

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

"Propriedades mecânicas da rocha intacta na mineração de ferro"

Autor: Jacqueline Andrade Nogueira
Orientador: Maria de Fátima Andrade Gripp

Fevereiro/2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Jacqueline Andrade Nogueira

**PROPRIEDADES MECÂNICAS DA ROCHA INTACTA NA MINERAÇÃO DE
FERRO**

**Dissertação de mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais**

Área de concentração: Tecnologia Mineral
Orientador: Profa. Maria de Fátima Andrade Gripp

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2000

Folha de Aprovação

Aos meus pais, irmãos, meu
marido Dulcino e meus
filhos André e Sara

AGRADECIMENTOS

Este projeto de pesquisa se tornou viável com a implementação do projeto: “Estudos geomecânicos no planejamento e projeto de minas a céu aberto”, financiado pela FAPEMIG e com o apoio de algumas empresas de mineração, em especial MBR, Minerações Brasileiras Reunidas. Agradecemos a FAPEMIG e MBR.

Agradeço ao senhor Renê Viel, geólogo da MBR, pela colaboração e gentileza no atendimento e seleção das amostras.

Agradeço pela colaboração da amiga Cláudia Aparecida Nonato, engenheira geóloga e doutora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas.

Agradeço a minha orientadora Professora Maria de Fátima Andrade Gripp pela dedicação.

Agradeço a minha família pela colaboração durante esses anos e especialmente ao meu marido Dulcino Frontino Nogueira e meu filho André Andrade Frontino Nogueira pela paciência.

Também agradeço a todos aqueles que colaboraram comigo indiretamente pela compreensão.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 – Introdução	4
3.2 – Caracterização geomecânica do maciço rochoso	5
3.3 – Relação entre a resistência a compressão uniaxial e as classes de alteração	7
3.4 – Testes de laboratório para determinação das características das rochas.....	13
3.5 – Determinação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta.....	15
3.5.1 - Análise e interpretação do ensaio de ruptura em compressão uniaxial	18
3.6 – Ensaio indireto para determinação da resistência a tração.....	20
3.7 – Medida da velocidade do som	22
3.7.1 - Mecanismo experimental.....	22
3.7.2 - Interpretação	22
3.8 – Perfil de rugosidade	25
4. METODOLOGIA DE TRABALHO	27
4.1 – Obtenção e seleção do material para realização de testes	27
4.2 – Preparação de amostras	27
4.2.1 – Preparação das amostras para o ensaio de compressão uniaxial	27
4.2.2 – Preparação das amostras para o ensaio de tração	28
4.3 – Realização do programa de ensaios e testes	28
4.3.1 – Determinação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta	28
4.3.2 – Determinação da resistência à tração	29
4.4 – Medidas da velocidade do som	29
4.5 – Determinação do perfil de rugosidade	29
4.6 – Construção de histogramas.....	29
4.7 – Determinação do peso específico das amostras.....	30
4.8 – Análise dos resultados e conclusões.....	30

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1 – Introdução	31
5.2 – Obtenção de amostras.	33
5.3 – Itabirito dolomítico	42
5.4 – Quartzo-xisto	56
5.5 – Quartzito.....	67
5.6 – Filito sericítico	81
5.7 – Quartzo-filito	91
5.8 - Medidas da velocidade do som	96
5.9 – Comentários finais.	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – fator de redução da resistência a compressão uniaxial determinado com base na descrição do estado de alteração e na coerência, Stacey e Page (1986)	11
Figura 3.2 – Fator de redução da resistência à compressão uniaxial determinado com base na descrição do estado de alteração, de acordo com Vaz (1996).	12
Figura 3.3 - Ensaio de compressão uniaxial	19
Figura 3.4 - Esquema representativo de ensaio brasileiro: (a) colocação do corpo de prova; (b) tensões σ_{xx} e σ_{yy} ao longo do plano AA'; (c) ensaio de tração indireto com distribuição de carga.	21
Figura 3.5 - Perfil de rugosidade da descontinuidade, de acordo com Barton e Choubey (1977).....	26
Figura 5.3.1 - Ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico (foto).	43
Figura 5.3.2 - Histograma dos valores de tensão para o ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico, furo de sonda 03 (1984).....	43
Figura 5.3.3 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico.	44
Figura 5.3.4 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico.	45
Figura 5.3.5 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico.	47
Figura 5.3.6 - Histograma do módulo de elasticidade. Itabirito dolomítico, furo de sonda 03 (1984).....	48
Figura 5.3.7 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Itabirito dolomítico, furo de sonda 03 (1984).....	48
Figura 5.3.8 - Foto de amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial (rompeu por cisalhamento).	50
Figura 5.3.9 - Foto de amostra submetida a ensaio brasileiro. Itabirito dolomítico.	50
Figura 5.3.10 - Histograma dos valores de resistência a ruptura obtidos no ensaio brasileiro, Itabirito dolomítico. a) Furo de sonda 03 (1984) 22 ensaios. b) Furo de sonda 09 (1985) 10 ensaios	51
Figura 5.3.11 - Perfil da superfície de ruptura de amostra submetida a ensaio brasileiro.	

Itabirito dolomítico.	51
Figura 5.4.1 - Foto de três amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito.	57
Figura 5.4.2 - Ensaio de compressão uniaxial. Quartzito (foto).	57
Figura 5.4.3 - Ensaio de compressão uniaxial. Quartzito (foto).	57
Figura 5.4.5 - Histograma do módulo de elasticidade. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).	58
Figura 5.4.6 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).	58
Figura 5.4.7 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito.	59
Figura 5.4.8 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito.	60
Figura 5.4.9 - Ensaio brasileiro para o quartzito 1, 2 e 3 (foto).	62
Figura 5.4.10 - Histograma dos valores de resistência a ruptura obtidos em ensaio brasileiro para o quartzito 3, furo de sonda 02 (1982).	62
Figura 5.4.11 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio brasileiro. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).	63
Figura 5.5.1 - Foto de duas amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).	69
Figura 5.5.2 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).	69
Figura 5.5.3 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).	71
Figura 5.5.4 - Ensaio brasileiro. Quartzito, furo de sonda 02 (1982). Foto.	72
Figura 5.5.5 - Histograma dos valores de resistência à ruptura obtidos em ensaio brasileiro. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).	72
Figura 5.5.6 - Foto de amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).	73
Figura 5.5.7 - Foto de amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).	73
Figura 5.5.8 - Histograma dos valores de resistência à ruptura obtida em ensaio de	

compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).	73
Figura 5.5.9 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).	74
Figura 5.5.10 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).	75
Figura 5.5.11 - Histograma dos valores de resistência a ruptura obtidos em ensaio brasileiro. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).	76
Figura 5.5.12 – Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio brasileiro. Quartzito.	76
Figura 5.6.1 - Ensaio de compressão uniaxial. Filito sericítico (foto).	83
Figura 5.6.4 - Foto de amostra submetida a ensaio brasileiro. Filito sericítico, furo de sonda 02 (1982).	83
Figura 5.6.2 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Filito sericítico.	84
Figura 5.6.3 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Filito sericítico.	85
Figura 5.6.5 - Foto de amostra submetida a ensaio brasileiro. Filito sericítico, furo de sonda 03 (1982).	86
Figura 5.6.6 - Histograma dos valores de resistência à ruptura obtida em ensaio brasileiro. Filito sericítico, furo de sonda 03 (1982).	86
Figura 5.6.7 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio brasileiro. Filito sericítico.	86
Figura 5.7.1. Ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-filito. Foto	92
Figura 5.7.2. Ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-filito. Foto	92
Figura 5.7.4. Perfil da superfície de ruptura de amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-filito.	92
Figura 5.7.3. Curva tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-filito.	93
Figura 5.8.1 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Itabirito dolomítico, direção do comprimento.	101
Figura 5.8.2 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Itabirito dolomítico, direção da largura.	101

Figura 5.8.3 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Itabirito dolomítico, direção do comprimento e da largura.	101
Figura 5.8.4 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Quartzito-xisto, direção do comprimento.	102
Figura 5.8.5 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Quartzito, direção do comprimento.	102
Figura 5.8.6 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Filito sericítico, direção do comprimento.	102
Figura 5.8.7 - Velocidade da onda longitudinal na direção do comprimento x velocidade da onda longitudinal na direção da largura. Itabirito dolomítico.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1 – Caracterização das descontinuidades com base na escala de observação (Duncan & Goodman, 1968). In: Giani, G.P. (1992)	8
Tabela III.2 - Metodologia adaptada pela Cia. Vale do Rio Doce para a avaliação do grau de alteração das rochas. In: Manual Técnico - Mina do Cauê - Taludes em Rocha, [197-]	9
Tabela III.3 – Graus de coerência (Guidicini et al., 1972)	9
Tabela III.4 – Categoria de testes em rochas (Brown, 1981). In: Farmer, I (1983)	14
Tabela III.5 - Classificação das rochas com base na resistência à compressão uniaxial (de acordo com Attewell e Farmer 1976). In: Farmer, I (1983)	17
Tabela III.6 - Resistência Típica das Rochas (MN/m ²). In: Farmer, I (1983)	17
Tabela III.7 - Velocidade média de propagação das ondas em algumas rochas e minerais	24
Tabela V.1- Faixa de variação dos valores obtidos em teste de laboratório para o ensaio de compressão uniaxial para cada litologia.	32
Tabela V.2 - Faixa de variação dos valores obtidos em teste de laboratório para o ensaio de Tração para cada litologia	32
Tabela V.3 – Ensaio de Compressão Uniaxial	35
Tabela V.4 – Ensaio de Compressão Uniaxial	36
Tabela V.5 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 03 - 1984	37
Tabela V.6 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 09 - 1985	38
Tabela V.7 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 02 - 1982	39
Tabela V.8 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 03 - 1982	40
Tabela V.9 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 02 - 1985	40
Tabela V.10 - Densidade das amostras.	41
Tabela V.14 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o itabirito dolomítico, referente ao furo de sonda 09 de 1985.	52
Tabela V.15 - Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o itabirito dolomítico, referente ao furo de sonda 09 de 1985.	53
Tabela V.16 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o itabirito dolomítico, referente ao furo de sonda 03 de 1984.	54
Tabela V.17 - Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o itabirito dolomítico,	

referente ao furo de sonda 03 de 1984.....	55
Tabela V.18 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-xisto, referente ao furo de sonda 02 de 1982.....	64
Tabela V.19 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-xisto, referente ao furo de sonda 02 de 1982.....	64
Tabela V.20 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-xisto, referente ao furo de sonda 02 de 1982.....	65
Tabela V.21 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-xisto, referente ao furo de sonda 02 de 1982.....	66
Tabela V.22 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzito, referente ao furo de sonda 02 de 1982 e furo de sonda 02 de 1985.....	77
Tabela V.23 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzito, referente ao furo de sonda 02 de 1982.....	78
Tabela V.24 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzito, referente ao furo de sonda 02 de 1982 e furo de sonda 02 de 1985.....	79
Tabela V.25 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzito, referente ao furo de sonda 02 de 1985.....	80
Tabela V.26 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o filito sericítico, referente ao furo de sonda 03 de 1982 e furo de sonda 02 de 1985.....	87
Tabela V.27 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o filito sericítico, referente ao furo de sonda 03 de 1982.....	88
Tabela V.28 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o filito sericítico, referente ao furo de sonda 02 de 1985.....	89
Tabela V.29 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o filito sericítico, referente ao furo de sonda 02 de 1985.....	90
Tabela V.30 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-filito, referente ao furo de sonda 03 de 1982.....	94
Tabela V.31 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-filito, referente ao furo de sonda 03 de 1982.....	95
Tabela V.11 - Velocidade da onda sonora medida nas amostras de itabirito dolomítico	98
Tabela V.12 - Velocidade da onda sonora medida nas amostras de quartzo-xisto e quartzito.....	99

Tabela V.13 - Velocidade da onda sonora medida nas amostras de filito sericítico e quartzo-filito	100
---	-----

RESUMO

Esta dissertação apresenta os resultados do trabalho de pesquisa realizado para determinação das propriedades da rocha intacta. Foi realizada uma série de ensaios no laboratório de mecânica de rochas da escola de engenharia da UFMG nas seguintes litologias: quartzito, itabirito dolomítico, quartzo-xisto e filito sericítico. O conjunto de amostras utilizadas foi obtido no galpão de testemunhos de sondagem de uma empresa de mineração do Quadrilátero Ferrífero no estado de Minas Gerais. Inicialmente é apresentada uma revisão que inclui os procedimentos recomendados pela sociedade internacional de mecânica de rochas (ISRM), normas utilizadas para a realização de testes de ruptura em laboratório e para a medida de velocidade do som. A metodologia empregada no trabalho aborda os ensaios de compressão uniaxial e ensaios de tração. Os resultados são apresentados e comentados para cada tipo de litologia estudada e conclui-se que para um melhor conhecimento do comportamento geomecânico dos maciços estudados deve-se realizar um maior número de ensaios.

ABSTRACT

This dissertation presents the results of a study conducted for determination of properties of intact rock. It was performed a series of tests in the laboratory of rock mechanics of the engineering school of the Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) in the following lithologies: quartzite, itabirite dolomite, quartz-schist and phyllite sericitico. The set of samples used was obtained at the barn testimonials of polling for a mining company in the Quadrilátero Ferrífero in the state of Minas Gerais. Initially, it is presented a review that includes the procedures recommended by the international society for rock mechanics (ISRM), standards used for performing tests of rupture in the laboratory and for the measurement of sound velocity. The methodology employed in work deals with the uniaxial compressive strength test and the tensile strength test. The results are presented and discussed for each type of geologic material studied and it was concluded that for a better understanding of the behavior of masses geomechanical studied you must perform a greater number of tests.

1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação faz parte do conjunto de estudos geológico-geomecânicos¹ que vêm sendo realizados em Minas Gerais nesta década de 90. Os estudos geológico-geomecânicos vêm sendo realizados para se chegar a uma melhor compreensão do comportamento dos maciços rochosos e melhor equacionamento dos problemas de engenharia. O impacto dos estudos geológico-geomecânicos cresce quando consideramos a importância econômico-financeira e ambiental dos projetos de mineração. As características geológico-geomecânicas afetam todo projeto e operação de mina, em particular em termos de custo de operação, custos de capital e segurança; ou tem ainda grandes implicações ambientais, em particular na estabilidade de taludes e comprometimento das águas subterrâneas.

Os trabalhos relacionados à geomecânica e mais especificamente à estabilidade de taludes e encostas são essenciais no Estado de Minas Gerais, especialmente na região do Quadrilátero Ferrífero, onde a topografia é acidentada, o índice pluviométrico é muito alto em especial alguns dias durante a estação das chuvas, a atividade de mineração é intensa e a densidade demográfica é alta. No contexto das atividades de mineração, aspectos relevantes como a segurança dos operários e equipamentos, a operacionalidade e economicidade do processo de lavra dentre outros, estão diretamente relacionados à questão geomecânica.

A determinação das propriedades mecânicas da rocha intacta é fundamental em todo projeto de engenharia de rochas seja um projeto de engenharia de taludes, um projeto de escavação subterrânea, um projeto de escavação e movimentação de terra, um projeto objetivando um melhor desempenho das operações unitárias de lavra de minas. No entanto, o conhecimento das propriedades mecânicas da rocha intacta no Quadrilátero Ferrífero é ainda pequeno.

¹ Neste trabalho, utiliza-se o termo *geológico-geomecânico* por considerá-lo mais geral, na prática de geologia de engenharia, mecânica de solos e de rochas e engenharia de solos e de rochas. O termo geotecnia se refere em um número muito grande de casos a trabalhos relacionados a solos.

O parágrafo abaixo faz uma síntese da situação atual. Nonato(1997) após avaliação e análise de inúmeros documentos disponíveis em várias minas chegou às seguintes conclusões:

“Na mineração a céu aberto, comumente se utiliza o grau de alteração/coerência na avaliação das condições de resistência dos maciços. Esta prática é utilizada desde a década de 70, mas, apesar da facilidade de classificação das rochas, muitas empresas não a utilizam, nem qualquer uma das outras formas de se avaliar as características geomecânicas dos maciços. Normalmente, os furos de sonda são efetuados na fase de prospecção da jazida mineral, e os dados obtidos são considerados para o maciço rochoso durante longo tempo após a abertura da mina. Furos de sonda esparsos normalmente são realizados posteriormente mas, tanto na primeira fase de execução dos furos quanto algum tempo depois, geralmente não há preocupação (com raras exceções) de se avaliar os parâmetros geomecânicos a partir dos testemunhos obtidos. O RQD é algumas vezes determinado. Ensaios de laboratório são feitos esporadicamente. Entretanto, o número de amostras coletadas (cerca de 5 ou 6 para cada tipo de rocha) não é suficiente para se fazer considerações em toda a área abrangida pela mina. Ensaios “in situ” raramente são executados.”

O projeto de pesquisa desenvolvido e apresentado nesta dissertação é uma contribuição para um melhor conhecimento das propriedades da rocha intacta em de minério de ferro de Minas Gerais.

2. OBJETIVO

Este projeto de pesquisa tem como objetivo contribuir para enriquecer o acervo de informações a respeito das propriedades da rocha intacta das minas de ferro do Quadrilátero Ferrífero. Para atingir este objetivo um programa de ensaios é realizado.

As etapas do trabalho incluem:

- Realização de pesquisa bibliográfica.
- Seleção de um conjunto de amostras e separação para realização dos ensaios, preparação das amostras para ensaio. Realização de ensaios de compressão uniaxial e ensaio brasileiro e de medidas para determinação da velocidade das ondas sonoras.
- As dificuldades encontradas em cada etapa são relatadas e comentadas.
- Os resultados encontrados são apresentados e analisados.
- Conclusões relevantes são apresentadas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – Introdução

Neste capítulo é brevemente descrita a metodologia atual de caracterização geológico-geomecânica do maciço rochoso. É apresentada a abordagem utilizada na mineração para determinação do estado de alteração do maciço rochoso. É apresentada a metodologia de ensaio para determinação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta através de ensaios de laboratório, resistência à tração através do ensaio brasileiro e determinação da velocidade das ondas longitudinais.

Entende-se por maciço rochoso a porção da crosta terrestre que é relevante para a obra de engenharia. O volume envolvido é aquele escavado somado ao volume no qual o campo de tensões é modificado devido à obra de engenharia com implicações na estabilidade.

A prática de engenharia de rochas atual admite que o maciço rochoso seja formado por um conjunto de blocos separados por descontinuidades. O material que constitui os blocos, ou seja, constitui a matriz rochosa do maciço, é denominado “rocha intacta”. O termo rocha intacta não tem relação com o termo rocha sã, o qual está relacionado com o estado de alteração da matriz rochosa.

Descontinuidades são quaisquer superfícies que provoquem interrupções na continuidade do maciço rochoso. São identificados vários tipos de descontinuidades: diclases, falhas, superfícies de acamamento, superfícies de discordâncias, xistosidade, clivagem. As descontinuidades podem ocorrer de forma aleatória, mas em geral as descontinuidades formam famílias. Famílias são conjuntos de descontinuidades com atitudes subparalelas (direção e mergulho). Cada família apresenta características peculiares (espaçamento, abertura, rugosidade, preenchimento) que devem ser estudadas.

Ressaltamos que a metodologia atual de caracterização geológico-geomecânica do maciço rochoso inclui a determinação das propriedades da rocha intacta. O intervalo de

variação da resistência à compressão uniaxial da matriz rochosa é determinado inicialmente no campo.

3.2 – Caracterização geomecânica do maciço rochoso

A metodologia básica de trabalho para realização de um programa de mapeamento geológico-geomecânico é aquela recomendada pela Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas, ISRM, Brown (1981) e ABGE (1983).

Para que o trabalho de mapeamento geológico-geomecânico possa vir a ser realizado o maciço rochoso é dividido em zonas homogêneas, ou seja, zonas dentro das quais ele apresente estruturas e propriedades geomecânicas relativamente uniformes.

Dependendo da extensão de uma zona ela deverá ser dividida em intervalos da ordem de 10 a 20m de comprimento e em geral de altura correspondendo à altura do talude. As zonas são delimitadas no mapa topográfico correspondente, normalmente em escala grande. Esta divisão em zonas é essencial para as etapas subsequentes do projeto de engenharia.

Na execução de um programa de mapeamento geológico-geomecânico tem-se:

1. Determinação da geometria do talude ou afloramento e atitude da face do talude, quando pertinente;
2. Descrição litológica (tipo de rocha) da área;
3. Determinação do intervalo de variação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta. Determinação do estado de alteração da rocha intacta desde rocha sã até completamente alterada (solo).
4. Determinação dos parâmetros relativos às discontinuidades para cada família, para discontinuidades aleatórias e ainda para zonas de fraqueza.
 - Tipo: (diaclases , xistosidade , etc.) ;
 - Atitude: direção e mergulho;
 - Persistência;
 - Espaçamento;

- Abertura;
- Intervalo de variação da resistência à compressão uniaxial nas paredes da descontinuidade;
- Rugosidade;
- Características geomecânicas do material de preenchimento;
- Condições de umidade, inclusive variação ao longo do ano;
- Determinação dos mecanismos de ruptura e estabilidade cinemática no campo
- Avaliação dos mecanismos de ruptura;
- Avaliação da estabilidade cinemática;
- Determinação da(s) família(s) crítica(s) de descontinuidade, ou seja, que vão ter papel principal no processo de instabilização.

O espaçamento das descontinuidades, menor distância entre duas descontinuidades sucessivas de uma mesma família, é medido sistematicamente ao longo dos afloramentos. Os resultados das medidas de espaçamento são apresentados sob a forma de histogramas, devendo ser construído um histograma para cada família, em cada talude ou afloramento estudado.

Os dados relativos ao espaçamento das descontinuidades (espaçamento médio ou modal de cada família de descontinuidades) permitem avaliar a faixa de variação de tamanho dos blocos que compõem um maciço rochoso. Os dados relativos ao espaçamento e atitude das descontinuidades permitem determinar a forma e a orientação dos blocos. Os dados relativos a forma, tamanho e orientação dos blocos são relevantes no estudo dos processos de instabilização e mecanismos de ruptura e no estudo do desmonte a explosivo e elaboração do plano de fogo. A resistência ao cisalhamento de um maciço rochoso e sua deformabilidade dependem do tamanho dos blocos. As propriedades relacionadas à engenharia de rochas tais como “aptidão” à escavação, permeabilidade do maciço rochoso também variam com o espaçamento das descontinuidades.

Uma classificação das descontinuidades de acordo com a escala de ocorrência das mesmas foi proposta por Duncan & Goodman (1968), sendo exibida na tabela III.1. Na primeira linha da tabela observamos que os corpos de prova, em escala centimétrica

apresentam fissuras originadas por esforços de tração e cisalhamento. Nesta escala encontramos os corpos de prova os quais vão nos permitir determinar as propriedades mecânicas da rocha intacta em ensaios de laboratório.

A determinação do intervalo de variação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta é feita no campo a partir de testes manuais com auxílio de canivete e martelo de geólogo. A tabela III.2 é usada para esta avaliação.

3.3 – Relação entre a resistência a compressão uniaxial e as classes de alteração

A ação dos processos intempéricos ao longo do tempo, água, chuvas, ventos, variação de temperatura, levam a alteração nas características do maciço rochoso; tanto da matriz rochosa como das descontinuidades. A avaliação do grau de alteração da matriz rochosa nos maciços rochosos é normalmente feita a partir de critérios baseados na alteração mineralógica e na porcentagem relativa de blocos de rocha sã, rocha pouco alterada e rocha completamente alterada. A tabela III.2 apresenta a metodologia adaptada pela Cia. Vale do Rio Doce para a avaliação do grau de alteração das rochas.

