1}{4}$ de cada corpo-de-prova fosse modelado. Para os modelos $SE(B)$, $SE(T)$ e $C(T)$ foram utilizadas 10 camadas de elementos para se avaliar o gradiente das tensões ao longo da espessura.

Para se obter uma boa descrição dos campos de tensões e deformações na frente da trinca, foi utilizada uma malha bastante refinada constituída por anéis focais (40 a 60, aproximadamente) centrados na ponta da trinca. Um raio ($\rho = 2,54\mu m$) simulando o “arredondamento” inicial da trinca foi utilizado para modelar a ponta da trinca (FIG.25). Este arredondamento evita problemas numéricos na computação das tensões e deformações nas vizinhanças da ponta da trinca e, também, acelera a convergência dos algoritmos de plasticidade utilizados nas soluções numéricas.

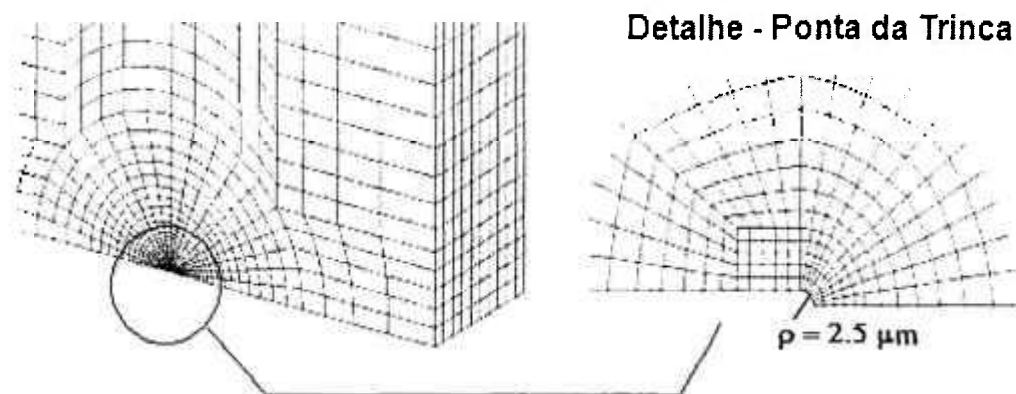


Figura 25: Detalhe do arredondamento da ponta da trinca nos modelos.

Para os corpos-de-prova $SE(B)$, $SE(T)$ e $C(T)$ foram também construídos modelos para a obtenção de soluções na condição de Estado Plano de Deformação (EPD). Esses modelos possuem malhas semelhantes aos respectivos modelos 3D, diferindo apenas na utilização de uma única camada de elementos na espessura dos corpos-de-prova e na restrição de deslocamentos impostos a todos os nós na direção z .

Além dos corpos-de-prova mencionados, foram modeladas chapas infinitas (*MBL Model*) em Estado Plano de Deformação para obtenção dos campos de referência SSY , necessários ao cálculo do parâmetro Q . Um detalhamento sobre esses modelos será apresentado no item pertinente à obtenção das soluções numéricas.

3.3 Modelos Constitutivos

Os modelos constitutivos empregados no trabalho seguem uma teoria de pequenas deformações e algoritmo de plasticidade de Mises. Uma lei exponencial para caracterizar a resposta a tração uniaxial foi utilizada para representar o comportamento mecânico dos materiais. Esta lei seguiu o modelo dado pela equação Eq.(15).

Em todas as análises utilizou-se $E/\sigma_0 = 500$, $\alpha = 1$ e o coeficiente de Poisson do material, $\nu = 0.3$. Por outro lado, três valores de “ n ” (5, 10 e 20) foram considerados, acreditando-se cobrir praticamente toda a faixa de valores de tenacidade à fratura de materiais tipicamente empregados na fabricação de vasos de pressão nucleares (*VPR*).

3.4 Soluções Numéricas

As soluções numéricas para os campos de tensões e deformações em trincas estacionárias dos modelos estudados neste trabalho foram obtidas pelo código de elementos finitos *WARP3D* (Koppenhoefer et al., 2002), executado em uma estação de trabalho Pentium Xeon Dell. O *WARP3D* utiliza alguns dos algoritmos mais avançados para a solução das equações de equilíbrio não-lineares por meio da formulação iterativo-incremental empregando o método de Newton para a eliminação das forças nodais. Outra importante característica do código é a incorporação da modificação \bar{B} , sugerida por Hughes (1980), que reduz o “travamento” característico dos elementos hexaédricos de 8 nós, quando as deformações evoluem para regimes completamente plásticos.

O valor local da taxa de liberação de energia mecânica, expresso pela Integral J , em pontos ao longo da frente da trinca foi calculado pela equação:

$$J = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} \left[w n_i - P_{ij} \frac{\delta u_i}{\delta X_j} n_j \right] d\Gamma \quad (45)$$

Na Eq.45, Γ denota um contorno fechado definido sobre um plano normal à frente da trinca, n_j é o vetor normal à superfície Γ , w é a densidade de energia de deformação por unidade de volume, P_{ij} e u_i são as componentes do tensor de tensões e dos deslocamentos no sistema de coordenadas cartesianas localizado na frente da trinca. O procedimento numérico para determinação da Integral J , expressa pela Eq.45, utiliza o método da integral de domínio proposta por Moran e Shih (1987), incluído no código *WARP3D*. Para modelos sólidos 3D, o valor médio da Integral J sobre a espessura é determinado para domínios de integração definidos fora da região próxima à ponta da trinca, onde intensa deformação plástica invalida a sua definição. Os valores da Integral J obtidos por esse método concordam, em geral, com os valores fornecidos por metodologias experimentais como, por exemplo, método “eta” da ASTM E-1820 (1999). Conseqüentemente, a Integral J numérica fornece um parâmetro conveniente e robusto para caracterizar a intensidade do carregamento remoto sobre a frente da trinca (Cravero & Ruggieri, 2002).

O parâmetro Q e as respectivas trajetórias J - Q , estudadas ao longo da espessura dos corpos-de-prova, foram obtidas por meio do programa *JQCRACK* (Cravero & Ruggieri, 2002). O parâmetro Q obtido pelo programa é determinado pela diferença entre os valores das tensões de abertura (Modo I de carregamento) dos modelos estudados e

as soluções de referência fornecidas pelos modelos de chapas infinitas (*MBL Model*) em Estado Plano de Deformação, a uma distância normalizada, $\lambda = r/(J\sigma_0)$, igual a 2.

Os modelos para obtenção das soluções de referência (para $n = 5, 10$ e 20) foram constituídos por anéis focais com aproximadamente 2000 elementos hexaédricos com 8 nós. A limitação da plastificação na ponta da trinca é garantida pela construção de um raio externo, R , suficientemente grande, de forma que $R_P \ll R/20$, sendo R_P o raio da zona plástica. As condições de estado plano de deformação foram obtidas pela restrição de deslocamentos na direção do eixo z , para todos os nós (FIG.26).

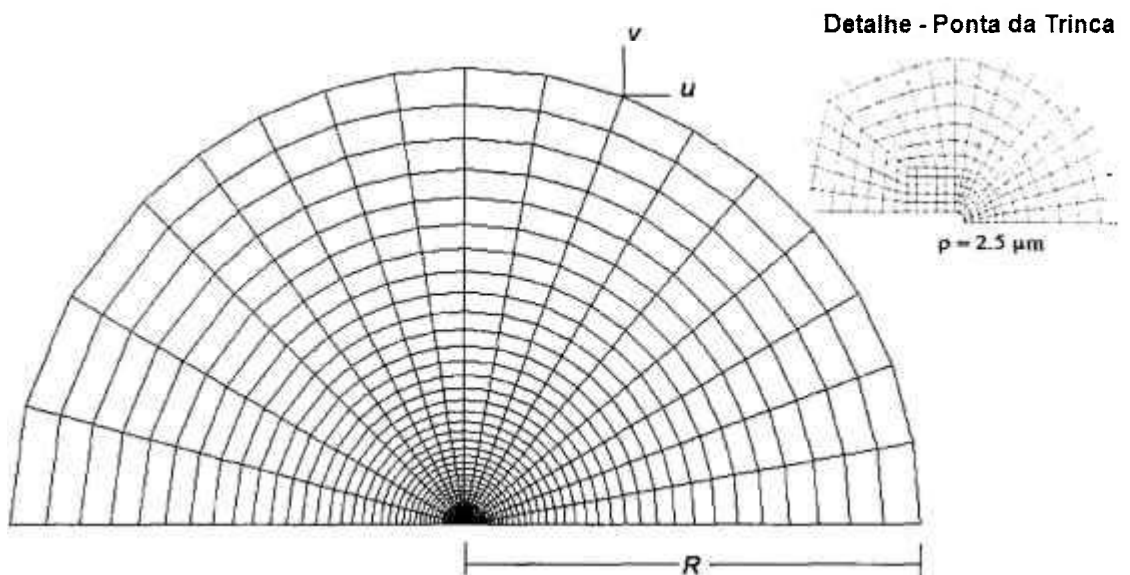


Figura 26: Modelo *MBL* utilizado para obtenção das Soluções de Referência (*SSY*).

3.5 Base de Dados Experimentais

A metodologia para correção dos efeitos da perda de restrição à plasticidade proposta neste trabalho (ver Capítulo 4: Resultados e Discussão) foi testada em resultados experimentais, publicados por Faleskog e colaboradores. (2004).

O material estudado foi um aço A508 modificado, cuja composição química é mostrada na TAB.2. O termo “modificado” refere-se ao tratamento térmico à que foi submetido o aço para o deslocamento da temperatura de transição frágil-dúctil a um intervalo no qual os testes foram realizados. A microestrutura do material é constituída de ferrita acicular de Widmanstätten e uma matriz de ferrita e carbonetos. O tamanho médio dos grãos é de aproximadamente 15 μ m.

Tabela 2: Composição Química do Aço A508 (% peso).

<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>S</i>
0,18	0,92	0,46	0,57	0,79	0,11	0,003

Na TAB.3 são apresentadas as principais propriedades mecânicas do material obtidas por ensaios de tração em 3 temperaturas: -30°C, 25°C e 55°C. Os símbolos “ α ” e “ n ” representam os coeficientes de ajuste e encruamento da Eq.(15).

Tabela 3: Propriedades Mecânicas do Aço A508, incluindo parâmetros de ajuste.

<i>Temperatura</i> (°C)	σ_e (MPa)	σ_f (MPa)	α	n	<i>E</i> (GPa)	ν
-30	597	831	0,62	8,5	208	0,3
25	557	775	0,56	9,4	208	0,3
55	552	758	0,50	10,0	208	0,3

Corpos-de-prova do tipo *SE(B)* foram construídos do material e testados para a obtenção da tenacidade à fratura (J_c), conforme norma ASTM E-1820 (1999). As principais dimensões das amostras são: largura (W) = 40mm; espessura (B) = 20mm e comprimentos de trinca (dados pela relação a/W) variando entre 0,10; 0,25 e 0,5.

O conjunto dos resultados de tenacidade, obtidos para as temperaturas -30°C, 25°C e 55°C, constitui a base de dados experimentais utilizada neste trabalho. Os dados são apresentados nas TAB.4-6.

Tabela 4: Tenacidade à fratura do Aço A508 modificado - Temperatura de Teste: -30°C.

<i>a/W</i>	J_c (kN/m)	<i>a/W</i>	J_c (kN/m)	<i>a/W</i>	J_c (kN/m)	<i>a/W</i>	J_c (kN/m)
0,503	9,2	0,504	12,7	0,248	12,09	0,109	14,7
0,513	9,6	0,496	13,0	0,244	12,5	0,103	15,3
0,503	9,8	0,496	13,0	0,246	12,6	0,104	15,4
0,504	10,6	0,503	13,3	0,255	13,8	0,104	16,0
0,492	10,9	0,502	13,4	0,247	14,0	0,102	16,1
0,506	11,0	0,504	13,6	0,252	14,1	0,113	16,8
0,506	11,1	0,500	14,0	0,252	14,3	0,101	18,2
0,503	12,2	0,506	14,7	0,251	16,4	0,104	18,5
0,498	12,2	0,500	16,6	0,246	16,43	0,109	18,5
0,506	12,4	0,248	11,4	0,250	17,5	0,108	19,0
0,502	12,6	0,247	11,5	0,102	13,7	0,105	22,3

Tabela 5: Tenacidade à fratura do Aço A508 modificado - Temperatura de Teste: 25°C.

a/W	J_c (kN/m)	a/W	J_c (kN/m)	a/W	J_c (kN/m)	a/W	J_c (kN/m)
0,504	23,1	0,504	34,6	0,249	37,8	0,100	54,8
0,504	23,5	0,498	35,5	0,249	39,6	0,100	55,1
0,500	23,6	0,504	36,0	0,249	41,2	0,100	61,1
0,502	25,8	0,504	38,0	0,249	42,5	0,102	62,7
0,502	26,5	0,501	38,3	0,246	45,3	0,105	71,5
0,498	27,0	0,499	39,2	0,247	51,2	0,093	75,1
0,503	27,6	0,503	42,7	0,249	58,3	0,112	77,9
0,509	28,5	0,502	45,4	0,245	58,5	0,098	89,5
0,499	30,9	0,499	45,4	0,248	60,2	0,102	115,0
0,503	32,3	0,249	32,4	0,249	69,4	0,106	120,4
0,498	34,4	0,250	37,7	0,105	50,8	0,102	155,2

Tabela 6: Tenacidade à fratura do Aço A508 modificado - Temperatura de Teste: 55°C.

a/W	J_c (kN/m)	a/W	J_c (kN/m)	a/W	J_c (kN/m)	a/W	J_c (kN/m)
0,505	36,9	0,501	61,6	0,259	78,4	0,115	114,5
0,502	45,3	0,501	64,5	0,256	82,6	0,109	117,4
0,501	45,6	0,496	66,9	0,261	84,6	0,103	117,7
0,501	46,2	0,503	68,2	0,243	88,1	0,107	131,5
0,497	46,8	0,499	69,5	0,240	91,0	0,103	141,6
0,503	50,1	0,504	74,9	0,245	97,1	0,111	143,9
0,502	51,5	0,505	81,5	0,248	112,1	0,103	172,0
0,493	52,9	0,505	84,1	0,249	112,7	0,106	172,4
0,505	55,5	0,502	117,4	0,253	116,0	0,110	178,8
0,503	56,5	0,246	66,8	0,251	142,5	0,107	182,2
0,502	60,5	0,245	70,2	0,107	111,2	0,112	209,1

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Na TAB.7 e na FIG. 27 são apresentados os resultados numéricos obtidos para uma geometria particular (corpo-de-prova do tipo SE(B); $a/W = 0,5$; $B = 1T$ e $n = 5$), porém, representativa do comportamento da variação da Integral J e do Parâmetro Q ao longo da frente da trinca, para todas as geometrias estudadas.

Tabela 7: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: SE(B) - $a/W = 0,5$ - $B = 1T$ - $n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0010	10,9	0,04	10,8	0,03	10,8	0,05	10,7	0,05	10,4	0,08	10,2	-0,07	6,9	-0,31
0,0020	20,8	0,05	20,8	0,05	20,7	0,05	20,5	0,06	20,0	0,07	19,6	-0,10	11,7	-0,53
0,0035	37,9	0,06	37,9	0,05	37,8	0,05	37,4	0,04	36,2	0,00	35,1	-0,20	18,8	-0,77
0,0047	51,5	0,05	51,5	0,05	51,4	0,05	50,7	0,02	48,7	-0,07	46,8	-0,27	23,9	-0,90
0,0064	72	0,05	72	0,04	72	0,03	70	-0,03	67	-0,17	63	-0,37	31	-1,05
0,0092	106	0,02	106	0,00	106	-0,02	103	-0,11	95	-0,30	90	-0,50	42	-1,23
0,0135	161	-0,05	161	-0,06	160	-0,09	154	-0,22	140	-0,47	131	-0,66	58	-1,43
0,0199	244	-0,15	244	-0,17	241	-0,21	230	-0,36	206	-0,64	191	-0,86	81	-1,61
0,0290	364	-0,32	364	-0,35	358	-0,39	339	-0,56	298	-0,85	277	-1,09	112	-1,77
0,0414	531	-0,56	529	-0,59	521	-0,65	488	-0,82	425	-1,09	394	-1,36	153	-1,91

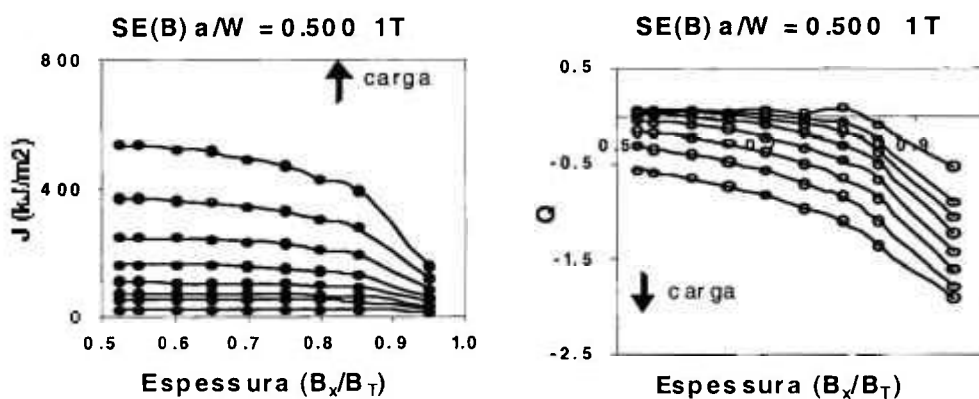


Figura 27: Distribuições de J e Q ao longo da frente da trinca.*

* Cada curva representa a variação do parâmetro ao longo da espessura, para um dado carregamento. As setas representam o sentido de crescimento do carregamento.

Os valores dos parâmetros (Integral J e Q) foram obtidos em diversas posições ao longo da espessura do corpo-de-prova modelado, conforme mencionado na metodologia. Para esses resultados, o nível do carregamento (P) é representado por $J_m/b\sigma_0$, sendo: b o ligamento remanescente ($W - a$); σ_0 a tensão de escoamento e J_m o valor médio da Integral J , computada ao longo da espessura do corpo-de-prova (normalizada por B_x/B_T , em que B_x é uma posição ao longo da espessura e B_T é a espessura total).

Nos Apêndices A, B e C são apresentados os resultados numéricos de todas as geometrias e condições estudadas. As discussões dos resultados e subseqüentes desdobramentos serão apresentados no capítulo posterior e nos Apêndices D, E e F.

No caso dos corpos-de-prova contendo trincas semi-elípticas ($SC(T)$), os valores de J e Q foram determinados para diversos ângulos, conforme o diagrama representado na FIG.24.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Comportamento Global: Distribuição dos valores da Integral J e do Parâmetro Q à Frente da Trinca

Influência do comprimento de trinca

Nas FIG.28-31, são mostradas as variações dos valores da Integral J ao longo da frente da trinca para algumas condições estudadas. Para melhor visualização dos efeitos da perda de restrição à plasticidade com a espessura, os valores de J (eixo das ordenadas) são representados pela razão $J/J_{0.5}$, sendo $J_{0.5}$ o valor da Integral J determinado no centro do corpo-de-prova.

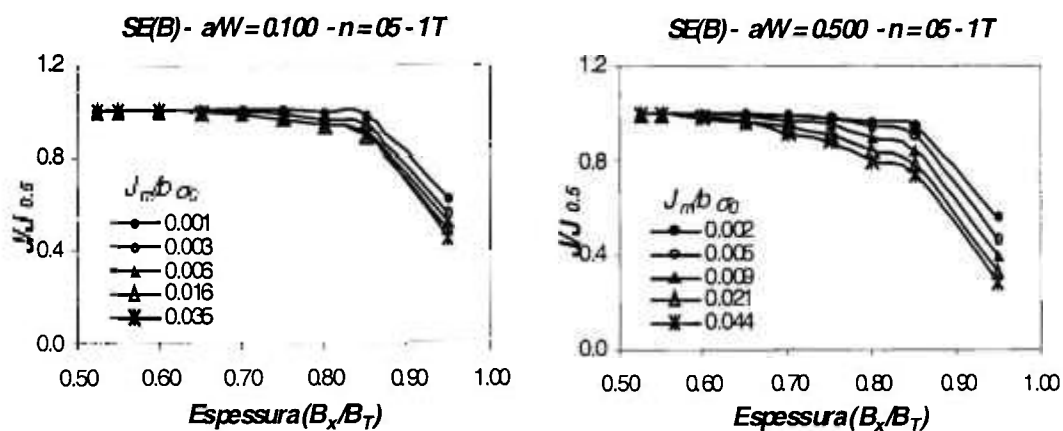


Figura 28: Distribuição de J à frente da trinca: SE(B).

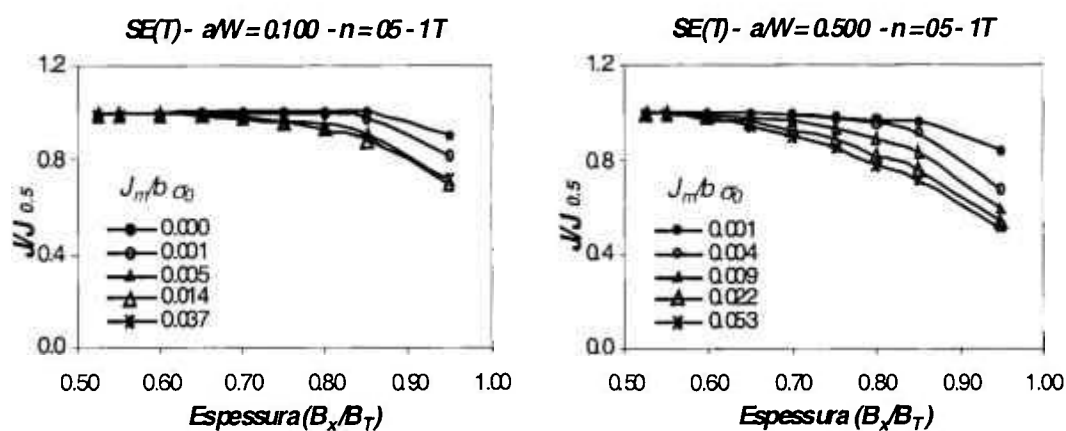


Figura 29: Distribuição de J à frente da trinca: SE(T).

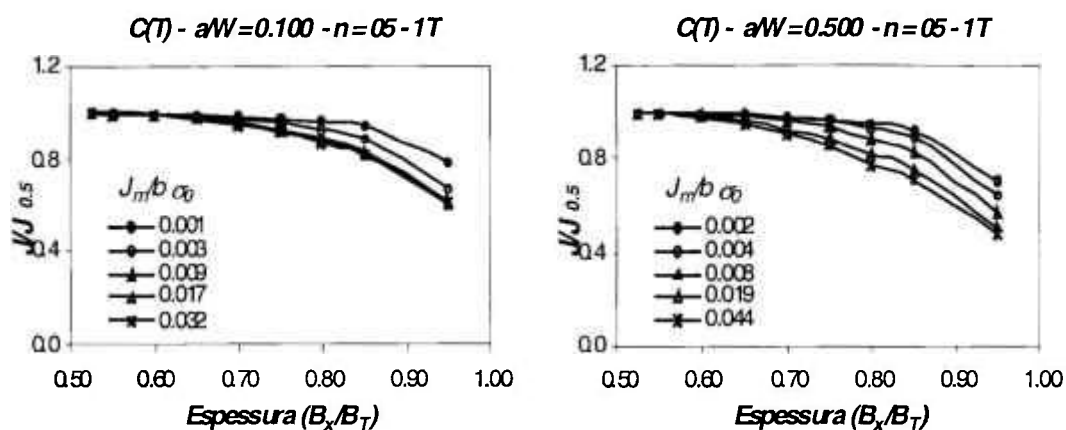


Figura 30: Distribuição de J à frente da trinca: C(T).

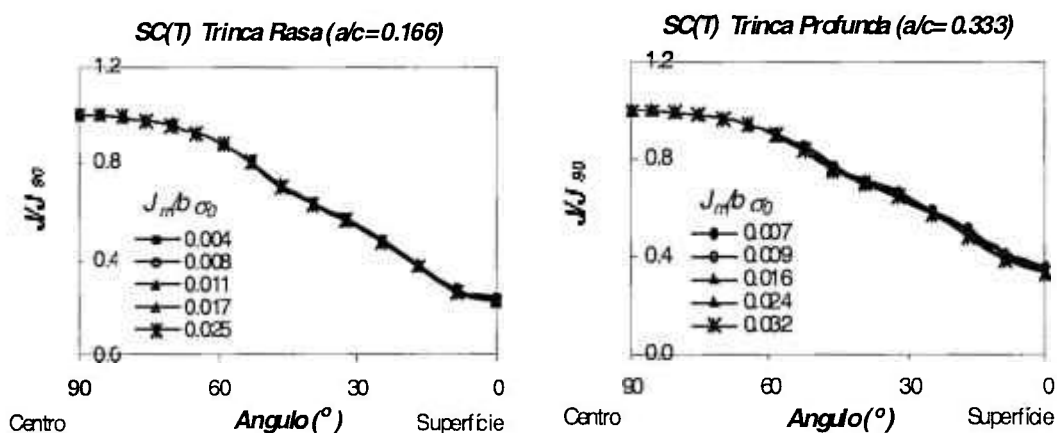


Figura 31: Distribuição de J à frente da trinca: SC(T).

De uma forma geral, observa-se que os valores da Integral J são máximos na região central dos corpos-de-prova e se reduzem na superfície. Esta redução é mais pronunciada com o aumento da carga aplicada. Nestas situações, os valores na superfície são aproximadamente 40% dos valores determinados no centro dos corpos-de-prova. Este comportamento, já relatado em literatura (Kim, et al., 2004), representa os efeitos da perda de restrição à plasticidade do centro (*in-plane*) para a superfície (*out-plane*) nos corpos-de-prova, associados à gradual transição entre a condição de estado plano de deformação para o estado plano de tensão.

Considerando-se apenas os efeitos do comprimento relativo de trinca na distribuição de J , observa-se que para trincas rasas ($a/W = 0,1$), os valores de J permanecem aparentemente constantes em grande parte da espessura, e sofrem uma redução acentuada na região mais próximas da superfície. Para trincas mais profundas

($a/W = 0,5$), a redução dos valores de J acontece ao longo de toda espessura, desde a região central até a superfície do corpo-de-prova.

As geometrias $SC(T)$ estudadas (FIG.31) se mostraram insensíveis aos efeitos do comprimento de trinca. As duas condições avaliadas (trincas rasa e profunda) apresentaram distribuições semelhantes dos valores de J .

Influência da Espessura

Nas FIG.32-37 são apresentadas as distribuições de J ao longo da frente da trinca para diversas espessuras estudadas. As espessuras são representadas por frações de uma espessura de referência $1T$ (equivalente a 25,4mm).

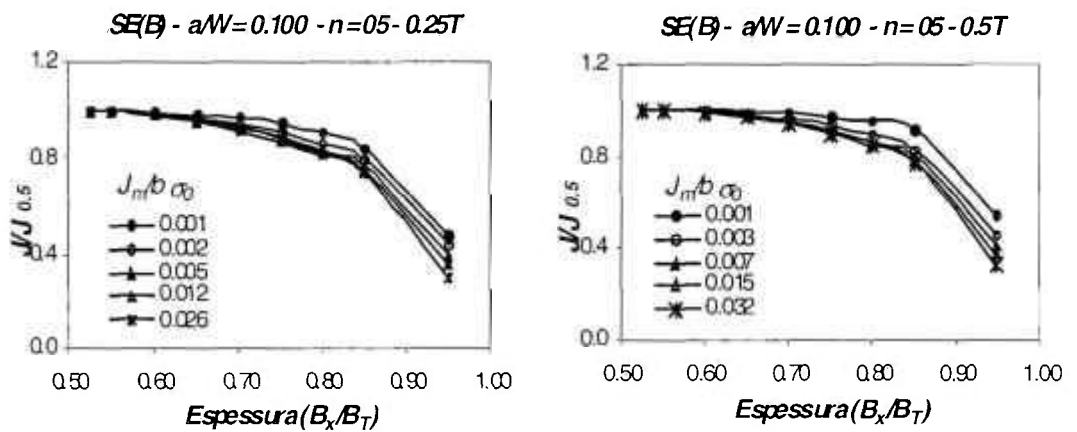


Figura 32: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(B)$ - $a/W = 0.1$ - $B = 0,25T$ e $0,5T$.

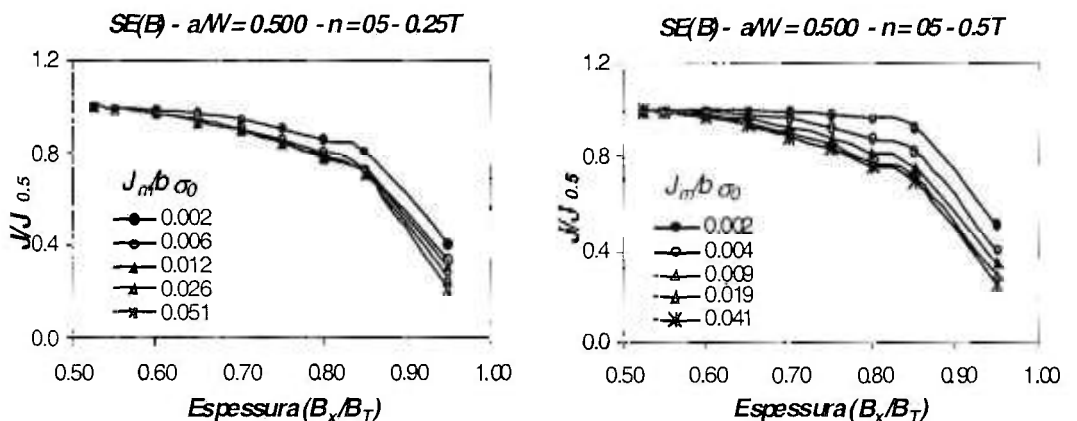


Figura 33: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(B)$ - $a/W = 0.5$ - $B = 0,25T$ e $0,5T$.

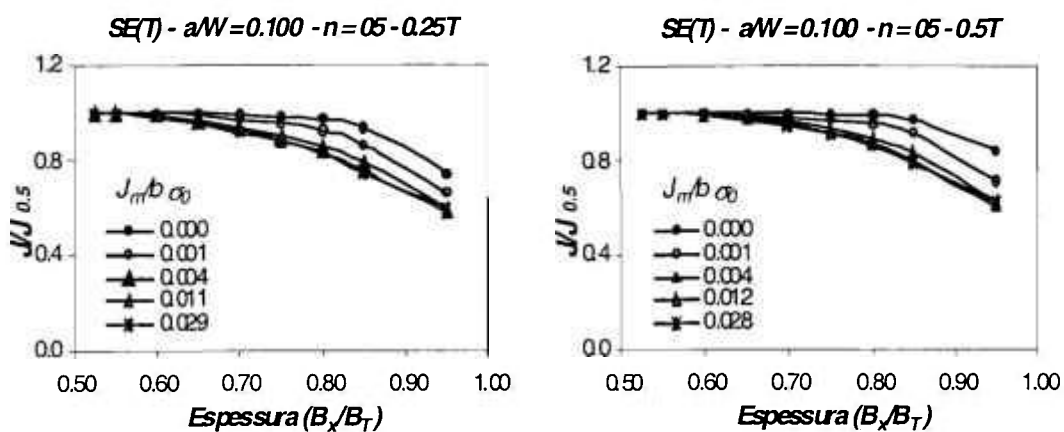


Figura 34: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(T)$ - $a/W = 0.1$ - $B = 0,25T$ e $0,5T$.

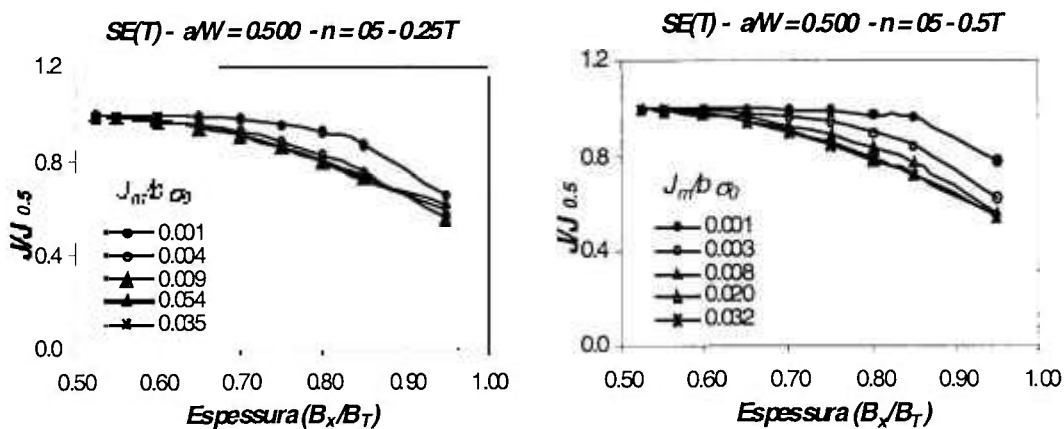


Figura 35: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(T)$ - $a/W = 0.5$ - $B = 0,25T$ e $0,5T$.

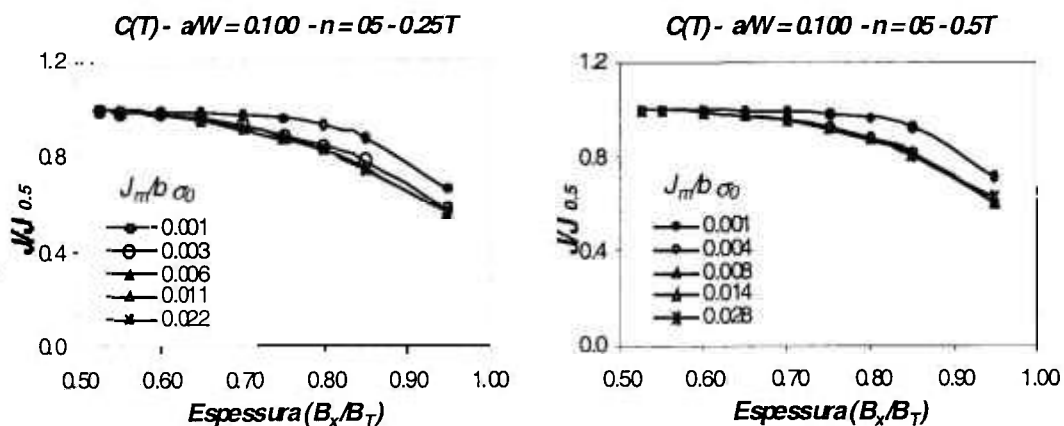


Figura 36: Distribuição de J à frente da trinca: $C(T)$ - $a/W = 0.1$ - $B = 0,25T$ e $0,5T$.

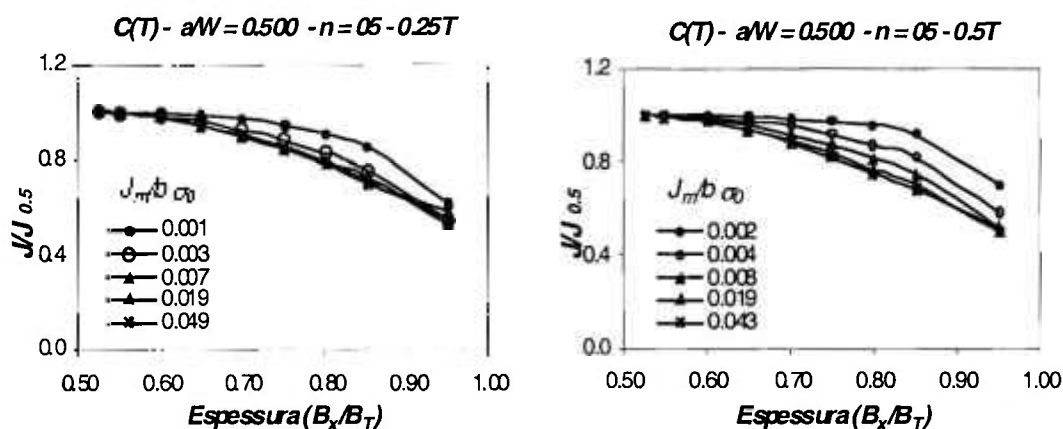


Figura 37: Distribuição de J à frente da trinca: $C(T)$ $a/W = 0.5$ - $B = 0,25T$ e $0,5T$.

Da mesma forma que o comprimento de trinca influi na distribuição de J ao longo da frente da trinca, as espessuras dos corpos-de-prova também afetam essa distribuição.

Para espessuras finas ($B = 0,25T$) os valores de J apresentam uma redução ao longo da frente da trinca tanto no centro, quanto na superfície dos corpos-de-prova, independentemente do comprimento de trinca considerado. Entretanto, esse efeito é menos perceptível para situações envolvendo grandes comprimentos de trinca ($a/W = 0.5$). Nesses casos, os efeitos do tamanho de trinca parecem sobrepor aos efeitos da espessura, uma vez que a distribuição de J possui um mesmo comportamento para qualquer espessura estudada.

Influência da Geometria

Todas as geometrias estudadas apresentaram uma redução (mais, ou menos acentuada) dos valores de J ao longo da espessura, sendo que, para geometrias submetidas à flexão a redução de J na superfície do corpo-de-prova é maior.

Para geometrias sob tração ($SE(T)$ e $C(T)$) os valores de J na superfície são aproximadamente 40% a 50% menores que os valores obtidos no centro do corpo-de-prova. Já no caso de geometrias sob flexão ($SE(B)$), os valores de J na superfície são aproximadamente 65% a 75% menores.

Influência do Nível de Encruamento

Nas FIG.38-39 são apresentadas as distribuições de J à frente da trinca para diferentes valores de “ n ”.

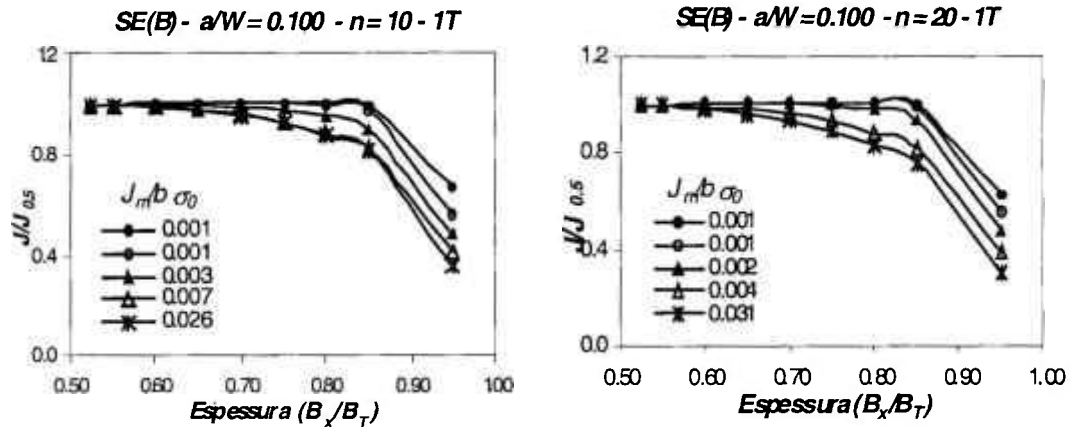


Figura 38: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0.1 - B = 1T$ e $0,5T - n = 10$.

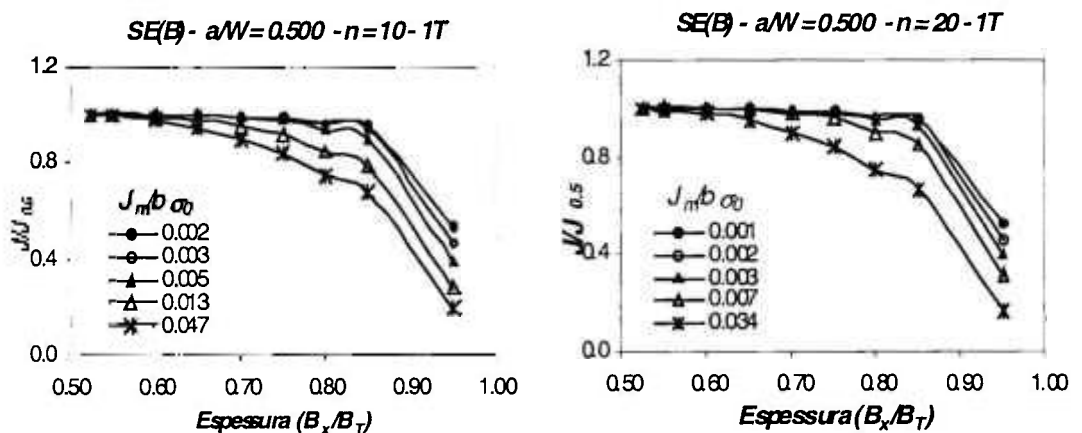


Figura 39: Distribuição de J à frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0.5 - B = 1T$ e $0,5T - n = 20$.

Comparando-se as FIG.28, FIG.38-39, observa-se que o aumento do coeficiente de encruamento provoca maiores reduções dos valores de J na superfície dos corpos-de-prova. Esse efeito é maior para $n = 20$. Os efeitos do coeficiente de encruamento mostrados para a geometria $SE(B)$ foram também percebidos para as geometrias $C(T)$ e $SE(T)$.

Em relação ao parâmetro Q , pode-se constatar o mesmo comportamento global apresentado pela Integral J . No APÊNDICE C, mostram-se os resultados das investigações da variação de Q ao longo da espessura dos corpos-de-prova.

As FIG.C1-C25 (APÊNDICE C) apresentam uma oscilação dos valores de Q ao longo da frente da trinca, para pequenos carregamentos aplicados. Este comportamento é atribuído ao refinamento da malha utilizada para a determinação das “soluções de referência” (*MBL Models*). Considerando as malhas dos *MBL's* utilizadas para o estudo das geometrias $SE(B)$, $SE(T)$, $C(T)$ e $SC(T)$, apenas os valores de Q obtidos para J superiores a $12kJ/m^2$, são confiáveis.

Em resumo, os resultados das análises numéricas mostram que o aumento do comprimento relativo de trinca e do nível de encruamento; bem como a diminuição da espessura do corpo-de-prova, promovem uma redução mais acentuada dos valores de J (ou Q) ao longo da frente da trinca.

Também, ainda que de uma forma comparativa, pode-se observar que as geometrias submetidas à tração apresentam menores gradientes de tensões do centro para a superfície, que as geometrias submetidas à flexão.

5.2 Trajetórias J-Q

Os resultados apresentados anteriormente demonstram a necessidade de se utilizar um segundo parâmetro para caracterização dos campos de tensões na ponta da trinca, uma vez que os valores de J não são constantes em toda espessura (para cada carregamento considerado).

Assim, foram construídas as Trajetórias J - Q (considerando o estado plano de deformação - EPD) para as geometrias estudadas, sendo Q , o parâmetro utilizado para quantificar o nível de triaxialidade ou restrição na ponta da trinca.

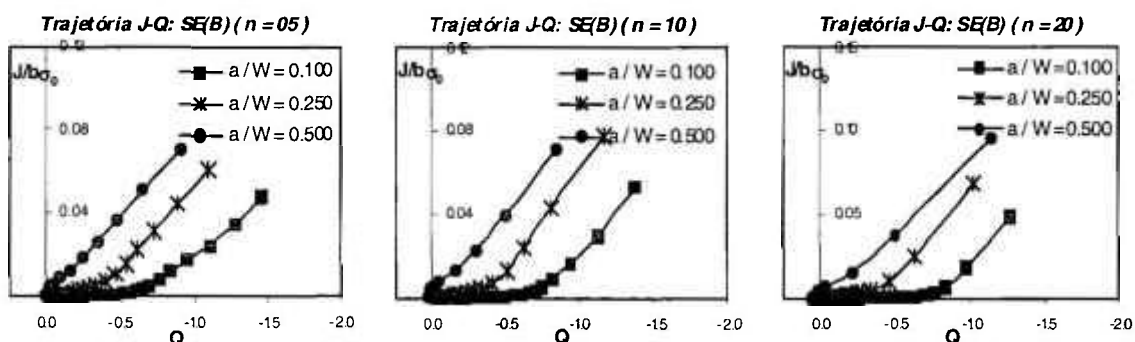


Figura 40: Trajetórias J - Q para geometria $SE(B)_{EPD}$.

