Campus de São Carlos

**DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA EM
ROCHAS BRASILEIRAS**

**AUTOR: MARIA DA CONSOLAÇÃO FONSECA DE
ALBUQUERQUE**

ORIENTADOR: PROF. DR. ANTONIO AIRTON BORTOLUCCI

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA EM ROCHAS
BRASILEIRAS

Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para a obtenção do título de
Mestre em Geotecnia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Antônio Aírton Bortolucci

São Carlos
1998

Class.	TESE
Cutt.	0164
Tombo	70069/98

5/5 944021

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC-USP

A345d Albuquerque, Maria da Consolação Fonseca de
Determinação da tenacidade à fratura em rochas
brasileiras / Maria da Consolação Fonseca de
Albuquerque. -- São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado). -- Escola de Engenharia
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.

Área: Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Airton
Bortolucci.

1. Tenacidade à fratura. 2. Mecânica das
rochas. 3. Ensaios de tenacidade à fratura.
4. Mecânica da fratura. I. Título

Dedico ao meu querido esposo, Cido, pela força nos momentos difíceis e por compartilhar a alegria nos momentos agradáveis. E aos meus pais, Zilda e Euclides (em memória), por nunca medirem esforços para me ajudar em qualquer situação

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Antônio Aírton Bortolucci, orientador e amigo, pela paciência, compreensão, confiança, dedicação e empenho dados a mim para realização deste trabalho.

Ao departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, pela oportunidade da realização do curso de Pós Graduação.

Aos professores do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, pelos conhecimentos transmitidos e pela saudável convivência apoio e amizade.

Ao Professor Dr. José Carlos A. Cintra pelo apoio ao ingresso nessa instituição e pela amizade despendida.

Aos Professores Doutores Antenor Braga Paraguassu, Lazaro Valentin Zuquette, Dirceu Spinelli e Tarciso Barreto Celestino pelas informações despendidas para realização deste trabalho.

À todos Funcionários do Departamento de Geotecnia, especialmente à Herivelto Moreira dos Santos, pelo constante auxílio na parte computacional, a seu Antônio Garcia, Décio, Vadinho, Dito, Maristela, Regina, Álvaro e Dona Rosa pelo apoio, carinho e amizade.

Aos funcionários da oficina mecânica, especialmente ao Penazzi e ao Adolfo, pela confecção dos dispositivos dos ensaios. E aos funcionários José Carlos e Bruno do Lamafe pelo empréstimo de dispositivos.

À professora Cristiane Nogueira pelo constante estímulo e incentivo à realização do curso de pós graduação.

Aos colegas de pós graduação Mônica, Paulinho Lins, Daniela, Janice, Edmiton, Ricardo, Rogério, Isaac, Juciara e aos demais colegas do Departamento de Geotecnia da EESC-USP, pela convivência e amizade.

À aluna de graduação Thaís Fosse pela ajuda despendida para esse trabalho.

À minha família, pelo esforço e dedicação para a minha educação e formação, sem os quais nada seria possível

À todos que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

E acima de tudo à Deus, por ter colocado todas essas pessoas maravilhosas no meu caminho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	vi
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO	1
1 - INTRODUÇÃO À MECÂNICA DA FRATURA	04
1.1-Introdução à Mecânica da Fratura Elástica Linear	04
1.1.1 - Teoria da Fratura de Irwin (Teoria Modificada de Griffith)	06
1.1.1.1 - Conceito de variação da liberação da energia de deformação	06
1.1.1.2 - Conceito de Fator de Intensidade de Tensão	07
1.1.2 - Modos de Propagação da Trinca	08
1.1.3 - Fator de Intensidade de Tensão em corpos Finitos	09
1.2 - Introdução à mecânica da Fratura Elástica não Linear (MFENL)	09
1.2.1 - Descrição Geral das Características não lineares na ponta da trinca	10
1.2.2 - Influência da Amostra na Tenacidade à Fratura	15
2 ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA EM MATERIAIS ROCHOSOS	18
2.1- Ensaio de ruptura repentina	
“Burst test (BT)”	18
2.2- Ensaio de flexão em amostras semi circulares	
“Semi-circular bend specimen (SCB)”	19
2.3- Ensaio em anel fraturado radialmente	
“Radially cracked ring specimens (RCR)”	21
2.4- Ensaio de anel modificado	
“Modified ring test (MRT)”	22
2.5- Método de indentação	
“Indentation Method”	23
2.6 - Disco compacto em tração	
“Round compact disk in tension (RCT)”	26

2.7- Barra redonda fraturada axialmente em ruptura por compressão	
“Axial cracked round bar in compression splitting (ACRBC)”	27
2.8- Barra cilíndrica com entalhe reto em flexão	
”Single edge notched round bar in bending (SENRBB)”	29
2.9- Barra cilíndrica com entalhe circunferencial	
“Circunferentially notched round bar in bending (CNRBB)	30
2.10- Barra entalhada circunferencialmente em carregamento excêntrico	
”Circunferentially notched bar in eccentric loading (NRBEL)	30
2.11- Chapas retangulares em flexão	
“Rectangular plates in bending”	31
2.11.1 - Chapa retangular com entalhe reto na ponta em flexão a três pontos	
“Single edge straight-through cracked rectangular plate in three point bending (SC3PB)”	31
2.11.2- Chapa retangular com entalhe “chevron” em flexão a três pontos	
“Single edge chevron-notched rectangular plate in three-point bending (CN3PB)”	32
2.11.3- Chapa retangular com entalhe reto em flexão a quatro pontos	
“Single edge straight-through cracked rectangular plate in four-point bending (CS4PB)”	33
2.11.4- Chapa retangular com entalhe “chevron” em flexão a quatro pontos	
“Single edge chevron-notched rectangular plate in four-point bending (CN4PB)”	34
2.12- Corpo de prova em torção dupla	
“Double torsion specimen (DT)”	34
2.13- Viga em ruptura com balanço duplo	
“Double cantilever beam in splitting (DCB)”	36
2.13.1 - Ruptura por Tração	36
2.13.2 - Ruptura por Flexão	37
2.13.3 - Ruptura por Cunha	37
2.14 - Disco Brasileiro entalhado em compressão diametral	37

2.14.1 - Entalhe reto Central	38
2.14.2 - Disco com estria de aresta	39
2.15-Ensaio do disco Brasileiro sem entalhe	40
2.15.1 - HUA & GUO (1990)	40
2.15.2 - CELESTINO E BORTOLUCCI (1992)	42
2.16-Influência da tensão de confinamento sobre o valor da tenacidade à fratura	43
2.17 - Ensaios para Determinação da Tenacidade à Fratura Sugeridos como Padrão pela ISRM	45
3: ENSAIOS SUGERIDOS PELA ISRM	46
3.1 - Introdução	46
3.2. - Corpos de Prova cilíndricos com Entalhe em “Chevron” sob Flexão	47
3.3 - Corpos de Prova Curtos com Entalhe em “Chevron” sob Tração	54
3.4 - Corpos de Prova na Forma de Disco Brasileiro Fraturado com Entalhe em “Chevron”	57
3.5 - Validade das Fórmulas da ISRM, 1988	60
4 ENSAIOS DE LABORATÓRIO	65
4.1 - Amostragem	65
4.2 - Preparação das Amostras	66
4.2.1 - Corpo de Prova “CB”	66
4.2.2 - Corpo de Prova “SR”	67
4.2.3 - Corpo de Prova “CCNBD”	69
4.3 - Execução dos Ensaios	70
4.3.1 - Ensaio “CB”	70
4.3.2 - Ensaio “SR”	70
4.3.3 - Ensaio “CCNBD”	71
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	82
APÊNDICE: EMBASAMENTO TEÓRICO PARA AS FÓRMULAS DA ISRM, 1988 E 1995	85
1 - Calibração de Flexibilidade do Corpo de Prova	85
1.1 - Tenacidade à Fratura em Função da Curva de Calibração da Flexibilidade	85

1.2 - Construção da Curva de Calibração "Compliance"	87
2 - Cálculo da Tenacidade à Fratura para o nível I dos Ensaios da ISRM	88
2.1 - "Chevron Bend - CB"	88
2.2 - "Short Rod - SR"	90
3 - Fórmulas para o Nível II dos Ensaios da ISRM, 1988	91
3.1 - Introdução	91
3.2 - Comprimento crítico da trinca e inclinação correspondente	92
3.3 - Fator de correção para plasticidade (p)	95
4 - "Cracked Chevron Notched Brazilian Disc - CCNBD"	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Placa infinita com furo em forma de elipse, submetidas à tensões uniformes de tração	04
Figura 1.2 - Placa infinita biaxialmente carregada com trinca plana	07
Figura 1.3 - Modos de Propagação da Trinca	08
Figura 1.4 - Ilustração Esquemática da zona inelástica e característica da zona K-dominante na ponta da trinca	11
Figura 1.5: Ilustração Esquemática dos quatro estágios de desenvolvimento da ZPF em rochas e os correspondentes registros de carga “versus” deslocamento	13
Figura 1.6 - Ilustração do modelo de trinca coesivo para ZPF em rocha: a)distribuição de fechamento coesivo e as dimensões associadas; b)tensão de fechamento coesiva linearmente distribuída sobre a ZPF; c)tensão de fechamento coesiva como função do deslocamento de abertura da ponta da trinca verdadeira.	14
Figura 1.7 - Variação da Tenacidade à fratura com o comprimento da trinca e espessura do corpo de prova para materiais metálicos	16
Figura 2.1 - Burst Tests	19
Figura 2.2 - Ensaio de Flexão à Três Pontos em Amostras Semicirculares	20
Figura 2.3-Amostra em anel com entalhe radial	21
Figura 2.4-Geometria do corpo de prova do anel modificado (MRT)	22
Figura - 2.5: Duas trincas simetricamente radiais geradas no furo interno do corpo de prova (MRT)	22
Figura 2.6 - Gráfico carga versus deslocamento típico do ensaio MRT	23
Figura - 2.7: Representação esquemática de um contato pontagudo mostrando os parâmetros de indentação devidos à carga (F); onde Ψ é a metade do ângulo de indentação, J é a indentação diagonal e a é o comprimento da trinca na superfície	24
Figura - 2.8: Geometria do disco compacto e as condições de carregamento associada	26
Figura-2.9: Corpo de prova cilindrico em ruptura por compressão	27

Figura - 2.10: Corpo de prova retangular em ruptura por compressão	28
Figura-2.11: Geometria do corpo de prova e esquema do ensaio SENRBB	29
Figura - 2.12: Geometria da barra redonda entalhada circunferencialmente em flexão	30
Figura - 2.13: Geometria da barra redonda entalhada circunferencialmente com carregamento excêntrico	30
Figura - 2.14: Geometria da barra retangular com fratura reta em flexão a três pontos	31
Figura - 2.15 Geometria da barra retangular com entalhe “chevron” em flexão a três pontos	32
Figura - 2.16: Geometria e esquema de ensaio da barra retangular em flexão a quatro pontos com entalhe reto	33
Figura-2.17: Geometria e esquema do ensaio de uma barra retangular em flexão a quatro pontos com entalhe em “chevron”	34
Figura - 2.18: Ilustração do corpo de prova em torção dupla e configuração do carregamento	35
Figura - 2.19: Principais tipos de viga em balanço duplo: a)ruptura por tração, b) ruptura por flexão, c) ruptura por cunha	36
Figura - 2.20: Ilustração de corpos de prova tipo disco brasileiro em compressão diâmetral: a) entalhe reto central (CSCBD), b) disco com estria de aresta (SECBD)	38
Figura - 2.21: Ensaio do disco modificado	40
Figura - 2.22: Ensaio do disco brasileiro sem entalhe: a) disco com corte plano onde aplica o carregamento, b) disco com a geometria sem o corte.	41
Figura 2.23 - Ensaio do disco brasileiro sem entalhe	42
Figura 2.24 -Anel modificado sob pressão confinante	44
Figura 3.1 - Corpo de Prova “CB”	48
Figura 3.2 - Dispositivo para posicionamento do corpo de prova “CB”	49
Figura 3.3 - Dispositivo para medir LPD	50
Figura 3.4-Correção da não Linearidade	53
Figura 3.5 - Geometria do Corpo de Prova “SR”	54
Figura 3.6 - Dispositivo para aplicar tração no corpo de prova “SR”	55

Figura 3.7 - Configuração geral do ensaio “SR”	56
Figura 3.8 - Geometria do Corpo de Prova “CCNBD”.	58
Figura 3.9 - Procedimento do entalhe	58
Figura 3.10 - p “versus” D para o tufo de Ogino	63
Figura 3.11 - p “versus” D para o gabro Kallax e o granito Inada	64
Figura 4.1 - Dispositivo de fixação do corpo de prova “CB” para confecção do entalhe	67
Figura 4.2 - Dispositivo de fixação do corpo de prova “SR” para confecção do entalhe	68
Figura 4.3 - Dispositivo de Fixação do corpo de prova “CCNBD” para confecção do entalhe	69
Figura 1 - a) Seção Transversal Central do corpo de prova “SR” com avanço incremental da trinca, Δa b) Vista Lateral do “SR”	85
Figura 2 - Esquema de comportamento de um corpo de prova elástico linear	86
Figura 3 - Representação Esquemática para determinação experimental da taxa de liberação de energia e portanto do fator de intensidade de tensão	88
Figura 4 - Interpretação Esquemática do corpo de prova “CB” mostrando a relação carga, posição na frente da trinca e comportamento linear ou não linear (WHITTAKER et al., 1992)	92
Figura 5 Curva Fator de intensidade de tensão “versus” comprimento da trinca	93
Figura 6 - Variação de K_I ao longo da frente da trinca	93
Figura 7 - Esquema do comportamento elasto plástico do corpo de prova	96
Figura 8 - Modelo de Fatia de Bluhm	99
FOTOS	
Foto 4.1 - extração dos testemunhos	74
Foto 4.2 - acabamento dos testemunhos	75
Foto 4.3 - dispositivo de fixação para confecção do entalhe do corpo de prova “CB”	76
Foto 4.4 - dispositivo de fixação para confecção do entalhe do corpo de	

prova “SR”	77
Foto 4.5 - dispositivo de fixação para confecção do entalhe do corpo de prova “CCNBD”	78
Foto 4.6 - nível II do ensaio “CB” com seus respectivos dispositivos	79
Foto 4.7 - nível II do ensaio “SR” com seus respectivos dispositivos	80
Foto 4.8 - ensaio “CCNBD” com seus respectivos dispositivos	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Dimensões do corpo de prova “CB”	48
Tabela 3.2. Dimensões do corpo de prova “SR”	54
Tabela 3.3. Valores de u e v	61
Tabela 4.1 - Propriedades Mecânicas das Amostras	66
Tabela 4.2 - Taxas de carregamento e velocidades de ensaios	71
Tabela 4.3: Resultados de Ensaio Usando Corpos de Prova “CB”	72
Tabela 4.4: Resultados de Ensaio Usando Corpos de Prova “SR”	72
Tabela 4.5: Tenacidade à Fratura modo I para Corpos de Prova “CCNBD”	73
Tabela 5.1: resultados médios dos ensaios “CB” e “SR” nos níveis I e II e “CCNBD”	84

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

α	comprimento adimensional da trinca
α_0	comprimento adimensional do entalhe inicial
α_1	comprimento adimensional da trinca na face do corpo de prova
α_B	largura adimensional da trinca
α_S	raio adimensional da serra do corpo de prova “CCNBD”
2β	ângulo de distribuição de tensões para o corpo de prova em disco de aresta
γ	energia específica de superfície
σ	tensão
σ_t	resistência à tração uniaxial
σ_y	tensão na direção y
σ_{ys}	tensão de escoamento
λ	“flexibilidade”
λ_F	“flexibilidade” no ponto de carga
λ_T	“flexibilidade” total do corpo de prova
ν	coeficiente de Poisson
ξ	comprimento do centro do corpo de prova até a extremidade central interna de uma fatia (“CCNBD”)
Ψ	metade do ângulo de indentação
ρ	raio de curvatura numa trinca elíptica
$\Delta\lambda$	mudança incremental no “compliance” elástico
Δa	variação do comprimento da trinca
ΔF	distância vertical entre a curva de carregamento e descarregamento no ponto L
ΔW	trabalho irreversível realizado durante o avanço da trinca.
$\Delta w, \Delta a_0$ e $\Delta\theta$	a diferença entre os valores medidos e os valores nominais do comprimento do corpo de prova, comprimento do entalhe inicial e ângulo “chevron” respectivamente
ΔZ	espessura da fatia do corpo de prova “CCNBD”
δ_c	valor crítico do deslocamento de abertura na ponta da trinca verdadeira
δ_t	deslocamento de abertura na ponta da trinca verdadeira
2θ	ângulo “chevron”
$2a_1$	comprimento do entalhe na face do corpo de prova
$2b$	largura da trinca remanescente à distância a do corpo de prova;
a	comprimento da trinca
a_0	comprimento inicial do entalhe
a_c	comprimento crítico da trinca
A_{min}	fator de correção para geometria e carregamento do corpo de prova

B espessura do corpo de prova
 B_n a espessura da placa na estria para o corpo de prova double torsion
 C fator de correção para forma do carregamento
 CB “chevron bend”
 CCNBD “cracked chevron notched brazilian disc”
 C_K fator de correção em função da geometria do corpo de prova
 CMOD cracked mouth opening displacement
 D diâmetro do corpo de prova
 d diâmetro dos furos de carregamento para o ensaio de tração
 $D_{\min}$ diâmetro mínimo permitido para o corpo de prova
 E - módulo de elasticidade
 e metade do eixo menor de uma fenda elíptica
 EESC Escola de Engenharia de São Carlos
 e_y distância entre o ponto de carga e o eixo do cilindro (excentricidade)
 $\bar{F}$ carga média de F_1 e F_2
 F força
 F'_1 ponto auxiliar para desenhar a reta de inclinação S_c
 F_1 e F_2 pontos de interseção das retas escolhidas (S_1 e S_2) com a envoltória dos ciclos de carregamento/descarregamento
 F_C a carga crítica ou ponto de avaliação da tenacidade à fratura
 F_c carga correspondente ao ponto sobre a reta F'_1F_2 cuja inclinação é S_c e o deslocamento recuperável é X_2
 F_H carga correspondente ao ponto H
 $F_{\max}$ Força máxima
 g “flexibilidade” adimensional
 G variação de liberação da energia de deformação por unidade de comprimento da trinca
 G_c valor crítico da variação de liberação da energia de deformação por unidade de comprimento da trinca
 G_{IC} valor crítico da variação de liberação da energia de deformação modo I por unidade de comprimento da trinca
 H ponto onde começa o descarregamento no gráfico cíclico de carga “versus” deslocamento
 h_c profundidade do corte
 I momento de inércia
 ISRM International Society of Rock Mechanics
 J é a indentação diagonal
 K fator de intensidade de tensão
 K_C quantidade crítica do fator de intensidade ou tenacidade à fratura
 K'_{CB} valor da tenacidade à fratura para o corpo de prova “CB” avaliado para o comprimento crítico da trinca igual ao comprimento crítico da trinca do corpo de prova “SR”

K_{CB} tenacidade à fratura do ensaio “CB” para o nível I
 K_{CB}^C valor da tenacidade à fratura para o corpo de prova “CB” no nível II
 K_{ISRM}^C valor médio de K_{CB}^C e K_{SR}^C
 K_{IC}^e valor estimado para K_{IC}
 K_I fator de intensidade de tensão modo I
 K_{IC} tenacidade à fratura modo I
 K_{min} fator de intensidade de tensão local mínimo
 K_Q tenacidade à fratura aparente
 K_{SR} é o valor da tenacidade à fratura no nível I do ensaio “SR”
 L comprimento do corpo de prova e também ponto definido pela carga correspondente a $F_L = 0,50 F_H$ em cima da curva de recarregamento do ciclo
 l distância vertical do centro do furo à face da trinca
 LPD load point displacement
 $LVDTS$ medidor de deslocamento
 M momento
 $MFEL$ Mecânica da Fratura Elástica Linear
 n número de fatias do corpo de prova “CCNBD”
 p índice de plasticidade
 p_{max} pressão interna máxima
 R - raio do corpo de prova
 r, θ coordenadas polares
 r_o raio externo do corpo de prova
 r_e zona elástica
 r_i o raio interno do corpo de prova
 R_s o raio da serra do corpo de prova “CCNBD”
 r_y zona plástica
 S vão entre os suportes
 S_1 e S_2 inclinações que mais se aproximam da inclinação S_c
 S_c inclinação entre as curvas (carregamento-descarregamento) no gráfico força “versus” deslocamento para o ponto crítico a_c
 SR “short rod”
 SSY - small scale yielding
 S_{igin} inclinação do carregamento inicial
 t espessura do entalhe
 u e v valores constantes determinados em função de α_0 e α_B (tabelados)
 U_0 - energia elástica
 U_E - perda de energia de deformação elástica
 U_S - variação na energia de superfície elástica

USP Universidade de São Paulo

U_T - energia total

u_x deslocamento na direção x

u_y deslocamento na direção y

v o deslocamento de abertura da boca da trinca

w largura do corpo de prova

W trabalho

W_m braço do momento da barra para o corpo de prova double torsion

w_p largura da placa de carregamento

x distância do centro da trinca à ponta da trinca verdadeira ao longo do eixo x

x,y,z coordenadas cartesianas

X_2 quantidade de deslocamento “recuperável” de S_2

X_1 distância horizontal entre as retas (S_1 e S_2) nos pontos F_1 e F_2

X_u distância horizontal entre as retas (S_1 e S_2) no eixo LPD

Y fator de correção para a geometria do corpo de prova e para forma de carregamento ou fator de intensidade de tensão adimensional ou fator de forma para o corpo de prova

Y_C fator de intensidade de tensão adimensional crítico

ZPF zona de processo de fratura

RESUMO

O estudo da mecânica da fratura de rochas é extremamente importante pois o processo de ruptura das rochas se dá em grande parte por propagação de trinca e as teorias clássicas da resistência dos materiais baseadas na mecânica do contínuo possuem critérios de ruptura que não lidam com a propagação da trinca.

Um parâmetro fundamental da Mecânica da Fratura de Rochas é a tenacidade à fratura, que é o parâmetro que indica a habilidade de materiais idealmente frágeis resistir ao fraturamento por esforços de fadiga ou estático.

Constam deste trabalho uma revisão da literatura sobre tenacidade à fratura de rochas, a descrição dos três tipos de ensaios (sugeridos pela ISRM, 1988 e 1995) e das amostras usadas para a realização destes, bem como seus resultados e conclusões. No apêndice tem-se um embasamento teórico dos ensaios.

Visa-se com esta pesquisa capacitar o laboratório de mecânica das rochas da EESC-USP com técnica e instrumental necessário para a determinação de tenacidade à fratura para o modo I de propagação sugeridos pela ISRM.

Os equipamentos mais sofisticados para a realização desses ensaios já estavam à disposição do laboratório, restou somente a aquisição ou desenvolvimento de pequenos dispositivos de montagem ou preparação das amostras.

