



Universidade Federal do Rio de Janeiro

CCMN - Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

REDUÇÃO DA TENACIDADE POR INTEMPERISMO: MECANISMO PRÉ-RUPTURA DE MACIÇOS ROCHOSOS.

Alba Teodora Campos dos Santos

ORIENTADORES:
EMÍLIO VELLOSO BARROSO
EURÍPEDES DO AMARAL VARGAS JÚNIOR

RELATÓRIO DE ESTÁGIO DE CAMPO IV

RIO DE JANEIRO
JULHO DE 2004

“Meta
A gente busca
Caminho
A gente acha
Desafio
A gente enfrenta
Vida
A gente inventa
Saudade
A gente mata
Sonho
A gente realiza.”
(Autor desconhecido)

AGRADECIMENTOS

Teria sido muito difícil concretizar este trabalho sem a colaboração de tantas pessoas. Gostaria de registrar minha gratidão a todos que ajudaram na sua execução, direta ou indiretamente, em especial:

- Aos meus orientadores, os Profs. Emílio Velloso Barroso e Eurípedes do Amaral Vargas Júnior, pela enorme paciência, pelo incentivo ao trabalho, por tudo que me ensinaram e estarão sempre dispostos a ensinar. Sem a orientação de vocês, este trabalho não seria possível;
- Ao Departamento de Geologia, pela infra-estrutura que possibilitou a confecção deste trabalho;
- Às engenheiras civis, Janáina Barreto Santos e Sueli Ferreira, responsáveis pelo Laboratório de Mecânica das Rochas onde os ensaios foram feitos. Muito obrigada pela dedicação;
- Ao geólogo Cláudio Matta, à secretária Lúcia e à engenheira Fátima. Muito obrigada pela ajuda e pelo apoio;
- Aos técnicos Roberto, Osório Quintão, Sidney e Tarcísio, todos foram muito importantes no transporte, na confecção e preparação dos corpos de prova e na preparação das lâminas, respectivamente. Vocês têm meu respeito e gratidão;
- Aos Professores Júlio Cezar Mendes e João Baptista Filho pela ajuda sempre que necessária e pelo incentivo, não só neste trabalho, mas também ao longo desses anos de graduação. Foi um prazer tê-los como mestres;
- Ao Professor Aristóteles Moraes Rios Netto, pela gentileza de permitir o uso do seu laboratório, possibilitando o uso do microscópio e da câmera digital e à sua orientanda Geisa pelo suporte;
- À minha família que durante todos esses anos de graduação me apoiou, e pelo amor que sempre demonstraram por mim. Em especial, à minha irmã Ana, por toda a ajuda na parte gráfica;
- Ao meu namorado Rik van Rijzingen e à sua família que me acolheu de coração, todos vocês me deram amor, força e incentivaram a finalização deste trabalho;
- Aos meus amigos e amigas de curso, em especial, Maria Cláudia Fontes da Silva Graça, Mônica Souto Carneiro Echternach, Gilmar Pauli Dias, Gilmara Alexandre Felipe da Silva, Melissa Cristina Duque Nogueira, Patrícia Anselmo Duffles Teixeira e tantos outros que não estão citados, mas que também me ajudaram muito.

RESUMO

Na Cidade do Rio de Janeiro e em várias localidades vizinhas, os problemas de instabilidade de taludes em rocha são freqüentes e tem causado sérios prejuízos econômicos e sociais. Este tipo de movimento de massa é condicionado pela presença de descontinuidades nos maciços rochosos, feições estruturais tais como fraturas e falhas, que via de regra são persistentes e possuem resistência ao cisalhamento menor que a matriz da rocha.

Não obstante, têm-se observado instabilidades em maciços rochosos cujas fraturas são descontínuas e não persistentes. Este tipo de mecanismo está relacionado principalmente à queda de blocos. Tendo em vista que estas fraturas são condutos para percolação da água, espera-se que a alteração intempérica se processe a partir dessas fraturas e modifique as propriedades da rocha nas proximidades das mesmas.

Para que ocorra queda de blocos em maciço com fraturas não persistentes é necessário que haja a propagação das mesmas para que individualize blocos. A tenacidade é a propriedade que descreve a energia necessária para que uma fratura pré-existente se propague pela matriz da rocha.

Neste trabalho investiga-se o papel da alteração intempérica na modificação das características mineralógicas e texturais do gnaiss facoidal e, como consequência, a redução da tenacidade. Foram coletadas amostras e descritas macro e microscopicamente para classificá-las segundo diferentes estágios de alteração. Na fase seguinte foram confeccionados corpos de prova para ensaios de tenacidade segundo as recomendações da ISRM para o módulo I de ruptura.

Procurou-se estabelecer uma relação entre o grau de alteração e a tenacidade com intuito de explicar este provável mecanismo pré-ruptura de maciços rochosos. Verificou-se a redução da tenacidade com o grau de intemperismo, que faz supor que esse pode ser o mecanismo proposto.

ÍNDICE

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	iv
1 – Introdução	1
2 – Objetivo	4
3 – Área de Estudo	5
3.1 – Localização	5
3.2 – Arcabouço Geológico	5
3.3 – Geologia da Área	7
4 – Mecânica da Fratura	10
4.1 – Modos de Carregamento e Deslocamento	11
4.2 – Critério de Energia	12
4.3 – Intensidade de Tensões	14
4.4 – Tenacidade à Fratura das Rochas	16
4.4.1 – Ensaios de Tenacidade à Fratura	17
4.4.1.1 – Ensaios normalizados pela ISRM	17
4.4.1.2 – Ensaios não normalizados pela ISRM	20
5 – Alteração Intempérica das Rochas	31
5.1 – Introdução	31
5.2 – Efeitos do Intemperismo	31
5.2.1 – Mineralogia e Textura Originais do Gnaiss Facoidal	31
5.2.2 – Índices Físicos	32
5.2.3 – Propriedades Mecânicas	35
5.3 – Caracterização das Amostras Estudadas	35
5.4. – Preparação das Amostras	37
5.4.1 – Petrografia	41
5.4.2. – Índices Físicos	44
5.4.3 – Velocidade de Propagação de Ondas	46
6 – Resultados e Análise do Ensaio de Tenacidade para o Gnaiss Facoidal	47
7 – Conclusão	49
8 – Referências Bibliográficas	50
Anexo I	52
Anexo II	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Classificação de Movimentos de Massa (Varnes, 1958)	2
Figura 3.1 – Localização do Clube Costa Brava (foto registrada pelo dirigível da Polícia do Rio de Janeiro, 2002).	5
Figura 3.2 – Localização da área de estudo (fonte: IPP, escala 1:10.000).	5
Figura 3.3 – Mapa Tectônico do Segmento Central da Faixa Ribeira, segundo Hemboldt et al. 2000 (in Porto Jr., 2004).	6
Figura 3.4 – Pegmatito boudinado.	8
Figura 3.5 – Perfil de alteração do gnaiss facoidal.	9
Figura 3.6 – Vista de SE para NW da parte de trás do Clube.	9
Figura 3.7 – Blocos que já caíram, também na parte de trás do Clube.	10
Figura 4.1 – Estado de tensão em coordenadas polares e cartesianas (Whittaker et. al., 1992).	11
Figura 4.2 – Tipos básicos de carregamento para uma fissura e seus respectivos deslocamentos (Whittaker et. al., 1992)	11
Figura 4.3 – Placa infinita com uma fratura elíptica sujeita a aplicação uniforme de tensão (Whittaker et. al., 1992).	13
Figura 4.4 – Placa infinita com uma abertura central sob carregamento biaxial (Whittaker et al., 1992)	15
Figura 4.5 – Detalhe das tensões aplicadas próximas a extremidade da fissura em um material elástico. (Whittaker et al., 1992)	15
Figura 4.6 – Ensaio Chevron Bend (ISRM 1988) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004)	17
Figura 4.7 - Ensaio Short Rod (ISRM 1988) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004).	18
Figura 4.8 - Ensaio de corpo-de-prova na forma de disco brasileiro com entalhe chevron (CCNBD).	19
Figura 4.9 - Geometria do corpo de prova e procedimento do corte a ser feito na amostra recomendado pela ISRM (1995).	19

Figura 4.10 - Ensaio de partição por compressão (CST) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004).	21
Figura 4.11 – Ensaio com corpos-de-prova semicirculares (SCB) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004).	22
Figura 4.12 – Ensaio com corpos-de-prova semicirculares com entalhe chevron (CNSCB) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004).	23
Figura 4.13 – Ensaio de anel modificado (MRT) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004).	24
Figura 4.14 – Ensaio em corpos de prova de discos com entalhe na borda com partição por cunha (END). (Donovan & Karfakis, 2004).	25
Figura 4.15 – Ensaio de carga pontual (CP) (Pehovaz-Alvarez et. al., 2004).	26
Figura 4.16 – Ensaio de dupla-torção (DT) (Whittaker et al., 1992).	27
Figura 4.17 – Disco sob compressão diametral com notação básica (Guo et al., 1993).	28
Figura 4.18 – Curva típica de carregamento diametral - deformação, obtida durante ensaio brasileiro (Guo et al., 1993).	30
Figura 5.1 – Variação da porosidade com o grau de alteração (Menezes Filho, 1993).	33
Figura 5.2 – Variação do teor de umidade com o grau de alteração (Menezes Filho, 1993).	34
Figura 5.3 – Variação do peso específico seco com o grau de alteração (Menezes Filho, 1993).	34
Figura 5.4 – Variação do peso específico saturado com o grau de alteração (Menezes Filho, 1993).	35
Figura 5.5 – Obra no Condomínio Joatinga, próxima ao Clube Costa Brava.	38
Figura 5.6 – Figura ilustrativa das direções do corte dos corpos de prova.	38
Figura 5.7 – Corpo de prova com corte paralelo à foliação.	39

Figura 5.8 – Corpo de prova com corte orientado a 45° em relação à foliação.	40
Figura 5.9 – Corpo de prova com corte perpendicular à foliação.	40
Figura 5.10 – Rocha no estágio I de alteração, plagioclásio (pl) com baixo grau de sericitização (se), microfissuras intragranulares, biotitas (bt) com leve descoloração nas bordas e pouca precipitação de óxido de ferro, microclina (mc) com extinção ondulante. (nicóis cruzados, aumento de 4x).	41
Figura 5.11 – Rocha no estágio II de alteração, maior grau de sericitização nos plagioclásios (pl), biotitas (bt) com maior precipitação de óxido de ferro nas bordas, quartzo (qt) com microfissuras intergranulares e presença de epidoto (ep) e muscovita (ms).	42
Figura 5.12 – Rocha no estágio III de alteração, plagioclásios (pl) bem microfissurados e maior grau de sericitização (se), biotitas (bt) com as bordas mais descoloradas e se apresentam mais abertas, quartzo (qt) com maior grau de microfissuramento também.	43
Figura 5.13 – Detalhe da biotita, na lâmina do estágio III, com a abertura dos planos de clivagem bem nítida com a presença do corante azul e descoloração nas bordas. (nicóis cruzados, aumento de 10x).	43
Figura 5.14 – Variação da porosidade com o nível de alteração do corpo de prova.	45
Figura 5.15 – Relação entre a Porosidade e Peso Específico Seco.	46
Figura 5.16 – Relação entre a Velocidade Média de Propagação de Ondas longitudinais e o nível de alteração do corpo de prova.	46
Figura 6.1 – Força de ruptura em relação ao tempo onde ocorre a ruptura.	47
Figura 6.2 – Resultados de tenacidade relacionados ao ângulo entre o corte (entalhe chevron) e a foliação.	48
Figura 6.3 – Variação da Anisotropia com a alteração.	48
Figura 6.4 – Correlação dos coeficientes de variação dos valores de tenacidade e porosidade.	49

LISTA DAS TABELAS

Tabela 1.1 – Casos de queda de blocos registrados pela Geo-Rio no Rio de Janeiro (in Cruz, 2002).	3
Tabela 3.1 – Coluna Estratigráfica do Município do Rio de Janeiro, segundo Hemboldt, 1965 (in Marques, 1998).	7
Tabela 4.1 – Tabela de valores básicos para a confecção de corpos de prova com a geometria sugerida pela I.S.R.M. (1995).	20
Tabela 5.1 – Evolução mineralógica com a alteração. (Menezes Filho, 1993).	32
Tabela 5.2 – Valores médios das propriedades-índice obtidos por Menezes Filho para o gnaisse facoidal (1993).	33
Tabela 5.3 – Cadastro de testes da matriz para reconhecimento e classificação dos estágios de alteração intempérica (Barroso, 1993).	36
Tabela 5.4 – Caracterização macroscópica de diferentes estágios de alteração da matriz do gnaisse facoidal.	37
Tabela 5.5 – Caracterização microscópica de diferentes estágios de alteração da matriz do gnaisse facoidal baseada na alteração dos Minerais guia.	44
Tabela 5.6 – Resultados médios para os ensaios de porosidade.	44
Tabela 5.7 – Resultados médios para os ensaios de peso específico aparente (seco e saturado)	44
Tabela 5.8 – Variação da Velocidade de Propagação de Ondas com a alteração da rocha.	47
Tabela 6.1 – Variação do Índice de Anisotropia com os valores de tenacidade máximo e mínimo para cada estágio de alteração.	48

1- Introdução

Segundo Marques (1998), o Município do Rio de Janeiro vem sofrendo, nas últimas décadas, uma grande pressão populacional que tem resultado em uma rápida, desordenada e intensa ocupação. Este processo originou inúmeras intervenções de engenharia tais como: túneis, adutoras, aterros, pontes, viadutos, trechos de rodovias, obras subterrâneas, etc.; além de, em função das características fisiográficas da cidade, uma intensa ocupação das encostas, caracterizada pela falta de ordenação e planejamento.

O resultado dessa ocupação intensa e desordenada é a existência de obras em locais onde há um grande risco da ocorrência de movimentos de massa que geram risco à integridade dessas mesmas obras e, conseqüentemente, possibilidades de acidentes envolvendo as pessoas que vivem e transitam por esses locais.

Movimento de massa é um termo geral que define movimentos coletivos de solos e rochas, naturalmente induzidos pela ação da gravidade e das águas superficial e subterrânea, ou induzidos pela ação antrópica por meio de ações de desmatamentos, cortes e aterros, entre outras. Segundo Ward, 1945 (*in* Varnes, 1958), a classificação dos tipos de movimentos de massa é importante por permitir que se reconheçam os diferentes fenômenos de mobilização e assim, possibilita definir medidas corretivas e preventivas. No entanto, não existe uma classificação internacionalmente aceita como padrão.

Existem diversos modelos para representar diferentes mecanismos de movimento de massa, são eles: queda de blocos, escorregamentos e fluxos detriticos. Faz-se a ressalva que processos de erosão, segundo a definição apresentada acima, poderiam ser enquadrados como movimentos de massa. No entanto, por se afastarem bastante do escopo desse estudo não são tratados no texto. Segue uma breve descrição da classificação de cada um desses movimentos proposta por Varnes (1958) e ilustrada na figura 1.1.

1.1- Queda de blocos (Falls)

O fator determinante deste tipo de movimento é a ação da gravidade no bloco de rocha, torna-se gradualmente instável por ter sua base descalçada (por exemplo, devido à erosão diferencial), porém o deslocamento do corpo instável caracteriza-se por ser muito rápido. Nesse caso pode haver cisalhamento ao longo de fraturas e na superfície de contato dos blocos.

1.2- Escorregamentos (Slides)

São os processos onde há cisalhamento concentrado ao longo de uma ou várias superfícies planas ou curvilíneas de descontinuidade física, que de um modo geral, encontra-se parcial ou totalmente saturada. O movimento tem início quando a tensão cisalhante atuante na massa de solo e/ou rocha torna-se superior à sua resistência ao cisalhamento.

1.3– Fluxos detríticos (Flows)

Caracteriza-se pela massa mobilizada (constituída basicamente por rocha fragmentada e/ou solo) comportar-se como um líquido viscoso. As superfícies de ruptura são de difícil identificação e o contato entre a massa mobilizada e a estacionária pode ser abrupto ou apresentar uma zona de comportamento plástico. Este tipo de movimento pode ser classificado como fluxo de detritos (*debris flow*) quando predominam fragmentos de rocha na massa deslocada e fluxo de lama (*mudflow*) quando o material mobilizado constitui-se essencialmente de solo.

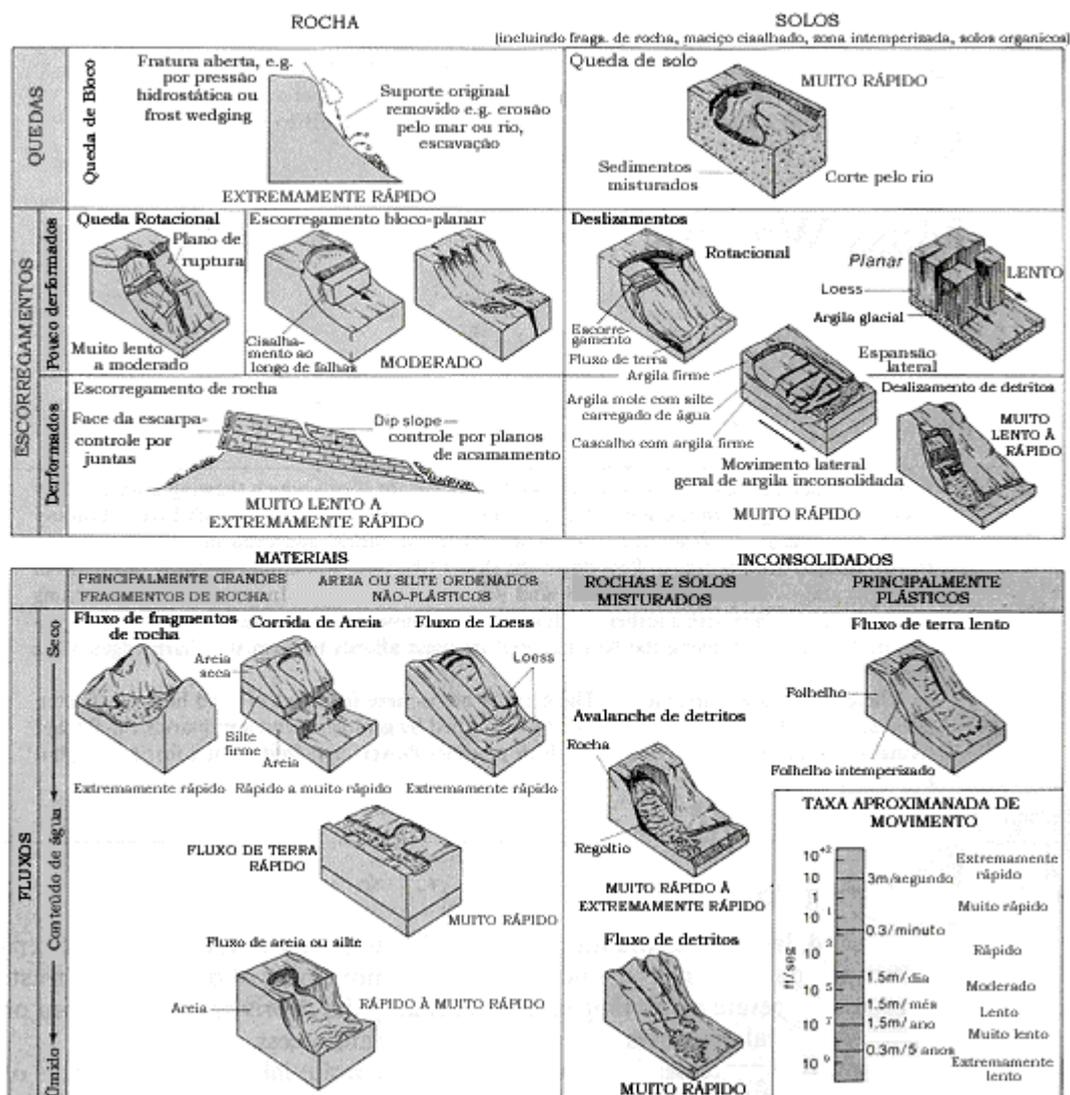


Figura 1.1 – Classificação de Movimentos de Massa (Varnes, 1958 in Rahn, 1986)

Analisando as breves descrições feitas acima, é possível deduzir que esses tipos de movimentos de massa estão associados a períodos de grandes taxas de precipitação pluviométrica. Porém, de acordo com dados obtidos pela Geo-Rio (Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, Órgão Municipal), há registros desses movimentos em épocas onde as taxas são sabidamente mais baixas. Tem-se observado que esses movimentos são, principalmente, queda de blocos. Logo, há

uma necessidade de compreensão desse mecanismo para que se possa entender o que pode provocar a queda de blocos.

Cruz (2002) elaborou um banco de dados a partir de laudos realizados pela Geo-Rio. Em razão dos laudos definirem o tipo de movimento ocorrido segundo os modelos propostos por Varnes (1958), não é possível identificar se alguns mecanismos apresentados, como por exemplo deslocamento de blocos, constituem de fato queda de blocos. Logo o presente trabalho limita-se a citar somente as ocorrências descritas como queda de blocos. Diante dos dados analisados, ocorreram na Cidade do Rio de Janeiro, entre os anos de 1998 e 2001, 12 casos de queda de blocos dentre os 44 laudos que contêm os diversos tipos de movimentos registrados. A tabela 1.1 apresenta um resumo dos laudos da Geo-Rio relatados como de queda de blocos levantados pelo autor supracitado fazendo referência aos autores dos relatórios originais, os números dos laudos e os locais das ocorrências.

Autores do relatório original	Laudos num/ Ano	Local
Eng. Reinaldo Japiassú e Geol. Wilmar Barros	290/2001	R. Antônio Candeia Filho, 196 – Cond. Village das Pedras - Jacarepaguá
Engs. Luiz O. Vieira e Walter Teixeira e Geol. Luiz J. Brandão	821/2000	Rua Ernesto de Souza, 133, casas 30 e 31 – Andaraí
Eng. Ronaldo Saad	834/2000	Rua Santo Amaro, 200, apto. 111 - Catete
Eng. Luiza Delfina Bastos	876/2000	Estrada do Camorim, 1454 – Camorim - Jacarepaguá
Eng. Paulo César França	632/2000	Rua Oscar Pimentel, 41 – Tijuca
Geol. Quintino do Carmo	080/1999	Rua Jatuarama, 575 – Morro Faz. Quem Quer – Rocha Miranda
Arqt. Alexandre Luiz da Silva	071/1999	Rua Paulo César de Andrade, 240 – Laranjeiras
Eng. Francisco Arruda	675/2000	Rua Gastão Bahiana, 77/902 – Copacabana
Eng. Helena Quaresma	772/2000	Rua Jorge Rudge 208, Vila Isabel
Eng. Ademaro Neto	943/1998	Rua Tenente Vieira Sampaio, 132 – Rio Comprido
Eng. Reinaldo Japiassú	572/1998	Rua Tavares Bastos, 80 – Fundos – Catete
Eng. Luiz Antônio Costa	024/1998	Rua Gurindiba, 81, casa 25 – Morro do Bananal - Tijuca

Tabela 1.1 – Casos de queda de blocos registrados pela Geo-Rio no Rio de Janeiro (*in* Cruz, 2002).

Vargas *et al.* (2004), por sua vez, obtiveram dados desses movimentos também através de relatórios técnicos gerados pela GEO-Rio, levando em consideração o índice pluviométrico registrado no dia da ocorrência. Como exemplo de queda de bloco em dia de baixo índice pluviométrico, cita-se o caso ocorrido em 10 de dezembro de 2002. O local de ocorrência foi na Rua Visconde de Sabóia, 54, onde um bloco de 1 m³ de rocha caiu de uma altura de 50 metros de uma escarpa muito fraturada e atingiu, destruindo, uma casa a 10 metros de distância do sopé. O índice pluviométrico registrado foi de 2,6 mm/24horas e o número do laudo é 662/2003. Outro exemplo é o caso ocorrido em julho de 1995, próximo ao Hospital Santa Genoveva, onde um boulder de 4200m³ caiu de uma escarpa natural de 420m de altura e não foi registrada chuva no dia.

Para que haja a queda de blocos é necessário que a compartimentação estrutural do maciço rochoso, por fraturas tectônicas ou não-tectônicas, permita a individualização dos mesmos. Esse processo se completa quando o bloco se desprende do maciço, o que muitas vezes ocorre devido à propagação de fraturas não-persistentes a montante (*e.g.* fendas de tração). Considera-se, por hipótese, que essas fraturas não-persistentes se propaguem devido à redução da tenacidade com o tempo. Faz-se aqui a hipótese que essa redução seja resultado do preenchimento por água da fratura e a conseqüente alteração intempérica da matriz da rocha. Como esse é um processo de longa duração é possível, então, que a deflagração da queda de blocos não coincida com períodos de elevada precipitação.