As trajetórias mostradas na FIG.40 explicam parcialmente os resultados apresentados em 5.1 (em termos do nível de restrição à plasticidade).

Trincas com relações $a/W = 0,100$ e $0,250$ apresentam valores negativos de Q para qualquer nível de carregamento e coeficiente de encruamento. Conforme definição do Parâmetro Q (ver sub-capítulo 2.2.4), quanto menor o seu valor, maior é a perda de restrição à plasticidade na ponta da trinca, e conseqüentemente, menor a triaxialidade de tensões.

Trincas profundas ($a/W = 0,5$) apresentam valores de $Q > 0$ para uma determinada faixa de carregamento. Para corpos-de-prova $SE(B)$, a perda da restrição à plasticidade é percebida para limites expressos por: $b > 188J/\sigma_0$ ($n = 5$); $b > 200J/\sigma_0$ ($n = 10$) e $b > 280J/\sigma_0$ ($n = 20$). Respeitados os limites mencionados, considera-se que a geometria possui uma alta restrição à plasticidade, e os valores de tenacidade à fratura determinados nessas condições são utilizados (de uma forma geral) em estudos de integridade em componentes estruturais.

Também se pode perceber um pequeno efeito do nível de encruamento, pois à medida que se aumenta o valor de n , as trajetórias são deslocadas para a direita (região de $Q < 0$). No caso de trincas rasas, para carregamentos da ordem de $J/b\sigma_0 \approx 0,008$ as trajetórias possuem uma inclinação menor (valores menores de Q) para maiores coeficientes de encruamento. Para trincas profundas esse efeito é quase imperceptível.

Os efeitos da espessura não podem ser analisados pelas trajetórias $J-Q$ mostradas, uma vez que elas são obtidas numericamente para a condição de estado plano de deformação (EPD), com a imposição de deslocamento nulo ao longo da espessura (ver subcapítulo 3.2). Entretanto, podem-se construir Trajetórias $J-Q$ estratificadas por “frações” da espessura do corpo-de-prova, conforme mostrado na FIG.41.

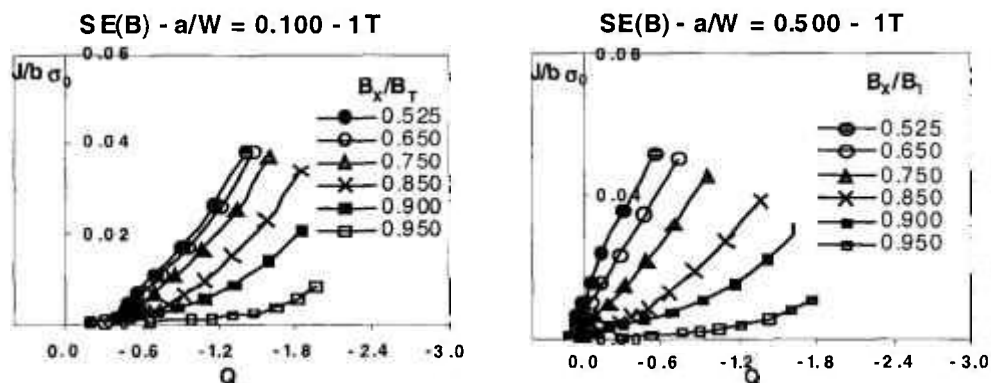


Figura 41: Trajetórias $J-Q$ estratificada por espessura: $SE(B)$.

Na FIG.41 observa-se de uma forma mais clara a perda de restrição à plasticidade ao longo da espessura do corpo-de-prova. Para um mesmo carregamento, os valores de Q são menores na superfície que na região central. Este comportamento reflete a transição de um estado plano de deformação no centro do corpo-de-prova, para uma condição de estado plano de tensão na superfície. Mesmo para geometrias contendo uma trinca profunda ($a/W = 0,5$) os efeitos da perda de restrição à plasticidade ocorrem. Tal constatação não pode ser percebida pelas trajetórias $J-Q$ “convencionais” (EPD).

No APÊNDICE D são mostradas as Trajetórias estratificadas pela espessura para todas as condições estudadas. Por meio dessa estratificação constata-se a transição de alta restrição à plasticidade (no centro) para baixa restrição na superfície dos corpos-de-prova.

5.3 Extensão 3D para as Trajetórias $J-Q$

A princípio, os efeitos da perda de restrição à plasticidade são caracterizados/descritos por Trajetórias $J-Q$ semelhantes às apresentadas na FIG.40. Entretanto, por limitações da própria definição dessas trajetórias, os efeitos da espessura do corpo-de-prova não são incluídos, uma vez que esta metodologia se limita à condição de estado plano de deformação. As limitações apresentadas pelas Trajetórias $J-Q$ convencionais (EPD) motivaram o presente estudo e a formulação de um outro parâmetro para caracterização do nível de restrição à plasticidade na ponta da trinca.

Assim, baseado no conceito de “integração funcional”, utilizado na formulação da integral de domínio (Koppenhoefer et al., 2002; Moran & Shih,1987), pode-se estender a abrangência das Trajetórias $J-Q$ convencionais incluindo-se os efeitos da espessura. Segundo esse conceito, todas integrais de funções contínuas podem ser expressas pela soma dos valores dos integrandos sobre um domínio, devidamente normalizadas, para fornecer um valor médio funcional. Um domínio pode ser definido por uma função de domínio ou função peso ($w(x)$) que seja igual a zero fora do conjunto e igual a um determinado valor dentro da abrangência desse domínio. O valor médio de uma função ($F(x)$) sobre o domínio pode ser escrito como:

$$\frac{\int F(x) \cdot w(x) dx}{\int w(x) dx} = \bar{F} \quad (46)$$

A Eq.46 também pode ser entendida como a razão entre a medida do gráfico da função sobre o domínio e a medida do domínio.

Considerando o esquema apresentado na FIG.42 e a grande variação do Parâmetro Q ao longo da frente da trinca, propõe-se a formulação de um outro parâmetro, Q_A , para melhor caracterização dos efeitos da perda de restrição à plasticidade em toda espessura do corpo-de-prova:

$$Q_A = 2 \cdot \int_{B_z = 0.5}^{B_z = 1} Q(B_z) dB \quad (47)$$

Sendo $Q(B_z)$ o valor do Parâmetro Q em cada ponto ao longo da espessura (eixo z) e a constante, 2, está associada ao uso da simetria (Modo I de carregamento).

Assim, o Parâmetro Q_A corresponde à área sob a curva Q vs. *Espessura(Normalizada)*, e pode ser entendido como um valor equivalente ($Q_{Equivalente}$) representativo do efeito global (centro e superfície) da perda de restrição à plasticidade (FIG.43).

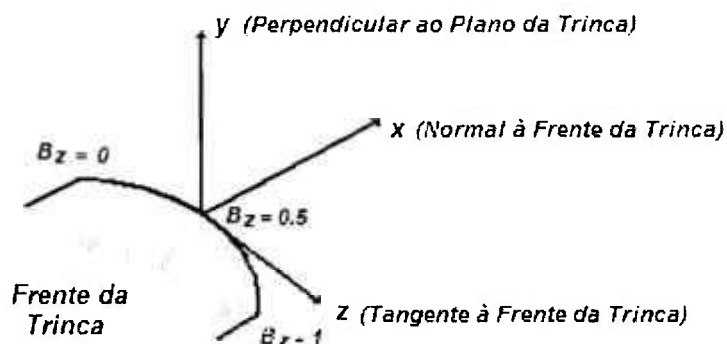


Figura 42: Coordenadas à frente da trinca.

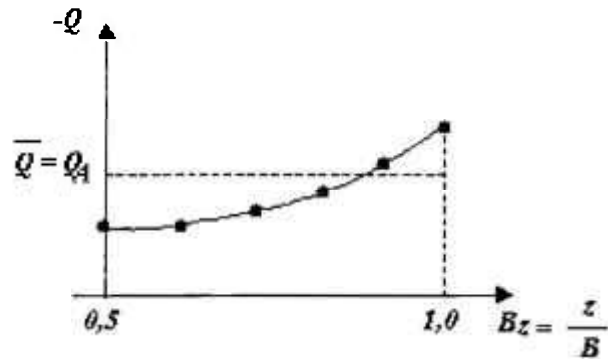


Figura 43: Representação do Parâmetro Q_A .

A Eq.47 pode ser escrita na forma:

$$Q_A(B_{z-0} \rightarrow B_{z-1}) = \frac{\int_{B_{z-1}}^{B_{z-0}} Q(z) \cdot w(z) dz}{\int_{B_{z-1}}^{B_{z-0}} w(z) dz} = \frac{\bar{Q}}{A_w} \quad (48)$$

Sendo A_w , a área do gráfico da função de domínio ($w(z)$) na qual a função Q foi integrada, e \bar{Q} , o valor médio do Parâmetro Q , determinado ao longo da espessura do corpo-de-prova.

Como no caso da integral de domínio para corpos-de-prova contendo trincas retas e passantes, a função de domínio é uniforme e constante (unitária) ao longo da espessura. Assim, fisicamente o Parâmetro Q_A representa o valor médio das diferenças entre as tensões ao longo da frente da trinca de uma geometria particular e as tensões obtidas em um modelo com alta restrição à plasticidade (*SSY Conditions*), ou seja, Q_A está associado a uma tensão hidrostática média, que representa a triaxialidade de tensões (nível de restrição) da geometria estudada.

Dessa forma, o parâmetro Q_A se aproxima do valor de Q obtido no estado plano de deformação para análises em geometrias espessas; e para pequenas espessuras, Q_A será menor que os valores determinados por Q_{EPD} . Shih e colaboradores (1993) apresentaram formulação semelhante para o tratamento de problemas de trincas tridimensionais.

Partindo desse significado físico, podem-se construir Trajetórias $J-Q_A$, conforme mostrado nas FIG.44-45.

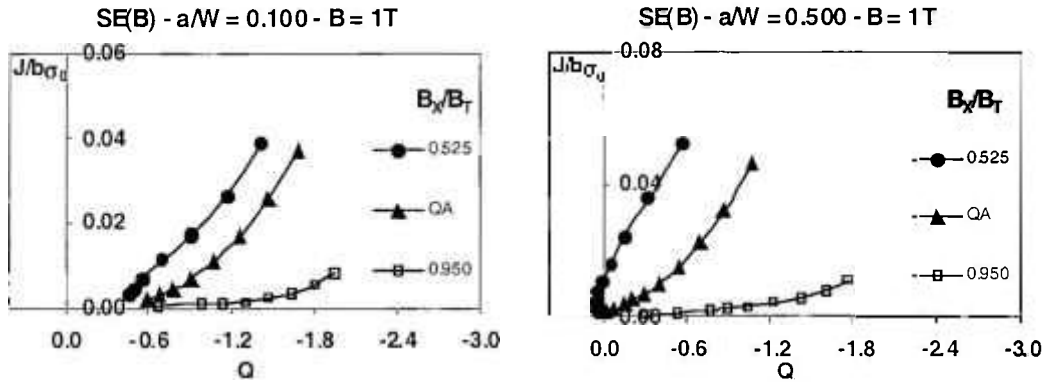


Figura 44: Trajetória $J-Q_A$: $SE(B)$.

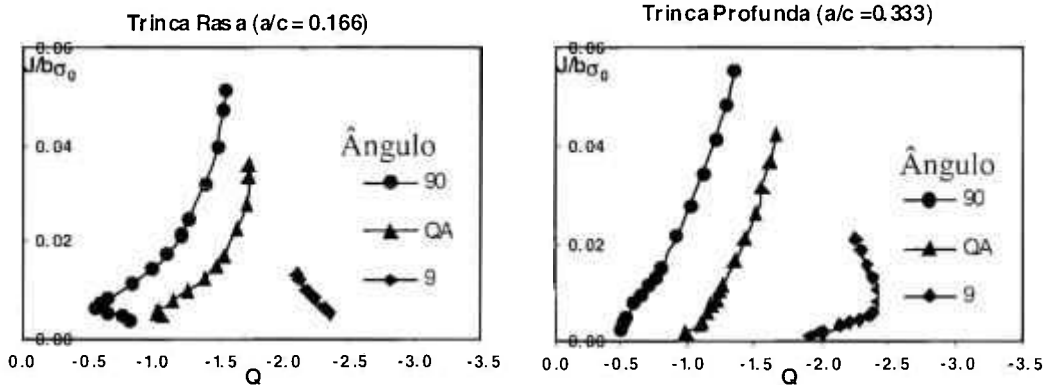


Figura 45: Trajetória $J-Q_A$: $SC(T)$.

Nas FIG.44-45 são apresentadas as Trajetórias $J-Q$ convencionais, determinadas no centro e na superfície dos corpos-de-prova, e as Trajetórias $J-Q_A$. Nota-se que as Trajetórias $J-Q_A$ representam um comportamento intermediário entre o centro e a superfície dos corpos-de-prova.

Assim, o Parâmetro Q_A pode ser utilizado para representar os efeitos globais de perda de restrição à plasticidade em uma configuração geométrica particular, e também, servir como fator de intercomparação entre valores de tenacidade à fratura obtidos para diferentes geometrias.

No APÊNDICE E são mostradas as novas trajetórias ($J-Q_A$) propostas. Essas trajetórias melhor descrevem os efeitos da perda de restrição à plasticidade na ponta da trinca, uma vez que considera os efeitos da espessura dos corpos-de-prova (*in-plane and out-plane effects*).

5.4 Procedimento para Correção de J

Além da capacidade de inclusão dos efeitos da espessura no nível de restrição na ponta da trinca, o parâmetro Q_A , definido anteriormente, também pode ser utilizado para a elaboração de um procedimento de correção dos valores de J . Procedimentos e metodologias para correção de J são importantes instrumentos que auxiliam na intercomparação (transferência) de resultados de tenacidade obtidos para diferentes geometrias, e se aplicam no tratamento da dispersão dos valores de tenacidade obtidos na região de transição.

Seguindo a filosofia descrita pela metodologia *SSYC* (ver sub-capítulo 2.3), que utiliza as Trajetórias J - Q em sua formulação, um procedimento para correção de J foi proposto, baseado nas novas Trajetórias J - Q_A .

Considerando-se os resultados apresentados anteriormente, uma “correção” para os valores da Integral J pode ser feita, incluindo-se os efeitos da variação da perda de restrição à plasticidade ao longo da espessura, dado pelo Parâmetro Q_A .

Na FIG.46a são mostradas as Trajetórias J - Q (EDP) e para a correção com o Parâmetro Q_A . Considerando a reta AB, que representa uma situação de mesma restrição (mesmo Parâmetro Q), o ponto C corresponde ao valor médio da Integral J e o ponto D o valor da Integral J corrigido pelo efeito de restrição tridimensional (J_{Q_A}). Assim, para as diversas cargas e valores do Parâmetro Q , pode-se construir uma curva de “correção” dos valores médios da Integral J , conforme mostrado na FIG.46b.

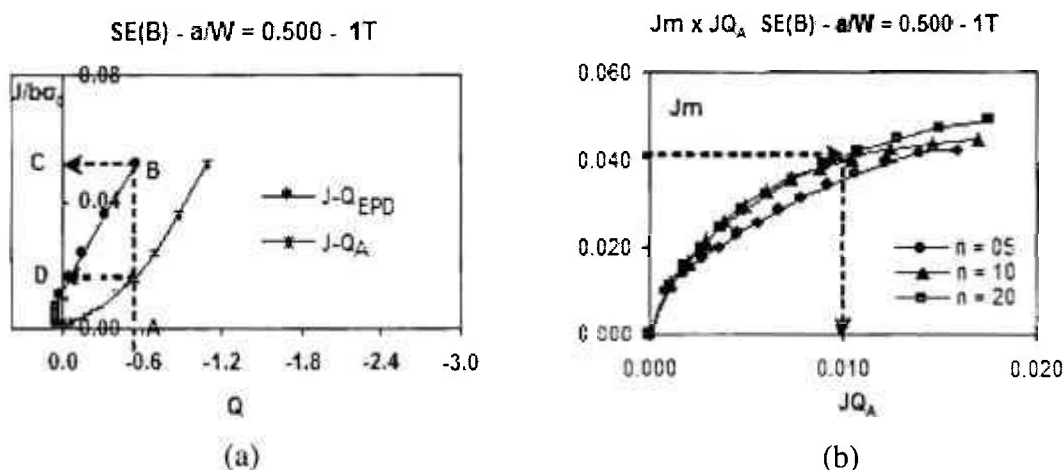


Figura 46: Esquema de correção de J baseado no Parâmetro Q_A .

No APÊNDICE F são apresentadas as curvas de correção de J obtidas numericamente por meio do procedimento proposto para os corpos-de-prova $SE(B)$, $C(T)$ e $SE(T)$. Tais curvas foram construídas considerando as diferentes espessuras e coeficientes de encruamento estudados. Assim, a correção proposta pode ser utilizada para a intercomparação e transferência dos valores de J obtidos em diversas condições geométricas e de comportamento mecânico.

5.5 Aplicação e Verificação Experimental do Procedimento de Correção

Conforme apresentado anteriormente, além da possibilidade de se estabelecer uma forma de intercomparação dos resultados de tenacidade à fratura obtidos para diferentes geometrias, o procedimento de correção dos valores J pelo parâmetro Q_A , também pode ser utilizado para tratar a dispersão dos valores de tenacidade à fratura dos aços ferríticos, obtidos na região de transição.

Assim, os resultados experimentais obtidos por Faleskog e colaboradores (2004) (ver Sub-capítulo 3.5) foram submetidos ao procedimento proposto, com a finalidade de se investigar os efeitos da correção na dispersão dos valores de tenacidade à fratura.

Nas TAB.8-10 são apresentados os resultados obtidos pela correção dos valores de tenacidade (J_{Q_A}) nas temperaturas de testes utilizadas.

Tabela 10: Correção da tenacidade à fratura do Aço A508 - Temperatura de Teste: 55°C.

$a/W = 0,500$				$a/W = 0,250$				$a/W = 0,100$			
Amostra	J_C (kN/m)	J_{QA} (kN/m)	Dif. %	Amostra	J_C (kN/m)	J_{QA} (kN/m)	Dif. %	Amostra	J_C (kN/m)	J_{QA} (kN/m)	Dif. %
1	36,90	22,37	-39,4	1	66,80	38,96	-41,7	1	111,20	44,48	-60,0
2	45,30	24,61	-45,7	2	70,20	39,79	-43,3	2	114,50	45,36	-60,4
3	45,60	24,69	-45,9	3	78,40	41,79	-46,7	3	117,40	46,13	-60,7
4	46,20	24,86	-46,2	4	82,60	42,81	-48,2	4	117,70	46,21	-60,7
5	46,80	25,02	-46,5	5	84,60	43,30	-48,8	5	131,50	49,90	-62,1
6	50,10	25,91	-48,3	6	88,10	44,15	-49,9	6	141,60	52,60	-62,9
7	51,50	26,30	-48,9	7	91,00	44,86	-50,7	7	143,90	53,22	-63,0
8	52,90	26,70	-49,5	8	97,10	46,34	-52,3	8	172,00	60,73	-64,7
9	55,50	27,44	-50,6	9	112,10	50,00	-55,4	9	172,40	60,84	-64,7
10	56,50	27,72	-50,9	10	112,70	50,14	-55,5	10	178,80	62,55	-65,0
11	60,50	28,85	-52,3	11	116,00	50,95	-56,1	11	182,20	63,46	-65,2
12	61,60	29,16	-52,7	12	142,50	54,22	-62,0	12	209,10	70,22	-66,4
13	64,50	29,98	-53,5								
14	66,90	30,66	-54,2								
15	68,20	31,03	-54,5								
16	69,50	31,40	-54,8								
17	74,90	32,93	-56,0								
18	81,50	34,82	-57,3								
19	84,10	35,60	-57,7								
20	117,40	45,85	-60,9								

Como pode ser visto, os valores de tenacidade à fratura (J_C) para a temperatura de teste $T = -30^\circ\text{C}$ se encontram na faixa de 9,2-16,6 kN/m. Assim, uma nova malha (mais refinada) foi utilizada para a obtenção das “soluções de referência” (*MBL Models*), para se evitar as “oscilações” dos valores de Q com a espessura, já discutidas. Esta ação minimizou as oscilações, comprovando a justificativa dada anteriormente (sub-capítulo 5.1).

Nas FIG.47-49, são mostrados e comparados os valores obtidos pelas correções dadas pela metodologia *SSYC* e pelo procedimento J_{QA} .

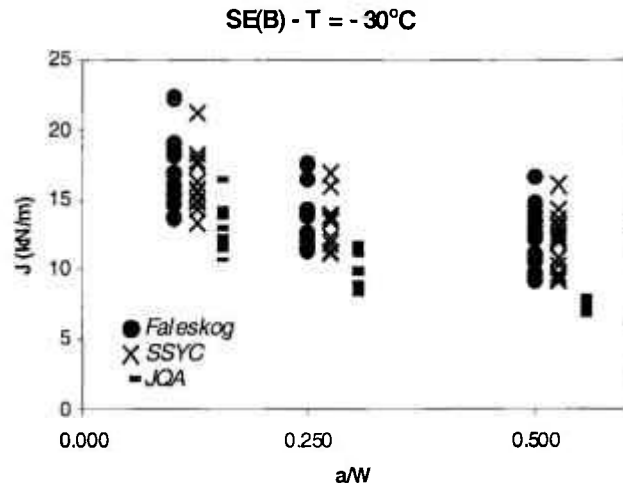


Figura 47: Metodologias para correção dos valores de tenacidade: $SE(B) - T = -30^\circ\text{C}$.

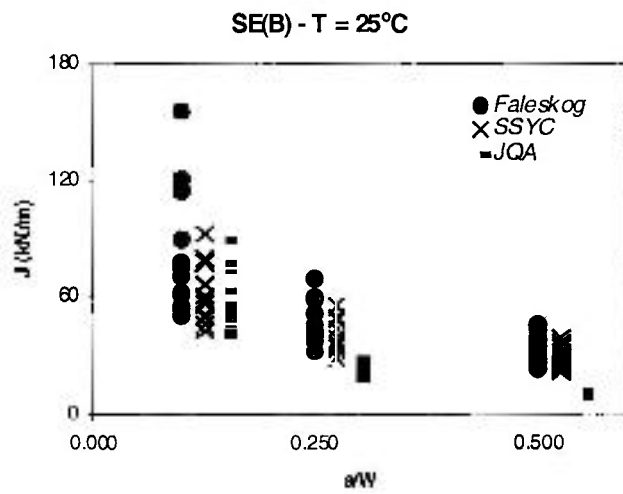


Figura 48: Metodologias para correção dos valores de tenacidade: $SE(B) - T = 25^\circ\text{C}$.

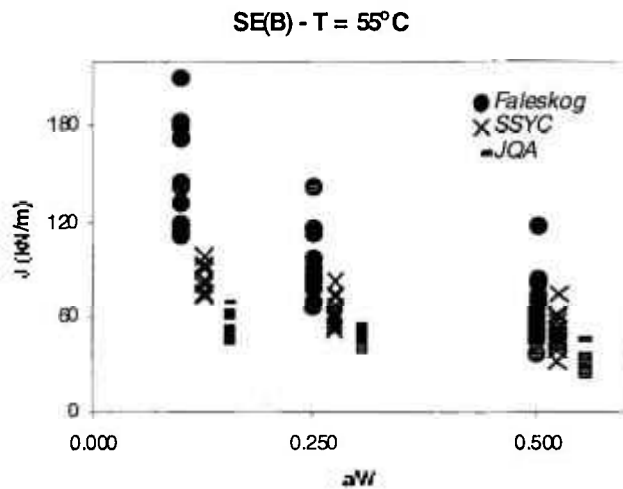


Figura 49: Metodologias para correção dos valores de tenacidade: $SE(B) - T = 55^\circ\text{C}$.

Observa-se nas figuras apresentadas, um comportamento típico dos aços ferríticos na transição: para trincas rasas (relação $a/W = 0,100$), os valores da tenacidade à fratura (médio) e a dispersão são maiores que os apresentados para geometrias contendo trincas profundas ($a/W = 0,500$). Este fato evidencia a necessidade de metodologias para correção dos valores de J .

Comparando-se os resultados fornecidos pelas correções dadas por $SSYC$ e J_{QA} , observa-se que há uma considerável redução da amplitude dos valores, principalmente para as temperaturas $T = 25^{\circ}\text{C}$ e 55°C . A TAB.11 resume os resultados, em termos das amplitudes, para cada método de correção considerado.

Tabela 11: Comparação entre as metodologias para correção da tenacidade.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	a/W	FALESKOG	SSYC		J_{QA}	
		Amplitude	Amplitude	% Redução	Amplitude	% Redução
-30	0,500	7,40	6,98	5,6	1,22	83,5
	0,250	6,10	5,70	6,4	3,49	42,8
	0,100	8,60	7,89	8,2	5,59	35,0
25	0,500	22,30	17,71	20,6	3,38	84,8
	0,250	37,00	25,79	30,3	10,67	71,2
	0,100	104,40	48,95	53,1	47,47	54,5
55	0,500	80,50	42,67	47,0	23,48	70,8
	0,250	75,70	31,18	58,8	15,26	79,8
	0,100	97,90	25,12	74,3	25,74	73,7

Os resultados apresentados e discutidos até então, atendem aos objetivos (1) e (2) propostos neste trabalho, uma vez que, por meio do Parâmetro Q_A foi possível quantificar os efeitos da perda de restrição à plasticidade no comportamento à fratura dos aços ferríticos e estabelecer uma metodologia para correção dos valores de tenacidade à fratura, reduzindo os efeitos mecânicos da perda de restrição à plasticidade.

Tendo-se em vista o objetivo (3) deste trabalho e considerando que as metodologias para a caracterização da tenacidade à fratura na região de transição, como a Curva Mestre (*Master Curve*), utilizam valores de tenacidade obtidos para a condição de estado plano de deformação, pode-se recomendar a correção J_{QA} para a formulação de uma teoria mais realista para o comportamento à fratura dos aços ferríticos, incluindo os efeitos da espessura no tratamento dos efeitos da perda de restrição à plasticidade.

Assim, pode-se sugerir uma modificação da Eq.(43):

$$\bar{J}_{Q_A} = J_{Q_A}(J_C) \sqrt{\frac{B_1}{B_2}} \quad (49)$$

Com essa sugestão, espera-se obter uma expressão mais robusta, capaz de descrever os efeitos globais (*in plane and out plane*) da perda de restrição à plasticidade e da espessura na tenacidade à fratura de materiais ferríticos avaliados na região de transição.

5.6 Importância e Coerência dos Resultados

A caracterização da tenacidade à fratura na região de transição dos aços ferríticos é uma importante questão a ser tratada pela mecânica da fratura. Assim, neste trabalho de pesquisa foram realizadas extensivas análises numéricas (por elementos finitos) objetivando a compreensão dos efeitos da perda de restrição à plasticidade sobre os valores de tenacidade à fratura.

A influência de alguns parâmetros geométricos (tamanho de trinca, espessura e geometria do corpo-de-prova) e do material (coeficiente de encruamento) sobre o comportamento global à fratura dos corpos-de-prova foi investigada. Para os corpos-de-prova $SE(B)$, $SE(T)$ e $C(T)$, cada parâmetro foi estudado em três níveis (3 valores distintos). No caso das trincas superficiais (semi-elípticas), foram estudados apenas dois tamanhos de trinca (trinca rasa e profunda), sendo mantidos fixos os outros parâmetros. Dessá forma, a matriz de análise foi elaborada de forma a se obter informações da influência de cada parâmetro individualmente, bem como, dos efeitos combinados, uma vez que todos parâmetros foram analisados em todas as condições.

As análises realizadas revelaram a variação da Integral J e do Parâmetro Q com a espessura de cada corpo-de-prova. Esses resultados numéricos são coerentes com análises similares realizadas por Nevalainen e Dodds (1996) e Kim e colaboradores (Kim, et al., 2004).

Partindo-se da variação do comportamento de J e Q com a espessura, foi possível estabelecer uma “extensão” das trajetórias J - Q convencionais (determinadas para condições de EPD) por meio de um outro parâmetro (Q_A). As novas trajetórias apresentadas (J - Q_A) descrevem de uma forma mais realista os efeitos da perda de restrição à plasticidade, uma vez que inclui os efeitos da espessura dos corpos-de-prova.

Um outro importante resultado apresentado foi o desenvolvimento de um procedimento para correção de J , baseado no parâmetro Q_A (J_{Q_A}), para um aço A508.

6. CONCLUSÕES

Extensivas análises numéricas foram realizadas para o estudo dos efeitos da perda de restrição à plasticidade na ponta da trinca em corpos-de-prova padronizados do tipo $SE(B)$, $SE(T)$ e $C(T)$. Com a intenção de se investigar a influência de parâmetros como, comprimento de trinca, espessura e coeficiente de encruamento, na determinação do nível de restrição, foram também modelados corpos-de-prova não padronizados, incluindo-se placas contendo trincas superficiais ($SC(T)$). Os resultados obtidos revelaram que a influência de tais parâmetros gera uma distribuição decrescente dos valores da Integral J e do parâmetro Q ao longo da frente da trinca. De uma forma geral, os valores máximos de J ocorrem no centro dos corpos-de-prova, determinando a condição de maior triaxialidade de tensões.

Qualitativamente, as Trajetórias $J-Q$ obtidas para a condição de estado plano de deformação explicam a influência dos parâmetros estudados no comportamento à fratura dos aços ferríticos. A obtenção do campo diferencial de tensões, expresso pelo parâmetro Q , é sensível ao nível de refinamento da malha na ponta da trinca dos modelos utilizados para a obtenção das “soluções de referência”.

Quantitativamente, as Trajetórias $J-Q$ não podem ser utilizadas para avaliação dos efeitos da espessura dos corpos-de-prova, pois utilizam um único valor de Q , obtido para uma condição de Estado Plano de Deformação (EPD), para representar o nível de restrição à plasticidade global do corpo-de-prova. Esta consideração não representa a variação do parâmetro Q , ocorrida ao longo da frente da trinca.

Um parâmetro médio (Q_A) foi proposto para a inclusão dos efeitos da espessura na caracterização do nível de restrição na ponta da trinca. Este parâmetro foi obtido pela área sob a curva Q vs. *Espessura Normalizada*, sendo Q , determinado em diversas posições ao longo da frente da trinca. Assim, o parâmetro Q_A pode ser interpretado fisicamente, como um valor médio do campo diferencial de tensões, determinado na espessura do corpo-de-prova. As Trajetórias $J-Q_A$, obtidas por meio do parâmetro Q_A , são coerentes com o comportamento das Trajetórias $J-Q$ convencionais.

O procedimento para correção dos valores de tenacidade à fratura (J_{QA}) proposto foi capaz de reduzir os efeitos da perda de restrição à plasticidade nos valores obtidos na região de transição de um aço A508 modificado. Este procedimento apresentou reduções das amplitudes, superiores às obtidas pela utilização da metodologia SSYC, para diferentes comprimentos de trincas e temperaturas de teste.

Por fim, pelos resultados numéricos apresentados, considera-se que o uso de um parâmetro mais abrangente, que inclui os efeitos da espessura sobre os efeitos da perda de restrição à plasticidade, pode ser útil na formulação de teorias mais realistas para o estudo do comportamento à fratura dos materiais ferríticos, operando na região de transição dúctil-frágil.

Sugestão para trabalhos posteriores:

Neste trabalho de pesquisa apresentam-se importantes observações sobre o efeito da espessura na caracterização da restrição à plasticidade na ponta da trinca de diversos corpos-de-prova. Assim, no intuito de se complementar os estudos desenvolvidos sugerem-se:

(1) Determinar uma “função peso”, incluindo-se efeitos probabilísticos de falha, para o estudo de corpos-de-prova contendo trincas superficiais (semi-elípticas), uma vez que a formulação do parâmetro Q_A realizada neste trabalho, partiu de um valor constante para a função peso, aplicada ao caso de trincas passantes com frente reta.

(2) Separar os efeitos puramente estatísticos dos efeitos mecânicos da perda de restrição à plasticidade, incrementando ao parâmetro Q_A uma componente estatística (aderência fenomenológica).

(3) Investigar os efeitos da correção J_{QA} na determinação de parâmetros como T_0 (Curva Mestre), para caracterizar o comportamento à fratura na região de transição, uma vez que as metodologias para avaliação da tenacidade à fratura na região de transição utilizam valores de tenacidade obtidos para a condição de estado plano de deformação.

APÊNDICE A: Resultados Numéricos

Tabela A 1: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 5^*$

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0005	10,3	-0,23	10,3	-0,23	10,2	-0,23	10,1	-0,25	9,8	-0,29	9,3	-0,46	5,5	-1,04
0,0010	21,6	-0,34	21,5	-0,34	21,4	-0,36	20,8	-0,42	19,4	-0,56	18,1	-0,72	10,1	-1,36
0,0015	31,0	-0,40	31,0	-0,41	30,7	-0,43	29,6	-0,52	27,3	-0,69	25,3	-0,83	13,9	-1,52
0,0021	45,6	-0,47	45,4	-0,49	45,0	-0,52	43,0	-0,62	39,2	-0,82	36,2	-0,95	19,6	-1,67
0,0031	67,6	-0,57	67,4	-0,59	66,5	-0,62	63,2	-0,74	57,3	-0,95	52,5	-1,09	27,8	-1,80
0,0047	103	-0,73	102	-0,75	101	-0,78	95	-0,90	86	-1,11	78	-1,28	40	-1,92
0,0072	160	-0,95	159	-0,97	156	-1,00	147	-1,12	132	-1,33	120	-1,51	59	-2,02
0,0111	248	-1,23	247	-1,25	243	-1,28	228	-1,38	204	-1,58	185	-1,73	86	-2,07
0,0169	378	-1,52	376	-1,53	370	-1,55	347	-1,64	309	-1,80	280	-1,90	122	-2,07
0,0250	560	-1,77	557	-1,78	548	-1,80	514	-1,85	457	-1,93	413	-1,98	165	-2,02

Tabela A 2: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 5$

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0005	9,7	-0,23	9,7	-0,23	9,7	-0,23	9,6	-0,22	9,5	-0,21	9,3	-0,35	6,0	-0,77
0,0010	19,6	-0,31	19,5	-0,32	19,5	-0,32	19,3	-0,33	18,7	-0,37	17,9	-0,54	10,6	-1,10
0,0014	27,8	-0,35	27,8	-0,36	27,7	-0,37	27,2	-0,40	25,9	-0,47	24,6	-0,65	14,2	-1,25
0,0029	59,5	-0,43	59,3	-0,44	59,0	-0,46	57,1	-0,54	53,1	-0,71	49,4	-0,85	27,2	-1,55
0,0042	89,3	-0,49	89,0	-0,50	88,4	-0,53	85,1	-0,63	78,3	-0,83	72,5	-0,96	38,7	-1,69
0,0064	137	-0,60	137	-0,61	136	-0,64	130	-0,75	119	-0,97	109	-1,11	56	-1,83
0,0098	212	-0,78	212	-0,80	210	-0,83	200	-0,95	182	-1,16	167	-1,32	83	-1,96
0,0148	323	-1,04	322	-1,06	319	-1,09	304	-1,20	275	-1,40	251	-1,57	119	-2,05
0,0219	479	-1,34	477	-1,36	472	-1,39	450	-1,48	406	-1,66	370	-1,81	165	-2,10
0,0315	692	-1,63	690	-1,64	682	-1,66	650	-1,75	586	-1,89	533	-1,99	222	-2,11

Tabela A 3: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 5$

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0006	11,8	-0,29	11,8	-0,29	11,8	-0,28	11,8	-0,26	11,8	-0,24	11,7	-0,37	8,3	-0,66
0,0013	24,2	-0,40	24,2	-0,40	24,2	-0,39	24,3	-0,38	24,1	-0,37	23,6	-0,51	15,1	-0,99
0,0019	35,5	-0,44	35,5	-0,44	35,5	-0,43	35,5	-0,42	34,8	-0,44	33,8	-0,59	20,8	-1,14
0,0027	53,0	-0,46	53,0	-0,46	53,0	-0,46	52,6	-0,47	51,1	-0,53	49,3	-0,69	29,6	-1,30
0,0041	81,2	-0,49	81,1	-0,50	81,0	-0,50	80,2	-0,54	77,1	-0,65	73,9	-0,80	43,5	-1,47
0,0064	128	-0,55	128	-0,56	128	-0,58	126	-0,65	120	-0,79	115	-0,93	66	-1,65
0,0100	203	-0,69	203	-0,70	202	-0,72	199	-0,79	190	-0,96	181	-1,08	102	-1,81
0,0155	316	-0,91	315	-0,92	315	-0,93	310	-1,01	296	-1,17	281	-1,31	154	-1,95
0,0235	477	-1,17	477	-1,17	476	-1,19	470	-1,27	448	-1,43	426	-1,59	225	-2,06
0,0340	703	-1,41	702	-1,42	701	-1,44	692	-1,53	659	-1,70	628	-1,85	321	-2,14

* Integral J em $[kJ/m^2]$

Tabela A 4: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0006	10,7	-0,08	10,7	-0,08	10,7	-0,08	10,5	-0,10	10,2	-0,17	9,7	-0,36	5,4	-0,91
0,0012	21,2	-0,15	21,2	-0,16	21,0	-0,18	20,3	-0,26	18,8	-0,41	17,5	-0,57	9,3	-1,20
0,0030	55,3	-0,37	55,0	-0,39	54,2	-0,43	51,0	-0,55	45,7	-0,78	41,7	-0,92	20,9	-1,62
0,0041	77	-0,50	76	-0,52	75	-0,56	70	-0,69	63	-0,91	57	-1,07	28	-1,74
0,0058	108	-0,67	107	-0,69	105	-0,72	98	-0,85	87	-1,07	79	-1,24	38	-1,84
0,0083	157	-0,89	156	-0,91	153	-0,94	143	-1,06	126	-1,27	114	-1,45	52	-1,93
0,0122	231	-1,15	230	-1,16	226	-1,19	210	-1,30	186	-1,50	168	-1,66	73	-1,99
0,0178	338	-1,40	336	-1,42	330	-1,44	308	-1,53	272	-1,70	245	-1,82	98	-2,00
0,0256	486	-1,63	484	-1,65	475	-1,67	442	-1,73	390	-1,84	351	-1,91	129	-1,98
0,0361	687	-1,82	683	-1,83	671	-1,84	624	-1,86	551	-1,91	495	-1,94	160	-1,92

Tabela A 5: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0007	11,0	-0,08	11,0	-0,08	11,0	-0,07	10,9	-0,07	10,7	-0,06	10,5	-0,22	6,4	-0,67
0,0013	21,0	-0,10	21,0	-0,11	21,0	-0,11	20,8	-0,13	20,1	-0,18	19,2	-0,37	10,7	-0,93
0,0017	28,9	-0,12	28,8	-0,13	28,8	-0,14	28,3	-0,18	26,8	-0,28	25,4	-0,46	13,7	-1,07
0,0031	56	-0,20	55	-0,22	55	-0,24	53	-0,34	48	-0,52	45	-0,68	23	-1,34
0,0043	78	-0,27	78	-0,28	77	-0,32	73	-0,43	66	-0,64	61	-0,80	31	-1,48
0,0061	112	-0,37	112	-0,39	110	-0,42	104	-0,55	93	-0,78	85	-0,93	41	-1,63
0,0089	166	-0,51	165	-0,54	162	-0,58	152	-0,71	135	-0,94	124	-1,11	58	-1,76
0,0131	248	-0,72	247	-0,74	242	-0,78	226	-0,91	199	-1,13	182	-1,33	81	-1,88
0,0192	366	-0,97	364	-0,99	357	-1,02	332	-1,14	291	-1,36	265	-1,55	112	-1,97
0,0275	529	-1,24	525	-1,25	516	-1,28	479	-1,38	418	-1,58	380	-1,75	150	-2,01

Tabela A 6: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0007	11,0	-0,08	11,0	-0,08	11,0	-0,07	10,9	-0,06	10,7	-0,04	10,6	-0,18	7,3	-0,44
0,0013	20,5	-0,10	20,4	-0,10	20,4	-0,10	20,3	-0,09	19,9	-0,08	19,5	-0,24	12,1	-0,67
0,0023	36,6	-0,13	36,6	-0,13	36,5	-0,13	36,2	-0,14	35,2	-0,17	34,0	-0,36	19,2	-0,92
0,0040	68	-0,17	68	-0,17	68	-0,18	66	-0,23	63	-0,35	59	-0,54	31	-1,19
0,0055	95	-0,20	95	-0,21	94	-0,23	92	-0,30	85	-0,47	80	-0,65	41	-1,33
0,0077	138	-0,25	138	-0,26	136	-0,29	131	-0,39	120	-0,60	112	-0,77	55	-1,49
0,0112	204	-0,32	203	-0,34	201	-0,38	192	-0,50	173	-0,74	160	-0,92	76	-1,65
0,0162	301	-0,45	299	-0,47	296	-0,51	280	-0,65	249	-0,90	230	-1,09	106	-1,79
0,0232	436	-0,63	434	-0,65	428	-0,69	403	-0,84	355	-1,08	327	-1,29	144	-1,92
0,0326	620	-0,87	617	-0,89	607	-0,93	569	-1,06	498	-1,29	458	-1,51	193	-2,02

Tabela A 7: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0012	12,9	0,01	12,8	0,01	12,8	0,00	12,6	-0,04	12,0	-0,15	11,4	-0,33	6,1	-0,89
0,0021	25,1	-0,07	25,0	-0,08	24,8	-0,11	23,8	-0,21	21,7	-0,39	20,1	-0,55	10,1	-1,18
0,0039	48,0	-0,22	47,7	-0,24	47,0	-0,28	44,1	-0,42	39,2	-0,65	35,9	-0,80	17,1	-1,47
0,0054	67,4	-0,35	67,0	-0,37	65,9	-0,42	61,4	-0,55	54,1	-0,79	49,3	-0,95	22,8	-1,60
0,0077	98	-0,53	97	-0,55	95	-0,59	88	-0,73	77	-0,96	70	-1,14	31	-1,73
0,0113	146	-0,78	144	-0,80	142	-0,84	131	-0,96	114	-1,18	103	-1,37	44	-1,85
0,0167	216	-1,06	215	-1,08	211	-1,11	194	-1,21	169	-1,42	153	-1,60	61	-1,93
0,0244	317	-1,34	314	-1,36	308	-1,38	284	-1,47	247	-1,64	223	-1,78	81	-1,96
0,0350	455	-1,59	451	-1,61	442	-1,62	408	-1,69	354	-1,81	320	-1,90	105	-1,96
0,0492	641	-1,81	636	-1,81	623	-1,82	575	-1,86	500	-1,92	450	-1,96	130	-1,92

Tabela A 8: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0009	9,6	0,04	9,6	0,04	9,6	0,04	9,5	0,05	9,3	0,06	9,1	-0,10	5,6	-0,51
0,0017	18,7	0,04	18,7	0,04	18,6	0,04	18,5	0,02	17,9	-0,03	17,2	-0,23	9,4	-0,76
0,0031	35,5	0,02	35,4	0,01	35,3	-0,01	34,5	-0,08	32,3	-0,22	30,4	-0,41	15,3	-1,03
0,0042	49,3	-0,02	49,2	-0,03	48,9	-0,06	47,2	-0,15	43,3	-0,34	40,4	-0,52	19,7	-1,17
0,0058	70	-0,08	70	-0,10	69	-0,13	66	-0,26	59	-0,48	55	-0,65	26	-1,32
0,0084	104	-0,18	104	-0,20	102	-0,24	96	-0,39	85	-0,64	78	-0,81	35	-1,49
0,0124	158	-0,34	157	-0,37	154	-0,41	144	-0,57	125	-0,82	115	-1,02	49	-1,66
0,0184	239	-0,58	237	-0,60	233	-0,64	215	-0,79	185	-1,04	169	-1,26	69	-1,80
0,0269	354	-0,86	351	-0,88	344	-0,92	316	-1,04	270	-1,28	247	-1,50	94	-1,91
0,0386	512	-1,15	508	-1,17	497	-1,20	455	-1,31	387	-1,52	353	-1,72	126	-1,99

Tabela A 9: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0010	10,9	0,04	10,8	0,03	10,8	0,05	10,7	0,05	10,4	0,08	10,2	-0,07	6,9	-0,31
0,0020	20,8	0,05	20,8	0,05	20,7	0,05	20,5	0,06	20,0	0,07	19,6	-0,10	11,7	-0,53
0,0035	37,9	0,06	37,9	0,05	37,8	0,05	37,4	0,04	36,2	0,00	35,1	-0,20	18,8	-0,77
0,0047	51,5	0,05	51,5	0,05	51,4	0,05	50,7	0,02	48,7	-0,07	46,8	-0,27	23,9	-0,90
0,0064	72	0,05	72	0,04	72	0,03	70	-0,03	67	-0,17	63	-0,37	31	-1,05
0,0092	106	0,02	106	0,00	106	-0,02	103	-0,11	95	-0,30	90	-0,50	42	-1,23
0,0135	161	-0,05	161	-0,06	160	-0,09	154	-0,22	140	-0,47	131	-0,66	58	-1,43
0,0199	244	-0,15	244	-0,17	241	-0,21	230	-0,36	206	-0,64	191	-0,86	81	-1,61
0,0290	364	-0,32	364	-0,35	358	-0,39	339	-0,56	298	-0,85	277	-1,09	112	-1,77
0,0414	531	-0,56	529	-0,59	521	-0,65	488	-0,82	425	-1,09	394	-1,36	153	-1,91

Tabela A 10: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n=10$.