Os estágios iniciais de alteração resultam em significativa diminuição da resistência a compressão uniaxial da matriz rochosa com relação à resistência a compressão uniaxial da rocha sã.

A metodologia proposta na década de 70 envolve a determinação da propriedade chamada coerência. A coerência é determinada tátil-visualmente com auxílio do martelo de geólogo e lâmina de aço. A metodologia proposta por Guidicini et al (1972) e adaptada para uso nas minas de ferro lavradas pela MBR (Minerações Brasileiras Reunidas S.A.) é apresentada na tabela III.3 . Para cada uma das quatro classes é apresentado o método de escavação ou desmonte: de desmonte a explosivo, escarificação ou escavação com trator de lâmina.

Tabela III.1 – Caracterização das discontinuidades com base na escala de observação (Duncan & Goodman, 1968). In: Giani, G.P. (1992)

Tipo	Escala de Observação	Escala	Espaçamento	Principal Origem
Macro e micro fissuras	2,5cm	Corpo de prova	$s < 0,25\text{cm}$	Tração e alteração
Superfícies de clivagem e acamamento	60cm	Bloco de rocha observado “in situ”	$0,25\text{cm} < s < 5\text{cm}$	Tração
Fraturas e diques	6m	Escavação para exploração	$5\text{cm} < s < 6\text{m}$	Tração e cisalhamento
Falhas menores e zonas fraturadas	60m	Escavação completa	$6\text{m} < s < 60\text{m}$	Cisalhamento
Falhas regionais	600m	Cadeias de montanhas	$s > 60\text{m}$	Cisalhamento

Tabela III.2 - Metodologia adaptada pela Cia. Vale do Rio Doce para a avaliação do grau de alteração das rochas. In: Manual Técnico - Mina do Cauê - Taludes em Rocha, [197-]

Número (Grau)	Nome	Descrição
1	Rocha Fresca	- Cor e brilho originais intactos
		- Leve descoloração em algumas descontinuidades
2	Rocha Pouco Alterada	- Cores esmaecidas
		- Alteração mineralógica perceptível
		- Descoloração em descontinuidades
3	Rocha Medianamente Alterada	- Cores parcialmente modificadas
		- Alteração mineralógica acentuada
		- Alteração acentuada em xistosidades
		- Pode ocorrer material mais decomposto ao longo de descontinuidades principais
4	Rocha Muito Alterada	- Cores muito modificadas
		- Alteração mineralógica quase total
		- Estrutura rochosa bem preservada
5	Rocha Totalmente Alterada	- Cores totalmente modificadas
		- Alteração mineralógica total
		- Todo o material está alterado para solo, podendo ser ou não percebida a estrutura da rocha original

Tabela III.3 – Graus de coerência (Guidicini et al., 1972)

Siglas	Denominações	Características da Rocha
C1	Rocha coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos de bordas cortantes. Superfície dificilmente riscável por lâmina de aço. Desmonte a explosivo.
C2	Rocha medianamente coerente	Quebra com dificuldade ao golpe do martelo. Superfície riscável com lâmina de aço. Desmonte a explosivo.
C3	Rocha pouco coerente	Quebra com facilidade ao golpe do martelo, produzindo fragmentos que podem ser partidos manualmente. Superfície facilmente riscável com lâmina de aço. Escarificação.
C4	Rocha incoerente	Quebra com a pressão dos dedos, desagregando-se. Pode ser cortada com lâmina de aço. Trator de lâmina

Stacey e Page (1986) estudaram a relação entre estado de alteração e resistência a compressão uniaxial. Eles apresentam um fator que deve ser multiplicado pela resistência a compressão uniaxial. Tal fator é determinado com base na descrição do estado de alteração e na coerência, ver figura 3.1. É chamado fator de redução.

Igualmente, Vaz (1996) apresenta outro parâmetro, fator de redução da resistência a compressão uniaxial, dado em percentagem, determinado com base na descrição do estado de alteração. Na figura 3.2 Vaz (1996) apresenta a faixa de variação da resistência à compressão uniaxial para várias litologias. Apresenta ainda em função da faixa de variação da resistência métodos de desmonte ou escavação recomendáveis. Apresenta quatro classes de alteração: R1, rocha sã e pouco alterada, R2, medianamente alterada, R3, muito alterada, S2, extremamente alterada, ou seja, solo. Apresenta ainda a seguinte designação de acordo com a faixa de variação da resistência: solo até 2MPa, rocha muito branda de 2 até 10MPa, rocha branda de 10 a 30MPa, rocha média de 30 a 100MPa, rocha dura de 100 a 300 MPa. Esta designação (solo, rocha muito branda, rocha branda, rocha média, rocha dura) é usada neste texto.

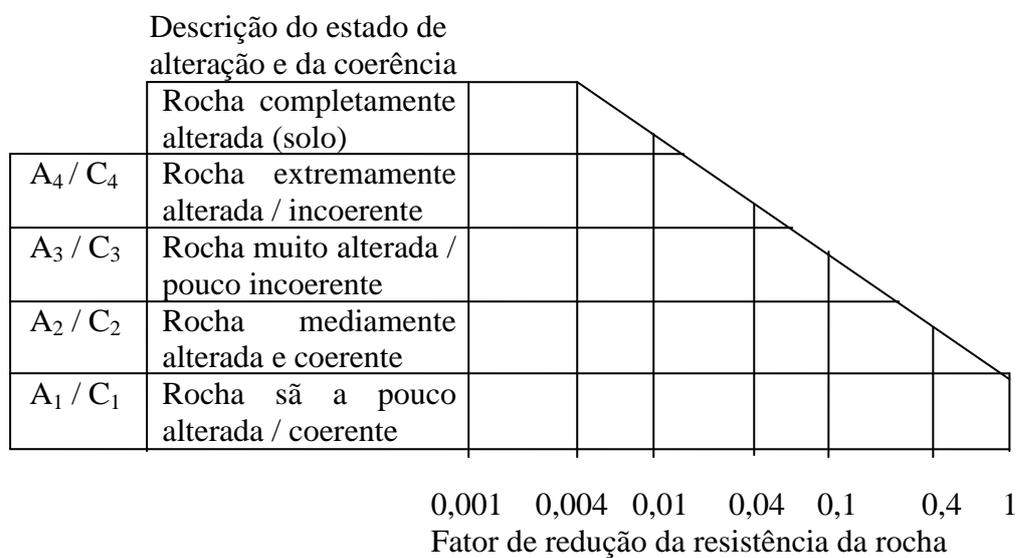


Figura 3.1 – fator de redução da resistência a compressão uniaxial determinado com base na descrição do estado de alteração e na coerência, Stacey e Page (1986)

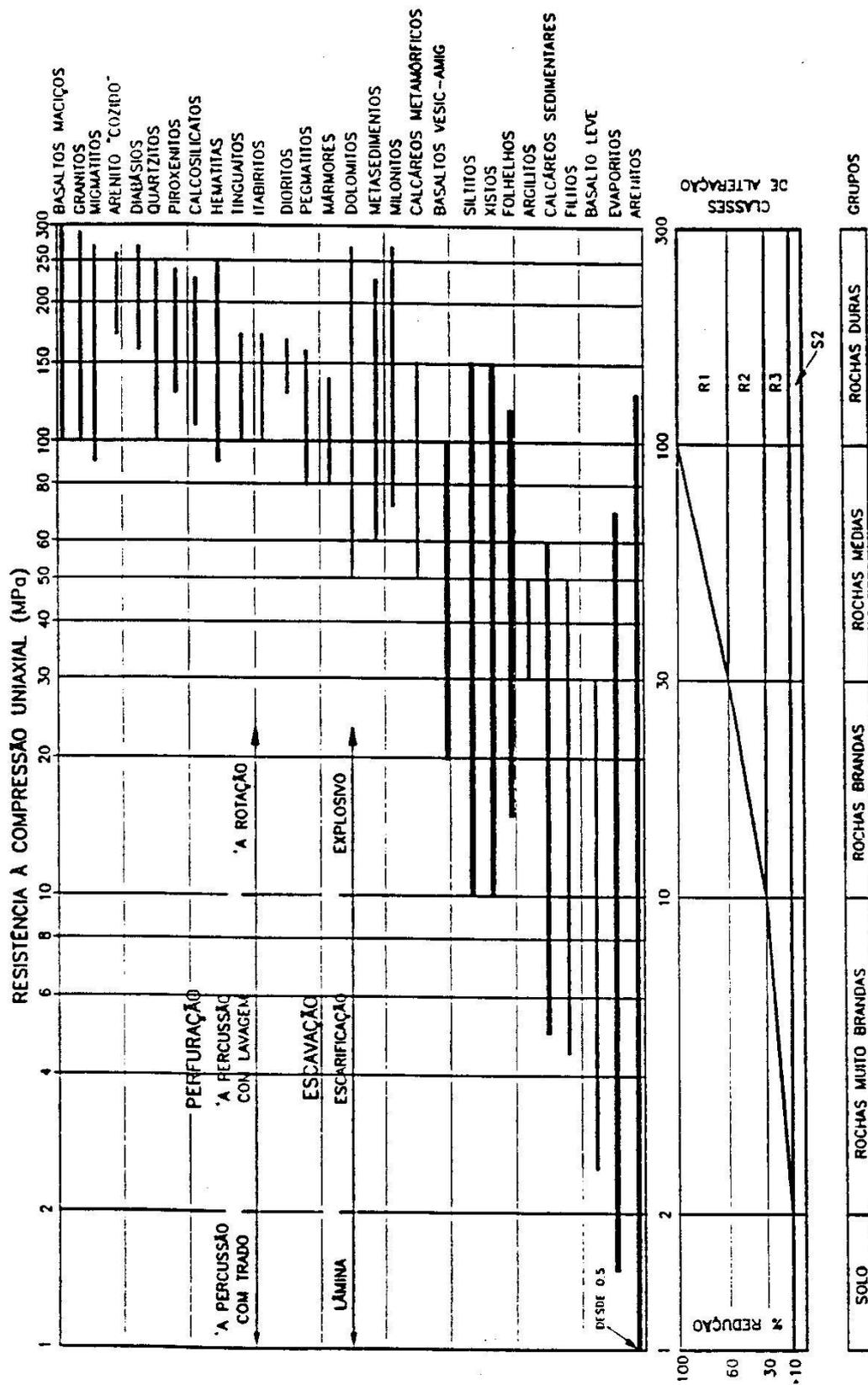


Figura 3.2 – Fator de redução da resistência à compressão uniaxial determinado com base na descrição do estado de alteração, de acordo com Vaz (1996).

3.4 – Testes de laboratório para determinação das características das rochas

As propriedades das rochas obtidas ou determinadas através de testes realizados em laboratório dependem das condições em que são realizados os testes. As decisões relativas às categorias de testes e procedimentos adotados foram estabelecidas basicamente com base na experiência empírica adquirida nas décadas de 60 e 70. As especificações mais completas são fornecidas pelo *American Society for testing and Materials* (ASTM) completadas por: BROWN, E.T. (1981) *Rock Characterization, Testing and Monitoring. Suggested Methods* ISRM. Oxford. Pergamon. Esses “métodos sugeridos” foram preparados pelos comitês da *Internacional Society of Rock Mechanics*, ISRM. Estes procedimentos têm tido boa aceitação entre os profissionais da área e são adotados neste projeto.

A Tabela III.4 preparada por (Brown, 1981) apresenta categorias de testes em rochas.

Tabela III.4 – Categoria de testes em rochas (Brown, 1981). In: Farmer, I (1983)

1- Testes de Laboratório
(a) Classificação
<ul style="list-style-type: none"> - densidade, umidade contida, porosidade, absorção. - resistência à compressão uniaxial e resistência a tração - deformabilidade - índices de anisotropia - dureza - abrasividade - permeabilidade - velocidade do som - descrição micropetrográfica
(b) Projeto de Engenharia
<ul style="list-style-type: none"> - resistência à compressão triaxial - deformabilidade - resistência ao cisalhamento - propriedades visco elásticas (fluência)
2- Observações no Campo e Testes
(a) Caracterização
<ul style="list-style-type: none"> - orientação das discontinuidades, espaçamento, rugosidade, geometria, etc. - recuperação do testemunho, RQD, frequência de fraturas - velocidade do som in situ - perfis geofísicos
(b) Projeto de Engenharia
<ul style="list-style-type: none"> - testes de deformabilidade - testes de cisalhamento - medidas de permeabilidade no campo - determinação das tensões in situ - monitoramento dos movimentos da rocha após-construção - resistência à compressão uniaxial, biaxial e triaxial

3.5 – Determinação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

A especificação ASTM D2938-71a para testes de resistência em compressão uniaxial exige espécimes de testes cilíndricos retos com diâmetro maior ou igual a NX(54mm) e uma relação altura / diâmetro do espécime de 2,0 a 2,5. As recomendações da IRSM, Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas, Brown (1981), sugerem uma relação altura sobre diâmetro entre 2,5 e 3,0. Quando é necessário testar testemunhos de menor diâmetro, é desejável que o diâmetro seja 10 vezes maior que o diâmetro máximo do grão do mineral, é recomendado um diâmetro 20 vezes maior. Os lados do espécime devem ser lisos e livres de toda irregularidade. As faces devem ser paralelas e perfeitamente perpendiculares ao eixo longitudinal. A tolerância admitida é:

- (i) Irregularidades. Todas as superfícies retas com variação de até 0,127mm sobre o comprimento do espécime;
- (ii) Faces finais lisas com variações de até 0,025mm e perpendiculares ao eixo longitudinal com variação de até 0,25mm;
- (iii) Altura. Cinco medidas igualmente espaçadas sobre o espécime usando relógio comparador, variações de até 0,051mm.

A umidade contida deve usualmente representar as condições de campo.

A forma do espécime é um cilindro evitando assim “efeitos de canto”.

Os espécimes preparados são submetidos a aplicação de carga até a ruptura com uma velocidade de carregamento a uma taxa menor que $700 \text{ kNm}^{-2}\text{s}^{-1}$ numa máquina apropriada. A resistência à compressão uniaxial é dada pela carga máxima suportada dividida pela seção transversal e é expressa em $0,1\text{MN/m}^2$.

O relatório de teste deve incluir:

- ◇ Descrição litológica da amostra;
- ◇ Fonte ou procedência da amostra incluindo: localização geográfica, profundidade e orientação, dados de amostragem e testes, ambiente de estocagem;
- ◇ Diâmetro e altura do espécime;

- ◇ Umidade contida e grau de saturação quando da realização do ensaio;
- ◇ Velocidade de carregamento;
- ◇ Tipo de ruptura;
- ◇ Densidade, porosidade, e outras propriedades físicas.

Com base na resistência à compressão uniaxial das rochas são apresentadas algumas classificações, ver tabela III.5. Os tipos de rochas sugeridos na tabela III.5 não são os tipos convencionais das classificações da geologia, ou da terminologia convencional geológica. Os fatores que afetam a resistência dos espécimes de rocha não são os mesmos fatores considerados na elaboração das classificações geológicas. A resistência está relacionada com a mineralogia, particularmente os minerais de quartzo e minerais argilosos, estão relacionados igualmente com a porosidade, tamanho dos grãos, sua forma e anisotropia, com as descontinuidades presentes na escala das amostras. Algumas faixas de valores de resistência à compressão são apresentadas na tabela III.6, estes valores confirmam a variação muito grande que pode haver entre resistência e descrição geológica convencional.

Tabela III.5 - Classificação das rochas com base na resistência à compressão uniaxial (de acordo com Attewell e Farmer 1976). In: Farmer, I (1983)

Classificação da resistência	Resistência (MN/m²)	Rochas Típicas
Muito fraca	10-20	rocha sedimentar pouco compacta alterada
Fraca	20-40	rocha sedimentar fracamente cimentada, xisto
Resistência média	40-80	rocha sedimentar competente, algumas rochas ígneas grosseiras de baixa densidade
Forte	80-160	rocha ígnea competente, algumas rochas metamórficas e arenitos de grão fino
Muito forte	160-320	quartzitos, rocha ígnea de grão fino

Tabela III.6 - Resistência Típica das Rochas (MN/m²). In: Farmer, I (1983)

Tipo de Rocha	Compressão Uniaxial	Tração
granito	100-250	7-25
dolerito	100-350	15-35
basalto	100-300	10-30
quartzito	150-300	10-30
arenito	20-170	4-25
xisto	5-10	2-10
calcário	30-250	5-25

3.5.1 - Análise e interpretação do ensaio de ruptura em compressão uniaxial

O ensaio em compressão uniaxial (ver figura 3.3) permite determinar as características de deformabilidade, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, e de ruptura em compressão uniaxial.

A amostra tem forma cilíndrica de altura h e diâmetro D , as bases são paralelas e cuidadosamente retificadas para evitar flexões parasitas quando do carregamento.

A natureza do contato entre as bases da amostra e os pratos da prensa de compressão têm uma grande influência sobre a repartição de tensões na amostra mas, de acordo com o princípio de Saint Venant esta influência é localizada nas vizinhanças das bases. Quando a relação altura / diâmetro é igual ou superior a dois, a parte mediana da amostra está submetida à um esforço monoaxial de intensidade:

$$\sigma_c = \frac{F}{S} \quad (3.1)$$

onde F é a força de compressão aplicada pela prensa e S a seção transversal da amostra.

A fim de diminuir as concentrações locais de tensão na vizinhança do contato prato da prensa/base da amostra, ou seja, afim de diminuir os chamados “efeitos de extremidade”, pode-se interpor um material deformável (papelão, teflon, etc.) que favorece o deslizamento da rocha sobre o prato. Este procedimento tem pouca aceitação.

As deformações da rocha são medidas por extensômetros mecânicos (relógios comparadores de 1/100mm) e por extensômetros elétricos (“strain gage”, in., “gauges de déformation”, fr.). Os comparadores podem ser colocados entre os pratos da prensa e medem sua aproximação durante o carregamento. A deformação medida desta maneira inclui as deformações parasitas das extremidades da amostra, e eventualmente do material interposto entre os pratos da prensa e a amostra.

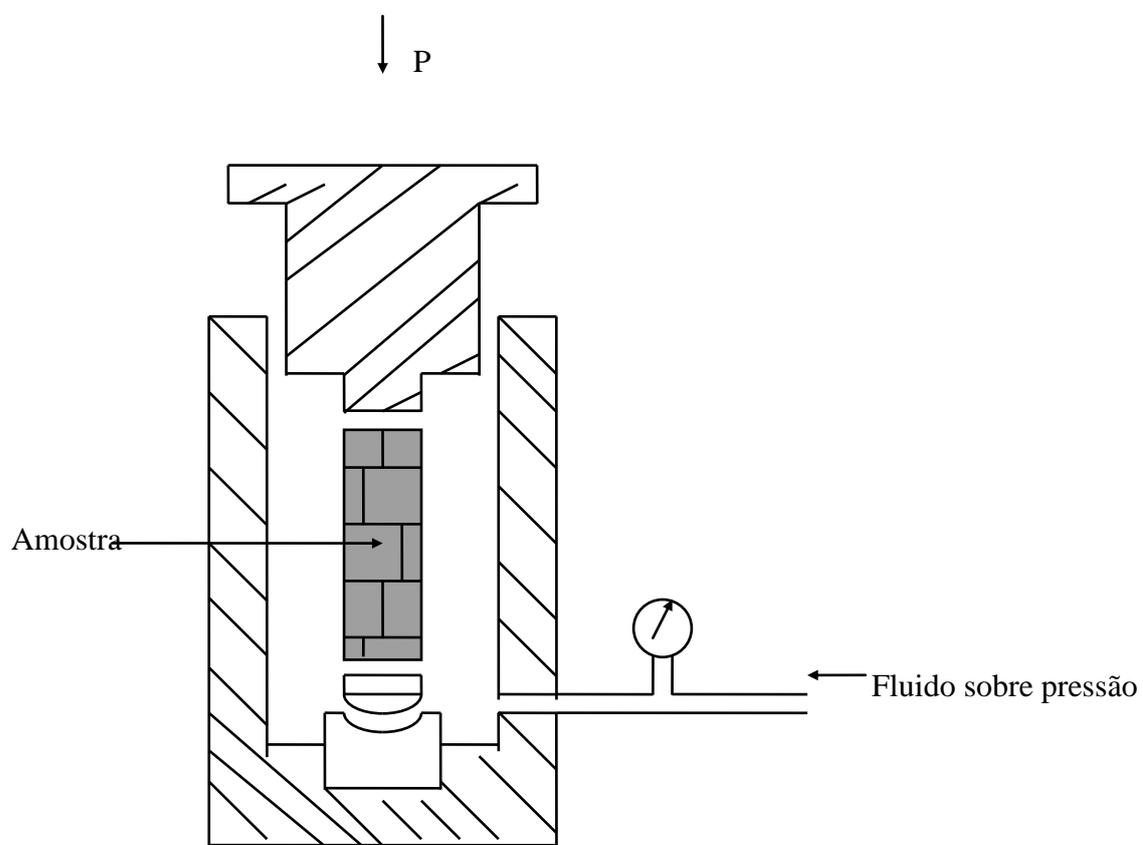


Figura 3.3 - Ensaio de compressão uniaxial

3.6 – Ensaio indireto para determinação da resistência a tração

Este ensaio é conhecido como ensaio brasileiro ou ensaio de compressão diametral. Um corpo de prova cilíndrico ou discoide é colocado horizontalmente entre os pratos de uma prensa, (ver figura 3.4), e é comprimido segundo duas geratrizes opostas. O campo de tensões que se desenvolve é complexo. Obert & Duval (1967), demonstram que as tensões principais horizontais atuando ao longo do diâmetro AA' são constantes e têm por valor:

$$\sigma_{xx} = \frac{2F}{\pi DL} \quad (3.2)$$

onde F é a força aplicada, D é o diâmetro e L é o comprimento do corpo de prova. Por outro lado a tensão vertical σ_{yy} ao longo de AA' não é constante e a sua variação é representada na figura 3.4 (b). Para prevenir tensões de cisalhamento e moagem, no local de aplicação da carga é usado um elemento para distribuição de carga, figura 3.4 (c).

Aumentando a carga aplicada F sobre o corpo de prova provocamos a ruptura por fratura diametral vertical, quando F atinge o valor correspondente à resistência a tração, R_t . O ensaio é fácil de realizar, ao contrário de ensaio de tração direta, no entanto os dois ensaios não são exatamente equivalentes, no ensaio de tração direta a ruptura tem lugar sobre a seção mais fraca da amostra e no ensaio brasileiro a ruptura se inicia necessariamente em um plano AA'.

Se a rocha é homogênea a resistência a tração determinada no ensaio brasileiro é igual à resistência a tração determinada ensaio de tração direto, no caso mais comum a resistência a tração determinada no ensaio brasileiro é maior que aquela do ensaio de tração direto, pois no ensaio direto a ruptura se dá segundo o plano mais fraco.