2- Objetivo

O objetivo do presente trabalho é verificar se a redução da tenacidade é, de fato, um mecanismo pré-ruptura de maciços rochosos (queda de blocos) e se esse mecanismo proposto tem como principal condicionante a evolução intempérica.

Para poder testar essa hipótese, primeiramente foi escolhida uma área onde a ocorrência de queda de blocos é significativa. A área escolhida situa-se no Clube Costa Brava, na Joatinga, que é uma região onde há ocorrência de gnaiss facoidal em diferentes níveis de alteração e uma grande ocorrência de fraturas não-persistentes. Blocos de amostras foram coletados e classificados de acordo com o nível de alteração. Esta classificação foi, primeiramente, resultado de um cadastramento de testes na matriz da rocha, seguida da análise petrográfica em lâminas e caracterização física. Por sua vez, a caracterização física (absorção de água, porosidade, massa específica e velocidade de propagação de ondas primárias) nos discos de prova elaborados segundo os Métodos para Determinação da Tenacidade em Fraturas Modo I (I.S.R.M., 1981), foi responsável pela determinação mais precisa dos níveis de alteração dos blocos amostrados.

3 – Área de Estudo

3.1- Localização

Como já foi mencionada anteriormente, a área de estudo localiza-se no Clube Costa Brava, na Rua Sargento José da Silva, Joatinga, na Cidade do Rio de Janeiro (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Localização do Clube Costa Brava (foto registrada pelo dirigível da Polícia do Rio de Janeiro, 2002).

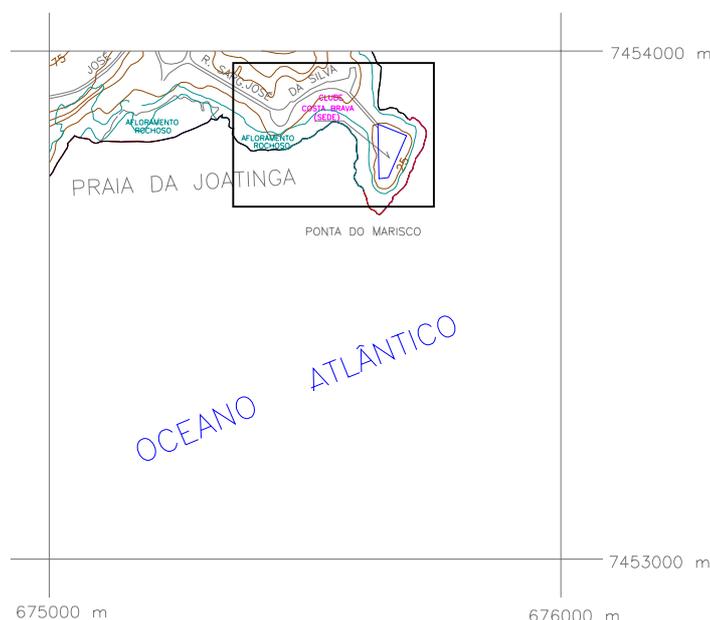


Figura 3.2 – Localização da área de estudo (fonte: IPP, escala 1:10.000).

3.2 – Arcabouço Geológico

O Estado do Rio de Janeiro encontra-se inserido na Faixa Ribeira que compreende um complexo cinturão de dobramentos e empurrões gerados no Neoproterozóico/Cambriano, durante a Orogênese Brasileira, na borda sul/sudeste do cráton São Francisco, como pode ser visto na

figura 3.3 (Heilbron *et al.* 1995, *in* Cruz 2002). Este contexto geológico é marcado pela elevada complexidade estrutural e de relações estratigráficas por ser uma área de ocorrência de rochas gnáissicas, graníticas, intrusivas metamorfasadas que são cortadas por granitos plutônicos e rochas básicas alcalinas geradas após este evento (Marques, 1998).

CONTEXTO TECTÔNICO DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

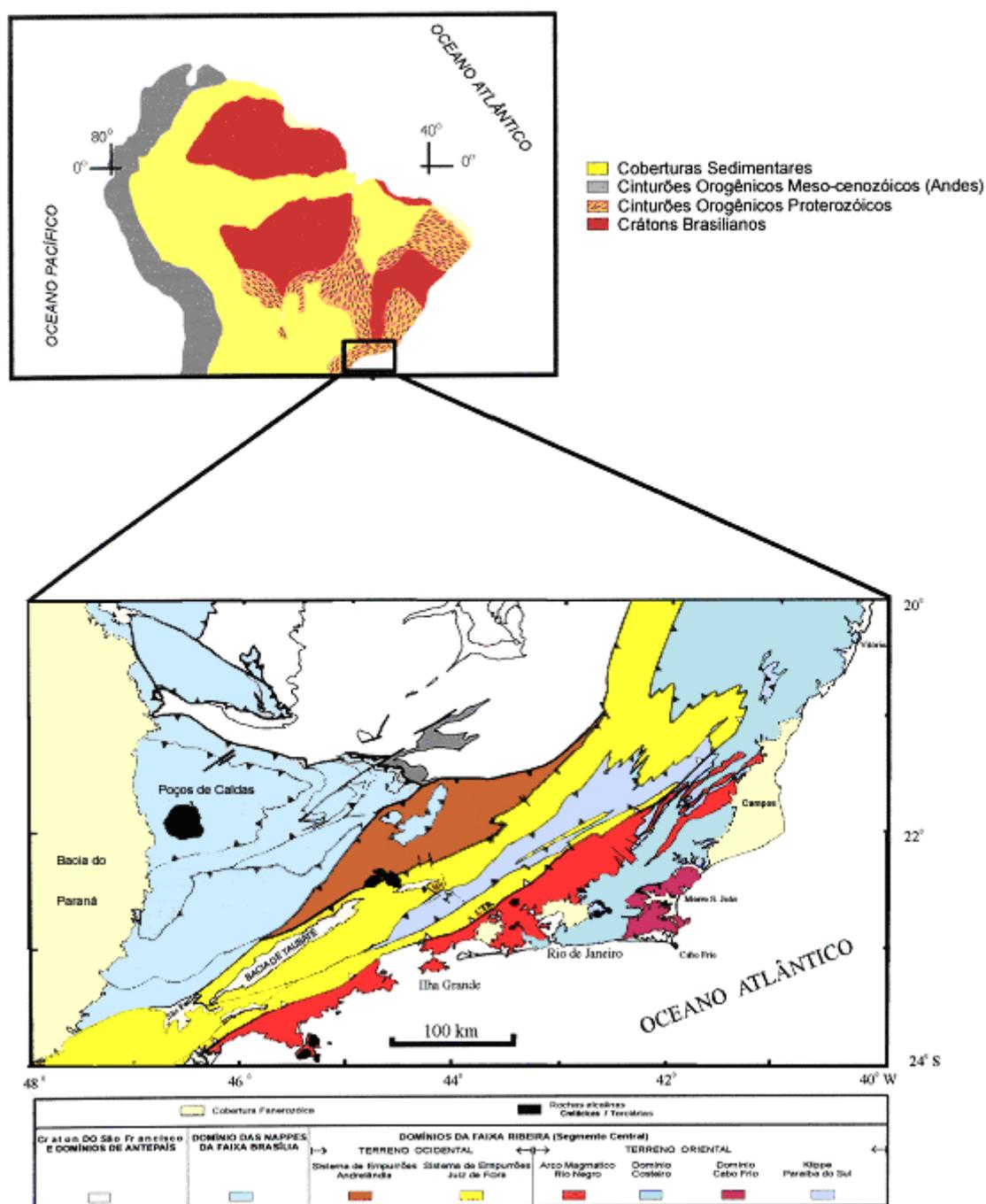


Figura 3.3 – Mapa Tectônico do Segmento Central da Faixa Ribeira, Hemboldt *et al.* 2000 (*in* Porto Jr., 2004).

Humboldt et al. (*in* Marques,1998) publicaram o primeiro mapa geológico do município, na escala 1:50.000, em que apresenta uma proposta de coluna estratigráfica constituída, entre outras unidades, por duas séries metamórficas principais, Inferior e Superior, mostradas na tabela 3.1, a seguir.

IDADES	NOME	TIPOS LITOLÓGICOS
Terciário		Bostonitos Lamprófiro
Cretáceo		Fonolito Foiáito e Umptekito
Cretáceo Jurássico		Diabásios ou Diques de Basalto
Siluriano Ordoviciano		Granitos Plutônicos Aplitos e Pegmatitos
Pré-Cambriano	Série Superior	Leptinito Gnaisses Facoidais e Semi-Facoidais Biotita-Gnaisses Kinzigito Gnaisses Charnockíticos Gnaisses Calcosilicáticos Granodioritos, Quartzo Dioritos e Equivalentes Gnaissificados Gnaisses básicos de metamorfismo variado
Arqueano	Série Inferior	Gnaisses e intrusões básicas a intermediárias indiferenciadas Aplitos, Pegmatitos e Diabásios metamorfisados Biotita-hornblenda Gnaisses Anfibolitos e Migmatitos

Tabela 3.1 – Coluna Estratigráfica do Município do Rio de Janeiro, segundo Humboldt, 1965 (*in* Marques, 1998).

3.3 – Geologia da Área

O gnaiss facoidal é a rocha encontrada na área de estudo, esse é composto principalmente por quartzo, feldspato, plagioclásio e biotita e se apresenta em diversos níveis de alteração. Há também uma grande ocorrência de pegmatitos compostos por feldspato, quartzo, biotita e muscovita e em alguns se pode observar boudins (figura 2.4).



Figura 3.4 – Pegmatito boudinado.

A foliação tem direção NNE, com mergulhos que variam entre 30 a 45°, como exemplo de orientações (“*dip/dip*”) de medidas no campo tem-se: 280/30°, 295/34°, 275/41°.

Este gnaisse apresenta-se muito fraturado, sendo muitas das fraturas não-persistentes e algumas dessas fraturas estão sendo percoladas por água. Um bom exemplo da alteração causada pela presença de água nas fraturas encontra-se na figura 3.5 a seguir. Pode-se notar que no plano da fratura que agora se encontra exposto no centro da figura houve uma alteração maior do que alteração superficial sofrida pela rocha que está exposta ao intemperismo do lado esquerdo.

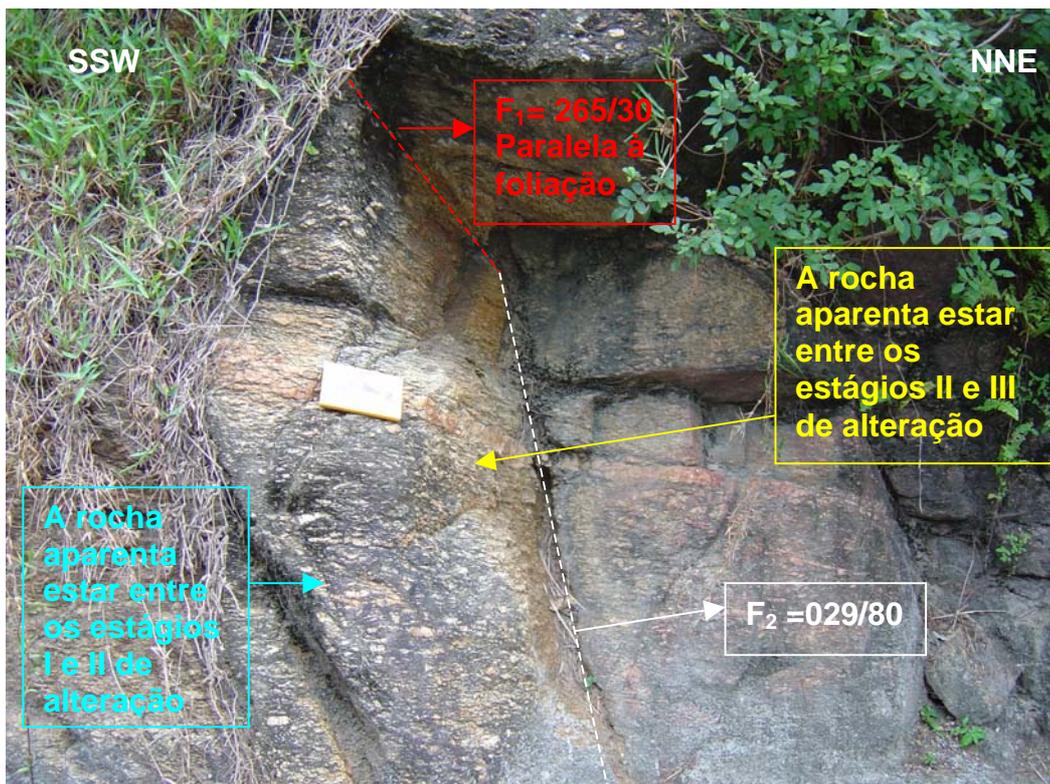


Figura 3.5 – Perfil de alteração do gnaiss facoidal.

Foram obtidas no campo muitas direções variadas dos planos de fratura como $205/72^\circ$, $232/80^\circ$, $000/86^\circ$, $029/80^\circ$, $110/55^\circ$ e $265/30^\circ$. O resultado da propagação dessas fraturas quando interceptam os planos de foliação é a individualização de blocos no maciço e, conseqüente queda dos mesmos. Esse processo também pode ser visto nas figuras 3.6 e 3.7.

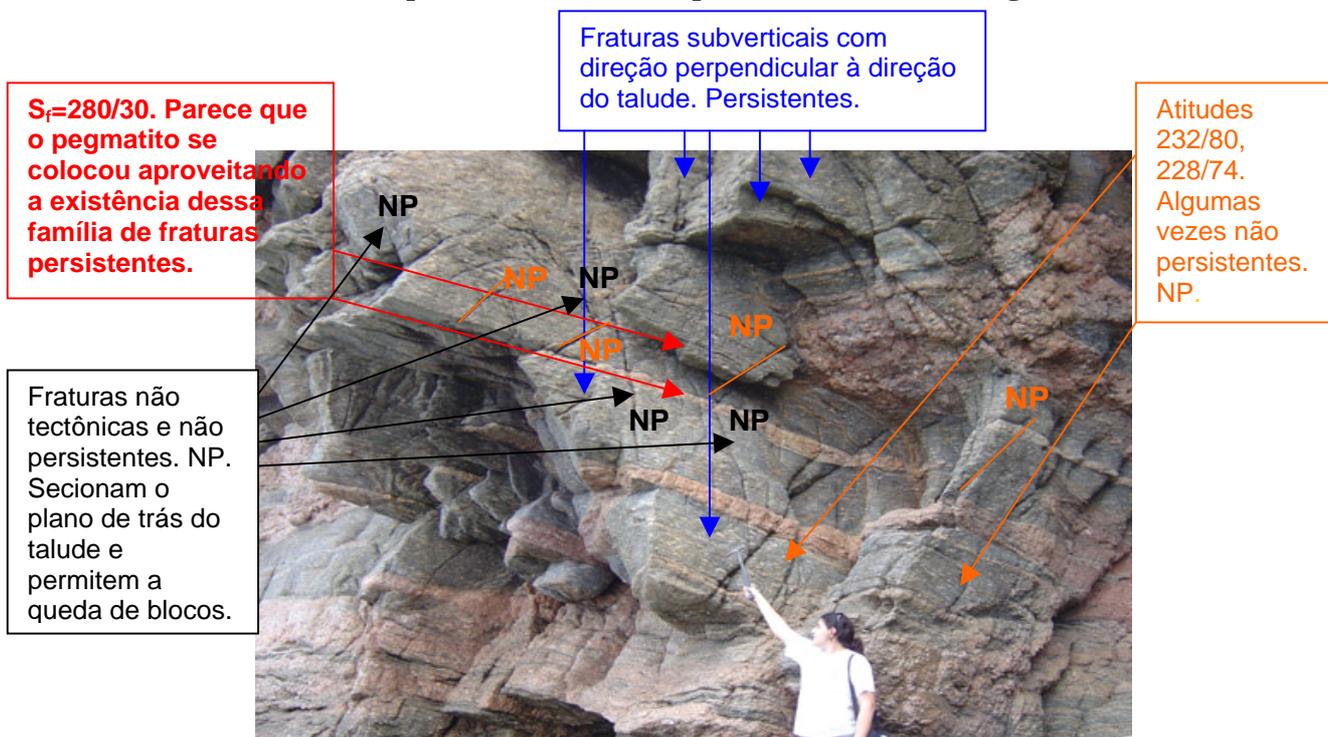


Figura 3.6 – Vista de SE para NW da parte de trás do Clube.



Figura 3.7 – Blocos que já caíram, também na parte de trás do Clube.

Notar neste bloco a presença das fraturas persistentes e não persistentes que afetam o maciço.

4 – Mecânica da Fratura

Segundo Almeida (1999), a mecânica da fratura foi originalmente concebida visando-se determinar quando a fratura ocorre. Os motivos pelos quais a fratura ocorre eram até então preteridos. Atualmente sabe-se que o entendimento dos mecanismos de surgimento e desenvolvimento das fraturas constitui uma valiosa ferramenta. A mecânica da fratura moderna é um ramo relativamente novo da ciência dos materiais que busca combinar estado de tensões e dimensões de fissuras para determinação de um critério para extensão de fraturas.

Por definição, a mecânica da fratura tem como objetivo estabelecer as condições para uma fissura de uma dada dimensão ter início e propagar-se sob um determinado sistema de carregamento e conseqüentemente, determinar o grau de segurança que uma estrutura possui no que diz respeito a ruptura por fraturamento. Na mecânica das rochas, tem sido objeto de significativos experimentos no campo da mecânica da fratura das rochas.

Atkinson (1987) reuniu alguns dos principais conceitos que consolidam a base da mecânica da fratura, dentre os quais destacam-se:

modos de carregamento e deslocamento nas extremidades de fissuras, critério de energia, análise da intensidade de tensões, estado de tensões nas extremidades das fissuras, fraturamento dinâmico e avaliação e análise dos parâmetros mecânicos envolvidos.

4.1 – Modos de Carregamento e Deslocamento

As fissuras ou fraturas nas rochas podem ocorrer arbitrariamente orientadas em relação à aplicação de tensões, resultando em várias formas de carregamento e conseqüentemente a variados tipos de deslocamentos. Em geral a extremidade de uma fissura pode estar sujeita a 3 variedades de tensões: σ - tensão normal; τ_i - tensão cisalhante (no plano) e τ_o - tensão cisalhante (fora do plano). A figura 4.1 mostra em coordenadas polares e cartesianas os estados de tensão.

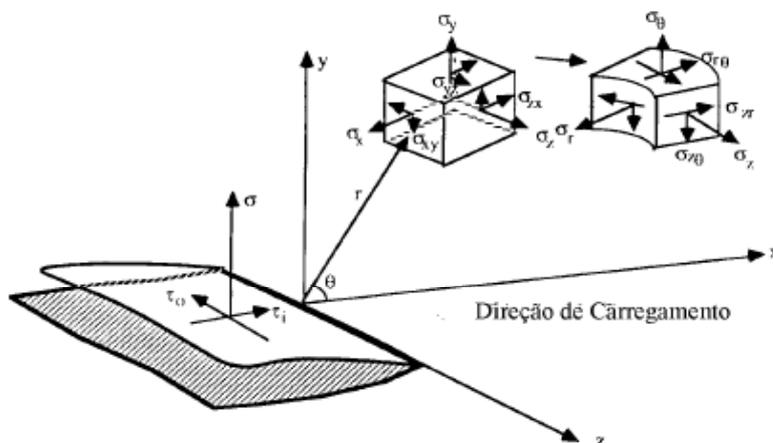


Figura 4.1 – Estado de tensão em coordenadas polares e cartesianas (Whittaker, 1992).

Em função destes estados de tensão surgem diferentes tipos de sollicitação ao material (figura 4.2):

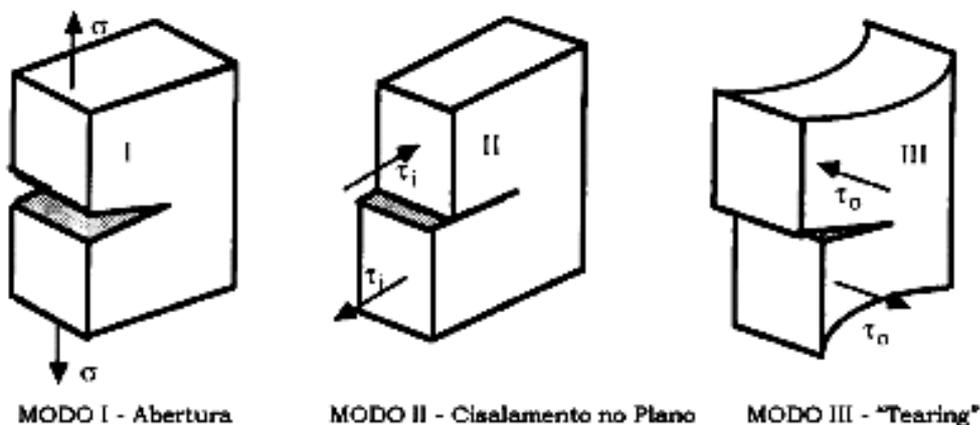


Figura 4.2 – Tipos básicos de carregamento para uma fissura e seus respectivos deslocamentos (Whittaker et. al., 1992)

- **MODO I** - (ou modo de abertura), é assim chamado, pois a extremidade da fissura está sujeita a uma tensão normal (σ) e as faces da fissura separam-se com deslocamentos perpendiculares em relação ao plano da fissura

- **MODO II** - (ou cisalhamento no plano), ocorre quando o plano da fissura está sujeito a um estado de tensões cisalhantes, e o deslocamento se dá paralelamente a este plano e perpendicularmente à *frente* da fissura.

- **MODO III** - (“tearing”) é o caso onde a extremidade da fissura está sujeita a um estado de tensão cisalhante fora do plano da fissura. As faces da fissura sofrem deslocamentos no plano, mas paralelos à *frente* da fissura.

Se considerarmos o sistema de coordenadas cartesianas da figura acima, no plano $Y=0$ temos:

$$\text{MODO I} \Rightarrow \sigma_x \neq 0; \sigma_y \neq \sigma_z \neq 0; \tau_{xy} = 0 \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$\text{MODO II} \Rightarrow \tau_{xy} \neq 0; \sigma_y = 0 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

$$\text{MODO III} \Rightarrow \tau_{yz} \neq 0; \sigma_y = 0; \tau_{xy} = 0 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Entre os três tipos de carregamento e conseqüentes deslocamentos, o modo I é o mais importante, posto que constitui uma condição de carregamento de fraturas predominante em muitas situações práticas. Em razão disso, a maior parcela dos trabalhos desenvolvidos no campo da mecânica da fratura tem se concentrado no modo I, mesmo que também sejam freqüentes os casos envolvendo os outros dois tipos básicos de carregamento ou ainda o modo misto de carregamento. Este último constitui uma combinação de qualquer um dos três tipos e representa o mais complexo tipo de carregamento.

4.2 – Critério de Energia

A análise de fraturas segundo o critério de energia prende-se basicamente ao fato de que uma fratura ocorre quando a energia disponível para o crescimento de uma fissura é suficientemente grande para superar a resistência do material (Whittaker et al., 1992). A resistência do material pode incluir energia de superfície ou tipo de dissipação de energia associado à propagação da fissura.

O conceito de balanço de energia proposto por Griffith, em consonância com a primeira lei da termodinâmica estabelece que quando um sistema passa de um estado de desequilíbrio para um em equilíbrio, ocorrerá necessariamente, uma diminuição de energia do sistema. Griffith aplicou esta idéia a formação de uma fissura.

A figura 4.3 mostra uma placa infinita sob estado uniforme de tensões com a introdução de uma fratura. Para ocorrer um aumento no tamanho da fissura, suficiente energia potencial deve estar disponível na placa para superar a energia de superfície do material.

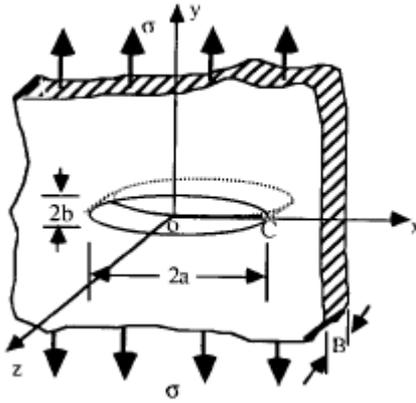


Figura 4.3 – Placa infinita com uma fissura elíptica sujeita a aplicação uniforme de tensão (Whittaker et. al., 1992).

O balanço de energia postulado por Griffith, para um incremento na área da fissura, dA , sob condições de equilíbrio, pode ser expresso por:

$$(dE/dA) = (d\pi/dA) + (dW_s/dA) = 0 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

onde E é a energia total, π é a energia potencial fornecida pela energia de deformação interna, fruto da ação de forças externas e W_s é o trabalho necessário para criar novas superfícies.