P ($J_m/b\sigma$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0005	10,5	-0,21	10,5	-0,21	10,5	-0,21	10,4	-0,23	10,0	-0,29	9,4	-0,46	4,9	-1,06
0,0007	14,3	-0,24	14,3	-0,24	14,3	-0,25	13,9	-0,29	13,1	-0,41	12,2	-0,59	6,1	-1,18
0,0009	19,4	-0,28	19,4	-0,29	19,2	-0,30	18,6	-0,37	17,1	-0,53	15,6	-0,71	7,7	-1,29
0,0012	26,4	-0,32	26,3	-0,34	26,0	-0,36	24,8	-0,46	22,3	-0,65	20,2	-0,81	9,8	-1,39
0,0017	37	-0,38	37	-0,40	36	-0,43	34	-0,55	30	-0,76	27	-0,91	13	-1,48
0,0024	54	-0,47	53	-0,49	53	-0,53	49	-0,66	43	-0,88	38	-1,02	18	-1,57
0,0036	82	-0,61	82	-0,63	80	-0,66	74	-0,79	64	-1,01	57	-1,16	25	-1,66
0,0060	141	-0,84	140	-0,86	137	-0,89	125	-1,00	107	-1,20	95	-1,36	37	-1,75
0,0116	276	-1,23	273	-1,24	267	-1,26	243	-1,34	206	-1,50	182	-1,62	55	-1,81
0,0225	538	-1,62	533	-1,63	520	-1,65	472	-1,69	400	-1,76	351	-1,81	59	-1,72

Tabela A 11: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0005	9,8	-0,23	9,7	-0,23	9,7	-0,22	9,7	-0,22	9,6	-0,20	9,4	-0,33	5,6	-0,84
0,0009	17,0	-0,29	17,0	-0,29	17,0	-0,29	16,8	-0,30	16,3	-0,33	15,7	-0,49	8,4	-1,09
0,0011	22,6	-0,32	22,6	-0,32	22,5	-0,33	22,2	-0,35	21,2	-0,42	20,0	-0,59	10,4	-1,20
0,0015	31,0	-0,35	31,0	-0,35	30,8	-0,37	30,0	-0,41	28,1	-0,53	26,1	-0,71	13,2	-1,31
0,0021	44	-0,38	44	-0,39	44	-0,41	42	-0,48	39	-0,64	35	-0,82	17	-1,41
0,0031	66	-0,42	66	-0,44	66	-0,46	63	-0,56	56	-0,76	51	-0,92	24	-1,51
0,0049	109	-0,51	108	-0,52	107	-0,56	101	-0,67	89	-0,89	80	-1,04	36	-1,62
0,0089	202	-0,71	201	-0,73	198	-0,76	186	-0,88	162	-1,09	144	-1,24	59	-1,74
0,0170	390	-1,08	388	-1,09	383	-1,12	357	-1,22	310	-1,39	275	-1,53	93	-1,82
0,0317	733	-1,51	729	-1,52	718	-1,55	670	-1,61	580	-1,72	513	-1,80	123	-1,82

Tabela A 12: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0004	8,1	-0,23	8,1	-0,24	8,2	-0,22	8,2	-0,21	8,2	-0,19	8,1	-0,30	5,8	-0,56
0,0006	10,9	-0,28	10,9	-0,29	10,9	-0,28	10,9	-0,26	10,9	-0,23	10,8	-0,35	7,4	-0,69
0,0010	18,7	-0,39	18,7	-0,39	18,8	-0,38	18,9	-0,35	18,8	-0,33	18,6	-0,45	11,2	-0,95
0,0013	24,9	-0,43	24,9	-0,43	25,0	-0,42	25,1	-0,40	24,8	-0,39	24,3	-0,52	14,0	-1,07
0,0018	35	-0,46	35	-0,46	35	-0,45	35	-0,44	34	-0,46	33	-0,60	18	-1,19
0,0026	51	-0,48	51	-0,48	51	-0,47	50	-0,49	48	-0,55	46	-0,71	24	-1,31
0,0039	80	-0,49	80	-0,49	79	-0,50	78	-0,55	73	-0,67	69	-0,83	36	-1,45
0,0068	143	-0,55	143	-0,56	142	-0,58	137	-0,67	127	-0,84	119	-0,98	60	-1,60
0,0131	280	-0,75	279	-0,77	277	-0,79	267	-0,88	245	-1,06	228	-1,20	110	-1,75
0,0252	543	-1,12	541	-1,13	536	-1,15	519	-1,23	476	-1,38	442	-1,52	196	-1,88

Tabela A 13: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0007	11,5	-0,05	11,5	-0,05	11,4	-0,06	11,3	-0,08	10,8	-0,18	10,1	-0,37	4,9	-0,94
0,0011	20,2	-0,09	20,2	-0,10	20,0	-0,13	19,2	-0,22	17,4	-0,40	15,8	-0,58	7,3	-1,12
0,0015	27	-0,13	27	-0,15	26	-0,18	25	-0,30	22	-0,51	20	-0,68	9	-1,21
0,0019	36	-0,19	36	-0,21	35	-0,25	32	-0,39	28	-0,62	25	-0,78	11	-1,31
0,0025	48	-0,26	48	-0,29	47	-0,33	43	-0,49	37	-0,73	33	-0,88	14	-1,40
0,0034	67	-0,37	66	-0,40	65	-0,44	58	-0,60	49	-0,84	44	-0,99	18	-1,49
0,0048	96	-0,54	95	-0,56	92	-0,60	83	-0,74	69	-0,97	61	-1,13	23	-1,57
0,0075	152	-0,80	151	-0,82	146	-0,85	130	-0,95	109	-1,16	95	-1,32	31	-1,64
0,0134	274	-1,19	271	-1,20	263	-1,21	235	-1,29	195	-1,44	170	-1,57	41	-1,67
0,0244	502	-1,56	497	-1,57	482	-1,58	430	-1,61	358	-1,70	311	-1,76	35	-1,49

Tabela A 14: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0007	12	-0,06	11	-0,06	11	-0,05	11	-0,05	11	-0,04	11	-0,19	6	-0,72
0,0012	19	-0,07	19	-0,07	19	-0,07	19	-0,08	19	-0,14	18	-0,33	9	-0,92
0,0015	25	-0,08	25	-0,08	25	-0,09	25	-0,12	23	-0,23	22	-0,42	10	-1,01
0,0019	33	-0,10	33	-0,10	33	-0,12	32	-0,18	30	-0,33	28	-0,52	13	-1,10
0,0025	45	-0,12	45	-0,13	45	-0,16	43	-0,25	38	-0,44	35	-0,63	16	-1,19
0,0034	63	-0,16	63	-0,18	62	-0,22	58	-0,34	51	-0,57	46	-0,74	20	-1,29
0,0048	92	-0,24	91	-0,26	90	-0,30	83	-0,45	71	-0,70	64	-0,86	26	-1,39
0,0075	149	-0,39	148	-0,41	145	-0,46	131	-0,61	110	-0,86	99	-1,03	37	-1,51
0,0134	275	-0,70	272	-0,72	265	-0,75	237	-0,88	196	-1,10	174	-1,28	55	-1,62
0,024	512	-1,11	507	-1,12	491	-1,14	436	-1,22	359	-1,40	317	-1,55	73	-1,65

Tabela A 15: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0008	12	-0,06	12	-0,07	12	-0,06	12	-0,05	12	-0,03	11	-0,16	7	-0,51
0,0012	19	-0,08	19	-0,09	19	-0,08	19	-0,07	19	-0,06	19	-0,20	11	-0,70
0,0020	32	-0,11	32	-0,11	32	-0,10	31	-0,11	31	-0,13	30	-0,30	15	-0,90
0,0025	41	-0,12	41	-0,12	41	-0,12	41	-0,13	40	-0,19	38	-0,37	18	-1,00
0,0033	56	-0,13	55	-0,13	55	-0,14	55	-0,17	52	-0,28	49	-0,47	23	-1,10
0,0045	78	-0,14	78	-0,15	78	-0,16	76	-0,23	69	-0,40	65	-0,59	29	-1,22
0,0065	120	-0,17	119	-0,18	118	-0,21	113	-0,32	101	-0,54	92	-0,73	39	-1,35
0,0110	210	-0,26	209	-0,28	206	-0,32	193	-0,46	167	-0,72	151	-0,91	59	-1,51
0,0195	387	-0,46	385	-0,48	377	-0,53	347	-0,68	293	-0,94	263	-1,13	92	-1,65
0,0347	706	-0,82	701	-0,84	685	-0,88	623	-1,00	517	-1,22	462	-1,41	137	-1,75

Tabela A 16: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0010	12	0,05	12	0,05	12	0,04	11	0,01	11	-0,10	10	-0,30	5	-0,84
0,0016	19	0,02	19	0,01	19	-0,02	18	-0,11	16	-0,29	15	-0,47	7	-0,99
0,0020	25	-0,01	24	-0,03	24	-0,06	23	-0,19	20	-0,39	18	-0,57	8	-1,07
0,0025	32	-0,05	32	-0,08	31	-0,12	29	-0,27	25	-0,50	23	-0,66	9	-1,16
0,0032	42	-0,12	42	-0,14	41	-0,19	37	-0,36	32	-0,60	28	-0,76	11	-1,24
0,0042	57	-0,21	56	-0,24	55	-0,29	49	-0,46	41	-0,71	37	-0,87	14	-1,33
0,0059	80	-0,36	80	-0,39	77	-0,43	68	-0,59	56	-0,84	50	-1,01	17	-1,42
0,0090	126	-0,61	124	-0,63	120	-0,66	105	-0,79	86	-1,02	76	-1,20	23	-1,51
0,0151	214	-0,98	211	-0,99	203	-1,01	178	-1,09	145	-1,27	127	-1,44	30	-1,56
0,0258	367	-1,35	362	-1,36	349	-1,37	306	-1,42	249	-1,54	217	-1,65	30	-1,48

Tabela A 17: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0010	10	0,06	10	0,05	10	0,06	10	0,07	10	0,09	10	-0,07	5	-0,56
0,0016	17	0,06	17	0,06	17	0,06	17	0,06	17	0,01	16	-0,18	8	-0,75
0,0021	23	0,07	23	0,06	22	0,06	22	0,03	21	-0,06	20	-0,26	9	-0,83
0,0026	30	0,06	30	0,06	30	0,04	29	-0,01	27	-0,16	26	-0,36	11	-0,92
0,0035	41	0,05	41	0,04	40	0,01	39	-0,08	35	-0,27	33	-0,46	14	-1,02
0,0047	57	0,01	57	-0,01	57	-0,04	53	-0,17	47	-0,40	43	-0,59	17	-1,12
0,0069	90	-0,06	89	-0,09	87	-0,14	81	-0,30	68	-0,57	62	-0,75	23	-1,26
0,0119	163	-0,26	161	-0,29	157	-0,34	141	-0,52	116	-0,79	104	-0,99	33	-1,42
0,0220	313	-0,66	309	-0,68	299	-0,72	263	-0,84	212	-1,08	189	-1,29	48	-1,54
0,0406	590	-1,13	582	-1,15	561	-1,17	490	-1,24	391	-1,41	346	-1,58	61	-1,56

Tabela A 18: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 10$.

\bar{P} ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0010	10	0,06	10	0,05	10	0,06	10	0,07	9	0,10	9	-0,04	6	-0,30
0,0017	17	0,06	17	0,06	17	0,07	17	0,08	17	0,10	16	-0,05	9	-0,50
0,0022	23	0,07	23	0,06	23	0,07	22	0,08	22	0,09	22	-0,08	11	-0,60
0,0028	30	0,07	30	0,07	30	0,07	29	0,08	29	0,06	28	-0,12	14	-0,70
0,0036	39	0,08	40	0,07	39	0,07	39	0,07	38	0,01	37	-0,18	17	-0,80
0,0049	54	0,08	54	0,08	54	0,07	53	0,04	51	-0,07	49	-0,27	21	-0,91
0,0071	82	0,07	82	0,07	82	0,05	80	-0,02	74	-0,19	70	-0,40	28	-1,07
0,0121	149	0,03	149	0,01	147	-0,02	142	-0,14	126	-0,40	117	-0,61	42	-1,29
0,0228	296	-0,12	295	-0,14	291	-0,19	273	-0,37	234	-0,66	213	-0,89	69	-1,49
0,0433	585	-0,49	581	-0,52	571	-0,58	525	-0,77	437	-1,03	397	-1,26	112	-1,65

Tabela A 19: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 20$.

r ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_r/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0004	8	-0,17	8	-0,17	8	-0,17	8	-0,16	7	-0,18	7	-0,33	4	-0,96
0,0005	10	-0,19	10	-0,19	10	-0,19	10	-0,21	10	-0,27	9	-0,44	4	-1,08
0,0006	13	-0,21	13	-0,22	13	-0,23	13	-0,27	12	-0,38	11	-0,56	5	-1,18
0,0008	18	-0,24	18	-0,25	17	-0,27	17	-0,33	15	-0,50	14	-0,68	6	-1,27
0,0011	23	-0,28	23	-0,29	23	-0,31	22	-0,41	19	-0,61	17	-0,79	8	-1,34
0,0014	32	-0,33	31	-0,34	31	-0,37	29	-0,49	25	-0,72	22	-0,89	10	-1,41
0,0019	45	-0,39	45	-0,41	44	-0,45	40	-0,59	34	-0,83	30	-0,98	12	-1,48
0,0029	68	-0,51	68	-0,53	66	-0,57	60	-0,71	50	-0,94	44	-1,09	17	-1,54
0,0050	123	-0,75	121	-0,76	118	-0,80	106	-0,92	87	-1,12	76	-1,26	24	-1,61
0,0140	350	-1,33	346	-1,34	335	-1,35	296	-1,41	241	-1,52	208	-1,61	24	-1,52

Tabela A 20: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_r/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0006	11	-0,24	11	-0,24	11	-0,23	11	-0,23	11	-0,22	10	-0,34	6	-0,94
0,0007	14	-0,27	14	-0,27	14	-0,26	14	-0,26	13	-0,28	13	-0,41	7	-1,04
0,0009	17	-0,29	17	-0,30	17	-0,29	17	-0,30	17	-0,35	16	-0,49	8	-1,14
0,0011	22	-0,31	22	-0,32	22	-0,32	22	-0,35	21	-0,43	20	-0,59	9	-1,24
0,0014	30	-0,34	30	-0,34	30	-0,35	29	-0,40	27	-0,53	25	-0,71	11	-1,32
0,0019	42	-0,36	42	-0,37	41	-0,39	40	-0,47	36	-0,64	32	-0,82	14	-1,40
0,0028	62	-0,40	62	-0,42	61	-0,44	58	-0,55	51	-0,76	45	-0,93	20	-1,48
0,0046	106	-0,49	106	-0,51	104	-0,54	97	-0,67	83	-0,89	73	-1,05	29	-1,56
0,0112	265	-0,81	264	-0,83	259	-0,86	238	-0,98	200	-1,16	175	-1,31	55	-1,67
0,0325	780	-1,46	776	-1,47	761	-1,49	697	-1,55	584	-1,64	507	-1,70	59	-1,60

Tabela A 21: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_r/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0004	8	-0,22	8	-0,23	8	-0,21	8	-0,20	8	-0,18	8	-0,29	5	-0,57
0,0007	12	-0,32	12	-0,32	12	-0,31	12	-0,29	12	-0,26	12	-0,36	8	-0,80
0,0009	16	-0,37	16	-0,37	16	-0,36	16	-0,34	16	-0,31	16	-0,41	9	-0,92
0,0011	20	-0,41	20	-0,41	20	-0,40	20	-0,38	20	-0,36	20	-0,46	11	-1,03
0,0014	26	-0,45	26	-0,45	26	-0,44	26	-0,42	26	-0,42	25	-0,53	13	-1,14
0,0018	35	-0,48	35	-0,48	35	-0,47	35	-0,46	34	-0,49	33	-0,62	17	-1,25
0,0026	52	-0,49	52	-0,49	52	-0,49	51	-0,51	49	-0,58	46	-0,74	22	-1,36
0,0042	88	-0,50	88	-0,50	88	-0,52	85	-0,58	78	-0,73	72	-0,88	34	-1,48
0,0097	215	-0,62	214	-0,64	211	-0,67	200	-0,78	179	-0,97	163	-1,11	75	-1,65
0,0295	660	-1,16	656	-1,17	647	-1,19	615	-1,27	549	-1,41	500	-1,53	200	-1,82

Tabela A 22: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0007	12	-0,04	12	-0,04	12	-0,04	11	-0,07	11	-0,19	10	-0,37	4	-0,96
0,0009	15	-0,04	15	-0,05	15	-0,06	14	-0,12	13	-0,28	12	-0,47	5	-1,03
0,0010	19	-0,06	19	-0,07	18	-0,09	18	-0,19	16	-0,38	14	-0,57	6	-1,09
0,0013	24	-0,08	24	-0,10	23	-0,14	22	-0,26	19	-0,48	17	-0,66	7	-1,15
0,0016	31	-0,12	30	-0,14	30	-0,19	27	-0,34	23	-0,58	21	-0,75	8	-1,22
0,0020	40	-0,18	40	-0,20	39	-0,25	35	-0,42	29	-0,67	25	-0,84	10	-1,28
0,0026	53	-0,25	52	-0,28	51	-0,33	45	-0,51	37	-0,76	32	-0,92	11	-1,34
0,0035	73	-0,37	72	-0,39	69	-0,44	60	-0,61	49	-0,86	42	-1,02	14	-1,40
0,0050	107	-0,55	106	-0,58	102	-0,61	87	-0,75	70	-0,98	60	-1,14	17	-1,45
0,0094	206	-0,96	203	-0,97	194	-0,98	166	-1,06	131	-1,23	112	-1,38	19	-1,45

Tabela A 23: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0007	11	-0,05	11	-0,05	11	-0,05	11	-0,04	11	-0,02	11	-0,16	5	-0,74
0,0011	17	-0,06	17	-0,06	17	-0,06	17	-0,06	17	-0,11	16	-0,29	7	-0,91
0,0013	22	-0,06	22	-0,07	22	-0,07	22	-0,09	21	-0,18	20	-0,37	9	-0,99
0,0016	28	-0,07	28	-0,07	28	-0,08	28	-0,13	26	-0,27	24	-0,47	10	-1,06
0,0021	38	-0,08	38	-0,09	37	-0,11	36	-0,20	32	-0,38	29	-0,58	12	-1,14
0,0028	52	-0,11	51	-0,12	51	-0,16	48	-0,28	41	-0,50	37	-0,69	14	-1,21
0,0038	75	-0,16	74	-0,18	73	-0,23	67	-0,38	56	-0,63	50	-0,81	18	-1,29
0,0060	123	-0,28	122	-0,31	119	-0,36	106	-0,53	86	-0,79	76	-0,96	24	-1,38
0,0141	307	-0,72	303	-0,74	292	-0,77	252	-0,88	200	-1,09	173	-1,26	35	-1,47
0,0404	904	-1,42	890	-1,43	850	-1,44	726	-1,47	571	-1,55	484	-1,63	8	-3,11

Tabela A 24: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0008	12	-0,05	12	-0,06	12	-0,05	12	-0,04	11	-0,02	11	-0,15	7	-0,54
0,0012	18	-0,07	18	-0,08	18	-0,07	18	-0,07	18	-0,05	18	-0,17	10	-0,72
0,0014	23	-0,09	23	-0,09	23	-0,08	22	-0,08	22	-0,07	22	-0,21	11	-0,80
0,0018	28	-0,10	28	-0,10	28	-0,09	28	-0,09	28	-0,11	27	-0,26	13	-0,89
0,0022	36	-0,11	36	-0,11	36	-0,10	36	-0,11	35	-0,16	34	-0,33	15	-0,99
0,0029	48	-0,11	48	-0,11	48	-0,12	47	-0,14	45	-0,24	42	-0,42	18	-1,08
0,0038	66	-0,12	66	-0,12	66	-0,14	65	-0,19	60	-0,34	55	-0,54	22	-1,18
0,0056	103	-0,14	103	-0,15	102	-0,17	98	-0,27	86	-0,49	78	-0,69	30	-1,31
0,0115	228	-0,24	226	-0,26	222	-0,30	205	-0,46	172	-0,73	152	-0,93	50	-1,48
0,0304	640	-0,69	634	-0,71	619	-0,75	553	-0,88	445	-1,10	388	-1,28	93	-1,61

Tabela A 25: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_r/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0007	7	0,06	7	0,06	7	0,06	7	0,06	7	0,03	7	-0,15	3	-0,71
0,0008	9	0,06	9	0,06	9	0,06	9	0,05	9	-0,03	8	-0,22	4	-0,78
0,0010	11	0,06	11	0,06	11	0,05	11	0,02	10	-0,09	10	-0,29	4	-0,83
0,0012	13	0,05	13	0,05	13	0,04	13	-0,02	12	-0,16	11	-0,36	5	-0,88
0,0014	16	0,04	16	0,04	16	0,02	16	-0,07	14	-0,24	13	-0,43	5	-0,93
0,0017	20	0,03	20	0,02	20	-0,01	19	-0,13	17	-0,33	15	-0,51	6	-0,98
0,0020	25	0,01	24	-0,01	24	-0,05	22	-0,19	19	-0,41	17	-0,59	7	-1,04
0,0024	31	-0,02	30	-0,05	30	-0,10	27	-0,26	23	-0,50	20	-0,68	7	-1,09
0,0029	39	-0,06	38	-0,10	37	-0,15	33	-0,34	28	-0,60	24	-0,76	8	-1,15
0,0036	50	-0,13	50	-0,17	48	-0,23	42	-0,42	34	-0,69	30	-0,85	10	-1,21

Tabela A 26: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_r/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0010	10	0,06	10	0,06	10	0,06	10	0,08	10	0,09	10	-0,07	5	-0,59
0,0015	16	0,07	16	0,06	16	0,07	15	0,07	15	0,03	15	-0,15	7	-0,74
0,0018	19	0,07	19	0,07	19	0,07	19	0,05	19	-0,03	18	-0,22	8	-0,81
0,0022	25	0,07	25	0,07	25	0,06	24	0,02	23	-0,10	22	-0,30	9	-0,88
0,0028	32	0,06	32	0,06	32	0,04	31	-0,02	28	-0,19	26	-0,39	10	-0,95
0,0035	42	0,05	42	0,04	42	0,01	40	-0,09	36	-0,30	33	-0,49	12	-1,02
0,0047	60	0,03	59	0,01	59	-0,03	55	-0,18	47	-0,43	42	-0,62	15	-1,10
0,0075	102	-0,06	101	-0,09	98	-0,15	88	-0,34	72	-0,62	64	-0,81	19	-1,22
0,0171	252	-0,46	249	-0,49	240	-0,53	206	-0,68	160	-0,94	140	-1,14	26	-1,34
0,0458	706	-1,20	695	-1,21	663	-1,22	558	-1,27	428	-1,41	364	-1,54	9	-0,85

Tabela A 27: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(B) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_r/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0010	10	0,06	10	0,05	10	0,06	10	0,08	10	0,10	9	-0,04	6	-0,34
0,0015	16	0,06	16	0,06	15	0,07	15	0,08	15	0,11	15	-0,04	8	-0,50
0,0019	19	0,07	19	0,06	19	0,07	19	0,08	19	0,10	19	-0,05	10	-0,58
0,0023	24	0,07	24	0,07	24	0,07	24	0,08	23	0,09	23	-0,08	11	-0,66
0,0029	30	0,07	30	0,07	30	0,08	30	0,08	29	0,06	29	-0,12	13	-0,74
0,0036	39	0,08	39	0,08	38	0,08	38	0,07	37	0,01	36	-0,17	15	-0,82
0,0046	51	0,08	51	0,08	51	0,08	50	0,05	48	-0,05	46	-0,25	18	-0,91
0,0065	75	0,08	75	0,08	75	0,06	73	0,00	68	-0,17	64	-0,38	23	-1,05
0,0124	156	0,04	156	0,02	154	-0,01	147	-0,13	129	-0,40	117	-0,63	36	-1,28
0,0320	433	-0,25	431	-0,28	425	-0,34	393	-0,53	323	-0,81	287	-1,03	71	-1,50

Tabela A 28: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0001	1	-0,06	1	-0,06	1	-0,05	1	-0,05	1	-0,04	1	-0,12	1	-0,26
0,0004	8	-0,26	8	-0,27	8	-0,26	8	-0,27	8	-0,28	7	-0,44	6	-1,19
0,0006	12	-0,33	12	-0,33	12	-0,33	12	-0,35	11	-0,41	11	-0,58	8	-1,38
0,0009	18	-0,40	18	-0,41	18	-0,42	17	-0,46	16	-0,57	15	-0,73	12	-1,57
0,0016	32	-0,49	32	-0,50	32	-0,53	31	-0,61	29	-0,78	27	-0,91	20	-1,81
0,0034	72	-0,65	72	-0,67	71	-0,70	68	-0,81	61	-1,01	57	-1,15	42	-2,06
0,0063	139	-0,90	138	-0,92	136	-0,95	129	-1,07	116	-1,28	106	-1,45	80	-2,20
0,0108	239	-1,22	238	-1,24	235	-1,26	221	-1,37	198	-1,57	181	-1,72	137	-2,23
0,0177	392	-1,54	390	-1,55	384	-1,58	361	-1,66	323	-1,81	293	-1,91	227	-2,17
0,0276	616	-1,81	613	-1,82	604	-1,83	567	-1,88	506	-1,94	459	-1,97	364	-2,07

Tabela A 29: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 5$.

\dot{P} ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0001	3	-0,08	3	-0,08	3	-0,07	3	-0,07	3	-0,05	3	-0,17	3	-0,41
0,0003	7	-0,24	7	-0,25	7	-0,24	7	-0,23	7	-0,21	6	-0,35	6	-0,85
0,0007	13	-0,36	13	-0,36	13	-0,36	13	-0,36	13	-0,37	13	-0,52	10	-1,20
0,0010	21	-0,42	21	-0,43	20	-0,43	20	-0,44	20	-0,48	19	-0,65	15	-1,40
0,0020	40	-0,48	40	-0,49	40	-0,50	39	-0,55	37	-0,66	35	-0,82	27	-1,66
0,0039	82	-0,54	82	-0,55	81	-0,58	79	-0,66	73	-0,85	68	-0,98	51	-1,91
0,0068	145	-0,67	144	-0,68	143	-0,71	138	-0,82	127	-1,02	117	-1,16	88	-2,10
0,0112	239	-0,88	238	-0,90	236	-0,93	227	-1,04	207	-1,24	191	-1,41	145	-2,21
0,0175	377	-1,17	376	-1,19	373	-1,22	357	-1,32	326	-1,51	298	-1,67	230	-2,27
0,0265	575	-1,48	573	-1,50	568	-1,52	544	-1,61	495	-1,78	452	-1,90	357	-2,26

Tabela A 30: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	-0,15	4	-0,15	4	-0,14	4	-0,13	4	-0,11	4	-0,21	3	-0,37
0,0005	9	-0,31	9	-0,32	9	-0,30	9	-0,29	9	-0,27	9	-0,39	8	-0,76
0,0007	13	-0,39	13	-0,39	13	-0,38	13	-0,37	13	-0,34	12	-0,47	11	-0,95
0,0011	20	-0,48	20	-0,48	20	-0,47	20	-0,45	20	-0,44	20	-0,57	17	-1,17
0,0023	45	-0,53	45	-0,53	45	-0,53	45	-0,54	43	-0,57	42	-0,72	33	-1,47
0,0046	92	-0,58	92	-0,58	91	-0,59	90	-0,62	87	-0,72	83	-0,86	65	-1,74
0,0083	166	-0,66	166	-0,67	165	-0,69	162	-0,76	155	-0,90	148	-1,02	116	-1,95
0,0139	283	-0,86	282	-0,87	281	-0,88	276	-0,96	263	-1,12	251	-1,24	198	-2,12
0,0226	458	-1,15	457	-1,15	456	-1,17	449	-1,24	428	-1,40	409	-1,54	326	-2,23
0,0352	716	-1,44	715	-1,44	713	-1,46	702	-1,54	670	-1,69	640	-1,84	518	-2,28

Tabela A 31: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00023	4	-0,06	4	-0,06	4	-0,05	4	-0,04	4	-0,02	3	-0,16	3	-0,72
0,00066	11	-0,16	11	-0,17	11	-0,17	11	-0,19	10	-0,25	10	-0,43	8	-1,26
0,00149	26	-0,29	26	-0,30	26	-0,32	25	-0,41	23	-0,57	21	-0,72	16	-1,65
0,00220	39	-0,38	39	-0,39	39	-0,42	37	-0,53	34	-0,73	31	-0,86	23	-1,82
0,00336	61	-0,51	61	-0,53	60	-0,56	57	-0,68	51	-0,89	47	-1,03	35	-1,98
0,00537	99	-0,71	98	-0,73	97	-0,77	91	-0,88	82	-1,09	75	-1,25	56	-2,12
0,00877	163	-0,98	162	-1,00	160	-1,03	150	-1,13	134	-1,34	122	-1,52	93	-2,20
0,01425	266	-1,27	264	-1,29	260	-1,31	244	-1,41	218	-1,60	198	-1,75	155	-2,20
0,02291	428	-1,56	426	-1,57	419	-1,60	393	-1,67	351	-1,81	318	-1,89	256	-2,13
0,03577	670	-1,79	667	-1,80	656	-1,81	615	-1,84	548	-1,89	495	-1,92	413	-2,01

Tabela A 32: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	3	-0,05	3	-0,05	3	-0,04	3	-0,03	3	-0,01	3	-0,13	3	-0,41
0,0006	9	-0,15	9	-0,16	9	-0,15	9	-0,14	9	-0,12	9	-0,27	7	-0,90
0,0013	21	-0,22	21	-0,22	21	-0,23	21	-0,24	20	-0,29	19	-0,47	15	-1,28
0,0026	46	-0,33	46	-0,33	45	-0,35	44	-0,42	41	-0,57	38	-0,73	29	-1,63
0,0040	72	-0,40	71	-0,42	71	-0,44	68	-0,54	62	-0,73	58	-0,87	43	-1,81
0,0064	116	-0,52	115	-0,54	114	-0,57	108	-0,69	98	-0,89	91	-1,03	68	-1,99
0,0102	187	-0,69	186	-0,70	184	-0,74	174	-0,86	156	-1,07	144	-1,24	109	-2,13
0,0161	300	-0,91	298	-0,93	294	-0,96	276	-1,08	247	-1,29	227	-1,48	175	-2,21
0,0252	472	-1,19	469	-1,20	462	-1,24	433	-1,34	385	-1,54	354	-1,71	278	-2,24
0,0382	719	-1,46	715	-1,48	704	-1,51	659	-1,60	584	-1,76	535	-1,88	433	-2,20

Tabela A 33: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	-0,07	4	-0,08	4	-0,07	4	-0,06	4	-0,05	4	-0,14	3	-0,30
0,0007	11	-0,16	11	-0,17	11	-0,16	11	-0,15	11	-0,13	11	-0,26	9	-0,71
0,0015	24	-0,24	24	-0,24	24	-0,24	23	-0,23	23	-0,23	23	-0,39	18	-1,08
0,0022	35	-0,28	35	-0,28	35	-0,28	35	-0,29	34	-0,32	33	-0,49	25	-1,26
0,0033	55	-0,33	54	-0,34	54	-0,34	53	-0,37	51	-0,45	49	-0,63	37	-1,46
0,0052	90	-0,38	89	-0,39	89	-0,41	87	-0,47	81	-0,61	76	-0,78	57	-1,67
0,0085	150	-0,45	150	-0,46	149	-0,48	143	-0,58	132	-0,77	124	-0,92	92	-1,87
0,0139	250	-0,55	250	-0,57	247	-0,60	237	-0,71	215	-0,93	201	-1,08	149	-2,05
0,0226	412	-0,73	410	-0,75	406	-0,78	386	-0,90	348	-1,12	324	-1,31	243	-2,19
0,0354	650	-1,00	648	-1,01	641	-1,05	608	-1,16	544	-1,37	507	-1,57	385	-2,27

Tabela A 34: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 5$.

\bar{P} ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00042	4	0,00	4	-0,01	4	0,00	4	0,01	4	0,03	4	-0,12	4	-0,76
0,00124	14	-0,06	14	-0,07	14	-0,08	14	-0,12	13	-0,23	12	-0,41	9	-1,30
0,00282	34	-0,20	34	-0,22	33	-0,25	32	-0,36	29	-0,56	26	-0,71	19	-1,70
0,00409	50	-0,31	50	-0,33	49	-0,37	46	-0,49	41	-0,71	38	-0,86	28	-1,86
0,00589	73	-0,45	73	-0,47	72	-0,51	67	-0,64	60	-0,87	54	-1,03	40	-2,00
0,00865	109	-0,65	108	-0,67	106	-0,71	99	-0,83	87	-1,05	80	-1,24	60	-2,12
0,01316	167	-0,92	166	-0,93	163	-0,97	152	-1,08	133	-1,29	121	-1,48	93	-2,19
0,02055	262	-1,22	260	-1,23	256	-1,26	238	-1,36	209	-1,55	190	-1,71	150	-2,20
0,03212	410	-1,51	408	-1,53	400	-1,55	372	-1,62	327	-1,76	297	-1,86	243	-2,15
0,04955	634	-1,76	630	-1,77	619	-1,78	575	-1,81	505	-1,88	457	-1,92	391	-2,06

Tabela A 35: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	2	0,09	2	0,09	2	0,10	2	0,11	2	0,13	2	0,03	2	-0,16
0,0009	10	-0,03	10	-0,04	10	-0,03	10	-0,02	9	-0,01	9	-0,17	8	-0,83
0,0023	25	-0,06	25	-0,07	25	-0,07	25	-0,11	24	-0,19	22	-0,39	17	-1,27
0,0034	39	-0,10	39	-0,11	38	-0,13	37	-0,20	35	-0,34	33	-0,52	24	-1,46
0,0050	59	-0,16	59	-0,17	58	-0,20	56	-0,31	51	-0,50	47	-0,66	34	-1,65
0,0074	90	-0,25	90	-0,27	88	-0,31	84	-0,44	75	-0,66	69	-0,82	50	-1,84
0,0113	142	-0,41	141	-0,43	139	-0,47	130	-0,61	115	-0,84	106	-1,02	77	-2,01
0,0181	231	-0,65	229	-0,67	225	-0,71	209	-0,84	182	-1,07	168	-1,27	124	-2,16
0,0292	377	-0,96	374	-0,98	367	-1,01	339	-1,12	294	-1,34	270	-1,55	204	-2,24
0,0463	604	-1,30	599	-1,31	587	-1,34	541	-1,43	466	-1,61	429	-1,78	334	-2,26

Tabela A 36: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	2	0,09	2	0,09	2	0,09	2	0,10	2	0,12	2	0,06	2	-0,03
0,0009	9	-0,03	9	-0,04	9	-0,03	9	-0,02	9	0,00	9	-0,13	8	-0,54
0,0022	23	-0,05	23	-0,05	23	-0,05	22	-0,04	22	-0,04	22	-0,21	17	-0,92
0,0044	48	-0,07	48	-0,08	48	-0,08	47	-0,10	46	-0,18	44	-0,38	33	-1,27
0,0062	70	-0,09	70	-0,10	70	-0,11	68	-0,16	64	-0,30	61	-0,49	44	-1,45
0,0089	104	-0,13	104	-0,14	103	-0,16	100	-0,25	92	-0,44	87	-0,63	62	-1,63
0,0133	161	-0,19	161	-0,21	159	-0,24	152	-0,37	137	-0,60	128	-0,78	91	-1,83
0,0205	255	-0,31	254	-0,33	250	-0,37	236	-0,52	209	-0,78	194	-0,97	138	-2,01
0,0317	404	-0,50	402	-0,53	395	-0,57	368	-0,73	321	-0,98	297	-1,20	211	-2,18
0,0483	628	-0,77	624	-0,80	612	-0,84	565	-0,98	486	-1,22	451	-1,46	323	-2,30

Tabela A 37: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_z/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00016	3	-0,09	3	-0,10	3	-0,08	3	-0,07	3	-0,04	3	-0,17	2	-0,65
0,00023	4	-0,17	4	-0,17	4	-0,17	4	-0,15	4	-0,13	4	-0,25	3	-0,87
0,00044	9	-0,26	9	-0,26	9	-0,26	9	-0,27	8	-0,30	8	-0,45	6	-1,21
0,00059	12	-0,31	12	-0,31	12	-0,31	12	-0,34	11	-0,42	10	-0,59	8	-1,34
0,00082	17	-0,36	17	-0,37	17	-0,38	16	-0,43	15	-0,56	14	-0,74	10	-1,47
0,00131	28	-0,45	28	-0,46	28	-0,48	26	-0,57	24	-0,75	22	-0,91	15	-1,63
0,00296	67	-0,62	66	-0,64	65	-0,67	61	-0,79	53	-1,00	48	-1,14	34	-1,84
0,00829	193	-1,05	191	-1,07	187	-1,09	172	-1,19	148	-1,37	132	-1,51	99	-2,01
0,01988	468	-1,57	464	-1,58	454	-1,59	415	-1,65	356	-1,74	314	-1,80	259	-1,99
0,04331	1024	-1,84	1016	-1,84	993	-1,84	907	-1,84	775	-1,84	683	-1,84	641	-1,83

Tabela A 38: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_z/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	3	-0,09	3	-0,10	3	-0,09	3	-0,08	3	-0,05	3	-0,18	3	-0,43
0,0003	6	-0,23	6	-0,23	6	-0,22	6	-0,22	6	-0,19	6	-0,31	5	-0,79
0,0004	8	-0,28	8	-0,28	8	-0,27	8	-0,27	8	-0,25	8	-0,36	6	-0,95
0,0006	11	-0,33	11	-0,33	11	-0,33	11	-0,32	11	-0,32	10	-0,44	8	-1,10
0,0008	15	-0,38	15	-0,39	15	-0,38	15	-0,39	14	-0,41	14	-0,55	10	-1,26
0,0012	24	-0,45	24	-0,45	23	-0,45	23	-0,48	22	-0,55	21	-0,71	15	-1,43
0,0026	54	-0,52	54	-0,52	54	-0,54	52	-0,62	47	-0,78	44	-0,94	31	-1,66
0,0072	160	-0,69	160	-0,70	158	-0,73	149	-0,85	132	-1,05	119	-1,20	86	-1,91
0,0173	391	-1,11	390	-1,13	385	-1,16	362	-1,25	317	-1,42	283	-1,56	219	-2,05
0,0376	857	-1,62	853	-1,63	842	-1,65	791	-1,71	692	-1,81	615	-1,86	526	-2,02

Tabela A 39: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_z/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00005	1	-0,19	1	-0,19	1	-0,19	1	-0,18	1	-0,18	1	-0,21	1	-0,26
0,0001	2	0,01	2	0,01	2	0,02	2	0,03	2	0,04	2	-0,04	2	-0,12
0,0002	4	-0,15	4	-0,16	4	-0,15	4	-0,14	4	-0,12	4	-0,22	3	-0,37
0,0003	6	-0,24	6	-0,25	6	-0,24	6	-0,22	6	-0,20	6	-0,32	5	-0,58
0,0005	9	-0,33	9	-0,33	9	-0,32	9	-0,30	9	-0,28	9	-0,39	8	-0,77
0,0007	13	-0,42	13	-0,43	13	-0,42	13	-0,40	13	-0,37	13	-0,48	11	-0,98
0,0013	24	-0,54	24	-0,54	24	-0,53	24	-0,51	24	-0,51	23	-0,63	18	-1,26
0,0046	95	-0,60	94	-0,60	94	-0,61	92	-0,65	86	-0,77	81	-0,91	59	-1,64
0,0159	339	-0,87	338	-0,88	335	-0,90	323	-0,99	298	-1,15	278	-1,29	210	-1,95
0,0454	975	-1,49	972	-1,50	963	-1,52	929	-1,59	858	-1,72	803	-1,82	654	-2,09

Tabela A 40: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00007	1	-0,05	1	-0,06	1	-0,04	1	-0,03	1	-0,02	1	-0,13	1	-0,27
0,00067	11	-0,13	11	-0,14	11	-0,14	11	-0,17	11	-0,25	10	-0,43	7	-1,21
0,00097	17	-0,17	17	-0,18	17	-0,20	16	-0,26	15	-0,41	14	-0,59	10	-1,36
0,00139	25	-0,23	25	-0,24	25	-0,27	24	-0,38	21	-0,57	19	-0,73	13	-1,49
0,00201	38	-0,31	38	-0,33	37	-0,36	34	-0,50	30	-0,72	27	-0,87	19	-1,62
0,00308	60	-0,44	59	-0,46	58	-0,50	53	-0,64	45	-0,87	40	-1,02	29	-1,75
0,00523	103	-0,67	102	-0,69	100	-0,72	91	-0,85	77	-1,06	68	-1,21	50	-1,89
0,00990	197	-1,03	195	-1,04	191	-1,07	173	-1,16	147	-1,34	130	-1,48	101	-1,99
0,01987	397	-1,44	394	-1,45	384	-1,47	348	-1,53	295	-1,64	260	-1,72	221	-1,98
0,04229	847	-1,77	840	-1,77	819	-1,77	743	-1,78	631	-1,80	550	-1,81	540	-1,85

Tabela A 41: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0003	4	-0,08	4	-0,08	4	-0,07	4	-0,06	4	-0,03	4	-0,16	4	-0,53
0,0007	10	-0,15	10	-0,15	10	-0,14	10	-0,13	10	-0,12	10	-0,25	8	-0,93
0,0009	15	-0,17	15	-0,17	15	-0,17	15	-0,17	15	-0,19	14	-0,35	10	-1,09
0,0013	21	-0,20	21	-0,20	21	-0,20	21	-0,22	20	-0,29	19	-0,47	14	-1,24
0,0018	32	-0,24	32	-0,24	31	-0,25	31	-0,30	28	-0,44	26	-0,62	18	-1,38
0,0027	49	-0,29	49	-0,30	49	-0,32	46	-0,42	42	-0,60	38	-0,77	27	-1,53
0,0045	84	-0,38	84	-0,40	83	-0,44	77	-0,56	67	-0,78	61	-0,94	43	-1,69
0,0083	162	-0,57	161	-0,59	157	-0,63	144	-0,76	124	-0,98	111	-1,14	81	-1,86
0,0164	326	-0,90	323	-0,92	316	-0,95	287	-1,05	243	-1,25	218	-1,41	169	-1,99
0,0341	687	-1,35	682	-1,36	664	-1,38	602	-1,45	508	-1,59	452	-1,69	386	-2,01

Tabela A 42: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0001	1	0,05	1	0,05	1	0,05	1	0,06	1	0,06	1	0,01	1	-0,05
0,0004	5	-0,10	5	-0,10	5	-0,09	5	-0,08	5	-0,06	5	-0,18	5	-0,41
0,0006	9	-0,13	9	-0,14	9	-0,13	9	-0,12	9	-0,10	8	-0,22	7	-0,59
0,0012	18	-0,21	18	-0,21	18	-0,20	18	-0,20	18	-0,18	18	-0,31	14	-0,95
0,0017	27	-0,24	27	-0,25	27	-0,24	27	-0,24	26	-0,25	25	-0,40	19	-1,12
0,0025	41	-0,29	41	-0,29	41	-0,29	41	-0,31	39	-0,37	37	-0,54	27	-1,30
0,0041	72	-0,33	72	-0,34	71	-0,35	69	-0,41	64	-0,55	60	-0,73	42	-1,49
0,0079	145	-0,40	144	-0,42	143	-0,44	136	-0,55	120	-0,76	110	-0,93	77	-1,69
0,0164	315	-0,57	313	-0,59	308	-0,63	287	-0,76	248	-0,98	226	-1,15	162	-1,89
0,0371	730	-0,98	725	-1,00	712	-1,03	657	-1,13	559	-1,32	508	-1,49	388	-2,04

Tabela A 43: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00048	5	0,01	5	0,01	5	0,01	5	0,03	5	0,05	5	-0,11	4	-0,79
0,00077	8	-0,01	8	-0,01	8	0,00	8	-0,01	8	-0,05	8	-0,24	6	-1,01
0,00167	20	-0,05	20	-0,06	20	-0,09	19	-0,18	17	-0,36	16	-0,54	11	-1,33
0,00238	30	-0,11	29	-0,13	29	-0,17	27	-0,31	24	-0,52	21	-0,69	15	-1,47
0,00338	44	-0,20	43	-0,23	43	-0,27	39	-0,43	33	-0,67	30	-0,82	21	-1,61
0,00483	64	-0,33	64	-0,36	62	-0,40	56	-0,56	47	-0,80	42	-0,96	30	-1,73
0,00720	98	-0,52	97	-0,55	94	-0,59	84	-0,73	70	-0,95	62	-1,12	46	-1,84
0,01222	169	-0,85	167	-0,87	162	-0,89	143	-0,99	118	-1,19	105	-1,36	81	-1,95
0,02462	343	-1,32	339	-1,33	328	-1,34	290	-1,39	239	-1,53	210	-1,64	180	-1,99
0,05301	742	-1,73	733	-1,73	709	-1,73	628	-1,74	518	-1,77	448	-1,80	446	-1,91

Tabela A 44: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 10$.