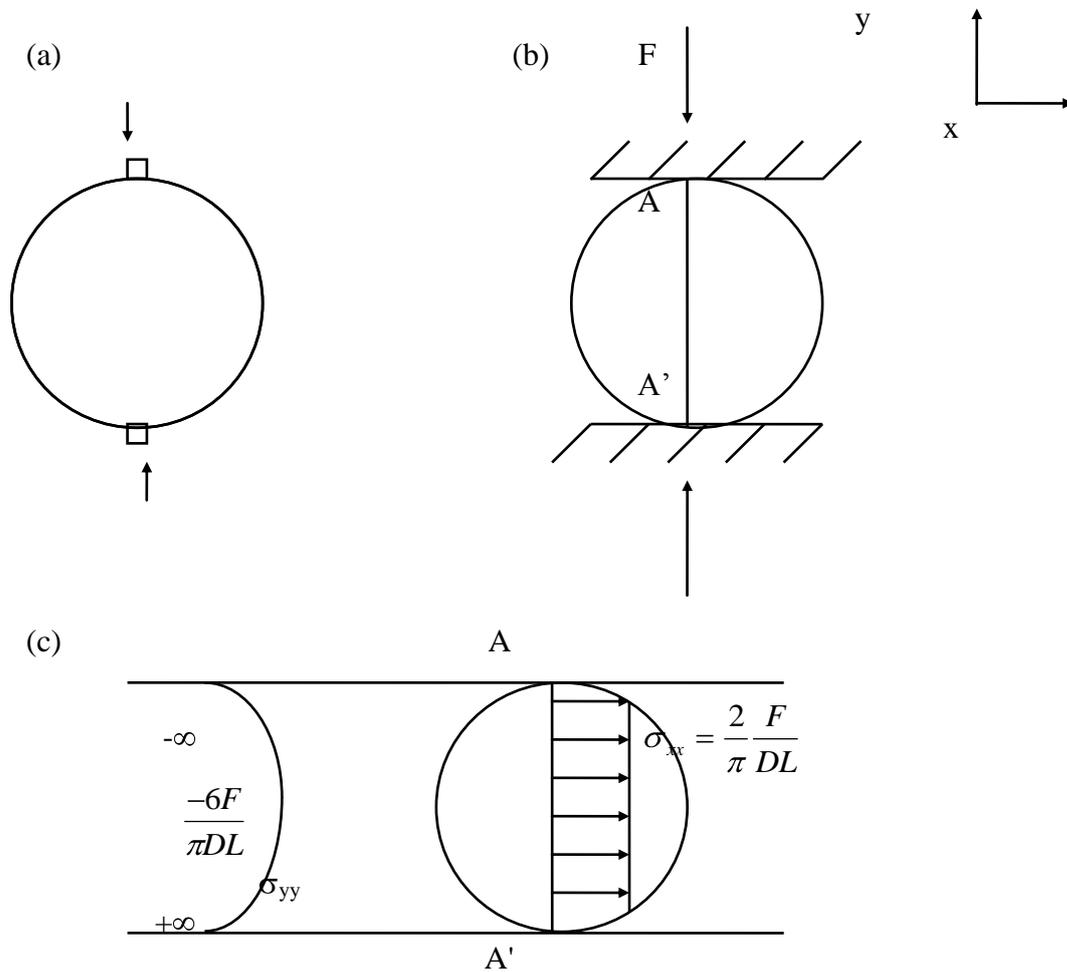


Figura 3.4 - Esquema representativo de ensaio brasileiro: (a) colocação do corpo de prova; (b) tensões σ_{xx} e σ_{yy} ao longo do plano AA' ; (c) ensaio de tração indireto com distribuição de carga.

3.7 – Medida da velocidade do som

A medida da velocidade de ondas sonoras em um corpo de prova é relativamente simples. No método mais comum são emitidas vibrações em uma das extremidades da rocha com um cristal piezoeletrico, estas vibrações são recebidas por um segundo cristal na outra extremidade.

3.7.1 - Mecanismo experimental

A medida é feita sobre amostra de altura H e faces paralelas colocadas entre dois pratos. Sobre um dos pratos um cristal piezoeletrico excitado por uma corrente elétrica a alta voltagem produz uma onda elástica que se propaga na amostra. Um segundo cristal piezoeletrico colocado sobre o outro prato produz um sinal elétrico ao receber esta onda.

O primeiro sinal captado corresponde à chegada da onda longitudinal. A medida do tempo de percurso Δt dá diretamente a velocidade correspondente.

$$v_l = \frac{H}{\Delta t_l} \quad (3.3)$$

A chegada do sinal correspondente às ondas transversais é geralmente mascarada pela vibração de fundo que segue a onda longitudinal incidente, e pela chegada das ondas refletidas na face da amostra. A medida de v_t exige grande experiência e cuidados particulares, o que faz com que esta medida não seja comumente efetuada.

3.7.2 - Interpretação

Em um sólido elástico existe entre as velocidades de propagação das ondas longitudinais v_l e das ondas transversais v_t , e as propriedades elásticas, as relações clássicas:

$$v_l^2 = \frac{E_d}{\rho} \frac{1 - \vartheta_d}{(1 + \vartheta_d)(1 - 2\vartheta_d)} \quad (3.4)$$

onde E_d = módulo de Young dinâmico; ϑ_d = coeficiente de Poisson dinâmico

$$v_t^2 = \frac{G_d}{\rho} \quad (3.5)$$

onde G_d = módulo de cisalhamento dinâmico; ρ = densidade do material

$v_l > v_t$ sempre

A velocidade de propagação das ondas sonoras varia com a presença de descontinuidades em maior ou menor número. Existem modelos que permitem comparar as características de uma rocha dada àquelas de um meio ideal de mesma composição mineralógica, mas sem descontinuidades. Nestes modelos o meio ideal tem um comportamento elástico linear e as descontinuidades são pequenas esferas, no caso dos poros, e elipsoides de revolução achatadas, no caso de fissuras, o comportamento elástico linear seria válido para as rochas no domínio das pequenas solicitações. Estes modelos mostram que a partir do conhecimento das características do meio ideal de referência, e medindo os parâmetros elásticos de uma rocha, bem como sua porosidade, podemos caracterizar o grau de fissuração da rocha.

O índice de qualidade, IQ, ou índice de continuidade, IC, de uma rocha é definido pela relação entre a velocidade de propagação das ondas longitudinais na rocha, v e a velocidade de propagação das ondas v^* num meio ideal de referência de mesma composição mineralógica.

$$IC = \frac{v}{v^*} \times 100\% \quad (3.6)$$

Em laboratório é feita a medida da velocidade das ondas longitudinais. Calculamos v^* a partir da composição mineralógica e dos dados relativos à velocidade média de propagação das ondas nos minerais:

$$\frac{1}{v^*} = \sum_i \frac{c_i}{v_i} \quad (3.7)$$

A tabela III.7 fornece os dados necessários à determinação de v^*

Tabela III.7 - Velocidade média de propagação das ondas em algumas rochas e minerais

MINERAL	V₁(m/s)	ROCHA	V₁(m/s)
Quartzo	6050	Gabro	7000
Moscovita	6800	Granito, gnaisse	6000
Calcita	6600	Arenito, quartzito	6000
Anfibólio	7200	xisto	5800
Dolomita	7500		
Feldspato	5960		

3.8 – Perfil de rugosidade

Em todas as escalas em que estudamos uma superfície de descontinuidade, poderemos estudar a rugosidade da mesma. Barton e Choubey (1977) apresentaram uma figura, ver figura 3.5, que permite avaliar o valor do parâmetro JRC, “*joint roughness coefficient*” numa escala de 10 cm. Um valor de JRC igual a 1 corresponde a um perfil liso e JRC igual a 19 a um perfil rugoso. Traçamos uma linha ao longo da superfície estudada e com auxílio de um perfilador obtemos o perfil. Tal perfil se comparado aos perfis apresentados na figura 3.5 permite determinar o valor de JRC. Quando aplicado à superfície de ruptura obtida após um ensaio de ruptura permite um registro do aspecto relativo à rugosidade da mesma.

3.9 – Histogramas de frequência relativa

Os histogramas são representações gráficas de distribuições de frequência.

Um histograma de frequência é um conjunto de retângulos que tem:

- a) As bases sobre um eixo horizontal (eixo da abscissa) com o centro no ponto médio e as larguras iguais às amplitudes dos intervalos das classes; a amplitude do intervalo de classe é a diferença entre os limites reais superiores e inferior dessa classe;
- b) As áreas proporcionais às frequências das classes.

A frequência relativa de uma classe é a frequência dessa classe dividida pelo total de todas elas e é, geralmente, expressa em percentagem.

Devido à pequena quantidade de dados obtidos adotou-se $K=6$ como número de intervalos de classe para a construção de todos os histogramas.

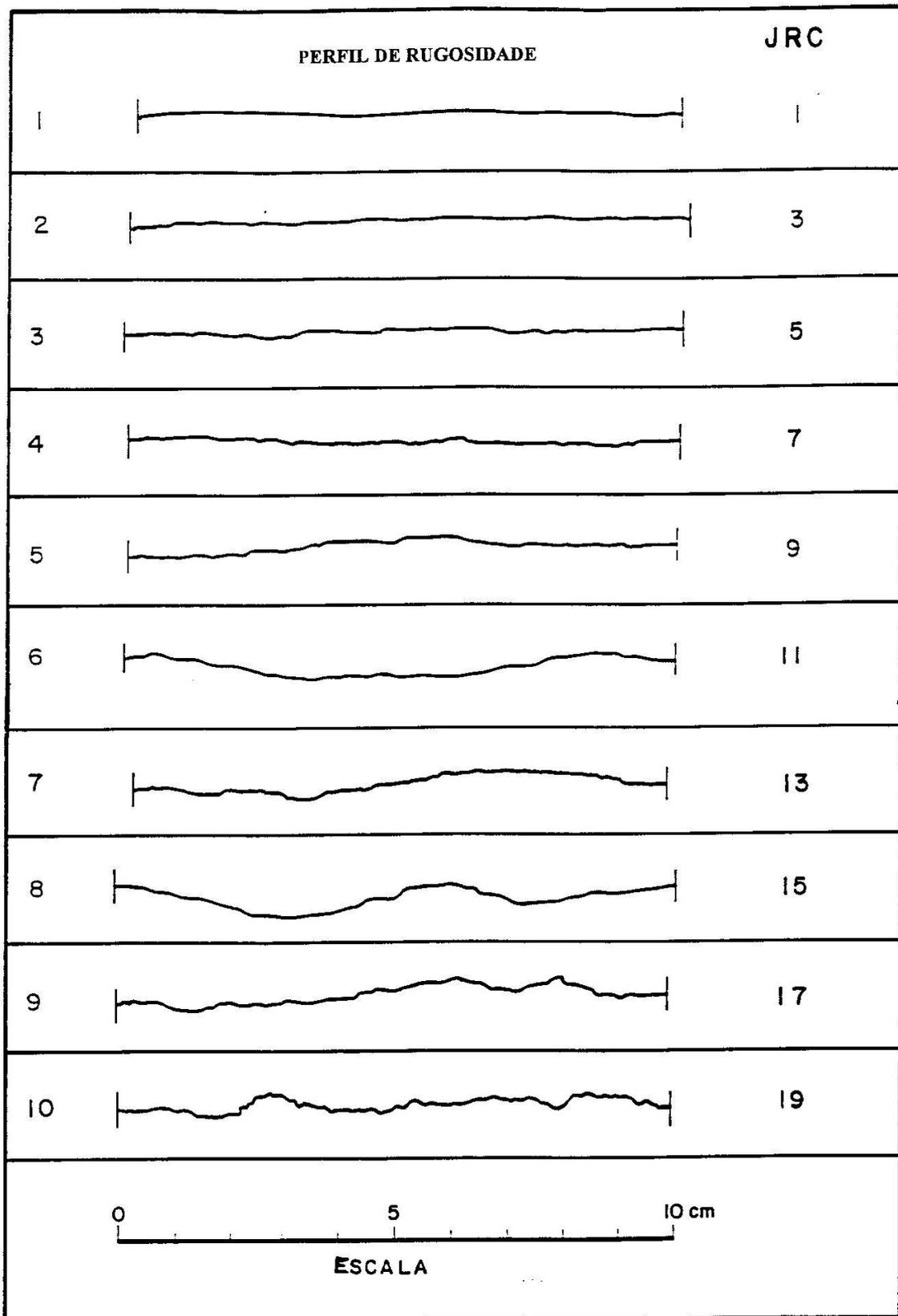


Figura 3.5 - Perfil de rugosidade da descontinuidade, de acordo com Barton e Choubey (1977).

4. METODOLOGIA DE TRABALHO

O procedimento adotado para este trabalho inclui três etapas distintas: obtenção e seleção do material para realização de testes, preparação de amostras e realização de testes, análise dos resultados e conclusões.

4.1 – Obtenção e seleção do material para realização de testes

Esta etapa inclui a seleção do local, visita ao galpão de testemunhos, o estudo da descrição dos testemunhos de sondagem, seleção preliminar do material, coleta de amostras no galpão de testemunhos e transporte para o laboratório, o que foi realizado por terceiros.

4.2 – Preparação de amostras

Esta etapa inclui a preparação de amostras de acordo com as recomendações e procedimentos para cada ensaio. As amostras não apresentavam marcações (nos testemunhos de sondagem) indicando qual seria a base e ou, o topo do furo, as mesmas foram divididas em subamostras para obedecer às especificações de cada teste realizado.

4.2.1 – Preparação das amostras para o ensaio de compressão uniaxial

Para os testes de resistência à compressão uniaxial deve-se obter:

- ◇ Espécimes cilíndricos;
- ◇ Diâmetro maior ou igual a 54 mm;
- ◇ Relação altura/diâmetro do espécime de 2,0 a 2,5;
- ◇ Lados do espécime lisos e livres de irregularidades;
- ◇ Faces paralelas e perpendiculares ao eixo longitudinal;
- ◇ Amostras secas.

Para o teste de compressão uniaxial adotou-se os seguintes procedimentos:

- ◇ Foram medidas várias amostras em pedaços de testemunhos de sondagem;
- ◇ As amostras foram serradas, levadas para o torno e foram retificados os dois lados;
- ◇ Foram feitas cinco medidas do comprimento e diâmetro da amostra com paquímetro;
- ◇ Fixaram-se os anéis na amostra e foram feitas cinco medidas de altura entre anéis;
- ◇ O relógio comparador foi fixado no anel e a amostra foi levada para prensa.

4.2.2 – Preparação das amostras para o ensaio de tração

Para o teste de tração foi separado uma parte do testemunho no qual foram medidas várias amostras, depois estas amostras foram serradas de acordo com as recomendações citadas.

4.3 – Realização do programa de ensaios e testes

Esta etapa inclui a realização dos testes e preparação dos relatórios dos testes.

4.3.1 – Determinação da resistência à compressão uniaxial da rocha intacta

Coloca-se a amostra já preparada na prensa e quando o teste é iniciado, marca-se o tempo gasto até a ruptura, anotam-se as leituras feitas no relógio comparador, a carga que a amostra está sendo submetida e também a força de ruptura.

O relatório de teste deve incluir:

- ◇ Descrição litológica da amostra;
- ◇ Fonte ou procedência da amostra incluindo: localização geográfica, profundidade e orientação, dados de amostragem e testes, ambiente de estocagem;
- ◇ Diâmetro e altura do espécime;
- ◇ Velocidade de carregamento;
- ◇ Tipo de ruptura;

◇ Densidade, porosidade, e outras propriedades físicas.

4.3.2 – Determinação da resistência à tração

Um corpo de prova cilíndrico ou discoide é colocado horizontalmente entre os pratos de uma prensa e é comprimido segundo duas geratrizes opostas, aplica-se uma carga sobre o corpo de prova até a ruptura por fratura diametral.

4.4 – Medidas da velocidade do som

Com o objetivo de determinar o grau de fissuração da rocha fez-se medidas da velocidade do som para cada amostra ensaiada. Antes das amostras serem preparadas e submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, em cada extremidade da amostra e também nos cristais piezelétricos, é colocada uma graxa especial. Coloca-se os dois cristais em contato com as duas extremidades da amostra, liga-se o aparelho e fazem-se as medidas de tempo. Foram feitas cinco medidas em cada amostra.

4.5 – Determinação do perfil de rugosidade

O perfil da superfície de ruptura foi reproduzido (copiado) com o auxílio de um perfilador, estas reproduções foram feitas nas superfícies de ruptura obtidas nos ensaios de compressão uniaxial e nos ensaios de tração, o perfil obtido foi comparado com aquele apresentado na figura 3.5. As figuras são apresentadas no capítulo 5.

4.6 – Construção de histogramas

Os histogramas foram construídos de acordo com o procedimento recomendado por Spiegel (1985). Foram construídos histogramas para os seguintes conjuntos de dados: resistência a ruptura e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de compressão uniaxial, resistência a ruptura por tração obtidos em ensaio brasileiro e dados relativos a

medidas de velocidade da onda longitudinal.

Os histogramas são representações gráficas de distribuições de frequência.

Um histograma de frequência é um conjunto de retângulos que tem:

- a) As bases sobre um eixo horizontal (eixo da abscissa) com o centro no ponto médio e as larguras iguais às amplitudes dos intervalos das classes; a amplitude do intervalo de classe é a diferença entre os limites real superior e inferior dessa classe;
- b) As áreas proporcionais às frequências das classes.

A frequência relativa de uma classe é a frequência dessa classe dividida pelo total de todas elas e é, geralmente, expressa em percentagem.

Devido à pequena quantidade de dados obtidos adotou-se $K=6$ como número de intervalos de classe para a construção de todos os histogramas.

4.7 – Determinação do peso específico das amostras

A densidade foi determinada através do método do picnômetro de acordo com o procedimento recomendado por Dana (1984). Determinou-se a densidade para o itabirito dolomítico, quartzito, quartzo xisto e filito sericítico.

4.8 – Análise dos resultados e conclusões

Esta etapa inclui a análise dos dados e resultados obtidos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados todos os resultados obtidos nos testes realizados no laboratório de mecânica de rochas. Foram realizados ensaios de resistência à ruptura em compressão uniaxial, resistência à tração e medidas da velocidade da onda longitudinal. Ver tabela V1 e V2. Determinou-se também o perfil da superfície de ruptura de todas as amostras submetidas ao ensaio de compressão uniaxial e de tração.

5.1 – Introdução

O programa de ensaios realizado teve como objetivo contribuir para o conhecimento das propriedades mecânicas das rochas encontradas na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais.

Foi realizada uma série de ensaios no laboratório de mecânica de rochas em quartzito, itabirito dolomítico, quartzo-xisto e filito sericítico. Para o quartzo-filito foi feito apenas um ensaio devido à dificuldade de obtenção de amostras.

As amostras submetidas aos ensaios de ruptura foram fornecidas pela MBR, Minerações Brasileiras Reunidas. As amostras foram descritas por C.A.Nonato. Os ensaios foram realizados pela Eng. Jacqueline Andrade Nogueira, com a colaboração de um aluno de graduação bolsista de iniciação científica e do técnico encarregado o Laboratório de Mecânica de Rochas, Eng. Waldo de Oliveira Sepúlveda.

Os resultados dos ensaios realizados no Laboratório de Mecânica de Rochas são apresentados neste capítulo. Foram feitas medidas de velocidade do som em amostras que não foram submetidas a ensaio de compressão uniaxial, estes resultados são apresentados no item 5.8.

Tabela V.1- Faixa de variação dos valores obtidos em teste de laboratório para o ensaio de compressão uniaxial para cada litologia.

Tipo de Rocha	σ_c (MPa) resistência a ruptura	ϵ (GPa) módulo de elasticidade	V_1 (m/s) velocidade da onda longitudinal	nº de amostras
Itabirito dolomítico	100,0 a 294,8	60,0 a 383,3	4806 a 6753	18
Quartzo-xisto	12,1 a 91,7	12,9 a 40,3	2723 a 4861	7
Quartzito	13,8 a 150,2	4,4 a 56,7	1091 a 4194	9
Filito sericítico	10,4 a 33,7	5,1 a 9,7	2484 a 4122	4
Quartzo-filito	41,1	10,5	2836	1

Tabela V.2 - Faixa de variação dos valores obtidos em teste de laboratório para o ensaio de Tração para cada litologia

Tipo de Rocha	Tração (MPa)	nº de amostras
Itabirito dolomítico	6,0 a 20,2	32
Quartzo-xisto	1,7 a 8,4	13
Quartzito	2,6 a 11,9	13
Filito sericítico	2,3 a 7,8	10

5.2 – Obtenção de amostras.

Os testemunhos de sondagem, fornecidos pela empresa MBR, Minerações Brasileiras Reunidas, foram selecionados para ensaio por C.A.Nonato e pelo geólogo da mina Sr. René Viel. Nesta etapa foi assinalada a dificuldade de obter amostras que pudessem ser submetidas aos ensaios para determinação das propriedades mecânicas das rochas.

No galpão de testemunhos de sondagem se observa o alto grau de alteração do material dos testemunhos de sondagem. Nos casos em que o grau de alteração varia de médio a baixo, o material se encontra fraturado, podendo em alguns casos ser aproveitados para ensaio brasileiro. Lembramos aqui que as recomendações da ISRM, Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas, sugerem uma relação altura sobre diâmetro entre 2,5 e 3,0. Amostras destas dimensões são difíceis de obter. Esta relação costuma ser respeitada no caso de rocha dura, em caso de rocha média e branda, obter amostras respeitando esta relação entre 2,5 e 3,0 são mais difícil, ou mesmo impossível. Admita-se neste trabalho uma relação entre 2,0 (dois) e 2,5 como satisfatória para ensaio de compressão uniaxial.

Para o ensaio brasileiro precisamos de um disco (cilindro reto) de cerca de 2 cm de altura, o que é um pouco mais fácil de obter. Lembramos ainda que o ensaio brasileiro só é válido quando a ruptura ocorre no plano diametral. Para o itabirito-dolomítico não há dificuldades na obtenção de amostras.

Foram feitos ensaios de compressão uniaxial e ensaio de tração em amostras de itabirito dolomítico, filito sericítico, quartzo-xisto, quartzo-filito e quartzito. As tabelas V.3 e V.4 dão os resultados dos ensaios de compressão uniaxial. As tabelas V.5, V.6, V.7, V.8 e V.9 dão os resultados dos ensaios de tração. Nas tabelas, gráficos e figuras onde se lê, por exemplo, A41CX35 quer dizer: amostra 41caixa 35. Foram ainda realizados alguns ensaios com o picnômetro, para determinação da densidade relativa, os resultados são apresentados na tabela V.10. Em cada tabela temos o número e ano de realização do furo de sondagem e intervalo no furo. A denominação da rocha foi obtida no documento que fornece a descrição do furo de sondagem. Os resultados foram apresentados na

mesma sequencia do furo de sondagem para facilitar a avaliação das propriedades mecânicas ao longo do furo. Os resultados apresentados são comentados nos tópicos seguintes.

Os ensaios foram realizados segundo as recomendações da Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas, Brown (1981).