Griffith demonstrou que para a placa fissurada da figura 4.3 pode-se escrever:

$$\pi = \pi_0 - (\pi\sigma^2 aB/E) \quad (\text{Eq. 4.5})$$

onde π_0 é a energia potencial de uma placa intacta e B a espessura da placa e a corresponde à metade do eixo maior da elipse na figura 4.3. Como a formação de uma fissura requer a criação de duas novas superfícies, W_s é dado por:

$$W_s = 4aB\gamma_s \quad (\text{Eq. 4.6})$$

onde γ_s é a energia de superfície do material, então temos:

$$-(d\pi/dA) = (\pi\sigma^2 a/E) \quad (\text{Eq. 4.7})$$

e

$$dW_s/dA = 2\gamma_s \quad (\text{Eq. 4.8})$$

resolvendo as equações 4.7 e 4.8 temos:

$$\sigma f = (2E\gamma_s/\pi a)^{1/2} \quad (\text{Eq. 4.9})$$

A taxa de variação na energia potencial π com a área da fissura ou taxa de alívio de energia G é:

$$G = \pi\sigma^2 a/E \quad (\text{Eq. 4.10})$$

4.3 – Intensidade de Tensões

Em materiais com comportamento elástico linear, analisados segundo os princípios da LEFM (*linear elastic fracture mechanics*), as tensões e deslocamentos podem ser caracterizados por um único parâmetro conhecido como SIF-K (*stress intensity factor*) ou fator de concentração de tensões. O valor de K traduz essencialmente a medida de intensidade de tensão na extremidade de uma fissura ou o campo de tensões elásticas na extremidade da fissura (Atkinson, 1987).

A tenacidade à fratura representa a medida da concentração crítica de tensões representada por K_c na extremidade de uma fissura requerida para iniciar ou propaga-la. É função da carga aplicada, geometria da amostra e da fissura. A taxa crítica de alívio de energia de deformação geradora de fissura (tenacidade) é representada por G_c . Esta taxa crítica de alívio de energia de deformação que constitui a energia necessária para se criar uma nova área de superfície e é função do fator de intensidade de tensões (K_c), módulo de elasticidade (E), e coeficiente de Poisson (ν), pode ser expresso pela eq. 4.11:

$$G_c = (K_c^2 (1 - \nu^2)) / E \quad (\text{Eq. 4.11})$$

Os valores estabelecidos por Griffith para a iniciação de fissuras demonstram que quando a taxa de alívio de energia de tensão atinge um dado valor crítico, a iniciação da fissura ocorre. Desta forma para o modo I de carregamento temos:

$$G_I = G_{IC} \quad (\text{Eq. 4.12})$$

onde G_{IC} é o valor crítico de alívio de energia de deformação para o modo I de carregamento. É um parâmetro constante para um dado material, indicando a capacidade de resistência a extensão de uma fratura ou fissura. Se este critério é expresso em termos de intensidade de tensões, temos analogamente:

$$K_I = K_{IC} \quad (\text{Eq. 4.13})$$

onde K_{IC} representa a tenacidade à fratura no modo I de carregamento. K_{IC} também é uma propriedade intrínseca do material. Conceitualmente K_{IC} é uma constante e não deve variar com fatores tais como dimensões do corpo, geometria da fissura, taxa de carregamento, condições do ambiente entre outros (Singh, 1976, *in* Whittaker et al., 1992).

A análise da intensidade de tensões busca a medida do conjunto de forças aplicadas a extremidade de uma fissura, a qual determinará se a fissura sofrerá extensão ou permanecerá estável. A dimensão da fissura é controlada pela condição $K_I = K_{IC}$; a fratura continuará a se propagar enquanto esta condição for satisfeita, isto é, enquanto a força incidente K_I

para a fratura for maior ou igual a resistência do material K_{IC} , e cessará somente quando $K_I < K_{IC}$.

A figura 4.2 mostra as componentes de tensões aplicadas a extremidade de uma fratura em um meio linear-elástico e homogêneo. A solução para a análise das tensões elásticas com base na chamada função de tensões de Westergaard, 1939 (*in* Whittaker et al., 1992), neste caso pode ser obtida através de uma função que satisfaça as condições de equilíbrio, compatibilidade e contorno do problema. Para uma placa infinita carregada biaxialmente contendo uma abertura central com comprimento $2a$ como mostram as figuras 4.4 e 4.5, as condições de contorno são:

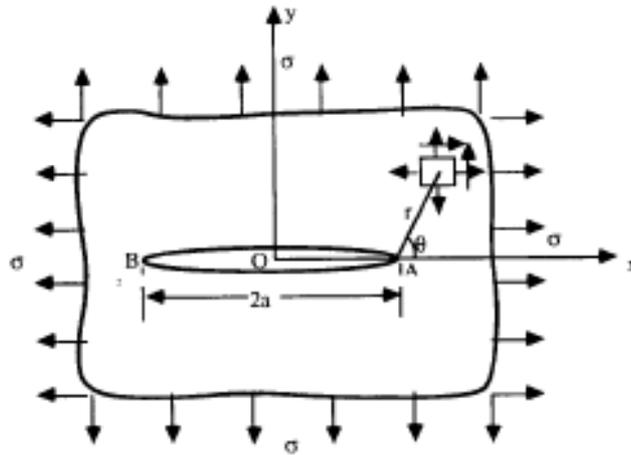


Figura 4.4 – Placa infinita com uma abertura central sob carregamento biaxial (Whittaker et al., 1992)

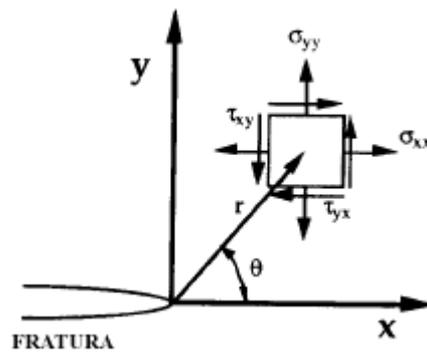


Figura 4.5 – Detalhe das tensões aplicadas próximas a extremidade da fissura em um material elástico. (Whittaker et al., 1992)

(a) $\sigma_y = 0$ para $-a < x < a$ e $y = 0$; (Eq. 4.14)

(b) $\sigma_y = \sigma$ para $x = \pm \infty$; (Eq. 4.15)

(c) $\sigma_y = \infty$ para $x = \pm a$, (Eq. 4.16)

desde que a concentração de tensões seja infinita na extremidade da abertura.

As equações 4.17, 4.18 e 4.19 definem o estado de tensões na extremidade da abertura:

$$\sigma_x = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right) \quad (\text{Eq. 4.17})$$

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right) \quad (\text{Eq. 4.18})$$

$$\sigma_{xy} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \quad (\text{Eq. 4.19})$$

onde σ_y é a tensão normal ao plano da abertura ou fratura.

Assumindo o valor de $\theta = 0$, temos que $\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}}$, substituindo temos:

$$\sigma_y \sqrt{2\pi r} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} \sqrt{2\pi r} = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{Eq. 4.20})$$

O valor de $\sigma \sqrt{\pi a}$ constante ao longo do eixo x e independente para uma mesma configuração de carregamento e um dado valor de a. Esta constante é o fator de intensidade de tensões no modo I (K_I). Assim $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$. Pode se dizer então, que K_I é um produto da tensão pela raiz quadrada da abertura da fissura e de π . Portanto, a unidade que mede K_I é dada por $P_a \sqrt{m}$.

Se analisarmos as relações entre G_I e K_I e da mesma forma G_{IC} e K_{IC} notamos que as aproximações em ambos os casos, são essencialmente equivalentes para materiais lineares elásticos.

4.4 - Tenacidade à Fratura das Rochas

Segundo Almeida (1999), o parâmetro básico na mecânica da fratura é a tenacidade à fratura, que descreve os efeitos de fissuras no material. Os ensaios de tenacidade diferem basicamente dos ensaios realizados em mecânica, pois requerem corpos de prova com fissuras bem definidas.

Os primeiros ensaios para avaliar a tenacidade à fratura em rochas fundamentavam-se em metodologias padronizadas para materiais metálicos ASTM-E399 (Schmidt, 1976 *in* Almeida, 1999). Estes métodos apresentavam resultados aceitáveis para rochas com comportamento frágil como granitos e alguns calcários. Entretanto, eram necessárias

quantidades consideráveis de corpos de prova com geometrias pouco razoáveis no contexto da mecânica das rochas.

Na década de 80 experimentou-se um considerável interesse no desenvolvimento da mecânica da fratura. Neste período a I.S.R.M. constituiu um grupo de trabalho coordenado por F. Ouchterlony que apresentou sugestão de métodos para determinação da tenacidade à fratura (I.S.R.M., 1988). Subseqüentemente a este trabalho surgiram outras metodologias. Existe atualmente uma série de métodos para determinar a tenacidade à fratura em rochas.

4.4.1 – Ensaios de Tenacidade à Fratura

4.4.1.1 – Ensaios normalizados pela ISRM

Os métodos de ensaio sugeridos pela ISRM, 1988 (*in* Pehovaz-Alvarez et al., 2004) utilizam os corpos-de-prova denominados “*Chevron Bend – CB*” e “*Short Rod – SR*” e pela ISRM (1995) o corpo-de-prova chamado “*Cracked Chevron Notched Brazilian Disc – CCNBD*”.

a) Método *Chevron Bend - CB*

Segundo Almeida (1999), o corpo de prova com a geometria CB foi desenvolvido por Ouchterlony (1980) e Ouchterlony & Sun, (1983) que adotaram esta geometria em flexão de 3 pontos de apoio para determinar a tenacidade à fratura de rochas como mostra a figura 4.6.

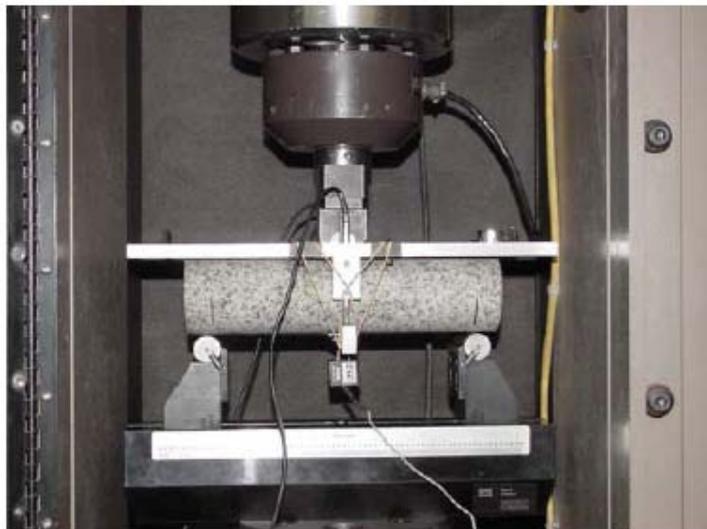


Figura 4.6 – Ensaio Chevron Bend (ISRM 1988, *in* Pehovaz-Alvarez et. al., 2004)

A introdução do notch do corpo de prova provoca a propagação da fissura que se inicia no vértice do “v” e se propaga ao longo do plano do notch em um padrão estável até que o carregamento aplicado alcance um valor máximo, P_{max} .

b) Método *Short Rod (SR)*

Este método foi introduzido por Barker, 1977 (*in* Pehovaz-Alvarez et al., 2004) para determinar a tenacidade à fratura das rochas. O corpo de prova possui o formato de um testemunho de sondagem, cortado nas dimensões sugeridas, com um corte ao longo do seu eixo (figura 4.7).



Figura 4.7 – Ensaio Short Rod (ISRM 1988, *in* Pehovaz-Alvarez et al., 2004).

Na determinação da tenacidade através dos métodos SR e CB são assumidas condições de isotropia e homogeneidade, e ainda que é atribuído ao material um comportamento frágil. Entretanto a presença de anisotropias nas rochas não deve ser desconsiderada uma vez que são importantes as influências nas medidas de tenacidade.

Segundo Pehovaz-Alvarez et al (2004), os dois tipos de ensaios (*chevron notched rock fracture specimens*) propostos pela ISRM (1988), Chevron Bend (CB) e Short Rod (SR) recomendados para determinar a tenacidade à fratura (Modo I) têm uma série de desvantagens práticas tais como taxas de carregamento muito baixas para iniciar a propagação de fraturas, razoáveis quantidades de material rochoso intacto para elaboração dos corpos de prova (CP), além de complicações na sua confecção (Fowell & Xu, 1994). Ainda segundo os mesmos autores, CP com um “vazio” na parte central orientado paralelo ou perpendicularmente a uma feição de anisotropia como planos de fraqueza superam estas dificuldades e são favoráveis à execução de ensaios mistos.

Logo, a ISRM (1995) sugere um terceiro ensaio, *Cracked Chevron Notched Brazilian Disc – CCNBD* (figura 4.8). 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.

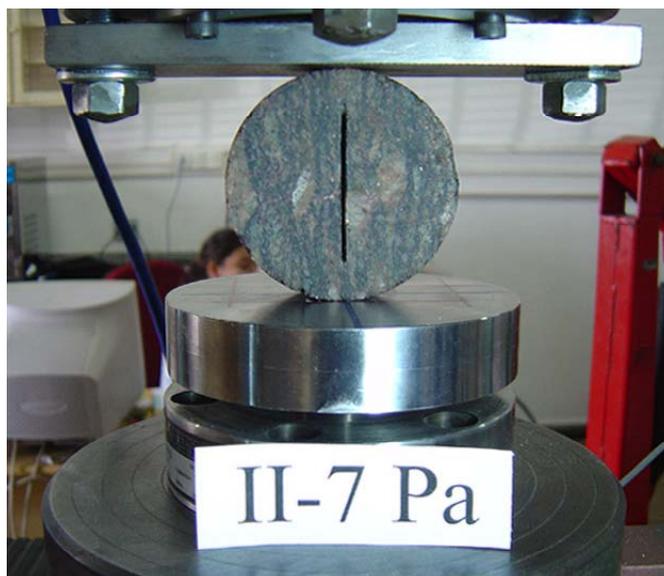


Figura 4.8 – Ensaio de corpo-de-prova na forma de disco brasileiro com entalhe chevron (CCNBD).

Em todos os métodos mencionados anteriormente 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, mas sob circunstância não ideal o ponto de avaliação da tenacidade pode ocorrer antes ou depois da carga máxima.

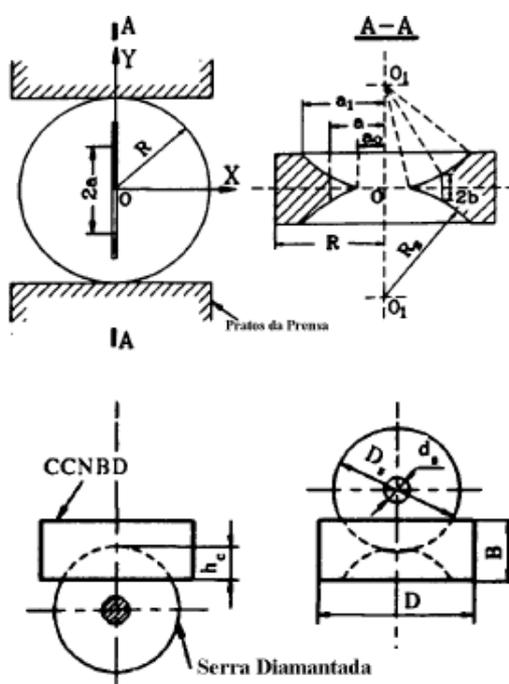


Figura 4.9 – Geometria do corpo de prova e procedimento do corte a ser feito na amostra recomendado pela ISRM (1995).

As dimensões básicas para a confecção do corpo de prova e do corte com a geometria mostrado na figura 4.9 são detalhadas na tabela 4.1:

DESCRIÇÃO	DIMENSÕES
Diâmetro D (mm)	75,00
Espessura B (mm)	30,00
a ₀ (mm)	9,89
a ₁ (mm)	24,37
Diâmetro da serra D _s (mm)	52,00
Profundidade do corte H _c (mm)	16,95
Y _{min} (adimensional)	0,84

Tabela 4.1 – Tabela de valores básicos para a confecção de corpos de prova com a geometria sugerida pela I.S.R.M. (1995).

O ensaio é conduzido sob controle de carregamento, e é apenas requerido o registro da força máxima (P_{max}). A I.S.R.M. (1995) recomenda ainda, que sejam confeccionadas lâminas petrográficas paralelas às direções de carregamento. A taxa de carregamento durante a realização dos ensaios deve ser não inferior a 0,25 MPa√m /s ou que a ruptura ocorra dentro de um intervalo de tempo não superior a 20 segundos. A tenacidade à fratura deve ser calculada pela seguinte equação:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}}{B \cdot \sqrt{D}} \cdot Y_{min}^* \quad (\text{Eq. 4.21})$$

onde o valor Y*min representa a intensidade de tensão para o dado corpo de prova o qual é determinado pelas dimensões geométricas do corpo de prova apenas, independente do material. Os valores de Y*min foram tabelados e listados em I.S.R.M. (1995). Para a geometria específica apresentada acima, o valor de Y*min foi mostrado na tabela 4.1.

4.4.1.2 – Ensaio não normalizados pela ISRM

a) Ensaio de partição por Compressão (*Compression Splitting Test – CST*)

Karihaloo, 1980 (*in* Whittaker et al., 1992) propôs um modelo mecânico simples – o modelo das duas colunas (*Two-strut model*) – baseado no critério do balanço energético de Griffith para explicar o comportamento de partição por compressão observada de dois tipos de polímeros vítreos. Pesquisas experimentais e teóricas mostraram que a partição axial é assegurada se o pré-entalhe é suficientemente longo e o prato superior é razoavelmente estreito.

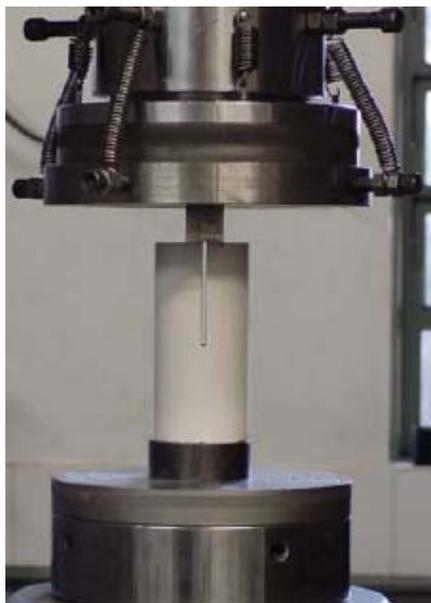


Figura 4.10 – Ensaio de partição por compressão (CST) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004).

Este método foi usado para a determinação da tenacidade à fratura de materiais frágeis vítreos (Perspex, Araldita), de materiais cimentícios (argamassas, concretos) e de cerâmicas.

O fator intensidade de tensão crítico determinado pelo modelo das duas colunas não é dependente da geometria do corpo-de-prova (Karihaloo, 1985, *in* Whittaker et al., 1992).

b) Ensaio com corpos-de-prova semi-circulares. (*Semi-circular Bend Specimen – SCB*)

Chong e Kuruppu, 1984 (*in* Whittaker et al., 1992) propuseram a utilização de um corpo-de-prova semicircular com um simples entalhe de comprimento a , sujeito a um carregamento semelhante a um ensaio de flexão a três pontos (Figura 4.11).

Desta forma, os ensaios são feitos com carregamento compressivo, onde são induzidas as fraturas de tração (modo I). Os ensaios são conduzidos com controle da abertura da boca do entalhe e registro da carga.

Chong et al., 1987 (*in* Whittaker et al., 1992) desenvolveram uma equação para K_I usando o método da taxa de liberação de energia de deformação.

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{DB} Y_K \quad (\text{Eq. 4.22})$$

onde Y_K é o fator de intensidade de tensão adimensional, obtido em função do comprimento adimensional da trinca $\frac{a}{D}$, D é o diâmetro do corpo-de-prova, B a espessura e P a carga máxima aplicada.

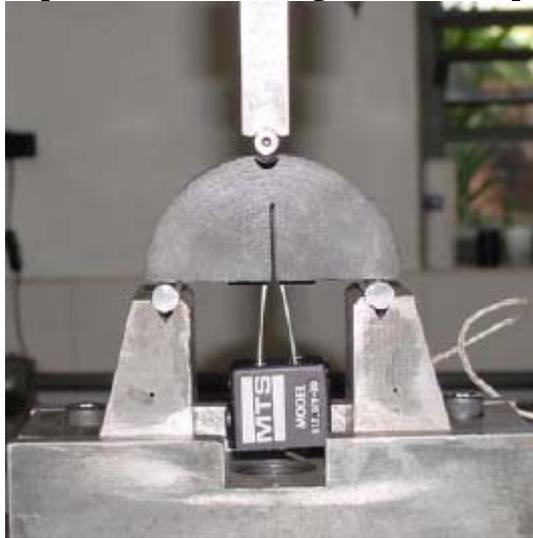


Figura 4.11 – Ensaio com corpos-de-prova semicirculares (SCB) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004).

Whittaker et al. (1992) aproximaram Y_K por um polinômio de terceiro grau:

$$Y_K = 4.47 + 7.40 \frac{a}{D} - 106.00 \left(\frac{a}{D} \right)^2 + 433.3 \left(\frac{a}{D} \right)^3 \quad (\text{Eq. 4.23})$$

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

c) Ensaio de corpos-de-prova semi-circulares com entalhe chevron (*Chevron Notched Semicircular Bend Test – CNSCB*)

Kuruppu, 1997 (*in* Pehovaz-Alvarez et al., 2004) propõe um corpo-de-prova baseado na forma semicircular com um entalhe chevron na borda (Figura 4.12). A incorporação do entalhe chevron facilita a iniciação e o crescimento de uma trinca natural de uma maneira estável antes de alcançar o ponto de instabilidade e também simplifica o cálculo da tenacidade à fratura.

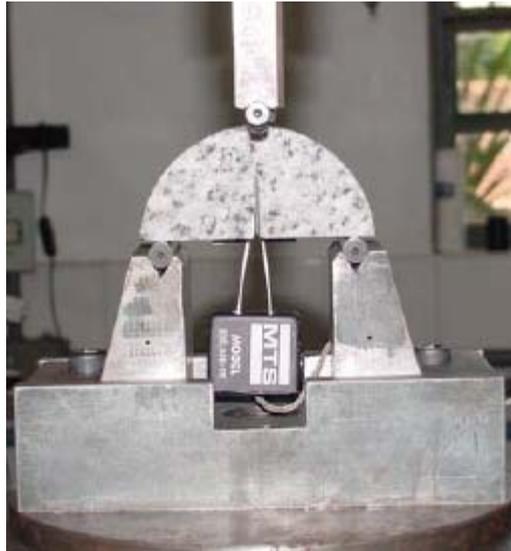


Figura 4.12 – Ensaio com corpos-de-prova semicirculares com entalhe chevron (CNSCB) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004).

Os fatores intensidade de tensão modo I adimensional para o corpo-de-prova semi-circular com entalhe chevron foram determinados usando uma simulação numérica de elementos finitos 3D.

O valor médio do fator intensidade de tensão determinado ao longo da frente da fratura é normalizado como segue:

$$K_{nd} = \frac{K_I}{P} t \sqrt{R} \quad (\text{Eq. 4.24})$$

onde K_{nd} é o fator de intensidade de tensão normalizado, P é a carga aplicada e t e R são a espessura e raio do corpo-de-prova, respectivamente.

Os corpos-de-prova são submetidos a um carregamento semelhante a um ensaio de flexão a três pontos até a ruptura, determinando-se a carga máxima. O valor apropriado da relação $\frac{S}{R}$ é 0,8 (Kuruppu 1997).

d) Ensaio do anel modificado (*Modified Ring Test - MRT*)

Thiercelin e Roegiers, 1986 (*in* Pehovaz-Alvarez et al., 2004) propuseram o ensaio de anel modificado (Figura 4.13), este ensaio é um ensaio de compressão diametral que pode ser analisado em tensão plana da Mecânica da Fratura Elástica-Linear (LEFM).

A carga compressiva é aplicada ao corpo-de-prova de anel modificado pelo deslocamento uniforme de dois pratos de carregamento paralelos e diametralmente opostos atuando sob as superfícies planas do anel modificado.