\bar{P} ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0001	1	0,03	1	0,03	1	0,04	1	0,04	1	0,04	1	-0,04	1	-0,13
0,0008	8	-0,01	8	-0,01	8	0,00	8	0,01	8	0,03	8	-0,11	6	-0,71
0,0011	12	-0,02	12	-0,02	12	-0,01	12	-0,01	11	0,00	11	-0,16	9	-0,88
0,0022	24	-0,03	24	-0,03	24	-0,04	24	-0,07	23	-0,17	21	-0,37	15	-1,17
0,0030	35	-0,04	35	-0,05	34	-0,07	33	-0,14	31	-0,30	29	-0,50	20	-1,30
0,0042	51	-0,08	50	-0,09	50	-0,12	47	-0,24	42	-0,45	38	-0,63	26	-1,44
0,0059	75	-0,14	75	-0,16	73	-0,20	68	-0,35	59	-0,59	53	-0,77	37	-1,57
0,0091	121	-0,26	120	-0,29	117	-0,34	106	-0,50	89	-0,76	80	-0,93	57	-1,72
0,0162	224	-0,54	222	-0,56	215	-0,60	191	-0,74	157	-0,98	141	-1,17	103	-1,89
0,0328	466	-1,02	460	-1,03	444	-1,05	390	-1,13	316	-1,32	283	-1,50	223	-2,02

Tabela A 45: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0003	3	0,03	3	0,02	3	0,04	3	0,05	3	0,07	3	-0,03	3	-0,16
0,0009	10	-0,02	10	-0,02	10	-0,01	10	0,00	9	0,02	9	-0,11	8	-0,52
0,0020	21	-0,03	21	-0,04	20	-0,03	20	-0,02	20	0,00	20	-0,16	15	-0,85
0,0027	29	-0,04	29	-0,04	29	-0,04	29	-0,03	28	-0,04	27	-0,22	20	-0,99
0,0037	40	-0,04	40	-0,04	40	-0,04	40	-0,05	39	-0,12	37	-0,31	26	-1,13
0,0051	58	-0,05	58	-0,05	58	-0,06	57	-0,10	53	-0,22	51	-0,43	35	-1,27
0,0074	87	-0,06	87	-0,07	86	-0,09	83	-0,17	76	-0,37	71	-0,57	48	-1,42
0,0117	146	-0,10	146	-0,12	144	-0,16	135	-0,30	119	-0,55	109	-0,74	73	-1,60
0,0215	286	-0,24	285	-0,27	278	-0,32	255	-0,50	214	-0,77	195	-0,98	132	-1,81
0,0434	607	-0,62	601	-0,64	584	-0,68	521	-0,83	424	-1,08	384	-1,30	271	-2,03

Tabela A 46: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00008	2	-0,01	2	-0,02	2	0,00	2	0,02	2	0,04	2	-0,12	1	-0,33
0,000190	4	-0,14	4	-0,14	4	-0,13	4	-0,12	4	-0,09	4	-0,20	3	-0,79
0,000274	5	-0,19	5	-0,20	5	-0,19	5	-0,18	5	-0,16	5	-0,28	4	-0,97
0,00037	7	-0,23	7	-0,23	7	-0,23	7	-0,22	7	-0,24	7	-0,38	5	-1,12
0,00049	10	-0,27	10	-0,27	10	-0,27	10	-0,28	9	-0,34	9	-0,50	6	-1,25
0,00065	13	-0,31	13	-0,31	13	-0,32	13	-0,36	12	-0,47	11	-0,65	8	-1,37
0,00092	20	-0,37	20	-0,38	19	-0,39	19	-0,46	17	-0,63	15	-0,81	10	-1,49
0,00170	38	-0,48	38	-0,50	37	-0,53	35	-0,64	30	-0,86	27	-1,02	18	-1,64
0,00627	150	-0,91	149	-0,93	145	-0,96	132	-1,06	110	-1,24	97	-1,38	71	-1,88
0,032	789	-1,74	782	-1,74	761	-1,75	683	-1,76	568	-1,78	493	-1,79	474	-1,82

Tabela A 47: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0001	2	-0,04	2	-0,04	2	-0,03	2	-0,02	2	0,01	2	-0,13	2	-0,29
0,0002	3	-0,12	3	-0,13	3	-0,11	3	-0,10	3	-0,08	3	-0,21	3	-0,50
0,0002	5	-0,18	5	-0,19	5	-0,18	5	-0,17	5	-0,15	4	-0,26	4	-0,66
0,0003	6	-0,23	6	-0,23	6	-0,23	6	-0,22	6	-0,20	6	-0,30	5	-0,81
0,0004	8	-0,28	8	-0,28	8	-0,27	8	-0,27	8	-0,25	8	-0,35	6	-0,96
0,0005	10	-0,33	10	-0,33	10	-0,32	10	-0,32	10	-0,31	10	-0,42	8	-1,10
0,0007	14	-0,38	14	-0,38	14	-0,37	14	-0,38	14	-0,40	13	-0,52	10	-1,24
0,0010	21	-0,43	21	-0,44	21	-0,44	21	-0,46	20	-0,53	19	-0,68	13	-1,39
0,0022	48	-0,51	47	-0,52	47	-0,54	45	-0,61	41	-0,77	37	-0,94	25	-1,59
0,0099	230	-0,83	229	-0,84	225	-0,87	210	-0,98	179	-1,17	159	-1,31	114	-1,87

Tabela A 48: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00005	1	-0,28	1	-0,28	1	-0,27	1	-0,27	1	-0,26	1	-0,29	1	-0,33
0,0001	2	-0,01	2	-0,02	2	-0,01	2	0,00	2	0,02	2	-0,07	2	-0,14
0,0002	4	-0,15	4	-0,16	4	-0,15	4	-0,13	4	-0,11	4	-0,23	3	-0,38
0,0003	6	-0,24	6	-0,25	6	-0,23	6	-0,22	6	-0,20	6	-0,32	5	-0,59
0,0005	9	-0,33	9	-0,34	9	-0,32	9	-0,31	9	-0,29	9	-0,39	8	-0,79
0,0007	13	-0,45	13	-0,45	13	-0,44	13	-0,42	13	-0,39	13	-0,49	11	-1,01
0,0015	29	-0,57	29	-0,57	29	-0,56	29	-0,56	28	-0,58	27	-0,68	20	-1,33
0,0133	291	-0,79	290	-0,80	287	-0,83	273	-0,92	247	-1,09	226	-1,22	160	-1,81

Tabela A 49: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00023	4	-0,04	4	-0,05	4	-0,04	4	-0,03	4	0,01	4	-0,12	3	-0,70
0,00036	6	-0,09	6	-0,09	6	-0,08	6	-0,07	6	-0,06	6	-0,20	4	-0,93
0,00054	9	-0,11	9	-0,11	9	-0,11	9	-0,11	9	-0,16	8	-0,34	6	-1,10
0,00076	13	-0,13	13	-0,13	13	-0,14	13	-0,18	12	-0,31	11	-0,50	7	-1,24
0,00107	19	-0,16	19	-0,17	19	-0,20	18	-0,29	16	-0,47	15	-0,66	10	-1,35
0,00151	29	-0,22	28	-0,23	28	-0,27	26	-0,40	22	-0,63	20	-0,80	13	-1,46
0,00220	43	-0,30	43	-0,33	42	-0,37	38	-0,52	32	-0,77	28	-0,93	19	-1,57
0,00352	72	-0,46	71	-0,49	69	-0,53	61	-0,68	50	-0,92	44	-1,07	30	-1,69
0,00686	144	-0,80	143	-0,81	138	-0,84	121	-0,95	98	-1,15	85	-1,29	63	-1,83
0,01766	374	-1,37	370	-1,37	357	-1,38	312	-1,42	252	-1,52	217	-1,61	190	-1,89

Tabela A 50: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	-0,05	4	-0,06	4	-0,04	4	-0,03	3	0,00	3	-0,14	3	-0,43
0,0004	6	-0,09	6	-0,10	6	-0,09	6	-0,08	6	-0,05	5	-0,17	5	-0,64
0,0005	8	-0,12	8	-0,13	8	-0,12	8	-0,11	8	-0,08	8	-0,20	6	-0,83
0,0007	12	-0,15	12	-0,15	12	-0,14	12	-0,13	12	-0,13	11	-0,26	8	-0,98
0,0010	16	-0,17	16	-0,17	16	-0,17	16	-0,17	16	-0,21	15	-0,37	11	-1,12
0,0014	23	-0,19	23	-0,19	23	-0,20	23	-0,23	22	-0,33	20	-0,51	14	-1,25
0,0019	34	-0,22	34	-0,23	34	-0,25	33	-0,31	30	-0,48	27	-0,66	18	-1,37
0,0030	56	-0,28	55	-0,29	55	-0,32	51	-0,43	44	-0,65	40	-0,83	26	-1,50
0,0053	106	-0,39	106	-0,42	103	-0,46	94	-0,61	78	-0,85	69	-1,00	47	-1,64
0,0125	260	-0,73	257	-0,75	249	-0,79	221	-0,90	180	-1,11	158	-1,27	118	-1,82

Tabela A 51: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	2	0,03	2	0,02	2	0,03	2	0,04	2	0,06	2	-0,03	2	-0,11
0,0004	7	-0,11	7	-0,12	7	-0,10	7	-0,09	7	-0,07	7	-0,20	6	-0,49
0,0006	10	-0,14	10	-0,15	10	-0,14	10	-0,13	10	-0,11	10	-0,23	8	-0,66
0,0009	14	-0,18	14	-0,18	14	-0,17	14	-0,17	14	-0,14	14	-0,25	11	-0,82
0,0012	19	-0,21	19	-0,21	19	-0,21	19	-0,20	19	-0,19	19	-0,31	15	-0,98
0,0017	28	-0,25	28	-0,25	28	-0,24	28	-0,24	27	-0,26	26	-0,40	19	-1,14
0,0025	43	-0,28	43	-0,28	43	-0,29	42	-0,31	40	-0,39	38	-0,55	26	-1,30
0,0044	79	-0,32	79	-0,33	78	-0,35	75	-0,42	68	-0,59	62	-0,77	41	-1,47
0,0099	192	-0,42	191	-0,43	188	-0,47	175	-0,60	149	-0,84	133	-1,00	89	-1,66
0,0304	623	-0,83	618	-0,85	603	-0,89	544	-1,00	447	-1,19	396	-1,35	294	-1,89

Tabela A 52: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,00027	3	0,07	3	0,06	3	0,07	3	0,09	3	0,13	3	-0,02	2	-0,49
0,00048	5	0,02	5	0,01	5	0,02	5	0,03	5	0,05	5	-0,10	4	-0,79
0,00078	8	0,00	8	0,00	8	0,00	8	0,00	8	-0,05	8	-0,23	5	-1,00
0,00117	13	0,00	13	-0,01	13	-0,02	13	-0,07	12	-0,21	11	-0,40	7	-1,15
0,00171	21	-0,04	21	-0,05	21	-0,08	19	-0,19	17	-0,40	15	-0,58	10	-1,29
0,00250	33	-0,10	32	-0,12	32	-0,17	29	-0,33	24	-0,57	21	-0,74	15	-1,42
0,00369	51	-0,21	50	-0,24	49	-0,29	43	-0,47	35	-0,73	31	-0,89	21	-1,55
0,00567	81	-0,39	80	-0,42	77	-0,47	66	-0,63	53	-0,88	46	-1,04	33	-1,67
0,01097	163	-0,79	160	-0,80	153	-0,82	129	-0,92	101	-1,12	88	-1,28	69	-1,81
0,04354	658	-1,64	645	-1,64	613	-1,63	516	-1,63	404	-1,66	337	-1,69	356	-1,87

Tabela A 53: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	2	0,10	2	0,09	2	0,11	2	0,12	2	0,15	2	0,01	2	-0,12
0,0008	9	-0,01	9	-0,01	9	0,00	9	0,01	9	0,04	8	-0,11	7	-0,75
0,0012	12	-0,01	12	-0,02	12	-0,01	12	0,00	12	0,00	12	-0,16	9	-0,90
0,0016	17	-0,02	17	-0,02	17	-0,01	17	-0,02	17	-0,07	16	-0,25	11	-1,03
0,0021	24	-0,02	24	-0,02	24	-0,02	23	-0,06	22	-0,17	21	-0,37	14	-1,14
0,0029	34	-0,02	34	-0,03	33	-0,05	32	-0,13	29	-0,30	27	-0,50	18	-1,25
0,0039	49	-0,05	48	-0,06	48	-0,10	45	-0,22	39	-0,44	36	-0,63	23	-1,36
0,0056	73	-0,10	73	-0,12	71	-0,17	65	-0,34	54	-0,59	49	-0,77	33	-1,47
0,0091	127	-0,24	126	-0,27	122	-0,32	107	-0,50	86	-0,77	77	-0,95	53	-1,62
0,0224	336	-0,76	331	-0,77	316	-0,79	268	-0,89	208	-1,11	182	-1,29	141	-1,84

Tabela A 54: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $SE(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0004	4	0,02	4	0,01	4	0,02	4	0,03	4	0,06	4	-0,06	4	-0,22
0,0007	7	0,00	7	-0,01	7	0,00	7	0,02	7	0,04	6	-0,10	6	-0,37
0,0013	14	-0,02	14	-0,02	13	-0,01	13	0,00	13	0,02	13	-0,11	11	-0,67
0,0024	25	-0,03	25	-0,03	25	-0,03	24	-0,02	24	-0,02	24	-0,17	17	-0,92
0,0031	33	-0,03	33	-0,04	33	-0,03	33	-0,03	32	-0,07	31	-0,24	22	-1,04
0,0041	45	-0,03	45	-0,04	45	-0,04	45	-0,06	43	-0,15	41	-0,34	27	-1,15
0,0055	64	-0,03	64	-0,04	63	-0,05	62	-0,10	57	-0,26	54	-0,46	35	-1,27
0,0080	98	-0,04	98	-0,05	97	-0,08	93	-0,19	82	-0,41	75	-0,61	48	-1,40
0,0144	192	-0,10	191	-0,12	187	-0,17	172	-0,34	144	-0,63	129	-0,83	83	-1,59

Tabela A 55: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	-0,07	4	-0,08	4	-0,07	4	-0,06	4	-0,04	4	-0,19	3	-0,77
0,0006	13	-0,18	13	-0,19	13	-0,19	13	-0,22	12	-0,30	11	-0,48	9	-1,33
0,0014	29	-0,29	29	-0,31	29	-0,33	28	-0,42	25	-0,59	23	-0,73	17	-1,68
0,0025	55	-0,43	55	-0,45	54	-0,48	51	-0,59	47	-0,81	43	-0,94	32	-1,92
0,0044	95	-0,64	95	-0,66	94	-0,69	89	-0,82	80	-1,03	73	-1,20	54	-2,08
0,0058	127	-0,80	126	-0,82	124	-0,85	118	-0,97	106	-1,19	96	-1,37	71	-2,14
0,0078	172	-1,01	171	-1,03	169	-1,06	160	-1,17	143	-1,39	130	-1,56	96	-2,18
0,0107	237	-1,25	236	-1,27	232	-1,30	219	-1,40	197	-1,60	178	-1,74	133	-2,20
0,0147	328	-1,49	326	-1,51	321	-1,53	303	-1,62	272	-1,79	246	-1,89	185	-2,19
0,0206	459	-1,72	457	-1,73	450	-1,75	424	-1,82	379	-1,93	343	-1,99	263	-2,17

Tabela A 56: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	-0,07	4	-0,08	4	-0,07	4	-0,06	4	-0,04	4	-0,17	4	-0,51
0,0009	18	-0,21	18	-0,21	18	-0,21	18	-0,22	17	-0,25	17	-0,43	13	-1,22
0,0031	66	-0,33	65	-0,35	65	-0,37	63	-0,46	58	-0,64	54	-0,78	40	-1,77
0,0041	86	-0,40	86	-0,42	85	-0,44	82	-0,54	76	-0,74	70	-0,87	52	-1,87
0,0053	113	-0,50	113	-0,51	112	-0,54	108	-0,64	99	-0,85	92	-0,99	68	-1,98
0,0072	153	-0,64	153	-0,66	152	-0,68	146	-0,79	134	-0,99	124	-1,15	92	-2,08
0,0098	210	-0,84	209	-0,86	208	-0,89	200	-0,99	184	-1,18	170	-1,34	127	-2,16
0,0135	290	-1,09	289	-1,10	287	-1,13	277	-1,22	254	-1,40	234	-1,56	178	-2,21
0,01884	404	-1,35	403	-1,36	400	-1,38	386	-1,47	354	-1,63	325	-1,77	251	-2,23
0,026	569	-1,58	567	-1,59	563	-1,61	542	-1,69	496	-1,84	455	-1,94	359	-2,23

Tabela A 57: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	-0,07	4	-0,07	4	-0,06	4	-0,05	4	-0,02	3	-0,10	3	-0,25
0,0008	15	-0,24	15	-0,24	15	-0,23	15	-0,21	15	-0,18	15	-0,31	12	-0,85
0,0015	29	-0,30	29	-0,30	29	-0,29	29	-0,27	28	-0,26	27	-0,41	21	-1,13
0,0025	50	-0,34	50	-0,34	50	-0,34	49	-0,34	47	-0,37	45	-0,53	34	-1,36
0,0051	106	-0,50	106	-0,50	105	-0,50	102	-0,52	95	-0,62	90	-0,75	67	-1,69
0,0089	187	-0,71	186	-0,71	185	-0,71	179	-0,74	166	-0,86	156	-0,97	115	-1,93
0,0119	252	-0,84	252	-0,84	250	-0,85	242	-0,89	224	-1,01	210	-1,13	155	-2,05
0,0162	344	-0,98	343	-0,98	341	-1,00	329	-1,06	303	-1,19	285	-1,33	211	-2,14
0,0220	472	-1,11	471	-1,12	467	-1,15	449	-1,22	413	-1,38	387	-1,54	288	-2,22
0,029	646	-1,23	644	-1,24	640	-1,27	614	-1,37	562	-1,56	527	-1,73	396	-2,27

Tabela A 58: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0003	4	0,07	4	0,07	4	0,08	4	0,08	4	0,10	4	-0,06	3	-0,67
0,0006	10	0,03	10	0,03	10	0,03	10	0,00	10	-0,07	9	-0,25	7	-1,08
0,0011	19	-0,02	19	-0,03	19	-0,05	19	-0,13	17	-0,28	16	-0,44	12	-1,38
0,0018	33	-0,13	33	-0,14	33	-0,18	31	-0,29	28	-0,49	26	-0,63	19	-1,64
0,0028	52	-0,27	52	-0,29	51	-0,32	48	-0,45	43	-0,67	39	-0,81	28	-1,83
0,0042	78	-0,44	77	-0,46	76	-0,50	71	-0,62	63	-0,85	57	-1,01	41	-1,98
0,0060	114	-0,65	113	-0,67	111	-0,71	104	-0,83	92	-1,05	83	-1,23	60	-2,09
0,0089	169	-0,93	168	-0,95	165	-0,98	154	-1,09	136	-1,30	123	-1,48	90	-2,16
0,0143	271	-1,30	270	-1,31	265	-1,34	247	-1,43	218	-1,62	196	-1,75	146	-2,20
0,0243	464	-1,67	461	-1,68	453	-1,70	421	-1,76	370	-1,87	332	-1,93	255	-2,19

Tabela A 59: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0006	10	0,04	10	0,04	10	0,05	10	0,05	9	0,07	9	-0,10	7	-0,76
0,0011	18	0,05	18	0,05	18	0,05	18	0,03	17	-0,02	16	-0,21	12	-1,02
0,0018	30	0,04	30	0,04	30	0,02	29	-0,04	27	-0,16	26	-0,34	19	-1,25
0,0027	47	-0,01	47	-0,02	46	-0,05	45	-0,14	41	-0,31	38	-0,47	28	-1,47
0,0039	71	-0,10	70	-0,12	70	-0,15	66	-0,27	60	-0,47	55	-0,63	40	-1,67
0,0056	104	-0,22	103	-0,24	102	-0,28	96	-0,41	86	-0,64	78	-0,79	56	-1,84
0,0082	153	-0,39	153	-0,42	150	-0,46	141	-0,59	125	-0,82	114	-1,00	82	-2,00
0,0128	241	-0,69	239	-0,71	235	-0,75	220	-0,88	194	-1,10	177	-1,30	128	-2,16
0,0214	406	-1,10	404	-1,12	397	-1,15	370	-1,26	325	-1,47	295	-1,64	219	-2,28
0,035	680	-1,48	676	-1,50	664	-1,53	617	-1,62	540	-1,78	487	-1,90	376	-2,34

Tabela A 60: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	0,07	4	0,07	4	0,08	4	0,08	4	0,10	4	0,01	3	-0,13
0,0010	15	0,05	15	0,04	15	0,05	15	0,06	15	0,09	14	-0,06	12	-0,64
0,0015	25	0,07	25	0,06	24	0,07	24	0,07	24	0,07	23	-0,10	18	-0,84
0,0032	37	0,08	53	0,08	53	0,07	52	0,03	49	-0,07	47	-0,26	34	-1,18
0,0044	75	0,07	75	0,06	74	0,04	73	-0,02	68	-0,17	64	-0,35	46	-1,35
0,0060	105	0,03	105	0,01	104	-0,01	101	-0,10	93	-0,28	87	-0,45	61	-1,52
0,0084	150	-0,05	150	-0,07	149	-0,10	143	-0,21	130	-0,42	121	-0,58	85	-1,70
0,0126	230	-0,21	229	-0,23	227	-0,27	216	-0,39	194	-0,62	180	-0,81	125	-1,94
0,0201	373	-0,48	371	-0,51	367	-0,55	347	-0,69	308	-0,93	284	-1,15	197	-2,17
0,0319	603	-0,83	600	-0,86	592	-0,90	557	-1,05	489	-1,29	451	-1,51	315	-2,35

Tabela A 61: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0009	10	0,11	10	0,11	10	0,10	10	0,07	9	0,00	9	-0,20	7	-1,03
0,0014	16	0,07	16	0,06	16	0,04	16	-0,03	15	-0,17	14	-0,34	10	-1,27
0,0022	26	0,00	26	-0,02	26	-0,05	24	-0,16	22	-0,34	21	-0,49	15	-1,49
0,0032	39	-0,11	39	-0,13	38	-0,17	36	-0,29	32	-0,50	30	-0,66	21	-1,69
0,0046	58	-0,25	58	-0,27	57	-0,31	53	-0,45	47	-0,68	43	-0,84	31	-1,87
0,0069	88	-0,45	87	-0,47	86	-0,51	79	-0,64	69	-0,87	63	-1,05	46	-2,02
0,0107	138	-0,73	137	-0,75	134	-0,78	124	-0,90	108	-1,12	98	-1,32	73	-2,13
0,0174	226	-1,08	224	-1,10	219	-1,13	202	-1,22	175	-1,43	159	-1,60	122	-2,19
0,0282	368	-1,44	365	-1,45	358	-1,47	329	-1,55	285	-1,70	258	-1,81	206	-2,18
0,0450	588	-1,75	584	-1,75	572	-1,76	526	-1,80	456	-1,87	411	-1,92	344	-2,12

Tabela A 62: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0007	7	0,13	7	0,12	7	0,13	7	0,14	7	0,16	7	0,00	6	-0,57
0,0016	17	0,14	17	0,15	17	0,14	17	0,13	16	0,08	16	-0,12	12	-0,94
0,0030	24	0,15	34	0,11	33	0,09	33	0,02	31	-0,12	29	-0,31	21	-1,26
0,0040	47	0,12	47	0,07	47	0,04	45	-0,07	41	-0,24	38	-0,42	27	-1,43
0,0055	67	0,08	67	-0,01	66	-0,05	62	-0,17	56	-0,38	52	-0,55	37	-1,61
0,0077	97	0,01	97	-0,12	95	-0,16	89	-0,31	78	-0,54	72	-0,72	51	-1,79
0,0113	147	-0,10	146	-0,29	143	-0,33	132	-0,48	114	-0,73	105	-0,93	74	-1,96
0,0172	226	-0,26	224	-0,52	220	-0,57	202	-0,71	172	-0,96	157	-1,18	112	-2,12
0,0259	346	-0,50	343	-0,83	336	-0,86	306	-0,99	260	-1,22	237	-1,45	172	-2,22
0,0387	520	-0,81	516	-1,15	504	-1,18	459	-1,28	388	-1,48	354	-1,69	262	-2,28

Tabela A 63: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 5$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0012	13	0,15	13	0,15	13	0,16	12	0,16	12	0,18	12	0,03	10	-0,48
0,0024	26	0,19	26	0,19	26	0,19	25	0,19	25	0,17	24	-0,02	18	-0,79
0,0033	35	0,20	35	0,20	35	0,20	35	0,18	33	0,13	32	-0,07	24	-0,93
0,0043	48	0,20	48	0,19	48	0,19	47	0,15	45	0,06	43	-0,14	31	-1,08
0,0058	66	0,18	66	0,18	66	0,17	64	0,11	61	-0,03	57	-0,23	40	-1,24
0,0081	95	0,15	95	0,14	94	0,12	91	0,03	84	-0,16	79	-0,35	54	-1,43
0,0118	144	0,10	144	0,08	142	0,05	136	-0,08	122	-0,32	114	-0,51	77	-1,65
0,0177	224	0,00	224	-0,02	220	-0,07	208	-0,22	183	-0,50	169	-0,72	113	-1,86
0,0266	345	-0,16	344	-0,20	338	-0,24	315	-0,42	273	-0,72	252	-0,97	168	-2,06
0,0396	522	-0,43	520	-0,46	510	-0,51	472	-0,69	404	-0,98	371	-1,26	249	-2,22

Tabela A 64: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	-0,04	4	-0,04	4	-0,03	4	-0,02	4	0,01	4	-0,12	3	-0,69
0,0004	9	-0,12	9	-0,13	9	-0,12	9	-0,13	9	-0,17	8	-0,34	6	-1,11
0,0011	24	-0,22	24	-0,23	24	-0,25	23	-0,35	20	-0,54	18	-0,70	13	-1,46
0,0018	41	-0,31	41	-0,33	40	-0,37	38	-0,50	33	-0,72	30	-0,86	21	-1,62
0,0029	67	-0,45	66	-0,47	65	-0,51	60	-0,64	52	-0,86	46	-1,00	33	-1,75
0,0045	105	-0,64	105	-0,66	102	-0,69	94	-0,82	81	-1,03	72	-1,18	51	-1,86
0,0059	138	-0,80	137	-0,82	134	-0,85	123	-0,96	106	-1,16	94	-1,32	68	-1,91
0,0082	194	-1,05	192	-1,06	188	-1,09	173	-1,18	149	-1,36	132	-1,50	97	-1,95
0,0121	285	-1,34	283	-1,35	277	-1,37	255	-1,45	220	-1,60	194	-1,70	148	-1,97
0,0187	441	-1,63	438	-1,64	429	-1,66	394	-1,71	340	-1,80	298	-1,85	244	-1,98

Tabela A 65: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	-0,07	4	-0,07	4	-0,06	4	-0,05	4	-0,03	4	-0,16	4	-0,50
0,0007	14	-0,17	14	-0,17	14	-0,17	14	-0,17	13	-0,18	13	-0,33	10	-1,05
0,0012	25	-0,21	25	-0,21	25	-0,22	24	-0,25	23	-0,34	22	-0,52	15	-1,29
0,0020	43	-0,24	43	-0,25	42	-0,27	41	-0,35	38	-0,51	35	-0,68	24	-1,46
0,0032	70	-0,32	70	-0,33	69	-0,36	66	-0,46	59	-0,66	54	-0,81	38	-1,61
0,0041	89	-0,38	89	-0,40	88	-0,42	84	-0,53	75	-0,74	68	-0,89	48	-1,69
0,0053	118	-0,48	118	-0,49	116	-0,52	111	-0,63	99	-0,84	89	-0,98	63	-1,77
0,0075	168	-0,66	167	-0,67	165	-0,70	158	-0,81	140	-0,99	127	-1,14	92	-1,86
0,0114	254	-0,96	253	-0,97	251	-0,99	239	-1,08	213	-1,24	192	-1,38	145	-1,94
0,0182	407	-1,34	405	-1,35	401	-1,36	382	-1,42	340	-1,54	307	-1,65	245	-1,98

Tabela A 66: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	4	-0,09	4	-0,09	4	-0,08	4	-0,07	4	-0,04	4	-0,14	3	-0,27
0,0012	22	-0,28	22	-0,28	22	-0,27	22	-0,25	22	-0,22	21	-0,35	16	-1,01
0,0028	58	-0,35	58	-0,35	57	-0,35	56	-0,36	53	-0,43	50	-0,58	36	-1,34
0,0035	73	-0,38	72	-0,38	72	-0,39	69	-0,42	64	-0,51	60	-0,65	43	-1,42
0,0044	93	-0,44	92	-0,44	92	-0,45	88	-0,48	81	-0,58	76	-0,72	54	-1,50
0,0059	126	-0,55	126	-0,55	125	-0,56	121	-0,58	111	-0,68	104	-0,80	73	-1,60
0,0086	184	-0,71	184	-0,71	183	-0,71	177	-0,73	162	-0,84	151	-0,94	108	-1,72
0,0133	288	-0,91	288	-0,91	286	-0,92	276	-0,96	252	-1,07	234	-1,18	170	-1,85
0,0216	473	-1,16	472	-1,16	470	-1,18	452	-1,25	409	-1,36	381	-1,49	286	-1,95
0,0360	799	-1,37	797	-1,39	792	-1,42	760	-1,51	686	-1,66	637	-1,77	501	-2,01

Tabela A 67: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0005	9	0,07	9	0,06	9	0,07	9	0,05	8	0,00	8	-0,19	6	-0,95
0,0008	15	0,05	15	0,04	15	0,03	14	-0,04	13	-0,18	12	-0,36	8	-1,14
0,0013	23	0,00	23	-0,01	23	-0,05	21	-0,16	19	-0,35	17	-0,51	12	-1,30
0,0018	35	-0,08	34	-0,10	34	-0,15	31	-0,29	27	-0,51	24	-0,66	17	-1,46
0,0025	50	-0,18	49	-0,21	48	-0,26	44	-0,41	37	-0,65	33	-0,80	23	-1,59
0,0035	69	-0,32	69	-0,34	67	-0,39	60	-0,54	50	-0,77	44	-0,92	31	-1,70
0,0047	95	-0,48	94	-0,50	91	-0,54	81	-0,67	68	-0,90	60	-1,06	43	-1,79
0,0064	132	-0,68	130	-0,70	126	-0,73	112	-0,84	94	-1,05	82	-1,22	60	-1,87
0,0094	193	-0,95	191	-0,97	185	-0,99	165	-1,07	137	-1,26	120	-1,41	90	-1,92
0,017	357	-1,40	353	-1,41	342	-1,42	304	-1,47	253	-1,59	220	-1,68	178	-1,96

Tabela A 68: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0003	5	0,07	5	0,07	5	0,08	5	0,09	5	0,12	5	-0,03	4	-0,45
0,0010	16	0,07	16	0,07	16	0,08	15	0,07	15	0,04	14	-0,15	11	-0,90
0,0014	24	0,08	24	0,08	24	0,07	23	0,03	22	-0,08	21	-0,26	15	-1,05
0,0020	35	0,06	35	0,05	35	0,03	34	-0,05	31	-0,21	29	-0,39	20	-1,19
0,0028	51	0,02	51	0,00	50	-0,03	47	-0,15	42	-0,35	38	-0,51	27	-1,33
0,0038	73	-0,05	72	-0,07	71	-0,12	66	-0,26	57	-0,49	51	-0,64	36	-1,48
0,0052	103	-0,15	102	-0,18	100	-0,23	91	-0,38	78	-0,62	70	-0,78	49	-1,61
0,0075	150	-0,31	149	-0,34	145	-0,38	131	-0,53	110	-0,77	98	-0,94	70	-1,74
0,0123	248	-0,63	246	-0,65	240	-0,69	216	-0,81	181	-1,02	161	-1,20	120	-1,90
0,0258	530	-1,21	525	-1,22	511	-1,25	458	-1,32	382	-1,48	337	-1,61	276	-2,02

Tabela A 69: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0003	5	0,07	5	0,06	5	0,07	5	0,08	5	0,11	5	-0,01	4	-0,20
0,0009	15	0,07	15	0,06	15	0,07	15	0,09	14	0,12	14	-0,04	11	-0,58
0,0019	31	0,09	31	0,09	31	0,10	30	0,09	29	0,07	28	-0,11	21	-0,87
0,0025	42	0,10	42	0,10	42	0,10	41	0,08	40	0,00	38	-0,18	27	-0,98
0,0034	57	0,10	57	0,10	57	0,09	56	0,04	52	-0,08	50	-0,26	34	-1,10
0,0044	77	0,08	77	0,08	77	0,06	75	-0,02	69	-0,17	64	-0,35	44	-1,22
0,0059	107	0,05	106	0,04	105	0,01	101	-0,09	91	-0,28	85	-0,45	58	-1,34
0,0085	157	-0,03	157	-0,05	155	-0,08	147	-0,20	130	-0,41	120	-0,58	82	-1,51
0,0149	284	-0,27	282	-0,29	278	-0,33	260	-0,46	226	-0,69	208	-0,88	144	-1,79
0,0309	611	-0,77	606	-0,79	597	-0,83	552	-0,97	468	-1,18	429	-1,39	310	-2,05

Tabela A 70: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0008	9	0,13	9	0,13	9	0,12	8	0,11	8	0,05	8	-0,14	6	-0,89
0,0012	13	0,11	13	0,11	13	0,10	13	0,04	12	-0,09	11	-0,28	8	-1,05
0,0016	19	0,08	19	0,07	19	0,04	18	-0,06	17	-0,24	15	-0,41	11	-1,21
0,0023	28	0,03	28	0,00	28	-0,04	26	-0,18	22	-0,39	20	-0,54	14	-1,36
0,0031	41	-0,06	40	-0,09	39	-0,14	36	-0,30	30	-0,53	27	-0,68	19	-1,51
0,0044	59	-0,19	59	-0,22	57	-0,27	51	-0,43	42	-0,68	38	-0,84	27	-1,65
0,0065	90	-0,39	89	-0,42	86	-0,46	76	-0,61	62	-0,85	55	-1,02	41	-1,78
0,0110	157	-0,75	154	-0,76	149	-0,79	130	-0,89	105	-1,10	93	-1,28	72	-1,91
0,0225	324	-1,27	319	-1,27	306	-1,28	266	-1,33	216	-1,46	188	-1,59	161	-1,98
0,0481	692	-1,71	682	-1,71	656	-1,71	572	-1,72	465	-1,75	399	-1,79	393	-1,95

Tabela A 71: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0005	5	0,13	5	0,13	5	0,14	5	0,16	5	0,19	5	0,02	4	-0,38
0,0011	12	0,15	12	0,14	12	0,15	12	0,15	12	0,15	11	-0,04	9	-0,73
0,0016	17	0,15	17	0,15	17	0,15	17	0,14	16	0,09	16	-0,11	11	-0,87
0,0021	23	0,15	23	0,15	23	0,14	23	0,10	22	0,00	21	-0,20	14	-0,99
0,0028	32	0,14	32	0,13	32	0,11	31	0,04	29	-0,11	27	-0,30	18	-1,11
0,0037	45	0,11	45	0,09	44	0,06	42	-0,05	38	-0,24	35	-0,41	24	-1,25
0,0052	66	0,06	66	0,03	65	-0,01	60	-0,16	52	-0,39	47	-0,56	32	-1,41
0,0079	106	-0,06	106	-0,09	103	-0,15	92	-0,32	77	-0,58	70	-0,76	48	-1,61
0,0143	204	-0,35	201	-0,38	194	-0,42	170	-0,59	136	-0,85	122	-1,06	87	-1,83
0,0291	430	-0,88	423	-0,90	407	-0,92	350	-1,00	275	-1,21	245	-1,41	187	-2,00

Tabela A 72: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 10$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0005	5	0,13	5	0,12	5	0,14	5	0,15	5	0,17	5	0,05	4	-0,12
0,0011	12	0,16	12	0,15	12	0,16	11	0,17	11	0,20	11	0,04	9	-0,40
0,0015	16	0,17	16	0,16	16	0,17	16	0,18	15	0,20	15	0,03	12	-0,53
0,0020	21	0,18	21	0,17	21	0,18	21	0,19	20	0,19	20	0,02	15	-0,64
0,0033	36	0,19	36	0,18	36	0,18	35	0,17	34	0,13	33	-0,07	24	-0,86
0,0056	64	0,18	64	0,17	64	0,17	63	0,12	58	-0,02	56	-0,23	37	-1,11
0,0079	95	0,16	95	0,15	94	0,13	91	0,04	82	-0,16	77	-0,36	50	-1,28
0,0131	168	0,12	168	0,10	165	0,06	155	-0,09	134	-0,36	123	-0,58	79	-1,53
0,0243	332	-0,03	330	-0,06	323	-0,12	295	-0,32	243	-0,64	221	-0,88	142	-1,79
0,0467	666	-0,45	659	-0,48	643	-0,54	574	-0,73	460	-1,00	414	-1,26	279	-2,01

Tabela A 73: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,25T - n = 20$.

P ($J_n/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	3	0,00	3	-0,01	3	0,01	3	0,02	3	0,05	3	-0,08	3	-0,59
0,0004	7	-0,10	7	-0,11	7	-0,10	7	-0,09	7	-0,11	7	-0,27	5	-1,02
0,0009	20	-0,17	20	-0,18	19	-0,20	19	-0,29	17	-0,47	15	-0,65	10	-1,35
0,0015	34	-0,25	34	-0,27	34	-0,31	31	-0,45	27	-0,67	24	-0,83	16	-1,49
0,0030	72	-0,45	71	-0,48	69	-0,52	63	-0,66	52	-0,88	46	-1,02	31	-1,65
0,0037	90	-0,54	90	-0,57	87	-0,61	78	-0,74	65	-0,95	57	-1,10	40	-1,70
0,0047	116	-0,66	115	-0,68	111	-0,72	100	-0,84	83	-1,04	72	-1,19	51	-1,75
0,0066	163	-0,89	162	-0,90	157	-0,93	142	-1,03	118	-1,20	103	-1,34	74	-1,79
0,0114	280	-1,30	277	-1,31	270	-1,33	245	-1,40	205	-1,52	178	-1,61	141	-1,84
0,0239	586	-1,75	581	-1,76	567	-1,77	514	-1,80	432	-1,84	371	-1,85	353	-1,94

Tabela A 74: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 0,5T - n = 20$.

P ($J_n/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0002	3	-0,01	3	-0,02	3	0,00	3	0,01	3	0,04	3	-0,11	3	-0,36
0,0005	10	-0,14	10	-0,15	10	-0,14	10	-0,13	10	-0,12	10	-0,24	7	-0,92
0,0011	23	-0,20	23	-0,20	23	-0,20	23	-0,23	22	-0,33	20	-0,50	14	-1,24
0,0018	38	-0,23	38	-0,23	38	-0,25	37	-0,33	33	-0,50	30	-0,67	20	-1,38
0,0028	62	-0,28	62	-0,30	61	-0,32	58	-0,43	51	-0,64	46	-0,80	31	-1,50
0,0034	78	-0,33	77	-0,35	77	-0,38	72	-0,49	63	-0,70	56	-0,86	38	-1,55
0,0044	99	-0,40	99	-0,42	98	-0,45	92	-0,56	80	-0,77	71	-0,92	49	-1,61
0,0062	141	-0,55	140	-0,57	139	-0,59	131	-0,70	114	-0,89	102	-1,03	72	-1,69
0,0107	245	-0,93	244	-0,94	241	-0,96	228	-1,04	199	-1,18	178	-1,31	135	-1,79
0,0228	530	-1,54	528	-1,54	521	-1,55	490	-1,58	428	-1,65	378	-1,71	332	-1,85

Tabela A 75: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,1 - B = 1T - n = 20$.