Tabela V.3 – Ensaio de Compressão Uniaxial

Ensaio Nº	Amostra Caixa	Tipo de Rocha	Intervalo	σ_c (MPa) Resistência à ruptura	ϵ (GPa) Módulo de elasticidade	V_1 (m/s) Velocidade da onda longitudinal	Observações
1	A45CX21	Itabirito dolomítico	77.5	253.3	112,5	6753	*
2	A45CX21	Itabirito dolomítico	77.5	153,0	76,9	6252	*
3	A48CX22	Itabirito dolomítico	79,75	182,2	66,7	6263	*
4	A50CX23	Itabirito dolomítico	80.8	115.1	117,7	5994	*
5	A50CX23	Itabirito dolomítico	80,8	110,5	200,0	6441	*
6	A56CX55	Itabirito dolomítico	198.6	247.2	112,5	5437	*
7	A57CX55	Itabirito dolomítico	199.3	153.4	150,0	5210	*
8	A57CX55	Itabirito dolomítico	199,3	211,6	75,0	5706	*
9	A58CX55	Itabirito dolomítico	200.0	100.0	156,3	5390	*
10	A58CX55	Itabirito dolomítico	200.0	173.4	115,8	x	*
11	A59CX55	Itabirito dolomítico	200.5	111.9	165,2	5843	*
12	A60CX56	Itabirito dolomítico	201.0	234.8	133,3	5834	*
13	A60CX56	Itabirito dolomítico	201.0	229.8	383,3	6142	*
14	A60CX56	Itabirito dolomítico	201.0	159.8	300,6	5781	*
15	A61CX56	Itabirito dolomítico	202.0	263.3	x	x	*
16	A61CX56	Itabirito dolomítico	202.0	294.8	60,0	4806	*
17	A62CX56	Itabirito dolomítico	202.5	228.4	266,7	x	*
18	A62CX56	Itabirito dolomítico	202,5	216,5	141,7	5819	*

Observações

- * Ruptura violenta (estouro). As amostras se romperam de forma aleatória (rocha muito dura).
- Ensaio de 1 a 5 furo de sonda 09 de 1985
- Ensaio de 6 a 18 furo de sonda 03 de 1984

Tabela V.4 – Ensaio de Compressão Uniaxial

Ensaio N°	Amostra Caixa	Tipo de Rocha	Intervalo	σ_c (MPa) Resistência à ruptura	ε (GPa) Módulo de elasticidade	V_1 (m/s) Velocidade da onda longitudinal	Observações
1	A09CX52	Quartzo-xisto+grosso	144.4	16.1	12,9	3959	I
2	A10CX49	Quartzo-xisto	135.1	91.7	20,2	3550	I
3	A11CX49	Quartzo-xisto	136.0	25.2	40,3	4404	I
4	A12CX48	Quartzo-xisto	133.5	90.8	21,9	2653	I
5	A13CX45	Quartzo-xisto	125.2	12.1	40,0	4861	I
6	A14CX18	Quartzo-xisto	49.0	53.7	14,4	2723	I
7	A16CX16	Quartzito	41.8	29.1	4,4	1565	II
8	A17CX19	Quartzito	50.7	24.8	18,2	3289	II
9	A19CX19	Quartzito	50.3	13.8	9,6	2225	II
10	A21CX15	Quartzito	40.3	36.7	6,2	1091	II
11	A22CX11	Quartzo-xisto	29.5	62.0	13,0	3212	I
12	A23CX15	Quartzo-filito	41.5	41.1	10,5	2836	III
13	A26CX31	Filito sericítico	85.7	20.3	x	3867	IV
14	A27CX32	Filito sericítico	86.5	33.7	9,7	3346	IV
15	A33CX06	Quartzito	23.0	115.4	44,4	4194	III
16	A33CX06	Quartzito	23.0	150.2	42,9	3665	III
17	A34CX06	Quartzito	23.5	93.8	27,3	3536	III
18	A35CX06	Quartzito	24.0	103.0	56,7	3069	III
19	A36CX06	Quartzito	24.5	97.0	27,3	3430	III
20	A40CX34	Filito sericítico	121.3	25.2	5,1	2484	V
21	A41CX35	Filito sericítico	122.6	10.4	x	4122	IV

Observações

- I - Ruptura paralela à foliação (cerca de 45 graus de mergulho).
- II - Ruptura em direção oblíqua à foliação.
- III - Ruptura na rocha intacta.
- IV - Ruptura se inicia segundo a foliação, e termina segundo plano aleatório.
- V - Ruptura segundo a foliação.

- Ensaio de 1 a 11, furo de sonda 02 de 1982.
- Ensaio de 12 a 14, furo de sonda 03 de 1982.
- Ensaio de 15 a 21, furo de sonda 02 de 1985.

Tabela V.5 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 03 - 1984

Ensaio No	Amostra Caixa	Tipo de Rocha	Intervalo	Força (kgf)	Diâmetro (cm)	Espessura (cm)	Tração (MPa)	Observações
1	A56 CX55	Itabirito dolomítico	198.60	290	5.417	3.265	14.7	I
2	A56 CX55	Itabirito dolomítico	198.60	270	5.422	2.207	20.2	I
3	A58 CX55	Itabirito dolomítico	200.00	180	5.418	2.557	11.6	II
4	A58 CX55	Itabirito dolomítico	200.00	150	5.422	2.305	10.7	II
5	A58 CX55	Itabirito dolomítico	200.00	180	5.425	2.213	13.4	II
6	A58 CX55	Itabirito dolomítico	200.00	200	5.423	2.517	13.1	II
7	A59 CX55	Itabirito dolomítico	200.50	200	5.415	3.308	10.0	III
8	A59 CX55	Itabirito dolomítico	200.50	110	5.422	2.742	6.6	II
9	A59 CX55	Itabirito dolomítico	200.50	250	5.42	3.22	12.8	II
10	A59 CX55	Itabirito dolomítico	200.50	190	5.42	2.923	10.7	II
11	A60 CX56	Itabirito dolomítico	201.00	130	5.405	2.277	9.5	IV
12	A60 CX56	Itabirito dolomítico	201.00	260	5.418	3.197	13.4	I
13	A60 CX56	Itabirito dolomítico	201.00	190	5.41	2.763	11.4	II
14	A60 CX56	Itabirito dolomítico	201.00	110	5.408	1.892	9.6	III
15	A60 CX56	Itabirito dolomítico	201.00	150	5.412	2.433	10.2	II
16	A60 CX56	Itabirito dolomítico	201.00	240	5.417	2.823	14.0	V
17	A60 CX56	Itabirito dolomítico	201.00	160	5.41	2.042	12.7	II
18	A61 CX56	Itabirito dolomítico	202.00	310	5.425	3.225	15.9	I
19	A61 CX56	Itabirito dolomítico	202.00	240	5.418	3.543	11.2	II
20	A67 CX58	Itabirito dolomítico	208.50	170	5.448	3.438	8.1	II
21	A67 CX58	Itabirito dolomítico	208.50	120	5.453	1.913	10.1	II
22	A67 CX58	Itabirito dolomítico	208.50	250	5.45	3.497	11.7	II

Observações

- I - Ruptura aproximadamente segundo plano diametral. Superfície curva acompanhando o plano.
- II - Superfície plana quase diametral alinhada com acamamento.
- III - Superfície plana diametral alinhada com acamamento.
- IV - Superfície plana quase diametral alinhada com acamamento, um pouco fora da diagonal.
- V - Superfície plana quase diametral, não se observa acamamento.

Tabela V.6 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 09 - 1985

Ensaio No	Amostra Caixa	Tipo de Rocha	Intervalo	Força (kgf)	Diâmetro (cm)	Espessura (cm)	Tração (MPa)	Observações
1	A43CX21	Itabirito dolomítico	71.00	140	5.443	2.740	8.4	I
2	A44CX21	Itabirito dolomítico	75.00	400	5.458	3.415	19.2	II
3	A44CX21	Itabirito dolomítico	75.00	200	5.453	2.965	11.1	II
4	A45CX21	Itabirito dolomítico	77.50	220	5.455	2.318	15.6	II
5	A45CX21	Itabirito dolomítico	77.50	200	5.442	2.210	14.9	II
6	A47CX22	Itabirito dolomítico	78.00	160	5.455	2.688	9.8	II
7	A50CX23	Itabirito dolomítico	80.80	155	5.413	2.233	11.2	II
8	A51CX23	Itabirito dolomítico	81.40	240	5.392	2.907	13.7	III
9	A51CX23	Itabirito dolomítico	81.40	85	5.405	2.252	6.1	I
10	A51CX23	Itabirito dolomítico	81.40	90	5.395	2.497	6.0	I

Observações

- I - Rompeu segundo (plano de fraqueza), ruptura favorecida por plano de fraqueza.
- II - Ruptura aproximadamente no plano diametral.
- III - Superfície aproximadamente planar se afastando do plano diametral, sentido perpendicular ao plano de fraqueza.

Tabela V.7 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 02 - 1982

Ensaio N°	Amostra Caixa	Tipo de Rocha	Faixa de Intervalo *	Força (kgf)	Diâmetro (cm)	Espessura (cm)	Tração (MPa)	Observações
1	A01CX83	filito sericítico	246.60	60	5.443	3.433	2.9	I
2	A02CX82	filito sericítico	241.80	60	5.415	2.495	4.0	I
3	A04CX60	quartzo xisto	164.50	125	7.552	2.55	5.7	II
4	A04CX60	quartzo xisto	164.50	120	7.587	2.938	4.8	II
5	A04CX60	quartzo xisto	164.50	80	7.582	3.013	3.1	II
6	A04CX60	quartzo xisto	164.50	45	7.583	3.067	1.7	II
7	A05CX59	quartzo xisto	162.80	265	7.602	3.703	8.4	III
8	A05CX59	quartzo xisto	162.80	200	7.6	3.847	6.1	III
9	A06CX59	quartzo xisto	162.80	190	7.602	3.025	7.2	IV
10	A07CX59	quartzo xisto	161.00	115	7.595	2.38	5.6	IV
11	A07CX59	quartzo xisto	161.00	170	7.582	3.067	6.4	IV
12	A08CX57	quartzo xisto + fino	157.80	75	7.565	3.508	2.5	II
13	A08CX57	quartzo xisto + fino	157.80	130	7.563	3.178	4.8	III
14	A11CX49	quartzo xisto	136.00	145	7.587	2.62	6.4	IV
15	A11CX49	quartzo xisto	136.00	180	7.587	2.865	7.2	IV
16	A20CX15	quartzito	41.50	55	7.582	2.45	2.6	III
17	A20CX15	quartzito	41.50	60	7.585	2.312	3.0	III
18	A20CX15	quartzito	41.50	90	7.582	2.885	3.7	III
19	A20CX15	quartzito	41.50	100	7.583	2.952	4.0	III
20	A21CX15	quartzito	40.30	80	7.583	2.822	3.3	III

Observações

- I - Rompeu-se segundo a foliação (cerca de 45 graus de mergulho).
- II - Ruptura segundo a superfície de foliação.
- III - Ruptura por tração segundo plano diametral.
- IV - Rompeu segundo a superfície que se aproxima do plano diametral.

* Como não se sabe qual é o topo ou a base a faixa de intervalo foi dividida em subamostras.

Tabela V.8 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 03 - 1982

Ensaio No	Amostra Caixa	Tipo de Rocha	Intervalo	Força (kgf)	Diâmetro (cm)	Espessura (cm)	Tração (MPa)	Observações
1	A24CX28	filito sericítico	77.70	90	7.587	3.218	3.3	*
2	A26CX31	filito sericítico	85.70	45	7.568	2.265	2.3	*
3	A26CX31	filito sericítico	85.70	60	7.573	1.967	3.6	*
4	A26CX31	filito sericítico	85.70	185	7.572	2.815	7.8	*
5	A30CX34	filito sericítico	93.20	140	7.587	3.623	4.6	*
6	A30CX34	filito sericítico	93.20	80	7.575	2.387	4.0	*
7	A30CX34	filito sericítico	93.20	90	7.585	2.45	4.3	*

Observações

- * Rompeu-se segundo a foliação (cerca de 45 graus de mergulho).

Tabela V.9 - Ensaio de Tração do Furo de Sonda 02 - 1985

Ensaio No	Amostra Caixa	Tipo de Rocha	Intervalo	Força (kgf)	Diâmetro (cm)	Espessura (cm)	Tração (MPa)	Observações
1	A33CX06	quartzito	23.00	300	7.6	2.975	11.9	I
2	A33CX06	quartzito	23.00	220	7.6	2.855	9.1	I
3	A34CX06	quartzito	23.50	90	7.107	3.222	3.4	I
4	A35CX06	quartzito	24.00	175	7.608	3.193	6.3	I
5	A35CX06	quartzito	24.00	210	7.585	3.34	7.4	I
6	A35CX06	quartzito	24.00	130	7.592	3.645	4.2	I
7	A35CX06	quartzito	24.00	310	7.593	3.583	10.2	I
8	A36CX06	quartzito	24.50	75	7.61	3.35	2.6	I
9	A42CX35	filito sericítico	125.20	70	5.427	3.185	3.6	II

Observações

- I - Ruptura por tração segundo plano diametral.
 II - Rompeu-se segundo a foliação (cerca de 45 graus de mergulho).

Tabela V.10 - Densidade das amostras.

Massa do Picnômetro (26,66g)									Massa do Picnômetro + Água (94,07)							
Material ensaiado	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3			Ensaio 4			Ensaio 5			Média da densidade
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Itabirito Dolomítico A60CX56	34,42	99,99	3,22	39,17	103,73	3,39	42,21	106,03	3,33	43,63	107,15	3,36	36,13	101,32	3,27	3,31
Itabirito Dolomítico A50CX23	35,95	100,80	2,63	39,59	103,49	2,68	35,65	100,61	2,67	36,61	101,24	2,58	37,37	101,83	2,63	2,64
Itabirito Dolomítico A45CX21	36,56	101,44	2,91	34,24	99,73	2,95	35,27	100,50	2,95	33,76	99,37	2,94	32,44	98,38	2,93	2,94
Itabirito Dolomítico A67CX58	37,59	101,96	2,60	39,06	103,11	2,69	37,26	101,78	2,67	41,98	105,26	2,71	36,68	101,40	2,72	2,68
Quartzito A16CX16	31,38	96,96	1,58	34,70	99,00	1,59	33,11	98,01	1,57	34,61	98,91	1,56	32,69	97,80	1,62	1,58
Quartzo Xisto A13CX45	36,48	100,22	1,68	41,47	103,26	1,64	40,88	102,90	1,64	34,26	98,70	1,56	31,99	97,17	1,63	1,63
Filito Sericítico	32,01	97,45	1,72	33,84	98,61	1,72	33,96	98,73	1,77	34,12	98,76	1,69	34,28	98,88	1,71	1,72
A=picnômetro + minério (g)						B=picnômetro+minério+água (g)						C=densidade aparente				

5.3 – Itabirito dolomítico

O itabirito dolomítico apresenta cor cinza médio, com níveis de dolomita muito nítidos.

O itabirito dolomítico é uma rocha dura, com uma resistência a ruptura em compressão uniaxial média de 200 MPa. Para o furo de sonda 03 de 1984 foram realizados 13 ensaios de compressão uniaxial; as amostras se romperam de forma explosiva (estouraram). A figura 5.3.1 mostra amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial, ver na foto pedaços da amostra depois de rompida em compressão uniaxial. A resistência a compressão uniaxial do itabirito dolomítico variou entre 100 e 300 MPa, sendo que 38% destes valores estão entre 200 e 240 MPa. Ver tabela V.3. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.3.2.

As curvas tensão x deformação específica foram traçadas, figura 5.3.3, 5.3.4 e 5.3.5, respectivamente para valores de resistência a ruptura menores que 150 MPa, acima de 150 MPa e entre 110 e 216 MPa. O módulo de elasticidade, ver tabela V.3, relativa a furo de sonda 03 de 1984 variou entre 50 e 400 GPa e 41% dos valores estão entre 92 e 156 GPa. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.3.6.

A velocidade da onda longitudinal, tabela V.11, variou entre 4650 e 6250 m/s, foram feitas 10 medidas, 3 medidas estão entre 5196 e 5456 m/s e 4 entre 5716 e 5976 m/s. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.3.7.

Para o furo de sonda 09 de 1985 foram realizados cinco ensaios. Os valores de resistência a ruptura em compressão uniaxial estão dentro da mesma faixa de valores, primeiros resultados na tabela V.3, ensaio número 1 a 5.

Todas as amostras submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (18 amostras) romperam de forma explosiva.

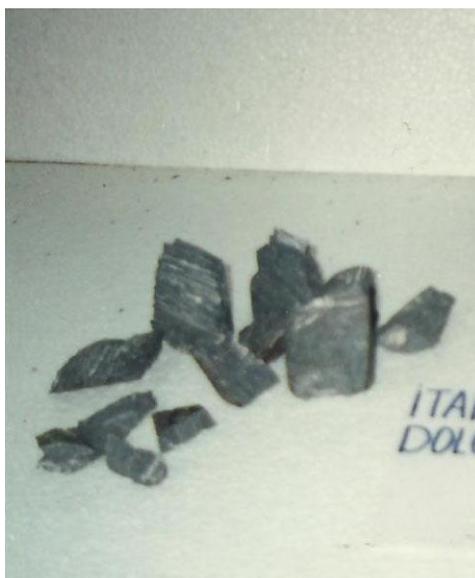


Figura 5.3.1 - Ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico (foto).

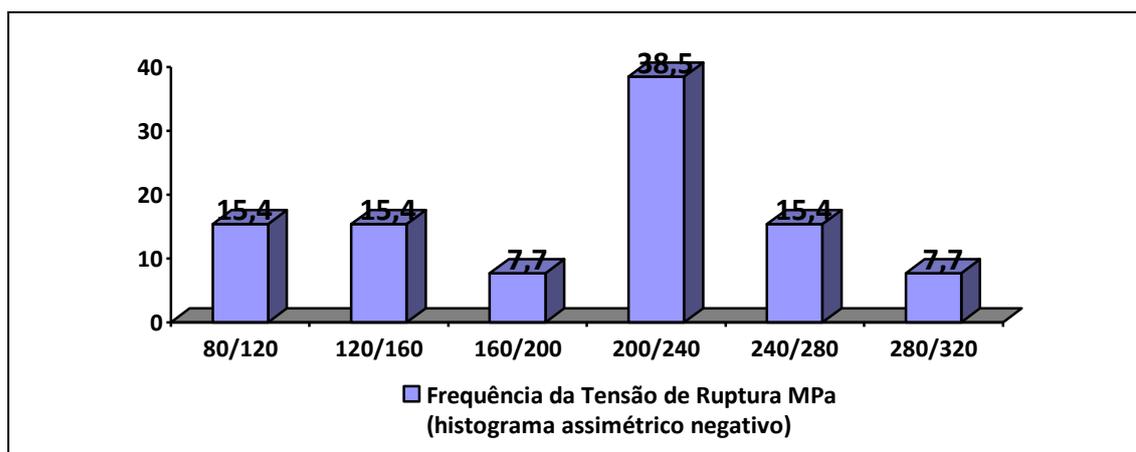


Figura 5.3.2 - Histograma dos valores de tensão para o ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico, furo de sonda 03 (1984).

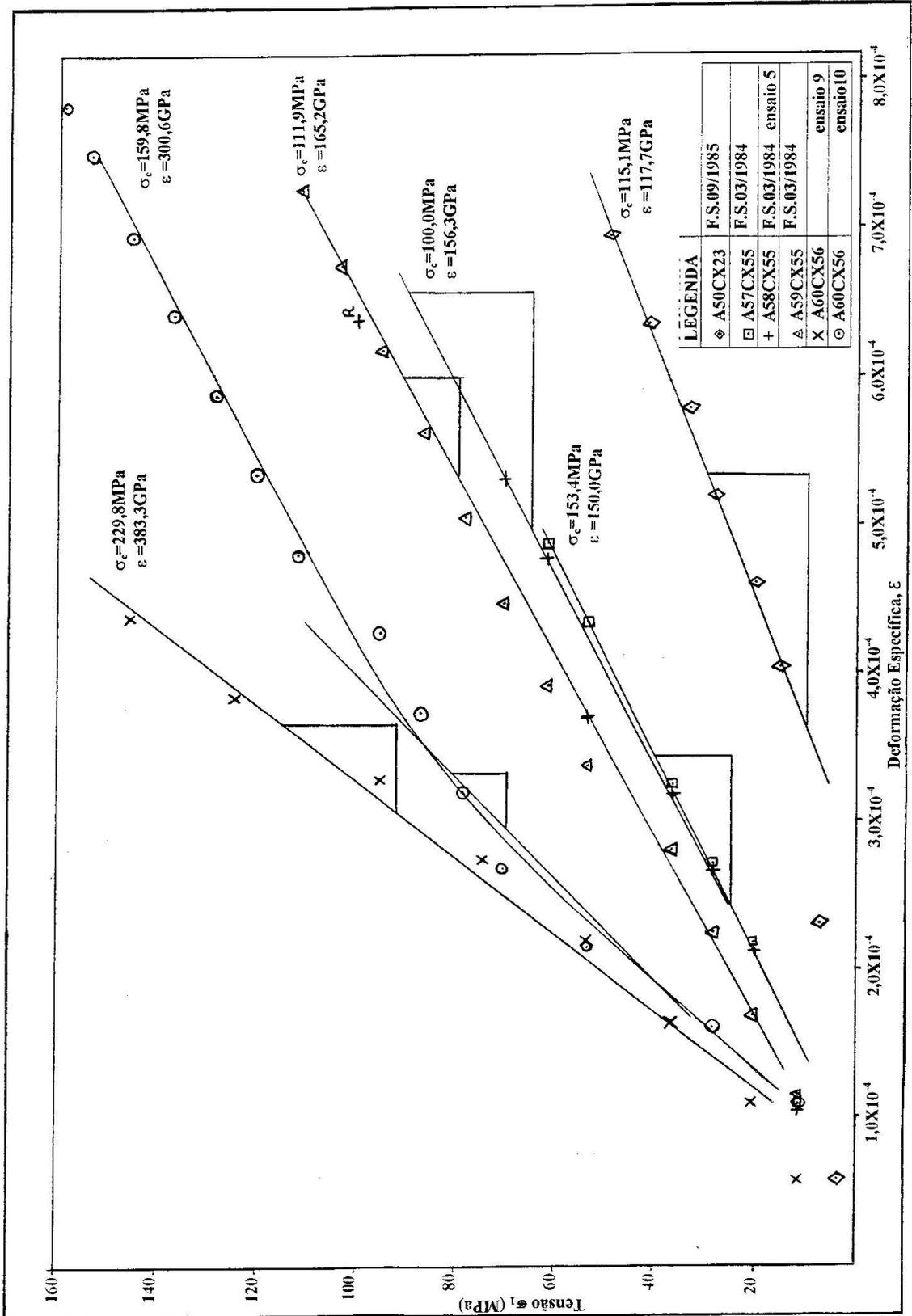


Figura 5.3.3 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico.