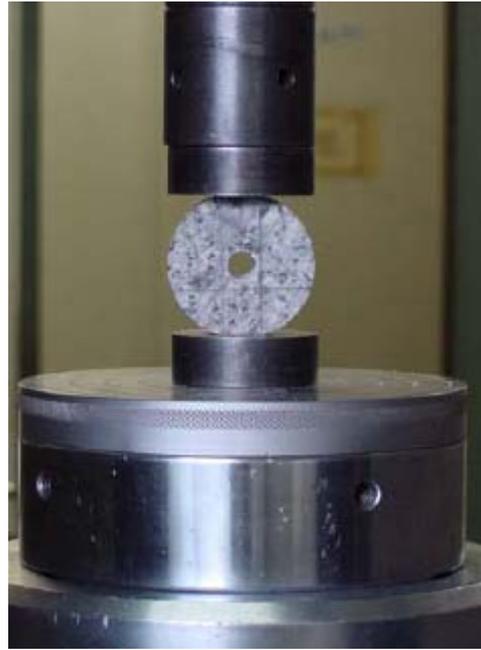


Figura 4.13 – Ensaio de anel modificado (*MRT*) (Pehovaz-Alvarez et al., 2004).

Thiercelin & Roegiers, 1986 (*in* Pehovaz-Alvarez et al., 2004) calibraram $K_{I_{max}}$ e a_c (comprimento de trinca crítica) para um amplo intervalo de geometrias.

Whittaker *et al.* (1992), indicaram que para $\nu=0.35$, pode-se fazer uma regressão de terceira ordem polinomial como segue:

$$a_c = r_0 \left[1.02 - 1.60 \left(\frac{b}{r_0} \right) + 0.35 \left(\frac{b}{r_0} \right)^2 + 1.17 \left(\frac{b}{r_0} \right)^3 \right] \quad (\text{Eq. 4.25})$$

Determinando a tenacidade à fratura pela seguinte expressão:

$$K_{I_{max}} = \frac{P_{min}}{\pi B r_0} \sqrt{\pi(r_i + a_c)} * f \left(\frac{b}{r_0} \right) \quad (\text{Eq. 4.26})$$

$$f \left(\frac{b}{r_0} \right) = \begin{cases} 3.23 - 13.73 \left(\frac{b}{r_0} \right) + 25.36 \left(\frac{b}{r_0} \right)^2 - 14.8 \left(\frac{b}{r_0} \right)^3 \dots \text{para } \frac{r_i}{r_0} = 0.13 \\ 3.50 - 14.86 \left(\frac{b}{r_0} \right) + 37.14 \left(\frac{b}{r_0} \right)^2 - 40.0 \left(\frac{b}{r_0} \right)^3 \dots \text{para } \frac{r_i}{r_0} = 0.20 \end{cases}$$

onde,

r_i = raio do furo interno

r_0 = raio do disco

P_{min} = carga aplicada local mínima

B = espessura

b = largura da superfície de carregamento

sendo válidos os resultados somente para $0.1 \leq \frac{b}{r_0} \leq 0.35$.

Pode-se observar que para valores dados de r_i e r_o , a_c e $K_{I_{max}}$ são dependentes somente de b , a largura da superfície de carregamento.

e) Ensaio em corpos-de-prova de discos com entalhe na borda com partição por cunha (*Edge Notched Disc Wedge Splitting Test – END*)

Donovan & Karfakis, 2004 propõem o ensaio de partição mediante uma cunha em discos com entalhe na borda (END wedge splitting test) para a determinação da tenacidade à fratura no modo I para uma rápida classificação e com fins comparativos.

Uma força de compressão aplicada na cunha propaga o entalhe (Figura 4.14). O ensaio requer que seja registrada somente a carga de pico. Os resultados do ensaio END não mostram nenhuma dependência com a velocidade de carregamento, mas mostram alguma dependência com o comprimento da trinca e o tamanho de grãos.

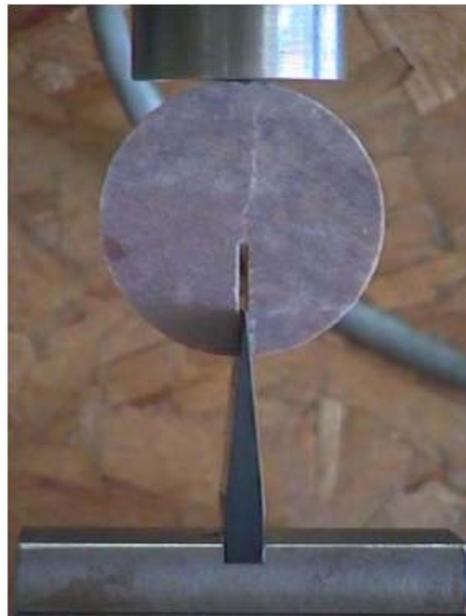


Figura 4.14 – Ensaio em corpos de prova de discos com entalhe na borda com partição por cunha (END). (Donovan & Karfakis, 2004).

Donovan & Karfakis (2004), baseados na solução de Gregory (1979) para determinar o fator intensidade de tensão e F_v , calcularam a tenacidade à fratura usando a seguinte equação:

$$K_{IC} = 2\sqrt{\frac{D}{2a}} \left[\frac{F_v}{2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \frac{1 - \mu \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{1 + \mu \cot\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right] \times \left[\frac{a}{0.355715(D-a)^{3/2}} + \frac{1}{0.966528(D-a)^{1/2}} \right] \quad (\text{Eq. 4.27})$$

onde:

D : diâmetro do corpo-de-prova

α : comprimento da trinca

F_v : Força vertical aplicada

α : ângulo da cunha
 μ : coeficiente de fricção na interface.

De acordo com o ensaio de tenacidade à fratura tipo I, somente a carga máxima deve ser registrada para calcular K_{IC} . Entretanto, os dados carregamento-deslocamento devem ser registrados para verificar a que carga máxima é a carga crítica aplicada que resulta da propagação da trinca.

O dispositivo de cunha usado para aplicar a força de separação da boca da trinca consiste de um aço endurecido. O ângulo de cunha é de 11° .

Entretanto, para acunhamento de uma trinca em rocha, a quantidade de atrito entre o material da cunha e a rocha pode ser substancial e poderiam ocorrer perdas friccionais. O coeficiente de fricção necessita ser quantificado para cada tipo de rocha ensaiada. Um ensaio tilt-test pode ser usado para determinar μ , onde o ângulo de deslizamento é φ e $\tan \varphi$ é igual a μ .

f) Ensaio de carga pontual (*Point Load Test (PLT)*)

Neste ensaio, os corpos-de-prova de forma cilíndrica ou irregular são carregados até a ruptura, empregando um esforço pontual através de ponteiros cônicos (Figura 4.15). Baseia-se no princípio do esforço de tração induzido dentro do corpo pela aplicação de uma força pontual compressiva.



Figura 4.15 – Ensaio de carga pontual (CP) (Pehovaz-Alvarez et. al., 2004).

Segundo Bearman (1999), a relação empírica entre os resultados de ensaios de carga pontual de corpos-de-prova carregados diametralmente em testemunhos e a tenacidade à fratura de rochas é dada por:

$$K_{IC} = \frac{29.84P}{D^{3/2}} \quad (\text{Eq. 4.28})$$

onde

K_{IC} : Tenacidade à fratura no Modo I ($\text{MN}/\text{m}^{3/2}$)

P : força na ruptura (kN)

D : distância entre os pontos da carga pontual (mm)

Para ensaios com corpos-de-prova irregulares ou carregados axialmente, a relação empírica é:

$$K_{IC} = \frac{26.56P}{(WD)^{3/4}} \quad (\text{Eq. 4.29})$$

onde

K_{IC} : Tenacidade à fratura no Modo I ($\text{MN}/\text{m}^{3/2}$)

P : força na ruptura (kN)

D : distância entre os pontos da carga pontual (mm)

W : largura mínima do corpo-de-prova ensaiado(mm).

g) Ensaio de Dupla-Torção (*Double Torsion Test – DT*)

O método de dupla-torção foi desenvolvido por Evans, 1972 (*in* Whittaker et al., 1992). Um deslocamento constante é aplicado aos corpos-de-prova através de um esquema de flexão de quatro pontos (Figura 4.16). A frente da fratura prossegue ao longo de uma linha reta que parte de um entalhe inicial e é guiada por um sulco lateral que produz assim uma relaxação de carga. O método tem muitas vantagens, a principal é sua potencialidade para produzir a propagação estável da fratura (Atkinson, 1987).

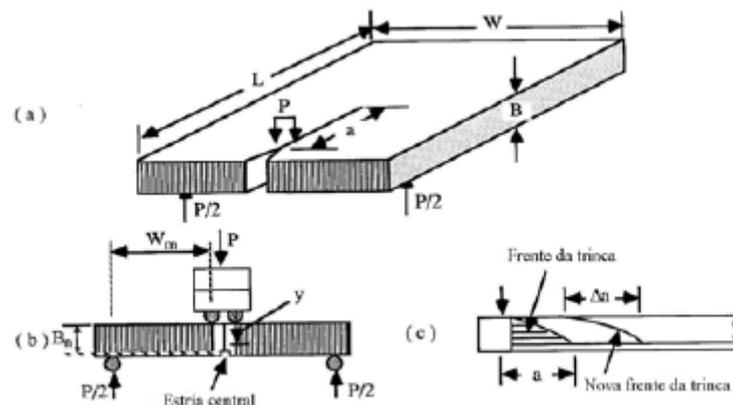


Figura 4.16 – Ensaio de dupla-torção (DT) (Whittaker et al., 1992).

Outra vantagem do método é que requer somente a carga máxima, sem nenhuma necessidade de medir o comprimento da fratura durante o ensaio. O fator de intensidade da tensão modo I é dada por a seguinte expressão:

$$K_I = \sqrt{EG} = PW_m \sqrt{\frac{3(1+\nu)}{Wd^3d_n}} \quad (\text{Eq. 4.30})$$

onde E é o módulo de Young, G a taxa de liberação de energia da tensão, P a carga aplicada, W_m o braço do momento da torção, ν a relação de Poisson, W a largura do corpo-de-prova, d a espessura do corpo-de-prova, e d_n a espessura do corpo-de-prova menos a profundidade do sulco.

h) Método - *Uncracked Brazilian Disk Test BDT* - Proposto por Guo et Al. (1993)

O BDT baseia-se na análise de tensões de Hondros, 1959 (*in* Guo et al, 1993) e tem como principal característica a indução e propagação de uma fratura em um disco durante a realização do ensaio brasileiro para determinar a resistência à tração de rochas. Este método foi primeiramente desenvolvido e empregado para determinar a tenacidade a fratura de rochas por Guo, 1990 (*in* Guo et al, 1993). A grande vantagem deste método, quando comparado aos demais, reside no fato de não ser necessário realizar-se o entalhe (notch) na porção central do CP, pois a fratura central é induzida durante o carregamento. Uma completa apresentação e descrição do presente método pode ser encontrada em Guo et al (1993) e Whittaker et al (1992).

A figura a seguir mostra a configuração básica do experimento:

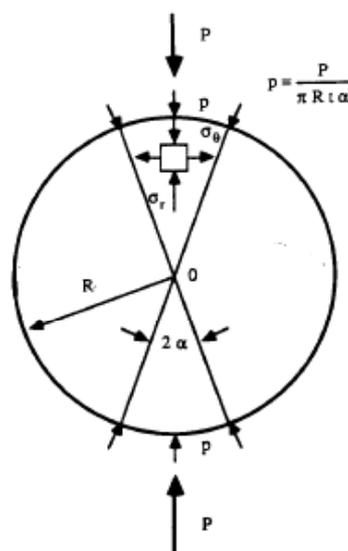


Figura 4.17 – Disco sob compressão diametral com notação básica (Guo et al., 1993).

onde P é o carregamento aplicado, R é o raio do disco, t é a espessura do disco, 2α é o arco de distribuição radial de P e (r, θ) são coordenadas

polares baseadas no centro do disco. σ_r é a tensão paralela a fratura na direção vertical e não tem influencia na propagação. σ_θ é a tensão que controla a propagação da fratura e a distribuição para diferentes valores de α . O valor máximo de σ_θ (tração) ocorre em $r = 0$ (na porção central do disco). Esta magnitude diminui com o aumento de r , tornando-se negativa (compressão) com a aproximação da fratura a extremidade do disco.

Segundo o critério de Griffith, apenas o ponto central no disco apresenta condições de fissuramento por tração. Esse fissuramento que se inicia no centro do disco, se propaga ao longo do diâmetro de carregamento. Na determinação do campo de tensões devem ser ignoradas pequenas concentrações de tensão produzidas naturalmente por poros ou pequenas falhas no material.

O fator de concentração de tensões no modo I (K_I) advém da distribuição não-uniforme da tensão de tração σ_θ , na vertical, ao longo do diâmetro carregado por esforços de compressão

$$P = \frac{P}{\pi R t a} \quad (\text{Eq. 4.31}).$$

A equação para K_I pode ser dada por:

$$K_I = \left(2P/\pi^{3/2} \cdot R^{1/2} t \alpha\right) f(a/R) \quad (\text{Eq. 4.32})$$

onde,

$$f(a/R) = \sqrt{a/R} \int_0^{a/R} \left[\frac{\sqrt{R} \phi(r/R)}{\sqrt{(a^2 - r^2)}} \right] \quad (\text{Eq. 4.33})$$

$$\phi\left(\frac{r}{R}\right) = \frac{\left[1 - (r/R)^2 \sin 2\alpha\right]}{1 - 2(r/R)^2 \cos 2\alpha + (r/R)^4} - \tan^{-1} \left[\frac{1 + (r/R)^2}{1 - (r/R)^2} \tan \alpha \right] \quad (\text{Eq. 4.34})$$

onde,

r - é a distância radial do centro do disco e;

a - é o comprimento da fratura.

Desde que $f(a/R)$ possa ser avaliado para um dado valor de a , K_I pode ser determinado para qualquer valor de P . Existe um valor máximo para $f(a/R)$ quando $a = a_c$, comprimento crítico da fratura. Quando $a < a_c$, $f(a/R)$ aumenta com a , indicando uma propagação instável, mas se $f(a/R)$ diminui com a na condição $a > a_c$ indica uma propagação estável. Isto implica que existe um valor de P_{\min} no qual $a = a_c$. Um incremento de carregamento adicional é necessário para a ruptura do CP. Isto pode ser usado para se determinar a tenacidade à fratura de rochas de uma fratura com comprimento crítico a_c através do valor de P_{\min} . A magnitude de a_c é função de α , sendo, em geral, da ordem de 0,8R (Whittaker et al., 1992).

Guo (1990) em seus estudos para aplicação do ensaio brasileiro na determinação da tenacidade, adotou CP com $R = 54\text{mm}$, $t = 27\text{mm}$, $\alpha = 5^\circ$,

resultando em um valor de $f(a/R) = 104,1$. Assim a tenacidade à fraturas de rochas pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$K_{IC} = 104,1P_{min} \quad (\text{Eq. 4.35})$$

P_{min} pode ser determinado a partir da curva carregamento-deformação.

A figura 4.18 exibe uma curva típica de carregamento diametral - deformação, obtida a partir de ensaios brasileiros, encontrada por Guo et al. (1993). Podemos observar que o processo de iniciação e desenvolvimento da fratura pode ser definido em 3 estágios. O primeiro, (**trecho oa**), o CP comporta-se de modo elástico e o CP permanece intacto. Quando o carregamento atinge um valor crítico, o qual induz esforços de tração no centro do disco que excede o valor de resistência à tração do material, a fratura é iniciada, e um segundo estágio é iniciado com a propagação instável da fratura (**trecho ab**). O carregamento começa então, a diminuir até que a propagação da fratura seja estabilizada, e o carregamento atinge um valor de P_{min} . Então o terceiro estágio se inicia (**trecho bc**) e o carregamento aumenta para possibilitar um fraturamento diametral adicional. Neste momento as zonas próximas aos pratos da prensa são fissuradas e desenvolvem-se fraturas secundárias. Este processo reflete-se na curva no trecho onde há oscilação randômica. Nos experimentos de Guo et al. (1993) a maior parte dos ensaios foi paralisado no início do terceiro estágio, onde o valor de P_{min} pode ser identificado na curva.

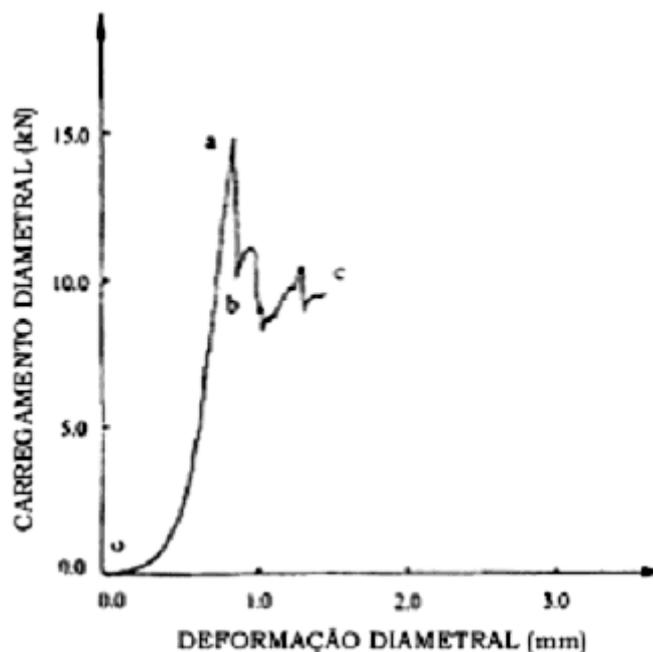


Figura 4.18 – Curva típica de carregamento diametral - deformação, obtida durante ensaio brasileiro (Guo et al., 1993).

5 – Alteração Intempérica de Rochas

5.1 – Introdução

Um grande número de pesquisadores dos processos intempéricos buscou definições que pudessem expressar o fenômeno do intemperismo de forma ampla, abrangendo seu significado, condicionantes físicos, químicos e biológicos, bem como tentando caracterizar suas conseqüências sobre o material rochoso original. Entende-se intemperismo, no presente trabalho, como alteração secundária ou meteórica que se desenvolve na ou próximo da superfície, portanto em campos de baixa pressão e temperatura, diferentes daqueles às que as rochas estavam condicionadas nas porções mais interiores da crosta (Barroso, 1993).

Como já foi citado, o intemperismo é comumente dividido em três tipos: físico, químico e biológico. Essa divisão foi sugerida para facilitar o entendimento de cada um deles, porém na natureza eles atuam, quase sempre, ao mesmo tempo.

5.2 – Efeitos do Intemperismo

Segundo Marques (1998) o intemperismo físico, ou desagregação física, é um processo que causa fragmentação “in situ” do arcabouço de uma rocha, sem que haja qualquer mudança na composição química destas. Os agentes que podem causar a desagregação física são vários: variações de temperatura, alívio de tensões, umedecimento e secagem, etc.

O intemperismo químico, por sua vez, promove a decomposição química dos minerais constituintes das rochas transformando-os em minerais secundários, estáveis ou não. Em uma escala de tempo relacionada com a vida útil de uma obra de engenharia, os processos de decomposição química mais importantes são os de oxidação/redução e solução.

Barroso (1993) cita que intemperismo biológico produz uma combinação de desagregação e decomposição através de agentes orgânicos (flora e fauna), cuja ação é mais relevante nos horizontes de solo. Porém, a ação biológica não será considerada neste trabalho, tendo em vista o enfoque específico para as modificações químicas, mineralógicas e mecânicas que ocorrem dentro dos termos de rocha alterada, excluindo-se, portanto, o solo residual jovem e o maduro.

5.2.1 – Mineralogia e textura originais do gnaiss facoidal

Segundo Barroso (1993), muito embora o termo facoidal possua caráter puramente textural, um grupo de microclina gnaisses da Série Superior de Helmbold et al. (1965) são assim informalmente designados. Caracteriza-se, em linhas gerais, por rocha de granulação média a grosseira e composta essencialmente por cristais bem desenvolvidos feldspatos e por uma matriz mais fina de plagioclásio, biotita, quartzo, opacos e, em menor quantidade, microclina. Os minerais secundários

presentes são a apatita, a clorita e o epidoto são de origem hidrotermal, e zircão como mineral acessório. O tipo textural observado na área de estudo foi o facoidal e semi-facoidal; tipo porfiroblástico que possui cristais de feldspatos, com formato lenticular (ou de olhos) e fortemente orientados na matriz da rocha.

Menezes Filho (1993) descreveu em seu trabalho a evolução mineralógica resultante da alteração do gnaisse estudado. A tabela 5.1 foi baseada nos dados obtidos neste trabalho.

Nível de alteração	Feldspato	Biotita	Quartzo
I	São; cor e brilho típicos; não podem ser riscados com canivete	Sã; cor e brilho inalterados	–
II	São em sua maioria, sendo que alguns grãos apresentam pequena alteração; não pode ser facilmente riscado com canivete	Cor e brilho característicos ainda preservados; alteração evidenciada pela deposição de ferro e manganês nas clivagens	Estirado e muito fraturado
III	Brilho reduzido; sinais de caulinição; risco com canivete relativamente fácil	Sinais de decomposição pela perda do ferro, conferindo coloração ferruginosa à rocha	Estirado; microfraturado; apresentam-se contornando os facóides
IV	Intensamente caulinizados; facilmente riscáveis com canivete	Bastante alteradas e sem brilho	Fortemente estirado e microfraturado

Tabela 5.1 – Evolução mineralógica com a alteração. (Menezes Filho, 1993).

5.2.2 – Índices físicos

Os índices físicos são parâmetros que refletem as condições de sanidade ou de alteração das rochas por estarem associados diretamente à textura da mesma. Marques (1998) cita que estas propriedades são correlacionáveis entre si, e com as propriedades mecânicas das rochas. Como, em geral, a determinação destas últimas demanda mais tempo, dinheiro e não ser muito simples, pesquisas vem sendo realizadas a fim de se obter expressões que permitam determinar, indiretamente, propriedades mecânicas através de algumas propriedades-índice (Irfan & Dearman, 1978 *in* Marques, 1998).

A caracterização das propriedades físicas no presente trabalho baseou-se nas seguintes propriedades-índice determinadas através das normas sugeridas pela ISRM (1981):

- peso específico aparente seco e saturado (γ);
- porosidade (η);
- teor de umidade de saturação (ω);
- velocidade de propagação de ondas (V).

Menezes Filho (1993) obteve valores dessas propriedades-índice citadas acima, exceto velocidade de propagação de ondas, para o gnaisse facoidal em diferentes níveis de alteração, que ele nomeou da seguinte maneira: nível I como Fresh Rock (FR), nível II com Slightly Weathered Rock (SW), nível III como Moderately Weathered Rock (MW) e nível IV como Highly Weathered Rock (HW). Segue uma tabela contendo os valores médios desses índices físicos encontrados pelo autor supracitado, e também gráficos que relacionam as propriedades ao nível de alteração. Esses resultados estão sendo apresentados com o objetivo de comparação com os resultados que serão apresentados no item 5.4.1.1.

Nível de Alteração	η (%)	ω_{sat} (%)	γ_{seco} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)
FR	0.75	0.29	26.45	26.55
SW	1.65	0.63	26.20	26.40
MW	3.78	1.45	25.35	25.75
HW	6.76	2.81	24.05	24.65

Tabela 5.2 – Valores médios das propriedades-índice obtidos por Menezes Filho para o gnaisse facoidal (1993).

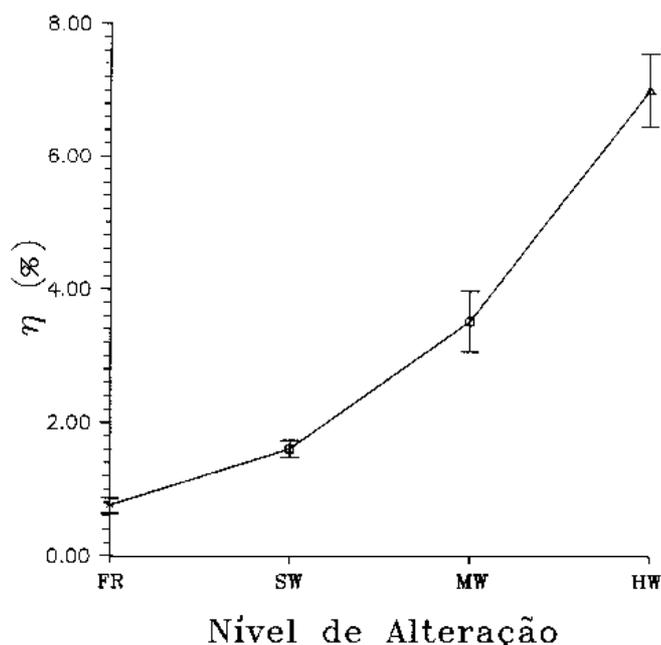


Figura 5.1 – Variação da porosidade com o grau de alteração (Menezes Filho, 1993).