ABSTRACT

The study of Rock Fracture Mechanics is extremely important since rock failure generally occur by propagating fracture. The classic failure criteria and theories based on solid mechanics do not deal directly with fracture processes. A fundamental parameter in Rock Fracture Mechanics is the fracture toughness which indicate its material resistance to crack propagation. This work contains a review of the literature about rock fracture toughness, testing procedures and calculations recommended by ISRM, 1988 and 1995 testing results are also included, as well as, theoretical background about testing.

The aim of this research is to make available the determination of fracture toughness suggested by ISRM.

Sophisticated equipment, used in the release of this tests, was already available in the laboratory, it remained only the acquisition of simple devices.

INTRODUÇÃO

A mecânica das rochas é uma ciência de grande importância à engenharia de minas em projetos de estruturas de minas superficiais e subterrâneas; à engenharia civil em projetos de perfuração em rocha, fundações para grandes barragens; à engenharia de petróleo em projeto de operações de perfurações para extrair óleo; à engenharia mecânica em projetos de maquinários requeridos para escavar ou fragmentar rochas por perfuração, corte, explosão; e assim por diante (WHITTAKER et al., 1992).

As teorias clássicas da resistência dos materiais, baseadas na mecânica do contínuo não tratam diretamente com o processo de propagação de trinca que é em grande parte o processo de ruptura de materiais rochosos e seus critérios de ruptura são insuficientes para descrever o processo de fraturamento das rochas.

Estes critérios e teorias podem descrever bem a deformação de materiais rochosos que se comportam como substâncias elasto plásticas, onde existe uma tensão limite de resistência. Para materiais frágeis que se rompem por propagação de trincas, estes critérios não têm base teórica de como uma trinca se propagará. Se existe uma trinca, o estado de tensão nas vizinhanças da ponta da trinca é alterado significativamente, sendo que estes critérios não podem prever a direção e a tensão crítica de propagação da trinca em um material rochoso frágil (WHITTAKER et al., 1992).

* A mecânica da fratura fornece uma descrição quantitativa da transformação de um componente estrutural intacto em um fraturado pelo crescimento de uma trinca. Trincas (ou descontinuidades) são feições estruturais comuns em maciços rochosos. Descontinuidades pré-existentes dentro de um maciço rochoso podem sofrer forças tectônicas e gerar novas descontinuidades resultando em terremotos, ruptura violenta de um maciço rochoso em minas, ruptura de taludes rochosos e de ombreiras de barragem. Além dessas, novas fraturas podem ser geradas intencionalmente em processos como fraturamento hidráulico, perfuração, corte e detonação. Portanto um entendimento de mecânica da fratura de rochas é de grande importância na resolução de muitos problemas de engenharia.

A mecânica da fratura de rochas refere-se principalmente à iniciação e propagação de uma ou várias trincas em rochas sujeitas a um campo de tensão particular. A propagação da trinca pode ser rápida e incontável, propagação instável; ou lenta, propagação estável.

A MFEL (Mecânica da Fratura Elástica Linear) é usada para descrever a extensão da trinca sob condições elásticas lineares, e neste caso o campo de deslocamento, de deformação e de tensão na ponta da trinca podem ser caracterizados por um fator de intensidade de tensão K . A quantidade crítica do fator de intensidade de tensão, K_{IC} , não deve ser considerada especialmente associada com o campo de deslocamento, de deformação ou de tensão, mas antes essa deve ser considerada como um parâmetro indicando a habilidade de materiais idealmente frágeis resistir ao fraturamento por fadiga ou estático (WHITTAKER et al., 1992). Este parâmetro, K_{IC} , é denominado tenacidade à fratura.

A tenacidade à fratura é um parâmetro importante e seus valores são empregados em grande escala de aplicações em engenharia de rochas. Algumas dessas aplicações são as que seguem (ISRM, 1988):

- a) Um parâmetro para classificação de materiais rochosos;
- b) Um índice para os processos de fragmentação de rochas tais como perfuração de túnel e modelo de escala para detonação;
- c) Uma propriedade do material na modelação de fragmentação de rochas tais como corte de rocha, fraturamento hidráulico, fraturamento guiado de gás, estimulação explosiva de poços de gás, fraturamento explosivo radial e na interpretação de feições geológicas.

Para iniciar este trabalho, no capítulo 1, é feita uma introdução da mecânica da fratura com a definição da tenacidade à fratura, bem como uma introdução das particularidades da mecânica da fratura para rochas.

Existem vários ensaios com diferentes metodologias, usando uma ampla variedade de corpos de prova, para determinar a tenacidade à fratura de rochas. No capítulo 2 comenta-se as várias metodologias apresentadas na literatura.

✧ Os ensaios de tenacidade à fratura diferem dos ensaios de resistência em mecânica das rochas por requererem corpos de provas com entalhes bem definidos

que são feitos antes do ensaio ou com trincas induzidas durante o aumento do carregamento no ensaio, onde o interesse é o estudo do crescimento da trinca.

Os valores obtidos das diferentes metodologias geralmente não são comparáveis, devido a vários fatores que podem interferir na tenacidade à fratura de rochas como anisotropia do material, interferências relativas às dimensões dos corpos de prova, etc. A ISRM, 1988 e 1995 sugeriu métodos para determinar a tenacidade à fratura de rochas que levam em conta os fatores que interferem nas medidas, sendo assim estes métodos produzem resultados bastante precisos. Os métodos sugeridos são: ISRM, 1988, Método 1: Método Sugerido para Determinação da Tenacidade à Fratura Usando Corpos de Provas com Entalhe “Chevron” em Flexão e Método 2: Método Sugerido para Determinação da Tenacidade à Fratura Usando Corpos de Prova Curtos com Entalhe “Chevron” sob Tração e ISRM, 1995, Método sugerido para Determinação da Tenacidade à Fratura Modo I Usando Corpos de Prova na Forma de Disco Brasileiro Fraturado com Entalhe “Chevron”. Este trabalho visa conduzir esses ensaios com escopo de capacitar o laboratório de mecânica das rochas do departamento de geotecnia da USP EESC-São Carlos com técnica e instrumental necessários para sua realização. Os capítulos 3 e 4 fazem uma descrição detalhada dos ensaios, bem como dos dispositivos necessários.

Os valores de tenacidade à fratura das seguintes rochas: arenito silicificado da Formação Botucatu, basalto da Formação Serra Geral e granito prata Interlagos da Face Cantareira de idade pré Cambriana são quantificados no capítulo 4 em diferentes orientações do entalhe inicial, sendo estas ortogonais entre si. Desta forma pode-se verificar, se houver, uma direção preferencial de fraturamento.

No capítulo 5 é feita uma análise dos resultados obtidos, tecendo-se considerações sobre os valores de tenacidade à fratura e as dificuldades de realização dos ensaios.

Finalmente o apêndice fornece um embasamento teórico sobre a maneira de se calcular o valor da tenacidade à fratura nos ensaios realizados.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO À MECÂNICA DA FRATURA

1.1-Introdução à Mecânica da Fratura Elástica Linear

INGLIS (1913) apud BORTOLUCCI (1993), mostrou que, em uma placa infinita com um furo central em forma de elipse e tensões de tração aplicadas ortogonalmente à direção do maior eixo da elipse, a tensão nas proximidades do ponto *C* da figura 1.1 podem ser muitas vezes maior que as tensões remotas aplicadas na placa.

Figura 1.1 - Placa infinita com furo em forma de elipse, submetidas à tensões uniformes de tração

A tensão em C na direção y é:

$$\sigma_y(C) = \sigma(1 + 2a/e) \quad (1.1)$$

sendo σ a tensão remota aplicada, $2a$ o comprimento da trinca e e a metade da largura da elipse. Se $e \ll a$:

$$\sigma_y(C) = 2\sigma a/e \quad (1.2)$$

se a expressão do raio de curvatura no ponto C da elipse ($\rho = e^2/a$) for utilizada, então:

$$\sigma_y(C) = 2\sigma(a/\rho)^{1/2} \quad (1.3)$$

O valor de concentração de tensão $[2(a/\rho)^{1/2}]$ da equação de Inglis depende muito mais da forma que do tamanho da elipse e não explica a observação experimental de que defeitos maiores causam maior enfraquecimento dos materiais.

GRIFFITH (1920), sugere a idéia de um modelo de ruptura por propagação de trinca baseado num conceito de balanço energético, que leva em conta a transferência da energia de deformação, armazenada num corpo com trinca, para a energia necessária para criar superfícies trincadas. Griffith admite que um corpo atinge a ruptura quando a propagação de uma trinca, presente neste corpo, ocorrer de maneira instável ou incontrolável. Isto ocorre quando a taxa de transferência da energia de deformação liberada for maior que a taxa de absorção da energia de superfície necessária para desencadear o processo de fraturamento.

GRIFFITH (1920) propôs que a energia total de uma placa infinita com trinca em forma de elipse é dada pela expressão (in EWALDS & WANHILL, 1986):

$$U_T = U_0 + U_E + U_S - F \quad (1.4)$$

sendo este o balanço energético de Griffith, onde:

U_T - energia total da chapa trincada,

U_0 - energia elástica da chapa carregada ainda não trincada,

U_E - perda de energia de deformação elástica causada pela presença da trinca,

U_S - variação na energia de superfície causada pela formação de superfícies trincadas (irreversível),

F - trabalho realizado pela força externa, é subtraído, já que não é parte da energia interna da placa.

GRIFFITH usou a análise de tensão desenvolvida por Inglis para mostrar que o valor absoluto de U_E é dado por:

$$|U_E| = \pi\sigma^2 a^2/E \quad (1.5)$$

e a energia de superfície elástica, U_S , foi admitida por Griffith como sendo:

$$U_s = 2(2a\gamma) \quad (1.6)$$

onde γ é a energia específica de superfície elástica, considerada como propriedade do material.

Em condições de deformação constante, o trabalho realizado pelas forças externas é zero ($F=0$) e a expressão (1.4) se reduz à:

$$U_T = U_0 + U_E + U_s \quad (1.7.a)$$

$$= U_0 + \pi\sigma^2 a^2/E + 4a\gamma \quad (1.7.b)$$

Como U_0 é constante, $dU_0/da = 0$, e a condição crítica será obtida quando $dU_T/da=0$, portanto:

$$d(\pi\sigma^2 a^2/E + 4a\gamma)/da = 0 \quad (1.8)$$

proporcionando que a tensão remota crítica para o corpo trincado seja:

$$\sigma_{cr} = (2E\gamma/\pi a)^{1/2} \quad (1.9)$$

Foi verificado que a energia de superfície (γ) obtida pela equação de Griffith, era ordens de grandeza superior ao valor medido em ensaios termodinâmicos executados em condição que não envolvem fraturamento (MEHTA e MONTEIRO, 1993).

1.1.1 - Teoria da Fratura de Irwin (Teoria Modificada de Griffith)

1.1.1.1 - Conceito de variação da liberação da energia de deformação

IRWIN e seus colaboradores (IRWIN, 1948, IRWIN & KIES, 1952 e 1954, WELLS, 1956) propuseram uma modificação da teoria de Griffith, que ao invés de se analisar a energia específica de superfície (γ), analise-se a “velocidade” com que a energia de deformação é transformada em energia de superfície, em função do comprimento da trinca: variação da liberação da energia de deformação G (in BORTOLUCCI, 1993).

Rearranjando à equação (1.9) que vem do balanço energético de Griffith equação (1.8) obtém-se:

$$\pi\sigma^2 a/E = 2\gamma \quad (1.10)$$

o lado esquerdo da equação acima define o parâmetro chamado variação da liberação de energia de deformação, então:

$$G = dU_E/da \quad (1.11)$$

A ruptura ocorre quando a variação da liberação de energia de deformação (G) atinge o valor crítico considerado uma propriedade do material (G_c).

1.1.1.2 - Conceito de Fator de Intensidade de Tensão

Figura 1.2 - Placa infinita biaxialmente carregada com trinca plana

WESTERGARD, 1939, publicou um método analítico para resolver o problema de determinação de tensões e deformações em corpos trincados. A trinca passa a ser plana, não mais elíptica, como mostra a figura 1.2.

Os valores de tensão no ponto A , próximo à extremidade da trinca ($r \ll a$), são representados pelas equações (in INGRAFFEA, 1977):

$$\sigma_x = \sigma(a/2r)^{1/2} \cos \theta/2 (1 - \sin \theta/2 \sin 3\theta/2) + \quad (1.12)$$

$$\sigma_y = \sigma(a/2r)^{1/2} \cos \theta/2 (1 + \sin \theta/2 \sin 3\theta/2) + \dots \quad (1.13)$$

$$\tau_{xy} = \sigma(a/2r)^{1/2} \sin \theta/2 \cos \theta/2 \cos 3\theta/2 \quad (1.14)$$

Análises sobre a equação (1.13), mostram que a tensão σ_y (responsável pela propagação da trinca), tende a infinito quando r tende a zero e que para $\theta = 0$ $\sigma_y = \sigma(a/2r)^{1/2}$, ou multiplicando os dois lados por $(\pi)^{1/2}$ temos:

$$\sigma_y(2\pi r)^{1/2} = \sigma(\pi a)^{1/2} \quad (1.15)$$

$$K = \sigma_{y(\theta=0)}(2\pi r)^{1/2} = \sigma(\pi a)^{1/2} \quad (1.16)$$

sendo K o fator de intensidade de tensão. Ele aumenta com o aumento do comprimento da trinca.

A trinca se propaga instavelmente quando o fator de intensidade de tensão alcança o valor crítico (K_c) considerado uma propriedade do material, e é chamado de tenacidade à fratura.

Pode ser demonstrado que o fator de intensidade de tensão (K) relaciona-se com a variação da liberação de energia de deformação (G) através das seguintes equações:

$$G = K^2/E \quad \text{estado plano de tensão} \quad (1.17.a)$$

$$G = K^2(1 - \nu^2)/E \quad \text{estado plano de deformação} \quad (1.17.b)$$

1.1.2 - Modos de Propagação da Trinca

A figura abaixo mostra três diferentes formas de propagação de uma trinca em função das tensões aplicadas e dos conseqüentes deslocamentos observados na extremidade da trinca (IRWIN, 1960, apud BORTOLUCCI, 1993).

Figura 1.3 - Modos de Propagação da Trinca

O modo I tem somente tensões de tração aplicadas normalmente ao plano da trinca, neste caso a trinca será propagada em seu próprio plano, e o deslocamento de sua superfície será no plano normal à trinca. No modo II atuam tensões cisalhantes paralelas ao eixo da trinca, e no modo III (rascamento), atuam tensões de cisalhamento na direção normal ao maior eixo da trinca.

O fator de intensidade de tensão, gerado a partir da geometria e carregamento da figura 1.2, que mostra um típico exemplo do modo I de propagação de trinca, é definido como fator de intensidade de tensão para o modo I (K_I). A equação (1.16) sob essa nova simbologia, pode ser expressa por:

$$K_I = \sigma(\pi a)^{1/2} \quad (1.18)$$

1.1.3 - Fator de Intensidade de Tensão em Corpos Finitos

A geometria de corpos finitos tem um efeito no campo de tensões próximo à extremidade da trinca, e conseqüentemente, as expressões anteriores para o cálculo do fator de intensidade de tensão devem ser modificadas. A forma geral dessa expressão modificada pode ser a seguinte (EWALDS e WANHILL, 1986):

$$K_I = C\sigma(\pi a)^{1/2}f(a/w) \quad (1.19)$$

sendo C o fator de correção para forma do carregamento e $f(a/w)$ o fator de correção para a geometria do corpo.

Esses fatores de correção podem se encontrados em compêndios e manuais de fatores de intensidade de tensão (ROOKE e CARTWRIGHT, 1976; MURAKAMI, 1987; etc.), em uso muito comum na engenharia de materiais. Na engenharia civil, e principalmente na geotecnia, as geometrias e formas de carregamento, geralmente são incomuns e complexas, portanto a determinação de C e $f(a/w)$, estaria no emprego de métodos numéricos de análise.

1.2 - Introdução à Mecânica da Fratura Elástica não Linear (MFENL)

Normalmente, na ponta da trinca, o material apresenta uma região de deformações não lineares. Se esta região for grande em comparação com o tamanho da trinca, a MFEL não pode descrever a extensão da trinca e o comportamento à ruptura do material. Uma análise desenvolvida da MFEL,

usualmente referida como mecânica da fratura elástica não linear, tem sido utilizada para prever o comportamento de materiais frágeis. Seus conceitos foram desenvolvidos a partir da plastificação na ponta da trinca de materiais metálicos. O efeito dessa plastificação é similar ao do microfraturamento observado na ponta da trinca em materiais rochosos.

1.2.1 - Descrição Geral das Características não lineares na ponta da trinca

Fisicamente, o comportamento de um material metálico sob tensão é governado pelo seu comportamento plástico, e daí uma pequena região imediatamente adiante da ponta da trinca, terá um comportamento inelástico. Essa região é referida como zona plástica (IRWIN, 1958; BARENBLETT, 1962). Em materiais rochosos tem sido demonstrada ser esta região uma zona de microfraturamento ou zona de processo de fratura (ZPF) (HARDY, 1973; HOAGLAND et. al., 1973; SCHIMIDT, 1980; ROSSIMANITH, 1983; LABUZ et al., 1983, 1985, 1987). A principal diferença entre as duas zonas, está no fato que em metais esta é formada por cisalhamento, enquanto que, em rochas é formada pela iniciação, propagação e interação de microfraturas adjacentes à ponta da trinca. Para generalizar o problema, as duas zonas são chamadas de zona não linear dentro da qual as tensões são liberadas (WHITTAKER et al., 1992).

LIU, 1983, mostrou que quanto menor a zona plástica mais elásticas serão as características do material. Portanto o fator de intensidade de tensão, K , definido para MFEL, caracteriza a tensão, deformação e campo de deslocamento dentro das zonas plástica e elástica. A zona elástica caracterizada por r_e é referida como a região K-dominante, que é sistematicamente mostrada na figura 1.4, e esta condição ($r_y \ll r_e$), é conhecida como deformação plástica de pequena escala (SSY - small scale yielding).

Figura 1.4 - Ilustração Esquemática da zona inelástica e característica da zona K-dominante na ponta da trinca (WHITTAKER et al., 1992)

Na região K-dominante os critérios da MFEL são ainda aplicáveis, mas se a condição de deformação plástica em pequena escala, SSY, não é satisfeita, isto é, se não acontecer que $r_y \ll r_e$, a MFEL também não poderá ser aplicada.

A descrição da zona de processo de fraturamento (ZPF) em rochas, é mais difícil que a zona de plastificação em metais devido às feições dos materiais rochosos (WHITTAKER et al.; 1992).

Em rochas, a zona de processo não linear é causada pela iniciação e propagação de microfraturas na vizinhança imediata à ponta da trinca. Conseqüentemente, é descrita como zona de microfraturamento ou zona de processo de fratura (ZPF), que parece e comporta-se de maneira similar à zona plástica em metais. Como não existem avaliações de modelos teóricos “perfeitos” para descrever completamente a forma e o tamanho da ZPF na ponta da trinca, estes são freqüentemente descritos por modelos aproximados desenvolvidos para descrever a zona plástica em metais, como fez SHIMIDT (1980).

SCHIMIDT (1980) sugeriu um critério de tensão normal máxima para descrever a forma da ZPF na ponta da trinca em rochas:

$$r(\theta) = 1/2\pi(K/\sigma_t)^2 \cos^2 \theta/2 (1 + |\sin \theta/2|)^2 \quad (1.20)$$

sendo r a distância da ponta da trinca até o limite da ZPF, em função do ângulo (θ) e σ_t é a resistência à tração uniaxial, tomada como positiva.

Em comparação com a zona de deformação plástica, a zona de processo de fratura (ZPF) tem o tamanho maior que a zona de deformação plástica em metais (WILKENING, 1978). Já que σ_3 não entra na expressão (1.20) a ZPF é vista ser independente da condição de deformação plana ou tensão plana. Este fenômeno implica que a tenacidade à fratura em rochas, ao contrário do que ocorre em metais, não será influenciada pela espessura do corpo de prova. Isso foi

observado em ensaios realizados com o granito Westerly por SCHIMIDT e LUTZ (1979).

Para SCHIMIDT (1980) a extensão máxima da ZPF, pode ser calculada quando $\theta = 60^\circ$ para equação (1.20). Para o calcário Indiana foi achado o valor da extensão máxima da ZPF. Mas observações experimentais realizadas por LABUZ et al., 1987, têm mostrado que a ZPF é muito maior que o valor calculado. Eles usaram a técnica ultra-som e emissão acústica para estimar o comprimento da ZPF. Foram feitas medidas para os granitos Charcoal e Rockville.

HOAGLAND et al., 1973, propuseram um modelo de quatro estágios para descrever a formação da ZPF em rochas de acordo com a figura 1.5.

OUCHETERLONY (1980) e LABUZ et al. (1985) indicaram que o tamanho da ZPF aumenta com o aumento do tamanho dos grãos da rocha. FREIDMAN et al., 1972, HOAGLAND et al., 1973 e BARTON, 1982, 1983, relataram que o tamanho da ZPF é cerca de 5 a 10 vezes o tamanho médio dos grãos, mas observações experimentais em dolomito Stockbridge por NOLEN-HOEKSEMA e GORDON, 1987, têm mostrado que a ZPF se estende acima de 20 a 40 vezes o diâmetro médio do grão presente na superfície de ruptura.

Figura 1.5: Ilustração Esquemática dos quatro estágios de desenvolvimento da ZPF em rochas e os correspondentes registros de carga “versus” deslocamento em (WHITTAKER et al., 1992)

Além do critério da tensão normal máxima existe um critério chamado modelo coesivo, que é uma modificação do modelo de Dugdale desenvolvido para metais. O comprimento efetivo da trinca consiste de uma porção livre de tração (comprimento da trinca verdadeiro) e o comprimento da ZPF, sobre o qual uma tensão coesiva tende a fechar a trinca (figura 1.6a) (LABUZ et al., 1983; INGRAFFEA & GERSTLE, 1984; CARPINTIERI et al., 1986 em WHITTAKER et al., 1992).

(a)

(b)

(c)

Figura 1.6 - Ilustração do modelo de trinca coesivo para ZPF em rocha: a) distribuição de fechamento coesivo e as dimensões associadas; b) tensão de fechamento coesiva linearmente distribuída sobre a ZPF; c) tensão de fechamento coesiva como função do deslocamento de abertura da ponta da trinca verdadeira.