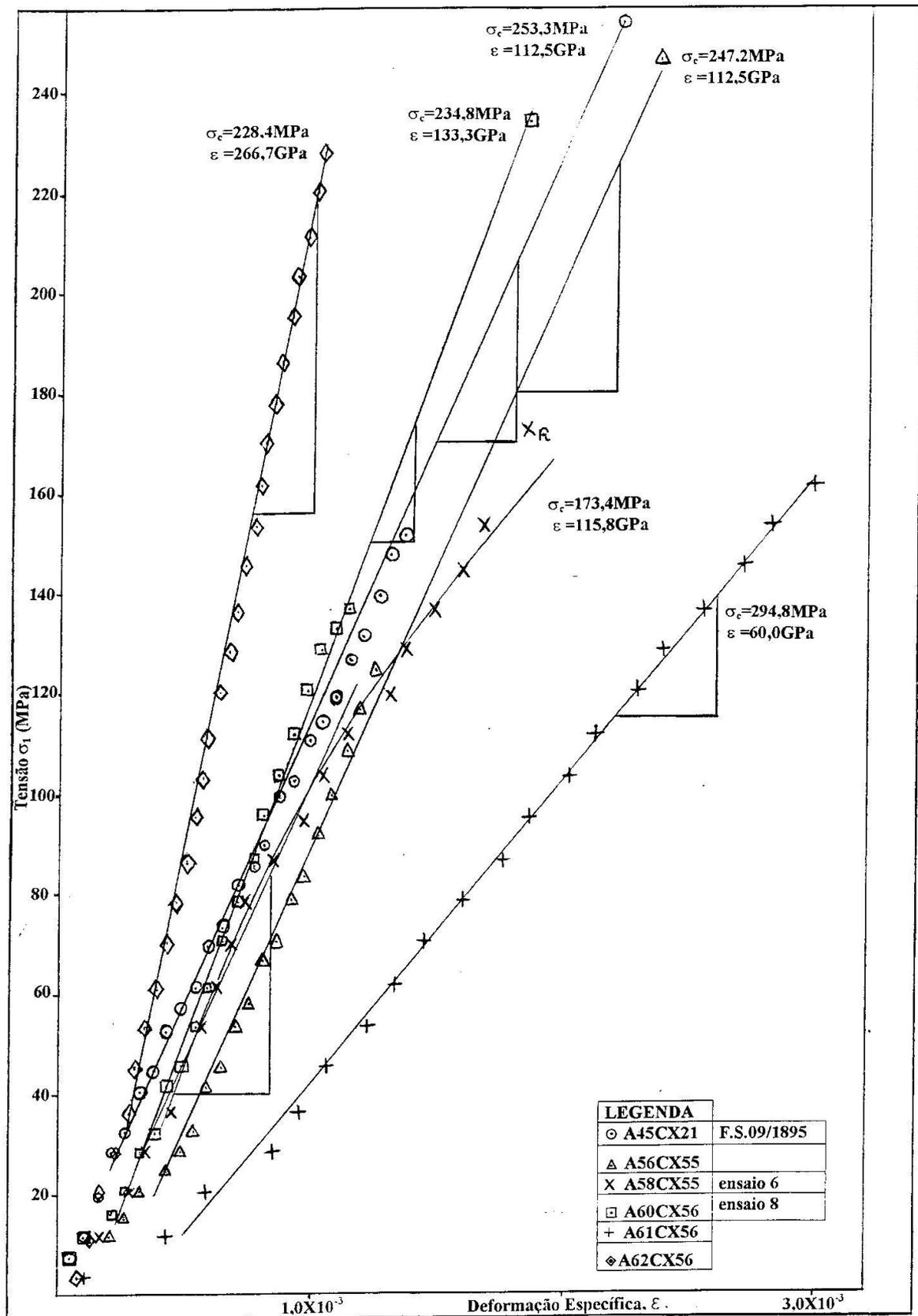


Figura 5.3.4 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico.

A curva tensão x deformação específica foi traçada, figura 5.3.5, para valor de resistência a ruptura entre 110 e 216 MPa.

O módulo de elasticidade, ver tabela V.3, relativa a furo de sonda 03 de 1984 variou entre 50 e 400 GPa e 41% dos valores estão entre 92 e 156 GPa. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.3.6.

A velocidade da onda longitudinal, tabela V.11, variou entre 4650 e 6250 m/s, foram feitas 10 medidas, 3 medidas estão entre 5196 e 5456 m/s e 4 entre 5716 e 5976 m/s. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.3.7.

Para o furo de sonda 09 de 1985 foram realizados cinco ensaios. Os valores de resistência a ruptura em compressão uniaxial estão dentro da mesma faixa de valores, primeiros resultados na tabela V.3, ensaio número 1 a 5.

Todas as amostras submetidas ao ensaio de compressão uniaxial (18 amostras) romperam de forma explosiva.

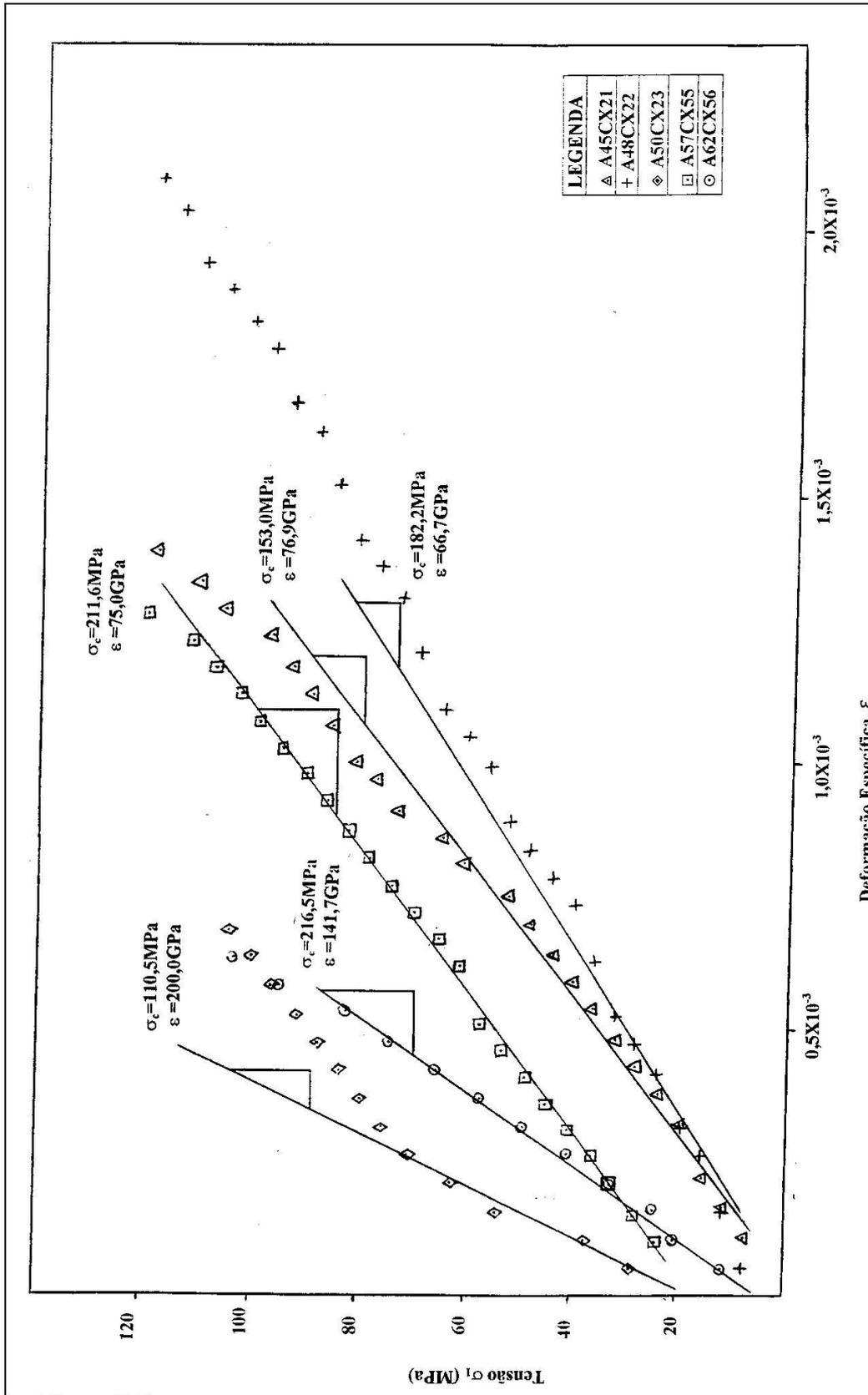


Figura 5.3.5 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Itabirito dolomítico.

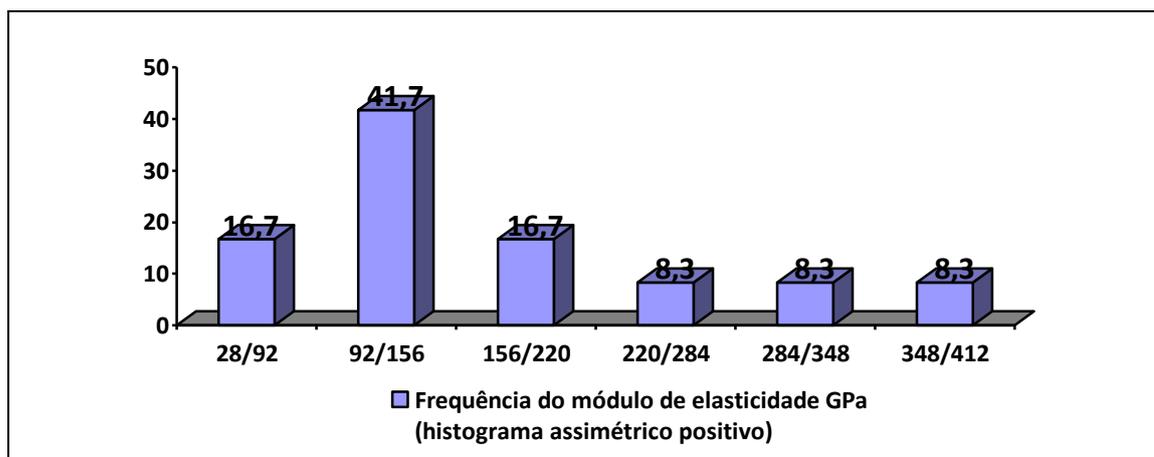


Figura 5.3.6 - Histograma do módulo de elasticidade. Itabirito dolomítico, furo de sonda 03 (1984).

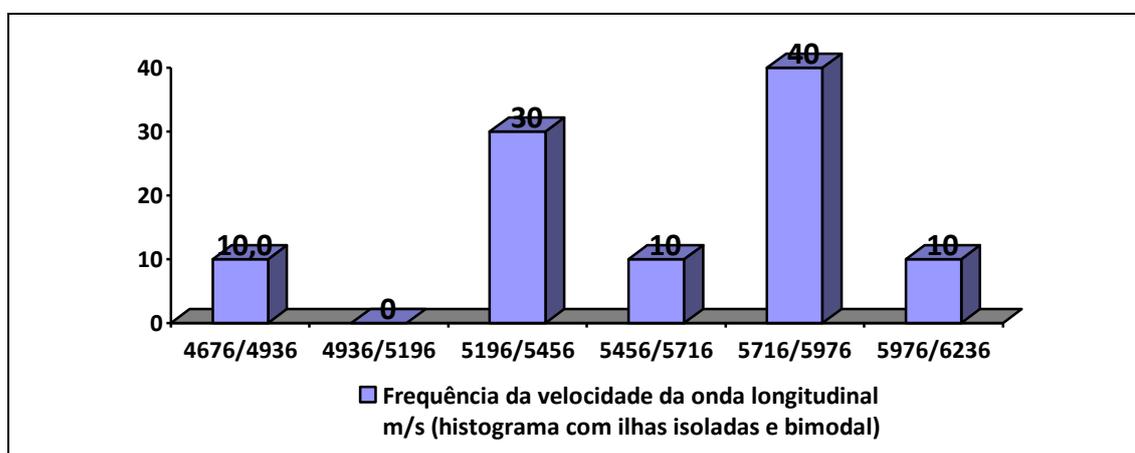


Figura 5.3.7 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Itabirito dolomítico, furo de sonda 03 (1984).

A amostra A54CX23 do furo de sonda 09 de 1985 rompeu por cisalhamento, com um valor de resistência a ruptura em compressão uniaxial de 60 MPa (rocha de resistência média), este valor está abaixo dos valores encontrados para o mesmo furo de sonda e também para o furo de sonda 03 de 1984. O tempo gasto para o ensaio até a ruptura foi pequeno (menos de 4 minutos) e a amostra não apresentou deformação, ou seja, o ponteiro do relógio comparador não se deslocou, figura 5.3.8.

A resistência à tração foi determinada através do ensaio brasileiro. A ruptura se deu no plano diametral, em todos os casos. A figura 5.3.9 mostra foto com amostra submetida a ensaio brasileiro. Para o furo de sonda 03 de 1984 foram realizados 22 ensaios. Ver tabela V.5. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.3.10.a. A resistência a tração variou entre 6 e 20 MPa, 77% dos valores estão na faixa de 8 a 14 MPa. Para o furo de sonda 09 de 1985 foram realizados 10 ensaios. Ver tabela V.6. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.3.10.b. A resistência a tração variou entre 6 e 20 MPa e 30% dos valores estão entre 13 e 16 MPa. Comparando os valores de resistência à tração dos dois furos, verificou-se que apresentaram pequenas diferenças, pouco significativas. A figura 5.3.11 mostra o perfil da superfície de ruptura de uma amostra submetida a ensaio brasileiro.

A densidade das amostras de rocha foi encontrada através do método do picnômetro e obtiveram-se os seguintes valores: 2,75 g/cm³ média amostras: A45cx21, A50cx23 e A67cx58; 3,31 g/cm³ amostra A60cx56. Os resultados dos testes realizados para determinação do peso específico são apresentados na tabela V.10.

Os dados apresentados nas tabelas V.14, V.15, V.16 e V.17 são resultados de dois ensaios de compressão uniaxial para o itabirito dolomítico, referente ao furo de sonda 09 de 1985 A45CX21 e furo de sonda 03 de 1984 A60CX56 respectivamente.

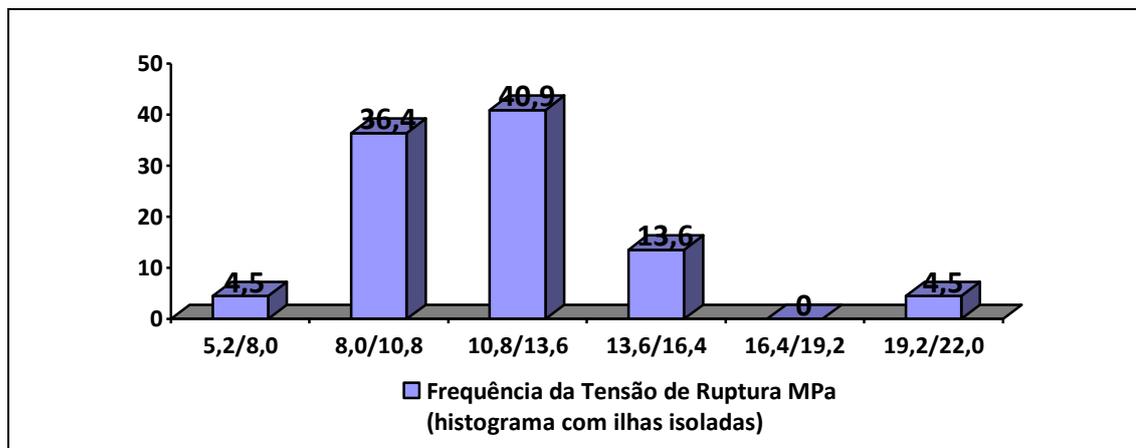


Figura 5.3.8 - Foto de amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial (rompeu por cisalhamento).



Figura 5.3.9 - Foto de amostra submetida a ensaio brasileiro. Itabirito dolomítico.

a. Furo de sonda 03 (1984)



b. Furo de sonda 09 (1985)

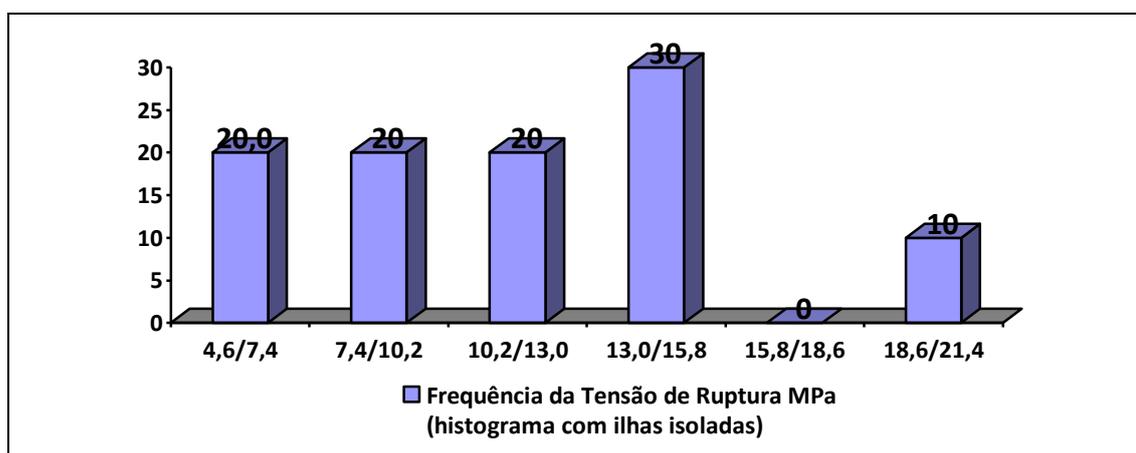


Figura 5.3.10 - Histograma dos valores de resistência a ruptura obtidos no ensaio brasileiro, Itabirito dolomítico. a) Furo de sonda 03 (1984) 22 ensaios. b) Furo de sonda 09 (1985) 10 ensaios

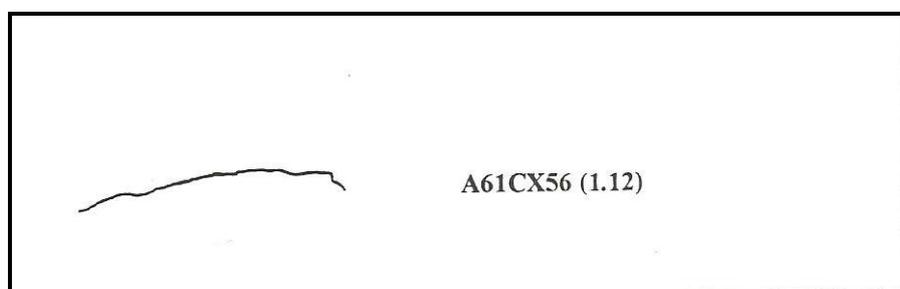


Figura 5.3.11 - Perfil da superfície de ruptura de amostra submetida a ensaio brasileiro. Itabirito dolomítico.

Tabela V.14 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o itabirito dolomítico, referente ao furo de sonda 09 de 1985.

Identificação: ensaio 1	A45 CX21	Origem	MBR		
Diâmetro (mm)	54.50	54.55	54.50	Média	54.52
Altura (mm)	123.60	123.65	123.50	Média	123.58
Altura entre anéis (mm)	98.70	99.15	99.75	99.55	99.2
L Médio	91.62				
Área de topo (m ²)	0.0023		Relação L/D		2.27
Tempo médio propagação de onda longitudinal (microseg.)					18.3
Velocidade da onda longitudinal (m/s)			6753		
Conteúdo de água na amostra durante o teste			Seca	Amostra retificada	
Leitura do manômetro na ruptura		62700			
Força de Ruptura (kgf)		60326			
Tensão de Ruptura (MPa)		253.27			
Tempo do ensaio (s) (até a ruptura)	656	Velocidade de carregamento (kgf/s)		91.96	
		Velocidade de carregamento (MPa/s)		0.39	
Tempo do ensaio (s) (até a leitura 38000)	264	Velocidade de carregamento (kgf/s)		136.82	
		Velocidade de carregamento (MPa/s)			
Observações	Ruptura violenta (estouro)				

Tabela V.15 - Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o itabirito dolomítico, referente ao furo de sonda 09 de 1985.

N° Leitura	Leitura Manômetro	Carga Corrigida (kgf)	Tensão (MPa)	Deformação Axial (mm)	Deformação Específica
1	2000	840.00	3.53	0.000	0.00E+00
2	3000	1820.00	7.64	0.005	5.46E-05
3	4000	2800.00	11.76	0.010	1.09E-04
4	6000	4760.00	19.98	0.015	1.64E-04
5	8000	6720.00	28.21	0.020	2.18E-04
6	9000	7700.00	32.33	0.025	2.73E-04
7	11000	9660.00	40.56	0.030	3.27E-04
8	12000	10640.00	44.67	0.035	3.82E-04
9	14000	12600.00	52.90	0.040	4.37E-04
10	15000	13580.00	57.01	0.045	4.91E-04
11	16000	14560.00	61.13	0.050	5.46E-04
12	18000	16520.00	69.36	0.055	6.00E-04
13	19000	17500.00	73.47	0.060	6.55E-04
14	21000	19460.00	81.70	0.065	7.09E-04
15	22000	20440.00	85.81	0.070	7.64E-04
16	23000	21420.00	89.93	0.075	8.19E-04
17	25000	23380.00	98.16	0.080	8.73E-04
18	26000	24360.00	102.27	0.085	9.28E-04
19	28000	26320.00	110.50	0.090	9.82E-04
20	29000	27300.00	114.61	0.095	1.04E-03
21	30000	28280.00	118.73	0.100	1.09E-03
22	32000	30240.00	126.96	0.105	1.15E-03
23	33000	31220.00	131.07	0.110	1.20E-03
24	35000	33180.00	139.30	0.115	1.26E-03
25	37000	35140.00	147.53	0.120	1.31E-03
26	38000	36120.00	151.64	0.125	1.36E-03

Tabela V.16 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o itabirito dolomítico, referente ao furo de sonda 03 de 1984.

Identificação: ensaio 8	A60 CX56	Origem	MBR		
Diâmetro (mm)	54.30	54.10	54.20	Média	54.20
Altura (mm)	131.35	131.10	131.35	Média	131.27
Altura entre anéis (mm)	99.85	99.60	99.00		
L Médio	91.83				
Área de topo (m ²)	0.0023		Relação L/D		2.42
Tempo médio propagação de onda longitudinal (microseg.)					22.5
Velocidade da onda longitudinal (m/s)					5834
Conteúdo de água na amostra durante o teste	Seca	Amostra retificada			
Leitura do manômetro na ruptura	56400				
Força de Ruptura (kgf)	55270.88				
Tensão de Ruptura (MPa)	234.77				
Tempo do ensaio (s)	1226	Velocidade de carregamento (kgf/s)	45.08		
(até a ruptura)		Velocidade de carregamento (MPa/s)	0.19		
Observações	Ruptura violenta (estouro)				

Tabela V.17 - Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o itabirito dolomítico, referente ao furo de sonda 03 de 1984.

No Leitura	Leitura Manômetro	Carga corrigida (kgf)	Tensão (MPa)	Deformação Axial (mm)	Deformação Específica
1	2000	840.00	3.57	0.0	0.00E+00
2	3000	1820.00	7.73	0.0050	5.44E-05
3	4000	2800.00	11.89	0.0100	1.09E-04
4	5000	3780.00	16.06	0.0200	2.18E-04
5	6000	4760.00	20.22	0.0250	2.72E-04
6	8000	6720.00	28.54	0.0300	3.27E-04
7	9000	7700.00	32.71	0.0350	3.81E-04
8	11000	9660.00	41.03	0.0400	4.36E-04
9	12000	10640.00	45.19	0.0450	4.90E-04
10	14000	12600.00	53.52	0.0500	5.44E-04
11	16000	14560.00	61.84	0.0550	5.99E-04
12	18000	16520.00	70.17	0.0600	6.53E-04
13	20000	18480.00	78.49	0.0650	7.08E-04
14	22000	20440.00	86.82	0.0700	7.62E-04
15	24000	22400.00	95.14	0.0750	8.17E-04
16	26000	24360.00	103.47	0.0800	8.71E-04
17	28000	26320.00	111.80	0.0850	9.26E-04
18	30000	28280.00	120.12	0.0900	9.80E-04
19	32000	30240.00	128.45	0.0950	1.03E-03
20	33000	31220.00	132.61	0.1000	1.09E-03
21	34000	32200.00	136.77	0.1050	1.14E-03

5.4 – Quartzo-xisto

O quartzo-xisto é uma rocha de resistência branda a média.