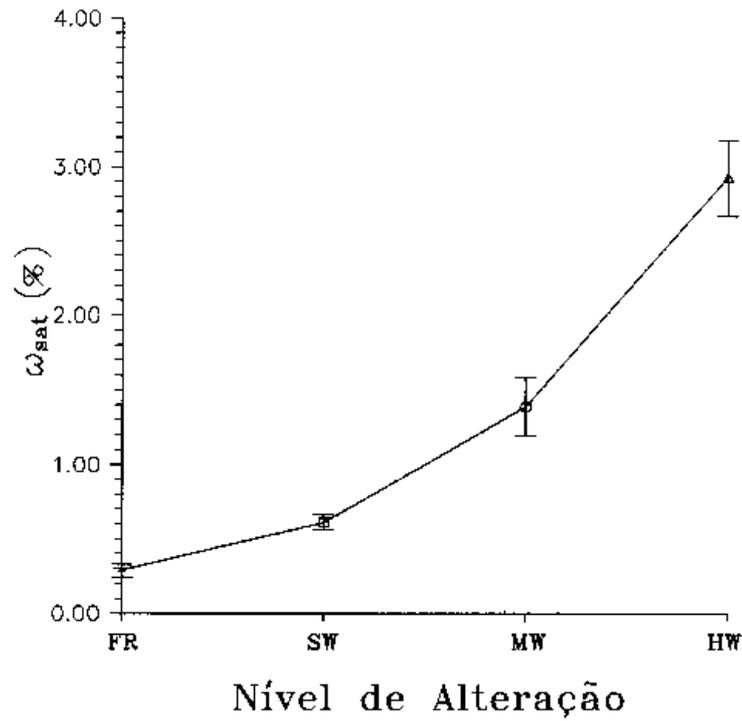


Figura 5.2 – Variação do teor de umidade com o grau de alteração (Menezes Filho, 1993).

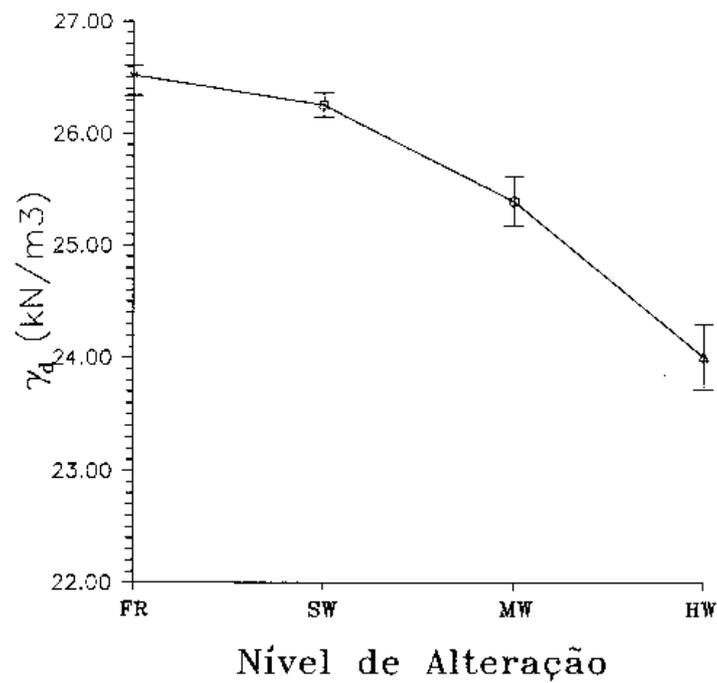


Figura 5.3 – Variação do peso específico seco com o grau de alteração (Menezes Filho, 1993).

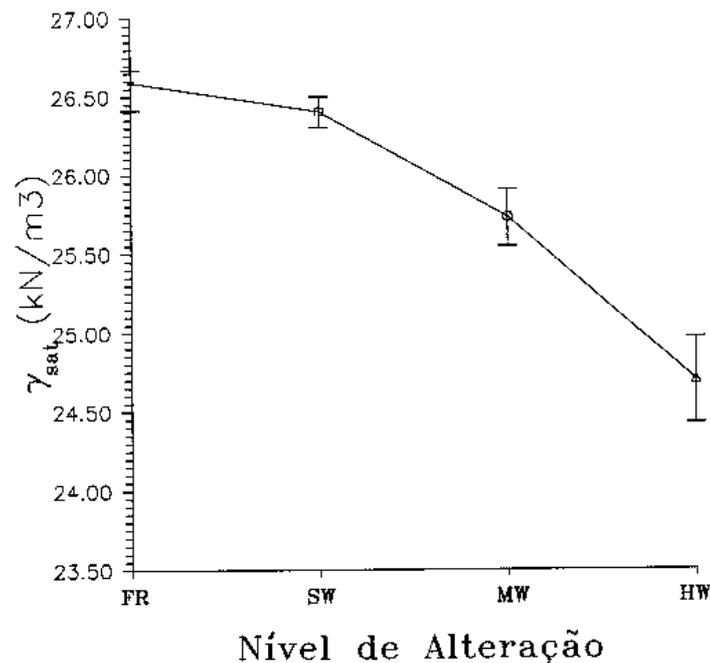


Figura 5.4 – Variação do peso específico saturado com o grau de alteração (Menezes Filho, 1993).

5.2.3 – Propriedades Mecânicas

A propriedade mecânica estudada no presente trabalho é a tenacidade à fratura de rochas. A tenacidade é a propriedade que descreve a energia necessária para que uma fratura pré-existente se propague pela matriz da rocha. No capítulo anterior, foram citados vários métodos que podem quantificar essa propriedade e o método escolhido, como já foi mencionado, foi o método *Cracked Chevron Notched Brazilian Disc* (CCNBD) para modo I de fraturas. Esse ensaio foi escolhido para ser utilizado no presente trabalho por ser o mais específico para a determinação da tenacidade no modo I de fraturas e por ser esse o tipo de mecanismo de propagação de fraturas mais provável na área de estudo e, também, o provável causador da queda de blocos.

5.3 – Caracterização das Amostras Estudadas

Neste tipo de rocha pode-se observar graus variados de alteração da matriz na frente de intemperismo. A caracterização macroscópica de cada estágio identificado foi realizada utilizando-se o cadastro de testes da matriz, desenvolvido por Barroso (1993) baseado na sugestão da ISRM (1981) para descrição de intemperismo de maciços rochosos e encontra-se na tabela 5.3:

CADASTRO DE TESES DA MATRIZ
A - Breve descrição da rocha
B - Caracterização da Decomposição Química (por mineral) 1. inalterado 2. sem brilho ou reduzido 3. descolorido ou cor alterada 4. argilização na superfície 5. totalmente argilizado 6. oxidado
C - Caracterização da Desagregação Física
C.a. Resistência ao golpe do martelo geológico 1. rocha pode ser apenas lascada 2. quebrada com diversos golpes 3. ponta do martelo produz entalhe na superfície 4. golpe do martelo desagrega parcialmente a rocha 5. golpe desagrega completamente a amostra
C,b. Escavação manual usando uma pá ou a mão 1. não pode ser escavado por uma pá 2. escavado com grande dificuldade por uma pá ou espátula 3. escavado com dificuldade pelas mãos 4. escavado facilmente pelas mãos
C,c . Risco do canivete e da unha (por mineral) 1. nenhum arranhão 2. arranhado com dificuldade pelo canivete 3. arranhado facilmente pelo canivete 4. arranhado pela unha
C,d . Facilidade de ser arrancado do arcabouço da rocha (por mineral) 1. não pode ser arrancado 2. arrancado com dificuldade pelo canivete 3. facilmente arrancados pelo canivete

Tabela 5.3 – Cadastro de testes da matriz para reconhecimento e classificação dos estágios de alteração intempérica (Barroso, 1993).

A descrição dos estágios de alteração do gnaisse facoidal feita a partir do cadastro de testes na matriz também foi usada como base na diferenciação dos estágios de alteração do gnaisse estudado na área. A tabela 5.4 contém as descrições dos estágios de alteração da rocha estudada. O cadastro de testes proposto pela ABGE é mais subjetivo, dificultando a classificação dos estágios de alteração.

ESTÁGIO DE ALTERAÇÃO	DESCRIÇÃO COM BASE NAS RESPOSTAS DO CADASTRO DE TESTES
ROCHA SÃ (I)	<p>Todos os minerais estão íntegros perante a observação macroscópica, apenas os feldspatos podem estar com o brilho levemente reduzido.</p> <p>A rocha rompe com extrema dificuldade, necessitando-se de mais de um golpe com o martelo para lascá-la ou quebrá-la. Neste estágio a rocha não pode ser escavada manualmente.</p> <p>Com o uso do canivete pode-se, apenas, arranhar os minerais mais macios como a biotita. Não se consegue arrancar nenhum mineral do arcação da rocha.</p>
LEVEMENTE INTEMPERIZADA (II)	<p>Os feldspatos perdem seu brilho com leve argilização na superfície de alguns grãos, enquanto as biotitas apresentam uma acentuada redução do mesmo e da cor original com insipiente sinal de oxidação.</p> <p>A rocha pode ser quebrada com diversos golpes do martelo geológico, não sendo possível escavá-la manualmente.</p>
MODERADAMENTE INTEMPERIZADA (III)	<p>Os feldspatos apresentam-se totalmente descoloridos e, na sua maioria estão argilizados na superfície. Biotitas apresentam acentuada alteração da cor e possui claros sinais de oxidação.</p> <p>A ponta do martelo geológico produz entalhe na rocha, que ainda não pode ser escavada manualmente.</p> <p>Feldspatos e biotitas são arranhados pelo canivete, sendo a biotita mais facilmente. Neste estágio, algumas biotitas já podem ser arrancadas da matriz.</p>
ALTAMENTE INTEMPERIZADA (IV)	<p>À exceção do quartzo, que se encontra bem fissurado, todos os minerais, estão alterados. Os feldspatos apresentam-se argilizados em superfície.</p> <p>O golpe do martelo desagrega parcialmente a rocha e uma pá ou espátula são capazes de escavá-la com grande dificuldade.</p> <p>Todos os minerais, excluindo-se o quartzo, podem ser arranhados pelo canivete. O canivete é capaz de produzir um sulco profundo sobre a matriz e grande parte dos minerais pode ser arrancada da amostra.</p>

Tabela 5.4 – Caracterização macroscópica de diferentes estágios de alteração da matriz do gnaiss facoidal.

5.4 – Preparação das amostras

Blocos de gnaiss facoidal foram recolhidos no campo, porém, a localização dos mesmos no maciço não foi reconhecida porque estavam dispostos junto a uma obra dentro do Condomínio Joatinga, onde se encontra o Clube Costa Brava, como pode ser visto na figura 5.5.

O transporte até o laboratório realizou-se de maneira cautelosa, os blocos foram arranjados de modo a tentar minimizar a vibração e os deslocamentos derivados da movimentação do veículo. Tendo em vista que uma caracterização macroscópica dos níveis de alteração aos quais os

blocos pertenciam foi feita anteriormente ao transporte, os blocos que se encontravam mais alterados foram mais cuidadosamente arranjados.



Figura 5.5 – Obra no Condomínio Joatinga, próxima ao Clube Costa Brava.

No laboratório, utilizando-se de uma sonda rotativa, foram extraídas amostras cilíndricas de diâmetro H_x (76 mm), que foram orientadas nas direções paralelas e perpendiculares à foliação (Figura 5.6). No caso dos blocos pertencentes aos níveis mais altos de alteração, houve uma grande dificuldade na extração dos corpos de prova porque, quando a sonda começava a entrar nos blocos, os mesmos se quebravam devido a presença de inúmeros planos de fraqueza. Isso se deu em todos os blocos do nível IV e, do nível III, apenas 3 corpos de prova puderam ser recuperados.

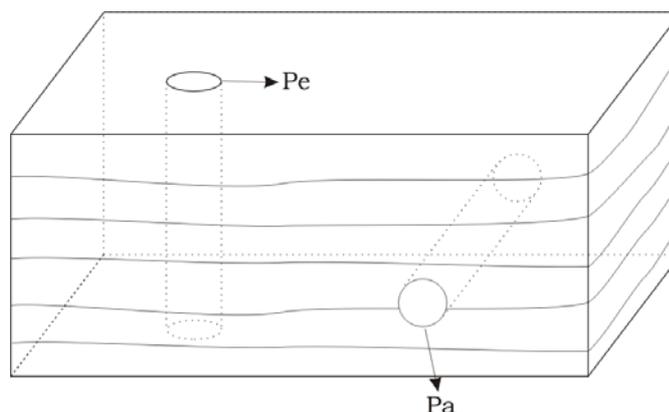


Figura 5.6 – Figura ilustrativa das direções do corte dos corpos de prova.

As amostras foram então cortadas e usinadas de modo a se ajustarem às relações geométricas necessárias para o ensaio de tenacidade para modo I de fratura (CCNBD), segundo as normas da ISRM (1995). Nas amostras paralelas à foliação, foram definidos dois ângulos de

corte, 0 e 45° em relação à direção da própria foliação. Nas amostras perpendiculares à foliação, não importava a orientação do corte, já que em qualquer direção, o corte estaria perpendicular à foliação. Essa hipótese foi assumida, pois dados sísmicos de Barroso (1993) sugerem que esses gnaisses se comportem como um sistema transversalmente isotrópico. As figuras 5.7 a 5.9 mostram os corpos de prova e seus respectivos cortes orientados em relação à foliação.



Figura 5.7 – Corpo de prova com corte paralelo à foliação.



Figura 5.8 – Corpo de prova com corte orientado a 45° em relação à foliação.

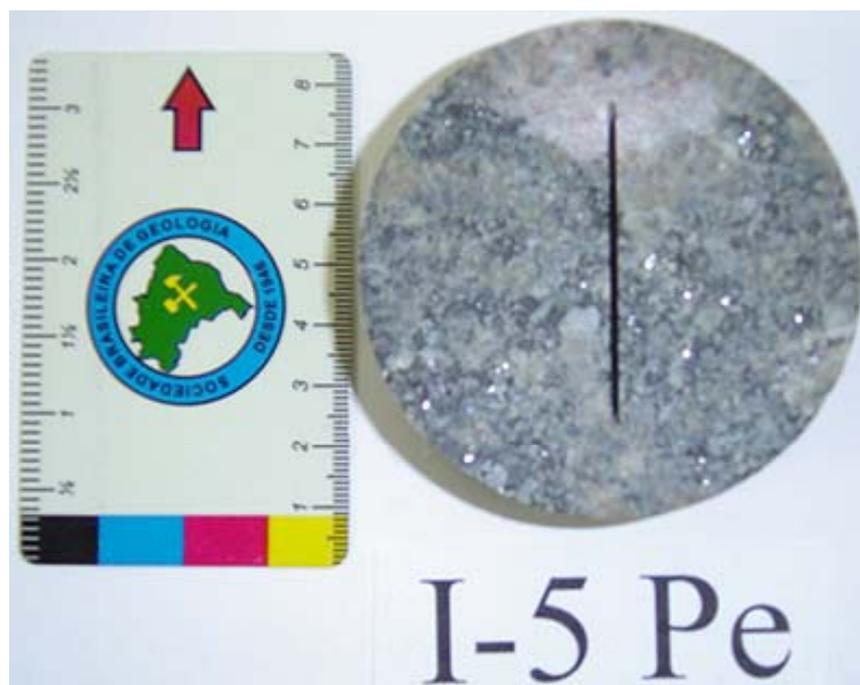


Figura 5.9 – Corpo de prova com corte perpendicular à foliação.

A identificação dos corpos de prova foi designada da seguinte maneira: os algarismos romanos I, II e III correspondem ao nível de alteração ao qual a amostra pertence; os algarismos arábicos relativos ao número da amostra, enquanto Pa e Pe correspondem à orientação do corpo de prova em relação à foliação do bloco, como já foi mostrado na figura 5.6.

Foram confeccionadas e descritas 9 lâminas petrográficas, sendo que dessas, 5 foram confeccionadas utilizando-se resina acrílica de

polimerização lenta (Araldite) e corante de cor azul (Azul de Oracet B) para o preenchimento dos vazios. A impregnação das rochas foi feita sob vácuo e com resina colorida, segundo a metodologia proposta por Cesero *et al.* (1989), visando uma análise da evolução do padrão de microfissuramento com o avanço do intemperismo.

5.4.1 – Petrografia

A rocha é composta principalmente por plagioclásio, quartzo, biotita e microclina, em menor quantidade foram observadas muscovitas, apatitas, epidotos, zircão e cloritas. Quando no estágio I de alteração, os feldspatos apresentam leve sericitização na superfície e ocorrência de alguns carbonatos e epidotos também secundários e resultantes de alteração hidrotermal, não estando relacionados ao intemperismo físico; microfissuras intergranulares, i.e., fissuras que se encontram dentro dos grãos, não são persistentes, e alguns grãos apresentam as microfissuras ao seu redor. As biotitas apresentam leve descoloração nas bordas, em alguns locais, concentração de óxido de ferro nas clivagens e também associadas a cloritas (figura 5.10). A contagem semi-modal (500 pontos) feita na lâmina pertencente ao estágio I indica 52% de plagioclásio, 10,8% de microclina, 16,4% de biotita, 13,4% de quartzo, 3,4% de muscovita, 3% de epidoto, 0,6% de apatita e 0,4% de zircão.

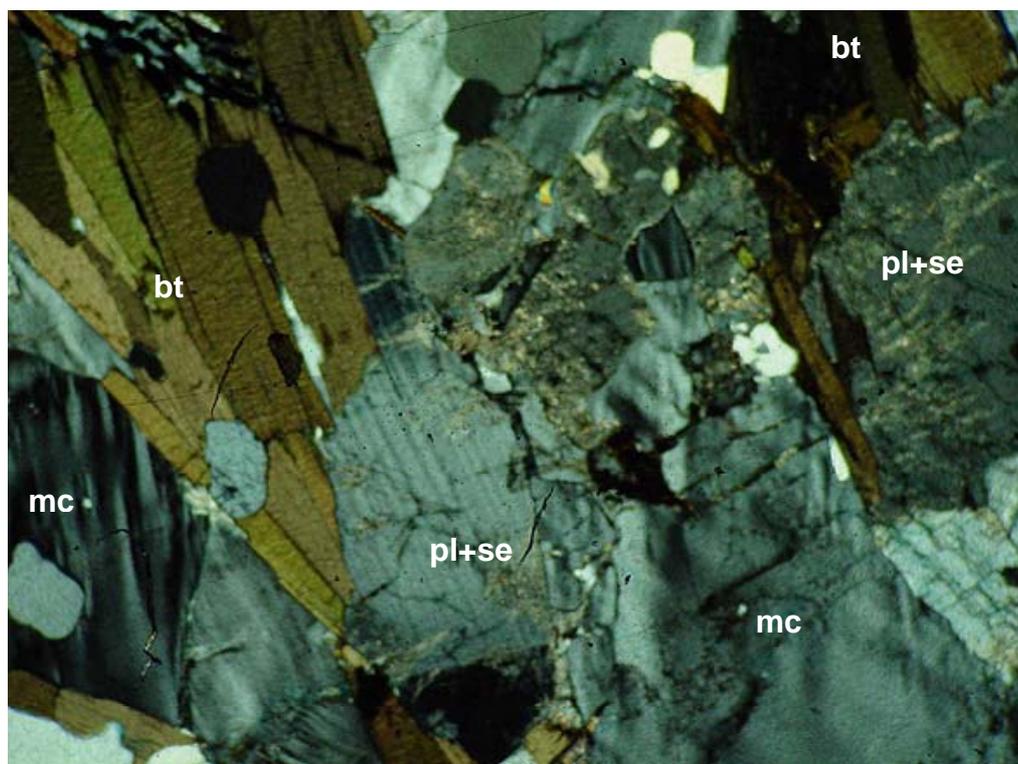


Figura 5.10 – Rocha no estágio I de alteração, plagioclásio (pl) com baixo grau de sericitização (se), microfissuras intragranulares, biotitas (bt) com leve descoloração nas bordas e pouca precipitação de óxido de ferro, microclina (mc) com extinção ondulante. (nicóis cruzados, aumento de 4x).

As figuras 5.11 e 5.12 mostram as lâminas dos estágios II e III perspectivamente, ambas estão com os nicóis cruzados e aumento de 4x. Nestes estágios os plagioclásios sofrem um aumento progressivo da intensidade de sericitização, a precipitação de óxido de ferro nas clivagens das biotitas aumenta gradualmente e, a partir do estágio III, começa a haver abertura desses planos de clivagem (figura 5.13).

As contagens semi-modais feitas nas lâminas do estágio II e III indicam:

- estágio II: 59,4 % de plagioclásio, 17 % de quartzo, 16 % de biotita, 2,6 % de epidoto, 2,2 % de apatita, 1,4 % de muscovita, 0,8 % de microclina e 0,6% de zircão.

- estágio III: 44,4 % de plagioclásio, 19,2 % de quartzo, 18,8 % de biotita, 1,4 % de apatita, 7 % de muscovita, 8,6 % de microclina e 0,6% de clorita.

O plagioclásio e a biotita foram os minerais escolhidos para serem usados como guia da caracterização dos estágios de alteração pois a evolução dos mesmos ao longo da alteração é gradativa, como pode ser observado na tabela 5.5.

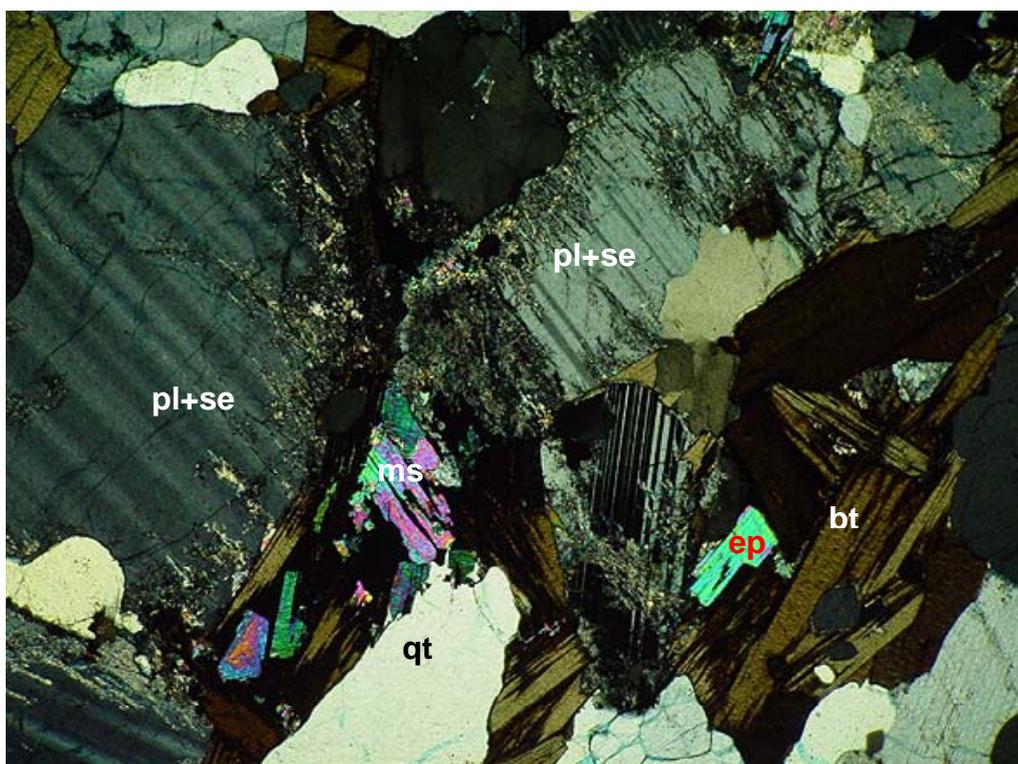


Figura 5.11 – Rocha no estágio II de alteração, maior grau de sericitização nos plagioclásios (pl), biotitas (bt) com maior precipitação de óxido de ferro nas bordas, quartzo (qt) com microfissuras intergranulares e presença de epidoto (ep) e muscovita (ms).