A figura 1.6 ilustra esse modelo que assume:

- O material na ZPF é parcialmente danificado, mas ainda capaz de transferir tensão $\sigma(x)$, de uma superfície da trinca para a outra, enquanto o material fora da ZPF é assumido ser elástico linear (figura 1.6-a).
- A ZPF começa a se desenvolver quando a tensão principal máxima alcança a resistência à tração e o correspondente deslocamento de abertura na ponta da trinca verdadeira δ_l é zero. Com aumento de δ_l , a tensão é diminuída até zero, e o

deslocamento correspondente, δ_p , alcança um valor crítico, δ_c (figura 1.6c). Tal fenômeno de decréscimo de tensão, com o aumento da deformação, é conhecido como amolecimento em deformação (HILLERBORG, 1985) ou amolecimento em tensão (HORII et al., 1987; LEUNG & LI, 1987).

c) A tensão coesiva é uma função do deslocamento de abertura na ponta da trinca verdadeira, δ_t (figura 1.6-b).

d) O fator de intensidade de tensão na ponta do “notional crack” não existe, isto é, a tensão singular desaparece na ponta do comprimento efetivo da trinca.

LABUZ et al., 1983, 1985, propuseram que $\sigma(x)$ seja linearmente distribuída sobre o comprimento da ZPF, r_y , com a seguinte relação:

$$\sigma(x) = [(x-a)/r_y] \sigma_t \quad (1.21)$$

onde x é a distância do centro da ponta da trinca verdadeira, ao longo do eixo x do sistema de coordenadas x e y (ver figura 1.6-a).

Se for assumido que a trinca esteja sob tensão uniforme externa σ , a determinação do tamanho da ZPF, r_y , segue exatamente o mesmo caminho da análise de DUGDALE, 1960, pelo princípio da superposição. Primeiro tem-se $K_{\sigma(x)}$ devido à tensão coesiva $\sigma(x)$ e em segundo tem-se K_σ devido à tensão remota aplicada. Fazendo substituições e assumindo que $a \gg r_y$, obtém-se:

$$r_y = 9\pi/32 (K/\sigma_t)^2 \cong 0,884 (K/\sigma_t)^2 \quad (1.22)$$

Esta equação revela que o tamanho da ZPF do modelo de fratura coesivo para rochas, é maior que a zona de processo plástico do modelo de fratura de Dugdale para metais. Isto é também consistente com o critério de tensão normal máxima, que também prevê uma ZPF maior em rochas que uma zona plástica em metais (WHITTAKER et al., 1992).

1.2.2 - Influência da Amostra na Tenacidade à Fratura

A tenacidade à fratura modo I para metais, varia com a espessura do corpo de prova e o comprimento da trinca. Um incremento no comprimento da trinca, resulta em um incremento na tenacidade à fratura. E um incremento na espessura

do corpo de prova resulta em um decréscimo na tenacidade à fratura, como mostra a figura abaixo (WHITTAKER et al., 1992):

a) Tenacidade à Fratura versus comprimento da trinca

b) Tenacidade à Fratura versus espessura

Figura 1.7 - Variação da Tenacidade à fratura com o comprimento da trinca e espessura do corpo de prova para materiais metálicos (WHITTAKER et al., 1992)

Até o material atingir um valor de tenacidade à fratura constante o crescimento da trinca toma lugar dentro de uma zona de deformação plástica. Neste caso, o material apresenta tenacidade baixa, mas pode ser aumentada por um incremento do comprimento da trinca. Quando o comprimento da trinca se torna suficientemente grande, satisfazendo a condição SSY, prevalece um estado de deformação plana, consequentemente, a tenacidade à fratura se aproxima de

um valor constante, que é referido como tenacidade à fratura de deformação plana, denotado por K_{IC} (MEGHID, 1989).

Portanto a tenacidade à fratura para metais, considerada uma propriedade do material, será constante somente para a condição SSY, em deformação plana, ou seja, essa medida de resistência varia com o comprimento da trinca ascendentemente, até um ponto que permanece constante (figura 1.7a).

A ASTM (1981) recomendou tamanhos requeridos para valor representativo de tenacidade à fratura de deformação plana K_{IC} para metais:

$$\left. \begin{array}{l} a \\ B \\ w-a \end{array} \right\} \geq 2,5(K_{IC}/\sigma_{ys})^2, \quad (1.23)$$

sendo:

B - espessura do corpo de prova

w - largura do corpo de prova

w-a - largura não trincada do corpo de prova

σ_{ys} - tensão de escoamento

Um valor de tenacidade que satisfaz a inequação acima, para tamanhos de corpos de prova correspondente, é então considerado válido para tenacidade à fratura de deformação plana.

Usualmente antes que as inequações sejam examinadas, o valor obtido de tenacidade é chamado tenacidade à fratura aparente, denotado por K_Q . O segundo passo é de substituir K_Q nas inequações acima e ver se estas são satisfeitas, se forem K_Q é considerado K_{IC} .

A variação no valor da tenacidade à fratura, em função do comprimento da trinca, para materiais rochosos, é similar ao observado em materiais metálicos (WHITTAKER et al., 1992).

CAPÍTULO 2: ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA EM MATERIAIS ROCHOSOS

Assim como em outros ensaios de engenharia, há um grande número de fatores que podem interferir nas medições de tenacidade à fratura; como por exemplo anisotropia do material, dimensão das amostras (efeito escala), efeito de um pré fendilhamento. Cada metodologia de ensaio procura minimizar, ou pelo menos avaliar o efeito de um determinado parâmetro, razão pela qual há um grande número de metodologias de ensaios encontrados na literatura.

Atualmente, ensaios de tenacidade à fratura são realizados em uma ampla variedade de amostras, submetidas a diferentes metodologias de ensaios. Os valores resultantes geralmente não são comparáveis, implicando que os valores de tenacidade à fratura medidos não são uma propriedade do material. Como estes valores representam um importante meio de previsões quantitativas dentro da engenharia, é de interesse que o valor de tenacidade à fratura seja encarado como um índice característico do material. Desta forma é necessário o uso de métodos de ensaio padronizados e reconhecidos (ISRM, 1988)

Alguns ensaios que podem ser utilizadas para a determinação da tenacidade à fratura apresentados na literatura são:

2.1- Ensaio de ruptura repentina”

“Burst test (BT)”

Corresponde a um tubo vazado de parede espessa, contendo uma única trinca ou duas diametralmente opostas, que sofrerá pressão de um fluido (figura 2.1) (CLIFTON et al., 1976 e ABOUT-SAYED et al., 1978). Apesar de ser totalmente

similar às condições geométricas e de carregamento do fraturamento hidráulico. Esta técnica tem recebido pouca atenção devido à sua complexidade experimental.

Figura 2.1 - Burst Tests

CLIFTON et al., 1976 usaram o princípio da superposição para derivar o fator de intensidade de tensão para o caso de uma ou duas trincas e para $\alpha \leq 0,1$, sendo α o comprimento adimensional da trinca e igual à $a/(r_o - r_i)$, sendo a o comprimento da trinca r_o o raio externo do corpo de prova e r_i o raio interno (figura 2.1).

A equação para determinar a tenacidade à fratura é:

$$K_{IC} = Y[p_{max}(\pi r_i)^{1/2}] \quad (2.1)$$

sendo p_{max} a pressão interna máxima, r_i o raio interno e Y o fator de correção para a geometria do corpo de prova e para forma de carregamento e pode ser determinado por calibração numérica ou experimental. Este ensaio não requer medida de comprimento da trinca.

2.2- Ensaio de flexão em amostras semi circulares

“Semi-circular bend specimen (SCB)”

Este ensaio também é referido como HDB (half disc in three point in bending). A geometria deste ensaio foi desenvolvida por CHONG e KURUPPU, 1984, que corresponde a uma amostra semi circular com um simples entalhe de

comprimento a . O carregamento é semelhante a um ensaio de flexão a três pontos, aplicado como mostra a figura 2.2.

Figura 2.2 - Ensaio de Flexão a Três Pontos em Amostras Semicirculares

Este ensaio é útil quando são necessárias amostras duplicadas com composições similares. Sua aplicação também pode ser usada para estudo de fraturamento modo misto, fazendo o corte do entalhe em angulo (CHONG e KURUPPU, 1988).

CHONG et al. (1987) desenvolveram uma fórmula para K_I usando o método da taxa de liberação de energia de deformação e acharam K_I da seguinte forma:

$$K_I = [F(\pi a)^{1/2}/DB]Y \quad (2.2)$$

sendo F a carga aplicada, a o comprimento da trinca, D o diâmetro do corpo de prova, B a espessura e Y o fator de intensidade de tensão adimensional que é dado em função do comprimento adimensional da trinca (a/D). Os resultados de CHONG et al. (1987a) podem ser aproximados por uma polinomial de terceira ordem como:

$$Y = 4.47 + 7.40(a/D) - 106.0(a/D)^2 + 443.3(a/D)^3 \quad (2.3)$$

válido no intervalo $0.25 \leq a/D \leq 0.35$ e $S/D = 0.8$, sendo S o vão entre os suportes.

2.3- Ensaio em anel fraturado radialmente

“Radially cracked ring specimens (RCR)”

Este tipo de ensaio mostrado na figura 2.3, foi proposto por SHIRYAEV e KOTKIS (1982), para determinar a tenacidade à fratura de materiais frágeis simulando duas trincas radiais no interior do orifício. Foi utilizada em medidas de resistência de materiais rochosos, e foi aplicada em ensaios de fratura em rochas por THIERCELIN & ROEGIERS (1986) e por ZHAO (1989).

Figura 2.3-Amostra em anel com entalhe radial

Se o raio interno do anel for muito menor que o raio externo, o corpo de prova em anel pode ser tratado como o disco brasileiro fraturado (THIERCELIN e ROEGIERS, 1986).

DANELL et al., (1987) analisou a configuração do corpo de prova e forneceu a seguinte expressão para o fator de intensidade de tensão K_I :

$$K_I = [F(a+r_i)/Br_o(\pi)^{1/2}] \{1 + 3/2[(a+r_i)/r_o]^2 + 20/3\pi[r_o/(a+r_i)]^3 - 3/\pi(a+r_i)r_i/r_o^2\} \quad (2.4)$$

sendo a o comprimento da trinca, B a espessura do corpo de prova, F a carga aplicada, r_i o raio interno e r_o o raio externo.

2.4- Ensaio de anel modificado

“Modified ring test (MRT)”

Uma modificação do ensaio do anel fraturado radialmente (RCR) foi feita por THIERCELIN e ROEGIERS, 1986. A configuração do ensaio do anel modificado (MRT) é mostrada na figura 2.4.

Figura 2.4-Geometria do corpo de prova do anel modificado (MRT) (WHITTAKER et al., 1992)

É essencialmente baseado no disco brasileiro cilíndrico, com duas superfícies de carregamento lisas e opostas diametralmente. Uma das principais feições deste método é que aumentando a compressão diametral, iniciará no cilindro interno duas trincas diametralmente opostas, que prolongarão no eixo de carregamento até alcançar a superfície do carregamento, como mostra a figura 2.5.

Figura - 2.5: Duas trincas simétricamente radiais geradas no furo interno do corpo de prova (MRT) (WHITTAKER et al., 1992)

Este ensaio não requer um pré-entalhe ou pré-trinca. A seguinte equação, calibrada por THIERCELIN & ROEGIERS (1986), fornece o valor da tenacidade à fratura:

$$K_{I\max} = \{(Fc/\pi Br_o) [\pi(r_i + a_c)]^{1/2}\} Y$$

sendo:

$$Y = \begin{cases} 3.23 - 13.73(b/r_o) + 25.36(b/r_o)^2 - 14.8(b/r_o)^3 & \text{para } r_i/r_o = 0.13 \\ 3.50 - 14.86(b/r_o) + 37.14(b/r_o)^2 - 40.0(b/r_o)^3 & \text{para } r_i/r_o = 0.20 \end{cases} \quad (2.5)$$

$$a_c = r_o[1.02 - 1.60(b/r_o) + 0.35(b/r_o)^2 + 1.17(b/r_o)^3] \quad (2.6)$$

com r_i o raio interno, r_o o raio externo, B a espessura, j a largura da superfície de carregamento e Fc a carga crítica no registro carga versus deslocamento no ponto de carga (LPD - loading point displacement) do ensaio. Os resultados são válidos para o intervalo de $0.1 \leq j/r_o \leq 0.35$. O ensaio é realizado sob controle de deslocamento LPD (load point displacement) e a carga crítica está no topo inferior de uma decaída no carregamento antes de alcançar a carga máxima, que é uma feição deste tipo de ensaio (figura 2.6).

Figura 2.6 - Gráfico carga versus deslocamento típico do ensaio MRT

2.5- Método de indentação

“Indentation Method”

Essencialmente este método é simples e preciso. Frequentemente é empregado em vidro e cerâmica, entretanto, pesquisa de fratura em rochas também

tem usado esta técnica, com objetivo de estudar a fratura em rochas e minerais, e tem obtido um sucesso significativo.

O método consiste em provocar uma indentação no corpo de prova através de um carregamento, como mostra a figura 2.7. Essa figura não mostra um corpo de prova, mas sim os parâmetros de indentação, sendo que o corpo de prova pode ter qualquer forma.

Figura - 2.7: Representação esquemática de um contato pontiagudo mostrando os parâmetros de indentação devidos à carga (F); onde Ψ é a metade do ângulo de indentação, J é a indentação diagonal e a é o comprimento da trinca na superfície (WHITTAKER et al., 1992)

O corpo de prova pode ser arbitrariamente formado, mas deve ter uma superfície polida com objetivo de assegurar um contato idealmente agudo, e também deve ter espessura suficiente para assegurar que a extensão do campo de tensões possa desenvolver completamente dentro do corpo de prova, sem que haja influência da borda da amostra. É sugerido que a espessura do corpo de prova seja maior ou igual a dez vezes o comprimento da trinca de indentação.

$$B \geq 10a \quad (2.7)$$

Existem dois tipos de contatos de indentação que podem ser classificados como obtuso e agudo (OSTOJIC E MCPHERSON, 1987). O contato obtuso

geralmente é produzido por um indutor esférico e a principal feição deste contato é sua natureza essencialmente elástica até a trinca iniciar. O contato de indentação agudo é produzido por um indutor pontiagudo e até o início da trinca a natureza deste contato é essencialmente plástica.

OSTOJIC e MCPHERSON (1987) derivaram do balanço de energia de Griffith uma relação entre a energia de superfície específica, γ_s , e os parâmetros de indentação. Como a energia de superfície específica está relacionada com a variação da liberação de energia crítica modo I, e esta por sua vez tem relação com a tenacidade à fratura modo I, pode-se obter a tenacidade à fratura em função dos parâmetros de indentação como na equação abaixo:

$$K_{IC} = [F/(\pi a)^{3/2}] (1/\text{tg } \Psi) \quad (2.8)$$

sendo F a carga, a o comprimento radial da trinca e Ψ a metade do ângulo de indentação. Experimentalmente para achar o valor da tenacidade em um material faz-se um número de 3 a 5 ensaios similares a diferentes valores de cargas (aproximadamente 2 a 10 kN) e a indentação deve ser feita para cada carga. Então plota-se a curva F versus $a^{3/2}$ e a inclinação da mesma é determinada por uma regressão linear. Com Ψ conhecido e também a inclinação da curva F versus $a^{3/2}$, K_{IC} pode ser calculado pela equação (2.8).

Este método é mais apropriado para materiais transparentes como o vidro, cujo comprimento da trinca pode ser diretamente observado. Quando aplicado a materiais opacos como rocha e cerâmica, as observações diretas algumas vezes tornam-se difíceis.

2.6 - Disco compacto em tração

“Round compact disk in tension (RCT)”

A geometria deste corpo de prova é mostrada na figura 2.8. Este corpo de prova tem um diâmetro D , comprimento de trinca a , largura w e espessura B . Os dois furos de carregamento têm um diâmetro d , com uma distância vertical l do centro do furo à face da trinca. A carga de tração (F), é aplicada diretamente a fim de romper o corpo de prova. Este método é padronizado na ASTM 95 E399 para materiais metálicos.

Figura - 2.8: Geometria do disco compacto e as condições de carregamento associada

O fator de intensidade de tensão para o corpo de prova é dado pela seguinte fórmula (NEWMAN, 1981):

$$K_I = [F/B(w)^{1/2}] \{ (2+a/w) [0.76 + 4.8(a/w) - 11.5(a/w)^2 + 11.43(a/w)^3] \} / (1-a/w)^{3/2} \quad (2.9)$$

SUN (1983) e SUN e OUCHETERLONY (1986) usaram a carga máxima, $F_{máx}$, e o comprimento inicial da trinca, a_0 , do granito Stripa. Eles adotaram o método da secante a 5% (ASTM E399-1990) para determinar a carga crítica F_C . As notações da equação estão na figura 2.8.

2.7- Barra redonda fraturada axialmente em ruptura por compressão

”Axial cracked round bar in compression splitting (ACRBC)”

Um corpo de prova cilíndrico, contendo um entalhe reto orientado no eixo do cilindro, é submetido à compressão uniaxial através de uma chapa metálica, que não penetra no corpo de prova, como mostra a figura 2.9.

Figura-2.9: Corpo de prova cilíndrico em ruptura por compressão (WHITTAKER et al., 1992)

Foi introduzido por KENDALL, 1978, onde a trinca pode ser facilmente iniciada sob cargas compressivas relativamente baixas (WHITTAKER et al., 1992).

O fundo teórico deste ensaio é que se a chapa de carregamento é estreita e a trinca efetivamente profunda, a propagação da trinca é induzida pela tensão de tração resultante do carregamento de compressão de uma chapa de aço plana na superfície superior da amostra e o corpo de prova é rompido axialmente em duas metades idênticas. A tensão de tração na ponta da trinca é desenvolvida pela flexão dos braços do corpo de prova (WHITTAKER et al., 1992).

KARIHALOO (1984), derivou uma fórmula para o fator de intensidade de tensão, assumindo deformação plana e negligenciando a influência da deformação cisalhante, que é muito menor que 1. A fórmula é dada abaixo (em WHITTAKER et al., 1992):

$$K_I = [\sec(ka/2)] \{2 - ka[\operatorname{tg}(ka/2)]\}^{1/2} [0.54F(0.85D - w_p)/D^{2.5}(1 - \nu^2)^{1/2}] \quad (2.10)$$

sendo:

$$k = (0.86/D^2)(F/E)^{1/2} \quad (2.11)$$

a o comprimento da trinca, D o diâmetro do cilindro, F a carga compressiva, w_p a largura da placa de carregamento, E o módulo de elasticidade e ν o coeficiente de Poisson do material do corpo de prova. A expressão é válida para $a/D \geq 3/2$ e $w_p/D \leq 1/2$. Tais limitações asseguram a ruptura do corpo de prova axialmente à placa e não por cisalhamento.

Outra alternativa deste ensaio é usar uma amostra prismática como mostra a figura 2.10.

Figura - 2.10: Corpo de prova retangular em ruptura por compressão

Neste caso o fator de intensidade de tensão é dado pela fórmula:

$$K_I = [\sec(ka/2)] [0.44F(D - w_p)/BD^{1.5} \{2 - ka[\operatorname{tg}(ka/2)]/(1 - \nu^2)\}^{1/2}] \quad (2.12)$$

sendo:

$$k = 6.9(F/EBD^3)^{1/2} \quad (2.13)$$

D a largura e B a espessura do corpo de prova

2.8- Barra cilíndrica com entalhe reto em flexão

”Single edge notched round bar in bending (SENRBB)”

A geometria do SENRBB é mostrada na figura 2.11. Consiste de um corpo de prova cilíndrico com uma trinca reta no centro em que será aplicada flexão a três pontos.

Figura-2.11: Geometria do corpo de prova e esquema do ensaio SENRBB (OUCHETERLONY 1980:2)

Este método foi introduzido por BUSH, 1976, e foi adotado por OUCHETERLONY, 1980c; SWAN, 1980 a, b e SUN, 1983 para determinar a tenacidade à fratura de rochas. A expressão para o fator de intensidade de tensão será:

$$K_I = (F/D^{3/2})Y \quad (2.14)$$

sendo F a carga máxima do ensaio, D o diâmetro do corpo de prova e Y uma função do comprimento da trinca (a) e do tamanho do corpo de prova (D), que os autores citados acima calibraram usando o ensaio de flexibilidade. Como por exemplo a calibração obtida por OUCHETERLONY, 1980:2:

$$Y'(a/D) = 12.7527(a/D)^{0.5}[1 + 19.646(a/D)^{4.5}]^{0.5}/[1 - a/D]^{0.25} \quad (2.15a)$$

$$Y = 0.25(S/D)Y' \quad (2.15b)$$

2.9- Barra cilíndrica com entalhe circunferencial

“Circunferentially notched round bar in bending (CNRBB)”

O corpo de prova é um cilindro com diâmetro D e um entalhe circunferencial de profundidade a como mostra a figura 2.12.

Figura - 2.12: Geometria da barra redonda entalhada circunferencialmente em flexão (WHITTAKER et al., 1992)

BEAR (1976) (in WHITTAKER et al., 1992) propôs este método para determinar tenacidade à fratura em rochas e concreto. O fator de intensidade de tensão foi calculado por BEAR (1976):

$$K_I = 6M \{ 2a / \pi(D - 2a)^5 [a + 0.056(D - 2a)] \}^{1/2} \quad (2.16)$$

sendo M o momento aplicado ao cilindro. As outras notações estão na figura (2.12).

2.10- Barra entalhada circunferencialmente em carregamento excêntrico

“Circunferentially notched bar in eccentric loading (NRBEL)”

A configuração do ensaio é mostrada na figura 2.13. A geometria do corpo de prova é idêntica ao anterior, somente muda a forma de aplicar a carga. Este ensaio também foi proposto por BEAR, 1976 (in WHITTAKER et al., 1992).

Figura - 2.13: Geometria da barra redonda entalhada circunferencialmente com carregamento excêntrico (WHITTAKER et al., 1992)

A aplicação da carga, F , resulta em um momento, $M = Fe_y$, e uma carga compressiva F ; e_y é a distância entre o ponto de carga e o eixo do cilindro. O fator de intensidade de tensão será:

$$K_I = \left\{ \frac{F(2a)^{1/2}}{[\pi(D - 2a)^3]} \right\} \left\{ 6e_y / [(D - 2a)(a + 0.056(D - 2a))^{1/2} - 1/(a + 0.1(D - 2a))] \right\} \quad (2.17)$$

2.11- Placas retangulares em flexão

“Rectangular plates in bending”

2.11.1- Chapa retangular com entalhe reto na ponta em flexão a três pontos

“Single edge straight-through cracked rectangular plate in three point bending (SC3PB)”

A geometria e o esquema do ensaio são mostrados na figura 2.14. Consiste de um prisma de seção transversal retangular de espessura B e largura w com um entalhe reto (a_0) na direção do menor eixo. Aplica-se neste corpo de prova uma flexão a três pontos.