P ($J_n/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0001	2	0,06	2	0,05	2	0,06	2	0,06	2	0,06	2	-0,01	1	-0,08
0,0003	5	-0,10	7	-0,15	5	-0,09	5	-0,08	5	-0,05	5	-0,16	4	-0,34
0,0007	13	-0,22	13	-0,22	13	-0,21	13	-0,19	12	-0,15	12	-0,26	10	-0,76
0,0011	21	-0,29	21	-0,29	21	-0,27	20	-0,25	20	-0,22	20	-0,33	15	-0,98
0,0016	32	-0,33	32	-0,33	32	-0,32	32	-0,29	31	-0,29	30	-0,43	21	-1,14
0,0036	77	-0,39	77	-0,39	76	-0,41	72	-0,45	66	-0,55	61	-0,69	42	-1,39
0,0047	102	-0,47	101	-0,48	100	-0,49	96	-0,51	88	-0,62	81	-0,76	55	-1,46
0,0073	159	-0,66	159	-0,65	158	-0,65	153	-0,67	139	-0,78	128	-0,89	89	-1,57
0,0143	312	-0,96	312	-0,97	311	-0,98	301	-1,02	271	-1,11	251	-1,21	184	-1,73
0,0324	726	-1,39	726	-1,40	725	-1,43	702	-1,52	630	-1,62	579	-1,70	469	-1,86

Tabela A 76: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,25T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0004	7	0,07	7	0,07	7	0,07	7	0,07	7	0,05	7	-0,13	5	-0,86
0,0007	12	0,06	12	0,06	12	0,05	12	0,01	11	-0,11	10	-0,30	7	-1,03
0,0010	19	0,04	19	0,03	19	0,00	18	-0,10	16	-0,29	14	-0,46	10	-1,17
0,0015	29	-0,01	29	-0,04	28	-0,08	26	-0,24	22	-0,46	19	-0,62	13	-1,30
0,0021	42	-0,10	42	-0,13	40	-0,18	36	-0,36	30	-0,61	26	-0,75	18	-1,43
0,0028	60	-0,21	59	-0,25	57	-0,30	49	-0,48	40	-0,73	35	-0,87	24	-1,54
0,0038	82	-0,37	81	-0,39	78	-0,44	67	-0,60	54	-0,84	46	-0,99	33	-1,63
0,0052	114	-0,56	112	-0,58	107	-0,61	92	-0,73	73	-0,96	63	-1,11	46	-1,71
0,0076	167	-0,81	164	-0,82	157	-0,84	134	-0,92	106	-1,12	91	-1,27	69	-1,78
0,0145	323	-1,28	317	-1,28	303	-1,28	258	-1,31	204	-1,43	173	-1,54	147	-1,83

Tabela A 77: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 0,5T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0005	7	0,07	7	0,06	7	0,08	7	0,09	7	0,12	7	-0,03	6	-0,57
0,0007	11	0,07	11	0,07	11	0,08	11	0,08	11	0,09	11	-0,08	8	-0,76
0,0015	25	0,08	25	0,07	24	0,07	24	0,02	23	-0,10	21	-0,28	11	-0,91
0,0020	35	0,06	35	0,05	35	0,03	34	-0,05	31	-0,22	28	-0,40	14	-1,03
0,0027	50	0,03	50	0,02	49	-0,02	46	-0,15	40	-0,36	36	-0,52	19	-1,13
0,0036	70	-0,02	70	-0,04	68	-0,10	62	-0,26	53	-0,49	47	-0,65	24	-1,25
0,0048	99	-0,11	98	-0,14	96	-0,19	85	-0,37	70	-0,62	62	-0,77	32	-1,37
0,0069	146	-0,26	144	-0,29	139	-0,34	122	-0,51	98	-0,75	87	-0,91	43	-1,48
0,0117	252	-0,59	248	-0,61	239	-0,65	209	-0,77	167	-0,98	147	-1,15	62	-1,60
0,0397	869	-1,48	858	-1,49	825	-1,50	715	-1,53	574	-1,61	485	-1,68	113	-1,75

Tabela A 78: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,25 - B = 1T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0007	11	0,06	11	0,06	11	0,07	11	0,08	11	0,11	10	-0,03	9	-0,45
0,0014	22	0,08	22	0,08	22	0,08	22	0,09	21	0,10	21	-0,06	16	-0,73
0,0019	30	0,09	30	0,08	30	0,09	30	0,09	29	0,06	28	-0,11	20	-0,84
0,0024	40	0,09	40	0,09	40	0,09	39	0,07	38	0,00	36	-0,18	25	-0,93
0,0031	53	0,09	53	0,09	53	0,08	52	0,04	49	-0,07	46	-0,25	31	-1,02
0,0040	70	0,08	70	0,07	69	0,06	68	-0,01	62	-0,16	58	-0,34	39	-1,11
0,0052	94	0,06	94	0,05	93	0,02	89	-0,07	80	-0,25	74	-0,42	50	-1,22
0,0072	134	0,01	134	-0,01	132	-0,04	125	-0,16	109	-0,37	101	-0,53	67	-1,34
0,0136	266	-0,24	265	-0,26	260	-0,29	241	-0,42	205	-0,63	189	-0,82	131	-1,63
0,0456	957	-1,06	950	-1,08	929	-1,11	845	-1,23	697	-1,41	620	-1,56	501	-1,97

Tabela A 79: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,25T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0004	4	0,13	4	0,13	4	0,14	4	0,15	4	0,18	4	0,01	3	-0,55
0,0006	6	0,12	6	0,12	6	0,12	6	0,13	6	0,12	6	-0,06	4	-0,75
0,0009	9	0,12	9	0,11	9	0,11	9	0,09	9	0,02	8	-0,18	6	-0,90
0,0012	14	0,10	14	0,10	14	0,09	13	0,03	12	-0,12	11	-0,31	8	-1,02
0,0016	20	0,08	20	0,07	19	0,04	18	-0,08	16	-0,26	15	-0,43	10	-1,14
0,0022	28	0,04	28	0,02	27	-0,03	25	-0,19	21	-0,41	19	-0,56	13	-1,26
0,0029	40	-0,02	39	-0,06	38	-0,12	34	-0,31	28	-0,55	25	-0,70	17	-1,39
0,0040	58	-0,14	57	-0,18	55	-0,24	47	-0,43	37	-0,69	33	-0,84	24	-1,52
0,0061	91	-0,36	89	-0,39	85	-0,44	71	-0,60	56	-0,84	49	-1,01	36	-1,66
0,0125	193	-0,87	189	-0,88	178	-0,89	147	-0,95	113	-1,15	97	-1,31	80	-1,82

Tabela A 80: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 0,5T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0004	4	0,13	4	0,12	4	0,14	4	0,16	4	0,19	4	0,02	3	-0,28
0,0009	10	0,13	10	0,13	10	0,14	9	0,14	9	0,16	9	-0,01	7	-0,63
0,0013	13	0,14	13	0,13	13	0,14	13	0,14	13	0,12	13	-0,06	9	-0,76
0,0017	18	0,14	18	0,13	18	0,13	18	0,12	17	0,06	17	-0,14	12	-0,86
0,0022	24	0,13	24	0,13	24	0,12	24	0,08	23	-0,03	21	-0,23	14	-0,97
0,0028	33	0,12	33	0,11	33	0,10	32	0,02	29	-0,14	27	-0,33	18	-1,07
0,0038	47	0,10	47	0,08	46	0,05	44	-0,07	38	-0,28	35	-0,45	23	-1,19
0,0054	72	0,06	71	0,03	70	-0,03	63	-0,21	53	-0,45	48	-0,62	32	-1,35
0,0096	141	-0,12	139	-0,16	134	-0,22	115	-0,43	90	-0,70	80	-0,89	56	-1,59
0,0300	474	-0,92	465	-0,93	441	-0,94	363	-0,99	272	-1,20	235	-1,38	191	-1,88

Tabela A 81: Valores de J e Q ao longo da frente da trinca: $C(T) - a/W = 0,5 - B = 1T - n = 20$.

P ($J_m/b\sigma_0$)	Espessura normalizada (B_x/B_T)													
	0,525		0,550		0,600		0,700		0,800		0,850		0,950	
	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q	J	Q
0,0005	6	0,12	6	0,12	6	0,13	5	0,15	5	0,17	5	0,04	4	-0,14
0,0010	11	0,14	11	0,13	11	0,15	11	0,16	10	0,19	10	0,02	8	-0,36
0,0014	14	0,15	14	0,14	14	0,15	14	0,17	13	0,19	13	0,02	11	-0,47
0,0022	23	0,16	23	0,15	23	0,16	23	0,16	22	0,17	22	0,00	16	-0,66
0,0027	29	0,16	29	0,16	29	0,16	28	0,16	27	0,15	27	-0,03	20	-0,75
0,0042	47	0,16	47	0,16	46	0,15	46	0,13	43	0,05	42	-0,14	28	-0,93
0,0054	62	0,15	62	0,15	61	0,14	60	0,10	56	-0,03	53	-0,23	35	-1,04
0,0075	91	0,15	92	0,14	91	0,12	87	0,04	78	-0,16	73	-0,36	46	-1,20
0,0142	190	0,12	189	0,09	186	0,05	173	-0,12	144	-0,42	131	-0,64	81	-1,48
0,0388	568	-0,26	561	-0,30	547	-0,36	484	-0,57	377	-0,87	331	-1,11	221	-1,83

Tabela A 82: Valores de J ao longo da frente da trinca: $SC(T) - a/c = 0,166$ (Trinca rasa).

P ($J_m/a\sigma_0$)	Ângulo (°)											
	90	85	80	75	70	65	60	53	40	33	25	17
0,0105	36,6	36,6	36,4	35,8	35,0	33,9	32,3	29,8	23,7	21,1	18,2	14,4
0,0131	45,7	45,6	45,3	44,6	43,6	42,2	40,3	37,1	29,4	26,2	22,5	17,8
0,0157	54,9	54,9	54,5	53,7	52,5	50,8	48,4	44,6	35,3	31,5	27,0	21,3
0,0184	64,5	64,4	63,9	63,0	61,5	59,6	56,8	52,2	41,4	36,9	31,6	24,9
0,0211	74,2	74,1	73,6	72,5	70,8	68,6	65,4	60,1	47,5	42,3	36,2	28,5
0,0239	84,1	84,0	83,4	82,2	80,3	77,8	74,1	68,1	53,8	47,9	41,0	32,2
0,0327	115,0	114,9	114,1	112,3	109,8	106,4	101,3	93,0	73,3	65,3	55,8	43,6
0,0418	147,3	147,1	146,1	143,9	140,6	136,2	129,6	118,9	93,6	83,3	71,2	55,6
0,0512	180,8	180,5	179,2	176,5	172,5	167,1	159,0	145,8	114,7	102,1	87,1	68,0
0,0609	215,3	215,0	213,5	210,2	205,5	199,0	189,4	173,6	136,4	121,4	103,6	80,7
0,0709	250,8	250,4	248,6	244,9	239,3	231,7	220,5	202,1	158,7	141,2	120,5	93,8
0,0916	324,2	323,7	321,4	316,5	309,3	299,5	285,0	261,0	204,8	182,3	155,4	120,8
0,1131	400,5	399,9	397,0	391,0	382,1	370,0	352,0	322,3	252,7	224,9	191,7	148,9
0,1353	479,3	478,6	475,1	467,9	457,3	442,7	421,2	385,6	302,2	269,0	229,2	177,9
0,1466	519,6	518,8	515,0	507,2	495,6	479,9	456,6	417,9	327,5	291,4	248,4	192,7

Tabela A 83: Valores de Q ao longo da frente da trinca: $SC(T) - a/c = 0,166$ (Trinca rasa).

P ($J_m/b\sigma_0$)	Ângulo (°)											
	90	85	80	75	70	65	60	53	40	33	25	17
0,0105	-0,805	-0,930	-0,923	-0,922	-0,924	-0,974	-1,000	-1,208	-1,300	-1,570	-1,620	-1,772
0,0131	-0,752	-0,816	-0,818	-0,833	-0,854	-0,933	-1,008	-1,143	-1,211	-1,430	-1,520	-1,634
0,0157	-0,650	-0,715	-0,726	-0,761	-0,823	-0,915	-0,980	-1,094	-1,134	-1,156	-0,171	-1,498
0,0184	-0,557	-0,656	-0,706	-0,773	-0,831	-0,915	-0,969	-1,056	-1,130	-1,278	-1,680	-1,992
0,0211	-0,598	-0,696	-0,742	-0,804	-0,855	-0,929	-0,972	-1,025	-1,201	-1,356	-1,748	-2,198
0,0239	-0,655	-0,750	-0,792	-0,848	-0,892	-0,947	-0,972	-0,995	1,014	-1,293	-1,799	-2,186
0,0327	-0,826	-0,907	-0,930	-0,961	-0,980	-1,008	-1,009	-0,923	-1,084	-1,421	-1,850	-2,175
0,0418	-0,991	-1,060	-1,072	-1,092	-1,104	-1,131	-1,150	-1,086	-1,249	-1,533	-1,901	-2,186
0,0512	-1,093	-1,168	-1,191	-1,227	-1,260	-1,308	-1,359	-1,328	-1,387	-1,612	-1,850	-2,175
0,0609	-1,199	-1,272	-1,290	-1,320	-1,343	-1,380	-1,414	-1,426	-1,488	-1,713	-1,901	-2,175
0,0709	-1,265	-1,336	-1,348	-1,373	-1,389	-1,428	-1,456	-1,512	-1,612	-1,751	-1,961	-2,164
0,0916	-1,388	-1,456	-1,465	-1,487	-1,499	-1,538	-1,553	-1,623	-1,707	-1,870	-1,940	-2,148
0,1131	-1,488	-1,557	-1,569	-1,593	-1,607	-1,645	-1,659	-1,705	-1,793	-1,849	-1,936	-2,115
0,1353	-1,526	-1,590	-1,596	-1,612	-1,624	-1,654	-1,675	-1,710	-1,765	-1,831	-1,947	-2,080
0,1466	-1,551	-1,613	-1,616	-1,627	-1,638	-1,663	-1,688	-1,715	-1,754	-1,834	-1,958	-2,062

Tabela A 84: Valores de J ao longo da frente da trinca: $SC(T) - a/c = 0,333$ (Trinca profunda).

P ($J_m/b\sigma_0$)	Ângulo (°)											
	90	85	80	75	70	65	60	53	40	33	25	17
0,0077	24,3	24,3	24,2	23,9	23,5	23,0	22,3	21,1	18,2	17,1	15,6	13,8
0,0136	43,7	43,7	43,5	43,0	42,2	41,2	39,8	37,5	32,0	29,9	27,1	23,6
0,0162	52,2	52,2	51,9	51,3	50,4	49,2	47,5	44,7	38,1	35,6	32,1	27,9
0,0242	78,6	78,4	78,0	77,1	75,8	73,9	71,2	66,9	56,8	52,9	47,5	41,0
0,0298	97,0	96,7	96,2	95,2	93,6	91,1	87,8	82,4	69,8	64,9	58,1	49,9
0,0355	115,9	115,7	115,1	113,8	111,8	108,9	104,9	98,4	83,1	77,2	69,0	59,1
0,0413	135,4	135,1	134,4	132,9	130,6	127,1	122,3	114,7	96,7	89,7	80,0	68,4
0,0473	155,3	155,0	154,1	152,4	149,7	145,7	140,2	131,3	110,6	102,5	91,4	77,9
0,0659	217,4	216,9	215,7	213,3	209,5	203,7	195,9	183,2	153,8	142,3	126,5	107,4
0,0854	282,5	281,8	280,2	277,1	272,1	264,5	254,2	237,5	199,0	184,0	163,2	138,1
0,1057	350,1	349,3	347,3	343,4	337,1	327,7	314,8	293,9	245,9	227,2	201,3	170,0
0,1266	420,0	419,0	416,6	411,8	404,3	392,9	377,3	352,2	294,2	271,7	240,6	202,9
0,1480	491,8	490,6	487,8	482,2	473,4	460,0	441,6	412,0	343,9	317,5	281,0	236,6
0,1700	565,4	564,0	560,8	554,4	544,2	528,7	507,5	473,4	394,8	364,4	322,3	271,2

Tabela A 85: Valores de Q ao longo da frente da trinca: $SC(T) - a/c = 0,333$ (Trinca profunda).

P ($J_m/b\sigma_0$)	Ângulo (°)											
	90	85	80	75	70	65	60	53	40	33	25	17
0,0077	-0,490	-0,640	-0,700	-0,780	-0,700	-0,700	-0,750	-0,770	-1,354	-1,507	-1,612	-2,116
0,0136	-0,520	-0,680	-0,750	-0,810	-0,820	-0,800	-0,940	-0,960	-1,390	-1,594	-1,659	-2,165
0,0162	-0,540	-0,680	-0,740	-0,830	-0,850	-0,840	-0,960	-0,990	-1,400	-1,600	-1,683	-2,190
0,0242	-0,599	-0,718	-0,769	-0,823	-0,861	-0,900	-1,020	-1,120	-1,450	-1,630	-1,753	-2,245
0,0298	-0,658	-0,760	-0,792	-0,829	-0,862	-0,917	-1,060	-1,140	-1,490	-1,650	-1,800	-2,276
0,0355	-0,698	-0,796	-0,826	-0,862	-0,887	-0,937	-1,080	-1,160	-1,530	-1,684	-1,840	-2,344
0,0413	-0,760	-0,854	-0,870	-0,898	-0,926	-0,984	-1,100	-1,180	-1,520	-1,697	-1,873	-2,300
0,0473	-0,799	-0,882	-0,905	-0,943	-0,982	-1,049	-1,118	-1,200	-1,540	-1,719	-1,906	-2,340
0,0659	-0,914	-0,992	-1,014	-1,050	-1,082	-1,135	-1,197	-1,290	-1,542	-1,797	-2,035	-2,350
0,0854	-1,018	-1,091	-1,110	-1,145	-1,179	-1,237	-1,294	-1,391	-1,650	-1,829	-2,054	-2,334
0,1057	-1,123	-1,201	-1,227	-1,269	-1,301	-1,357	-1,403	-1,499	-1,679	-1,861	-2,070	-2,311
0,1266	-1,205	-1,277	-1,297	-1,330	-1,362	-1,416	-1,465	-1,544	-1,720	-1,892	-2,066	-2,281
0,1480	-1,289	-1,358	-1,374	-1,404	-1,435	-1,484	-1,536	-1,600	-1,752	-1,921	-2,068	-2,248
0,1700	-1,349	-1,418	-1,436	-1,464	-1,493	-1,536	-1,580	-1,636	-1,799	-1,922	-2,063	-2,219

APÊNDICE B: Variações da Integral J com a Espessura

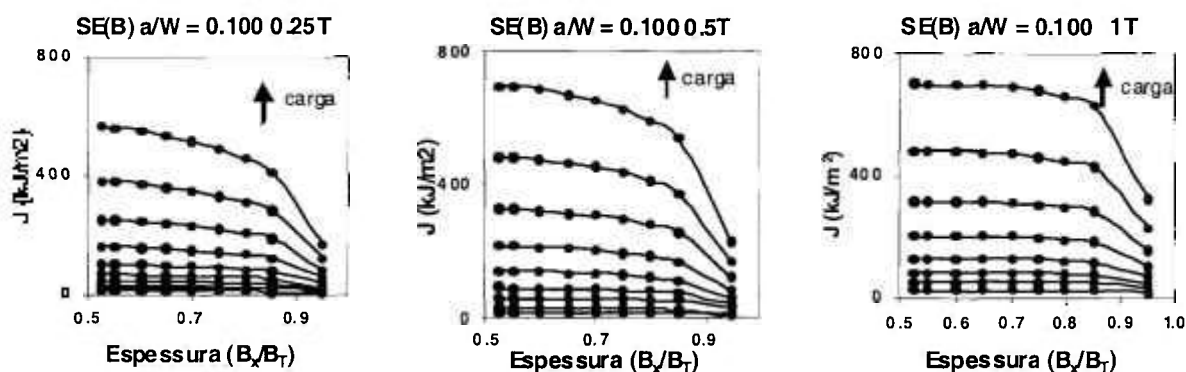


Figura B1: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 5$.

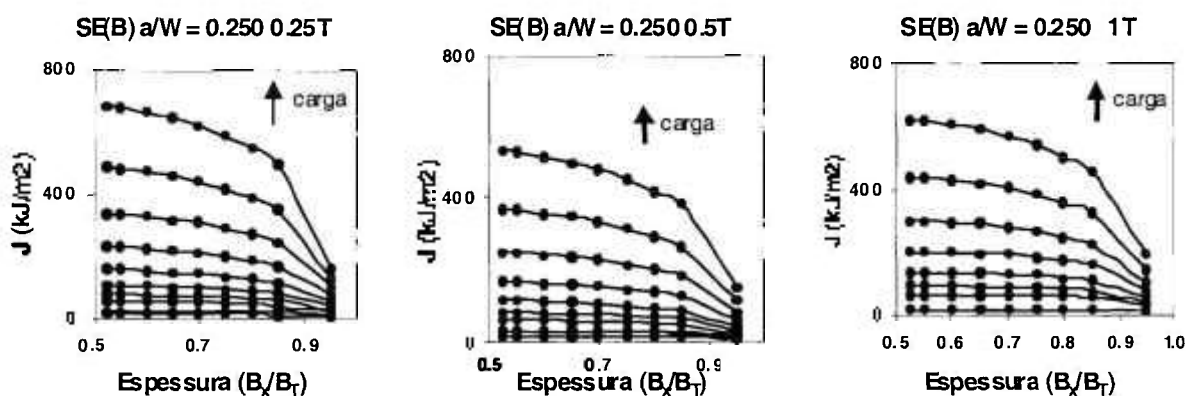


Figura B2: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 5$.

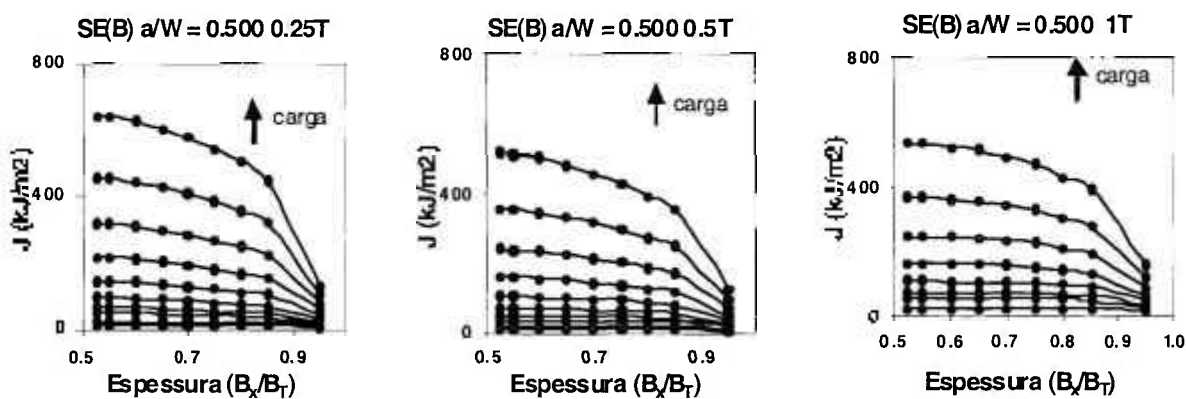


Figura B3: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 5$.

Cada curva representa a variação do parâmetro ao longo da espessura, para um dado carregamento. As setas representam o sentido de crescimento do carregamento.

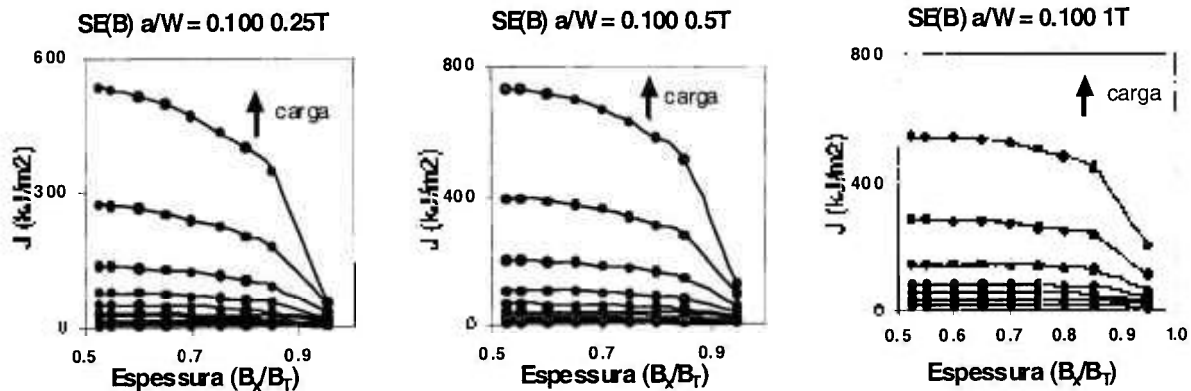


Figura B4: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 10$.

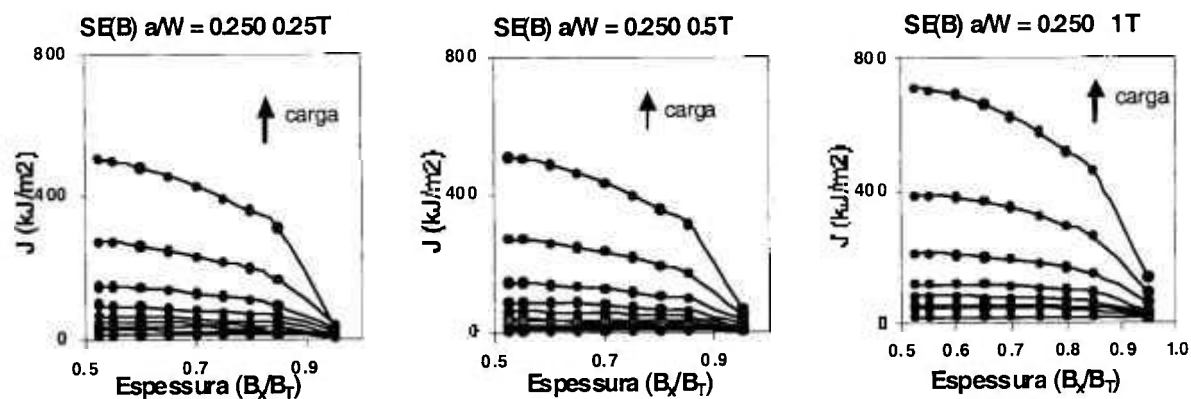


Figura B5: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 10$.

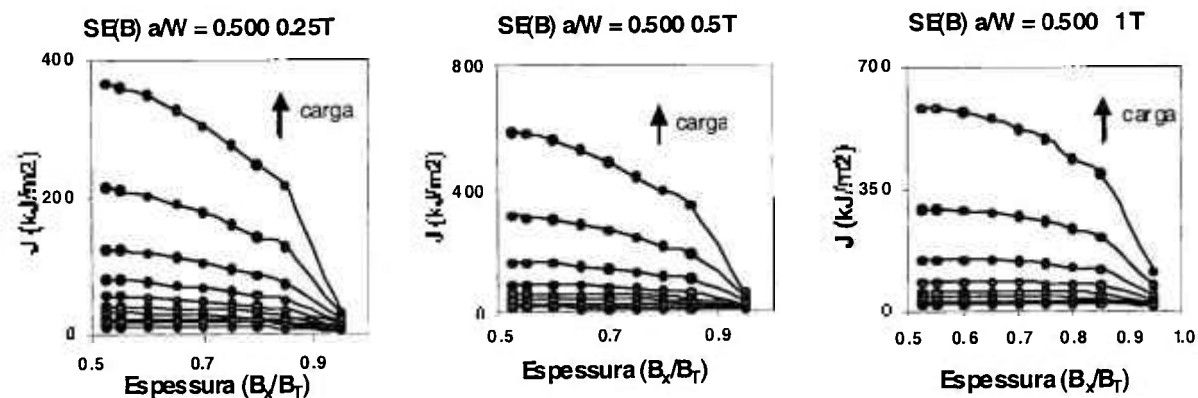


Figura B6: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 10$.

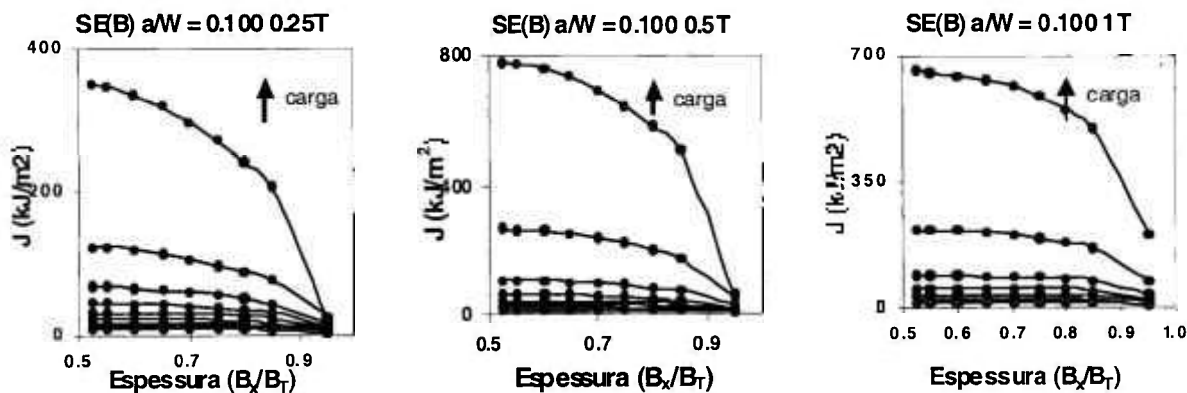


Figura B7: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 20$.

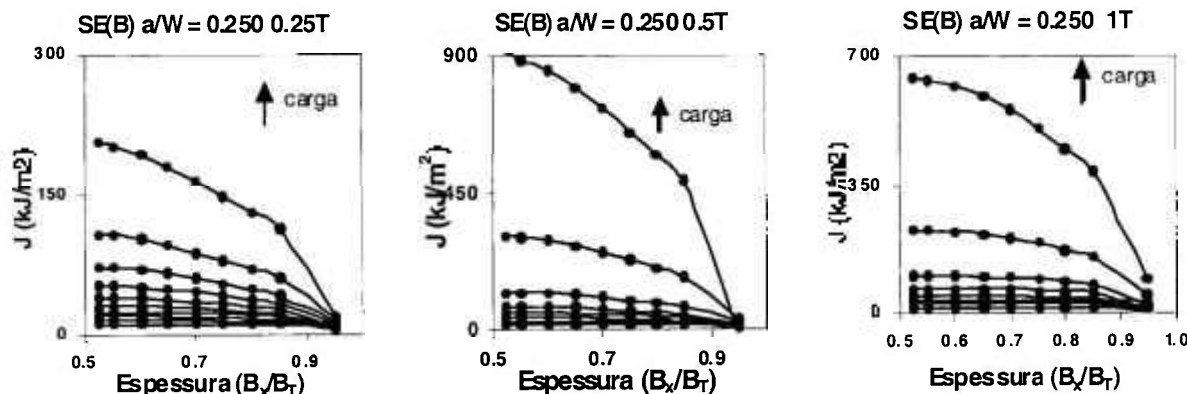


Figura B8: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 20$.

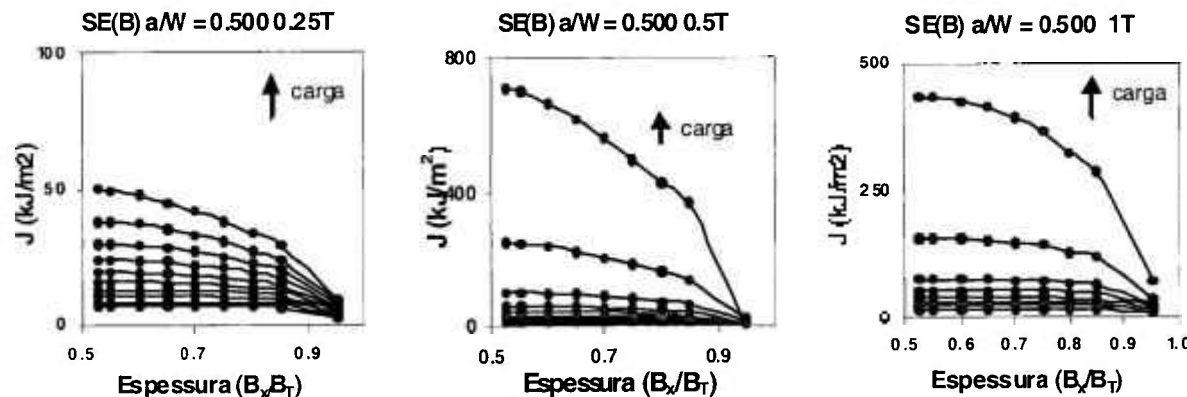


Figura B9: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 20$.

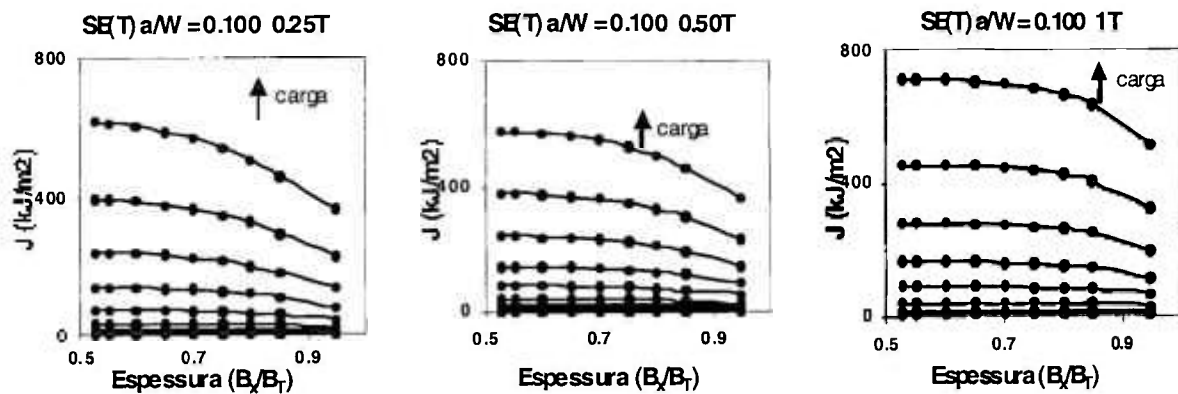


Figura B10: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 5$.

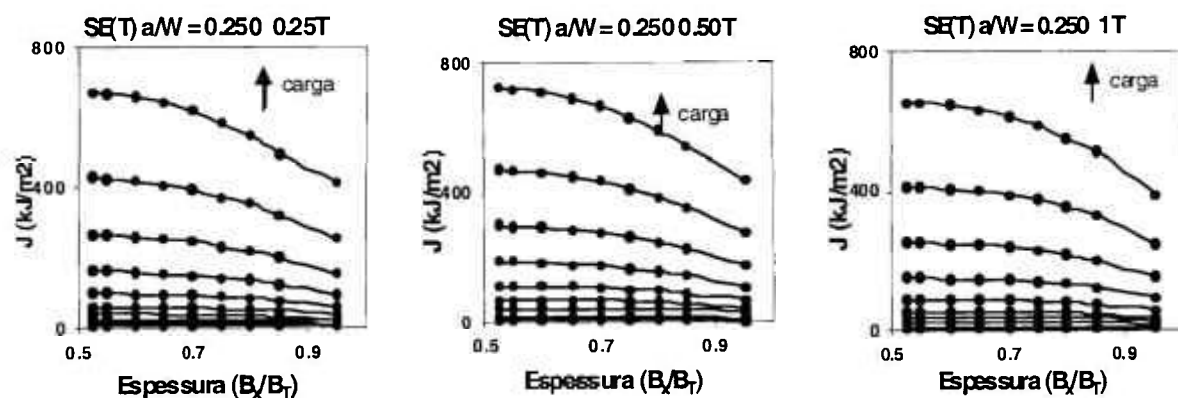


Figura B11: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 5$.

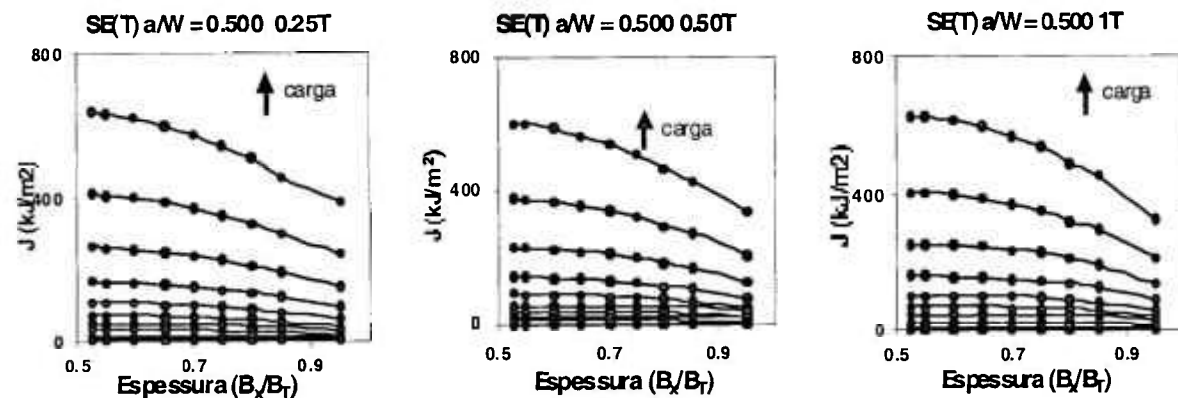


Figura B12: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 5$.

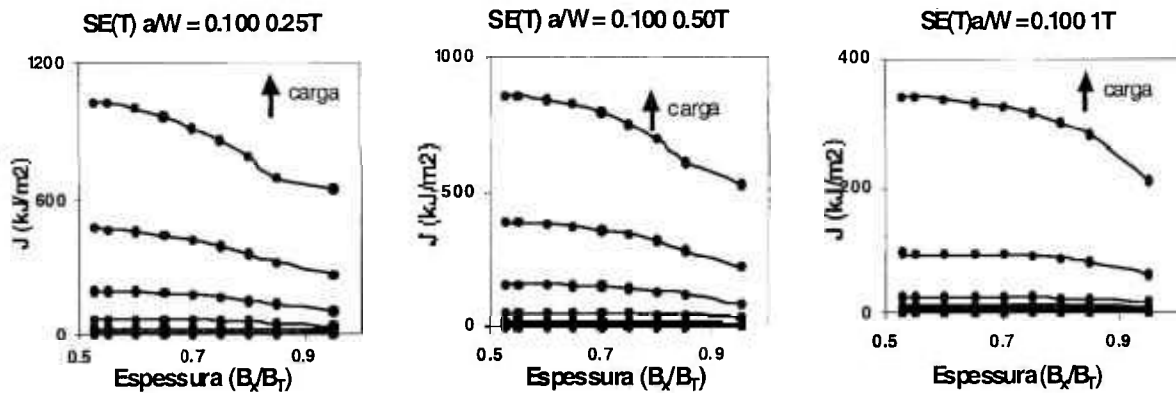


Figura B13: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 10$.

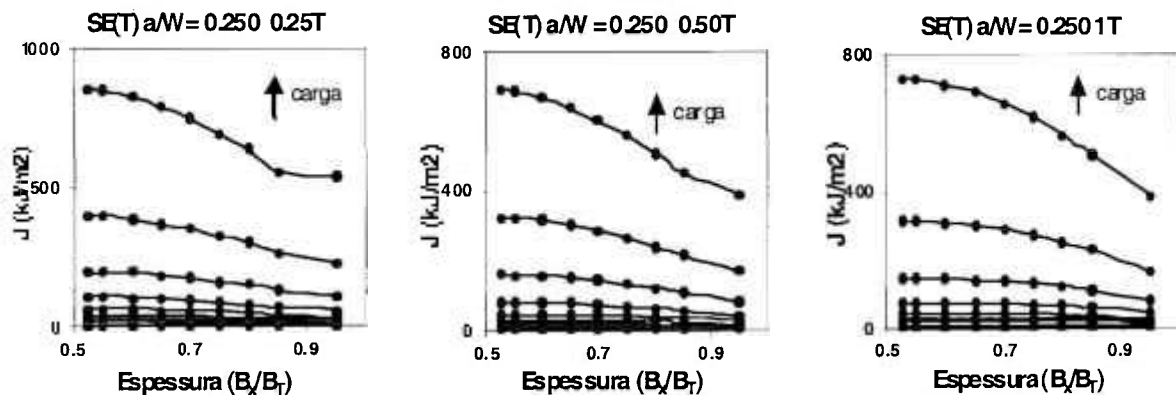


Figura B14:: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 10$.

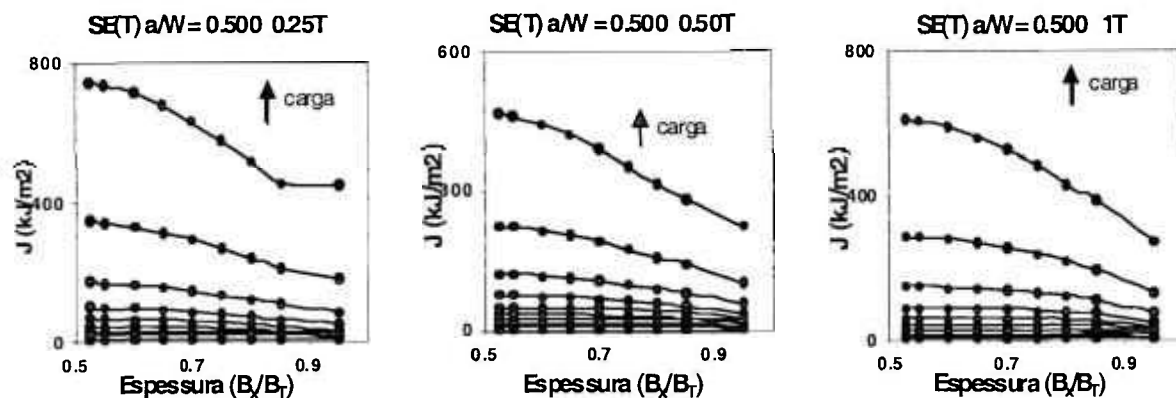


Figura B15: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 10$.

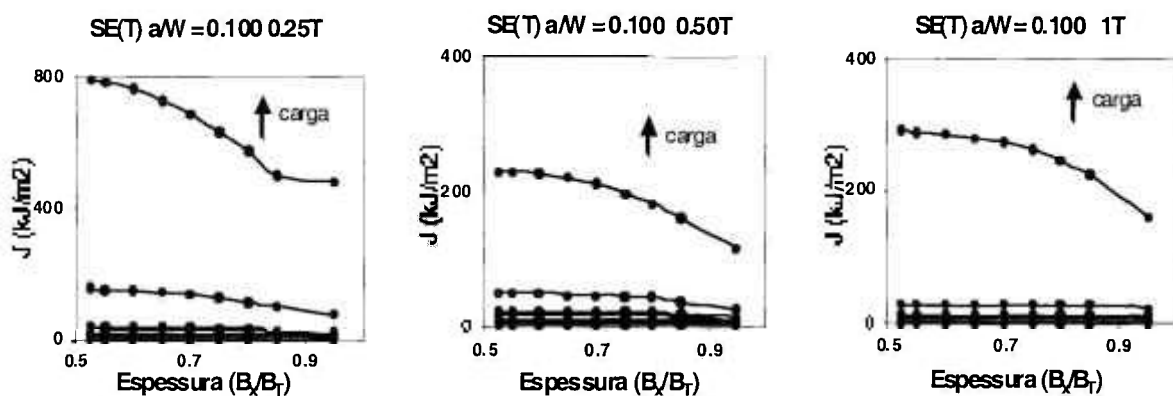


Figura B16: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 20$.

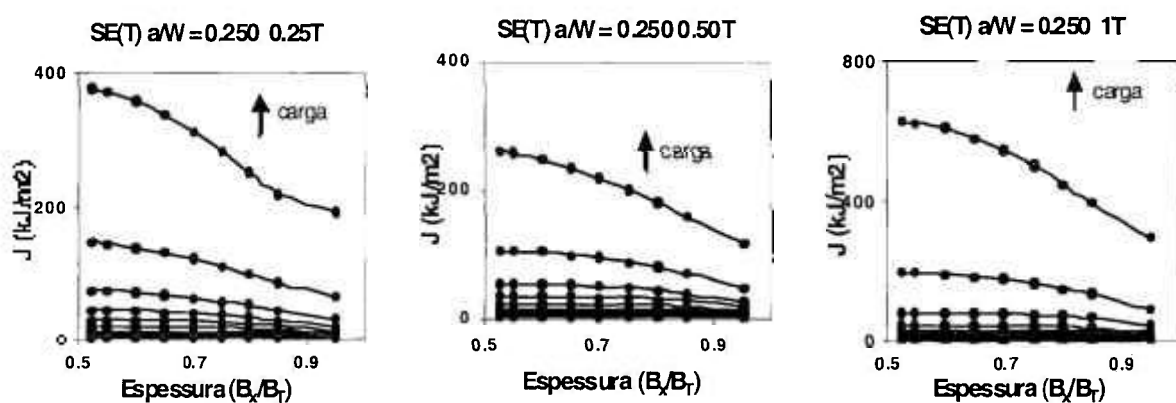


Figura B17: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 20$.