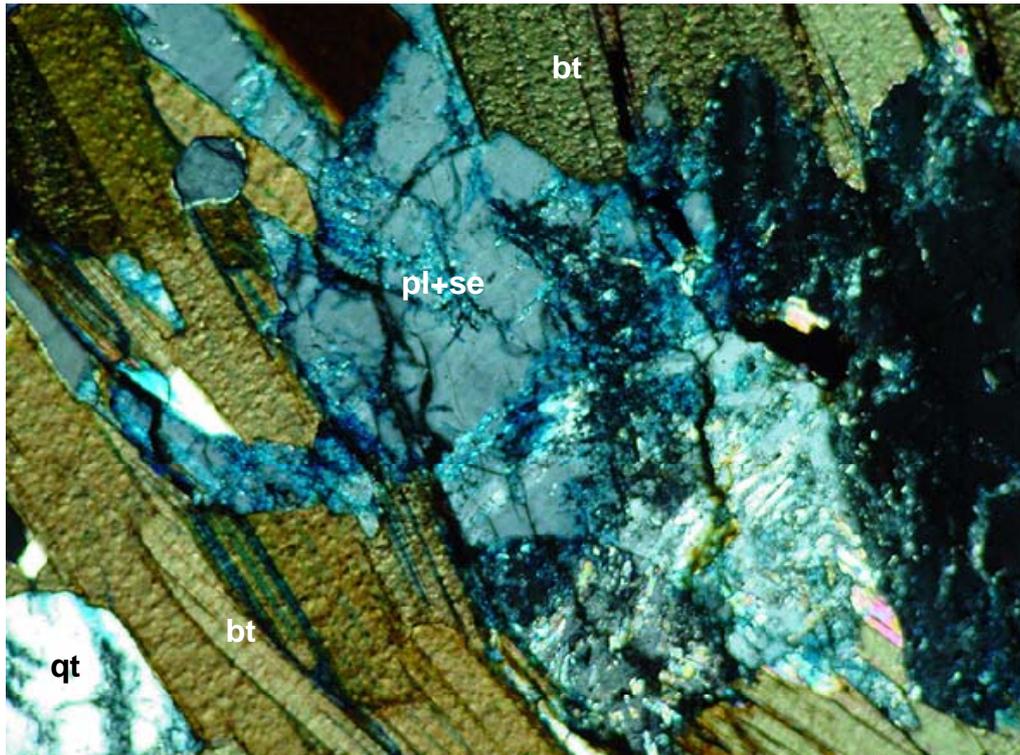


Figura 5.12 – Rocha no estágio III de alteração, plagioclásios (pl) bem microfissurados e maior grau de sericitização (se), biotitas (bt) com as bordas mais descoloradas e se apresentam mais abertas, quartzo (qt) com maior grau de microfissuramento também.

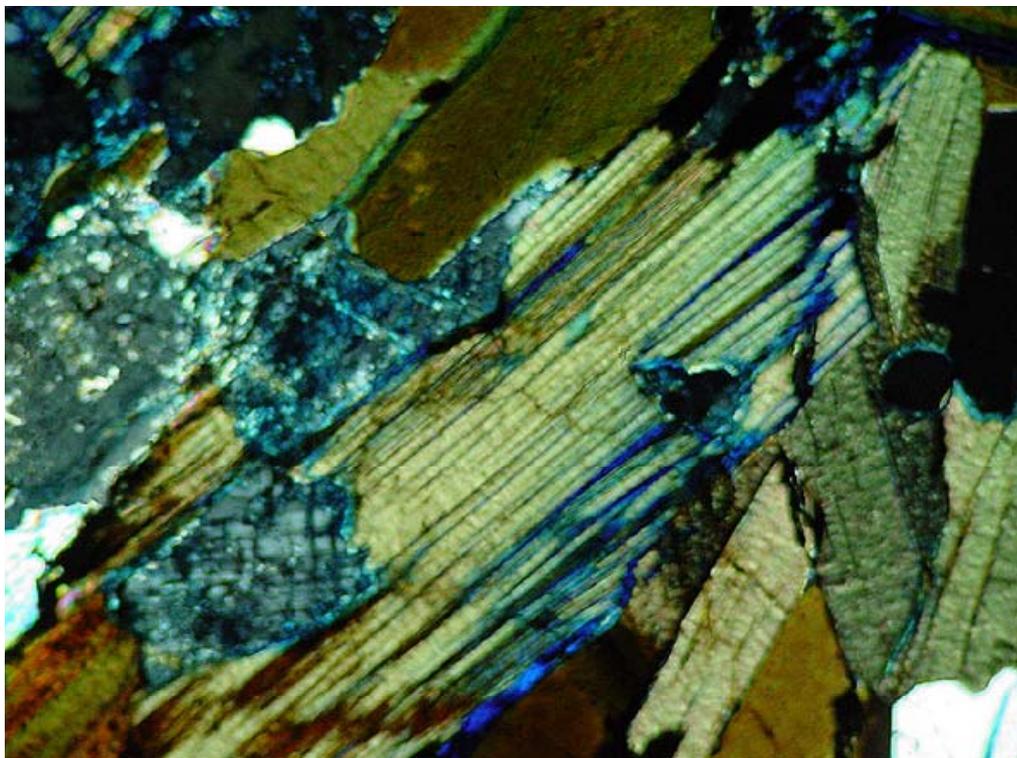


Figura 5.13 – Detalhe da biotita, na lâmina do estágio III, com a abertura dos planos de clivagem bem nítida com a presença do corante azul e descoloração nas bordas. (nicóis cruzados, aumento de 10x).

Mineral	Descrição dos Estágios de Alteração			
	I	II	III	IV
Plagioclásios	Sericitização e carbonatização insipiente na superfície de poucos minerais	Aumento progressivo da intensidade de sericitização e com formação de epidotos e carbonatos mais freqüentes		
Micas (biotitas)	Íntegras na sua maioria com rara presença de leve descoloração nas bordas e pouca evidência de precipitação de óxido de ferro	A maior parte com leve descoloração nas bordas e maior incidência de precipitação de óxido de ferro nas clivagens	Planos de clivagem bem marcados devido à precipitação de óxido de ferro e leve abertura dos mesmos	Aumento da intensidade do manchamento por óxido de ferro e maior abertura dos planos de clivagem

Tabela 5.5 – Caracterização microscópica de diferentes estágios de alteração da matriz do gnaiss facoidal baseada na alteração dos Minerais guia.

5.4.2 – Índices Físicos

Para a determinação dos pesos específicos, seco e saturado, e da porosidade seguiu-se a técnica de saturação e flutuação sugerida pela ISRM (1981). As tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os resultados médios obtidos através desses ensaios e a figura 5.14 mostra a variação da porosidade com a alteração.

Estágio de Alteração	Porosidade (%)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
I	1.03	0.23	22.73
II	2.76	0.25	9.04
III	4.81	0.79	16.49

Tabela 5.6 – Resultados médios para os ensaios de porosidade.

Estágio de Alteração	γ_{seco} (kN/m ³)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)	γ_{sat} (kN/m ³)	Desv. Pad.	Coef. Var. (%)
I	27.10	0.35	1.28	27.20	0.35	1.27
II	26.66	0.08	0.30	26.95	0.09	0.32
III	26.00	0.42	1.61	26.48	0.34	1.29

Tabela 5.7 – Resultados médios para os ensaios de peso específico aparente (seco e saturado)

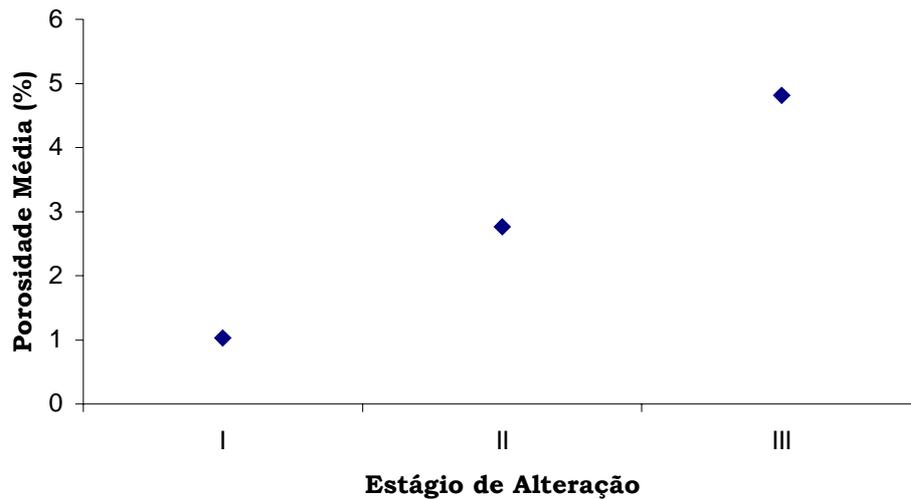


Figura 5.14 – Variação da porosidade com o nível de alteração do corpo de prova.

As tabelas acima mostram que há um aumento bem perceptível da porosidade com o aumento da alteração, enquanto que com relação aos pesos específicos, seco e saturado, nota-se uma redução. Outro fato importante está relacionado ao coeficiente de variação, bastante elevado para os valores de porosidade e bem inferiores para os valores de peso específico, confirmando uma tendência observada anteriormente por Barroso (1993), Menezes Filho (1993) e Marques (1998), para o leptinito, gnaiss facoidal e biotita gnaiss, respectivamente.

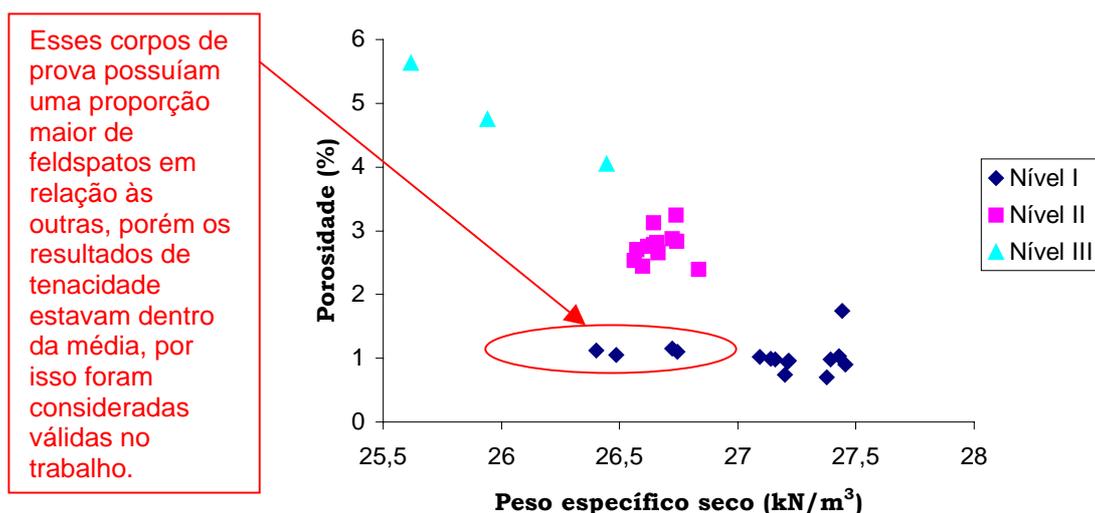


Figura 5.15 – Relação entre a Porosidade e Peso Específico Seco.

5.4.3 – Velocidade de Propagação de Ondas

As vibrações nas rochas se propagam, principalmente, por meio de ondas longitudinais e transversais. Teoricamente, a velocidade com que a onda se propaga através da rocha depende exclusivamente de suas propriedades elásticas (E , ν) e de sua densidade, γ . Na prática, o que se tem observado é que o grau de fissuramento da rocha interfere nessas medidas (a velocidade de propagação diminui com a presença de fissuras). Desse modo, a velocidade de propagação da onda pode ser usada como índice para avaliar o grau de fissuramento da rocha (Azevedo e Marques, 2002).

- a velocidade de propagação da onda diminui com o aumento da porosidade da rocha;
- a velocidade de propagação da onda se eleva com o aumento da densidade da rocha;
- a velocidade de propagação da onda aumenta com o nível da tensão aplicada e
- a velocidade de propagação da onda aumenta com o teor de umidade da rocha (água preenchendo os vazios).

As amostras orientadas paralelamente à foliação foram testadas para esta propriedade-índice, utilizando-se o aparelho PUNDIT e seguindo-se as normas da ISRM, com objetivo de caracterizar a anisotropia com relação a esta propriedade intrínseca da rocha. Dados sísmicos de Barroso (1993) sugerem que esses gnaisses se comportem como um sistema transversalmente isotrópico, por isso as amostras orientadas perpendicularmente à foliação não foram testadas.

A figura 5.16 mostra um gráfico da velocidade média de propagação de ondas relacionada ao nível de alteração no qual se encontra a rocha, pode ser observada a diminuição da velocidade com o aumento da alteração. Na tabela 5.8 observa-se a diminuição do coeficiente de variação com o aumento do estágio de alteração no qual a rocha se encontra, isso prova que a anisotropia diminui com o aumento da alteração.

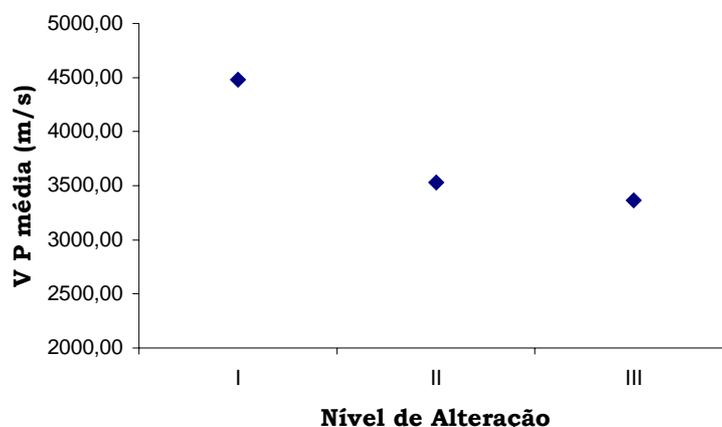


Figura 5.16 – Relação entre a Velocidade Média de Propagação de Ondas longitudinais e o nível de alteração do corpo de prova.

Estágio de Alteração	Vp média (m/s)	Desvio Padrão	Coef. Var. (%)
I	4482.28	193.64	4.32
II	3527.44	94.16	2.67
III	3366.84	77.43	2.30

Tabela 5.8 – Variação da Velocidade de Propagação de Ondas com a alteração da rocha.

6 – Resultados e análise do Ensaio de Tenacidade para o Gnaisse Facoidal

Este capítulo dedica-se à apresentação e análise dos resultados do ensaio de tenacidade, obtidos através do método para determinação da tenacidade para o modo I de fratura, usando corpo de prova na forma de disco brasileiro com entalhe chevron (CCNBD).

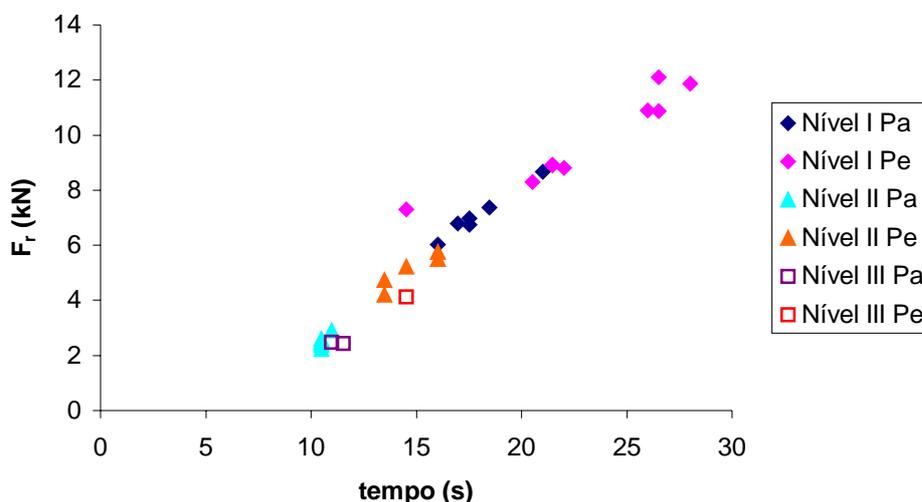


Figura 6.1 – Força de ruptura em relação ao tempo onde ocorre a ruptura.

É recomendado pela ISRM (1995), que a ruptura ocorra antes de 20 segundos, porém, a taxa de carregamento foi mantida constante, em $0,27 \text{ MPa}\sqrt{m}/s$, para que a ruptura das amostras mais alteradas não ocorresse tão rapidamente. No entanto, na maior parte dos ensaios das rochas dos níveis menos alterados, principalmente das perpendiculares ao plano da foliação, o tempo em que a ruptura ocorreu foi maior do que 20 segundos (figura 6.1).

A figura 6.2 revela a redução da tenacidade com o aumento da alteração e a variação da mesma com o ângulo de corte quanto à foliação. Esta figura foi também usada como base para calcular os valores da anisotropia que são mostrados na figura 6.3 e a tabela 6.1, por sua vez, elas ressaltam uma variação da anisotropia com o aumento da alteração.



Figura 6.2 – Resultados de tenacidade relacionados ao ângulo entre o corte (entalhe chevron) e a foliação.

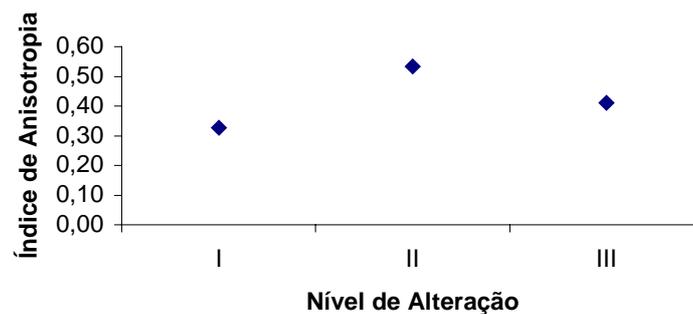


Figura 6.3 – Variação da Anisotropia com a alteração.

Estágio de Alteração	Índice de Anisotropia (%)	Média $K_{ICmáx}$ (MPa/m ^{1/2})	Ângulo em relação à foliação (°)	Média K_{ICmin} (MPa/m ^{1/2})	Ângulo em relação à foliação (°)
I	0,33	0,99	90	0,67	0
II	0,52	0,58	90	0,24	45
III	0,41	0,42	90	0,25	45

Tabela 6.1 – Variação do Índice de Anisotropia com os valores de tenacidade máximo e mínimo para cada estágio de alteração.

O índice de anisotropia corresponde à relação entre o maior e o menor valor da tenacidade obtidos nos testes. Esperava-se que a anisotropia diminuísse com o aumento da alteração, porém, como é visto na figura 6.3 e na tabela 6.1 acima, essa relação não ocorreu. A razão desse resultado inesperado foi o grande coeficiente de variação registrado para os resultados de tenacidade dos corpos de prova perpendiculares do estágio I (figura 6.4).

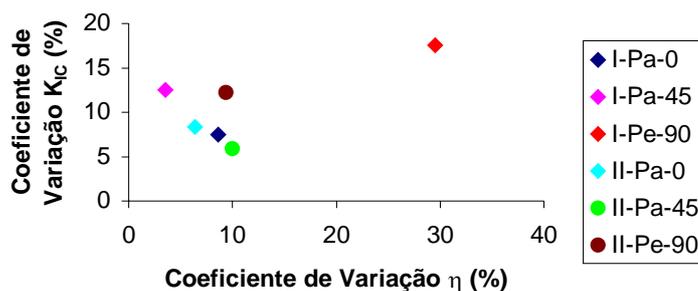


Figura 6.4 – Correlação dos coeficientes de variação dos valores de tenacidade (K_{IC}) e porosidade (η).

7 – Conclusões

O objetivo do presente trabalho foi verificar se a ação do intemperismo nos maciços rochosos é de fato um agente causador da redução da tenacidade. Tais maciços, na grande maioria dos casos, possuem fraturas persistentes e não persistentes. A redução da tenacidade resulta na propagação das fraturas não-persistentes, podendo causar a queda de blocos.

Observou-se que, de fato, a tenacidade se reduz com o intemperismo, como está representado na figura 6.2. Não é verificada uma tendência na variação do índice de anisotropia com o aumento da alteração. O mesmo acontece na figura 6.3, onde não é possível reconhecer uma tendência da dispersão dos valores de tenacidade com a dispersão da porosidade.

A partir da análise desses resultados, é correto afirmar que realmente o aumento do intemperismo pode ser considerado um mecanismo de redução da tenacidade para o gnaisse facoidal estudado, constituintes assim num mecanismo pré-ruptura de maciços rochosos.

8 – Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, L.C.R.; Estudo experimental da anisotropia de resistência de rochas graníticas e sua aplicação a processos de desmontes. Rio de Janeiro. **Dissertação de Mestrado**, Dep. de Geologia, IGEO/UFRJ, 116 p. 1999.
- ATKINSON, B.K.; **Fracture Mechanics of Rock**, Academic Press Geology Series, London, 1987. 534 p. 1987.
- AZEVEDO, I.C.D. & MARQUES, E.A.G.; **Introdução à Mecânica das Rochas**, Editora UFV, Viçosa. 363p. 2002.
- BARROSO, E.V.; Estudo das características geológicas e do comportamento geotécnico de um perfil de intemperismo em leptinito no Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. **Dissertação de Mestrado**, Dep. de Geologia, IGEO/UFRJ, 251 p. 1993.
- BEARMAN, R.A.; The use of the point load test for the rapid estimation of Mode I fracture toughness, **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.** **36**. Pergamon Press. p. 257-263. 1999.
- BROWN, E.T.; ISRM Suggested Methods; **Rock characterization, testing and monitoring**; London, Pergamon Press. 211p. 1981.
- CESERO, P.; MAURO, L.M. & DE ROS, L.F.; Técnica de preparação de lâminas petrográficas e molde de poros na Petrobrás. B.Geoc. Petrobrás, n.3, pp: 105-116. 1989.
- CRUZ, A. C.; Alcance dos blocos rochosos deslocados de encostas naturais e taludes escavados no Município do Rio de Janeiro (RJ): Base para futura modelagem geométrica. **Monografia**, UFRJ, 2002.
- DONOVAN, J.G. & KARFAKIS, M.G.; Adaptation of a simple wedge test for the rapid determination of mode I fracture toughness and the assessment of relative fracture resistance, **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, Article in Press, www.sciencedirect.com. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 2004.
- GUO, H., AZIZ, N.I. & SCHMIDT, L.C.; Rock fracture-toughness determination by the Brazilian test, **Eng. Geol.**, **33**: 177-188. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 1993.
- IPP (Instituto Pereira Passos). Secretaria Municipal de Urbanismo do Rio de Janeiro. Endereço eletrônico - <http://portalgeo.rio.rj.gov.br/>. Plantas Digitais 1:10000, distribuídas por **Folhas de Aerolevanteamento de 1999**.

- ISRM; Suggested methods for determining Mode I fracture toughness using cracked chevron notched brazilian disc (CCNBD) specimens, **Int. J. Rock Mech. Min. Sci.**, **32**: 57-64. 1995.
- MARQUES, E.A.G.; Caracterização geomecânica de um perfil de intemperismo em Kinzigito. Rio de Janeiro. **Tese de Doutorado**, Dep. de Geologia, IGEO/UFRJ, 271 p. 1998.
- MENEZES FILHO, A.P.; Aspectos geológico-geotécnicos de um perfil de alteração de gnaiss facoidal. Rio de Janeiro. **Dissertação de Mestrado**. DEC/PUC-RJ. 229 p. 1993.
- PEHOVAZ-ALVAREZ, H.I. & BORTOLUCCI, A.A.; Análises sobre os Ensaios para determinação da tenacidade à fratura no Modo I em Rochas, Rio de Janeiro. **Geo-Jovem**. 2004.
- PORTO JR, R.; Petrogênese das Rochas do Maciço da Pedra Branca, Rio de Janeiro, RJ. **Tese de Doutorado**, Departamento de Geologia, IGEO/UFRJ, 231 p. 2004.
- RAHN, P.H.; **Engineering Geology: An Environmental Approach**, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 589p. 1986.
- VARGAS Jr, E.; CASTRO, J.T.; AMARAL, C. & FIGUEIREDO, R.P.; On mechanisms for failures of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brazil: thermal fatigue?, **Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides, 2**; Landslides: Evaluation & Stabilization, Ed. Balkema, p. 1007-1011. 2004.
- WHITTAKER, B.N.; SINGH, R.N. & SUN, G.; **Rock Fracture Mechanics Principles**, Design and Applications, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, 1992. 570p. 1992.

ANEXO I

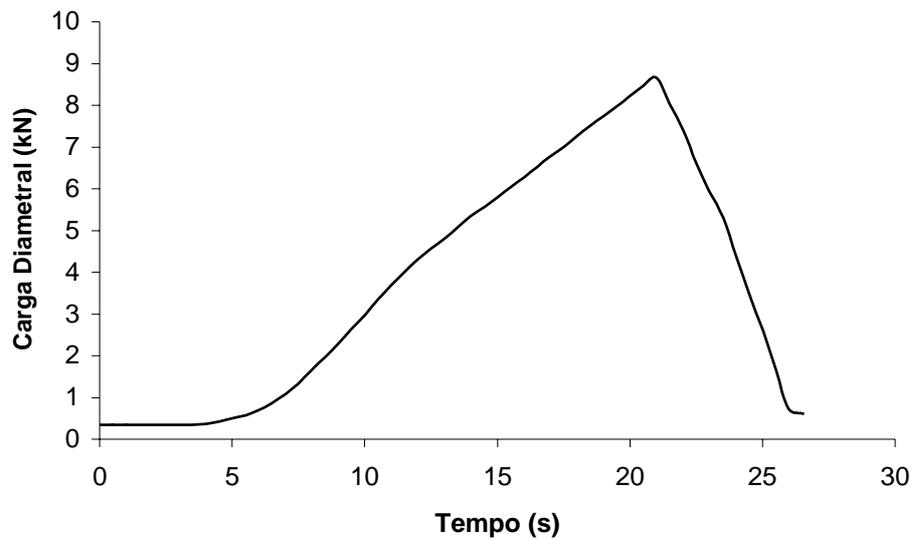


Figura A-1 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-1-Pa.