Figura - 2.14: Geometria da barra retangular com fratura reta em flexão a três pontos (WHITTAKER et al., 1992)

É um método padronizado pela ASTM E399 para materiais metálicos. SCHIMIDT; 1975,1976; seguiu exatamente esta técnica de ensaio para determinar a tenacidade à fratura do calcário Indiana, e pode verificar que este método é apropriado para ensaios de tenacidade à fratura de rochas. A equação de calibração

do fator de intensidade de tensão para esta configuração do corpo de prova é (BROWN & SRAWLEY, 1966):

$$K_I = [FS(a)^{1/2}/Bw^2]2.9 - 4.6(a/w) + 21.8(a/w)^2 - 37.6(a/w)^3 + 38.7(a/w)^4 \quad (2.18)$$

que é válido para $a = (0.45 \text{ a } 0.55)w$

2.11.2- Placa retangular com entalhe “chevron” em flexão a três pontos

“Single edge chevron-notched rectangular plate in three-point bending (CN3PB)”

A geometria e a configuração do carregamento deste ensaio são mostrados na figura 2.15. O corpo de prova é uma placa retangular de altura w e espessura B com entalhe “chevron” central e submetido a flexão a três pontos.

Figura - 2.15 Geometria da placa retangular com entalhe “chevron” em flexão a três pontos (WHITTAKER et al., 1992)

A fórmula para o fator de intensidade de tensão foi descrita por WU (1984), que adotou o modelo de fatias de BLUHM (1975) para calibrar fator de intensidade de tensão adimensional (Y) como função de $\alpha_0 = a_0/w$. Os resultados para $2\theta = 90^\circ$ são (em WHITTAKER et al., 1992):

$$K_Q = [F_{max} / B(w)^{0.5}] Y \quad (2.19)$$

sendo :

$$Y = 2.81 + 44.51\alpha_0 - 269.6\alpha_0^2 + 1338\alpha_0^3 - 2736\alpha_0^4 + 2242\alpha_0^5 \quad (2.20)$$

válido para $w/B = 1.5$

$$Y = 1.49 + 77.6\alpha_0 - 648.3\alpha_0^2 + 22848\alpha_0^3 - 5225\alpha_0^4 + 3592\alpha_0^5 \quad (2.21)$$

válido para $w/B=2$.

2.11.3- Placa retangular com entalhe reto em flexão a quatro pontos

“Single edge straight-through cracked rectangular plate in four-point bending (CS4PB)”

A figura 2.16 mostra a geometria do corpo de prova e a configuração do ensaio. Consiste em aplicar uma flexão a quatro pontos no corpo de prova já descrito no ítem 2.11.1.

Figura - 2.16: Geometria e esquema de ensaio da placa retangular em flexão a quatro pontos com entalhe reto (WHITTAKER et al., 1992)

Esta configuração de quatro pontos elimina a tensão cisalhante na seção transversal da chapa, o que leva à flexão pura (WHITTAKER et al, 1992). O fator de intensidade de tensão foi dado por SRAWLEY e GROSS, 1976 (em WHITTAKER et al., 1992):

$$K_I = \{[F(S_1 - S_2) (a)^{0.5}] / Bw^2\} Y$$

sendo:

$$Y = [3/2(1-a/w)^{3/2} \{1.989 - 1.33a/w - [(3.49 - 0.68a/w + 1.53(a/w)^2)(a/w)(1-a/w)](1+a/w)^2\}] \quad (2.22).$$

sendo que os parâmetros da equação são mostrados na figura 2.16 e esta é válida para o intervalo de $0 \leq a/w \leq 0.6$ e $S/w = 4$.

2.11.4- Placa retangular com entalhe “chevron” em flexão a quatro pontos

“Single edge chevron-notched rectangular plate in four-point bending (CN4PB)”

A configuração do ensaio e a geometria do corpo de prova são mostrados na figura 2.17.

Figura-2.17: Geometria e esquema do ensaio de uma placa retangular em flexão a quatro pontos com entalhe em “chevron” (WHITTAKER et al., 1992)

MUNZ et al., 1980, usou o modelo de fatias de BLUHM (1975) para calibrar valores de Y como função de $\alpha_o = a_o/w$. Seus resultados podem ser aproximados por uma polinomial de terceira ordem:

$$Y = 16.411 + 25.842\alpha_o - 2.238\alpha_o^2 + 133.889\alpha_o^3 \quad (2.23)$$

válida para coeficiente de poisson $\nu = 0.2$, $0 \leq \alpha_o \leq 0.5$, $B/w=0.8$, $S_1/w=0.75$ e $S_2/w=0.25$. A tenacidade à fratura pode ser determinada substituindo Y na equação (2.19).

2.12- Corpo de prova em torção dupla

“Double torsion specimen (DT)”

Este é um método para determinar a tenacidade à fratura, onde o fator de intensidade de tensão na ponta da trinca é independente do comprimento da mesma. A geometria do corpo de prova em torção dupla e o esquema de carregamento é mostrado na figura 2.18.

Figura - 2.18: Ilustração do corpo de prova em torção dupla e configuração do carregamento (WHITTAKER et al., 1992)

O mecanismo deste método é que quando a extremidade do corpo de prova é carregada em flexão a quatro pontos, a trinca estará sujeita à tensão de tração resultante do momento fletor, que será aplicado devido à configuração da flexão aplicada, e se propagará ao longo da estria central, mas sua propagação será maior na face inferior do corpo de prova de uma quantidade Δa , que na face superior como mostra a figura 2.18c (ATKINSON, 1979).

WILLIAMS & EVANS (1973) usaram a calibração de flexibilidade de EVANS (1972) para derivar a seguinte expressão de K_I :

$$K_I = FW_m[3(1 + \nu)/WB^3B_n]^{1/2} \text{ para tensão plana e}$$

$$K_I = FW_m[3/WB^3B_n(1 + \nu)]^{1/2} \text{ para deformação plana} \quad (2.24)$$

sendo W_m o braço do momento da barra, W a largura do corpo de prova, B a espessura do mesmo e B_n a espessura da placa na estria.

2.13- Viga em ruptura com balanço duplo

"Double cantilever beam in splitting (DCB)

Existem três tipos principais de configuração de carregamento de vigas em balanço duplo comumente usadas com objetivo de determinar a tenacidade à fratura ou a energia de fraturamento de rochas: ruptura por tração, ruptura por flexão e ruptura por cunha, como mostra a figura 2.19.

Figura - 2.19: Principais tipos de viga em balanço duplo: a) ruptura por tração, b) ruptura por flexão, c) ruptura por cunha (WHITTAKER et al., 1992)

2.13.1 - Ruptura por Tração

KANNINEM, 1973, levou em conta o efeito da tensão cisalhante e deduziu uma equação com objetivo de determinar a tenacidade à fratura modo I, para o ensaio de ruptura por tração:

$$K_I = (3.45Fa/Bh^{3/2})[1 + 0.64h/a] \quad (2.25)$$

As notações estão na figura 2.19a. KIM e STOUT, 1978, usaram este método para determinar o módulo de elasticidade e a tenacidade à fratura do granito Westerly.

2.13.2 - Ruptura por Flexão

O fator de intensidade de tensão K_I , pode ser independente do comprimento da trinca, se ao invés de aplicar carga de tração, for aplicado um momento constante na extremidade do corpo de prova, como mostra a figura 2.19b. Neste caso o fator de intensidade de tensão é:

$$K_I = M/(IB)^{1/2} \quad (2.26)$$

as notações estão na figura 2.19 e I é o momento de inércia.

A variação na configuração de carregamento fornece a vantagem neste ensaio de não requerer medidas de comprimento de trinca (WHITTAKER et al., 1992).

2.13.3 - Ruptura por Cunha

Para simplificar a fixação da carga, a força de ruptura pode ser simulada por uma cunha aplicando carga compressiva (fig. 2.19c). O fator de intensidade de tensão K_I para este caso é:

$$K_I = [0.866E\nu h^{3/2}]/\{a^2[1 + 0.64(h/a)]^2\} \quad (2.27)$$

sendo ν o deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD) e E o módulo de elasticidade do material. KOBAYASHY et al., 1986, usaram este método para estudar o efeito escala na tenacidade à fratura usando tufo Ogino.

2.14 - Disco Brasileiro entalhado em compressão diametral

Existem vários métodos para determinar a tenacidade à fratura usando o disco brasileiro com entalhe. Além do disco brasileiro com entalhe em “chevron”, normalizado pela ISRM, 1995, e que está detalhado no capítulo seguinte, existe também o disco brasileiro com entalhe central reto (CSCBD), disco Brasileiro com

estria de aresta (SECBD) e o disco brasileiro com estria dupla de aresta. A figura 2.20 ilustra estes corpos de prova.

Figura - 2.20: Ilustração de corpos de prova tipo disco brasileiro em compressão diametral: a) entalhe reto central (CSCBD), b) disco com estria de aresta (SECBD) (WHITTAKER et al., 1992)

A carga é aplicada diametralmente ao disco e é paralela ao plano do entalhe em todos os casos.

2.14.1 - Entalhe reto Central

Como mostra a figura 2.20a, um entalhe reto no centro do disco é cortado diametralmente. AWAJI e SATO (1978); SANCHEZ (1970) ATKINSON et al. (1982) e SHETTY et al. (1986) usaram o CSCBD para medir o modo I de tenacidade à fratura.

ATKINSON et al. (1982) forneceram uma solução numérica para o fator de intensidade de tensão que é da seguinte forma:

$$K_I = [F/(\pi R)^{1/2} B] Y \quad (2.28)$$

sendo

$$Y = [(a/R) N_I]^{1/2} (a/R) \quad (2.29)$$

N_I é um coeficiente adimensional em função de a/R , SHETTY et al. (1985) usaram uma polinomial de terceira ordem para os resultados de ATKINSON et al. (1982). O parâmetro a é a metade do comprimento da trinca, R é o raio do disco, B a espessura do disco e F a carga compressiva diametral. SHETTY et al. (1985) chegaram à seguinte expressão:

$$N_I(a/R) = 0.99 + 0.14(a/R) + 0.86(a/R)^2 + 0.89(a/R)^3 \quad (2.30)$$

Para comprimentos de entalhe relativamente pequenos ($a/R \leq 0.3$) ATKINSON et al. (1982) chegaram a um valor constante e igual a 1 para N_I .

2.14.2 - Disco com estria de aresta

A figura 2.20b mostra esquematicamente a configuração do corpo de prova do disco com estria de aresta em compressão diametral. O corpo de prova tem as dimensões D de diâmetro, a_0 de largura de estria, B de espessura do corpo de prova, 2θ o ângulo de distribuição de tensões e j a largura de carregamento correspondente ($j = D \sin \theta$).

O ensaio usando o SECBD foi desenvolvido por SZENDI-HORVATH, (1980 e 1982), com objetivo de determinar a tenacidade à fratura de materiais frágeis. A trinca é iniciada pela tensão de tração transversal, resultante da compressão diametral. Os autores chegaram na seguinte expressão para K_I (em WHITTAKER et al., 1992):

$$K_I = 1.264 F a_0^{1/2} / BD \quad (2.31)$$

Essa expressão é válida para uma carga pontual, isto é, $\beta = 0$. A tenacidade à fratura é obtida substituindo o valor da carga crítica em F da equação acima e as notações a_0 , B e D são mostradas na figura 2.20.

Segundo SZENDI-HORVATH, 1980, as equações do disco com estria de aresta de um lado são também aplicáveis ao corpo de prova com estrias de arestas

duplas (SECBD). Em suma o SECBD pode ser usado para determinar a tenacidade à fratura de materiais frágeis.

SINGH e PATHAN, 1988, usaram o SECBD para determinar a tenacidade à fratura de uma grande variedade de rochas. Os efeitos das dimensões dos corpos de prova foram investigados extensivamente. Seus resultados indicaram que os valores de K_{IC} , eram independente do comprimento da trinca, mas mostraram uma forte dependência da espessura do disco.

Outro corpo de prova baseado em disco entalhado foi proposto por CZOBOLY et al. (1986) apud WHITTAKER et al (1992), que propôs um ensaio de disco modificado para determinar a tenacidade à fratura em rochas. A configuração do ensaio é ilustrada na figura 2.21. A tensão de tração na região da ponta da trinca é resultante da força aplicada diretamente sob o entalhe.

Figura - 2.21: Ensaio do disco modificado

2.15-Ensaio do disco Brasileiro sem entalhe

2.15.1 - HUA GUO (1990)

Este método foi desenvolvido e empregado por HUA GUO (1990) apud WHITTAKER et al. (1992), com objetivo de determinar a tenacidade à fratura de rochas. A principal característica deste ensaio é a de não haver a necessidade de introduzir trinca ou entalhe no corpo de prova em forma de disco (figura 2.22). Uma

trinca diametral central é induzida no ensaio durante o carregamento, a qual leva o corpo de prova à ruptura. A fórmula para K_I pode ser dada como segue:

$$K_I = [2F/\pi^{3/2}R^{1/2}B\alpha]Y \quad (2.32)$$

sendo:

$Y = (a/R) \int_0^{a/R} [R^{1/2} \phi(r/R)/(a^2 - r^2)^{1/2}] d(r/R)$, o fator de intensidade de tensão adimensional,

$$\phi(r/R) = \{[1 - (r/R)^2 \sin 2\alpha] / [1 - 2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4]\} - \arctg\{[1 + (r/R)^2 \tan \alpha] / [1 + (r/R)^2]\},$$

r a distância radial do centro do disco, a o comprimento da trinca, R o raio, B a espessura e β a metade do ângulo sobre o qual a carga diametral é aplicada.

Figura - 2.22: Ensaio do disco brasileiro sem entalhe: a) disco com corte plano onde aplica o carregamento, b) disco com a geometria sem o corte.

Para evitar esmagamento no local de carregamento, o disco pode sofrer um corte plano no local de aplicação da carga (figura 2.21a).

A tenacidade é avaliada quando o comprimento da trinca é igual a um comprimento crítico. Quando o comprimento da trinca é menor que seu comprimento crítico, a propagação da trinca será instável; mas se o comprimento da trinca for maior que seu comprimento crítico a propagação da mesma será estável. Isto implica que existe um fator de intensidade de tensão local mínimo, K_{min} , que corresponde a um comprimento de trinca igual ao comprimento crítico. É requerido um aumento de carga na ruptura final do corpo de prova para superar a tensão compressiva gerada

perto dos limites de carregamento. A magnitude do comprimento de trinca crítico depende da metade do ângulo de carregamento, β . Geralmente, o comprimento crítico da trinca é aproximadamente $0.8R$. No estudo de HUA GUO (1990) o corpo de prova usado tinha as dimensões: $R = 27mm$, $B = 27mm$ e $\alpha = 5^\circ$, o que resultou em um valor de 104.1 para Y_C .

A principal vantagem desse método, está no fato de que não é necessário entalhe no corpo de prova, o que facilita esta técnica como uma aproximação potencialmente promissora para determinar a tenacidade à fratura de rochas.

2.15.2- CELESTINO E BORTOLUCCI (1992)

CELESTINO e BORTOLUCCI, 1992, apud CELESTINO ET AL., 1995, propuseram o uso de amostra “intactas”, ou sem entalhe, para determinação da tenacidade à fratura, utilizando corpo de prova do ensaio brasileiro. É um ensaio estável, realizado utilizando como variável de controle o deslocamento diametral, perpendicular ao eixo do carregamento. O deslocamento e o fator de intensidade de tensão são numericamente analisados em função das propriedades do material e do comprimento da trinca. As soluções são colocadas em termos de adimensionais e a interpretação dos resultados é confiável. O esquema do ensaio é mostrado na figura 2.23. As constantes elásticas são obtidas baseando-se nos deslocamentos u_x e u_y precedentes ao pico. Quando o pico do carregamento é alcançado, a trinca é criada e inicia-se o processo de fraturamento da amostra.

Figura 2.23 - Ensaio do disco brasileiro sem entalhe

O comprimento da trinca é determinado por uma série de ciclos de carregamento-descarregamento pós pico. A inclinação da curva durante o carregamento está diretamente ligada ao comprimento da trinca. O comprimento da trinca e consequentemente a tenacidade à fratura podem ser determinados em muitos pontos para uma mesma amostra.

Esse ensaio foi usado para determinar a tenacidade à fratura em mármore (MONTEIRO & COHEN, 1993), basalto, arenito e granito CELESTINO et al., (1995).

2.16-Influência da tensão de confinamento sobre o valor da tenacidade à fratura

Poucos autores estudaram a influência da pressão de confinamento sobre o valor da tenacidade à fratura. As dificuldades residem não somente na execução dos ensaios, mas também na interpretação dos resultados. Tais ensaios são importantes para observar um acréscimo não desprezível do valor da tenacidade à fratura com o aumento da pressão de confinamento. WINTER (1983) mediu um incremento no valor da tenacidade à fratura, a uma pressão confinante de 20 MPa, de cerca de 100% em relação ao valor sem confinamento do arenito de Ruhr. Aumentos similares foram verificados por MÜLLER (1985), para o granito de Lidate. SCHIMIDT e HURDLE (1977) verificaram um aumento de 50% no valor da tenacidade à fratura sob uma pressão de confinamento de 20,7 MPa para o calcário Indiana.

O aumento da tenacidade à fratura com a pressão de confinamento geralmente é atribuída a mudanças na zona de processo de fraturamento (ZPF), que existe à frente da extremidade da fratura.

Segundo THIERCELIN, 1987, a tenacidade à fratura usando o ensaio do anel modificado (item 2.4), parece ser um meio confiável de se determinar a tenacidade à fratura sob pressão confinante.

O ensaio baseia-se em um cilindro com uma cavidade, que é envolvido por uma envoltória impermeável e colocado em uma câmara triaxial. A pressão de confinamento e a axial são aumentadas simultaneamente até o valor de confinamento

escolhido. Então a tensão axial é aumentada com velocidade de deslocamento controlada.

A carga diametral é aumentada até o ponto onde inicia o fraturamento, a partir daí a carga decresce lentamente. O comprimento da trinca é determinado durante o ensaio, assumindo que o material é elástico linear.

O fraturamento terá início dentro do furo e se propagará ao longo do eixo do carregamento, como mostra a figura 2.24.

Figura - 2.24 -Anel modificado sob pressão confinante

THIERCELIN, 1987, verificou que muitas amostras exibiram um aumento na tenacidade à fratura em função da pressão confinante. O aumento verificado, é função das características do material. Rochas com grãos finos apresentaram um pequeno aumento da tenacidade à fratura com a tensão confinante, mas essas já possuem altos valores de tenacidade à fratura. O aumento da tenacidade à fratura sob pressão confinante mostrou ser maior em rochas que apresentam maior microfissuramento.

2.17 - Ensaios para Determinação da Tenacidade à Fratura Sugeridos como Padrão pela ISRM

A ISRM (1988) sugeriu como padrão dois métodos de ensaio, os entalhes dos corpos de prova são em forma de “chevron” ou “V”, o que permite uma propagação estável da trinca por mais tempo, pois na medida que esta se abre, seu comprimento da frente aumenta, requerendo assim mais energia para continuar sua propagação. Os corpos de prova são cilíndricos, pois esta forma é um pré requisito para serem extraídos com mais facilidade, através de brocas diamantadas. Para a realização do segundo método pode-se aproveitar a metade do corpo de prova rompido no primeiro. O entalhe do corpo de prova usado no primeiro método, pode ser perpendicular ao segundo método se as metades forem aproveitadas. Dessa forma pode-se analisar a anisotropia da rocha.

A ISRM, 1995, propôs um terceiro ensaio onde pode-se fazer um entalhe “chevron” no corpo de prova perpendicular aos outros dois métodos, e o corpo de prova pode ser aproveitado da outra metade do primeiro método da ISRM, 1988. Com esse ensaio pode-se então analisar a anisotropia em três direções ortogonais entre si.

Estes ensaios foram realizados no presente trabalho e estão detalhados nos capítulos seguintes.

CAPÍTULO 3: ENSAIOS SUGERIDOS PELA ISRM

Como comentado na introdução, este trabalho tem como objetivos equipar o laboratório de mecânica das rochas da EESC com técnica e instrumental necessários para a realização dos ensaios sugeridos como padrão pela ISRM, 1988 e 1995, e determinar a tenacidade à fratura modo I de algumas rochas brasileiras. Este capítulo tem o escopo de descrever o modo de realizar os ensaios. O embasamento teórico das fórmulas apresentadas neste capítulo se encontra no apêndice.

3.1 - Introdução

São dois os ensaios sugeridos pela ISRM (1988). Cada um desses ensaios têm dois níveis: nível I e nível II. O nível I é rápido (máximo 10 segundos) e requer somente o registro da carga máxima, pois este nível considera que o ponto de avaliação da tenacidade à fratura ocorre na carga máxima, isto implica que o material tenha um comportamento elástico linear. Como citado no capítulo I (item 1.2.1), a rocha possui uma ZPF na ponta da trinca, portanto essa só terá comportamento elástico linear se a condição SSY for satisfeita, ou seja, se o corpo de prova for bem grande em relação à ZPF. O tamanho da ZPF é uma função do tamanho dos grãos, portanto usando corpos de prova grandes com granulação fina o valor do nível I do ensaio é válido, mas o inverso não produz valores de tenacidade válidos, sendo indispensável o nível II.

O nível II é mais lento que o nível I e requer o registro de carga e deslocamento durante todo o ensaio, este nível fornece valores mais precisos que o nível I, pois considera a carga real que leva o corpo de prova ao ponto de avaliação da tenacidade à fratura. Este nível porém tem sua realização mais cara e difícil.

A ISRM, 1995, sugere um terceiro ensaio, que avalia a tenacidade somente para o nível I. Uma característica interessante desse conjunto de três ensaios é que eles podem quantificar a anisotropia de rochas visto que usam o mesmo corpo de prova com os entalhes em três direções ortogonais entre si.

Em todos os métodos a área não entalhada tem a forma de V ou “chevron”, o que gera um período relativamente longo de crescimento estável da trinca sob o

aumento de carga antes do ponto no qual a tenacidade à fratura é avaliada. Este ponto coincide com a carga máxima em material frágil e elástico linear, mas sob circunstância não ideal o ponto de avaliação da tenacidade pode ocorrer antes ou depois da carga máxima. O nível II dos ensaios da ISRM, 1988, leva em consideração esse aspecto corrigindo a tenacidade à fratura em função da não linearidade e não elasticidade do material. Também no nível II o tamanho do corpo de prova não influencia nos resultados obtidos como mostra por exemplo os ensaios realizados por YI et al., 1991, o que não ocorre no nível I, no qual a tenacidade à fratura aumenta com o aumento do tamanho do corpo de prova até um determinado tamanho, para depois deste tamanho permanecer constante.

Os métodos de ensaios sugeridos pela ISRM, 1988, usam os corpos de prova denominados “chevron” bend - CB” e “short rod - SR” e o método sugerido pela ISRM, 1995, usa o corpo de prova chamado de “cracked chevron notched brazilian disc - CCNBD” (figuras 3.4, 3.8 e 3.12 respectivamente).

3.2. - Corpos de Prova cilíndricos com Entalhe em “Chevron” sob Flexão

O corpo de prova usado neste ensaio é chamado de “CB (chevron bend)”. O corpo de prova consiste de um cilindro longo com um entalhe central em “chevron” paralelo ao menor eixo do cilindro. A tabela 3.1 fornece as dimensões calibradas para este ensaio. Este corpo de prova será submetido a flexão a três pontos conforme figura 3.1.