A ruptura em compressão uniaxial se deu, em todas as amostras, em direção paralela à foliação, a foliação ocorre com cerca de 45 graus de mergulho nas amostras obtidas. Os resultados são apresentados na tabela V.4, ensaio 1 a 6 e 11, relativo a furo de sonda 02 de 1982. Foram realizados 7 ensaios. O quartzo-xisto apresenta granulometria fina, cor cinza amarelado/rosado/esbranquiçado. As figuras 5.4.1, 5.4.2. e 5.4.3 são de amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Nota-se, nas amostras mais esbranquiçadas (ensaio no. 1 e 6), ver figura 5.4.2., a presença de grãos escuros (cinza) e de granulometria maior que as demais; grau de alteração: medianamente alterado, com exceção das amostras (ensaio no. 1 e 6), que se encontram praticamente sãs.

A resistência a ruptura em compressão uniaxial do quartzo-xisto variou entre 10 e 100 MPa. O histograma é apresentado na figura 5.4.4.

As curvas tensão x deformação específica foram traçadas, ver figura 5.4.7.

Os perfis correspondentes foram obtidos com um perfilador, para as 7 amostras submetidas a compressão uniaxial, e podem ser vistos na figura 5.4.8, em escala. Os valores de JRC são bastante variáveis, entre 3 e 13.

O módulo de elasticidade, ver tabela V.4, variou entre 10 e 42 GPa e 43% destes valores estão entre 10,2 e 15,6 GPa. O histograma é apresentado na figura 5.4.5.

A velocidade da onda longitudinal para o quartzo-xisto variou entre 2400 e 5000 m/s. O histograma é apresentado na figura 5.4.6.



Figura 5.4.1 - Foto de três amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-xisto.

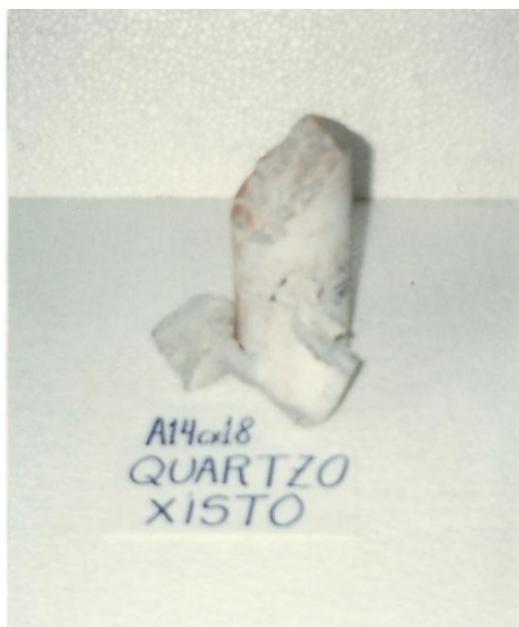


Figura 5.4.2 - Ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-xisto (foto).

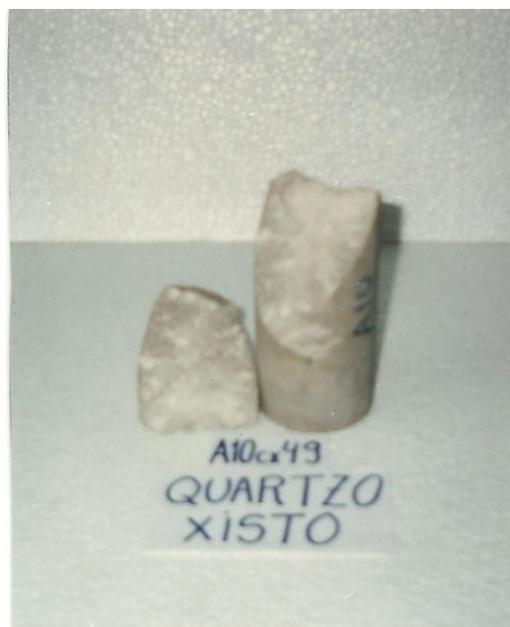


Figura 5.4.3 - Ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-xisto (foto).

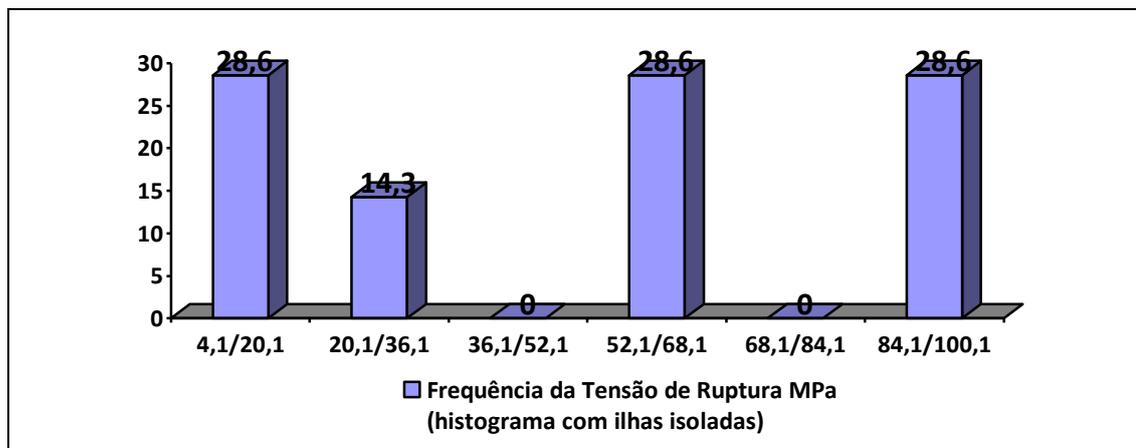


Figura 5.4.4 - Histograma dos valores de resistência a ruptura para ensaio de compressão uniaxial. Quartz-xisto. Furo de sonda 02 (1982).

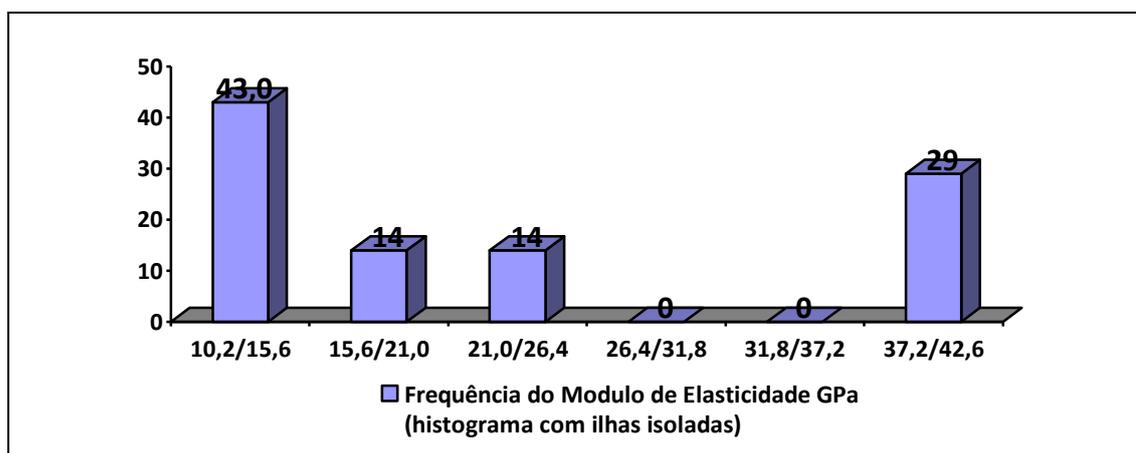


Figura 5.4.5 - Histograma do módulo de elasticidade. Quartz-xisto, furo de sonda 02 (1982).

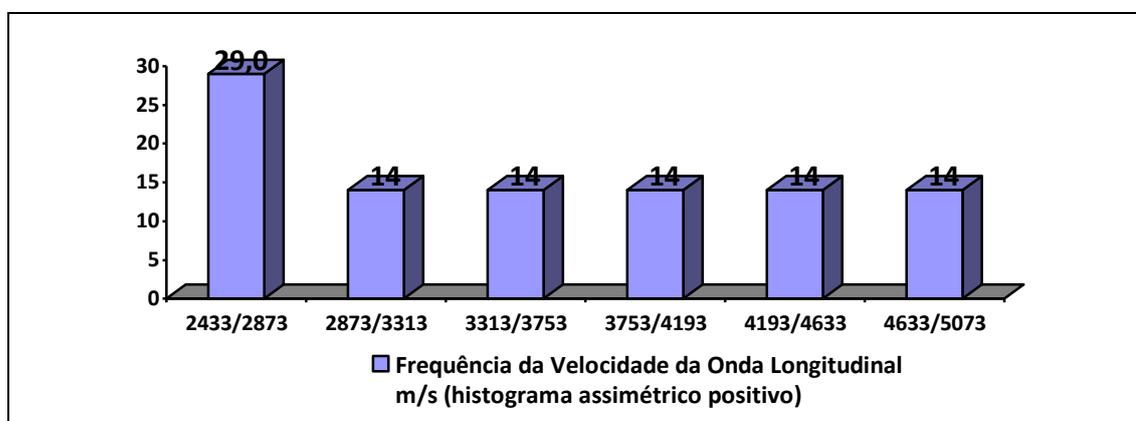


Figura 5.4.6 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Quartz-xisto, furo de sonda 02 (1982).

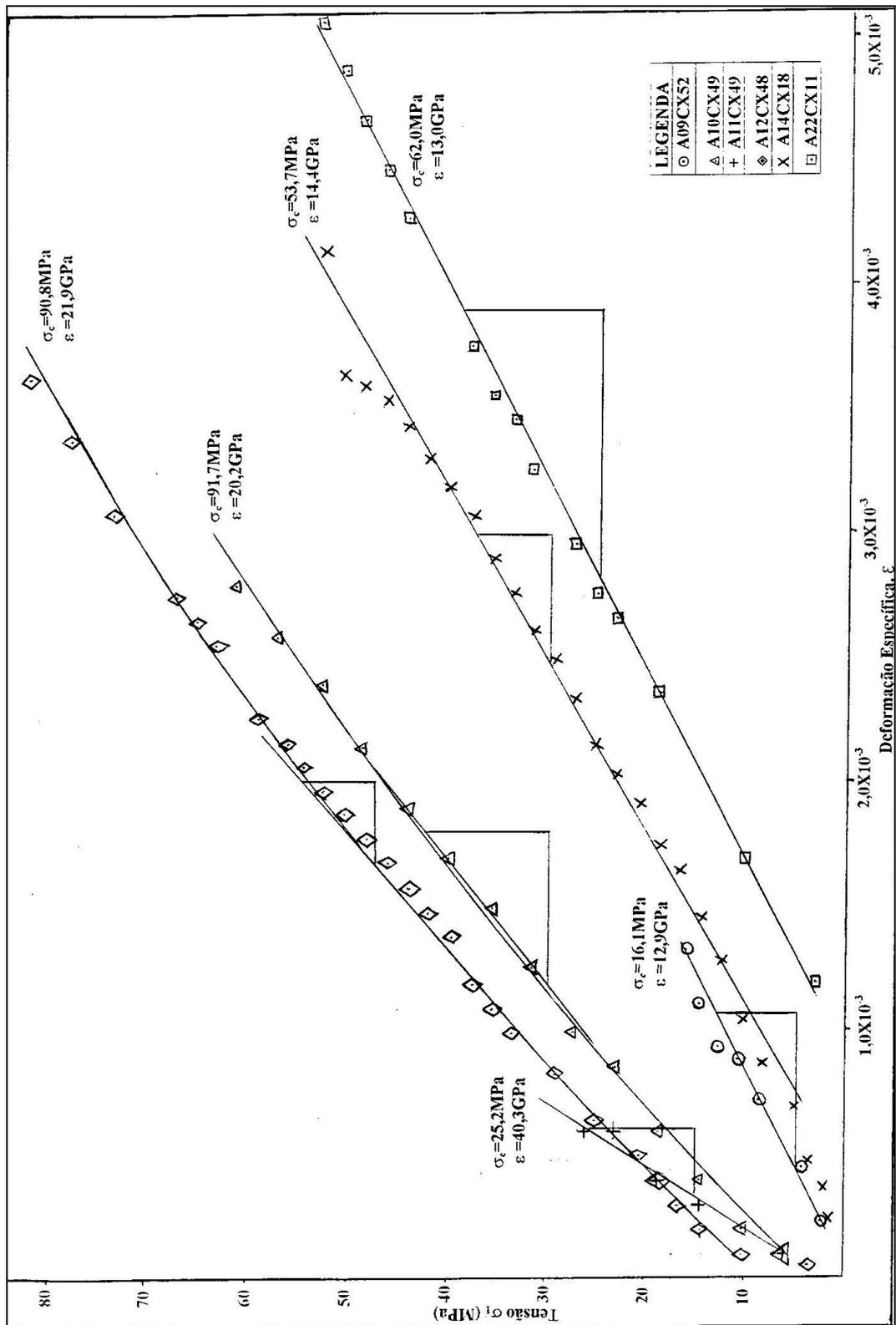


Figura 5.4.7 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Quartzos-xistos.

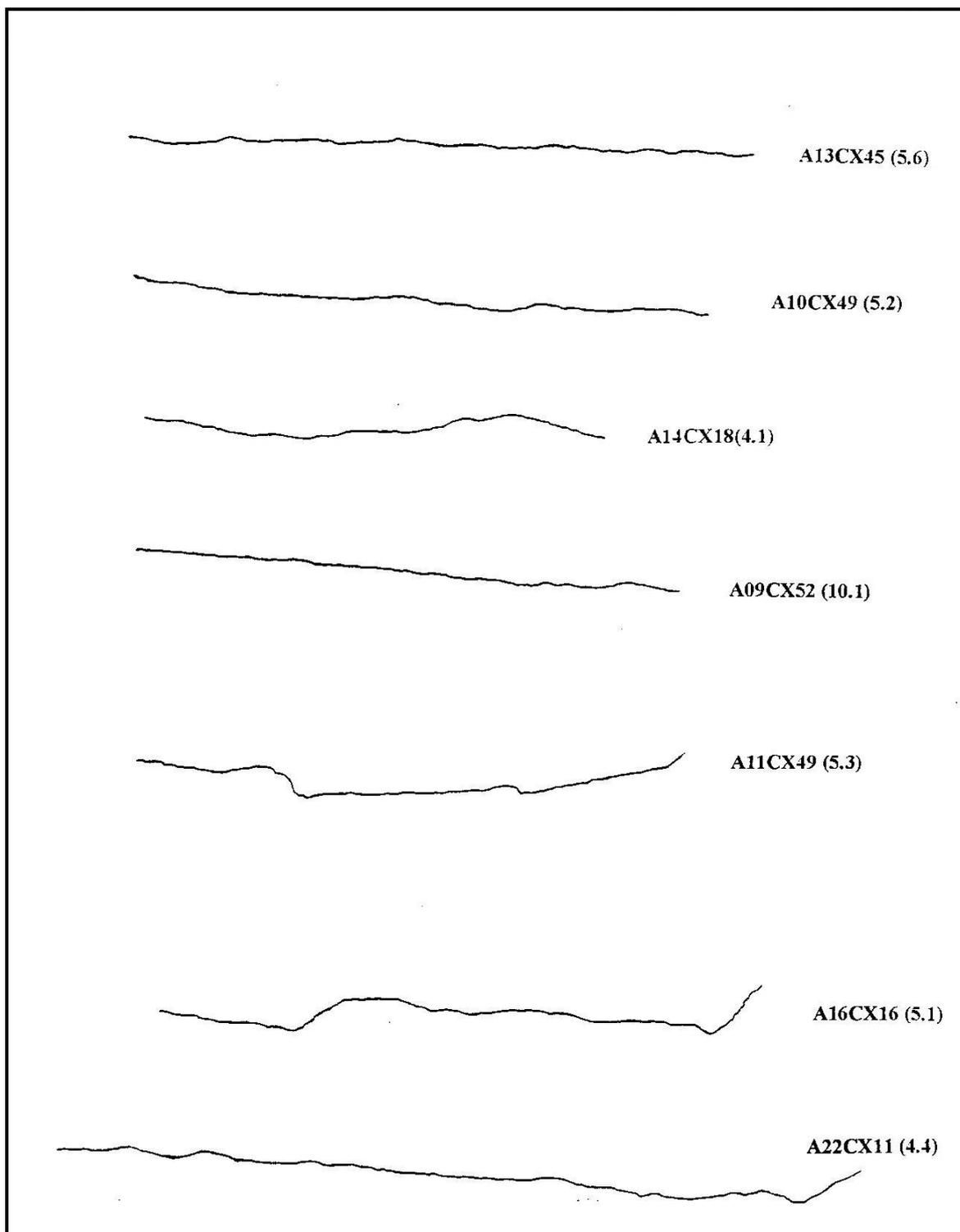


Figura 5.4.8 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-xisto.

Os resultados obtidos nos ensaios para determinação da resistência à tração são apresentados na tabela V.7, relativo a furo de sonda 02 de 1982. Na fase de avaliação dos resultados do ensaio de ruptura por tração e ensaio brasileiro, foram observadas características particulares que levaram a três descrições distintas: *Quartzo-xisto 1, 2 e 3*, ver figura 5.4.9. Estas descrições são apresentadas a seguir:

Quartzo-xisto 1 (ensaio no. 5, 6 e 12) : Apresenta cor cinza claro amarelado, rico em sericita, granulometria fina. A ruptura ocorreu segundo a superfície de foliação, o resultado obtido não é válido para determinação da resistência à tração.

Quartzo-xisto 2 (ensaio no. 3 e 4) : Cor cinza claro amarelado/rosado, apresentando partículas maiores do que o quartzo-xisto 1. Encontra-se fraturado. A ruptura ocorreu segundo a superfície de foliação, o resultado obtido não é válido para determinação da resistência à tração. Grau de alteração; baixo.

Quartzo-xisto 3 (ensaio no. 7 ao 11 e 13 ao 15, total 8 ensaios): Cor cinza rosado, apresenta granulometria maior que as anteriores (média). A foliação já não é muito nítida. Encontra-se praticamente sã. A ruptura ocorreu no plano diametral. E 62,5% destes valores estão entre 6 e 7,5 MPa. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.4.10.

Os perfis correspondentes foram obtidos com um perfilador. Para as amostras de quartzo-xisto 1 e 2, onde a ruptura ocorreu segundo a foliação, temos JRC entre 9 e 11. Para as amostras de quartzo-xisto 3, onde a ruptura ocorreu no plano diametral, temos JRC próximo a 19. Ver figura 5.4.11.

A densidade das amostras de rocha foi encontrada através do método do picnômetro e obteve-se o seguinte valor $1,63 \text{ g/cm}^3$ amostra A13cx45. Ver tabela V.10.

Os dados apresentados nas tabelas V.18, V.19, V.20 e V.21 são resultados de dois ensaios de compressão uniaxial para o quartzo-xisto, referente ao furo de sonda 02 de 1982, A09CX52 e A14CX18 respectivamente.



Figura 5.4.9 - Ensaio brasileiro para o quartzo-xisto 1, 2 e 3 (foto).

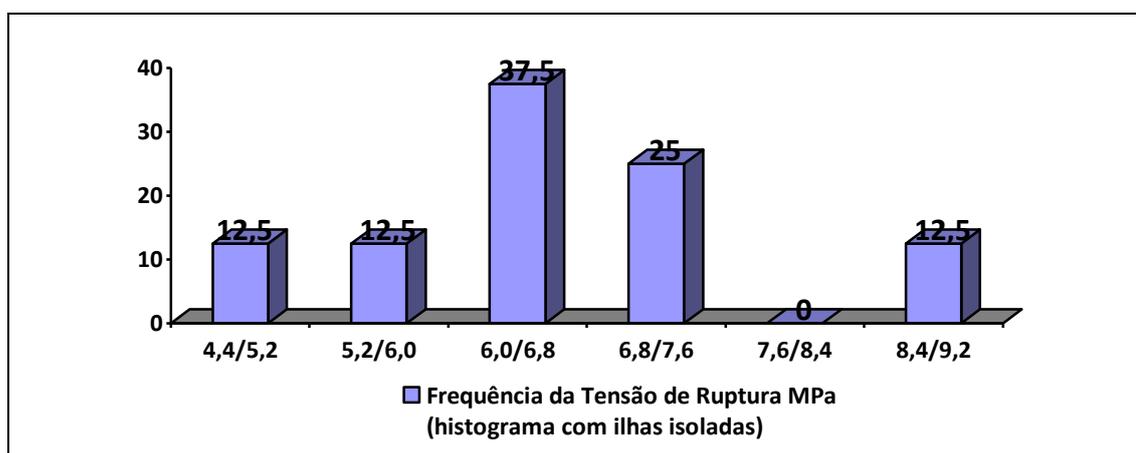


Figura 5.4.10 - Histograma dos valores de resistência a ruptura obtidos em ensaio brasileiro para o quartzo-xisto 3, furo de sonda 02 (1982).

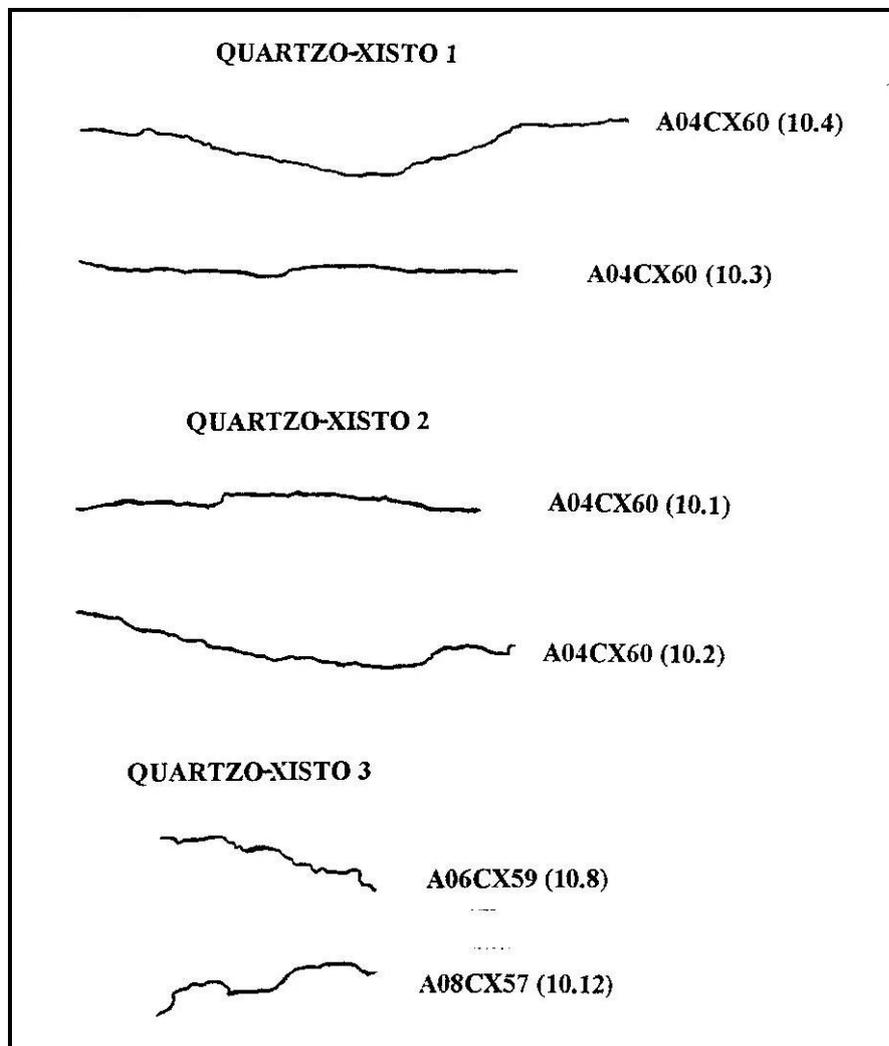


Figura 5.4.11 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio brasileiro. Quartz-xisto, furo de sonda 02 (1982).