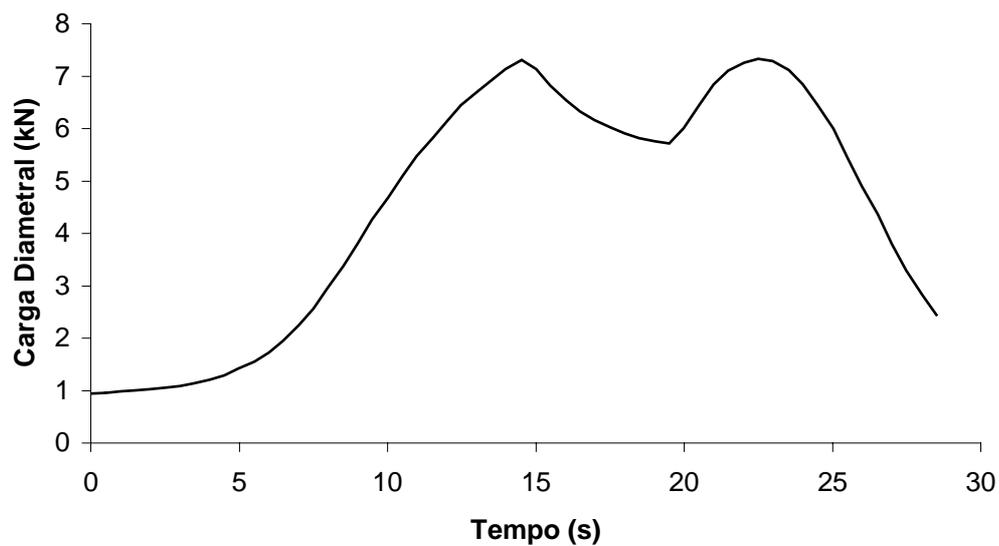


Figura A-2 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-1-Pe.

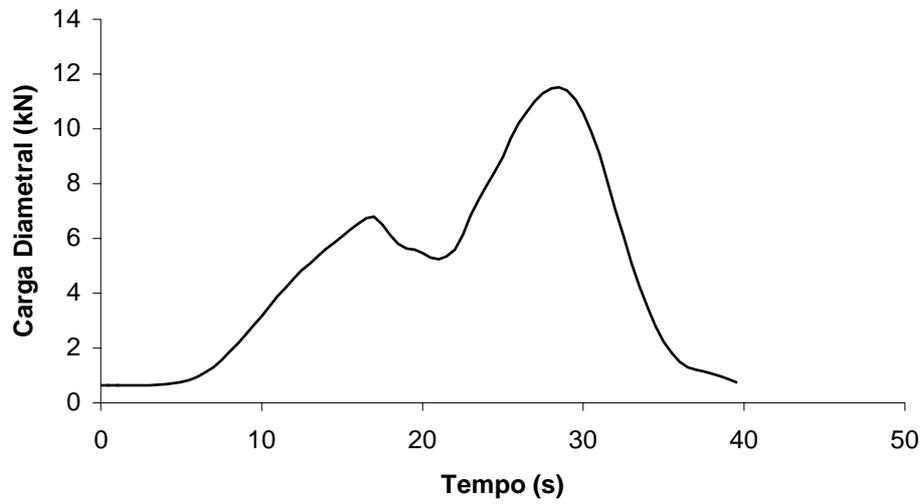


Figura A-3 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-2-Pa.

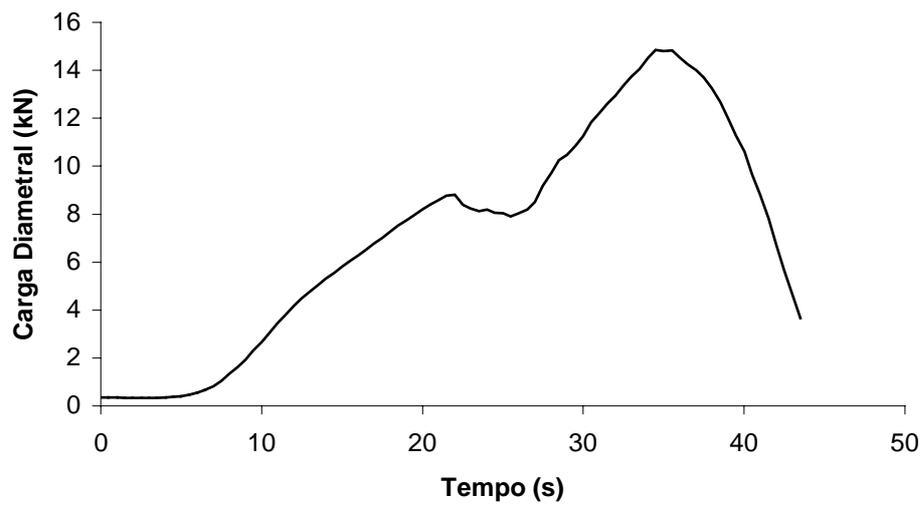


Figura A-4 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-2-Pe.

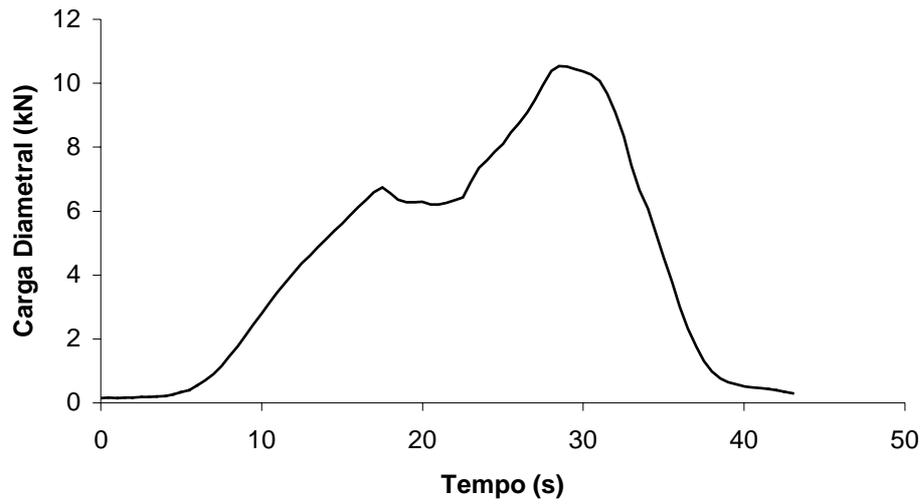


Figura A-5 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-3-Pa.

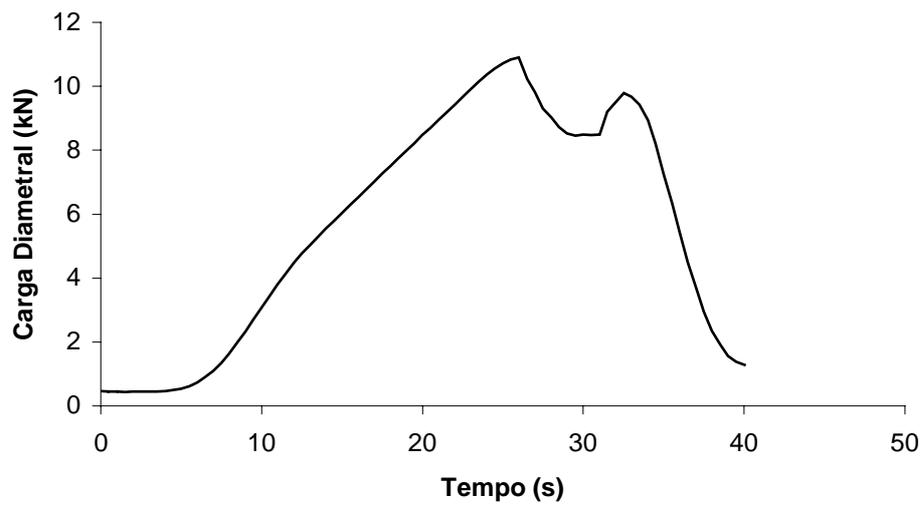


Figura A-6 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-3-Pe.

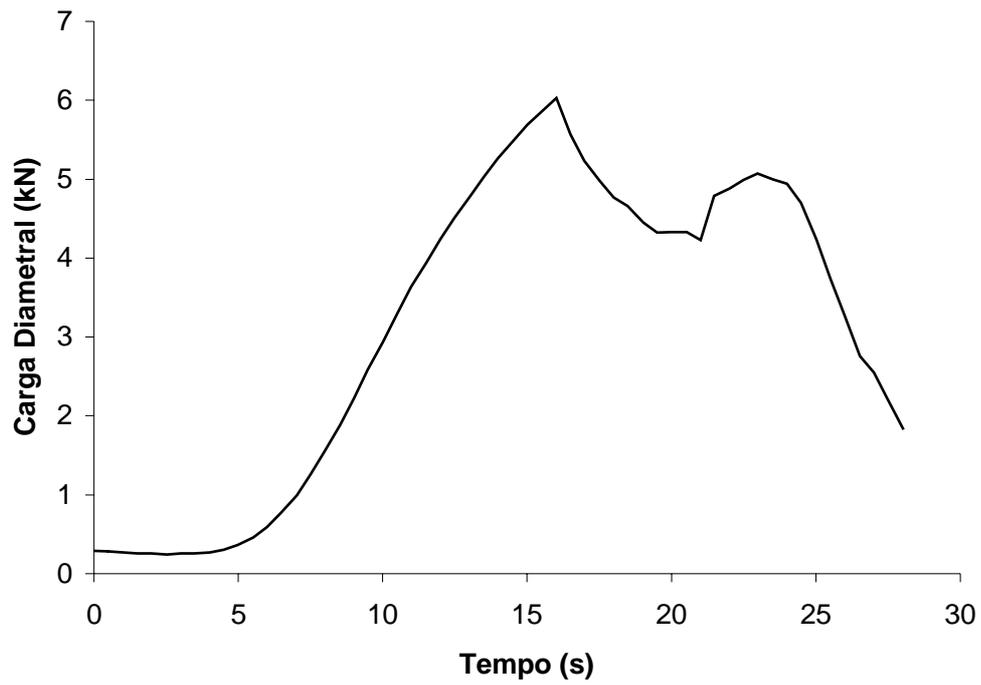


Figura A-7 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-4-Pa.

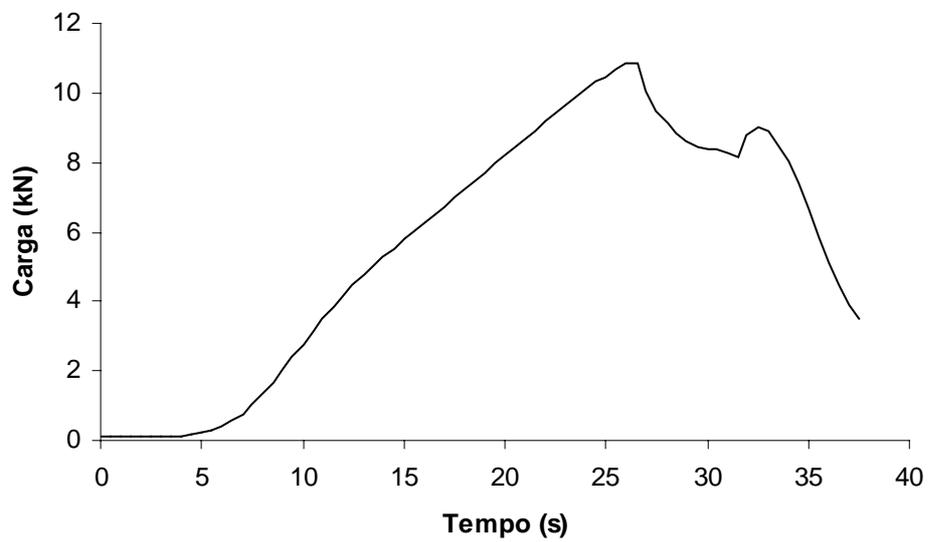


Figura A-8 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-4-Pe.

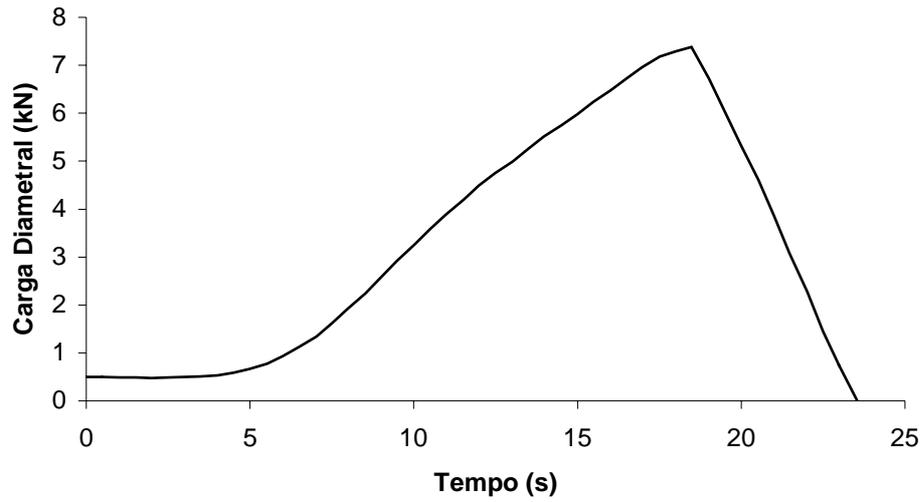


Figura A-9 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-5-Pa.

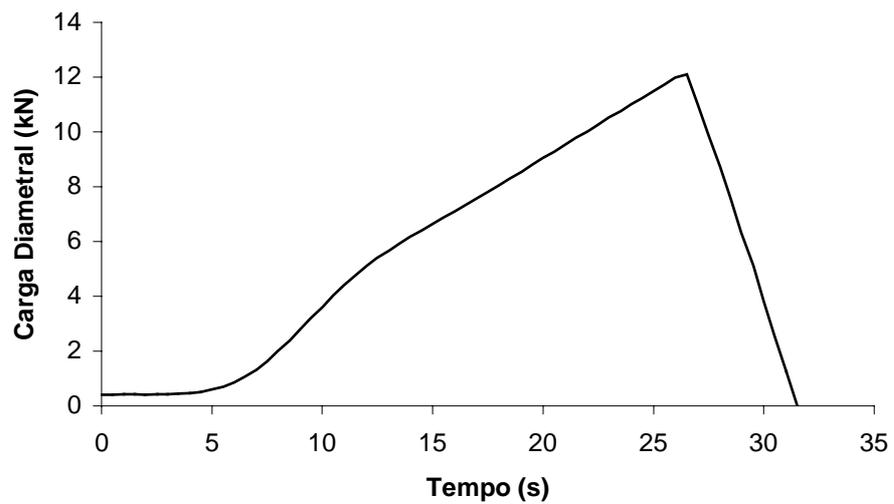


Figura A-10 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-5-Pe.

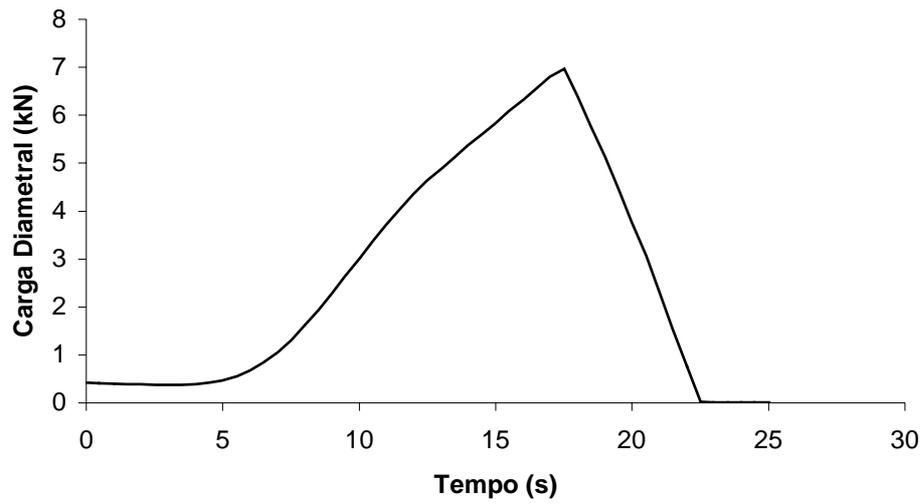


Figura A-11 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-6-Pa.

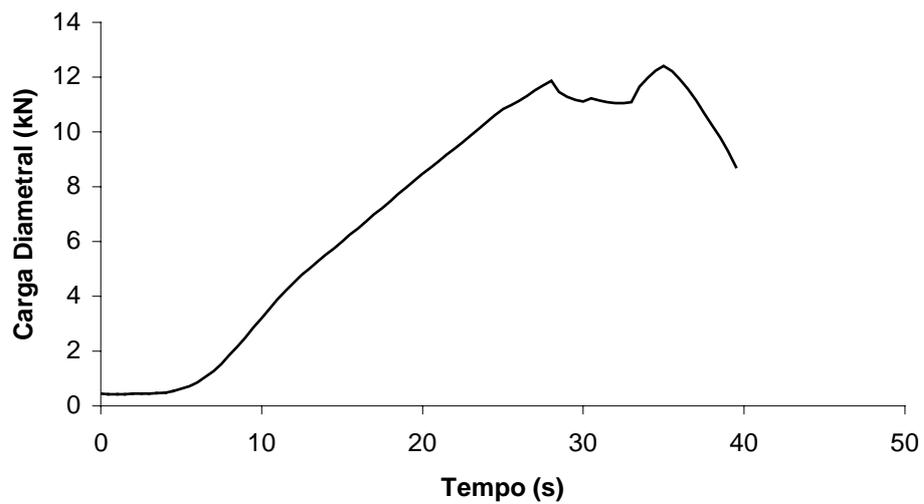


Figura A-12 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-6-Pe.

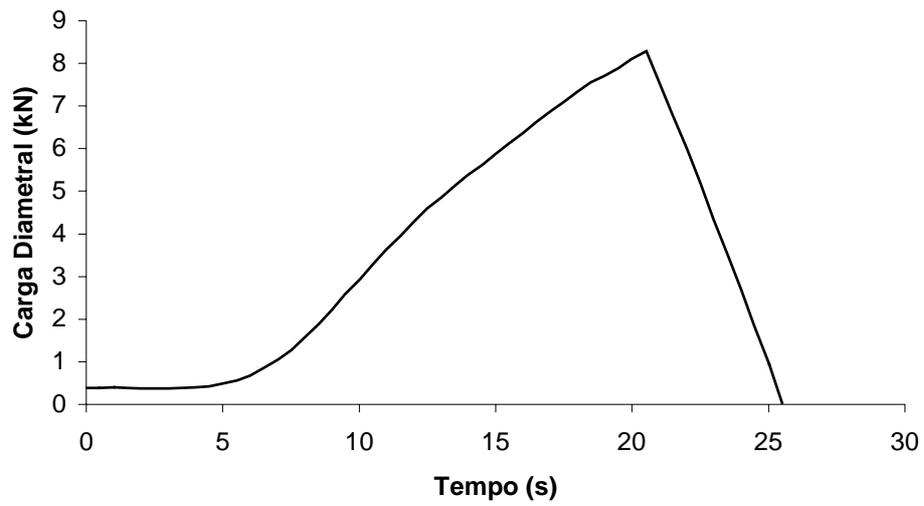


Figura A-13 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-7-Pe.

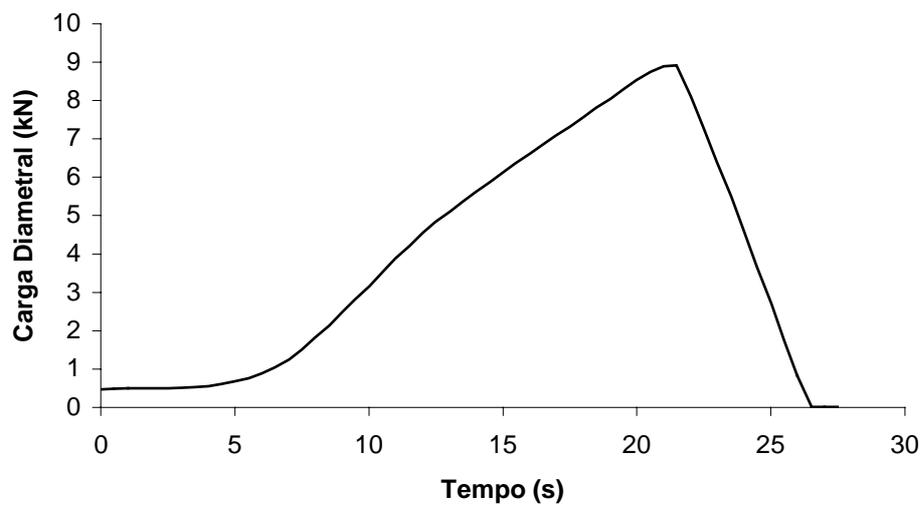


Figura A-14 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-8-Pe.

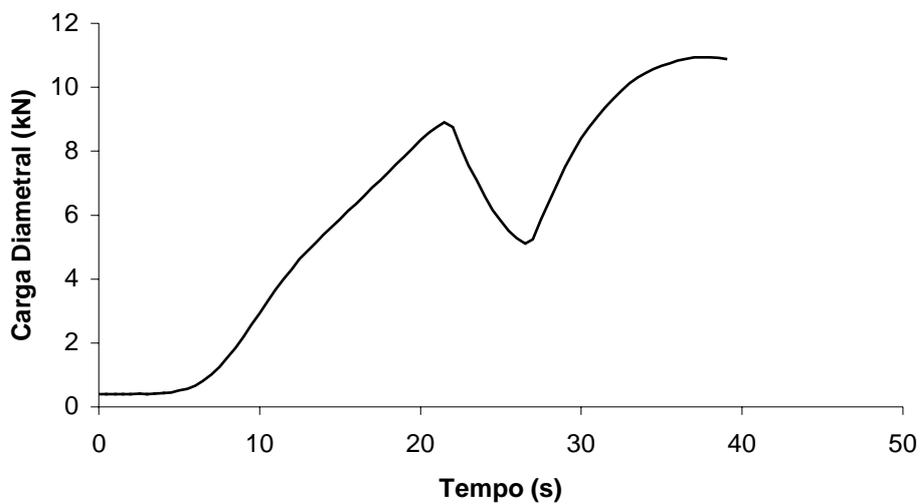


Figura A-15 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra I-9-Pe.

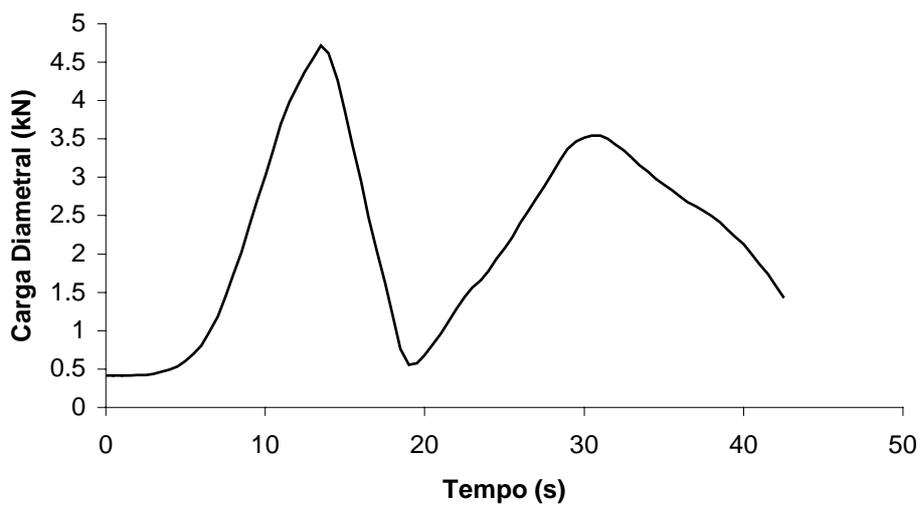


Figura A-16 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-1-Pe.