O ensaio pode ser feito nos dois níveis, sendo que o nível I requer somente a medida da carga máxima e o nível II requer a medida de carga e deslocamento vertical no eixo de aplicação da carga (LPD) “loading point displacement” durante todo o ensaio. O nível I é realizado sob controle de carga e o II sob controle de deslocamento da abertura da boca da trinca (CMOD) “cracked mouth opening displacement”. Para medir LPD normalmente são usados dois LVDTs e para CMOD usa-se um extensômetro tipo “clip gauge”.

Figura 3.1-Corpo de Prova "CB"

Tabela 3.1. Dimensões do corpo de prova "CB"

Parâmetros Geométricos	Valores	Tolerância
Diâmetro do corpo de prova	D	>10 X tamanho do grão
Comprimento do corpo de prova, L	4D	>3.5D
Distância dos suportes, S	3.33D	$\pm 0.02D$
Ângulo "chevron", θ	90°	$\pm 1.0^\circ$
Posição da ponta do "chevron, a_0	0.15D	$\pm 0.10D$
Largura do entalhe, t	$\leq 0.03D$ ou 1mm*	

* o maior valor

Para a preparação dos corpos de prova e realização dos ensaios, são necessários alguns dispositivos de fixação e posicionamento sugeridos pela ISRM, 1988.

O dispositivo de posicionamento do corpo de prova para realização do ensaio, deve garantir que a ponta do entalhe do corpo de prova fique exatamente embaixo do

eixo de carregamento e centrado em relação aos suportes. Este deve ser tal que possa ser retirado para realização do ensaio (figura 3.2). Para posicionar o entalhe “chevron”, deve-se ter um par de placas, sendo cada uma dessas colocadas de um lado do rasgo do dispositivo (figura 3.2).

Figura 3.2 - Dispositivo para posicionamento do corpo de prova “CB”

A figura 3.3 mostra o dispositivo de fixação dos LVDTs usados para medir o LPD. Esse dispositivo é apoiado sobre o corpo de prova, exatamente nas linhas de atuação dos apoios de reação. As pontas móveis dos LVDTs são apoiadas nos ombros de um balancim móvel, que é mantido pressionado ao entalhe por elásticos. Para medir a abertura do entalhe utiliza-se um extensômetro tipo “clip gauge”. Para acomodar o “clip gauge” deve-se colar ao corpo de prova um par de placas, que suportarão os braços do “clip gauge”, e são centradas em relação ao eixo vertical do entalhe.

Figura 3.3 - Dispositivo para medir LPD

O crescimento da trinca se processa com controle de carga no nível I, e com controle de deslocamento, CMOD (crack mouth opening displacement), no nível II. No nível I a taxa de aumento do fator de intensidade de tensão média durante o ensaio não deve ser menor que $0,25\text{MPa(m)}^{1/2}/\text{seg}$ ou tal que a ruptura ocorra no máximo dentro de 10 segundos após a aplicação da carga inicial. A tenacidade à fratura para o nível I é calculada através da expressão 3.1:

$$K_{CB} = F_{\max} A_{\min} / D^{3/2} \quad (3.1)$$

sendo:

$$A_{\min} = [1,835 + 7,15a_0/D + 9,85(a_0/D)^2] S/D \quad (3.2)$$

D = diâmetro do corpo de prova

a_0 = distância da ponta do V até a superfície do corpo de prova ($0,15D$ - figura 3.1)

S = vão do suporte ($3,33D$ - figura 3.1).

$F_{\max}$ = força máxima do ensaio

No nível II do ensaio faz-se ciclos de carregamento/descarregamento, sendo necessários no mínimo quatro ciclos com pelo menos três antes do pico e um pós-pico.

Neste nível a velocidade do ensaio deve satisfazer à inequação 3.3:

$$CMOD > 0,006 K_{CB} / [E(D)^{1/2}] \text{ m/s} \quad (3.3)$$

sendo E é o modulo de elasticidade do material, D o diâmetro e K_{CB} o valor da tenacidade obtida pela equação 3.1. Com o registro de carga “versus” LPD (load point displacement), o fator de correção não linear deve ser avaliado de acordo com método gráfico mostrado na figura 3.4 e relatado a seguir.

Para cada ciclo de carregamento/descarregamento traça-se uma reta que contém os pontos H e L. O ponto H está na parte que começa o descarregamento e sua carga correspondente é F_H . O ponto L é definido pela carga correspondente a $F_L = 0,50 F_H$ e está em cima da curva de recarregamento do ciclo. Paralela a esta reta é definida uma reta que deve estar a uma distância de $0,5 \Delta F$ da primeira, sendo ΔF a distância vertical entre a curva de carregamento e descarregamento no ponto L. Então medem-se as inclinações de cada reta e escolhem-se duas retas (S1 e S2), cujas inclinações mais se aproximam da inclinação S_c , sendo:

$$S_c = [1,05 - 2,15 a_0/D + 4,21 (a_0/D)^2] S_{tgin} \quad (3.4)$$

e S_{tgin} , a inclinação gráfica do carregamento inicial que deve estar no intervalo de 0,5 a 1,5 (figura 3.4-a), ou seja, no gráfico a inclinação da tangente inicial deve formar um ângulo com o eixo LPD no intervalo de $26,6^\circ$ a $56,3^\circ$. Colocam-se as retas escolhidas (S1 e S2) em um gráfico onde se tenha a envoltória dos ciclos de carregamento/descarregamento e acham-se os pontos de interseção da envoltória com as retas. As cargas destas interseções são denotadas por F_1 e F_2 (figura 3.4b). Acha-se assim a carga média:

$$\bar{F} = (F_1 + F_2)/2 \quad (3.5)$$

Na altura da carga média, mede-se a distância horizontal entre as retas escolhidas e acha-se X_1 . Nos pontos de interseção entre as retas e o eixo LPD mede-se X_u (figura 3.4-b). Pode-se portanto determinar:

$$p = X_u / X_1 \quad (3.6)$$

onde p é o índice de plasticidade ou de não linearidade. Deve-se então desenhar uma reta com inclinação S_c (figura 3.4-c). Para isso acha-se o ponto F'_1 , contido na reta S1,

com o auxílio da quantidade de deslocamento “recuperável” de F_2 (X_2). A partir da interseção de S_1 com o eixo horizontal, mede-se a quantidade X_2 e acha-se F'_1 sobre S_1 . Então traça-se uma reta que passa por F'_1 e F_2 achando-se o ponto sobre esta reta cuja carga é:

$$F_c = S_c X_2 \quad (3.7)$$

A seguir desenha-se uma reta por este ponto com deslocamento recuperável de X_2 . Finalmente acha-se a carga no ponto de avaliação, F_c , na interseção entre esta reta e envoltória dos ciclos.

A equação que fornece o valor da tenacidade para o nível II do ensaio será:

$$K_{CB}^C = [(1 + p)/(1 - p)]^{1/2} K_{CB} \quad (3.8)$$

se $\bar{F} > 0,98F_{\max}$ e F_C estiver situado entre as retas S_1 e S_2 senão:

$$K_{CB}^C = [(1 + p)/(1 - p)]^{1/2} (F_C/F_{\max}) K_{CB} \quad (3.9)$$

sendo K_{CB} dado na equação 3.1, mas com o cuidado de substituir a carga máxima pela carga crítica F_c .

- a) Construção da linha de descarregamento linearizada
 b) Obtenção do grau de não linearidade, p ;
 c) Obtenção da carga no ponto de avaliação, F_c .

Figura 3.4-Correção da não Linearidade

3.3 - Corpos de Prova Curtos com Entalhe em “Chevron” sob Tração

O corpo de prova deste ensaio é chamado “SR (short rod)” e sua geometria é mostrada na figura 3.5. O corpo de prova consiste de um cilindro curto com entalhe centralizado em forma de “chevron” paralelo ao maior eixo. Este corpo de prova sofrerá tração através de duas hastes encaixadas em duas placas coladas ao corpo de prova. O esquema do ensaio é mostrado na figura 3.7. A tabela 3.2 mostra as dimensões do corpo de prova.

Figura 3.5 - Geometria do Corpo de Prova “SR”

Tabela 3.2. Dimensões do corpo de prova “SR”

Parâmetros Geométricos	Valores	Tolerância
Diâmetro do corpo de prova	D	$>10 \times$ tamanho do grão
Comprimento do corpo de prova, w	$1.45D$	$\pm 0.02D$
Ângulo “chevron”, θ	54.6°	$\pm 1.0^\circ$
Posição da ponta do “chevron”, a_0	$0.48D$	$\pm 0.02D$
Comprimento do “chevron”, $a_1 - a_0$	$0.97D$	$\pm 0.02D$
Largura do entalhe, t	$\leq 0.03D$ ou 1mm^*	

* o maior valor

O ensaio pode ser feito em dois níveis. O nível I requer somente a medida da carga máxima e o nível II requer medidas de carga e deslocamento de abertura da boca da trinca (CMOD) durante todo o ensaio. O ensaio no nível I é feito sob controle de carga e no nível II sob controle de deslocamento CMOD. Normalmente as medidas de CMOD são feitas usando um “clip gauge”.

Para a aplicação da força de tração durante o ensaio foi desenvolvido um dispositivo de acordo com as sugestões da ISRM (1988) conforme figura 3.6. O dispositivo possui uma rótula que permite pequenas acomodações do corpo de prova sem o aparecimento de esforços indesejados (torção, flexão). São usados dois dispositivos iguais, sendo um conectado na parte superior da máquina de ensaio e o outro na parte inferior. A força de tração é aplicada pelas hastes que puxam duas placas de alumínio, que são coladas ao corpo de prova (conforme figura 3.7). A figura 3.7 mostra a configuração geral do ensaio.

Figura 3.6 - Dispositivo para aplicar tração no corpo de prova "SR"

Figura 3.7 - Configuração geral do ensaio "SR"

A tenacidade à fratura é avaliada em dois níveis. A tenacidade à fratura nível I, K_{SR} , é fornecida pela seguinte equação:

$$K_{SR} = 24C_K F_{max} / D^{1,5} \quad (3.10)$$

sendo C_K um fator de correção encontrado em função da geometria do corpo de prova:

$$C_K = (1 - 0,06\Delta w/D + 1,4\Delta a_0/D - 0,01\Delta\theta) \quad (3.11)$$

e Δw , Δa_0 e $\Delta\theta$ a diferença entre os valores medidos e os valores nominais do comprimento do corpo de prova, comprimento do entalhe inicial e ângulo "chevron" respectivamente.

Se o fator de correção, C_K , estiver no intervalo $0,99 < C_K < 1,01$, adota-se C_K igual a 1 na equação (3.10)

Para o nível II, da mesma forma que o ensaio "CB", são feitos ciclos de carga e descarga, registrando-se em gráficos os valores de carga "versus" CMOD. A velocidade de ensaio no nível II deve satisfazer a seguinte inequação:

$$CMOD > 0,017 K_{SR} / [E(D)^{1/2}] \text{ m/s} \quad (3.12)$$

sendo E é o módulo de elasticidade do material, D é o diâmetro do corpo de prova e K_{SR} é o valor da tenacidade no nível I dado na equação (3.10).

Para o cálculo do fator de intensidade de tensão determina-se S_C como na expressão abaixo:

$$S_C = 0,5 S_{tgin} \quad (3.13)$$

Os registros gráficos são feitos com F “versus” $CMOD$ com a tangente inicial gráfica entre 0.7 e 1.5. Todos os demais procedimentos, seja de cálculo ou de construção gráfica, são idênticos aos do ensaio “CB” (equações 3.5 a 3.9 e figura 3.4).

3.4 - Corpos de Prova na Forma de Disco Brasileiro Fraturado com Entalhe em “Chevron”

O ensaio usa material rochoso na forma de testemunho. A geometria do CCNBD (cracked chevron notched brazilian disc) é ilustrada na figura 3.8. O corpo de prova tem forma de um disco brasileiro com entalhe em “chevron”, que é feito com dois cortes em ambos os lados do disco ao longo do mesmo plano de corte diametral (figura 3.9). A carga é aplicada paralelamente ao plano do entalhe. A propagação da trinca inicia-se na ponta do entalhe em “chevron” e se propaga radialmente na direção externa do corpo de prova até o ponto onde a tenacidade à fratura é avaliada. O ensaio é feito sob controle de carga e requer somente o registro da carga máxima, sendo que se deve fazer dois ciclos de carregamento-descarregamento antes da carga máxima, para a acomodação do corpo de prova com a máquina, sendo que, os descarregamentos devem ocorrer cerca de 20% da carga máxima.

Notação da figura 3.8:

$2a_1$ - comprimento do entalhe na face do corpo de prova;

a_0 - distância do centro do corpo de prova até o vértice do entalhe;

a - distância do centro do entalhe até o ponto onde a trinca propagou;

$2b$ - largura da trinca remanescente à distância a do centro do corpo de prova;

R - raio do corpo de prova;

R_s - raio da serra.

FIGURA 3.8 - Geometria do Corpo de Prova "CCNBD".

Figura 3.9 - Procedimento do entalhe

Todas as dimensões da geometria do corpo de prova devem ser convertidas em parâmetros adimensionais com relação ao raio, R , como a seguir:

$$\begin{aligned}
\alpha_0 &= a_0/R \\
\alpha_1 &= a_1/R \\
\alpha_B &= B/R \\
\alpha_S &= R_S/R
\end{aligned}
\tag{3.15}$$

sendo B a espessura do corpo de prova e R_S o raio da serra, que será usada para fazer o entalhe no corpo de prova.

As dimensões do raio da serra de corte, R_S , e a profundidade do corte h_c , podem ser calculadas pelas seguintes relações:

$$\begin{aligned}
\alpha_S &= [\alpha_0^2 + (\alpha_1^2 - \alpha_0^2 + \alpha_B/4)^2/\alpha_B^2]^{1/2} \\
h_c &= [\alpha_S - (\alpha_S^2 - \alpha_1^2)^{1/2}]R = [\alpha_S - (\alpha_S^2 - \alpha_0^2)^{1/2}]R + B/2 \\
\alpha_0 &= \{\alpha_S^2 - [(\alpha_S^2 - \alpha_1^2)^{1/2} + \alpha_B/2]^2\}^{1/2} \\
\alpha_1 &= \{\alpha_S^2 - [(\alpha_S^2 - \alpha_0^2)^{1/2} - \alpha_B/2]^2\}^{1/2} \\
\alpha_B &= 2[(\alpha_S^2 - \alpha_0^2)^{1/2} - (\alpha_S^2 - \alpha_1^2)^{1/2}]
\end{aligned}
\tag{3.16}$$

Após a preparação do corpo de prova, este deve ser lavado para a remoção do pó dentro do entalhe e então levado para secar à 104°C por 24 horas para a remoção da água absorvida. Neste estágio devem-se medir as dimensões geométricas do corpo de prova como diâmetro (D), espessura (B) e comprimento da trinca ($2a_1$) com precisão de 0,1mm. Onde D é a média dos diâmetros medidos nas extremidades, B é a média de quatro espessuras ortogonais entre si e $2a_1$ é a média dos dois valores de $2a_1$ medidos em ambos os lados do corpo de prova. Depois disso deve-se converter essas medidas em α_1 e α_B como na equação 3.15. Os corpos de prova serão descartados caso não satisfaçam as seguintes condições:

$$\alpha_1 \geq 0,4 \tag{3.17-a}$$

$$\alpha_1 \geq \sigma_B/2 \tag{3.17-b}$$

$$\alpha_B \leq 1,04 \tag{3.17-c}$$

$$\alpha_1 \leq 0,8 \tag{3.17-d}$$

$$\alpha_B \geq 1,1729\sigma_1^{1,6666} \tag{3.17-e}$$

$$\alpha_B \geq 0,44 \tag{3.17-f}$$

O corpo de prova é colocado cuidadosamente na máquina de ensaio, com um dispositivo para auxiliar o alinhamento da trinca perpendicular à placa de carregamento. O ensaio é realizado sob controle de carga e a taxa de carregamento

deve ser tal que a ruptura deve ocorrer dentro de no máximo 20 segundos após o início do ensaio.

A tenacidade à fratura deve ser calculada pela seguinte expressão:

$$K_{IC} = F_{max}/B(D)^{1/2}Y \quad (3.18)$$

sendo Y é o valor do fator de forma para o corpo de prova, que é determinado em função das dimensões geométricas do corpo de prova α_0 , α_1 e α_B .

$$Y = ue^{v\alpha_1} \quad (3.19)$$

onde u e v são valores constantes tabelados (tabela 3.3), e determinados em função de α_0 e α_B . Se os valores de α_0 e α_B não estiverem na tabela 3.3, deverá ser feita uma interpolação linear para calcular os valores.

O diâmetro mínimo do corpo de prova deverá ser:

$$D_{min} = 8,88 + 1,4744(K_{IC}/\sigma_t)^2 \quad (3.20)$$

sendo σ_t a resistência à tração das amostras rochosas. Geralmente para materiais rochosos D_{min} é aproximadamente 75mm.

Não existe garantia que o valor da tenacidade à fratura determinado neste método represente uma propriedade do material. Entretanto, pesquisas mostraram que para muitas rochas frágeis, os valores obtidos são valores reais da propriedade do material (ISRM, 1995).

3.5 - Validade das Fórmulas da ISRM, 1988

OUCHETERLONY, et al., 1991, realizaram vários ensaios para determinação da tenacidade à fratura de rochas com o propósito de definir os limites de validade dos ensaios da ISRM, 1988. Esses ensaios apresentaram, para algumas rochas, valores de K_{CB}^C menores que os valores de K_{CB} . Já que o valor K_{CB} não é uma propriedade do material, os autores sugerem que K_{CB}^C deve ser avaliado em uma quantidade de crescimento da trinca idêntica ao corpo de prova “SR” para tornar possível a compatibilidade dos corpos de prova. O valor da tenacidade à fratura para o corpo de prova “CB” avaliado para o comprimento crítico da trinca igual ao comprimento crítico da trinca do corpo de prova “SR”, ou seja, $0.48D$, foi chamado de K_{CB}^C .

Tabela 3.3 - Valores de u e v

α_0	0.100	0.150	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300	0.325	0.350	0.375	0.400	0.425	0.450
u														
α_0														
0.440	0.2747	0.2774	0.2791	0.2808	0.2825	0.2844	0.2865	0.2883	0.2914	0.2943	0.2979	0.3024	0.3069	0.3120
0.480	0.2727	0.2752	0.2765	0.2782	0.2795	0.2812	0.2833	0.2856	0.2882	0.2918	0.2954	0.2994	0.3039	0.3090
0.520	0.2708	0.2727	0.2740	0.2757	0.2771	0.2788	0.2806	0.2828	0.2857	0.2887	0.2925	0.2968	0.3013	0.3060
0.560	0.2689	0.2705	0.2716	0.2733	0.2744	0.2763	0.2781	0.2805	0.2831	0.2867	0.2901	0.2943	0.2989	0.3039
0.600	0.2667	0.2684	0.2696	0.2709	0.2721	0.2739	0.2757	0.2782	0.2812	0.2844	0.2882	0.2921	0.2967	0.3015
0.640	0.2649	0.2665	0.2674	0.2685	0.2701	0.2719	0.2738	0.2764	0.2791	0.2825	0.2863	0.2905	0.2947	0.2992
0.680	0.2632	0.2646	0.2655	0.2667	0.2682	0.2704	0.2718	0.2744	0.2774	0.2807	0.2848	0.2888	0.2930	0.2971
0.720	0.2611	0.2628	0.2637	0.2650	0.2667	0.2683	0.2705	0.2727	0.2763	0.2794	0.2831	0.2871	0.2916	0.2954
0.760	0.2598	0.2612	0.2625	0.2637	0.2650	0.2668	0.2693	0.2719	0.2744	0.2781	0.2819	0.2860	0.2895	0.2934
0.800	0.2582	0.2602	0.2611	0.2625	0.2641	0.2657	0.2680	0.2706	0.2736	0.2772	0.2811	0.2845	0.2878	0.2916
0.840	0.2572	0.2586	0.2599	0.2612	0.2628	0.2649	0.2672	0.2699	0.2727	0.2763	0.2801	0.2831	0.2867	0.2891
0.880	0.2562	0.2578	0.2593	0.2602	0.2621	0.2642	0.2668	0.2691	0.2723	0.2754	0.2793	0.2816	0.2853	0.2867
0.920	0.2553	0.2572	0.2582	0.2598	0.2613	0.2634	0.2658	0.2684	0.2716	0.2747	0.2782	0.2811	0.2831	0.2856
0.960	0.2549	0.2566	0.2578	0.2593	0.2612	0.2633	0.2655	0.2685	0.2710	0.2746	0.2767	0.2799	0.2811	0.2825
1.000	0.2547	0.2564	0.2576	0.2591	0.2610	0.2630	0.2653	0.2679	0.2709	0.2738	0.2768	0.2786	0.2794	0.2794
1.040	0.2544	0.2565	0.2576	0.2593	0.2608	0.2627	0.2653	0.2678	0.2708	0.2727	0.2747	0.2769	0.2769	0.2765
v														
0.440	1.7813	1.7820	1.7820	1.7833	1.7863	1.7893	1.7923	1.7967	1.7966	1.7977	1.7973	1.7932	1.7901	1.7850
0.480	1.7748	1.7763	1.7787	1.7800	1.7843	1.7881	1.7907	1.7934	1.7952	1.7929	1.7923	1.7901	1.7866	1.7811
0.520	1.7694	1.7734	1.7758	1.7769	1.7808	1.7845	1.7884	1.7907	1.7911	1.7920	1.7897	1.7860	1.7823	1.7784
0.560	1.7644	1.7701	1.7732	1.7748	1.7794	1.7822	1.7856	1.7877	1.7885	1.7864	1.7857	1.7820	1.7779	1.7725
0.600	1.7620	1.7668	1.7692	1.7727	1.7770	1.7792	1.7826	1.7835	1.7833	1.7831	1.7805	1.7782	1.7733	1.7689
0.640	1.7580	1.7631	1.7671	1.7707	1.7732	1.7757	1.7788	1.7794	1.7795	1.7779	1.7753	1.7716	1.7686	1.7652
0.680	1.7550	1.7602	1.7640	1.7676	1.7707	1.7711	1.7757	1.7759	1.7754	1.7741	1.7700	1.7666	1.7630	1.7612
0.720	1.7536	1.7580	1.7616	1.7647	1.7661	1.7698	1.7708	1.7722	1.7693	1.7683	1.7652	1.7617	1.7574	1.7562
0.760	1.7497	1.7553	1.7568	1.7600	1.7635	1.7656	1.7649	1.7652	1.7662	1.7624	1.7593	1.7554	1.7548	1.7528
0.800	1.7474	1.7506	1.7538	1.7557	1.7581	1.7611	1.7613	1.7603	1.7596	1.7561	1.7525	1.7512	1.7509	1.7494
0.840	1.7430	1.7487	1.7500	1.7522	1.7545	1.7547	1.7551	1.7548	1.7535	1.7499	1.7469	1.7473	1.7448	1.7497
0.880	1.7392	1.7438	1.7446	1.7487	1.7490	1.7492	1.7478	1.7487	1.7463	1.7452	1.7403	1.7434	1.7414	1.7493
0.920	1.7357	1.7390	1.7413	1.7423	1.7440	1.7446	1.7443	1.7432	1.7411	1.7389	1.7360	1.7363	1.7417	1.7448
0.960	1.7299	1.7337	1.7358	1.7370	1.7372	1.7373	1.7372	1.7346	1.7344	1.7309	1.7343	1.7331	1.7414	1.7483
1.000	1.7243	1.7279	1.7300	1.7308	1.7310	1.7307	1.7306	1.7297	1.7273	1.7270	1.7258	1.7302	1.7394	1.7525
1.040	1.7196	1.7213	1.7231	1.7232	1.7246	1.7256	1.7237	1.7231	1.7204	1.7238	1.7272	1.7293	1.7423	1.7569

MATSUKI, et al. (1991) forneceram valores mínimos de diâmetro do corpo de prova para os ensaios “CB” e “SR”, sugeridos pela ISRM (1988), serem válidos. Esses valores são dados pelas equações abaixo:

$$D_{min} = 0.71(K_{IC}/\sigma_I)^2 \quad (3.21)$$

para o corpo de prova “SR” quando K_{IC} é conhecido, e:

$$D_{min} = 1.60(K_{IC}/\sigma_I)^2 \quad (3.22)$$

para o corpo de prova “CB” quando K_{IC} é conhecido. Quando não se conhece o valor de K_{IC} , o diâmetro mínimo pode ser calculado da seguinte maneira (OUCHETERLONY et al., 1991):

$$D_{min} = 0.71(1.2K_{IC}^e/\sigma_I)^2 \quad (3.23)$$

sendo:

$$K_{IC}^e = 0.23E^{0.65} \quad (3.24)$$

com K_{IC}^e (um valor estimado para K_{IC}) em $\text{MPa(m)}^{1/2}$ e E em GPa.