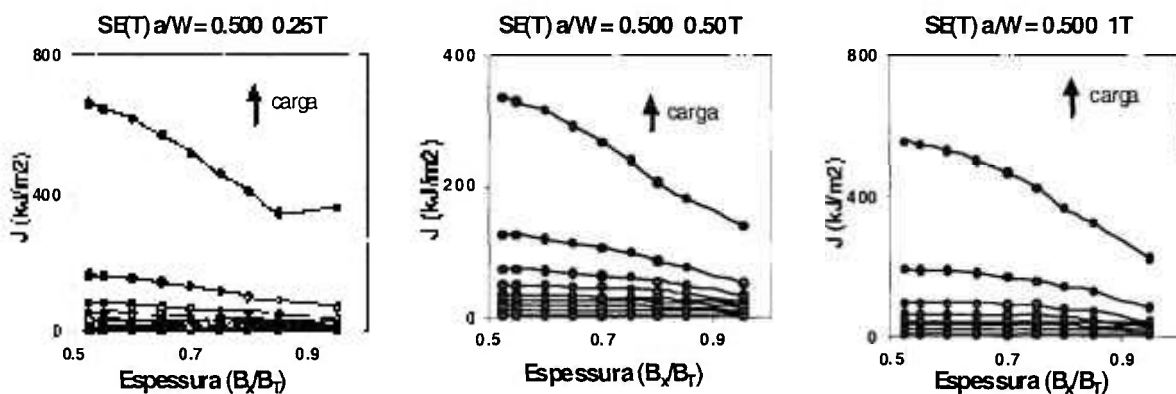


Figura B18: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 20$.

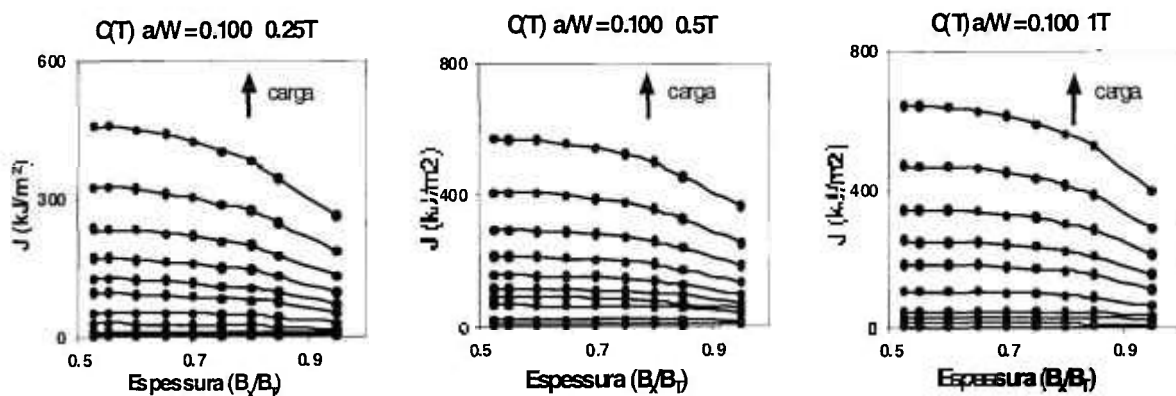


Figura B19: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T) n = 5$.

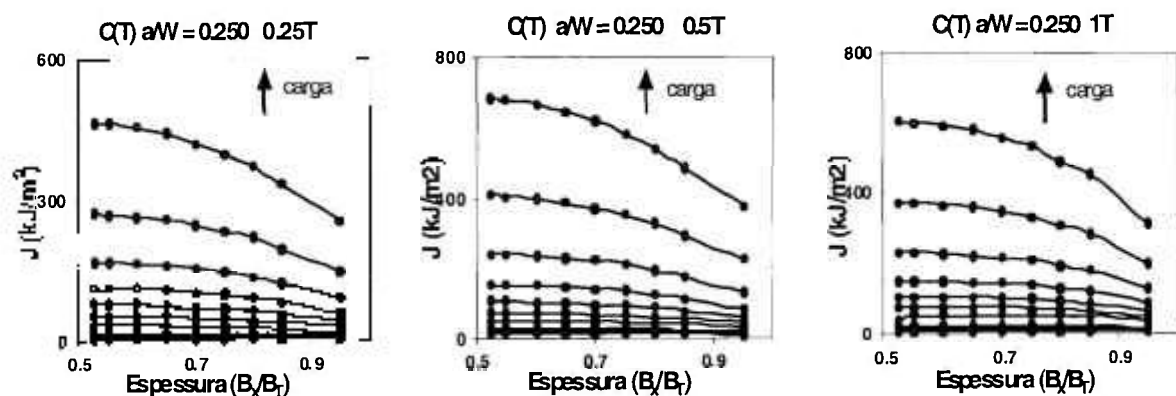


Figura B20: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T) n = 5$.

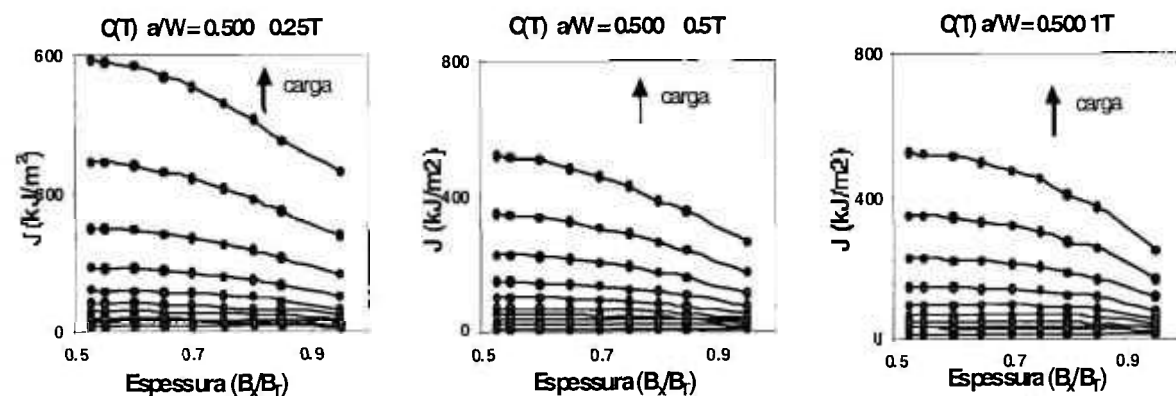


Figura B21: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T) n = 5$.

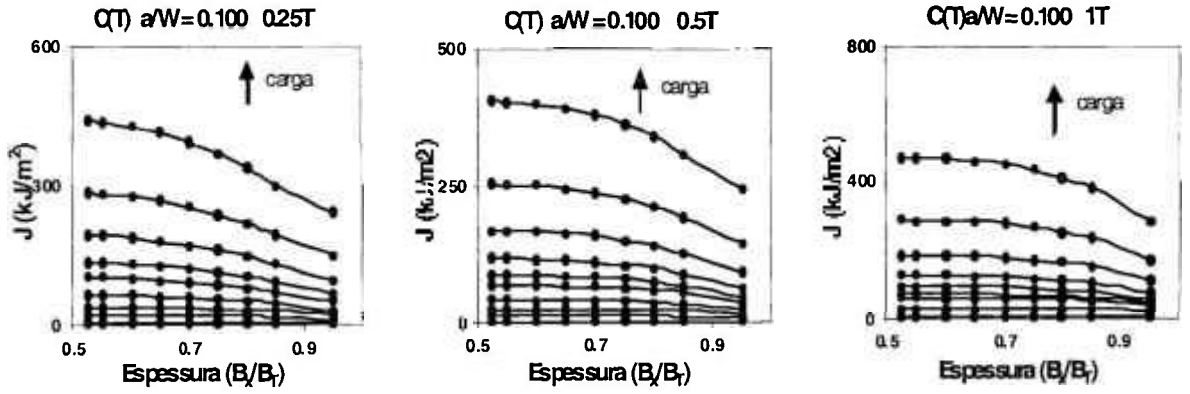


Figura B22: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 10$.

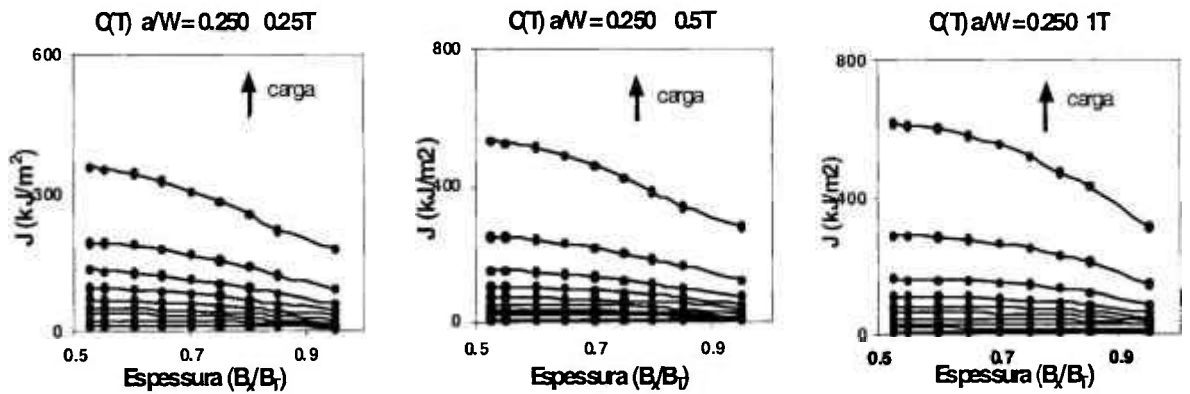


Figura B23: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 10$.

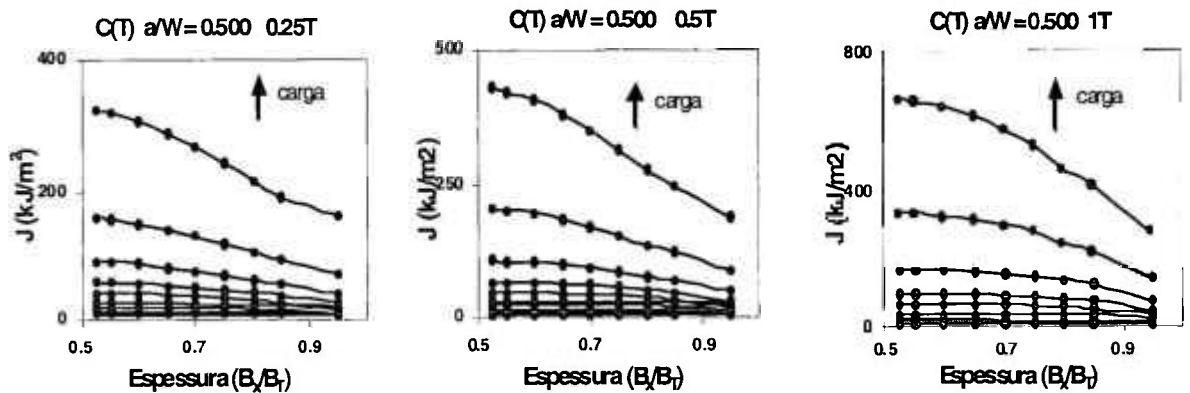


Figura B24: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T)$ $n = 10$.

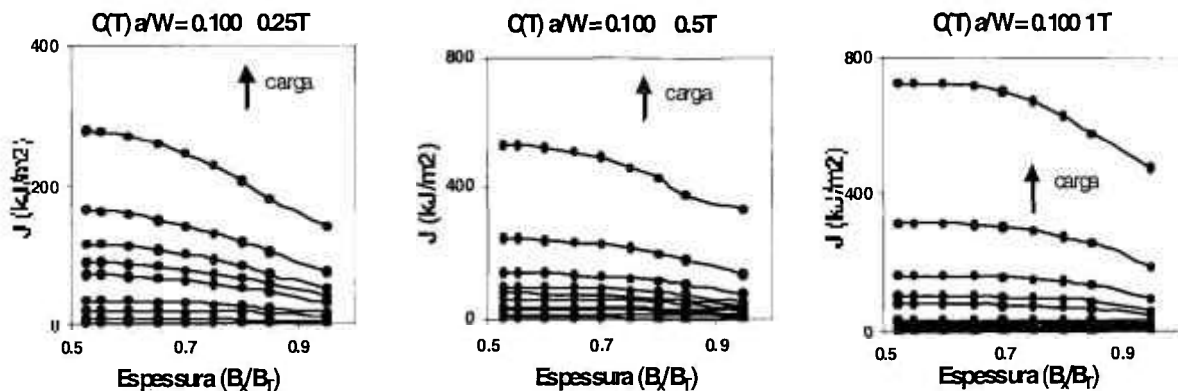


Figura B25: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T) n = 20$.

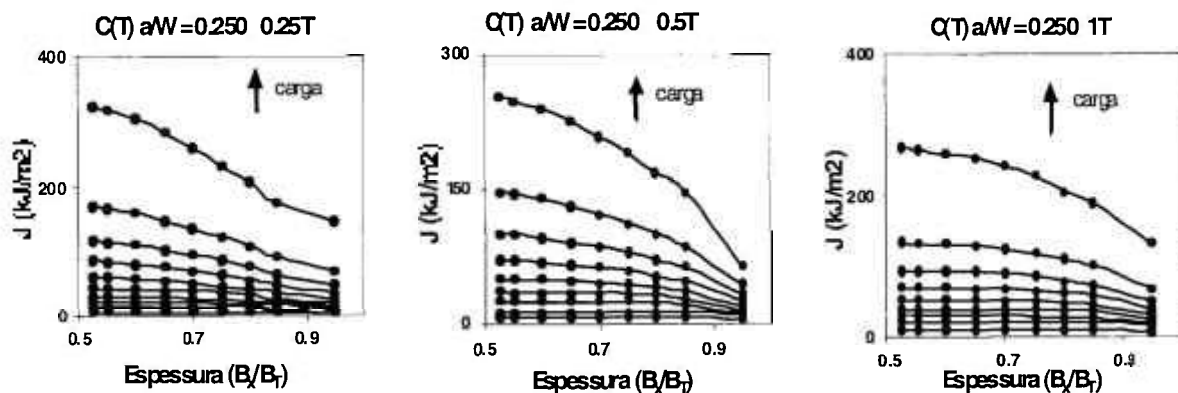


Figura B26: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T) n = 20$.

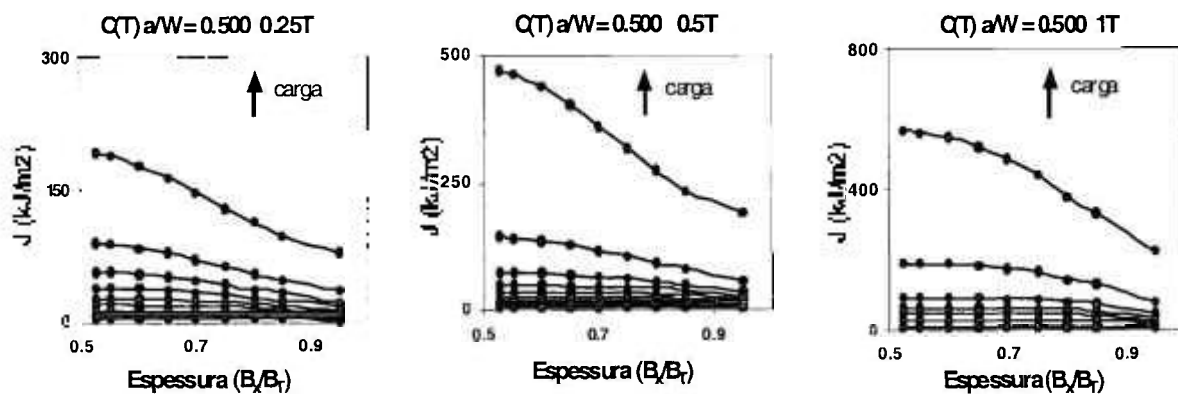
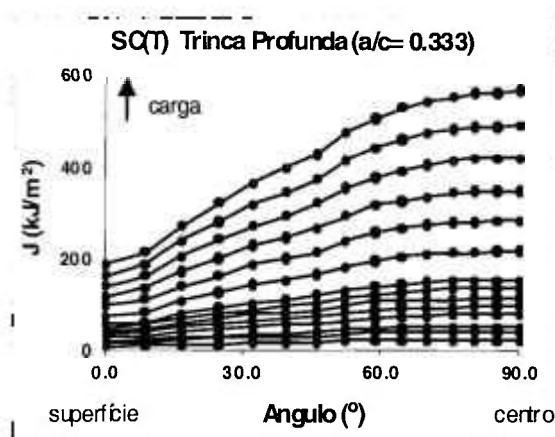
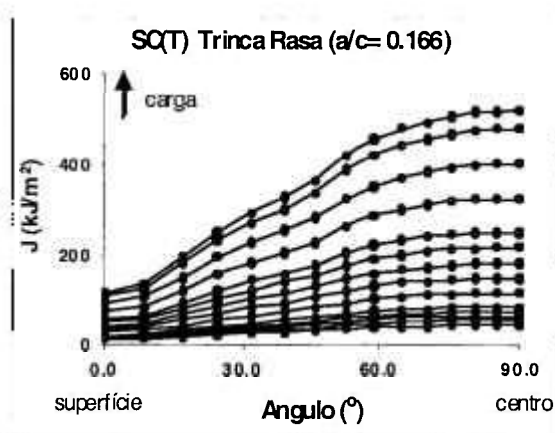


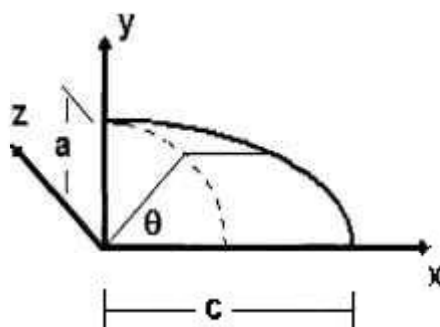
Figura B27: Variação da Integral J ao longo da espessura - $C(T) n = 20$.



(a)



(b)



(c)

Figura B28: Variação da Integral J ao longo da espessura - $SC(T)$ - $n = 5$:
 (a) Trinca Profunda - $a/c = 0.333$; (b) Trinca Rasa - $a/c = 0.166$; (c) Referência para medida do ângulo

APÊNDICE C: Variações do Parâmetro Q com a Espessura

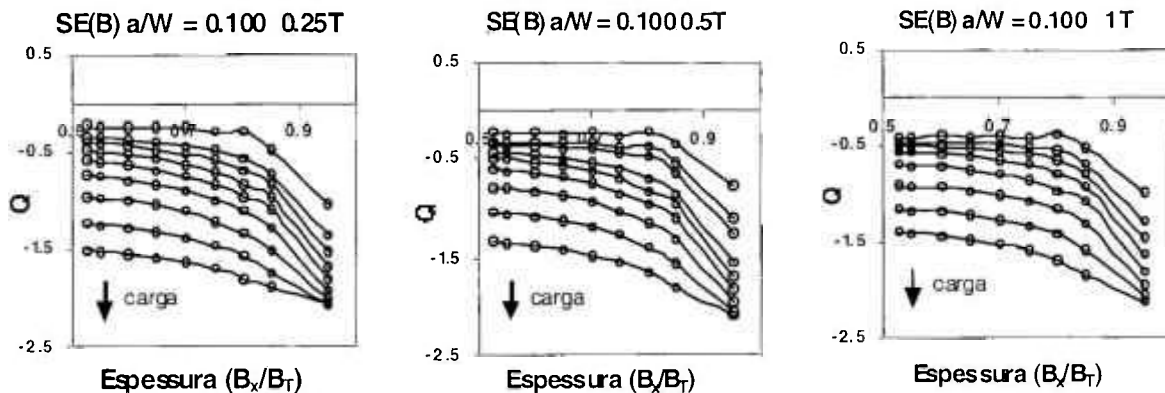


Figura C1: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 5$.

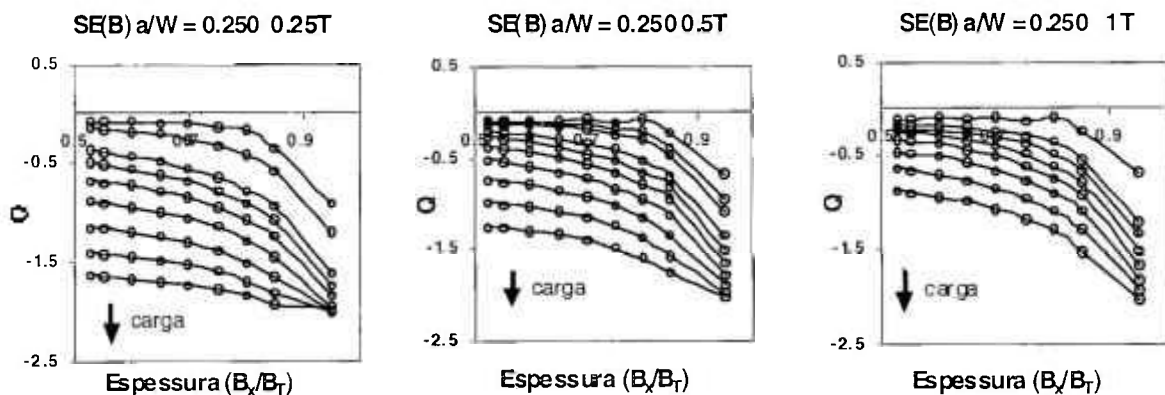


Figura C2: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 5$.

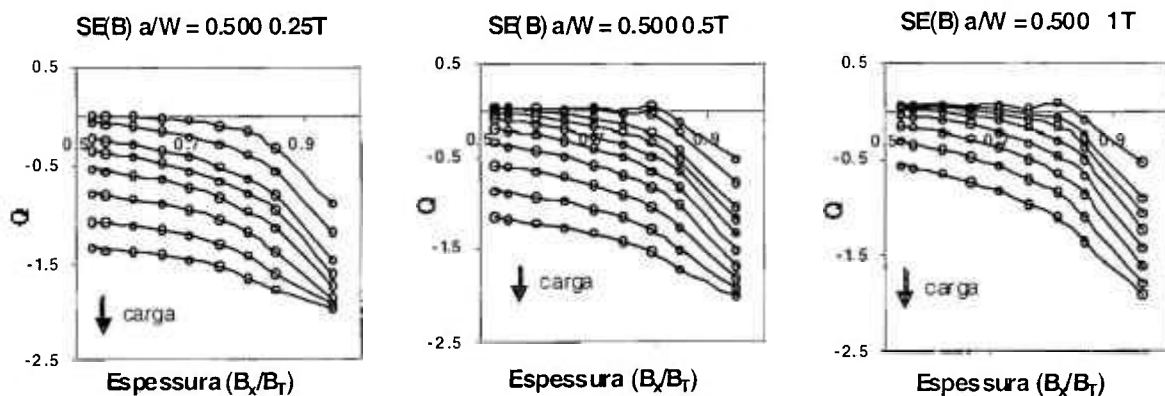


Figura C3: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 5$.

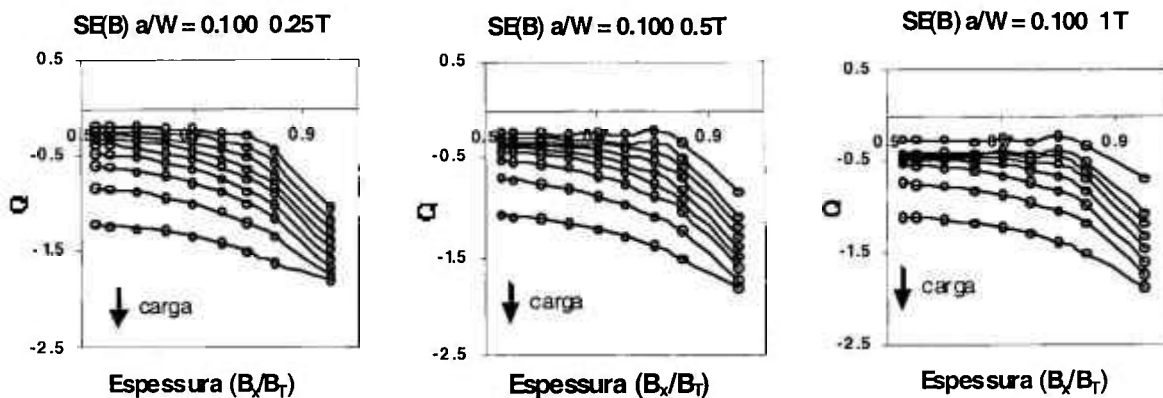


Figura C4: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 10$.

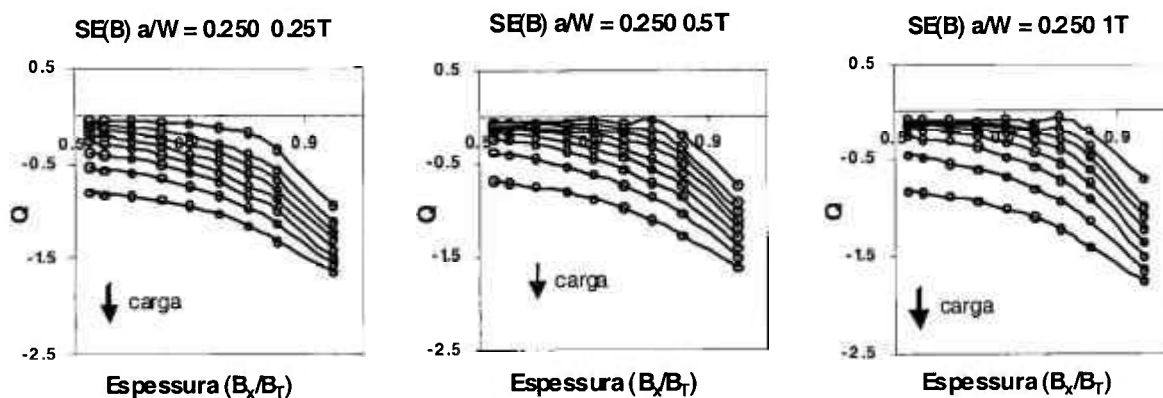


Figura C5: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 10$.

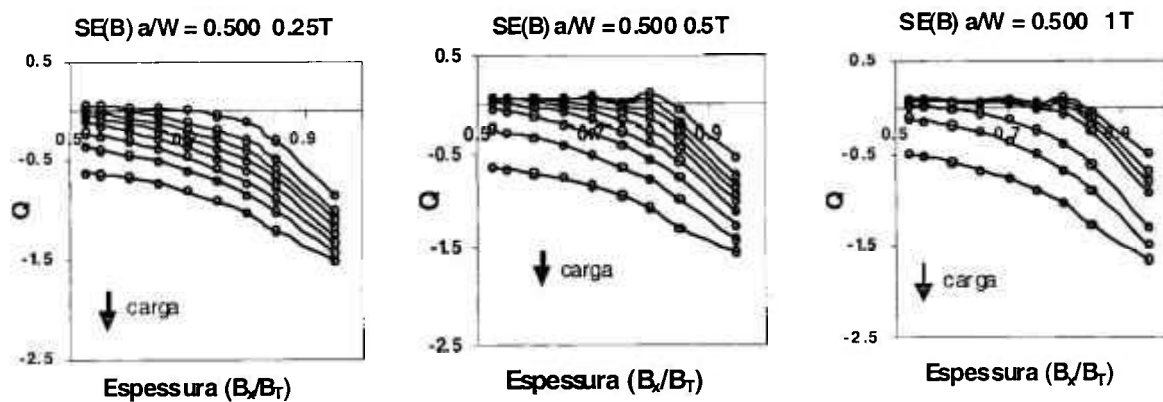


Figura C6: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B)$ $n = 10$.

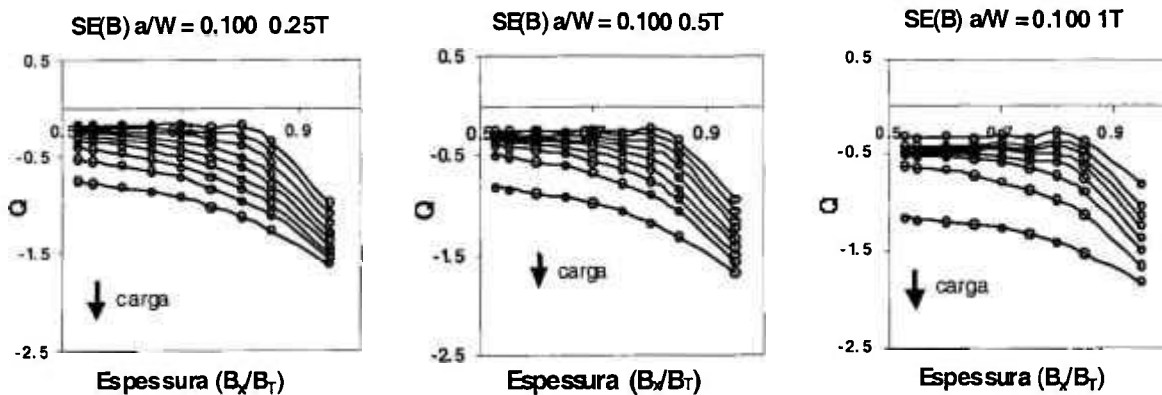


Figura C7: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B) \ n = 20$.

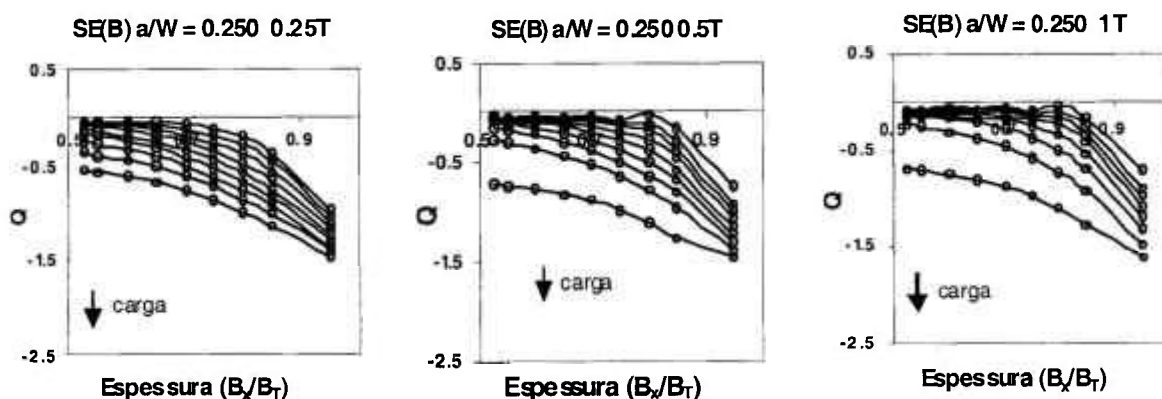


Figura C8: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B) \ n = 20$.

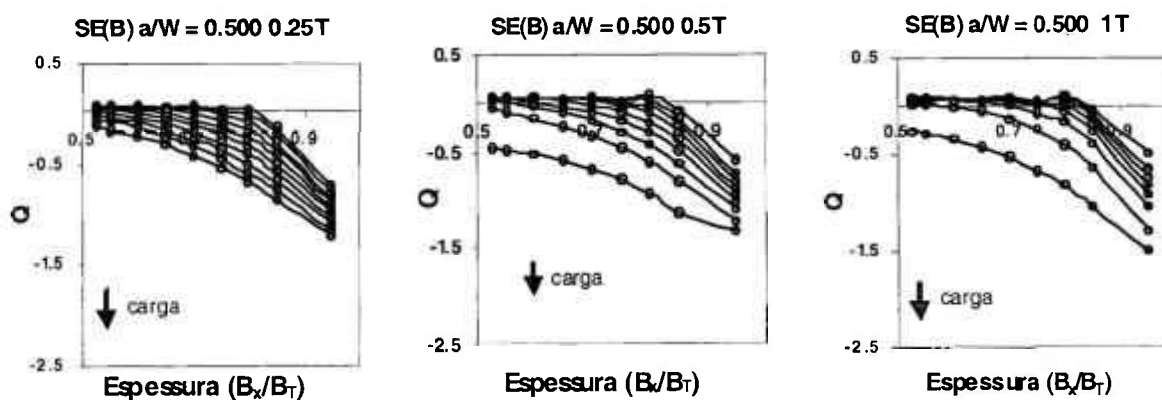


Figura C9: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(B) \ n = 20$.

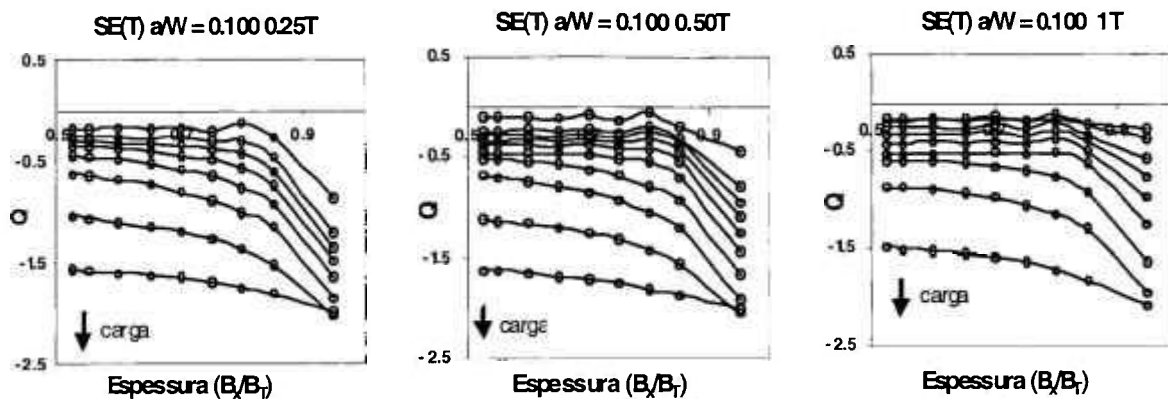


Figura C13: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 10$.

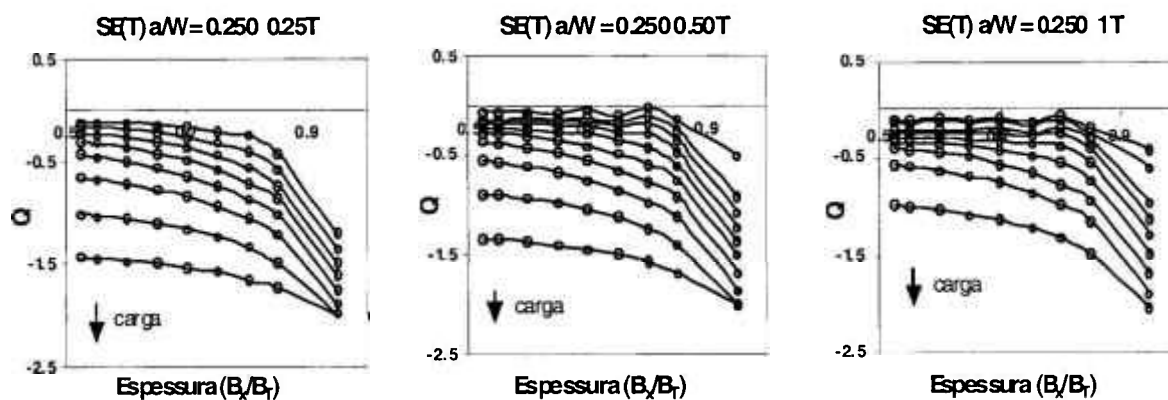


Figura C14: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 10$.

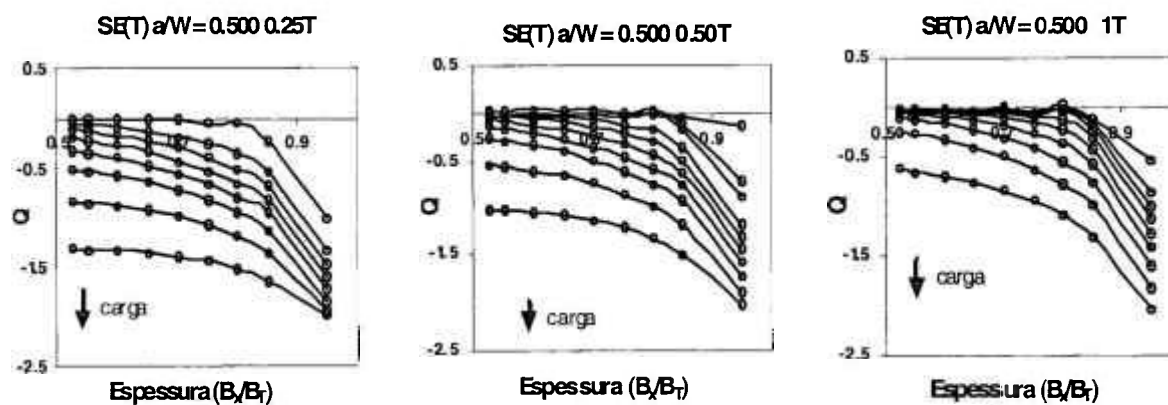


Figura C15: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T)$ $n = 10$.

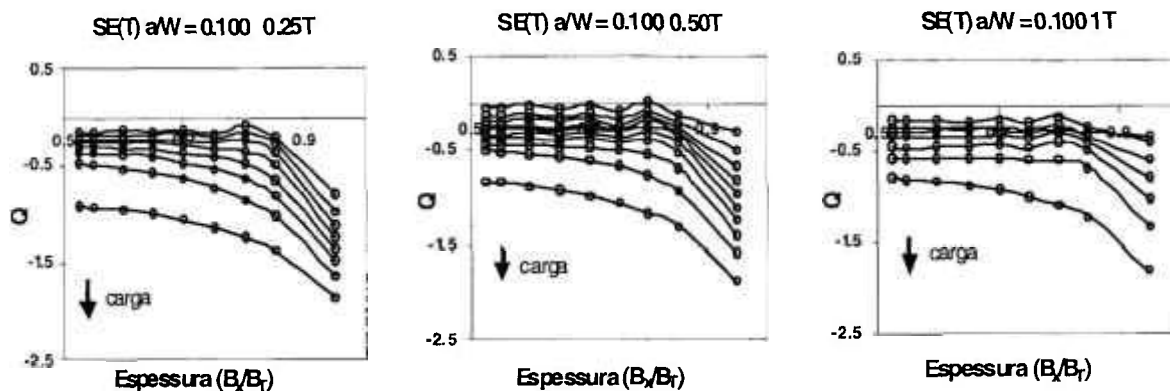


Figura C16: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T) n = 20$.

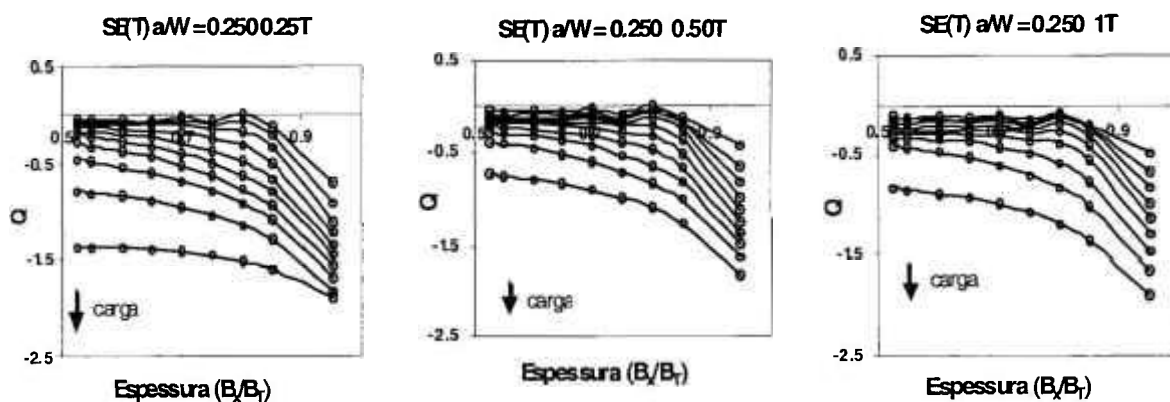


Figura C17: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T) n = 20$.

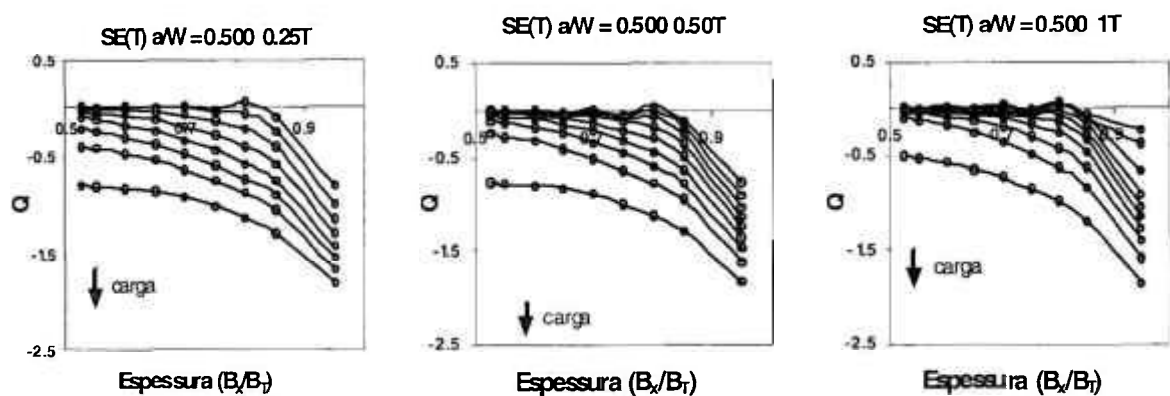


Figura C18: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SE(T) n = 20$.

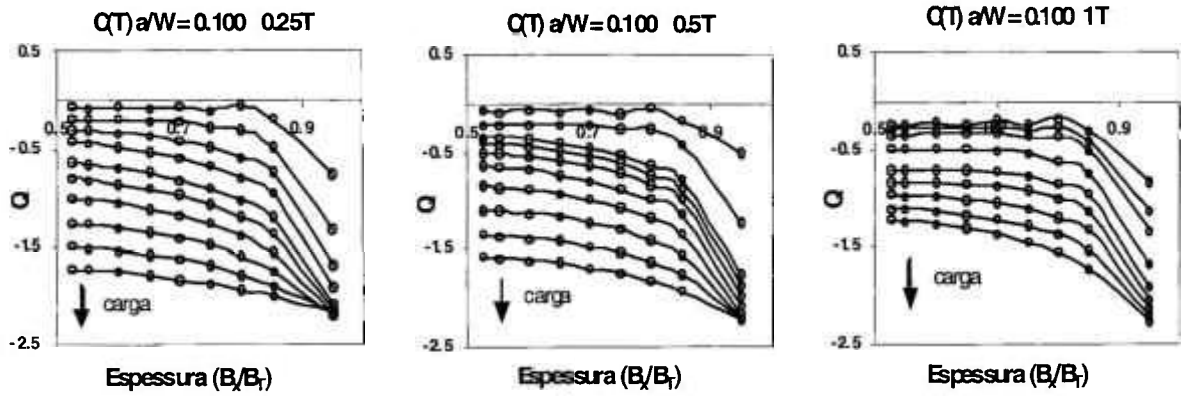


Figura C19: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T) n = 5$.