Tabela V.18 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-xisto, referente ao furo de sonda 02 de 1982.

Identificação: ensaio 1	A9 CX52	Origem	MBR		
Diâmetro (mm)	75.90	75.95	75.85	75.80	75.80
Diâmetro médio (mm)	75.86				
Altura (mm)	161.30	161.60	161.15	161.25	161.40
Altura média (mm)	161.34				
Altura entre anéis (mm)	99.05	99.35	98.55	99.35	98.75
L médio (mm)	90.81				
Área de topo (m ²)	0.0045		Relação L/D		2.13
Tempos de propagação de onda longitudinal (microseg.)					
41.2	40.6	40.5	40.8	40.5	40.9
Tempo médio propagação de onda longitudinal (microseg.)					40.8
Velocidade da onda longitudinal (m/s)			3959		

Conteúdo de água na amostra durante o teste	Seca	Amostra retificada
---	------	--------------------

Leitura do manômetro na ruptura	7560
Força de Ruptura (kgf)	7423
Tensão de Ruptura (MPa)	16.09

Tempo do ensaio (s) (até a ruptura)	150	Velocidade de carregamento (kgf/s)	49.48
		Velocidade de carregamento (MPa/s)	0.11

Tabela V.19 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-xisto, referente ao furo de sonda 02 de 1982.

Observações					
Ruptura ao longo de um plano fraqueza sericítico “amarelado”					
No Leitura	Leitura Manômetro	Carga Corrigida (kgf)	Tensão (MPa)	Deformação Axial (mm)	Deformação Específica
1	1000	1059.33	2.30	0.020	2.20E-04
2	2000	2029.33	4.40	0.040	4.40E-04
3	4000	3969.33	8.61	0.065	7.16E-04
4	5000	4939.33	10.71	0.080	8.81E-04
5	6000	5909.33	12.81	0.085	9.36E-04
6	7000	6879.33	14.92	0.100	1.10E-03
7	7560	7422.53	16.09	0.120	1.32E-03

Tabela V.20 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-xisto, referente ao furo de sonda 02 de 1982.

Identificação: ensaio 6	A14 CX18	Origem	MBR		
Diâmetro (mm)	75.85	75.80	75.80	75.85	75.80
Diâmetro médio (mm)	75.82				
Altura (mm)	155.00	154.70	155.30	154.90	154.85
Altura média (mm)	154.95				
Altura entre anéis (mm)	94.70	93.85	94.35	94.55	94.55
L médio (mm)	86.20				
Área de topo (m ²)	0.0045	Relação L/D			2.04
Tempos de propagação de onda longitudinal (microseg.)					
57.7	57.3	56.6	56.6	56.7	56.5
Tempo médio de propagação da onda longitudinal (microseg.)					56.9
Velocidade da onda longitudinal (m/s)			2723		
Conteúdo de água na amostra durante o teste			Seca	Amostra não retificada	
Leitura do manômetro na ruptura		26400			
Força de Ruptura (kgf)		24752			
Tensão de Ruptura (MPa)		53.73			
Tempo do ensaio (s)	362	Velocidade de carregamento (kgf/s)	68.38		
(até a ruptura)		Velocidade de carregamento (MPa/s)	0.15		
Observações	Ruptura tanto na rocha intacta (grosseira ao tato) quanto ao longo do plano sericítico (sedoso ao tato).				

Tabela V.21 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-xisto, referente ao furo de sonda 02 de 1982.

No Leitura	Leitura Manômetro	Carga Corrigida (kgf)	Tensão (MPa)	Deformação Axial (mm)	Deformação Específica ($\Delta l/l$)
1	2000	840.00	1.82	0.020	2.32E-04
2	3000	1820.00	3.95	0.040	4.64E-04
3	4000	2800.00	6.08	0.060	6.96E-04
4	5000	3780.00	8.20	0.075	8.70E-04
5	6000	4760.00	10.33	0.090	1.04E-03
6	7000	5740.00	12.46	0.110	1.28E-03
7	8000	6720.00	14.59	0.125	1.45E-03
8	9000	7700.00	16.71	0.140	1.62E-03
9	10000	8680.00	18.84	0.150	1.74E-03
10	11000	9660.00	20.97	0.165	1.91E-03
11	12000	10640.00	23.09	0.175	2.03E-03
12	13000	11620.00	25.22	0.185	2.15E-03
13	14000	12600.00	27.35	0.200	2.32E-03
14	15000	13580.00	29.48	0.215	2.49E-03
15	16000	14560.00	31.60	0.225	2.61E-03
16	17000	15540.00	33.73	0.240	2.78E-03
17	18000	16520.00	35.86	0.250	2.90E-03
18	19000	17500.00	37.98	0.265	3.07E-03
19	20000	18480.00	40.11	0.275	3.19E-03
20	21000	19460.00	42.24	0.285	3.31E-03
21	22000	20440.00	44.37	0.295	3.42E-03
22	23000	21420.00	46.49	0.305	3.54E-03
23	24000	22400.00	48.62	0.310	3.60E-03
24	25000	23380.00	50.75	0.315	3.65E-03
25	26000	24360.00	52.87	0.355	4.12E-03

5.5 – Quartzito

Temos amostras de dois furos de sonda, furo de sonda 2 de 1982 e furo de sonda 2 de 1985. As amostras foram estudadas separadamente.

Foram realizados 4 ensaios para determinação da resistência a ruptura em compressão uniaxial do quartzito do furo de sonda 02 de 1982. Ver tabela V.4. Descrição das amostras: encontra-se fraturado, algumas amostras tem maior concentração em grãos de quartzo do que outras. A ruptura nos ensaios de compressão uniaxial se dá em direção oblíqua à da foliação. A resistência a compressão uniaxial do quartzito variou entre 13 e 37 MPa. Ver tabela V.4, ensaio 7 a 10. A figura 5.5.1 mostra uma foto de duas amostras rompidas. A velocidade da onda longitudinal varia entre 1091 e 3289 para o furo de sonda 02 de 1982 e varia entre 3069 e 4194 para o furo de sonda 02 de 1985. Apresenta uma velocidade de onda longitudinal média de 2042 m/s e módulo de elasticidade entre 4,4 e 18,2 GPa para o furo de sonda 02 de 1982 e entre 27,3 e 56,7 GPa para o furo de sonda 02 de 1985. As curvas tensão x deformação específica foram traçadas, ver figura 5.5.3.

Os perfis correspondentes foram obtidos com um perfilador, para as 4 amostras submetidas a compressão uniaxial, e podem ser vistos na figura 5.5.2, em escala, JRC em torno de 17.

O ensaio brasileiro foi realizado para 5 amostras do furo de sonda 02 de 1982, tabela V.7. Descrição: cor esbranquiçado/rosado. A figura 5.5.4 mostra foto de amostra submetida a ensaio brasileiro. Notam-se variações granulométricas (maior quantidade de quartzo, em grãos maiores). A ruptura não se dá segundo a foliação. A resistência a tração do quartzito variou entre 2,6 e 4,0 MPa. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.5.5.

Foram realizados 5 ensaios para determinação da resistência a compressão uniaxial do quartzito do furo de sonda 02 de 1985, ver tabela V.4, ensaio 15 a 19. Descrição das amostras: encontra-se entrecortado por veios de quartzo que, muitas vezes, podem se

comportar como planos de fraqueza. A ruptura nos ensaios de compressão uniaxial se dá na rocha intacta. As figuras 5.5.6 e 5.5.7 mostram fotos de amostras rompidas, na primeira a ruptura se dá num plano perpendicular ao plano de aplicação da força; na segunda num plano oblíquo. A resistência a compressão uniaxial do quartzito variou entre 90 e 150 MPa, sendo que 40% destes valores estão entre 88 e 100 MPa. O histograma é apresentado na figura 5.5.8. Apresenta módulo de elasticidade que variou entre 27,3 e 56,7GPa e com velocidade da onda longitudinal que variou entre 3069 e 4194m/s . As curvas tensão x deformação específica foram traçadas, ver figura 5.5.9.

Os perfis correspondentes foram obtidos com um perfilador, para as 5 amostras submetidas a compressão uniaxial, e podem ser vistos na figura 5.5.10., em escala; JRC em torno de 17.

O ensaio brasileiro foi realizado para 8 amostras do furo de sonda 02 de 1985, tabela V.9. Descrição: cor cinza esbranquiçado, os grãos de quartzo são bastante nítidos. A ruptura ocorre no plano diametral. A resistência a tração variou entre 2,6 e 11,9MPa. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.5.11.

Os perfis correspondentes foram obtidos com um perfilador. Para as amostras de quartzito, onde a ruptura ocorreu no plano diametral, temos JRC entre 13 e 15. Ver figura 5.5.12, amostra A20cx15 furo de sonda 2 de 1982 e amostra A35cx6 furo de sonda 2 de 1985.

A densidade das amostras de rocha foi encontrada através do método do picnômetro e obteve-se o seguinte valor: 1,58 g/cm³ amostra A16cx16.

Os dados apresentados nas tabelas V.22, V.23, V.24 e V.25 são resultados de dois ensaios de compressão uniaxial para o quartzito, referente ao furo de sonda 02 de 1982 e furo de sonda 02 de 1985, A17CX19 e A36CX06 respectivamente.



Figura 5.5.1 - Foto de duas amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).

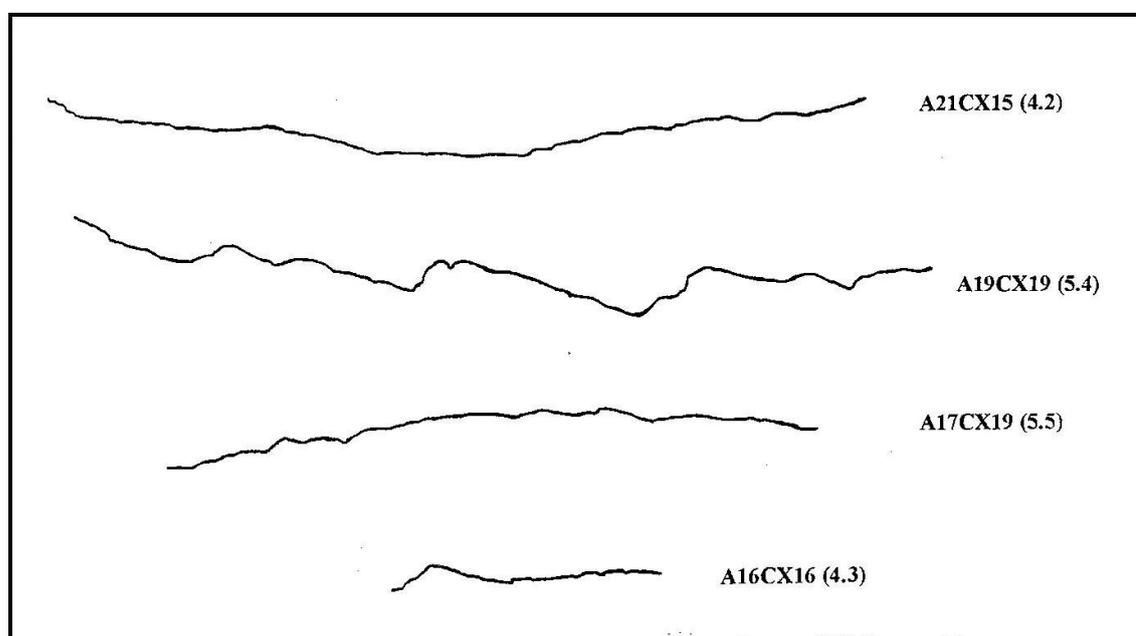


Figura 5.5.2 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).

A velocidade da onda longitudinal varia entre 1091 e 3289 para o furo de sonda 02 de 1982 e varia entre 3069 e 4194 para o furo de sonda 02 de 1985. Apresenta uma velocidade de onda longitudinal média de 2042 m/s e módulo de elasticidade entre 4,4 e 18,2 GPa para o furo de sonda 02 de 1982 e entre 27,3 e 56,7 GPa para o furo de sonda 02 de 1985. As curvas tensão x deformação específica foram traçadas, ver figura 5.5.3.

Os perfis correspondentes foram obtidos com um perfilador, para as 4 amostras submetidas a compressão uniaxial, e podem ser vistos na figura 5.5.2, em escala, JRC em torno de 17.

O ensaio brasileiro foi realizado para 5 amostras do furo de sonda 02 de 1982, tabela V.7. Descrição: cor esbranquiçado/rosado. A figura 5.5.4 mostra foto de amostra submetida a ensaio brasileiro. Notam-se variações granulométricas (maior quantidade de quartzo, em grãos maiores). A ruptura não se dá segundo a foliação. A resistência a tração do quartzito variou entre 2,6 e 4,0 MPa. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.5.5.

Foram realizados 5 ensaios para determinação da resistência a compressão uniaxial do quartzito do furo de sonda 02 de 1985, ver tabela V.4, ensaio 15 a 19. Descrição das amostras: encontra-se entrecortado por veios de quartzo que, muitas vezes, podem se comportar como planos de fraqueza. A ruptura nos ensaios de compressão uniaxial se dá na rocha intacta. As figuras 5.5.6 e 5.5.7 mostram fotos de amostras rompidas, na primeira a ruptura se dá num plano perpendicular ao plano de aplicação da força; na segunda num plano oblíquo. A resistência a compressão uniaxial do quartzito variou entre 90 e 150 MPa, sendo que 40% destes valores estão entre 88 e 100 MPa. O histograma é apresentado na figura 5.5.8. Apresenta módulo de elasticidade que variou entre 27,3 e 56,7 GPa e com velocidade da onda longitudinal que variou entre 3069 e 4194 m/s. As curvas tensão x deformação específica foram traçadas, ver figura 5.5.9.

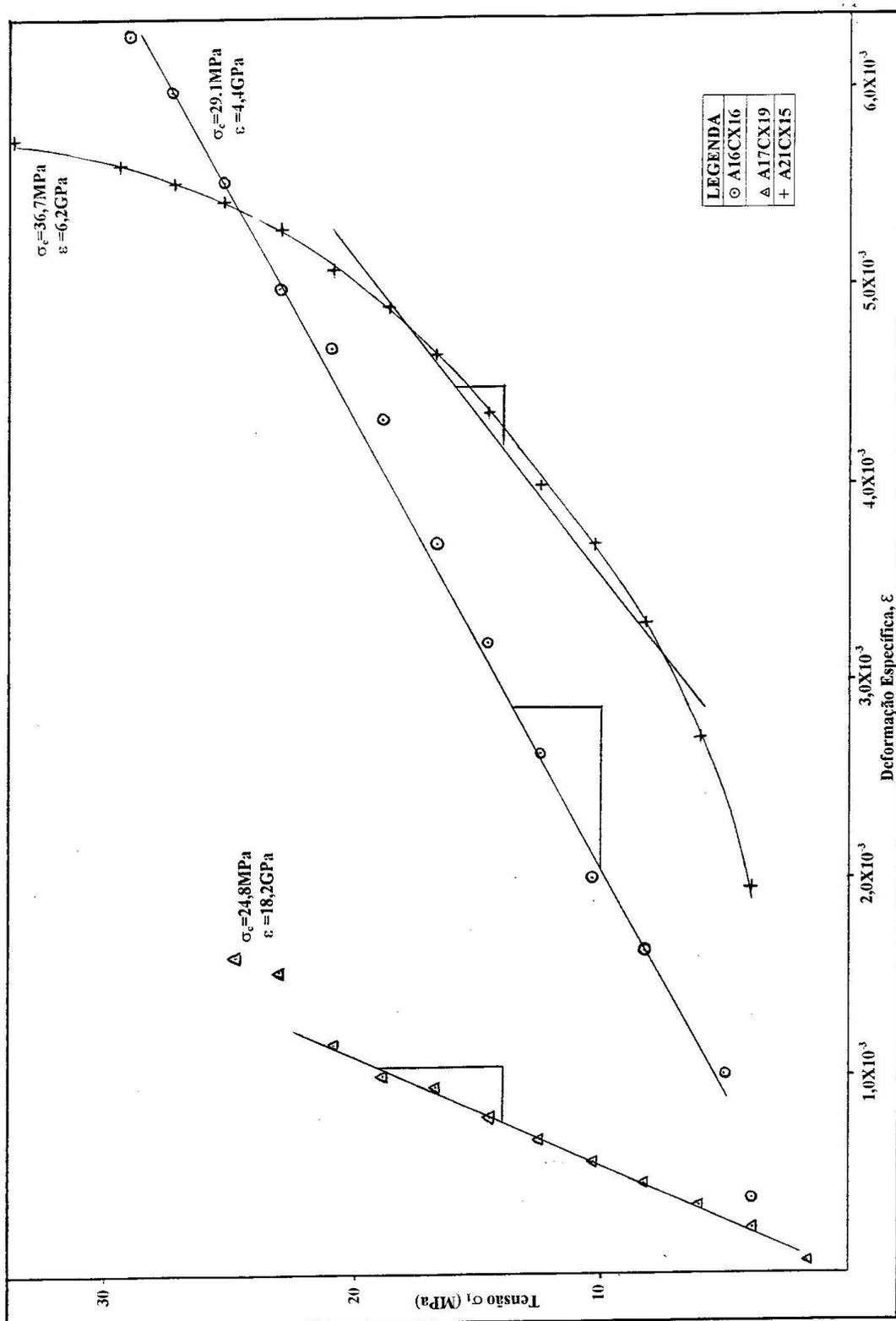


Figura 5.5.3 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).



Figura 5.5.4 - Ensaio brasileiro. Quartzito, furo de sonda 02 (1982). Foto.

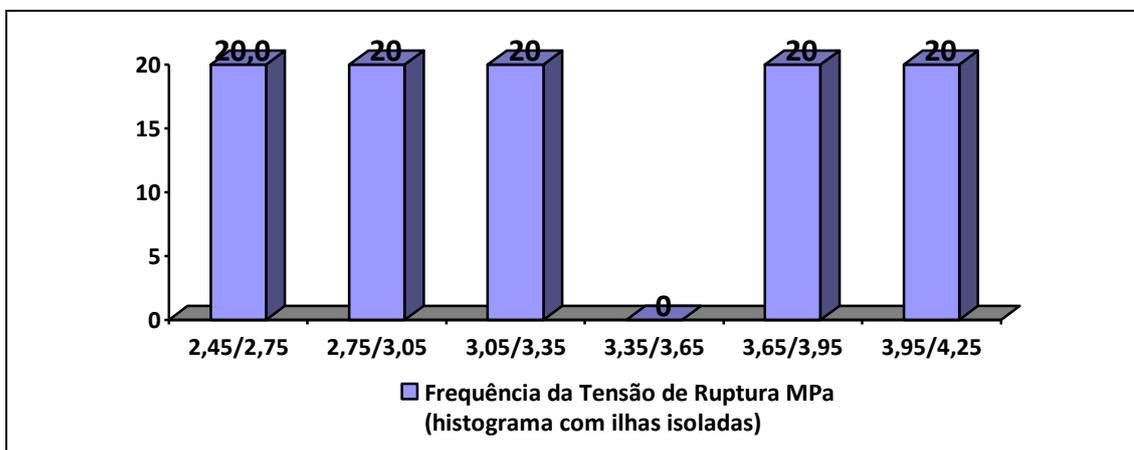


Figura 5.5.5 - Histograma dos valores de resistência à ruptura obtidos em ensaio brasileiro. Quartzito, furo de sonda 02 (1982).



Figura 5.5.6 - Foto de amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).

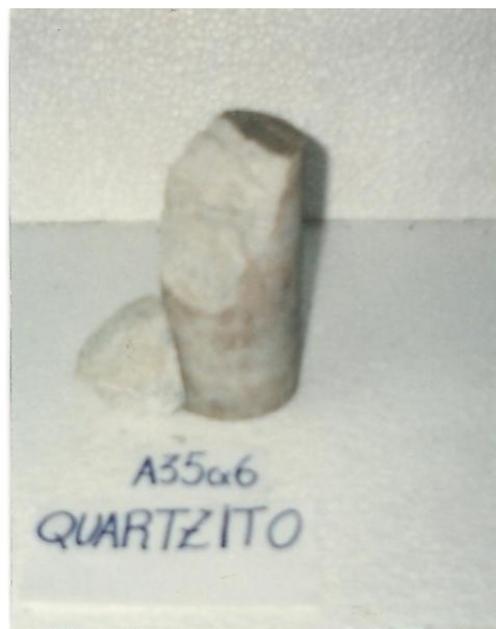


Figura 5.5.7 - Foto de amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).

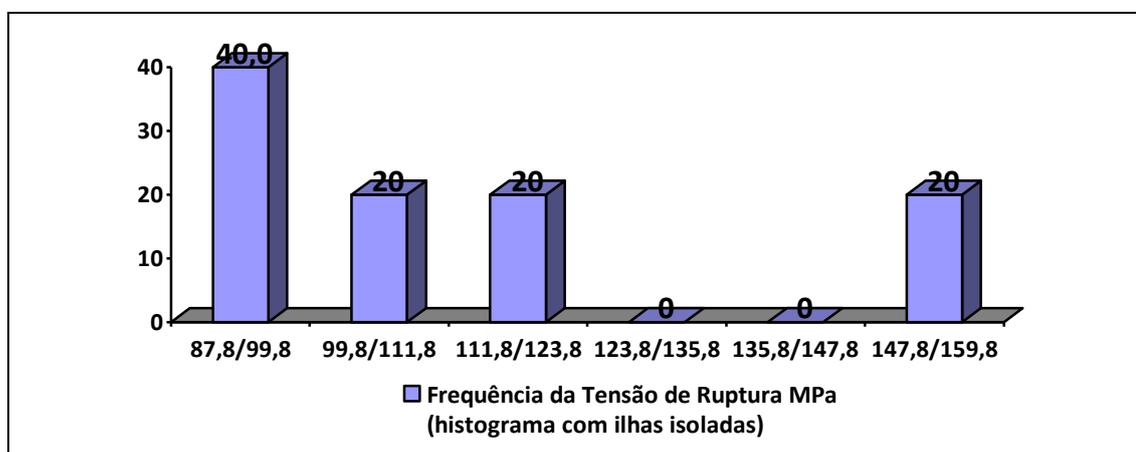


Figura 5.5.8 - Histograma dos valores de resistência à ruptura obtida em ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).