Através dos resultados dos ensaios realizados os autores concluíram que:

1) O valor da tenacidade à fratura verdadeiro é igual ao valor obtido pelos ensaios da ISRM (1988), $K_{IC} = K_{ISRM}^C$, com resultados bem precisos. Isto ocorre quando o material é ideal, isto é, material elástico linear e rochas frágeis com $p \cong 0$. Nesse caso,

$$K_{CB} = K_{SR} \cong K_{CB}^C = K_{SR}^C = K_{IC} \quad (3.25)$$

Nos ensaios dos autores isto ocorreu no tufo Ogino (figura 3.10).

Também obtiveram resultados bem exatos para rochas não frágeis com $p \neq 0$, com

$$K_{CB} < K_{SR} \leq K_{CB}^C \leq K_{CB}' = K_{SR}^C \cong K_{IC} \quad (3.26)$$

que é válido se $D \geq D_{min}$. As rochas precisam ser isotrópicas ou ter a mesma orientação para valer as equações (3.25) e (3.26).

Figura 3.10 - p "versus" D para o tufo Ogino

2) O valor da tenacidade à fratura verdadeiro é aproximadamente o valor obtido pelos ensaios da ISRM (1988), $K_{IC} \cong K_{ISRM}^C$, com possível imprecisão. Isto ocorre para rochas não frágeis como no caso 1 acima. Os métodos sugeridos pela ISRM (1988) são válidos quando:

$$K_{IC} \cong K_{ISRM}^C(2D) \cong K_{ISRM}^C(D) \quad (3.27)$$

ou seja, faz-se os ensaios com dois diâmetros diferentes, sendo um o dobro do outro. Se os valores de tenacidade à fratura forem próximos para os diferentes diâmetros, então os valores de tenacidade à fratura são válidos, senão faz-se a curva K de resistência (K_R), ou seja, a curva do fator de intensidade de tensão em função do comprimento da trinca, e:

$$K_{IC} \cong K_R(\Delta a) \quad (3.28)$$

quando $\Delta a \geq \Delta a_{min}$. Nos ensaios realizados pelos autores o gabro Kallax, com $p \neq 0$, dão resultados válidos dentro dos métodos sugeridos e para o granito Inada é necessário fazer a curva K_R . A figura 3.11 mostra os valores de p para essas duas rochas.

Figura 3.11 - p “versus” D para o gabro Kallax e o granito Inada

3) O valor da tenacidade à fratura verdadeiro é aproximadamente o valor da tenacidade à fratura obtido dos ensaios sugeridos pela ISRM (1988), $K_{IC} \cong K_{ISRM}^C$, com imprecisão desconhecida. Isto ocorre para rochas anisotrópicas não frágeis com a trinca na orientação longitudinal ou transversal do corpo de prova se:

$$K_{CB}^{C'} \neq K_{SR}^C \quad (3.29)$$

válido quando $D \geq D_{min}$.

4) O valor da tenacidade à fratura é aproximadamente o valor obtido pelos ensaios da ISRM (1988), $K_{IC} \cong K_{ISRM}^C$, com precisão adequada do ponto de vista da engenharia. Esta calibração básica é possível quando $D \geq D_{min}$.

5) O valor da tenacidade à fratura é diferente do valor obtido nos ensaios da ISRM (1988), $K_{IC} \neq K_{ISRM}^C$, e K_{IC} não é fornecido pelos ensaios. O ensaio é feito com $D \leq D_{min}$.

CAPÍTULO 4: ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Neste trabalho foram realizados os ensaios sugeridos pela ISRM, 1988 e 1995 e já descritos no capítulo anterior. Este capítulo descreve os dispositivos necessários para os ensaios e os materiais usados, também fornece os resultados obtidos nos mesmos.

4.1 - Amostragem

As rochas para determinação da tenacidade à fratura foram escolhidas em função das suas características de homogeneidade e isotropia e também pela facilidade de obtenção e importância no âmbito de sua utilização na engenharia civil. Assim foram selecionadas três tipos de rochas muito comuns e muito utilizadas como material de revestimento e/ou material de construção no estado de São Paulo: arenito, basalto e granito.

O arenito é da Formação Botucatu e foi proveniente da pedreira Araújo da cidade de São Carlos. É uma rocha exclusivamente eólica de sedimentos continentais e da idade Triássico/Jurássico (PARAGUASSU et al., 1993). A rocha usada neste trabalho possui estratificação plano-paralela. É uma rocha que apresenta elevado grau de silicificação, granulometria fina, coloração vermelha, grãos de quartzo (mais de 80% da composição) e calcedônia e óxido de ferro como cimento (SOUZA et al., 1990).

Os grãos do arenito são arredondados e os espaços entre eles são preenchidos por sílica. Essa sílica ocorre na forma de cordões de sílex (opala-calcedônia) e envolve os clastos (SOUZA et al., op cit).

O basalto da Formação Serra Geral, foi proveniente da pedreira Leão Leão da cidade de Jaboticabal. A rocha não é muito fraturada, o que é essencial para conseguir os corpos de prova do tamanho desejado. O basalto é compacto de cor cinza, textura afanítica, constituído principalmente de plagioclásio, piroxênio, magnetita e, em pequena quantidade, matéria vítrea (BORTOLUCCI, 1990).

O Granito Prata Interlagos, pertencente à Facies Cantareira da idade pré-cambriana do Estado de São Paulo, foi proveniente da cidade de São Paulo no bairro

de Interlagos da mineração Viterbo Machado Luz. Possui granulação fina, coloração branca e inequigranular, constituída predominantemente de plagioclásio, quartzo e biotita.

Foram feitos ensaios para determinar algumas propriedades mecânicas das amostras e o módulo de elasticidade, a resistência à tração e a resistência à compressão são dados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Propriedades Mecânicas das Amostras

propriedades mecânicas rochas	resistência à tração (MPa)	resistência à compressão (MPa)	módulo de elasticidade (GPa)	diâmetro médio dos grãos (mm)
arenito	9.6	270	36.37	0.5
basalto	12.0	277	50.12	0.7
granito	7.3	185	39.26	2.8

4.2 - Preparação das Amostras

4.2.1 - Corpo de Prova “CB”

Para confecção dos corpos de prova “CB” foram extraídos testemunhos cilíndricos a partir de blocos (de aproximadamente 400 x 300cm) das três rochas utilizando uma máquina de extração com brocas diamantadas. Para o basalto e arenito usou-se uma broca de 77 mm de diâmetro interno e para o granito uma de 75mm. A extração dos testemunhos é mostrada na foto 4.1. Os blocos foram orientados com riscos feitos com caneta à prova d’água para que todos os corpos de prova de um mesmo bloco tivessem a mesma direção de entalhe.

Os tarugos tiveram 300mm de comprimento e para seu acabamento cortou-se as extremidades em uma máquina de corte (foto 4.2).

Para a confecção do entalhe foi utilizado um disco diamantado de 125mm de diâmetro externo e 1.5 mm de espessura. O disco foi usado em uma retífica.

Utilizou-se um dispositivo da MTS com objetivo de fixar o corpo de prova para fazer o entalhe. Esse dispositivo, mostrado na figura 4.1, consiste de um prisma vazado de seção quadrada com rasgo central para entrada do disco e com quatro

roscas para colocar os parafusos que prendem o corpo de prova ao dispositivo. Esse dispositivo foi fixado na mesa da retífica através de uma morsa (foto4.3). Após o corte do entalhe em um lado do corpo de prova vira-se o dispositivo de fixação e faz o corte no outro lado. A rotação do dispositivo permitiu obter-se o entalhe em um ângulo “chevron” reto. A profundidade que o disco penetrou no corpo de prova foi de $0.25D$ para obter o comprimento inicial do entalhe de $0.15D$. Dessa maneira a profundidade de corte para o arenito e o basalto foi de 19.25mm e para o granito de 18.75mm. As dimensões recomendadas para este corpo de prova estão na tabela 3.1.

Após a preparação dos corpos de prova estes ficaram estocados em ambiente natural por 6 a 12 horas e a umidade estimada foi de 1.5%, 0.78% e 0.44% para o arenito, basalto e granito respectivamente.

Figura 4.1 - Dispositivo de fixação do corpo de prova “CB” para confecção do entalhe

4.2.2 - Corpo de Prova “SR”

Para confecção dos corpos de prova “SR”, aproveitou-se uma das metades rompidas dos corpos de prova “CB”. O risco, feito com caneta à provas d’água na confecção do corpo de prova “CB”, serviu como orientação para confecção do entalhe deste corpo de prova.

As metades dos corpos de prova “CB” receberam acabamento no lado onde estava o entalhe, ou seja, no lado rompido. Para isso levou-se a metade rompida do corpo de prova “CB” na máquina de corte e deixou o tarugo de arenito e basalto com 111mm de comprimento. O tarugo de granito ficou com 110 mm de comprimento

para satisfazer as dimensões desse corpo de prova que são dadas na tabela 3.2, pois o diâmetro do tarugo de granito era menor.

Para confecção do entalhe usou-se um disco de 205 mm de diâmetro externo e 1.0 mm de espessura.

Foi feito um projeto do dispositivo usado na fixação do corpo de prova “SR” para confecção do entalhe conforme mostra a figura 4.2, sendo w o comprimento do corpo de prova e D o diâmetro. Esse dispositivo foi fixado na mesa da retífica através de uma morsa. A mesa da retífica permite a rotação do corpo de prova em relação ao corte para a execução do ângulo “chevron” exigido, que é de 54.6° . A foto 4.4 mostra o dispositivo de fixação do corpo de prova preso na retífica. Após a confecção de um lado do entalhe vira-se o dispositivo de fixação do corpo de prova e a mesa da retífica e faz-se o entalhe do outro lado. A inclinação da mesa da retífica para cada lado foi de 27.3° .

A profundidade que o disco penetrou nos corpos de prova foi de 57.58mm em uma das extremidades dos corpos de prova de arenito e basalto e de 56.08mm em uma das extremidades dos corpos de prova de granito.

Como no ensaio “CB” estes corpos de prova também ficaram estocados em ambiente natural por 6 a 12 horas antes da realização do ensaio e a umidade estimada foi a mesma que para os corpos de prova “CB”.

Figura 4.2 - Dispositivo de fixação do corpo de prova “SR” para confecção do entalhe

4.2.3 - Corpo de Prova "CCNBD"

As metades dos corpos de prova "CB", após fraturados, foram utilizadas para confecção destes corpos de prova. Como no ensaio "SR", esta metade foi levada para a máquina de corte e o disco foi cortado no lado onde rompeu no ensaio "CB". A espessura foi de 25 mm para o arenito e o basalto e de 23 mm para o granito. No local do risco, feito na hora da extração do testemunho, mediu-se 90° ao redor do mesmo e marcou-se o local para fazer o entalhe, de maneira que esse fosse perpendicular aos entalhes feitos nos corpos de prova "CB" e "SR".

O disco diamantado usado para confecção do entalhe teve diâmetro externo de 65 mm e 1.5 mm de espessura. A confecção do entalhe necessitou do dispositivo de fixação do corpo de prova mostrado na figura 4.3, sendo D o diâmetro do corpo de prova, B a espessura, L a largura do dispositivo ($L > 1.5D$), H a espessura do dispositivo ($0,25D < H < 0,35D$) e o ângulo A deve estar entre 110 e 130° . Este dispositivo foi fixo na mesa da retífica através de uma morsa. O disco penetrou no corpo de prova uma profundidade de 13 mm no arenito e no basalto e 12 mm no granito, depois vira-se o dispositivo e corta-se o outro lado. A figura 3.13 mostra o esquema de confecção do entalhe e a foto 4.5 mostra o corpo de prova fixo no dispositivo na hora da confecção do entalhe.

Após a confecção do entalhe lavou-se os corpos de prova e estes foram levados à estufa por 24 horas para secagem do material, como sugere a ISRM, 1995.

Figura 4.3 - Dispositivo de Fixação do corpo de prova "CCNBD" para confecção do entalhe

4.3 - Execução dos Ensaios

As montagens dos ensaios “CB”, “SR” e “CCNBD” foram feitas conforme descrito no capítulo 3. Todos os ensaios foram realizados em uma máquina servo controlada com capacidade de carga máxima de 2.700kN (MTS 815) e com uma célula de carga de 50kN.

4.3.1 - Ensaio “CB”

O ensaio é de flexão à três pontos, teve o vão entre os apoios de 254mm para as três rochas ensaiadas. O ensaio no nível I requer somente o registro da carga máxima e é realizado sob controle de força. O nível II requer registro de carga e deslocamento LPD durante todo o ensaio, este nível é realizado sob controle de deslocamento CMOD.

Para medir o deslocamento CMOD no nível II do ensaio foi usado um “clip gauge” com extensão de 5mm e para a medida do deslocamento LPD usou-se 2 LVDTs com extensão de 2,5mm. Os LVDTs foram colocados simetricamente aos 2 lados de aplicação da carga e o registro gráfico é do valor médio ($F \times LVDT_{\text{méd}}$). A foto 4.6 mostra o nível II do ensaio com os dispositivos de medidas de deslocamento.

A taxa de carregamento para o nível I e a velocidade de ensaio para o nível II são dadas na tabela 4.2. A taxa de carregamento satisfaz o quesito de que o corpo de prova chegasse à ruptura dentro de no máximo dez segundos e a velocidade de ensaio foi lenta o suficiente para obter no mínimo três ciclos de carga e descarga antes do pico. A tabela 4.3 mostra os resultados dos 31 ensaios “CB” realizados, com os respectivos p para o nível II.

4.3.2 - Ensaio “SR”

O ensaio é de tração e pode ser feito em dois níveis. O nível I requer somente o registro da carga máxima e é realizado sob controle de carga. O nível II requer o registro de carga e deslocamento CMOD durante todo o ensaio, este nível é realizado sob controle de deslocamento CMOD.

Para medir CMOD no ensaio “SR” usou-se um “clip gauge” com capacidade de abertura de 5mm. A foto 4.7 mostra o ensaio com o respectivo dispositivo.

Foram feitos dezesseis ensaios com o corpo de prova “SR” no nível I e quinze ensaios no nível II, cujos resultados são mostrados na tabela 4.4, juntamente com o fator adimensional correspondente, p , para o nível II. A taxa de carregamento para o nível I e a velocidade de ensaio para o nível II estão na tabela 4.2, sendo que estas satisfizeram os quesitos sugeridos pela ISRM (1988).

4.3.3 - Ensaio “CCNBD”

O ensaio “CCNBD” é realizado sob controle de carga e requer somente o registro da carga máxima. No ensaio “CCNBD”, para posicionar o entalhe em “chevron” paralelo à aplicação da carga, como indica a figura 3.8, foi utilizado um esquadro pequeno.

A foto 4.8 mostra a realização do ensaio com seus dispositivos. Foram realizados 15 ensaios com o corpo de prova “CCNBD” para as três rochas ensaiadas, cujos resultados são apresentados na tabela 4.5. A taxa de carregamento é dada na tabela 4.2, sendo que esta levou o corpo de prova à ruptura dentro de no máximo 20 segundos como sugere a ISRM (1995).

Tabela 4.2 - Taxas de carregamento e velocidades de ensaios

ENSAIO	NÍVEL I - taxa de carregamento (kN/s)			NÍVEL II - velocidade de ensaio (mm/min)		
	ARENITO	BASALTO	GRANITO	ARENITO	BASALTO	GRANITO
“CB”	0.40	0.60	0.60	0.04	0.04	0.05
“SR”	0.23	0.30	0.40	0.15	0.15	0.16
“CCNBD”	1.00	1.50	1.35	-	-	-

Tabela 4.5: Tenacidade à Fratura modo I para Corpos de Prova “CCNBD”

CP	ARENITO	BASALTO	GRANITO
1	1.10	1.67	1.57
2	1.12	1.70	1.41
3	1.10	2.17	1.30
4	1.16	1.86	1.33
5	1.21	1.97	1.35
media	1.14	1.87	1.40
desvio p	0.05	0.20	0.11

Para as tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 as unidades de tenacidade à fratura estão em $\text{MPa(m)}^{1/2}$ e p é adimensional.

Foto 4.1 - Extração dos testemunhos

Foto 4.2 - Acabamento dos Testemunhos

Foto 4.3 - Dispositivo de Fixação para Confecção do Entalhe do Corpo de Prova "CB"

Foto 4.4 - Dispositivo de Fixação para Confecção do Entalhe do Corpo de Prova "SR"

Foto 4.5 - Dispositivo de Fixação para Confecção do Entalhe do Corpo de Prova "CCNBD"

Foto 4.6 - Nível II do Ensaio "CB" com seus respectivos dispositivos

Foto 4.7 - Nível II do Ensaio "SR" com seus respectivos dispositivos

Foto 4.8 - Ensaio “CCNBD” com seus respectivos dispositivos

CAPÍTULO 5: DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

Em relação às dificuldades da preparação das amostras e da execução dos ensaios, o desenvolvimento do trabalho permite concluir que:

- a confecção do corpo de prova “CB” é mais fácil que a do corpo de prova “SR”, devido à profundidade de entrada da serra no corpo de prova que é menor, além do ângulo exigido que requer somente a rotação do dispositivo de fixação, sendo que a confecção do corpo de prova “SR” requer a rotação do dispositivo de fixação e da retífica;

- O nível I dos ensaios é fácil de realizar, possui o cálculo mais direto necessitando somente da carga máxima, além de requerer equipamentos menos sofisticados para realização do ensaio. Porém, para obter valores verdadeiros de tenacidade à fratura, deve-se ter materiais homogêneos, de granulação fina e corpos de prova grandes;

- O nível II do ensaio “CB” apresenta maiores dificuldades de realização que o ensaio “SR”, pois pode acontecer um escorregamento do balancim, perdendo assim o corpo de prova e o ensaio, pois perde-se as medidas dos LVDTs;

- o cálculo da tenacidade à fratura no nível II destes ensaios são bastante trabalhosos, pois são feitos por métodos gráficos, e, com um único gráfico do ensaio não é possível medir as inclinações para cada ciclo de descarregamento-carregamento, sendo assim o gráfico de um ensaio é dividido em vários gráficos para cada ciclo de descarregamento-carregamento, com objetivo de obter a inclinação de cada um. É recomendável fazer um programa numérico para o cálculo da tenacidade à fratura no nível II.

Com relação à validade dos ensaios, em termos do tamanho da amostra, foi verificado que:

- no ensaio “CB”, de acordo com a equação (3.22) e a tabela 4.1, o D_{min} foi de 4,0, 6,5 e 15,6cm para o arenito, basalto e granito respectivamente. O arenito e o

basalto atingiram este quesito, o granito não atingiu, sendo que o quesito do Dmin para o granito é impraticável;

- no ensaio “SR”, de acordo com a equação (3.21) e a tabela 4.1, o quesito do Dmin foi atingido para todos corpos de prova;

- no ensaio “CCNBD”, de acordo com a equação (3.20) e a tabela 4.1, o quesito do Dmin, como no ensaio “CB”, também não foi atingido para o granito.

Em função dos resultados obtidos para os valores de tenacidade à fratura, resumidos na tabela 5.1, verifica-se que:

- o ensaio “CB” apresentou para o basalto menor resultado no nível II que no I. OUCHETERLONY et al. (1991) também acharam, para vários casos, $K_{CB}^C < K_{CB}$. Os autores afirmaram que, neste caso, os resultados de K_{CB}^C são inválidos. Atribuíram que esse erro deve ser causado por uma análise prematura do ponto Fc no ensaio “CB”;

- o ensaio “CCNBD” apresentou menores resultados de tenacidade à fratura que os ensaios “SR” e “CB”. O mesmo ocorreu na literatura (FOWELL & XU, 1994). Esses autores plotaram um gráfico com valores médios de diferentes amostras dos ensaios “CB” e “SR” (K^{ISRM}) “versus” valores médios dos ensaios “CCNBD” (K^{CCNBD}) e chegaram na relação: $K^{CCNBD} = 0.05 + 0.88K^{ISRM}$, ou seja, esta relação sugere que os valores de tenacidade obtidos dos corpos de prova “CCNBD” serão aproximadamente 10% menores que os valores obtidos dos corpos de prova “CB” e “SR”;

- o ensaio “SR” foi o que apresentou melhores resultados, pode-se dizer que isso concorda com a literatura, que não cita resultados de ensaios no nível II menores que no nível I para este ensaio;

- comparando os resultados “CB” e “SR”, com exceção do basalto, pode-se dizer que $K_{CB} = K_{SR} \cong K_{CB}^C = K_{SR}^C$ e que, os valores de p dados nas tabelas 4.3 e 4.4, quando comparados aos valores de p dos ensaios realizados por Oucheterlony et al., 1991, figuras 3.10 e 3.11 - capítulo 3, podem ser considerados aproximadamente zero. Então para as rochas ensaiadas não é necessário fazer a correção do ponto de avaliação da tenacidade no nível II, ou seja, igualar o ponto de avaliação do corpo de prova “CB” com o “SR”, pois os resultados para essas rochas são válidos;

•também pode-se observar que os valores de p para o ensaio “CB” são maiores que os valores de p para o ensaio “SR”, o que concorda com os resultados de Oucheterlony et al., 1991, e isto pode ser visto nas figuras 4.8 e 4.9 do capítulo 4;

Tabela 5.1: resultados médios dos ensaios “CB” e “SR” nos níveis I e II e “CCNBD”

Ensaio	“CB”[MPa(m) ^{1/2}]		“SR”[MPa(m) ^{1/2}]		“CCNBD”
Rocha	nível I	nível II	nível I	nível II	[MP(m) ^{1/2}]
arenito Botucatu	1.36	1.30	1.34	1.50	1.14 1.61
basalto Serra Geral	2.39	1.82	2.36	2.42	1.87 2.64
granito prata Interlagos	1.96	1.97	2.19	2.28	1.40 1.98

E, finalmente, comparando os resultados deste trabalho aos da literatura, pode-se dizer que os valores estão aparentemente dentro do esperado, quando se compara a ordem de grandeza dos mesmos. Os valores de desvio padrão, também estão de acordo com os encontrados na literatura, que apesar de altos são razoáveis para materiais rochosos.