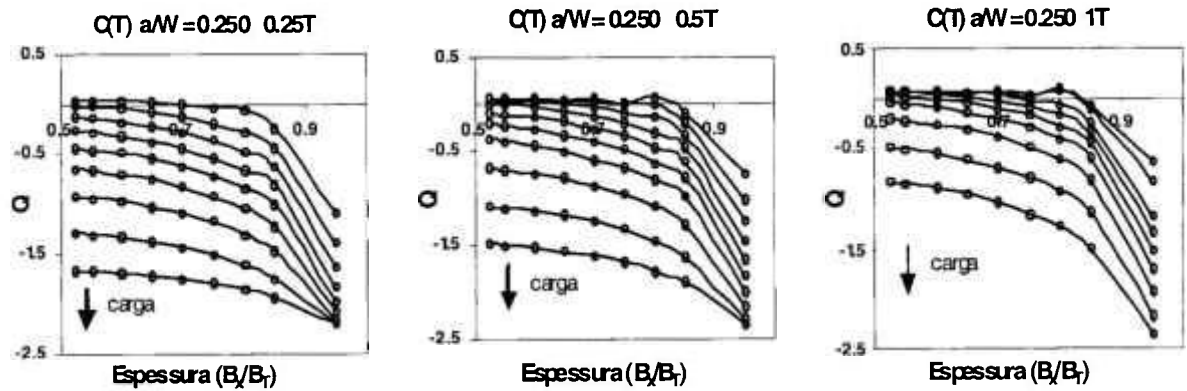


Figura C20: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T) n = 5$.

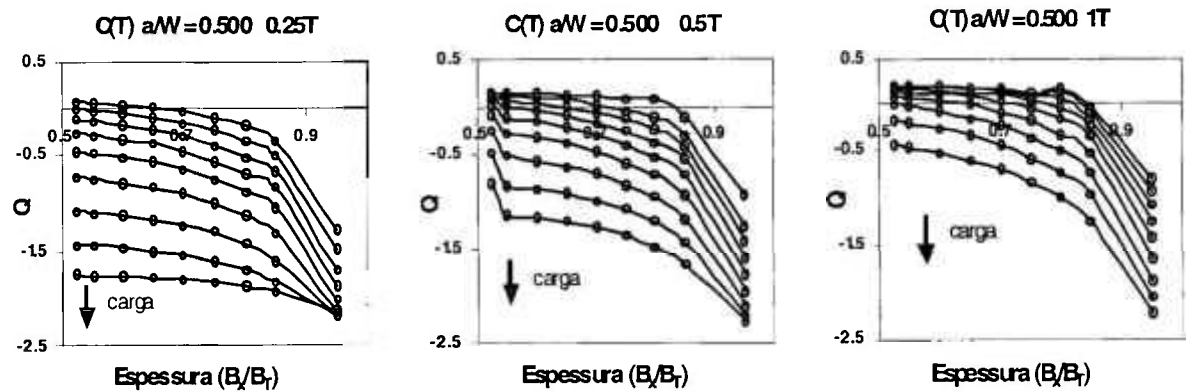


Figura C21: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T) n = 5$.

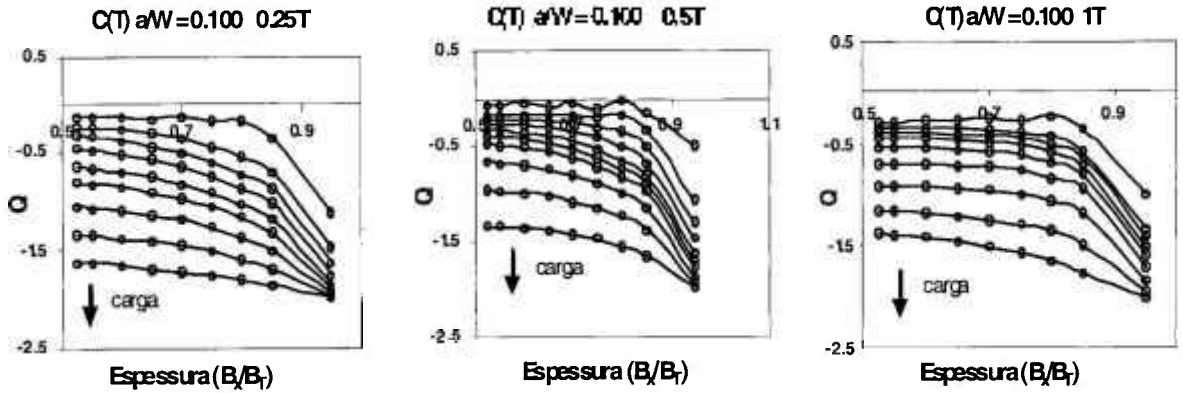


Figura C22: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T) n = 10$.

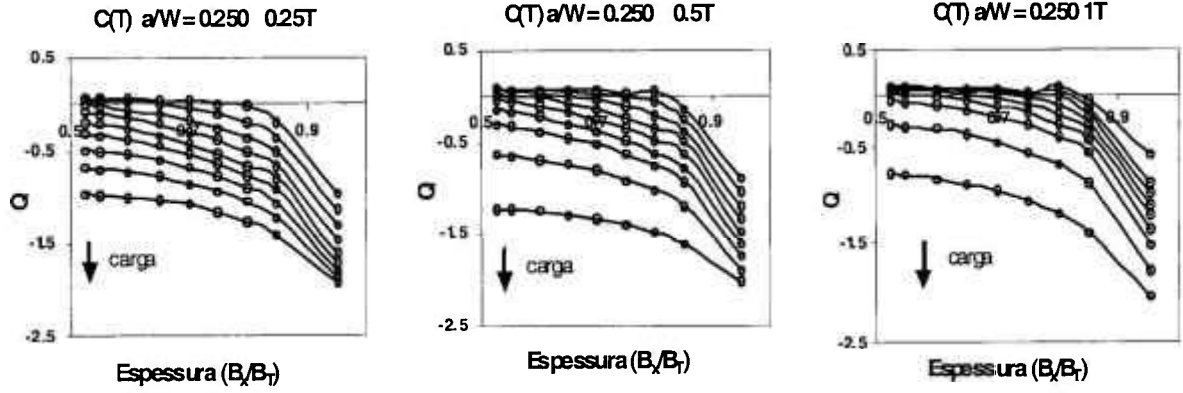


Figura C23: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T) n = 10$.

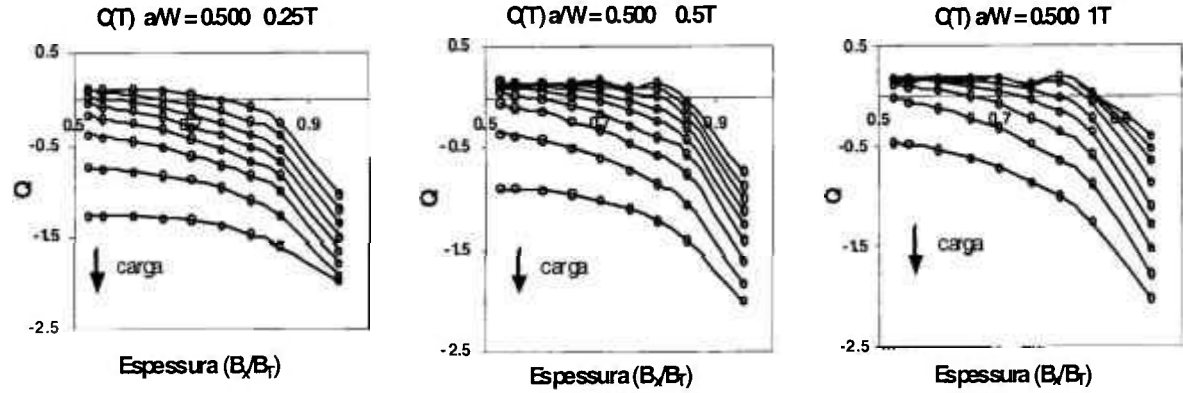


Figura C24: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T) n = 10$.

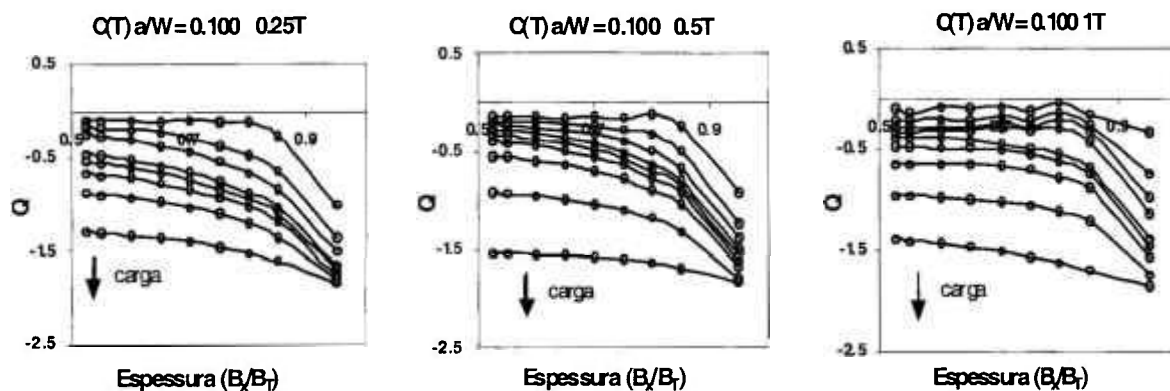


Figura C25: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T) n = 20$.

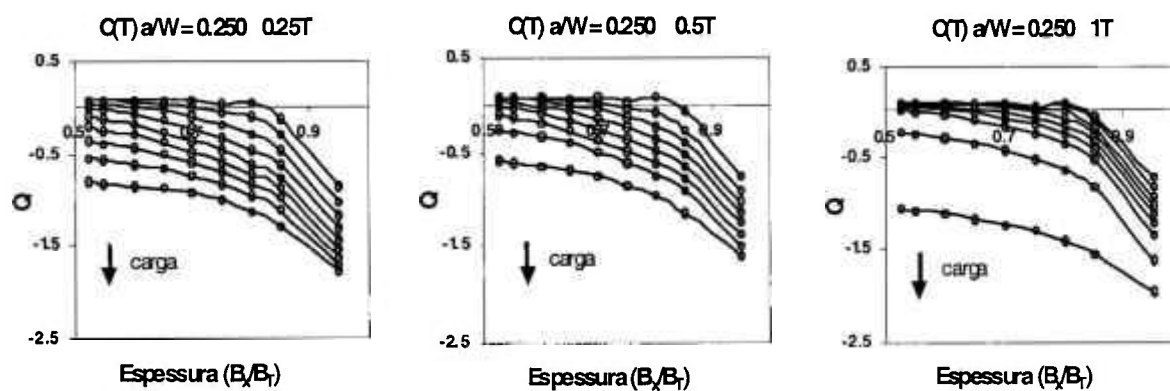


Figura C26: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T) n = 20$.

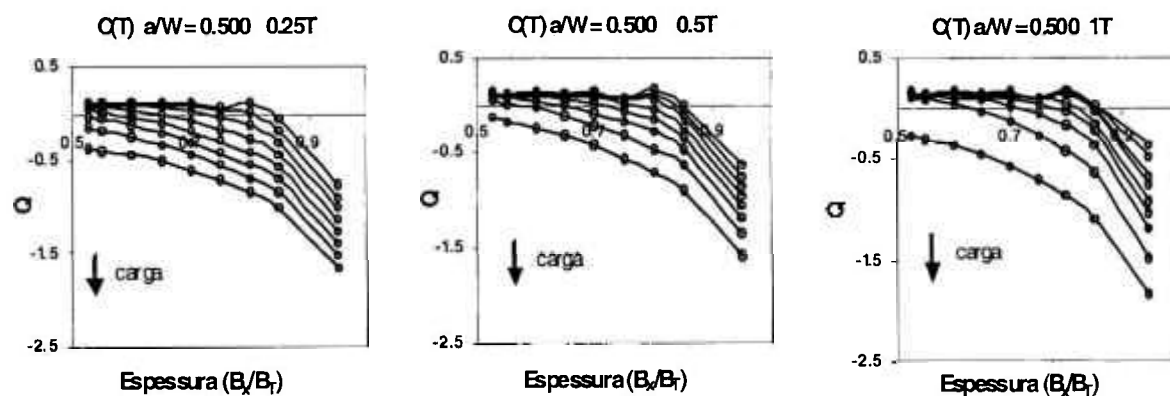


Figura C27: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $C(T) n = 20$.

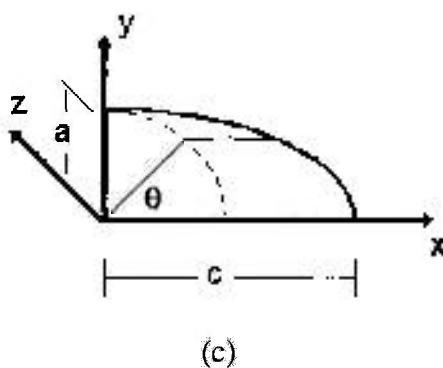
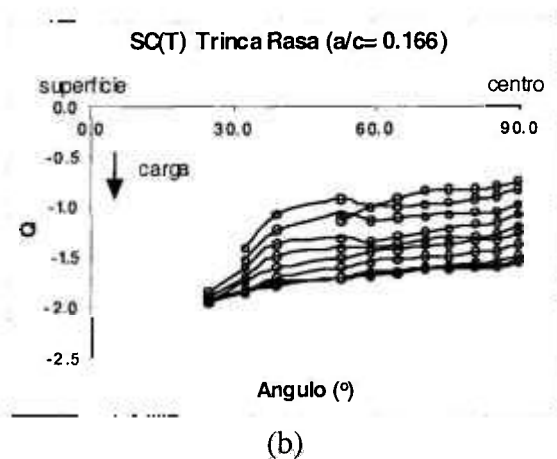
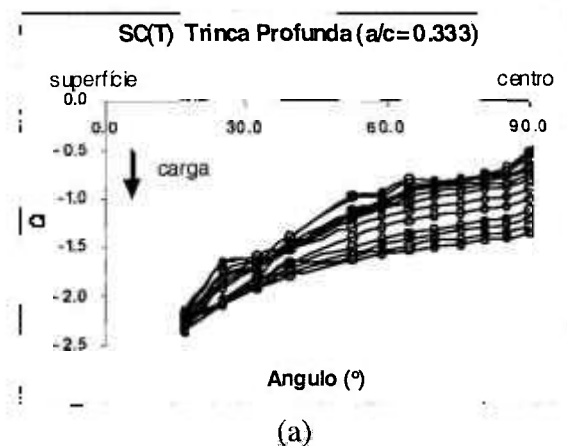


Figura C28: Variação do Parâmetro Q ao longo da espessura - $SC(T)$ - $n = 5$:
 (a) Trinca Profunda - $a/c = 0.333$; (b) Trinca Rasa - $a/c = 0.166$; (c) Referência para medida do ângulo.

APÊNDICE D: Trajetórias $J-Q$

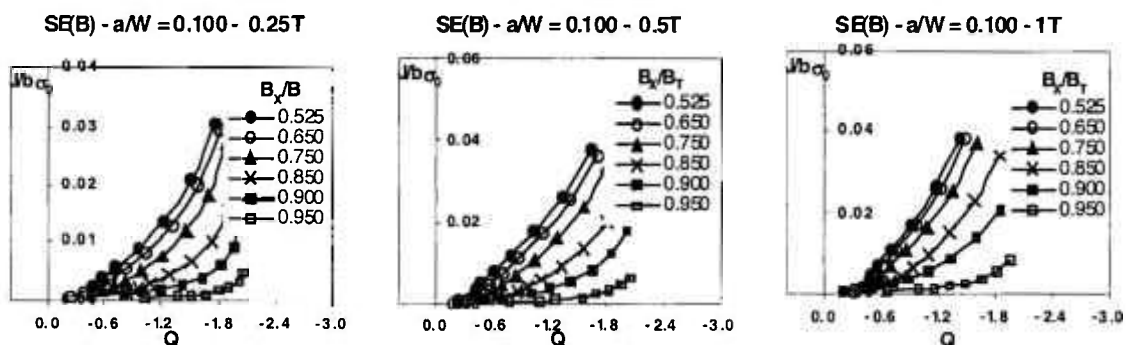


Figura D1: Trajetória $J-Q$ $SE(B)$ $n = 5$.

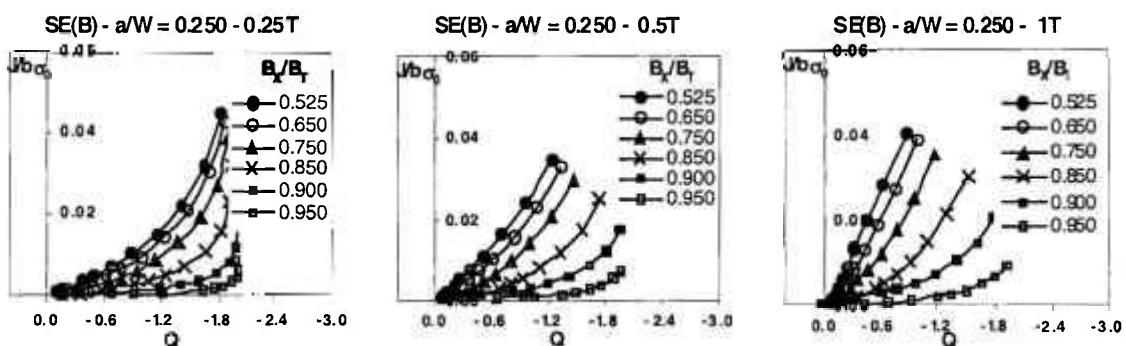


Figura D2: Trajetória $J-Q$ $SE(B)$ $n = 5$.

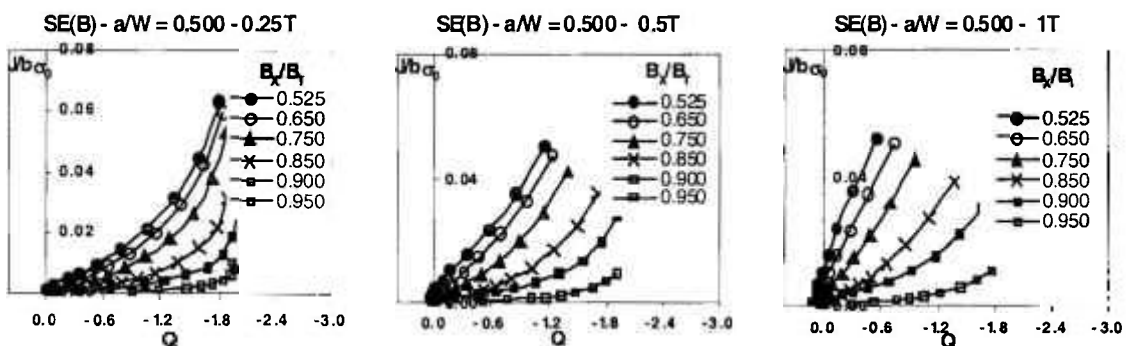


Figura D3: Trajetória $J-Q$ $SE(B)$ $n = 5$.

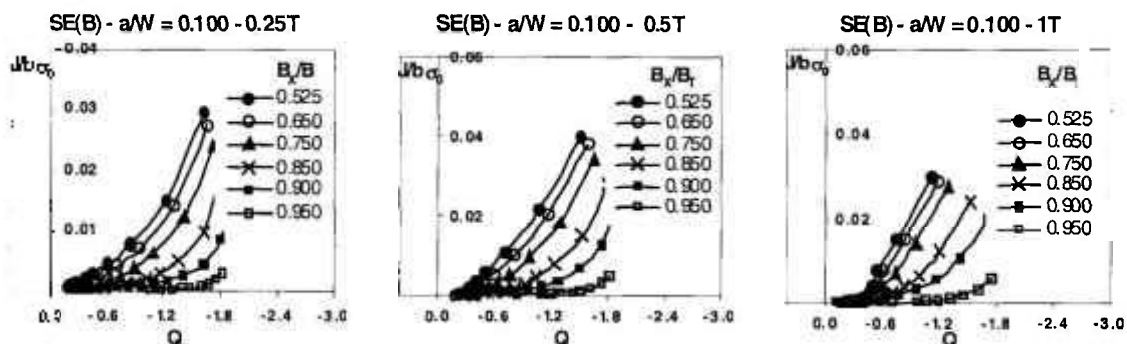


Figura D4: Trajetória $J-Q$ $SE(B)$ $n = 10$.

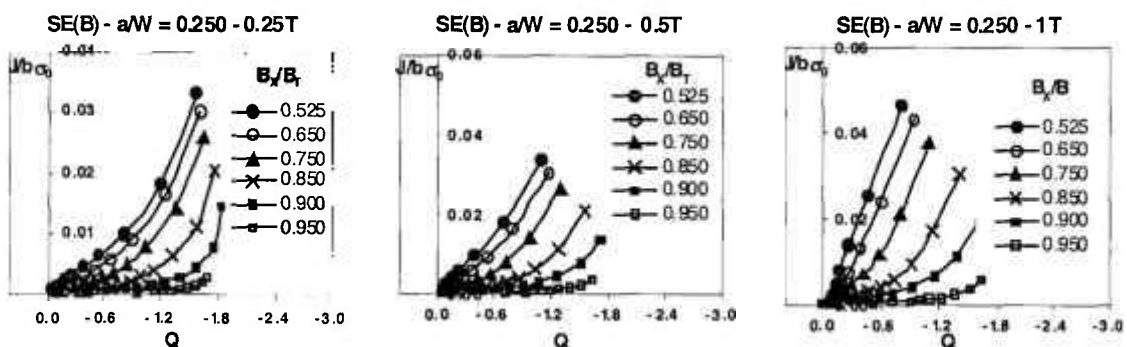


Figura D5: Trajetória $J-Q$ $SE(B)$ $n = 10$.

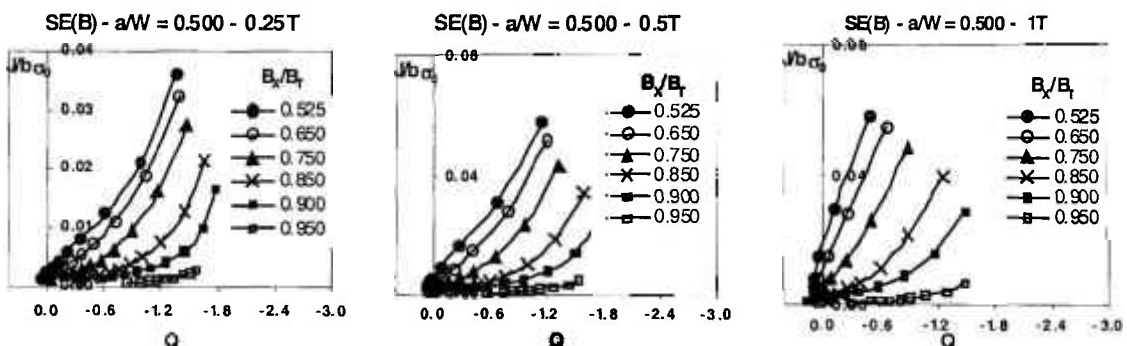


Figura D6: Trajetória $J-Q$ $SE(B)$ $n = 10$.

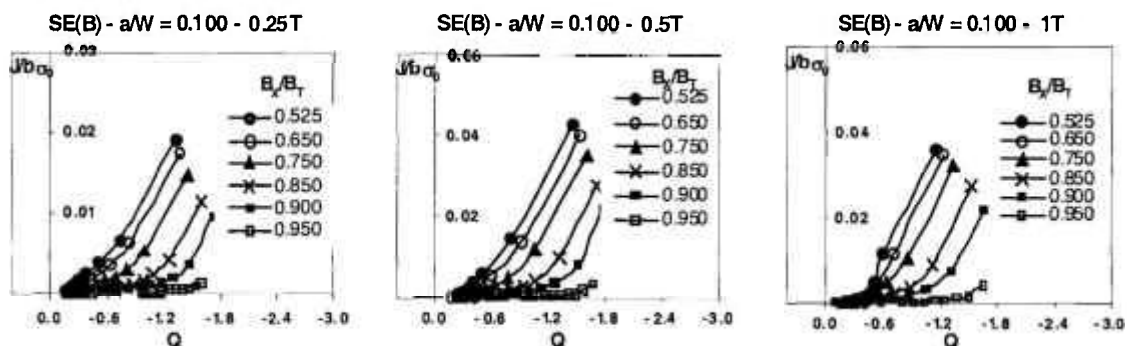


Figura D7: Trajetória $J-Q$ $SE(B)$ $n = 20$.

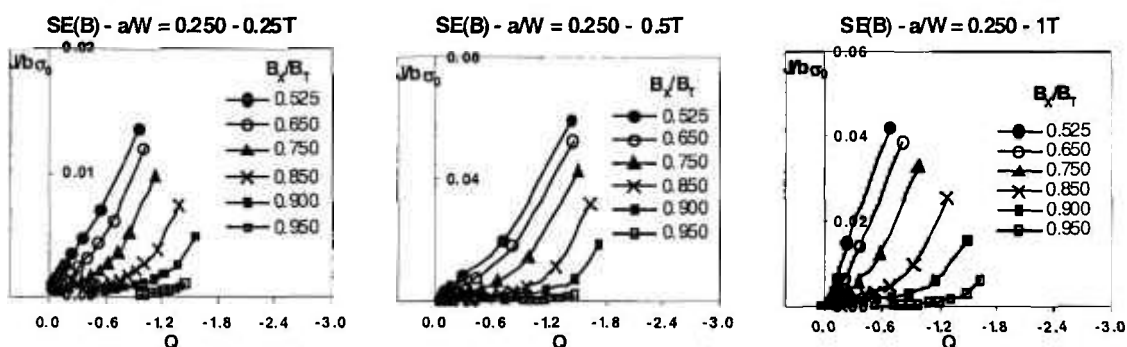


Figura D8: Trajetória $J-Q$ $SE(B)$ $n = 20$.

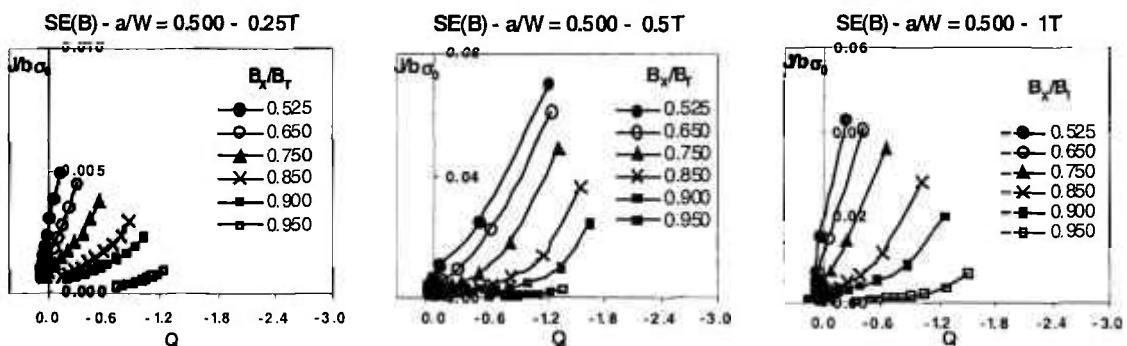


Figura D9: Trajetória $J-Q$ $SE(B)$ $n = 20$.

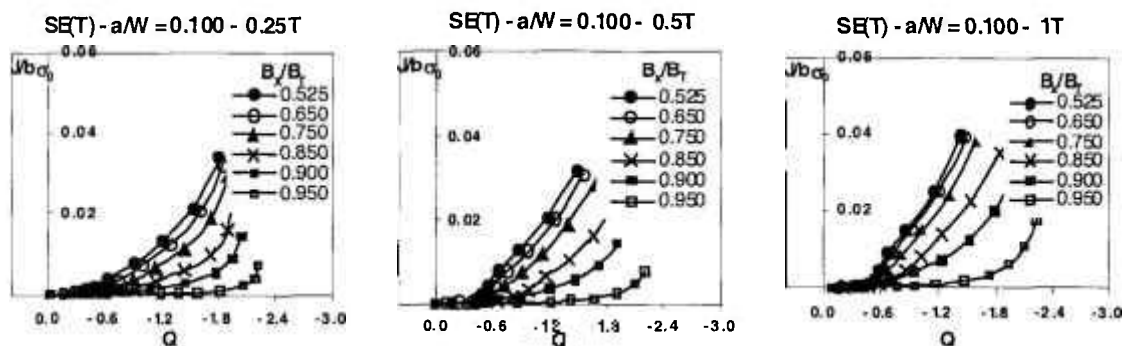


Figura D10: Trajetória $J-Q$ $SE(T)$ $n = 5$.

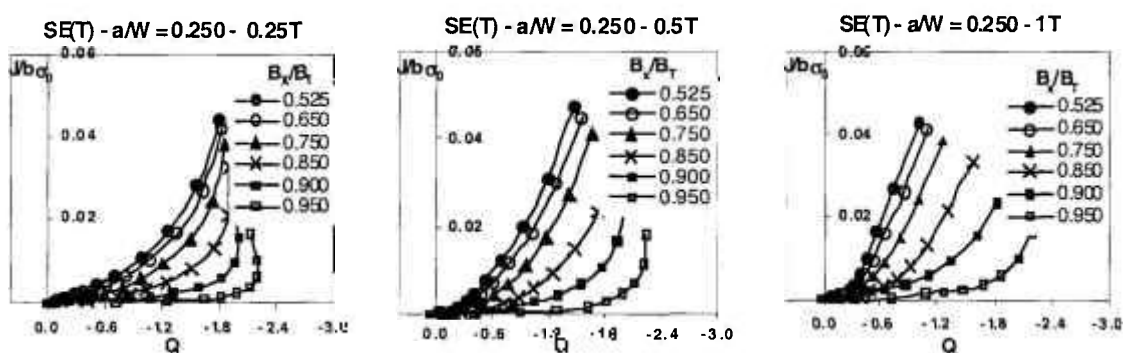


Figura D11: Trajetória $J-Q$ $SE(T)$ $n = 5$.

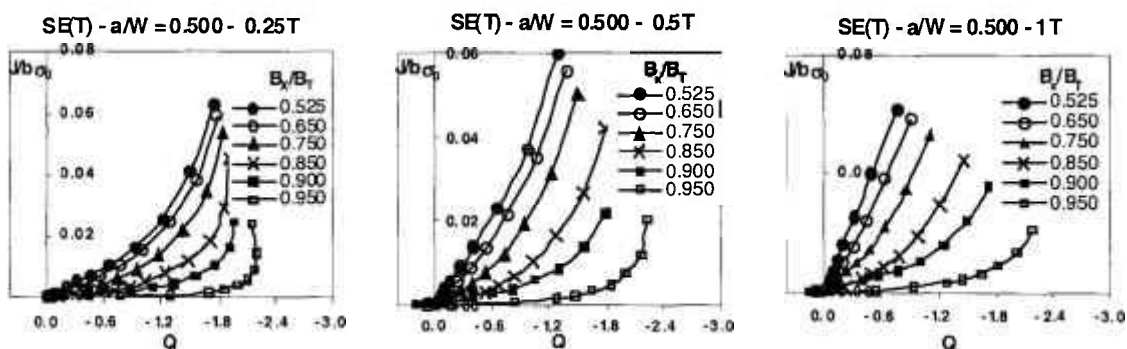


Figura D12: Trajetória $J-Q$ $SE(T)$ $n = 5$.

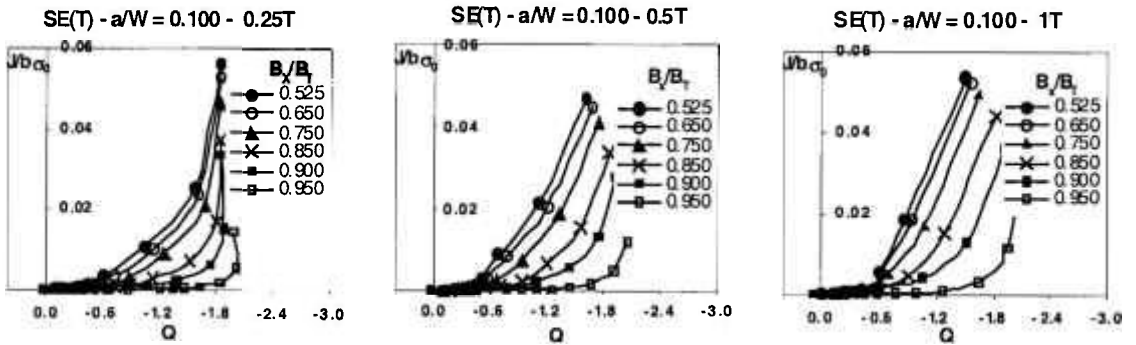


Figura D13: Trajetória $J-Q$ $SE(T)$ $n = 10$.

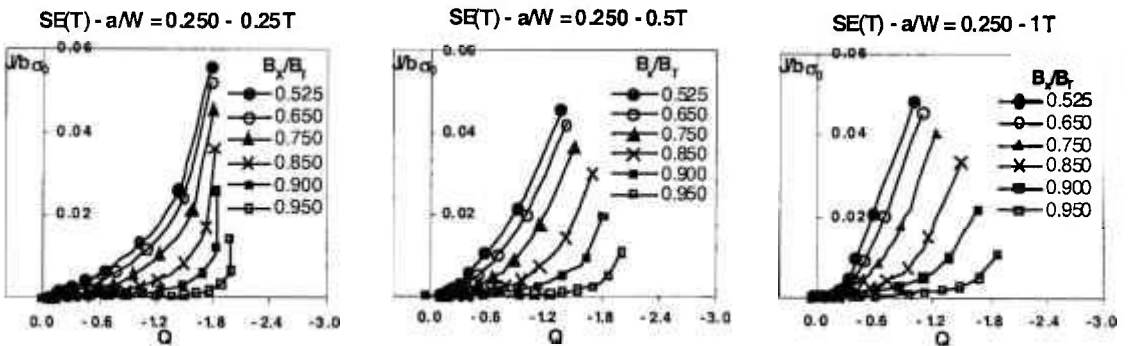


Figura D14: Trajetória $J-Q$ $SE(T)$ $n = 10$.

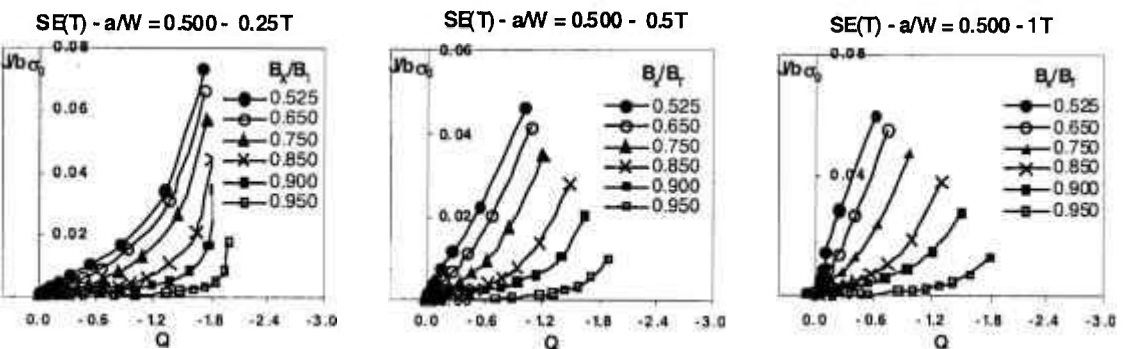


Figura D15: Trajetória $J-Q$ $SE(T)$ $n = 10$.

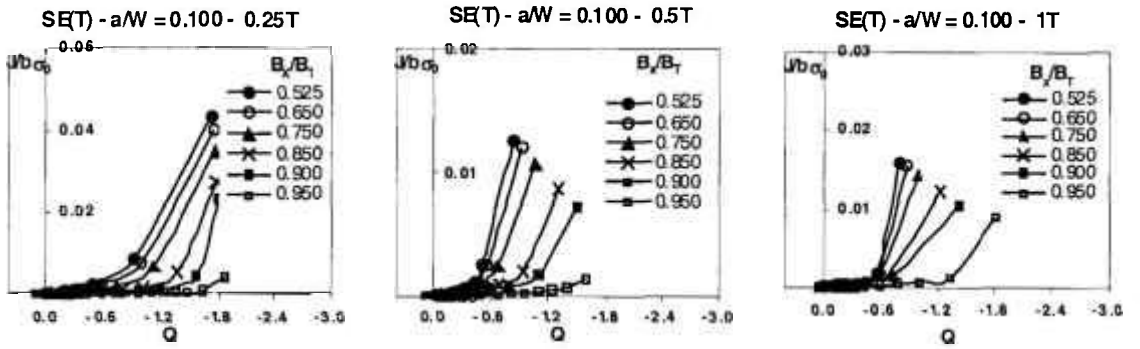


Figura D16: Trajetória $J-Q$ $SE(T)$ $n = 20$.

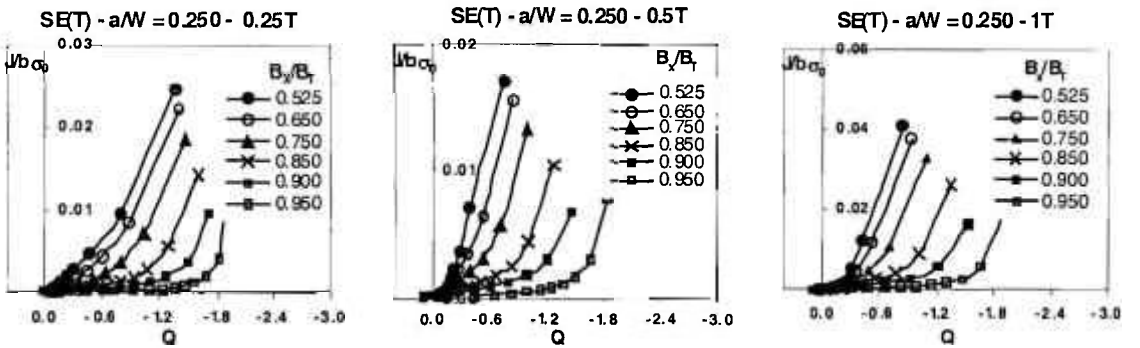


Figura D17: Trajetória $J-Q$ $SE(T)$ $n = 20$.

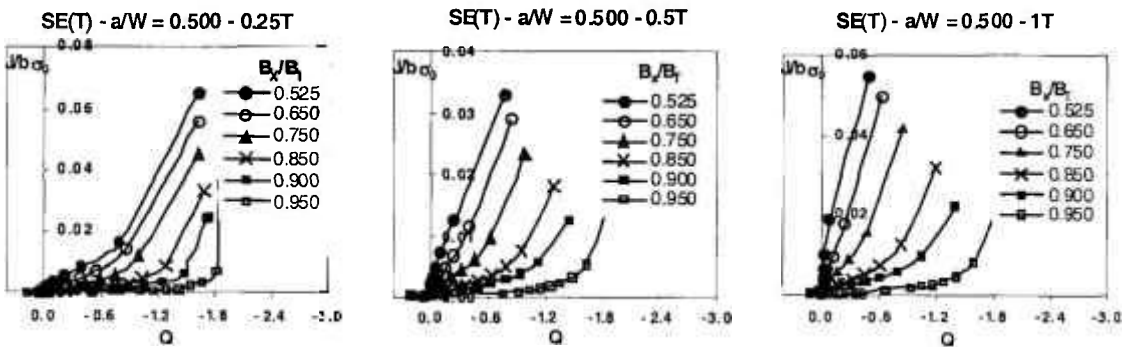


Figura D18: Trajetória $J-Q$ $SE(T)$ $n = 20$.

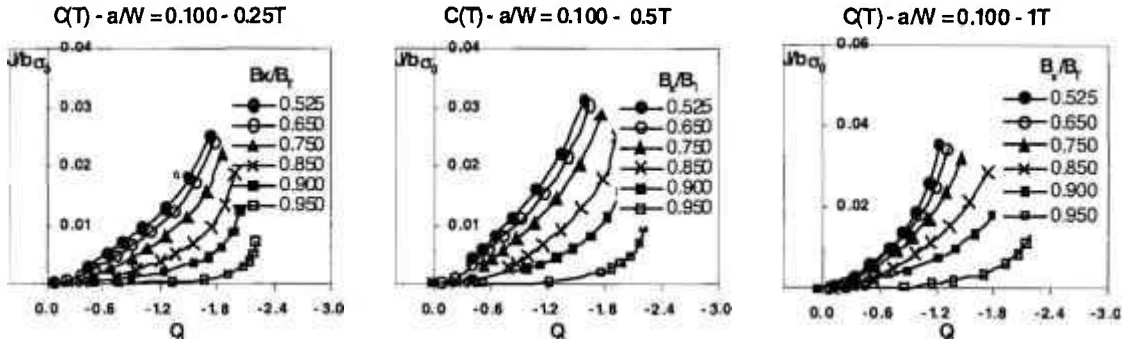


Figura D19: Trajetória $J-Q$ $C(T)$ $n = 5$.

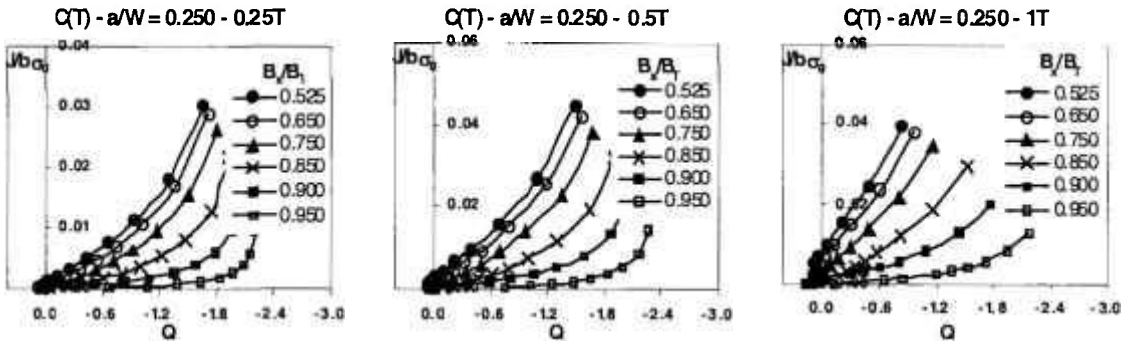


Figura D20: Trajetória $J-Q$ $C(T)$ $n = 5$.