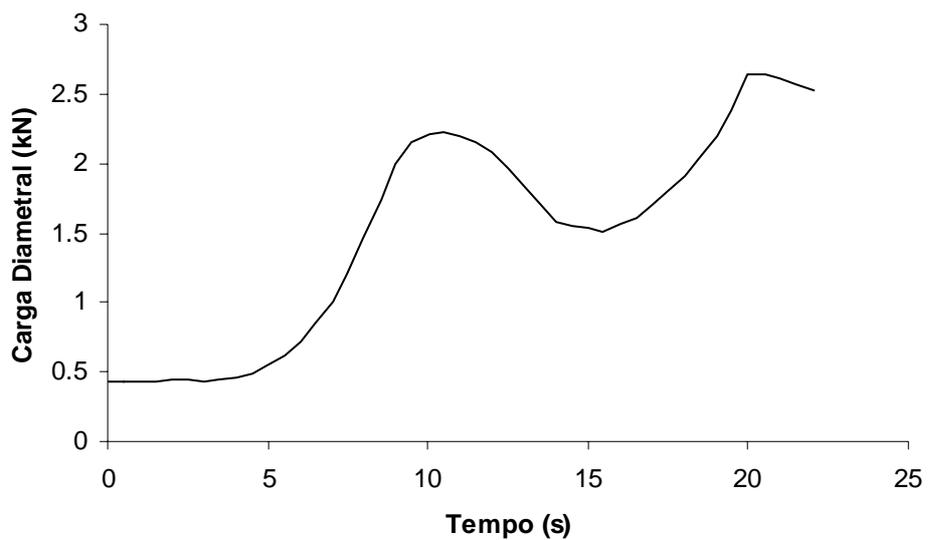


Figura A-17 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-2-Pa.

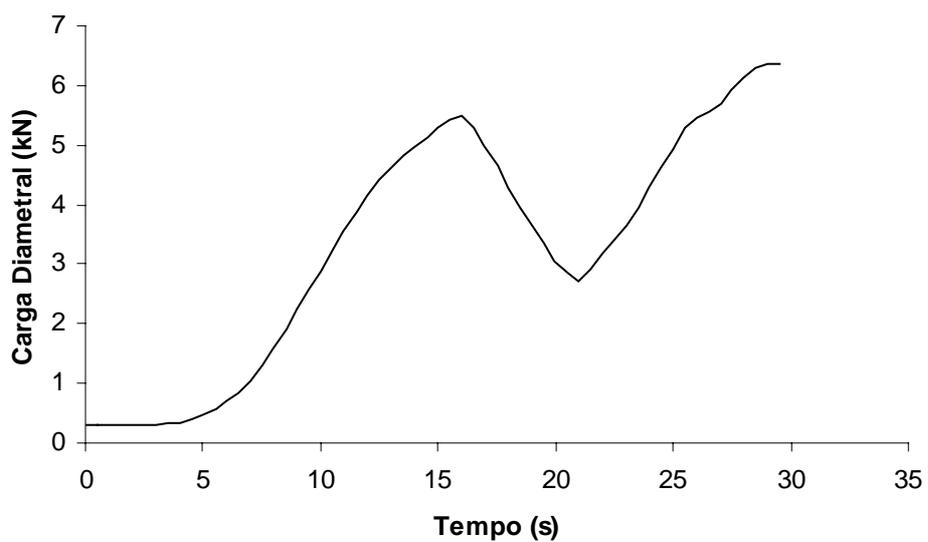


Figura A-18 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-2-Pe.

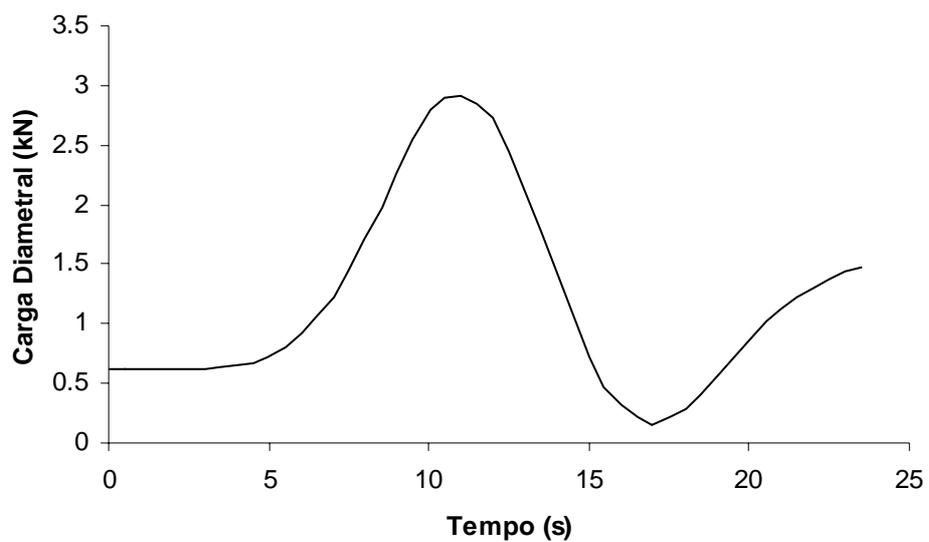


Figura A-19 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-3-Pa.

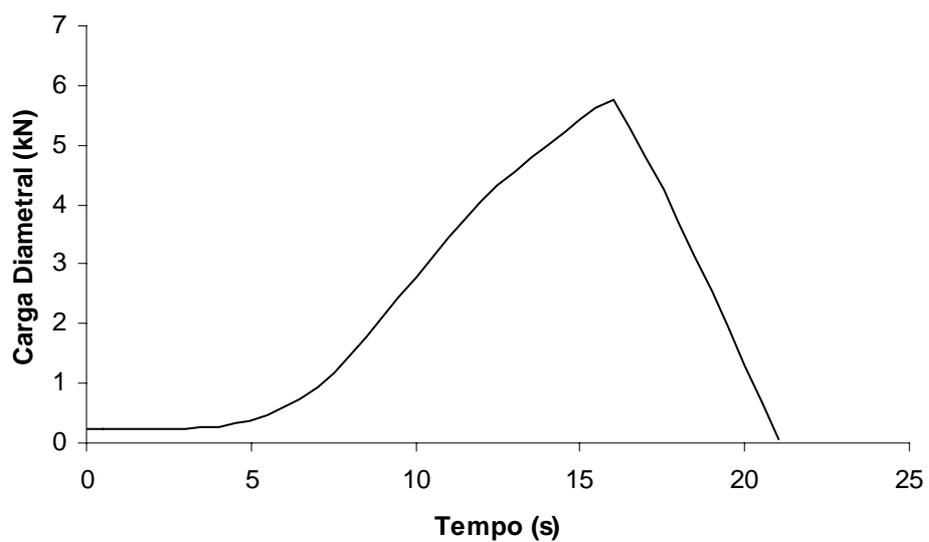


Figura A-20 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-3-Pe.

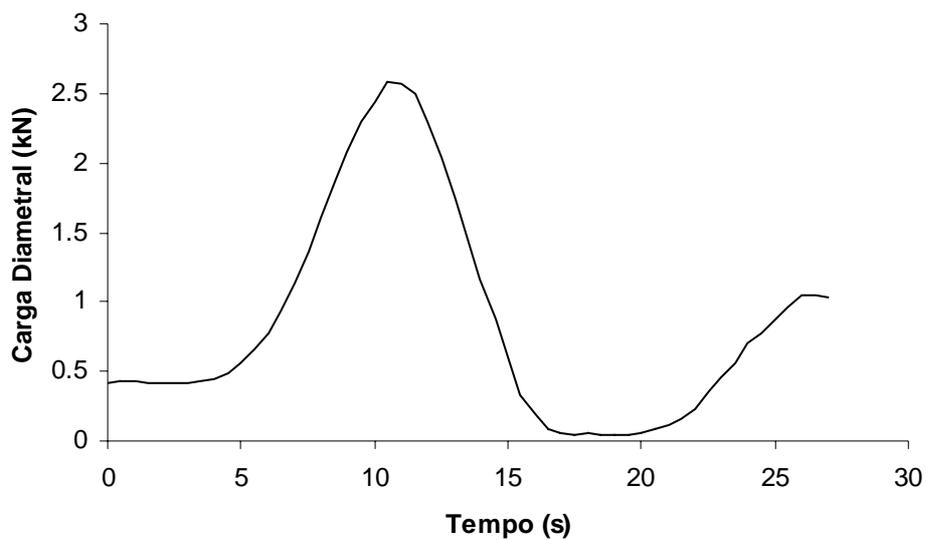


Figura A-21 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-4-Pa.

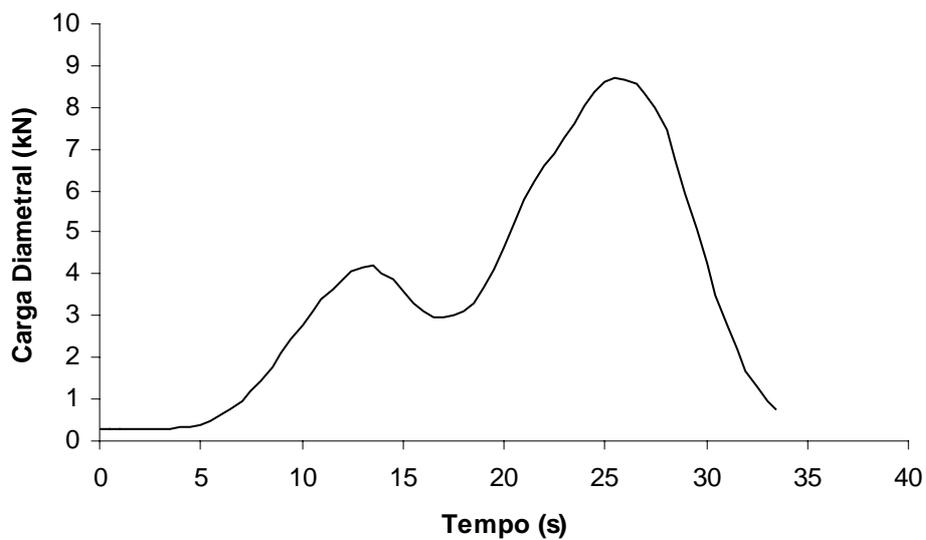


Figura A-22 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-4-Pe.

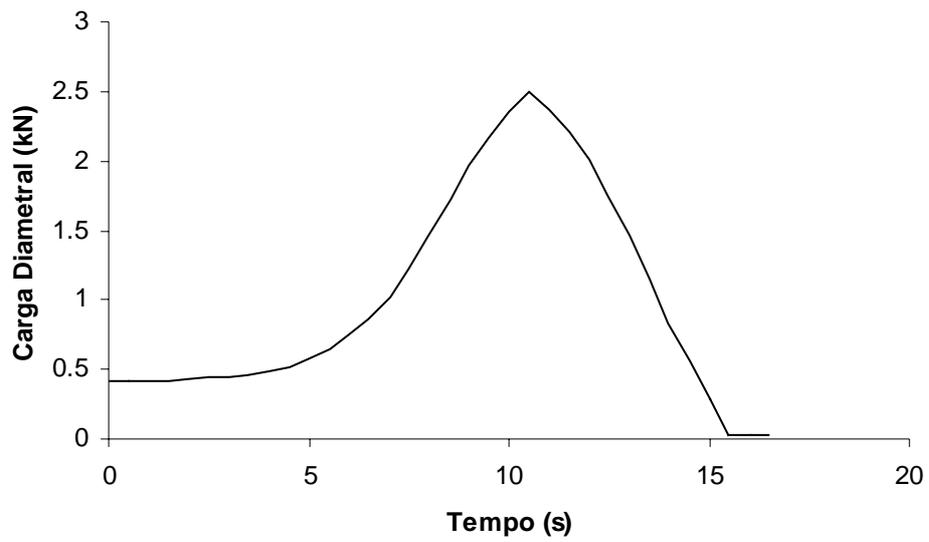


Figura A-23 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-5-Pa.

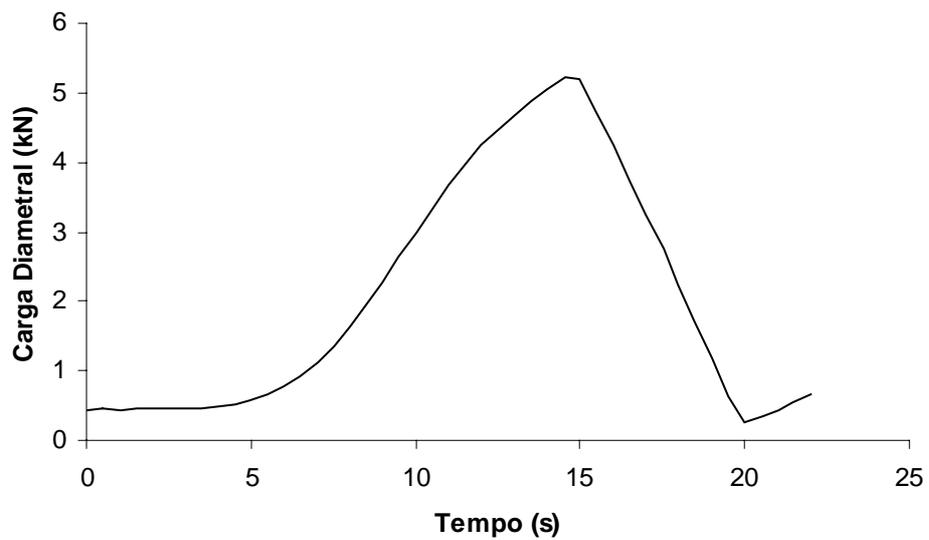


Figura A-24 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-5-Pe.

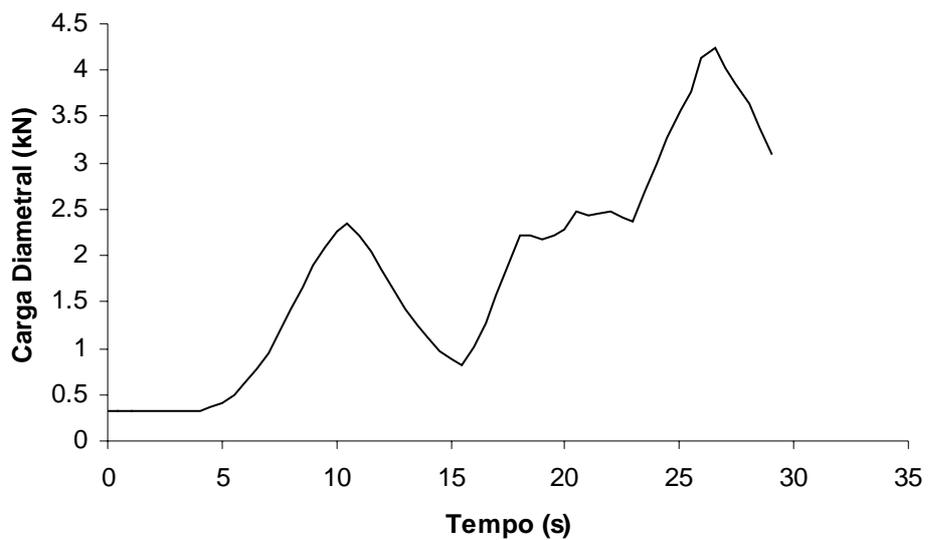


Figura A-25 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-6-Pa.

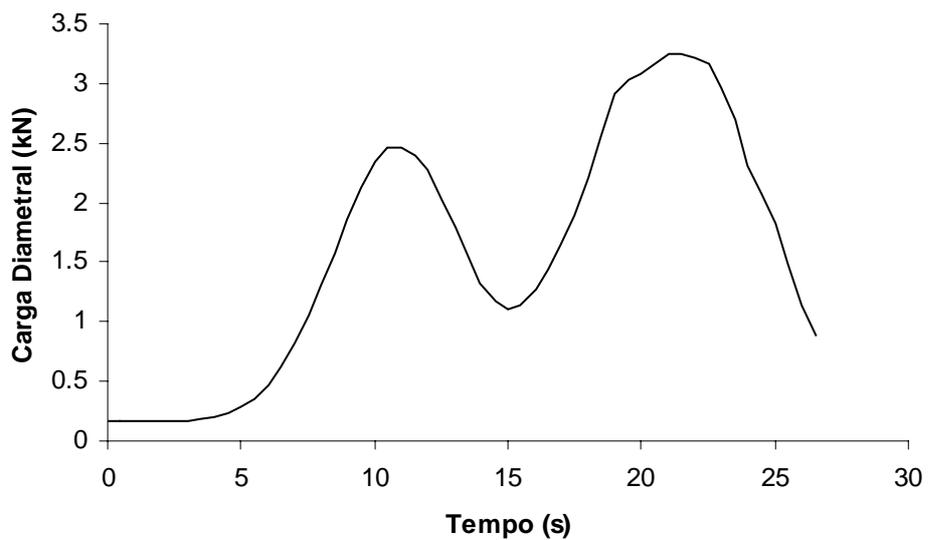


Figura A-26 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra II-7-Pa.

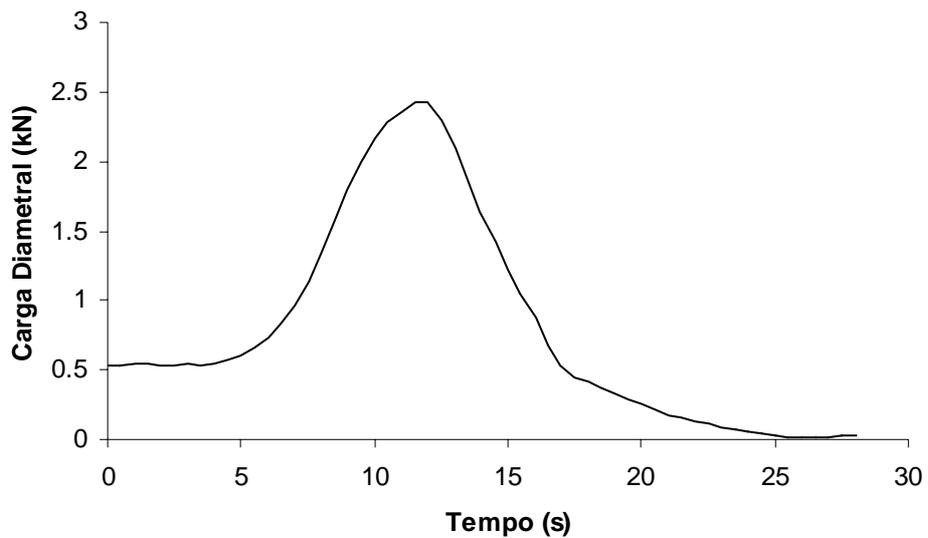


Figura A-27 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra III-1-Pa.

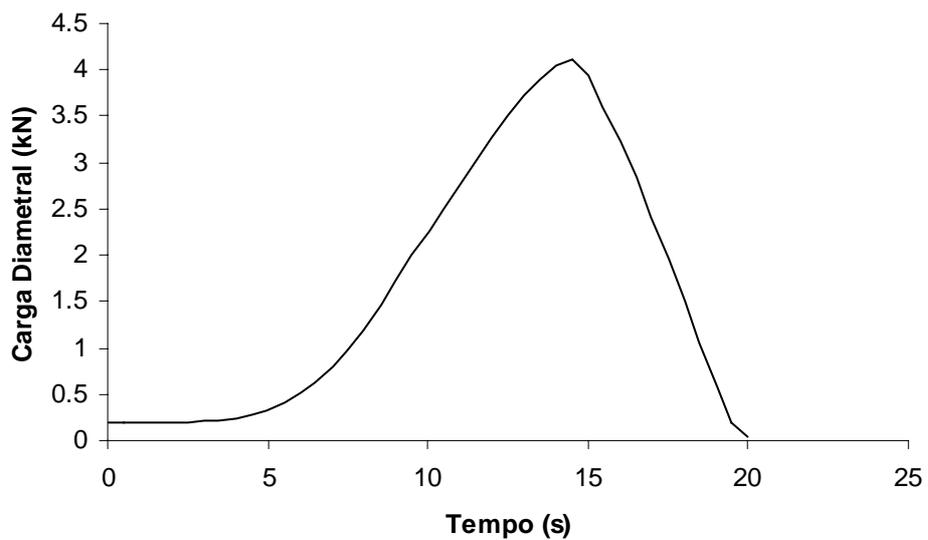


Figura A-28 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra III-1-Pe.

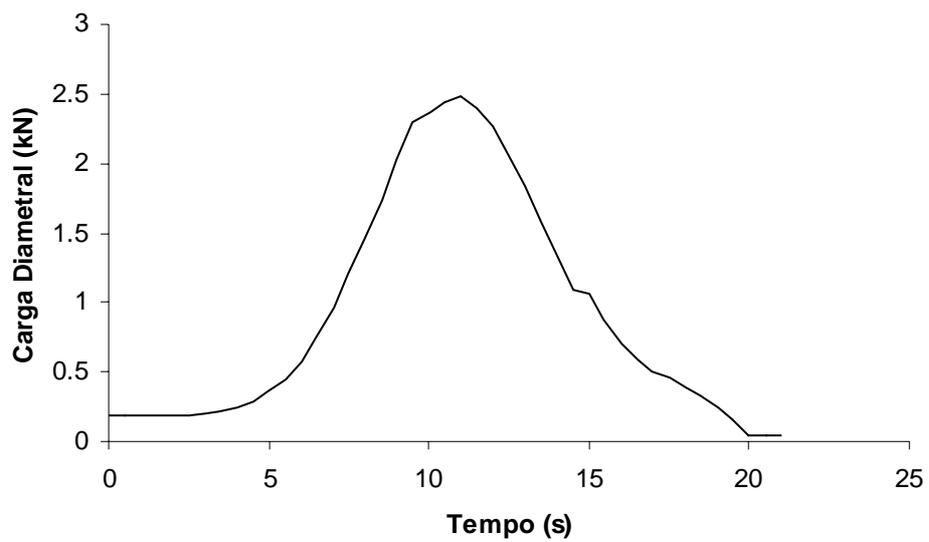


Figura A-29 – Resultado do ensaio de tenacidade, amostra III-2-Pa.

ANEXO II

Estágio de Alteração	ID. C.P.	ângulo(°)	B(mm)	D(mm)	η apar (%)	Fr (kN)	Kic (MN/m ^{1,5})	Kic médio		Desv.Pad.	Coef. Var.(%)
I	I-1-Pa	45	30.15	75.19	0.965063	8.666	0.880503	0.669102	Pa 0 graus	0.050275	7.513731
	I-1-Pe*	90	30.44	75.12	1.742186	7.307	0.735692				
	I-2-Pa	45	30.07	75.17	1.033398	6.789	0.691719	0.773985	Pa 45 graus	0.0967	12.49378
	I-2-Pe	90	30.15	75.07	0.943679	8.804	0.895239				
	I-3-Pa	0	30.05	75.15	0.982009	6.741	0.687376	0.993657	Pe 90 graus	0.174549	17.56632
	I-3-Pe	90	30.09	75.05	0.89955	10.901	1.110831				
	I-4-Pa	0	30.15	75.22	1.017355	6.027	0.612247				
	I-4-Pe*	90	30.14	75.13	0.74224	10.861	1.104331				
	I-5-Pa	45	30.14	75.22	0.98699	7.378	0.749735				
	I-5-Pe	90	30.16	75.07	0.69846	12.103	1.230291				
	I-6-Pa	0	30.21	75.04	1.154077	6.972	0.707684				
	I-6-Pe	90	30.04	75.1	0.98341	11.872	1.211388				
	I-7-Pe	90	30.22	74.84	1.098157	8.292	0.842514				
	I-8-Pe	90	30.09	74.84	1.048186	8.915	0.909728				
	I-9-Pe	90	30.3	74.86	1.121059	8.911	0.902897				
II	II-1-Pe*	90	30.04	75.22	2.834493	4.719	0.48113	0.269643	Pa 0 graus	0.022541	8.359391
	II-2-Pa*	45	30.1	75.09	2.700263	2.231	0.227207				
	II-2-Pe	90	30.17	74.94	2.395974	5.495	0.558875	0.240781	Pa 45 graus	0.014126	5.866698
	II-3-Pa	0	30.25	75.08	2.535148	2.907	0.294603				
	II-3-Pe	90	30.22	74.93	2.812547	5.754	0.584288	0.516429	Pe 90 graus	0.063024	12.20388
	II-4-Pa*	0	30.16	74.74	2.872911	2.587	0.263553				
	II-4-Pe	90	30.15	74.97	2.752915	4.195	0.426855				
	II-5-Pa	45	30.09	74.91	3.240426	2.504	0.2554				
	II-5-Pe*	90	30.12	74.99	3.128761	5.214	0.530999				
	II-6-Pa*	45	30.14	74.89	2.785116	2.354	0.239735				
II-7-Pa*	0	30.18	74.85	2.656475	2.465	0.250773					
III	III-1-Pa*	45	30.28	74.82	5.629416	2.432	0.246648				
	III-1-Pe*	90	30.14	75.08	4.046547	4.122	0.419259				
	III-2-Pa	0	30.13	74.85	4.752895	2.483	0.253024				