APÊNDICE: EMBASAMENTO TEÓRICO PARA AS FÓRMULAS DA ISRM, 1988 E 1995

1 - Calibração da Flexibilidade do Corpo de Prova

1.1 - Tenacidade à Fratura em Função da Curva de Calibração da Flexibilidade

Como já comentado no capítulo 1, item 1.1.3, o fator de intensidade de tensão para corpos finitos deve possuir correções para a geometria do corpo de prova e a forma de carregamento (equação 1.19).

KIES-IRWIN, 1954, apud BARKER, 1979, fornece uma equação geral para G_{IC} considerando o material elástico linear. A expressão de Kies-Irwin serve para qualquer corpo de prova, mas a figura 1 ilustra um com entalhe em “chevron”. A energia requerida para avançar a trinca a uma pequena distância no estado estável, Δa (figura 1a), é:

$$\Delta W = G_{IC} b \Delta a \quad (1)$$

sendo b a largura média da frente da trinca entre a e $a + \Delta a$. A energia, ΔW , é o trabalho irreversível realizado durante o avanço da trinca.

Figura 1 - a) Seção Transversal Central do corpo de prova “SR” com avanço incremental da trinca, Δa b) Vista Lateral do “SR”

Para iniciar a trinca, pode-se carregar o corpo de prova com uma força F , causando uma abertura x na boca do entalhe (figura 1b). Antes da iniciação da trinca, a curva do carregamento “versus” o deslocamento procede em um caminho de inclinação elástica linear como descrito na figura 2. A parte da não linearidade significa a iniciação da trinca na ponta do “V”.

Figura 2 - Esquema de comportamento de um corpo de prova elástico linear

Assumindo um material elástico linear e carregando-se o corpo de prova, sob controle de deslocamento, o ponto A da curva de carregamento da figura 2 corresponde a uma configuração de propagação da ponta da trinca até um determinado comprimento. Um descarregamento naquele ponto, gera uma curva de descarregamento representada por uma reta que passa pela origem, já que o material é assumido elástico linear. Se ao invés de se descarregar no ponto A, a trinca seja avançada de uma quantidade Δa , a nova configuração será representada pelo ponto B. Um subsequente descarregamento de B novamente produzirá uma linha reta para origem (figura 2). O trabalho irreversível, realizado pelo avanço da trinca na distância Δa , é dado pela área hachurada no triângulo OAB. Esta área é aproximadamente dada por:

$$\Delta W = (1/2) \bar{F} \Delta x \quad (2)$$

sendo $\bar{F}$ a carga média entre A e B , e Δx a separação longitudinal das curvas de descarregamento na carga média (figura 2).

A mudança incremental no “compliance” elástico de A para B é:

$$\Delta\lambda = \Delta x / \bar{F} \quad (3)$$

Usando a equação (3) para eliminar Δx da equação (2), acha-se:

$$\Delta W = (1/2)\bar{F}^2\Delta\lambda \quad (4)$$

Eliminando ΔW pelo uso da equação (1) e tomando o limite $\Delta\lambda$ e Δa tendendo a zero, obtém-se:

$$G_{IC} = (F^2/2b)(d\lambda/da) \quad (5)$$

b , F e $d\lambda/da$ são avaliados ao comprimento da trinca, a , o qual há uma propagação incremental da trinca. Com a equação (5), que é a de Kies-Irwin, e a equação (1.17b), que é a fórmula de conversão de Irwin, BARKER (1979) fez algumas manipulações e chegou a uma expressão para K_{IC} :

$$K_{IC} = AF_{max}/D^{3/2} \quad (6)$$

essa expressão é uma função do diâmetro do corpo de prova (D), da força máxima aplicada (F_{max}) e de A que é uma função de λ . Sendo λ a curva de calibração “compliance”, que pode ser obtida em laboratório.

1.2 - Construção da Curva de Calibração “Compliance”

No caso de ensaio, onde a geometria do corpo de prova e a forma de carregamento são definidas, normalmente usa-se fazer uma calibração “compliance” para achar λ . Esta calibração resumidamente consiste em achar $d\lambda/da$ com dados experimentais. Faz-se ensaios com vários comprimentos de trinca (ou entalhe), que

são usados para a construção da curva λ “versus” a . O esquema do procedimento é mostrado na figura 3.

Figura 3 - Representação Esquemática para determinação experimental da taxa de liberação de energia e portanto do fator de intensidade de tensão

O “compliance” é definido como mostra a equação (3), no qual λ é a inclinação incipiente da curva F “versus” x . Assim, o valor λ obtido juntamente com o valor a correspondente é o ponto da coordenada na curva λ “versus” a .

Para se obter melhores resultados deve-se realizar vários ensaios, nos quais os corpos de prova tenham o mesmo comprimento de trinca, e um valor médio de λ deve ser determinado.

A curva de calibração “compliance” normalmente é apresentada na forma de um polinômio de terceiro ou quarto grau obtido através da regressão polinomial dos dados de laboratório.

2 - Cálculo da Tenacidade à Fratura para o nível I dos Ensaio da ISRM

2.1 - “Chevron Bend - CB”

Em função das proporções sugeridas pela ISRM (1988) para o corpo de prova “CB” (figura 3.1), o comprimento da frente da trinca dentro da extensão do “chevron” será:

$$\begin{aligned} b/D &= 2\operatorname{tg}\theta(a - a_0)/D \\ &= 2(a - a_0)(Da_I - a_I^2)^{0.5}/(a_I - a_0) \end{aligned} \quad (7)$$

O “compliance” no ponto de carga λ_F é dado pela equação 3 ou:

$$g = \lambda_F ED \quad (8)$$

sendo g definido como o “compliance” adimensional. OUCHETERLONY (1980:2) chegou em um valor para g , em função de α , fazendo um “compliance” para o corpo de prova com entalhe reto. Desse valor de $g(\alpha)$, da taxa de liberação de energia potencial de Kies-Irwin (equação 5) e da fórmula de conversão de Irwin (equação 1.17b) ele obteve um valor K_I para o corpo de prova correspondente ao “CB” com entalhe reto como dado a seguir:

$$K_{IS} = 0.25(S/D)Y_S(\alpha)F/D^{1.5} \quad (9)$$

sendo:

$$Y_S = 2(D/S) [(dg_S/d\alpha)/[(1 - \nu^2)]^{0.5}/(\alpha - \alpha^2)^{0.25}] \quad (10)$$

OUCHETERLONY (1980:17) usando o método STCA (“straight through crack approximation”), que para propósitos práticos considera $dg_C/d\alpha \cong dg_S/d\alpha$ na área “chevron” e isto implica que $Y_C \cong Y_S(b_S/b_C)$. Então baseado no método da flexibilidade em combinação com a solução do corpo de prova correspondente com entalhe reto chega na mesma equação (9), mas em função de Y para o chevron:

$$K_I = 0.25(S/D)Y(\alpha)F/D^{1.5} \quad (11)$$

sendo:

$$Y = 2(D/S) \{(dg/d\alpha)/[(1 - \nu^2)b/2D]\}^{0.5} \quad (12)$$

chamado de fator de intensidade de tensão adimensional em termos de g . O comprimento da trinca adimensional é $\alpha=a/D$ e g o “compliance” adimensional dado

na equação (8). D é o diâmetro, S o vão entre os apoios, b o comprimento da frente da trinca (equação 7) e ν o coeficiente de Poisson.

OUCHETERLONY, 1984:8, fez uma calibração “compliance” experimental do corpo de prova “CB” e chegou na seguinte expressão para Y em função do comprimento inicial da trinca:

$$Y'(a_0/D, \theta, t/D) = Y_c = 7.34 + 28.6\alpha_0 + 39.4\alpha_0^2 \quad (13)$$

válido quando $0.05 \leq a_0/D \leq 0.25$. Sendo Y_c o fator de intensidade de tensão adimensional crítico e α_0 o comprimento inicial adimensional da trinca.

Se for usada a representação de BARKER (1977), equação (6) no lugar da equação (13):

obtem-se:

$$A = A(S/D, a_0/D, \theta, t/D, a/D) = 0.25(S/D)Y_c \quad (14)$$

e A para o corpo de prova de dimensões sugeridas na tabela 3.1, é dado na equação 3.2 do capítulo 3.

2.2 - “Short Rod - SR”

Fazendo ensaios de calibração “compliance” com o corpo de prova “SR” o fator adimensional A da equação (6) é simplificada pela substituição de uma polinomial de quarta ordem com constantes adimensionais. O valor calibrado de A para a configuração das dimensões do corpo de prova “SR” é de:

$$A = 24.0 \pm 0.25 \quad (15)$$

esse valor é um valor consensual para a geometria padrão sugerida pela ISRM, 1988 (NEWMAN, 1984 apud OUCHETERLONY, 1989).

Vários autores fornecem correções para variações nas proporções do corpo de prova. OUCHETERLONY, 1985:2 sugere a seguinte equação e diz que é suficientemente exata dentro das tolerâncias das dimensões padrão do corpo de prova:

$$A_{min} = 24.0[1 - 0.6\Delta w/D + 1.4\Delta a_f/D - 0.014\Delta(2\theta)] \quad (16)$$

como na equação (3.10 e 3.11).

3 - Fórmulas para o Nível II dos Ensaios da ISRM, 1988

3.1 - Introdução

Para assegurar que os valores de tenacidade à fratura calculado pelas equações do nível I dos ensaios “CB” e “SR” (3.1 e 3.10) são uma propriedade representativa do material, a ZPF deve ser suficientemente pequena em comparação com as dimensões do corpo de prova, isto é, deve satisfazer as condições SSY (capítulo 1, item 1.2). Esta condição exige maiores dimensões para os corpos de prova a fim de que o ensaio seja válido. Mas pode ser impraticável e algumas vezes impossível empregar corpos de prova do tamanho requerido, particularmente para rochas com grãos maiores e portanto necessita-se fazer ensaios com corpos de prova menores que os tamanhos exigidos. Em princípio, os conceitos da MFEL não são aplicáveis e deve ser feita alguma extensão ou modificação da MFEL durante a avaliação dos ensaios de fratura, em particular a tenacidade à fratura para materiais rochosos (WHITTAKER, et al., 1992).

BARKER, 1977, mostrou que os valores de tenacidade à fratura medidos para o calcário Indiana usando o corpo de prova “SR”, foi função do tamanho do corpo de prova. Isso foi explicado como o resultado significativo da ZPF na ponta da trinca.

As equações (3.1 e 3.10) usam a carga máxima (F_{max}) para calcular a tenacidade à fratura no nível I. No caso de deformação elástica linear (ignorando a deformação plástica), correspondendo à F_{max} , o comprimento da trinca alcança um valor crítico constante independente do material (figura 4b). Para situações de não linearidade, isso nem sempre é verdadeiro (figura 4c, BARKER, 1979). Portanto a carga crítica, F_c , que pode ou não ser igual à F_{max} , deve ser determinada a partir do comprimento de trinca crítico, sendo usada para avaliar a tenacidade à fratura.

Figura 4 - Interpretação Esquemática do corpo de prova "CB" mostrando a relação carga, posição na frente da trinca e comportamento linear ou não linear (WHITTAKER et al., 1992)

3.2 - Comprimento crítico da trinca e inclinação correspondente

O entalhe "chevron" produz uma pré trinca durante o ensaio por causa do aumento da largura da frente da trinca, b , com o crescimento da trinca, a . O aumento da largura da frente da trinca tende a estabilizar o crescimento inicial sob a condição de controle de carga. Isso é descrito por uma força de extensão da trinca ou pelo fator de intensidade de tensão, K_I , que primeiro decresce com o aumento do comprimento da trinca (figura 5). O crescimento da trinca é estável sob o aumento da carga externa, até a função K_I alcançar um mínimo, quando $a = a_c$, então K_I aumenta e o crescimento será instável (OUCHETERLONY, 1980:17).

Figura 5 Curva Fator de intensidade de tensão “versus” comprimento da trinca

Esse comportamento se explica devido ao fato de que a frente da trinca cresce em forma curva, sendo assim K_I varia ao longo da frente da trinca (figura 6).

Figura 6 Variação de K_I ao longo da frente da trinca

Nos ensaios de tenacidade à fratura, a característica mínima de K_I para um comprimento de trinca determinado à “priori”, dito $a = a_c$, é de crucial importância.

Para determinar o comprimento crítico da trinca usa-se a curva de calibração de flexibilidade do fator de intensidade de tensão adimensional. Então, do método “compliance” (figura 3) extrai-se a inclinação da curva carga “versus” deslocamento para o comprimento crítico, com o objetivo de determinar o ponto no qual o fator de intensidade de tensão, como função do corpo de prova, tem um mínimo.

Para o corpo de prova “CB”, com $a_0 = 0.15D$, isso ocorre aproximadamente a $0.15D$ da ponta do “chevron”, neste ponto a rigidez é de 78 a 95% do seu valor inicial, ou seja a correlação entre a rigidez da amostra na condição crítica e a rigidez inicial (Stg_{in}) é sugerida por OUCHETERLONY, 1984:8 e 1987:11:

$$Sc = [1.05 - 2.15a_0/D + 4.21(a_0/D)^2]Stg_{in} \quad (17)$$

Para o corpo de prova “SR” isso ocorre aproximadamente a $0.34D$ da ponta do “chevron”, ponto no qual a rigidez é a metade de seu valor inicial, ou seja:

$$Sc = 0.5Stg_{in} \quad (18)$$

Portanto deve-se fazer no mínimo três ciclos de descarregamento-carregamento antes de alcançar a carga máxima do ensaio e mais um ciclo após a carga máxima, pois obtendo-se as inclinações destes ciclos é que escolhem-se duas retas que mais se aproximam da inclinação Sc , que será a inclinação da reta que passa pelo ponto de carga crítico F_c .

Para achar o ponto onde a reta com inclinação Sc corta a abcissa usa-se o método gráfico descrito no capítulo 3 (figura 3.7) e acha-se também a força crítica F_c , que é o ponto no qual a tenacidade é avaliada.

Se F_c é um ponto entre as inclinações escolhidas e $\bar{F} > 0.98F_{max}$, então a tenacidade à fratura no nível I só requer uma correção para o grau de plasticidade que será descrita a seguir.

3.3 - Fator de correção para plasticidade (p)

BARKER, 1979, faz uma derivação para achar um fator de correção da plasticidade para tenacidade à fratura. O corpo de prova “SR” é carregado pelo aumento da carga F , causando o início de uma trinca na ponta do “V”, e continua crescendo com o aumento de carga. Em algum ponto a carga alcança um máximo, depois disso, para a trinca continuar seu crescimento estável é necessário que a carga diminua.

O ensaio é iniciado no ponto O da figura 6, e o corpo de prova é carregado até o ponto A (onde a trinca já iniciou sua propagação estável), sendo, então, descarregado. Assume-se para o nível I do ensaio, que a trilha de descarregamento terá uma relação elástica linear como visto na figura 2. Entretanto a trilha de descarregamento voltará para um ponto A'', no eixo x, com deslocamento permanente, por causa da deformação plástica ao redor da ponta da trinca durante o carregamento OA.

Como no caso da MFEL (figura 2), supondo que no lugar de descarregar em A, a trilha de carregamento continua até o ponto B, resultando em um avanço adicional quase estático, Δa , na frente da trinca estável. Assumindo que um descarregamento subsequente no ponto B produzirá novamente um caminho reto de descarregamento, mas agora interceptando o eixo x em algum ponto novo, B'', devido à deformação plástica adicional (figura 7). O trabalho adicional irrecuperável, realizado no carregamento de A para B, é a área hachurada A''ABB'', assumindo basicamente nesta teoria que este trabalho adicional irrecuperável é usado na criação de novas áreas de trinca, $b\Delta a$, sendo b a largura média da frente da trinca durante o avanço Δa . O trabalho por unidade de área alcançada pela frente da trinca é uma constante do material, G_{IC} , como no caso da MFEL, embora o tamanho da zona elástica na ponta da trinca seja grande o suficiente para prevenir o comportamento inteiramente elástico do corpo de prova como um todo.

A área A''ABB'' é aproximada pela área trapezoidal A''A'B'B'' da figura 7, que é dada exatamente por:

$$\Delta W = 1/2(1 + p)\bar{F}\Delta x \quad (19)$$

sendo p definido como a razão das duas bases do trapézio $A''A'B'B''$, Δx_0 e Δx :

$$p = \Delta x_0 / \Delta x \quad (20)$$

Figura 7 - Esquema do comportamento elasto plástico do corpo de prova

Vale a pena notar que p pode ser interpretado como o grau de plasticidade exibida pelo corpo de prova entre dois pontos na curva de carregamento, onde a trinca está crescendo. O valor de $p = 0$, isto é $\Delta x_0 = 0$, implica que o corpo de prova não sofreu nenhuma deformação plástica do ponto A para o B . O valor $p = 1$, $\Delta x_0 = \Delta x$, implica que não ocorreu crescimento da trinca, e que Δx está inteiramente atribuído à deformação plástica do corpo de prova. Também vale a pena notar que p pode ser medido experimentalmente fazendo o registro de carga “versus” deslocamento do corpo de prova, tirando a inclinação nos pontos A e B . Os valores Δx e Δx_0 podem ser determinados graficamente, como na figura 6, e p é então calculado na equação (20).

A seguir, calcula-se a mudança no “compliance” entre as duas trilhas de descarregamento e acha-se:

$$\Delta\lambda = (1 - p)\Delta x / \bar{F} \quad (21)$$

usando a equação (21) para eliminar Δx da equação (19), obtém-se:

$$\Delta W = 1/2[(1 + p)/(1 - p)]\bar{F}^2 \Delta \lambda \quad (22)$$

seguindo igualmente o que se fez nas equações (1) a (6) e (19) a (22), e tomando-se o limite para $\Delta \lambda$ e Δa aproximadamente zero. Então:

$$G_{IC} = [(1 + p)/(1 - p)](F^2/2b)(d\lambda/da) \quad (23)$$

A equação (23) é a nova relação de flexibilidade generalizada. É idêntica à equação (5) na derivação da MFEL exceto para o fator de plasticidade $(1 + p)/(1 - p)$. Então a equação elasto plástica para G_{IC} torna-se igual à equação da MFEL quando a plasticidade do corpo de prova, p , é zero.

Da equação (23), acha-se a equação para K_{IC} seguindo os mesmos passos como no caso da MFEL. O K_{IC} assim obtido será uma propriedade do material, e descreverá o campo de tensão sobre uma grande dimensão nas vizinhanças da ponta da trinca de um corpo de prova com comportamento elástico linear, embora não possa descrever exatamente o campo de tensão sobre uma grande vizinhança na ponta da trinca do corpo de prova com comportamento elasto plástico do qual foi determinado.

Aplicando o desenvolvimento da MFEL para G_{IC} , então obtém-se:

$$K_{IC}^C = [(1 + p)/(1 - p)]^{1/2} K_{IC} \quad (24)$$

sendo K_{IC}^C o valor da tenacidade à fratura, levando em conta o efeito da plasticidade do material, e K_{IC} o valor do fator de intensidade de tensão crítico que será obtido da análise da MFEL (equação 3.1 e 3.10), isto é, ignorando a presença dos efeitos de plasticidade. Deve-se entretanto, tomar cuidado na avaliação de K_{IC} , porque na equação (equação 3.1 e 3.10) foi assumido que F_{max} é a carga na qual a trinca alcança seu comprimento crítico a_m , para este caso a carga correspondente será F_c , que nem sempre coincide com a carga máxima.

4 - “Cracked Chevron Notched Brazilian Disc - CCNBD”

Para o ensaio “CCNBD”, se for assumido que a frente da trinca se propaga retilinicamente, então a largura da trinca é dada pela equação:

$$b = [2R^2/B]f_1(\alpha) \quad (25)$$

sendo:

$$f_1(\alpha) = (\alpha_1^2 + \alpha_0^2) + \alpha_B^2/4 - [(\alpha_1^2 - \alpha^2)\alpha_B + (\alpha_1^2 - \alpha_0^2 - \alpha_B^2/4)^2]^{1/2} \quad (26)$$

e $\alpha = a/R$, α_1 , α_0 e α_B já definidos na equação (3.15) do capítulo anterior.

Substituindo a equação (26) na (27) obtém-se:

$$K = [F/B(D)^{1/2}] \{[(d(\lambda BE')/d\alpha)\alpha_B]/4f_1(\alpha)\}^{1/2} = [F/B(D)^{1/2}]Y(\alpha) \quad (27)$$

sendo $\lambda BE'$ o valor “compliance adimensional para o corpo de prova CCNBD e $Y(\alpha)$ o valor do fator de intensidade de tensão adimensional para o corpo de prova “CCNBD”.

Pode-se usar o modelo da superposição “compliance” em fatia de Bluhm para derivar o valor “compliance” para uma geometria com entalhe “chevron” baseada nos valores “compliance” do corpo de prova correspondente com entalhe reto.

BLUHM, 1975, desenvolveu um método quase analítico para resolver o problema da frente da trinca, de não crescer de forma reta. A idéia básica é que todo corpo de prova pode ser analiticamente dividido em um número de diferentes fatias ao longo da direção da espessura, e o “compliance” total do corpo de prova λ_T é dado pela soma dos “compliances” recíprocos de todas as fatias, isto é:

$$1/\lambda_T = \sum_{i=1}^n 1/\lambda'_T \quad (29)$$

O efeito da tensão cisalhante interlaminar, entre as diferentes fatias, pode ser representado por uma constante k , que deve ser determinada pela comparação de resultados experimentais e analíticos.