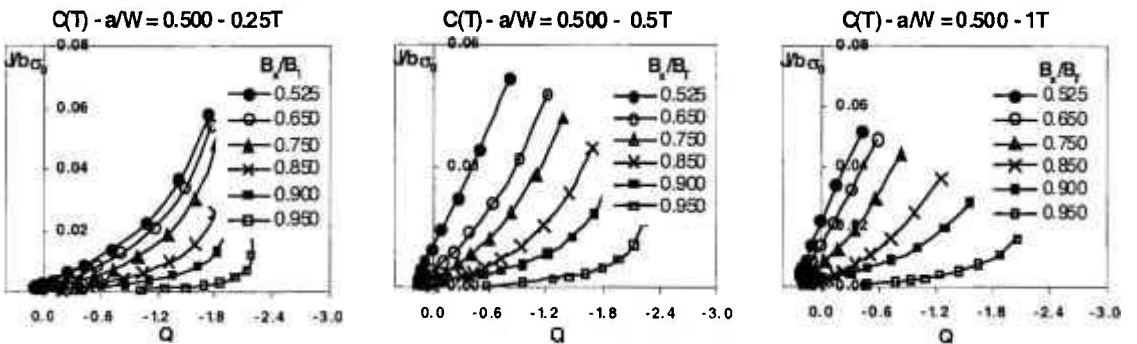
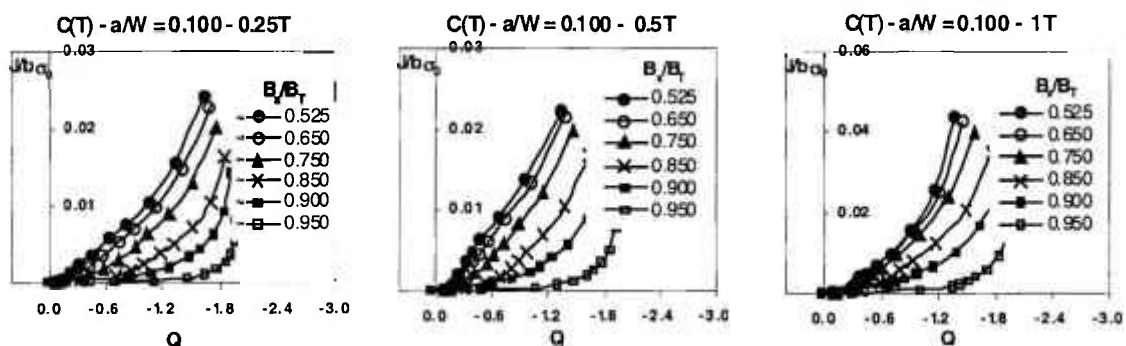
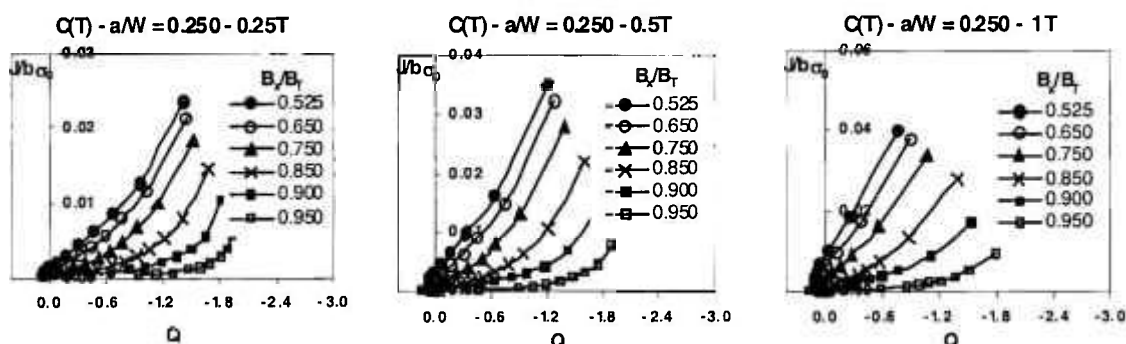
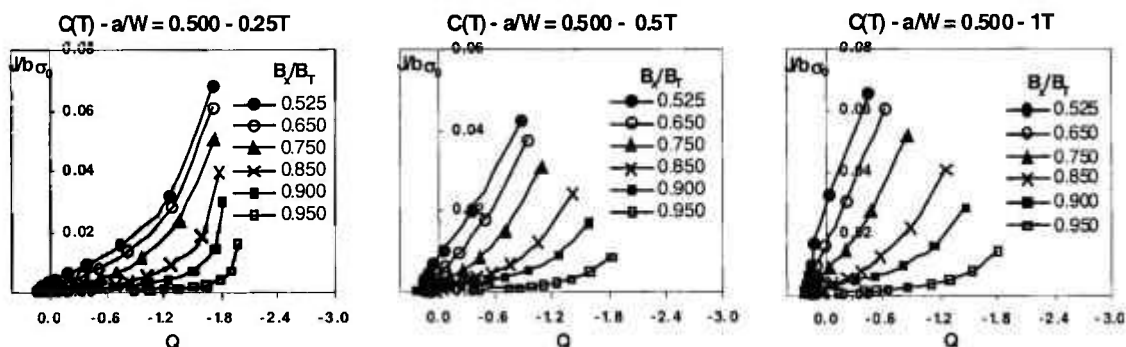


Figura D21: Trajetória $J-Q$ $C(T)$ $n = 5$.

Figura D22: Trajetória $J-Q C(T)$ $n = 10$.Figura D23: Trajetória $J-Q C(T)$ $n = 10$.Figura D24: Trajetória $J-Q C(T)$ $n = 10$.

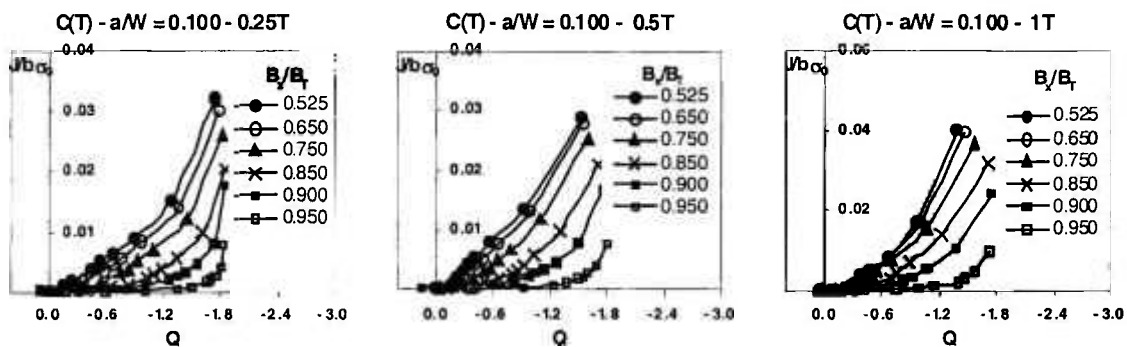


Figura D25: Trajetória $J-Q C(T)$ $n = 20$.

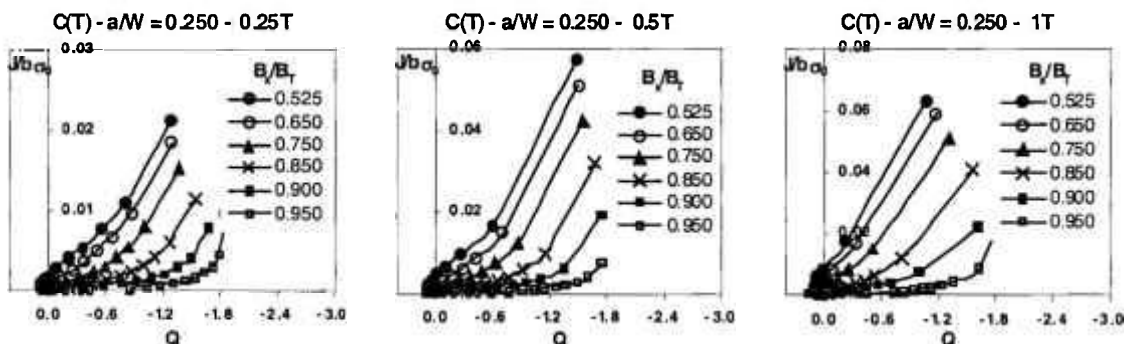


Figura D26: Trajetória $J-Q C(T)$ $n = 20$.

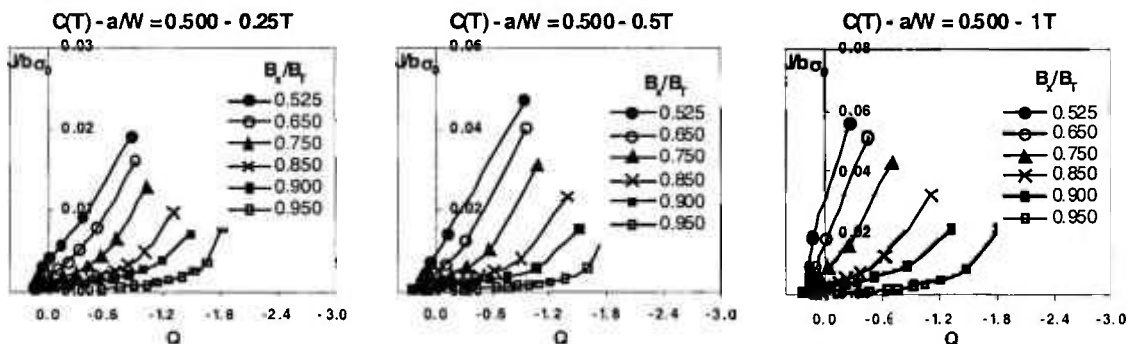


Figura D27: Trajetória $J-Q C(T)$ $n = 20$.

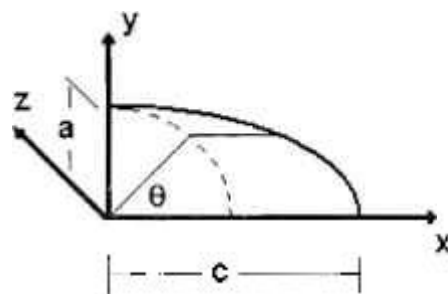
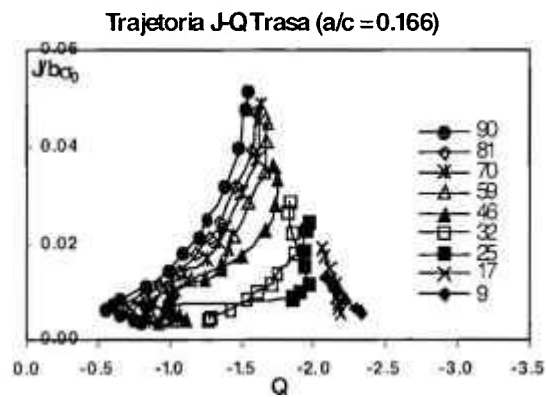
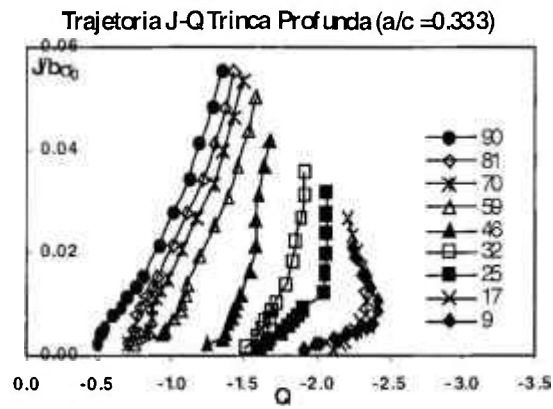


Figura D28: Trajetória $J-Q$ $SC(T)$ $n = 5$:
 (a) Trinca Profunda – $a/c = 0.333$; (b) Trinca Rasa – $a/c = 0.166$; (c) Referência para
 medida do ângulo.

APÊNDICE E: Trajetórias $J-Q_A$

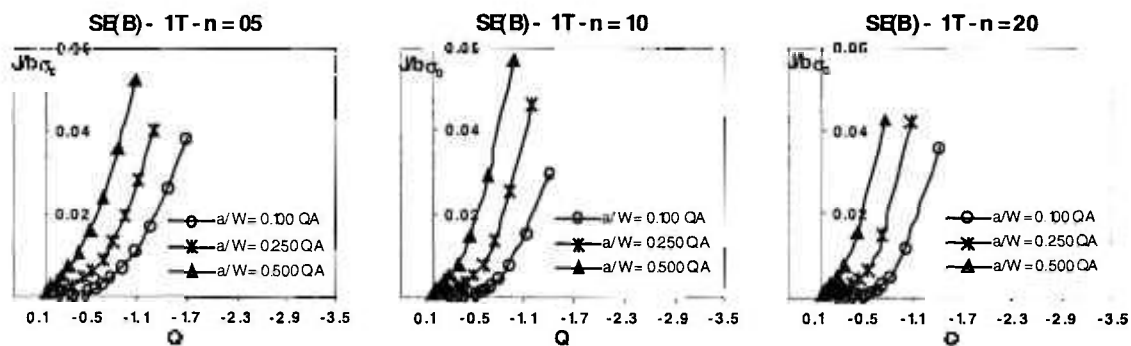


Figura E1: Trajetórias $J-Q_A - SE(B) - B = 1T$.

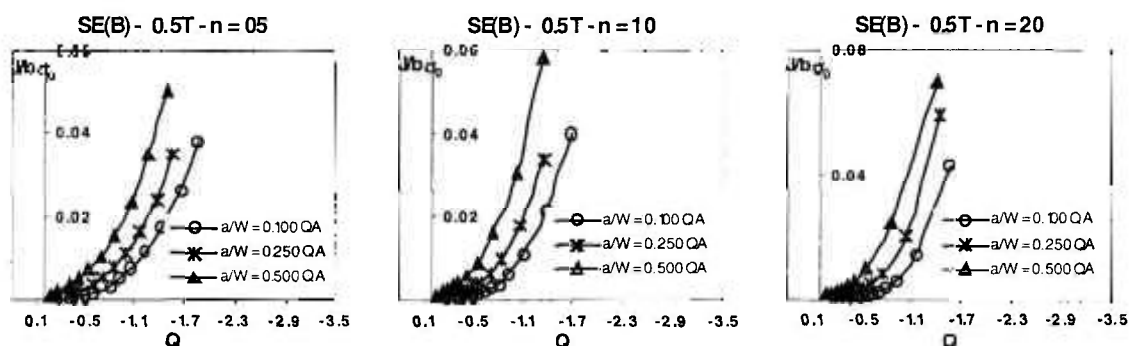


Figura E2: Trajetórias $J-Q_A - SE(B) - B = 0.5T$.

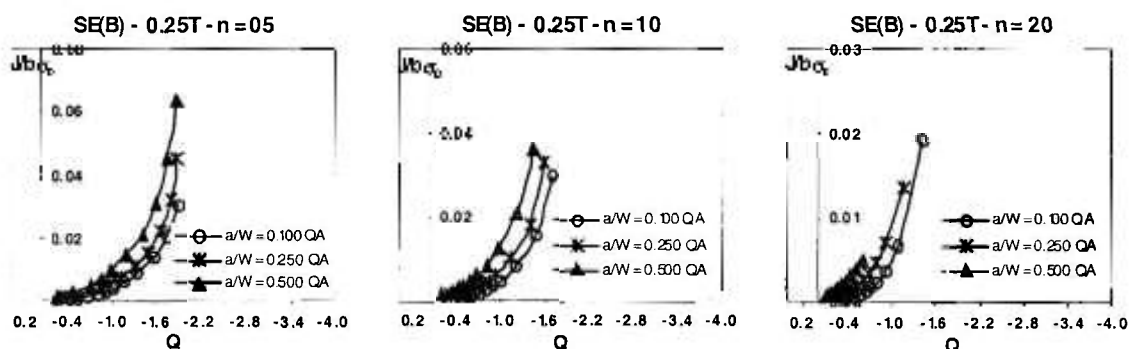


Figura E3: Trajetórias $J-Q_A - SE(B) - B = 0.25T$.

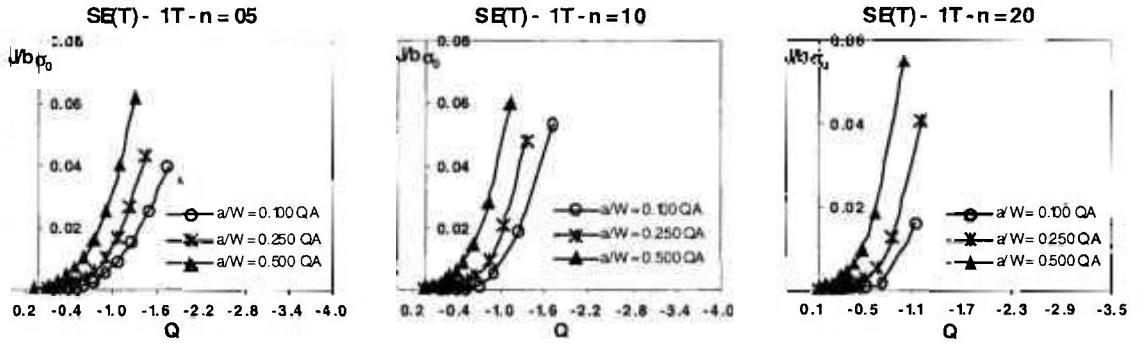


Figura E4: Trajetórias $J-Q_A - SE(T) - B = 1T$.

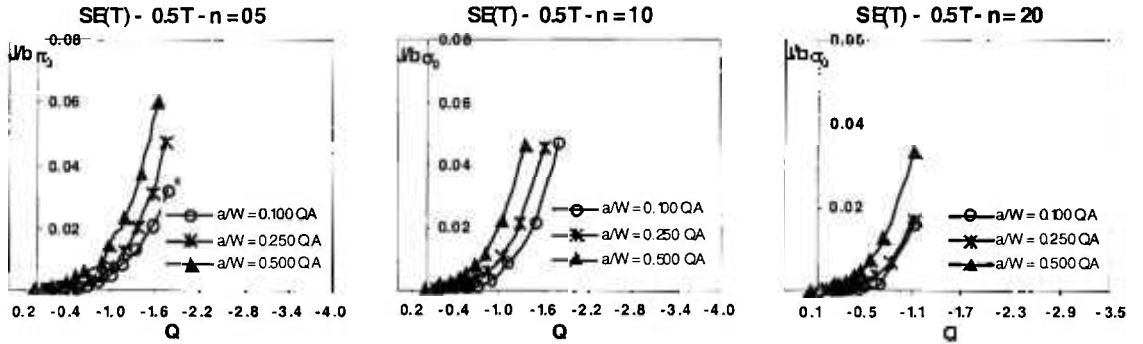


Figura E5: Trajetórias $J-Q_A - SE(T) - B = 0.5T$.

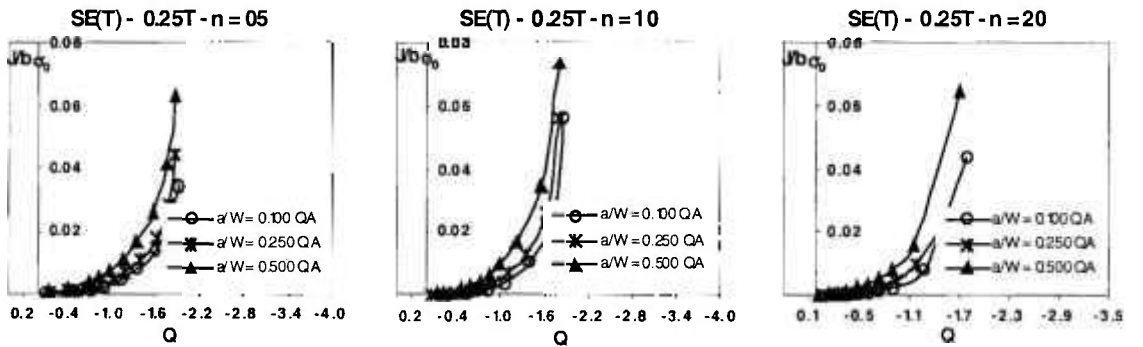


Figura E6: Trajetórias $J-Q_A - SE(T) - B = 0.25T$.

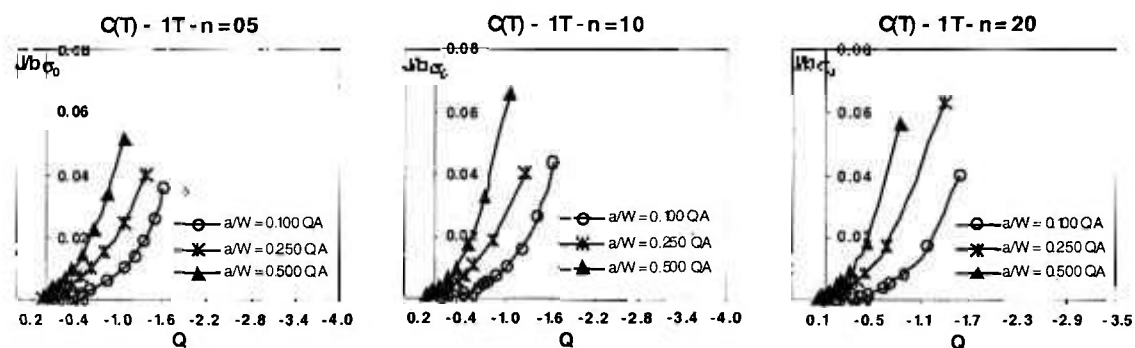


Figura E7: Trajetórias $J-Q_A - C(T) - B = 1T$.

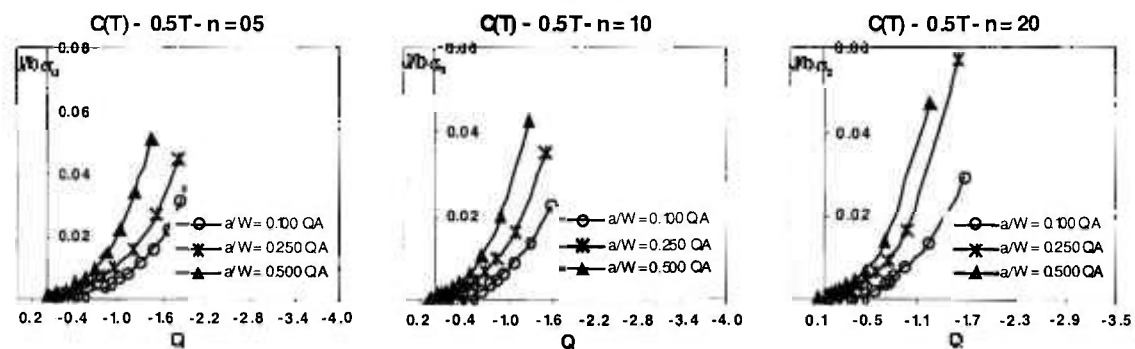


Figura E8: Trajetórias $J-Q_A - C(T) - B = 0.5T$.

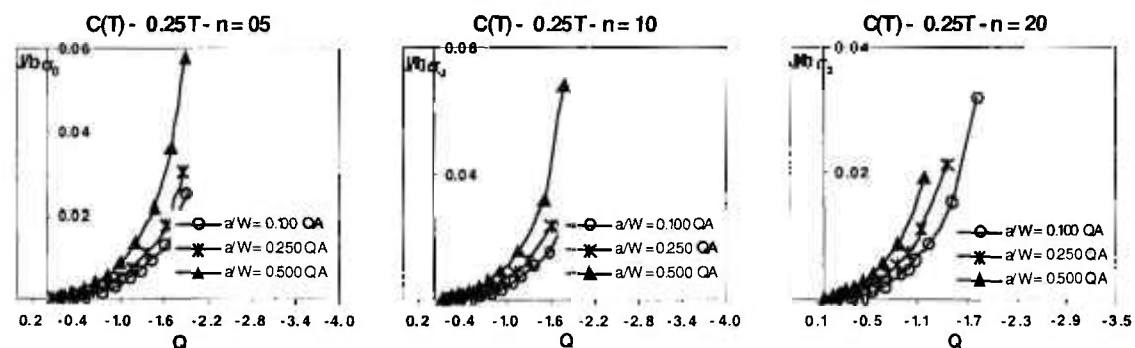


Figura E9: Trajetórias $J-Q_A - C(T) - B = 0.25T$.

APÊNDICE F: Correção de J pelo Parâmetro Q_A

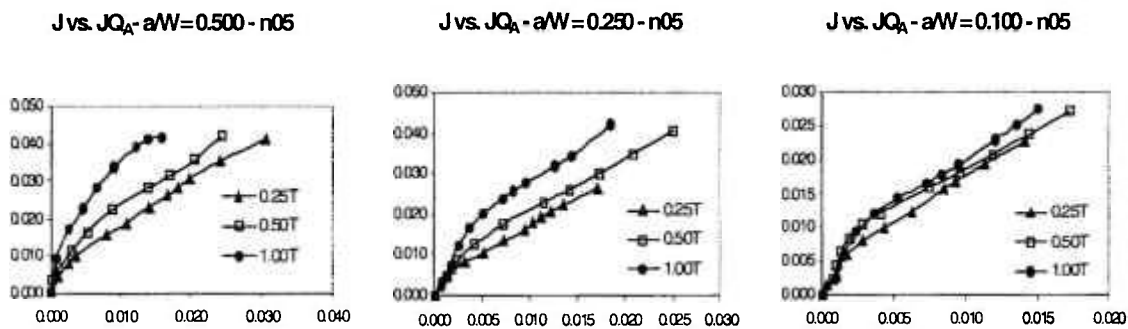


Figura F1: Curvas para correção de $J - SE(B) - n = 5$.

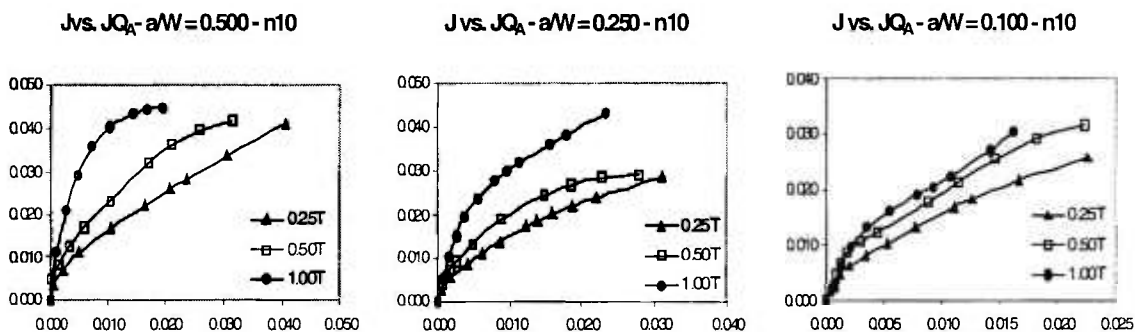


Figura F2: Curvas para correção de $J - SE(B) - n = 10$.

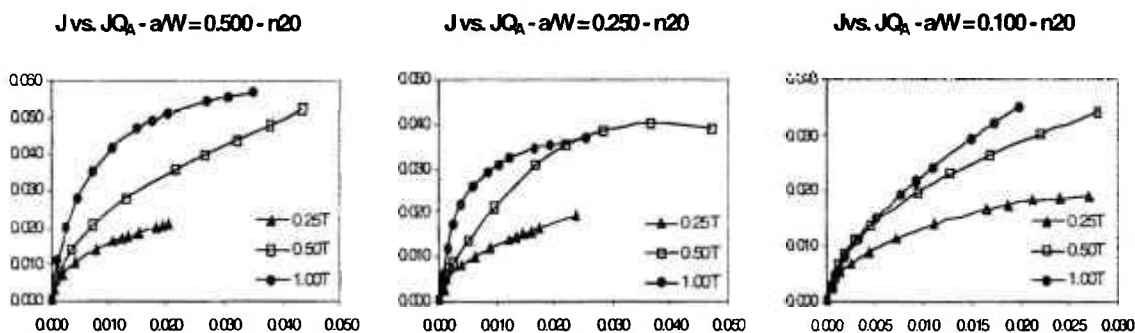


Figura F3: Curvas para correção de $J - SE(B) - n = 20$.

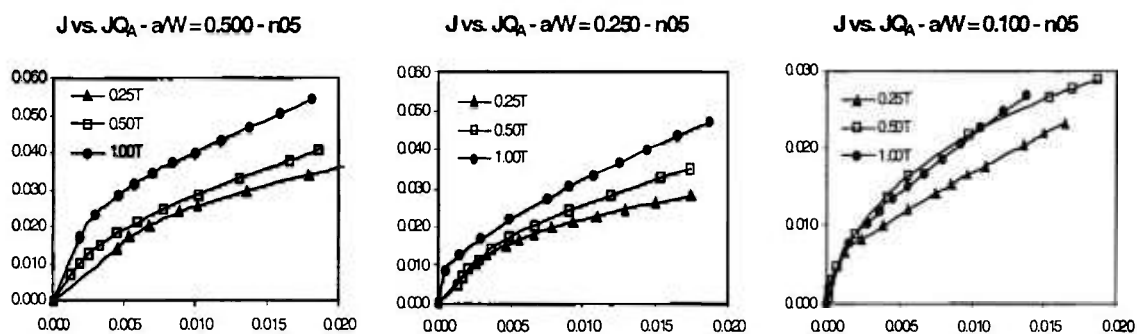


Figura F4: Curvas para correção de $J - SE(T) - n = 5$.

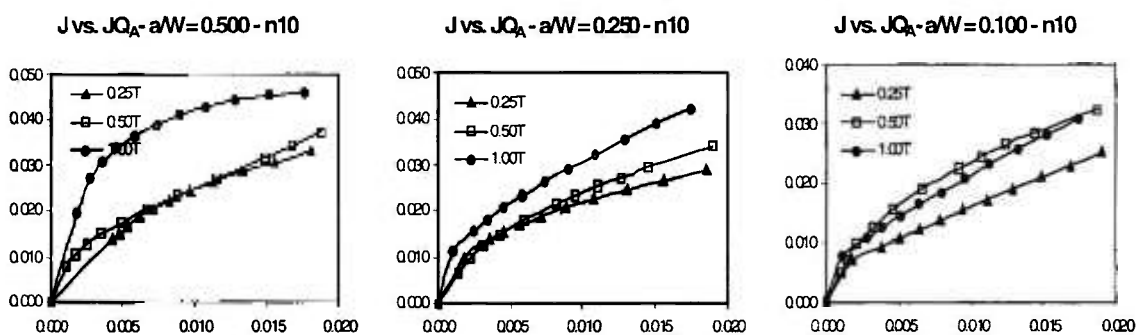


Figura F5: Curvas para correção de $J - SE(T) - n = 10$.

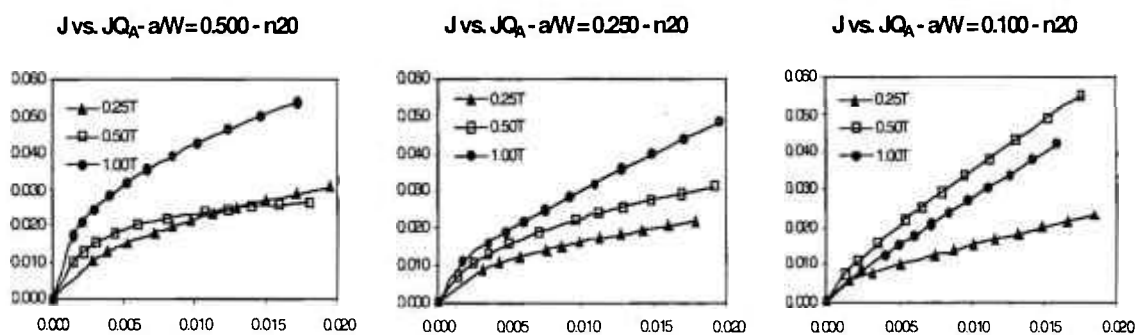


Figura F6: Curvas para correção de $J - SE(T) - n = 20$.

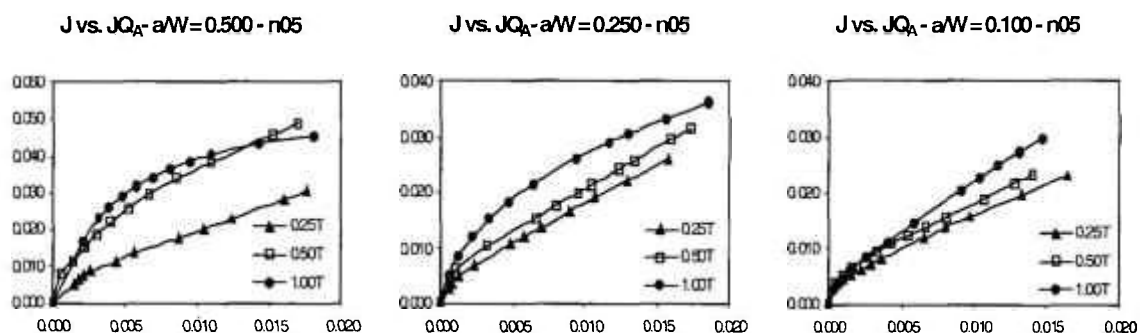


Figura F7: Curvas para correção de $J - C(T) - n = 5$.

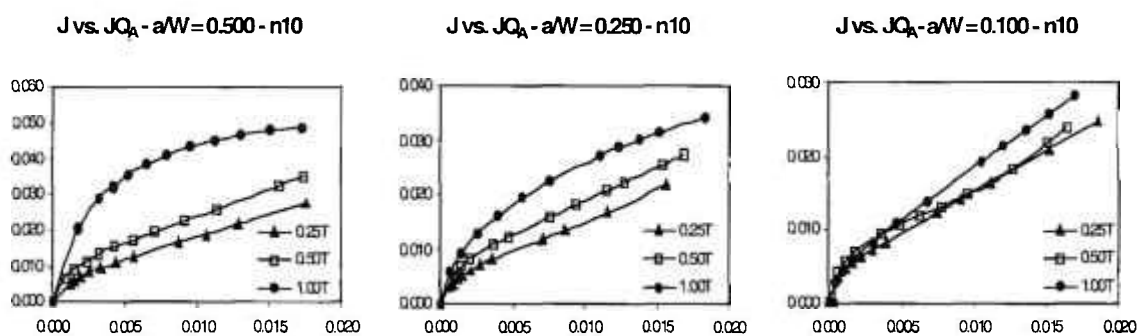


Figura F8: Curvas para correção de $J - C(T) - n = 10$.

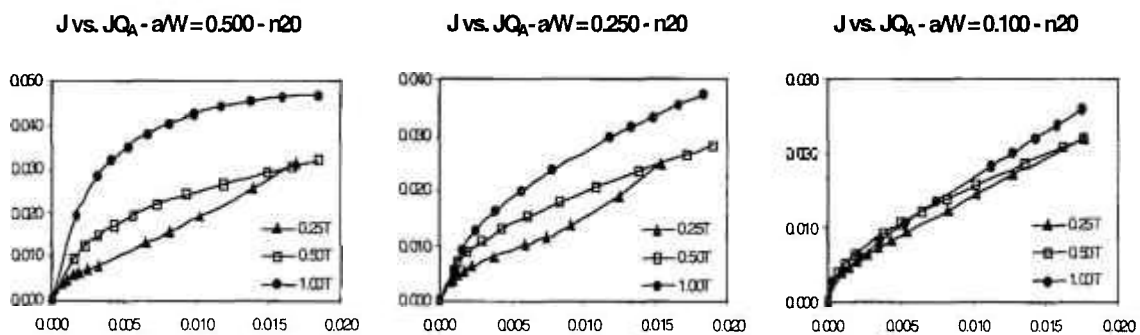


Figura F9: Curvas para correção de $J - C(T) - n = 20$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, T.L. *Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications*, 2.ed., Boca Ranton, FL: CRC Press, 1995.

ANDERSON, T.L., DODDS, R.H. Specimen size requirements for fracture toughness testing in the ductile-brittle transition region. *Journal of Testing and Evaluation*, v.19, p.123-134, 1991.

ANDERSON, T.L., DODDS, R.H. Simple constraint corrections for subsize fracture toughness specimens. Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension, ASTM STP1204, W.R. Corwin, F.M. Haggag and W.L. Server, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.93-105, 1993.

ANDERSON, T. L., STIENSTRA, D. A model to predict the sources and magnitude of scatter in toughness data in the transition region. *Journal of Testing and Evaluation*, v.17, p.46-53, 1989.

ASTM Standard test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials. American Society for Testing and Materials, ASTM E 399-90, Philadelphia, 1991.

ASTM Standard test method for measurement of fracture toughness. American Society for Testing and Materials, ASTM E 1820-99a, Philadelphia, 1999.

ASTM Test method for determination of the reference temperature, T_0 , for ferritic steels in the transition range. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. ASTM E1921-97. 1997.

BEREMIN, F. M. A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel. *Metallurgical Transactions*, v.14, p.2277-2287, 1983.

BETEGON, C., BELZUNCE, F.J., RODRIGUEZ, C. A two parameter fracture criterion for high strength low carbon steel. *Acta Materialia*, v.44, n.3, p.1055-1061, 1996.

BETEGON, C., HANCOCK, J.W. Two-parameter characterization of elastic-plastic crack tip fields. *Journal of Applied Mechanics*, v.58, p. 104-113, 1991.

CRAVERO, S., *Metodologia biparamétrica para análise de efeitos de restrição sobre a fratura de componentes estruturais e aplicações à avaliação de defeitos em dutos*. 2004. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Naval e Oceânica USP, São Paulo.

CRAVERO, S., RUGGIERI, C. A two-parameter framework to describe effects of constraint loss on cleavage fracture and implications for failure assessments of cracked components. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v.25, n.4, 2003.

CRAVERO, S., RUGGIERI, C., JQCRACK Versão 1.0 Cálculo numérico do parâmetro hidrostático Q para componentes estruturais 2D contendo trinca. Boletim Técnico da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - BT/PNV/59, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. 2002.

DODDS, R. H., ANDERSON, T. L. KIRK, M.T. A framework to correlate a/W ratio effects on elastic-plastic fracture toughness (J_C). *International Journal of Fracture*, v.48, p.1-22, 1991.

DODDS, R. H., SHIH, C. F., ANDERSON, T. L. Continuum and Micromechanics Treatment of Constraint in Fracture. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, Report NUREG/CR- 5971, 1993.

DODDS, R. H., ANDERSON, T.L. Numerical modeling of ductile tearing effects on cleavage fracture toughness. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, Report NUREG/CR- 6162, 1994.

DUGDALE, D.S. Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v.8, n.2, p.100-108, 1960.

DU, Z.Z., HANCOCK, J.W. The effect of non-singular stresses on crack-tip constraint. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, v.39, p.555-567, 1991.

FALESKOG, J., KROON, M., OBERG, H. A probabilistic model for cleavage fracture with a length scale - parameter estimation and predictions of stationary crack experiments. *Engineering Fracture Mechanics*, v.71, p.57-79, 2004.

HUTCHINSON, J.W. Singular behavior at the end of a tensile crack tip in a hardening material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v.16, p.13-31, 1968.

HUTCHINSON, J.W. Fundamentals of the phenomenological theory of nonlinear fracture mechanics. *Journal of Applied Mechanics*, v.50, p.1042-1051, 1983.

HUGHES, T.J. Generalization of selective integration procedures to anisotropic and nonlinear media. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, v.15, p.1413-1418, 1980.

IRWIN, G.R.. Plastic zone near a crack and fracture toughness. *Sagamore Research Conference Proceedings*, v.4, 1961.

KIM, Y.J., KIM, J.S., CHO, S.M., KIM, Y.J. 3-D constraint effects on J testing and crack tip constraint in M(T), SE(B), SE(T) and C(T) specimens: numerical study. *Engineering Fracture Mechanics*, v.71, p.1203-1218, 2004.

KOPPENHOEFER, K., GULLERUD, A., ROY, A., WALTERS, M., DODDS, R. H., WARP3D-Release 14.1: 3D Dynamic nonlinear fracture analysis of solids using parallel computers and workstations. *Structural Research Series 607*. UIIU-ENG-95-2012, University of Illinois at Urbana-Champaign. 2002.

LANDES, J. D., McCABE, D. E. Effects of section size on transition temperature behavior of structural steels, in *Fracture Mechanics: Fifteenth Symposium*, American society for Testing and Materials, Philadelphia, PA., ASTM STP 833, p. 378-392, 1984.

LANDES, J. D., SHAFFER, D. H., Statistical characterization of fracture in the transition region, in *Fracture Mechanics: Twelfth Conference*, American society for Testing and Materials, Philadelphia, PA., ASTM STP 700, p. 368-382, 1980.

LEEVEERS, P.S., RADON, J.C. Inherent stress biaxiality in various fracture specimen geometries. *Journal of Fracture*, v.19, p.311-325, 1982.

MEYERS, M.A., CHAWLA, K.K. *Princípios de Metalurgia Mecânica*. São Paulo: Edgard Blucher, p. 505, 1982.

MIRANDA, C.A.J. *Obtenção da tensão de clivagem e nível de confiabilidade na determinação da temperatura de referência de aços ferríticos na transição: abordagem numérica e experimental*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 1999. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

MORAN, B., SHIH, C.F. A general treatment of crack tip contour Integrals. *International Journal of Fracture*, v.35, p.295-310, 1987.

NEVALAINEN, M. J., DODDS, R. H. "Numerical investigation of 3-D constraint effects on brittle fracture in SE(B) and C(T) specimens", U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, Report NUREG/CR- 6317, 1996.

NEVALAINEN, M. J. "The effect of specimen and flaw dimensions on fracture toughness". Technical Research Center of Finland, VVT Publications 314. Espoo, 60p.+app. 98p., 1997.

O'DOWD, N. P., SHIH, C. F. Family of crack-tip fields characterized by a triaxiality parameter: Part I – Structure of fields. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, v.39, p.989-1015, 1991.

O'DOWD, N. P., SHIH, C. F. Family of crack-tip fields characterized by a triaxiality parameter: Part II – Structure of fields, *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, v.40, p.939-963, 1992.

O'DOWD, N. P., AND SHIH, C. F. Two-parameter fracture mechanics: Theory and applications, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, Report NUREG CR 5958, 1993.

O'DOWD, N. P.; SHIH, C. F.; DODDS, R. H. "The role of geometry and crack growth on constraint and implications for ductile/brittle fracture", in *Constraint Effects in Fracture Theory and Applications: Second Volume*, ASTM PA STP 1244, Philadelphia, p. 134-159, 1995.

PASTOUKHOV, V.A., VOORWALD, H.J.C. *Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural*. São Paulo: UNESP, 192p.,1995.

PARKS, D.M., Advances in characterization of elastic-plastic crack-tip fields, in *Topics in Fracture and Fatigue*, A.S.Argon, Ed, Springer Verlag, p.59-98,1992.

RABELLO, E.G., CRUZ, J.R.B., NETO, M.M., MIRANDA, C.A.J., Numerical study of 3-D constraint effects in SE(B) specimens. XXV Iberian Latin American Congress on Computational Methods – CILAMCE, Recife, 10-12 novembro, 2004.

RICE, J.R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v.35, p.379-386, 1968.

RICE, J.R., ROSENGREEN, G.F. Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material. *Journal of the Mechanics and Physics of Solid.*, v.16, p.1-12, 1968.

RITCHIE, R.O., KNOTT, J.F., RICE, J.R. On the relationship between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v.21, p.395-410, 1973.

RUGGIERI, C., DODDS, R. H. A transferability model for brittle fracture including constraint and ductile tearing effects: A probabilistic approach. *International Journal of Fracture*, v.79, p.309-340, 1996.

RUGGIERI, C., DODDS, R. H. Numerical modeling of ductile crack growth in 3-D using computational cell elements. *International Journal of Fracture*, v.82, p.67-95, 1996.

RUGGIERI, C., DODDS, R. H. Probabilistic modeling of brittle fracture including 3-D effects on constraint loss and ductile tearing, *Journal de Physique*, 1996.

ROLFE, S.T., BARSON, J.M., *Fracture and Fatigue Control in Structures. Applications of Fracture Mechanics*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.,1977.

SHIH, F.C., O'DOWD, N.O., KIRK, M.T. A framework for quantifying crack tip constraint. *Constraint Effects in Fracture*, ASTM STP 1171, E.M. Hackett, K.H et al., Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, p.2-20, 1993.

STIENSTRA, D., ANDERSON, T. L., RINGER, L. J. Statistical Inferences on cleavage fracture toughness data. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v.112, p.31-37, 1990.

TROVATO, E., RUGGIERI, C., Constraint effects on brittle fracture under small scale yielding conditions – Part I: Reference fields for elastic-plastic materials. Sixth Panamerican Congress of Applied Mechanics (PACAM IV), vol. 7, p. 943-946, Rio de Janeiro, 1999.

TROVATO, E., RUGGIERI, C. Micromechanics characterization of constraint and ductile tearing effects in small scale yielding fracture. *International Journal of Solids and Structures*, v.38, p.2171-2187, 2001.

VARIAS, A. G., SHIH, C. F. Quasi-static crack advance under a range of constraints-steady state fields based on a characteristic length. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, v.41, n.5, p.835-861, 1993.

WALLIN, K., Fracture toughness curve shape for ferritic structural steels, In: JOINT FEEG/ICF INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE OF ENGINEERING MATERIALS, August 6-8, 1991, Singapore. *Proceedings...*, p. 83-88, ,

WALLIN, K., “Statistical Modeling of fracture in the ductile-to-brittle transition region”, in: Defects Assessment in Components – Fundamentals and Applications, London, England, Mechanical Engineering Publications, ESIS/EGF9, p. 415-445, 1991.

WANG, Y. Y., “On the two-parameter characterization of elastic-plastic crack-front fields in surface cracked plates”, in Constraint Effects in Fracture, ASTM STP 1171, E. M. Hackett et al., Eds, Philadelphia, p. 120-1138, 1993.

WELLS, A.A., Unstable crack propagation in metals: CLEAVAGE AND FAST FRACTURE. PROCEEDINGS OF THE CRACK PROPAGATION SYMPOSIUM, Vol.1, Paper 84, Cranfield, 1961.

WELLS, A.A., Application of fracture mechanics at and beyond general yielding. British Welding Research Ass., Rep. M13, 1963.

WILLIAMS, M.L. On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Applied Mechanics*, v.24, p.109-114, 1957.