Figura 8 - Modelo de Fatia de Bluhm

Para o corpo de prova “CCNBD” a idéia é ilustrada na figura 8 (FOWEL & XU, 1994). Divide-se o corpo de prova em n fatias, então toda fatia tem uma espessura $\Delta Z = B/n$. Os autores usaram o modelo de flexibilidade em fatia para derivar o valor da flexibilidade para geometria com entalhe em “chevron” baseado nos valores de flexibilidade do corpo de prova correspondente com entalhe reto e chegaram nas equações 3.18 e 3.19 do capítulo 3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUT-SAYED, A. S.; BRECHTEL, C. E.; CLIFTON, R. J. - In situ stress determination by hidrofracturing: a fracture mechanics approach. *J. Geophys. Res.* 83, 2851-2862 (1978).
- ASTM E 399-74 *Annual Book of ASTM Standard*, Part. 31 (1974).
- ASTM E 399-81 Standard Method of Test for Plane Strain Fracture Toughness in Metallic Materials, New York (1981).
- ASTM E399-90 (1990)
- ATKINSON, B. K. (1979) Fracture toughness of tennessee sandstone and Carrara marble using the double torsion testing method, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 16, pp 49-53.
- ATKINSON, C., SMELSER, R. E. & SANCHEZ, J. Combined mode fracture via the cracked Brazilian disc test, *Int. J. Fract.* 18, nº 4, 279-291, (1982).
- ATKINSON B. K. Subcritical crack growth in geologic materials. *J. Geophys. Res.* 89:4077-4114 (1984).
- AWAJI, H. & SATO, S. Combined mode fracture toughness measurement by the disc test, *J. Eng. Materls. Tech.*, 100, 175-182, (1978).
- BARENBLETT, G. I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture, *Adv. Appl. Mech.*, 7, 55 - 129 (1962).
- BARKER L. M. A simplified method for measuring plane strain fracture toughness. *Engng. Fract. Mech.* 9, 361-369, (1977).
- BARKER L. M. Compliance calibration of a family of short rod and short bar fracture toughness specimens. *Engng. Fract. Mech.* 17, 289-312 (1983).
- BARKER L. M. Theory for determining K_{IC} for small, non LEFM specimens, supported by experiments on aluminum. *Int. J. Fract.* 15, 515-536 (1979).
- BARKER L. M. Short rod and short bar fracture toughness specimen geometries and test methods for metallic materials. In *Fracture Mechanics: 13th Conf.*, ASTM STP 743, (Edited by R. Roberts), pp 456-475. ASTM, Philadelphia, PA (1981).
- BARTON, C. C. *Systematic jointing in the Cardium sandstone along the Bow River*, Phd Thesis, Yale Univ., Alberta (1982).

- BARTON, C. C. Variables in fracture energy and toughness of rock, *Proc. 24rd US Symp. on Rock Mech.*, The Univ. of California, Berkeley, California, R. E. Goodman & F. E. Heuze (Eds.), pp449 - 462 (1983).
- BEAR, T. J. (1976) New fracture toughness test for rock and concrete with particular reference to rock structure design. *PhD Tesis, Departament od Civil Eng. and Building, The Poytechnic of Wales Treforest, Mid - Geamorgan*
- BLUHM, J. I. Slice synthesis of a three dimensional "work of fracture" specimen, *Eng. Fract. Mech.*, 7, 593-604 (1975).
- BORTOLUCCI A. A. Modelo de ruptura em compressão de materiais frágeis baseado na mecânica da fratura e aplicado ao efeito escala. Tese de Doutorado. EESC, São Carlos, S.P., 132p.
- BORTOLUCCI A. A., CELESTINO, T. B., MUNAIR NETO, J. - Determinação da curva completa tensão-deformação de basaltos da formação Serra Geral. *Proc. III Congresso Suramericano de Mecanica de Rocas. Caracas. Soc. Venezolana de Mec. Suelo Ing. Fund./ISRM.* pp. 63-69 (1990).
- BROWN, W. F. & SRAWLEY, J. E. (1966) Plane strain fracture toughness testing of high strength mettalic materials, *ASTM, STP* 410.
- BUBSEY R. T., MUNZ D., PIERCE W. S. & SHANNON J. L. Jr. Compliance calibration of the short rod chevron notch specimen for fracture toughness testing of brittle materials. *Int. J. Fract.* 18, 125-133 (1982).
- BUSH, A. J. (1976) Experimentally determined stress intensity factor for single - edge crack round bar loaded in bending, *Expl. Mech.*, 16, 249-257.
- CARPINTIERI, A. (1986) Mechanical damage and crack growth in concrete - plastic collapse to brittle fracture, Martinus Nijhoff Publishers.
- CARPINTIERI, A., TOMMASO, A. D. e FANELLI, M. Influence of material parameters and geometry on cohesive crack propagation, *Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete*, Wittman, F. H., (Ed.), Elsevier Science Publishers Ltd, London, pp29-67 (1986).
- CELESTINO T. B. & BORTOLUCCI A. A. Rock fracture toughness determination by diametral compression tests. *Report G-1-93, EESC, Univ. São Paulo, São Carlos* (1992).

- CELESTINO T. B., BORTOLUCCI A. A. & NOBREGA C. A. Determination of rock fracture toughness under creep and fatigue. *Proc. 36th U. S. Symp. Rock Mech.*:147-152. Bakelma, Rotterdam (1995).
- CHONG K. P.; KURUPPU, M. D (1988) - New specimens for mixed mode fracture investigations of geomaterials. *Eng. Fracture Mech.* **30**, n^o 5, 701-712.
- CHONG K. P.; KURUPPU, M. D. (1984) - New specimens for fracture toughness determination for rock and other materials. *Int. J. of Fracture*, **26**, R59-62
- CHONG, K. P., HARKINS, J. S., KURUPPU, D. M. e LESKINEN, A. I. L. Strain rate dependent mechanical properties of Western oil shale, *Proc. 28th US Symp. on Rock Mech.* pp 157-164 (1987).
- CLIFTON, R. J.; SIMONSON, E. R.; JONES, A. H.; GREEN, S. J. (1976) - Determination of the critical stress intensity factor K_{IC} from internally pressurized thick - walled vessels. *Experimental Mechanics*, June, 223-238.
- CZOBOLY, E., GALOS, M., HAVAS, I. & THAMM, F. Appropriate fracture mechanics specimens for testing rocks, *Fracture Control of Engineering Structures, Proc. 6th Biennial Euro. Conf. on Fracture, ECF6, vol III, Van Elst, H. C. & Bakker, A., (Eds.), pp2205-2115.* (1986).
- DANELL, R., KARIHALOO, B. L., LEUNG, L. e LEWIS, J. A. Fracture toughness testing of geological materials, *SEM/RILEM Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rock*, Houston, Texas, S. P. Shah & S. E. Swartz, (Eds.), pp. 433-443 (1987).
- DUGDALE, D. C. Yielding of steel sheets containing slits, *J. Mech. Phys. Solids*, **8**, 100 - 104 (1960).
- EVANS, A. G. A method for evaluating the time dependent failure characteristics of brittle materials and its application to polycrystalline alumina, *J. Materl. Sci.*, **7**, 1137-1146 (1972).
- EWALDS, H. L. & WANHILL, R. J. H. - *Fracture Mechanics*. 3 ed. London, Edward Arnold Ltd. 304 p. (1986).
- FOWELL R. J. & XU C. The cracked chevron notched brasilian disc tes - geometrical considerations for practical rock fracture toughness measurement. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **30**, 7, 821-824 (1993).

- FOWELL R. J. & XU C. The use of the cracked brasilian disc geometry for rock fracture investigations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 31, 6, 571-579 (1994).
- FREIDMAN, M., HANDIN, J. & ALANI, G. Fracture - surface energy of rocks, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 9 757 - 766 (1972).
- GRIFFITH, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. *Phil. Trans. R. Soc.*, vol A 221, 163- 198 (1920).
- GUEST, B. W. & KARIHALOO, B. L. (1985) Fracture of glassy brittle materials, *J. Materials Sci. Letters*, 4, 1285-1289.
- HARDY M. P. *Fracture Mechanics Applied to Rock*, PhD Thesis, University of Minnesota, Michigan (1973).
- HILLERBORG, A. Results of three comparative tests series for determining the fracture energy G_F of concrete, *Materials and Structures*, 18,n° 107, 407 - 413 (1985).
- HOAGLAND, R. G., HAHN, G. T. & ROSENFELD, A. R. Influence of microstructure on fracture propagation in rock, *Rock Mechanics*, 5, Springer - Verlag, 77 - 106 (1973).
- HONDROS, G. (1959) The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete, *Aus. J. Appl. Sci.*, 10, 243-268.
- HORII, H., HASEGAWA, A. & NISHINO, F. Process zone model and influencing factors in fracture of concrete, SEM/RILEM Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rock, Houston, Texas S. P. Shah & S. E. Swartz, (Eds.), pp 299-307 (1987).
- HUA GUO Rock Cutting Using Fracture Mechanics Principles, PhD Thesis, Univ. of Wollongong, N. S. W., Australia, (1990).
- INGLIS, C. E. Stress in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. *Trans Inst. Nav. Archit.*, London, vol. 55, 219-241 (1913).
- INGRAFFEA, A. R. Discrete fracture propagation in rock laboratory tests and finit element analysis. PhD Dissertation, University of Clorado, Boulder, Colorado. 346p. (1977).
- INGRAFFEA, R. A. & GERSTLE, W. H. Non Linear fracture models for discrete crack propagation, *Application of Fracture Mechanics to*

- Cementitious Composites*, Shah, S. P. (Ed.), Martinus Nijhoff, The Hague, pp 247-285 (1984).
- IRWIN G. R. & KIES J. E., *Welding Journal*, 33, pp 193, (1954).
- IRWIN, G. R. Discussion of the paper on the dynamic stress distribution surrounding a running crack: a photoelastic analysis, *Proc. SESA*, 16, 93-96 (1958).
- IRWIN, G. R. & KIES, J. A. Critical energy rate analysis of fracture strength. *The Welding Journal*, vol. 33, Research Suppl., 193s-198s (1954).
- IRWIN, G. R. Fracture dynamics. In *fracturing of metals (Proc.)*, Cleveland. Am. Soc. for Met., p 147-166 (1948).
- IRWIN, G. R. *Structural Mechanics*. Pergamon Press, London (1960).
- ISRM Commission on Testing Methods. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 25, 71-96 (1988).
- ISRM Commission on Testing Methods. Suggested method for determining mode I fracture toughness using cracked chevron notched brazilian disc (CCNBD) specimens. *Int. J. Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* 32, 57-64 (1995).
- KANNINEN, M. F. (1973) An augmented double cantilever beam mode of studying crack propagation and arrest, *Int. J. Fract.*, 9, n^o1, 83-92.
- KARIHALOO, B. L. (1984) Compressive fracture of brittle materials, *Proc. Royal Soc. London*, A396, pp 297-314.
- KARIHALOO, B. L. (1986) Fracture toughness of plain concrete from compression splitting tests, *Int. J. Cement, Composites and Lightweight concrete*, 8 n^o4, 251-259.
- KARIHALOO, B. L. (1987) Do plain and fibre reinforced concretes have an R - curve behaviour? *SEMIRILEM Int. conf. on Fracture of concrete and rock*, Houston, Texas, S.P. Shah & S. E. Swartz, (Eds.), pp 128-137.
- KENDALL, K. (1978) Complexities of compression failure, *Proc. R. Soc. London*, A361, pp 245-263.
- KIM, K. & STOUT, M. G. (1978) Determination of effective elastic modulus by compliance calibration for measurement of fracture toughness of rock, *Proc. 19th U. S. Symp. on Rock Mech.*, pp 203-209

- KOBAYASHI, R.; MATSUKI, K. & OTSUKA, N. (1986) Size effect in the fracture toughness of Ogino tuff, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **23**, n° 1, 13-18.
- LABUZ, J. F., SHAH, S. P. & DOWDING, C. H. Experimental analysis of crack propagation in granite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **22**, n°2, 85 - 98 (1985).
- LABUZ, J. F., SHAH, S. P. & DOWDING, C. H. Post peak tensile load displacement response and the fracture process zone in rock, *Proc. 24th US Symp. on Rock Mech.*, C. C. Mathewson, (Ed.), Texas, A & M Univ., pp421 - 428 (1983).
- LABUZ, J. F.; SHAH, S. P. & DOWDING, C. H. The fracture process zone in granite: Evidence and effect, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **22**, n° 2, 85 - 98 (1987).
- LEUNG, C. K. Y. & LI, V. C. Determination of fracture toughness parameters of quasi-brittle materials with laboratory - size specimens, *SEMIRILEM Int. Conf. on Fracture of Concrete and Rock*, Houston, Texas, S. P. Shah & S. E. Swartz, (Eds.), pp695 - 709.
- LIU, H. W. On the fundamental basis of fracture mechanics, *Eng. Fract. Mech.*, **19**, 959 - 972 (1983).
- MEGUID, S. A. *Engineering Fracture Mechanics*, Elsevier Applied Science Elsevier Science Publishers Ltd, London and New York (1989).
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO P. J. M. *Concrete: Structure, Properties and Materials*. 2nd ed. Prentice-Hall, 548p (1993).
- MUNZ, D.; BUBSEY, R. T. & SHANNON, JR. J. L. (1980) Fracture toughness determination of Al_2O_3 using four-point-bending specimens with straight-through and chevron notches, *J. Am. Ceram. Soc.*, **63**, n°5-6, 300-305.
- MURAKAMI, Y. (ed.) *Stress Intensity Factors Handbook*. Pergamon Press. 2 vols (1987).
- NEWMAN J. C. Jr. A review of chevron-notched fracture specimens, *STM STP* 855, (Edited by J. H. Underwood et al.) pp 5-31. ASTM, Philadelphia, PA (1984).
- NEWMAN, J. C. Jr. Stress intensity factors and crack opening displacement for round compact specimens, *Int. J. Fract.*, **17**, n. 6, 567-578 (1981).

- NOLEN-HOEKSEMA R. C. & GORDON, R. B. Optical detection of crack patterns in the opening-mode fracture of marble, Technical note, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 24, 135-144 (1987).
- OSTOJIC, P. & MCPHERSON, R. (1987) A review of indentation fracture theory: its development, principles and limitations, *Int. J. Fract.* 33, 297-312.
- OUCHTERLONY F. Evaluation formulas for rock fracture testing with standard core specimens, SveDeFo Report DS 1985:2. Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm (1985:2).
- OUCHTERLONY, F. Systematic cracking of a wedge by transverse displacements, *J. Elasticity*, 10 n° 2 215 - 223 (1980).
- OUCHTERLONY F. A fem calibration of a core bend specimen with chevron edge notch for fracture toughness measurements. *SveDeFo Report DS 1987:11. Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm (1987).*
- OUCHTERLONY F. A new core specimen for the fracture toughness testing of rock. *SveDeFo Report DS 1980 : 17. Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm (1980:17).*
- OUCHTERLONY F. A simple r-curve approach to fracture toughness testing of rock with sub-size SECRBB specimens. *SveDeFo Report DS 1981:18 Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm (1981:18).*
- OUCHTERLONY F. Compliance calibration of a round fracture toughness bend specimen with chevron edge notch. *SveDeFo Report DS 1984:8. Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm (1984:8).*
- OUCHTERLONY F. Compliance measurements on notched rock cores in bending. *SveDeFo Report DS 1980:2 Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm (1980:2).*
- OUCHTERLONY F. Fracture toughness testing of rock, part 2 of lectures at the CISM. *SveDeFo Report DS 1982:5 Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm (1982:5).*
- OUCHTERLONY F. On the background to the formulae and accuracy of rock fracture toughness measurements using ISRM standard core specimens. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, 1, 13-23 (1989).

- OUCHTERLONY F. The crack mouth opening displacement of the SECRBB specimen. *SveDeFo Report DS 1981:21 Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm* (1981:21).
- OUCHTERLONY F., MATSUKI K., TAKAHASHI H. & HASHIDA T. Experiences from fracture toughness testing of rock according to the ISRM suggested methods. *SveDeFo Report DS 1991:2 Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm* (1991:2).
- OUCHTERLONY F., SWAN G. & ZONGQI S. A comparison of displacement measurement methods in the bending of notched rock cores. *SveDeFo Report DS 1982:16 Swedish Detonic Research Foundation, Stockholm* (1982:16).
- PARAGUASSU, A. B., RODRIGUES, J. E., GANDOLFI, N., ZUQUETTE, L. V., FRETES PORTILLO, E. Z. Arenito Botucatu silicificado: caracterização exploração e usos. In: Congresso Ítalo-Brasileiro de Engenharia de Minas, 2, São Paulo, 15-17 set. 1993 - Anais São Paulo, EDUSP, 1993. v. 2, p 745-757.
- PERKINS, T. K. & KRECH, W. W. (1966) Effect of cleavage rate and stress level on apparent surface energies of rocks, *Soc. of Petroleum Enginners J.*, pp 308-314.
- ROOKE, D. P. e CARTWRIGHT, D. J. Compendium of Stress Intensity Factors. London, Her Majesty's Stationary Office. 330p. (1976).
- ROSSMANITH, H. P. Modelling of frature process zones and singularity dominated zones, *Eng. Fract. Mech.*, 17, nº 6, 509 - 525 (1983).
- SCHIMIDT, R. A. & HUDDLE, C. W. Effect of confining pressure on fracture toughness of Indiana Limestone, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, 14, 289-293 (1977).
- SCHIMIDT, R. A. (1975) Fracture toughness testing of rock, *Closed Loop*, MTS System Corp, 5, 5, 3-12.
- SCHIMIDT, R. A. (1976) Fracture toughness testing of limestone, *Expl. Mech.*, 16, 161-167.
- SCHMIDT, R. A & LUTZ, T. J. K_{IC} and J_{IC} of Westerley Granite - effects of thickness and inplane dimensions, *Fract. Mech. Applied to Brittle Materials*, ASTM ATP 678, S. W. Freidman (Ed.), American Society for Testing and Materials, Philadelphia Pa, pp 166 - 182 (1979).

- SCHMIDT, R. A. A microcrack model and its significance to hydraulic fracturing and fracture toughness testing, *Proc. 21st US Symp. on Rock Mech.*, pp 581 - 590 (1980).
- SHANNON J. L. Jr, BUBSEY R. T., PIERCE W & MUNZ D. Extended range stress intensity factor expressions for chevron-notched short bar and short rod fracture toughness specimens. *Int. J. Fract.* 19, R55-R58 (1982).
- SHETTY, D. K., ROSENFELD, A. R. & DUCKWORTH, W. H. Mixed-mode fracture of ceramic in diametral compression, *J. Am. Ceram. Soc.* 69, n°6, 437-443, (1986).
- SHIRYAEV, A. M. e KOTKIS, A. M. Methods for determining fracture toughness of brittle porous materials, *Industrial Laboratory*, 48, n. 9, 917-918 (1982).
- SING, R. N. & PATHAN, A. G. (1988) Fracture toughness of some British rocks by diametral loading of discs, *Min. Sci. & Tech.*, 6, 179-190.
- SOUZA, N. C. D. C., CELESTINO, T. B. e BORTOLUCCI, A. A. - Influência do grau de silicificação no comportamento pós-ruptura de arenitos brasileiros. *Proc. III Congresso Suramericano de Mecânica de Rochas. Caracas. Soc. Venezolana de Mec. Suelo Ing. Fund./ISRM.* pp. 113-121 (1990).
- SRAWALEY, J. E. & GROSS, B. (1976) Side-cracked plates subjected to combined direct and bending forces, *Cracks and Fractures, ASTM STP 601*, pp 559-579.
- SUN, Z. Q. & OUCHETERLONY, F. (1986) Fracture toughness of Stripa granite cores, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 23, n°6, 399-409.
- SUN, Z. Q. (1983) Fracture Mechanics and Tribology of Rocks and Rock Joints, *PhD Thesis*, Lulea University Sweden.
- SWAN, G. (1980a) Fracture stress scale effects for rocks in bending, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 17, 317-324.
- SWAN, G. (1980b) Some observations concerning the strength-size dependence of rocks, *Research Report Lulea 1980:01*, Lulea Univ. of Tech., Sweden.
- SZENDI-HORVATH, G. (1980) Fracture toughness determination of brittle materials using small specimens. *Eng. Fract. Mech.*, 13, 955-961.
- SZENDI-HORVATH, G. (1982) On the fracture toughness testing of coal, *The Australian Journal of Mining Technology and Research*, n°2, pp 51-57.

- THIERCELIN M. & ROEGIERS J. C. Toughness determination with the modified ring test. *Proc. 27th U. S. Symp. Rock Mech.*:67-76. Tuscaloosa (1986).
- THIERCELIN M. Fracture toughness under confining pressure using the modified ring test. *Proc. 28th U. S. Symp. Rock Mech.*:149-156. Tucson (1987).
- WELLS, A. A. Strain energy releasy rates for fractures caused by wedge action. NRL Report, n. 4705 (1956).
- WESTERGAARD, H. M. Bearing pressures and cracks, *J. Appl. Mech.*, 61, A49-53 (1939).
- WHITTAKER B. N., SING R. N. & SUN G. Rock Fracture Mechanics - Principles, Design and Applications. Elsevier Science, Amsterdam (1992).
- WIEDERHORN, S. M. & SHORB, AM M. (1968) Critical analysis of the theory of the double cantilever method of measuring fracture surface energy, *J. Appl. Phys.*, 39, 1569-1572
- WILKENING, W. W. J-integral measurement in geological materials, *Proc. 19th US Symp. on Rock Mech.*, pp 254 - 258 (1978).
- WILLIAMS, D. P. e EVANS, A. G. A simple method for studing slow crack growth, *J. Testing and Evaluation JTEVA*, 1, n. 4, 264-270 (1973).
- WINTER, R. B. Bruchemechanische Gesteinsuntersuchugen mitdem Bezug zu hydraulischen Frac-versuchen in Tiefbohrungen, Report for Institute of Geophysics, Ruhr-Universitat Bochum, Series A n° 3, (1983).
- WU, S. X. (1984) Compliance and stress intensity factor of chevron-notched three-point bend specimen, chevron notched specimen: Testing and stress analysis, *ASTM STP 855*, J. H. Underwood, S. W. Freimam & G. I. Baratta (eds), Americam Society Testing and Materials, Philadelphia, pp. 176-192.
- XU C. & FOWELL R. J. Stress intensity factor evaluation for cracked chevron notched brasilian disc specimens. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 31, 2, 157-162 (1994).
- YI X., SUN Z., OUCHTERLONY F. & STEPHANSSON O. Fracture toughness of kallax gabbro and specimen size effecte. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 28, 2/3, 219-223 (1991).

ZHAO X. L. & ROEGIERS J. C. Compliance analysis for chevron-notched brasilian disc specimens. *Int. J. Fract.* 61, 29-34 (1991).

ZHAO, X. L. (1989) - A fracture mechanics study of unassisted and water jet assisted rock disk cutting. *Ph.D Thesis*, Dep. of Eng., U. of Newscatle upon Tyne, 305p.