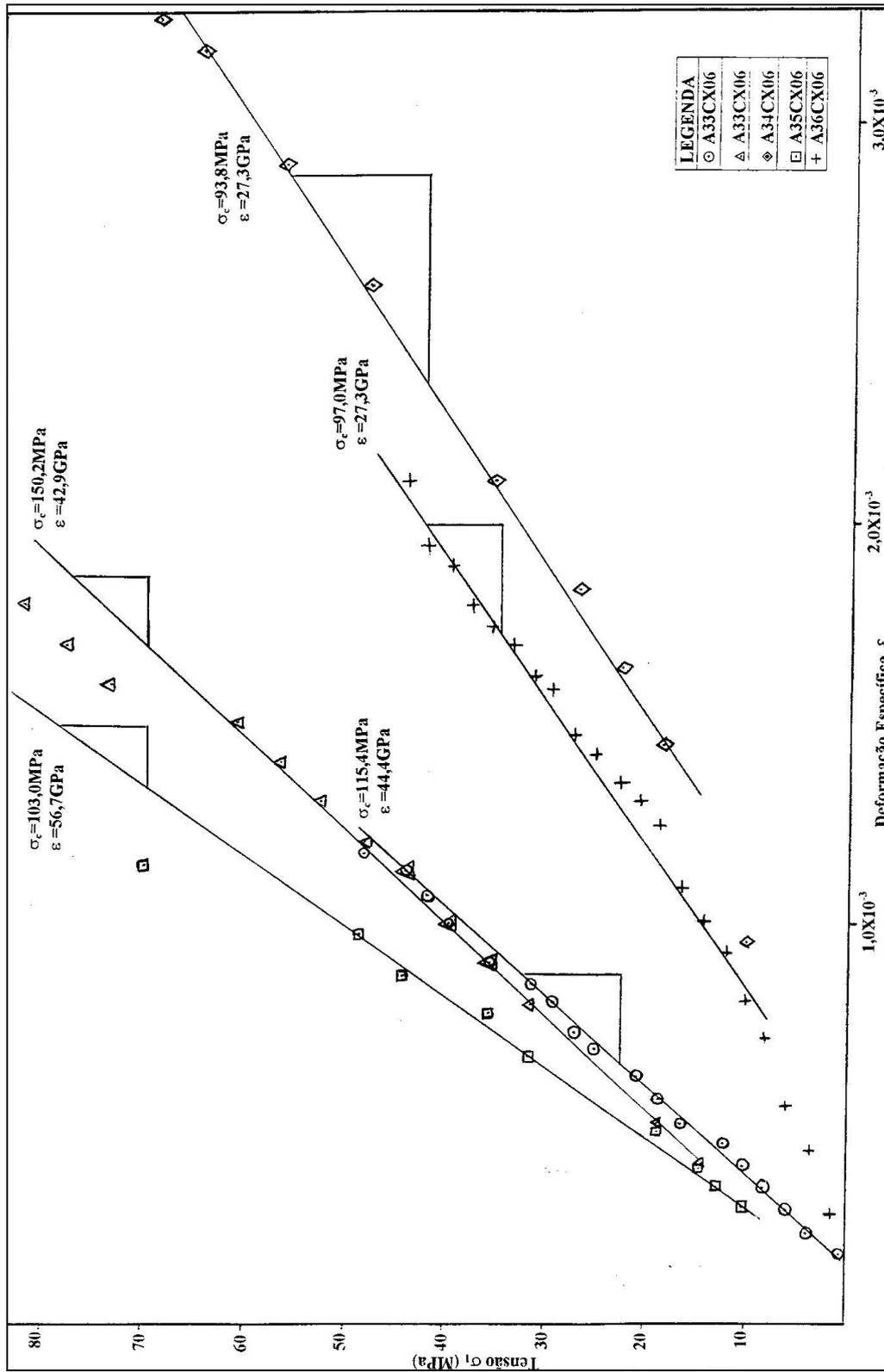


Figura 5.5.9 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).

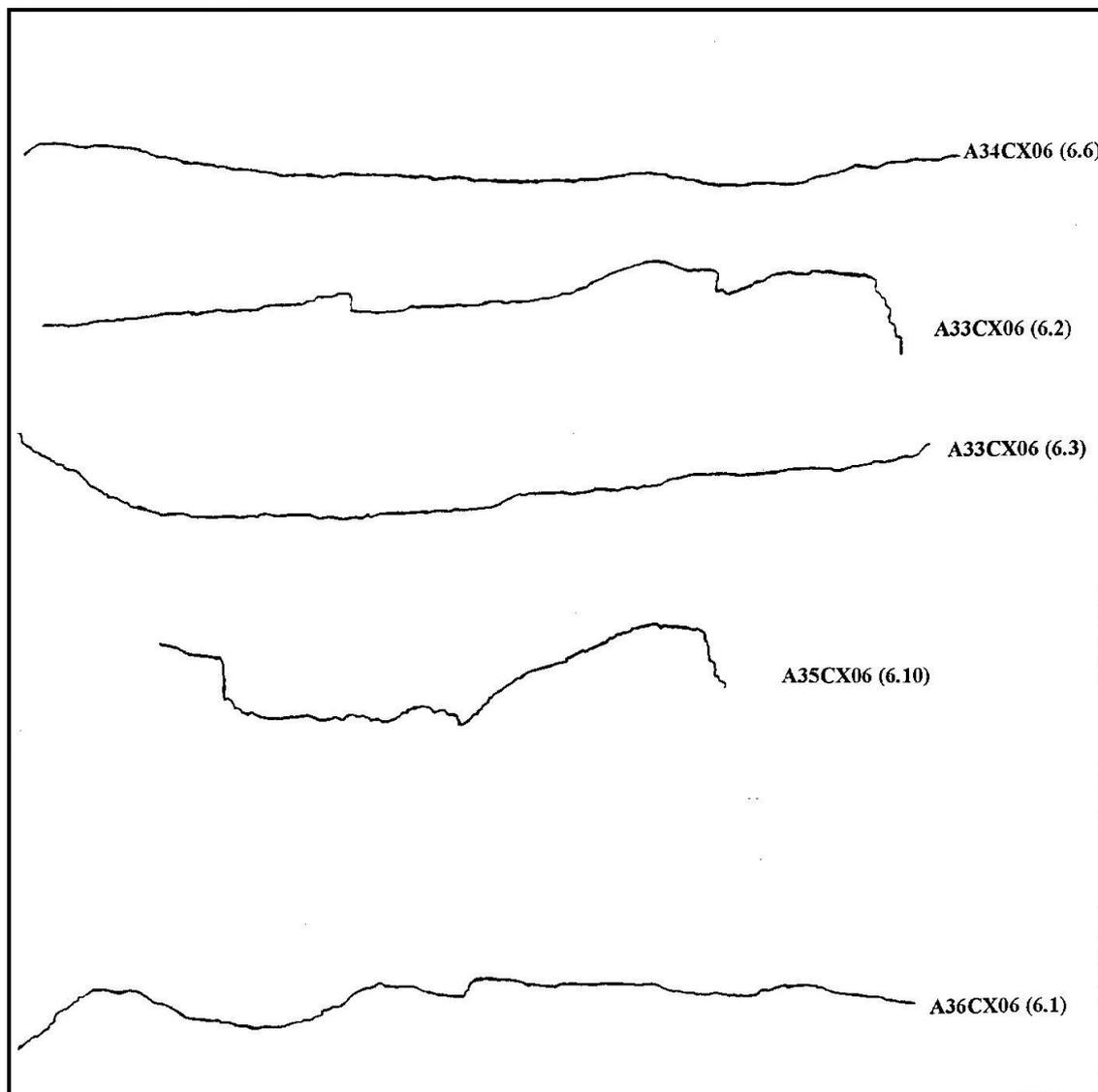


Figura 5.5.10 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).

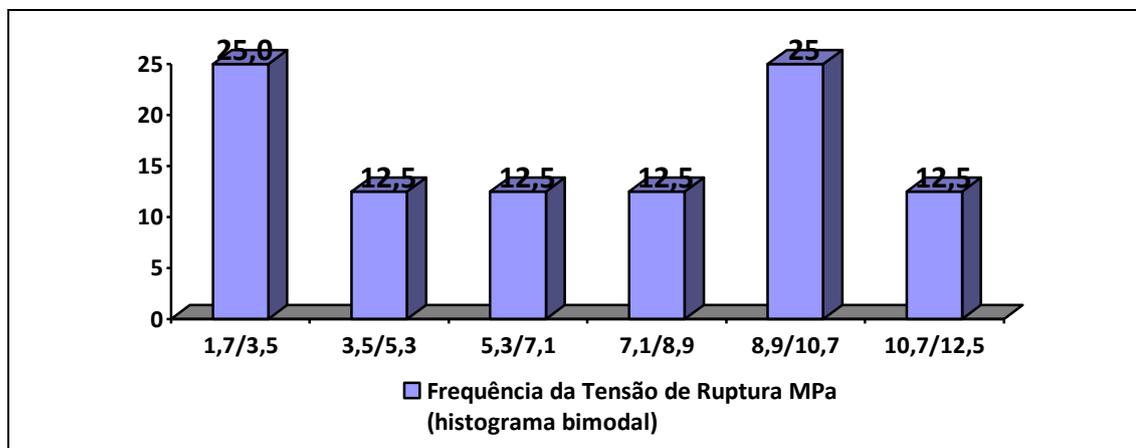


Figura 5.5.11 - Histograma dos valores de resistência a ruptura obtidos em ensaio brasileiro. Quartzito, furo de sonda 02 (1985).

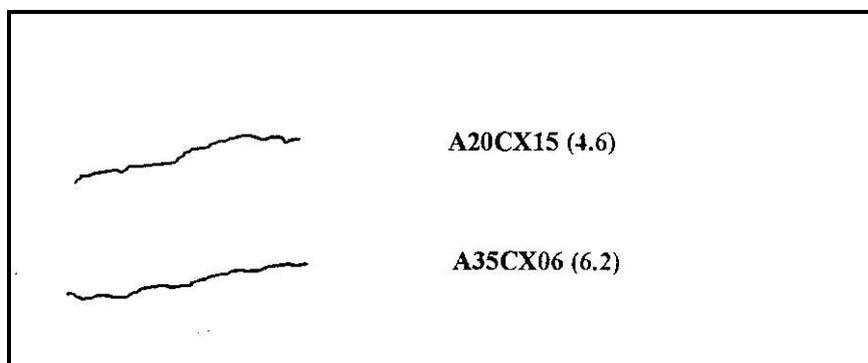


Figura 5.5.12 – Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio brasileiro. Quartzito.

Tabela V.22 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzito, referente ao furo de sonda 02 de 1982 e furo de sonda 02 de 1985.

Identificação: ensaio 8	A17 CX19	Origem	MBR		
Diâmetro (mm)	75.95	75.80	75.90	75.85	75.80
Diâmetro médio (mm)	75.86				
Altura (mm)	174.70	175.00	174.40	174.90	174.75
Altura média (mm)	174.75				
Altura entre anéis (mm)	98.55	98.15	97.75	97.30	97.15
L médio (mm)	89.58				
Área de topo (m ²)	0.0045		Relação L/D		2.30

Tempos de propagação de onda longitudinal (microseg.)					
53.4	53.2	53.1	53.0	53.0	53.1
Tempo médio propagação de onda longitudinal (microseg.)					53.1
Velocidade da onda longitudinal (m/s)				3289	

Conteúdo de água na amostra durante o teste	Seca	Amostra não retificada
---	------	------------------------

Leitura do manômetro na ruptura	12800
Força de Ruptura (kgf)	11424
Tensão de Ruptura (MPa)	24.77

Tempo do ensaio (s) (até a ruptura)	231	Velocidade de carregamento (kgf/s)	49.45
		Velocidade de carregamento (MPa/s)	0.11
Observações	Ruptura ao longo da rocha intacta		

Tabela V.23 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzito, referente ao furo de sonda 02 de 1982.

No Leitura	Leitura Manômetro	Carga Corrigida (kgf)	Tensão (MPa)	Deformação Axial (mm)	Deformação Específica
1	2000	840.00	1.82	0.005	5.58E-05
2	3000	1820.00	3.95	0.020	2.23E-04
3	4000	2800.00	6.07	0.030	3.35E-04
4	5000	3780.00	8.20	0.040	4.47E-04
5	6000	4760.00	10.32	0.050	5.58E-04
6	7000	5740.00	12.45	0.060	6.70E-04
7	8000	6720.00	14.57	0.070	7.81E-04
8	9000	7700.00	16.70	0.085	9.49E-04
9	10000	8680.00	18.82	0.095	1.06E-03
10	11000	9660.00	20.95	0.105	1.17E-03
11	12000	10640.00	23.07	0.115	1.28E-03

Tabela V.24 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzito, referente ao furo de sonda 02 de 1982 e furo de sonda 02 de 1985.

Identificação: ensaio 19	A36 CX6	Origem	MBR		
Diâmetro (mm)	76.05	75.95	76.05	76.10	76.00
Diâmetro médio (mm)	76.03				
Altura (mm)	177.90	177.70	177.55	177.55	177.70
Altura média (mm)	177.68				
Altura entre anéis (mm)	100.30	100.50	99.55	99.75	100.20
L médio (mm)	91.86				
Área de topo (m ²)	0.0045		Relação L/D		2.34
Tempos de propagação de onda longitudinal (microseg.)					
52.6	52.0	51.7	52.0	51.2	51.3
Tempo médio propagação de onda longitudinal (microseg.)					51.8
Velocidade da onda longitudinal (m/s)			3430		
Conteúdo de água na amostra durante o teste			Seca	Amostra não retificada	
Leitura do manômetro na ruptura		47000			
Força de Ruptura (kgf)		44940			
Tensão de Ruptura (MPa)		97.01			
Tempo do ensaio (s)	242	Velocidade de carregamento (kgf/s)		88.55	
(até a leitura 22000)		Velocidade de carregamento (MPa/s)		0.19	
Tempo do ensaio (s)	280	Velocidade de carregamento (kgf/s)		160.50	
(até a ruptura)		Velocidade de carregamento (MPa/s)		0.35	
Observações	Ruptura violenta (estouro).				

Tabela V.25 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzito, referente ao furo de sonda 02 de 1985.

No Leitura	Leitura Manômetro	Carga Corrigida(kgf)	Tensão (MPa)	Deformação axial (mm)	Deformação específica
1	2000	840.00	1.81	0.025	2.72E-04
2	3000	1820.00	3.93	0.040	4.35E-04
3	4000	2800.00	6.04	0.050	5.44E-04
4	5000	3780.00	8.16	0.065	7.08E-04
5	6000	4760.00	10.27	0.075	8.16E-04
6	7000	5740.00	12.39	0.085	9.25E-04
7	8000	6720.00	14.51	0.095	1.03E-03
8	9000	7700.00	16.62	0.100	1.09E-03
9	10000	8680.00	18.74	0.115	1.25E-03
10	11000	9660.00	20.85	0.120	1.31E-03
11	12000	10640.00	22.97	0.125	1.36E-03
12	13000	11620.00	25.08	0.130	1.42E-03
13	14000	12600.00	27.20	0.135	1.47E-03
14	15000	13580.00	29.31	0.145	1.58E-03
15	16000	14560.00	31.43	0.150	1.63E-03
16	17000	15540.00	33.54	0.155	1.69E-03
17	18000	16520.00	35.66	0.160	1.74E-03
18	19000	17500.00	37.77	0.165	1.80E-03
19	20000	18480.00	39.89	0.175	1.91E-03
20	21000	19460.00	42.01	0.180	1.96E-03
21	22000	20440.00	44.12	0.195	2.12E-03

5.6 – Filito sericítico

O filito sericítico se rompe facilmente nas etapas de preparação. Com muita dificuldade recuperamos para o ensaio de compressão uniaxial 4 amostras, e somente duas curvas tensão x deformação foram obtidas. A resistência a compressão uniaxial variou entre 20 e 34 MPa. Ver tabela V.4, ensaio 13 e 14 relativo a furo de sonda 03 de 1982 e ensaio 20 e 21 relativo a furo de sonda 02 de 1985. A ruptura ocorre no plano oblíquo ao plano de aplicação da carga. As curvas tensão x deformação específica foram traçadas, ver figura 5.6.2.

Os perfis correspondentes foram obtidos com um perfilador para as 4 amostras submetidas a compressão uniaxial e podem ser vistos na figura 5.6.3, em escala. Para as amostras, A26 caixa 31 e A27 caixa 32 (figura 5.6.1), ensaio 13 e 14, relativo a furo de sonda 03 de 1982, temos superfície rugosa com JRC em torno de 17, isto pode ser visto na foto (figura 5.6.1). Observo-se que a curva tensão x deformação da amostra A27 caixa 32 mostra um aspecto ondulado. Por outro lado a curva tensão x deformação da amostra A40 caixa 34 é praticamente linear, e a superfície de ruptura pouco rugosa, JRC em torno de 3. Estes resultados preliminares sugerem que em programas de ensaios futuros, em filito sericítico, seja dada atenção especial a estes aspectos.

Na amostra, ensaio 20, de cor cinza escuro, a ruptura se dá segundo a foliação. A amostra, ensaio 21, se rompeu de forma irregular (a ruptura se inicia segundo a foliação). A resistência a compressão uniaxial varia entre 10 e 25 MPa. Ver tabela V.4, relativa a furo de sonda 2 de 1985.

O ensaio brasileiro foi realizado para amostras de três furos de sonda. Os resultados não são válidos para avaliar a resistência a tração pois a ruptura não ocorre segundo o plano diametral, rompe-se segundo a foliação (cerca de 45 graus de mergulho nas amostras).

1. *Descrição*: cor cinza claro e apresenta camadas amareladas, granulometria muito fina. Praticamente são. Ver figura 5.6.4. Ver tabela V.7 ensaio no. 1 e 2, relativa a furo de sonda 02 de 1982.

2. *Descrição*: cor cinza escuro, praticamente sã, muito dura. Apresenta algumas camadas mais ricas escurecidas (presença de matéria orgânica?). Ver figura 5.6.5. Para a resistência obtida nestes ensaios 71,5% destes valores estão entre 2,9 e 5,3 MPa. O histograma correspondente é apresentado na figura 5.6.6. Ver tabela V.8, relativa a furo de sonda 03 de 1982, ensaio de 1 a 7.
3. *Descrição*: cor cinza claro e apresenta camadas amareladas. Somente uma amostra ensaio no. 9. Ver tabela V.9, relativa a furo de sonda 02 de 1985.

Os perfis correspondentes foram obtidos com um perfilador, a ruptura ocorreu segundo a foliação, temos JRC em torno de 1 para amostra A2 caixa 82 do furo de sonda 2 de 1982 e JRC em torno de 3 para a amostra A30 caixa 34 do furo de sonda 3 de 1982. Ver figura 5.6.7.

A densidade das amostras de rocha foi encontrada através do método do picnômetro e obteve-se o seguinte valor: 1,72 g/cm³.

É importante salientar a dificuldade de realização de ensaios em filito sericítico. Na preparação de amostras para o ensaio de compressão uniaxial perdemos várias amostras. Não faz sentido realizar o ensaio brasileiro, pois a ruptura ocorre segundo a foliação, e não no plano diametral como previsto para ruptura por tração. Os resultados encontrados nos levam a recomendar uma reavaliação da metodologia de trabalho para determinação das propriedades mecânicas do filito sericítico.

Os dados apresentados nas tabelas V.26, V.27, V.28 e V.29 são resultados de dois ensaios de compressão uniaxial para o filito sericítico, referente ao furo de sonda 03 de 1982 e furo de sonda 02 de 1985, A27CX32 e A40CX34 respectivamente.



Figura 5.6.1 - Ensaio de compressão uniaxial. Filito sericítico (foto).



Figura 5.6.4 - Foto de amostra submetida a ensaio brasileiro. Filito sericítico, furo de sonda 02 (1982).

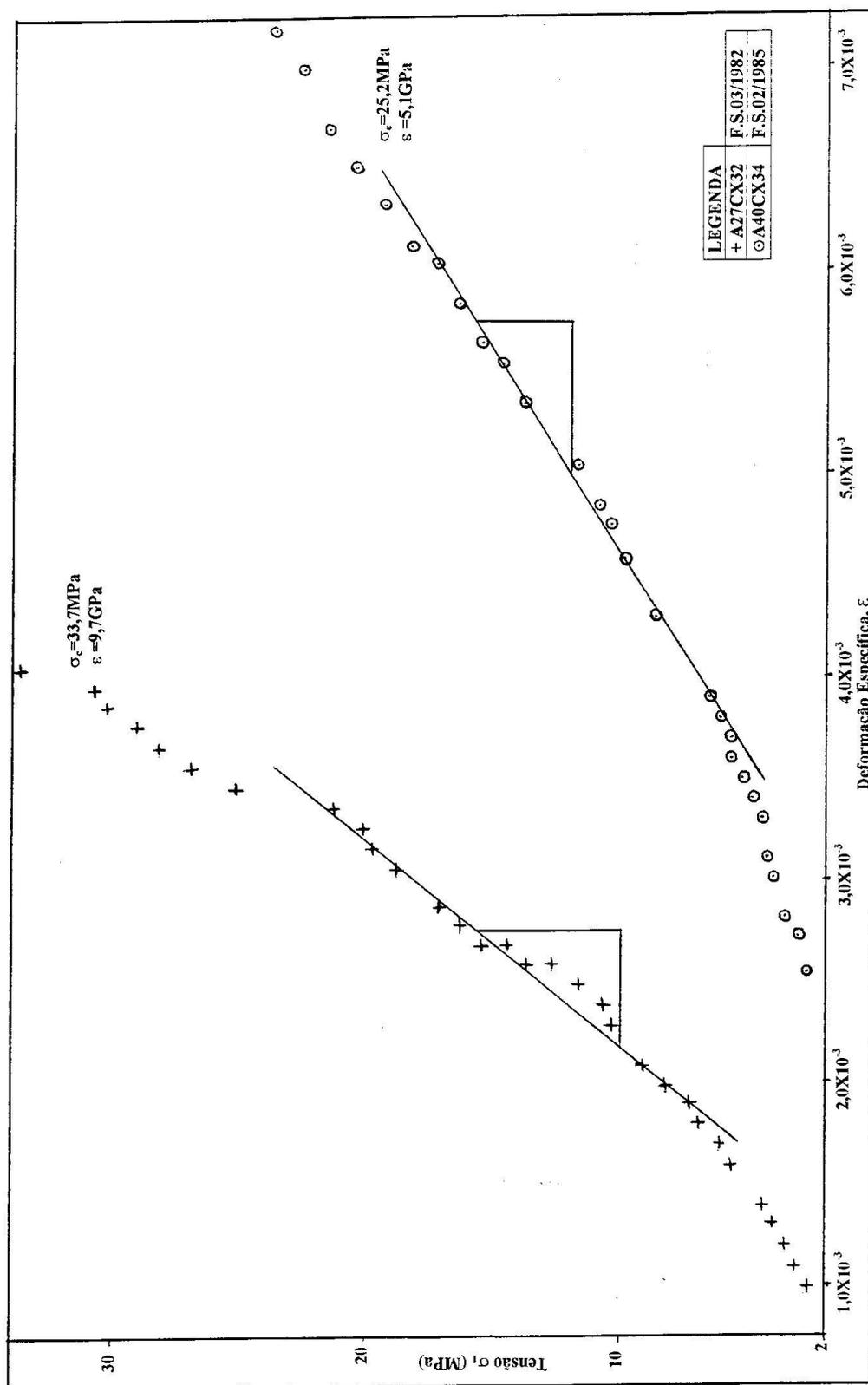


Figura 5.6.2 - Curvas tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Filito sericítico.

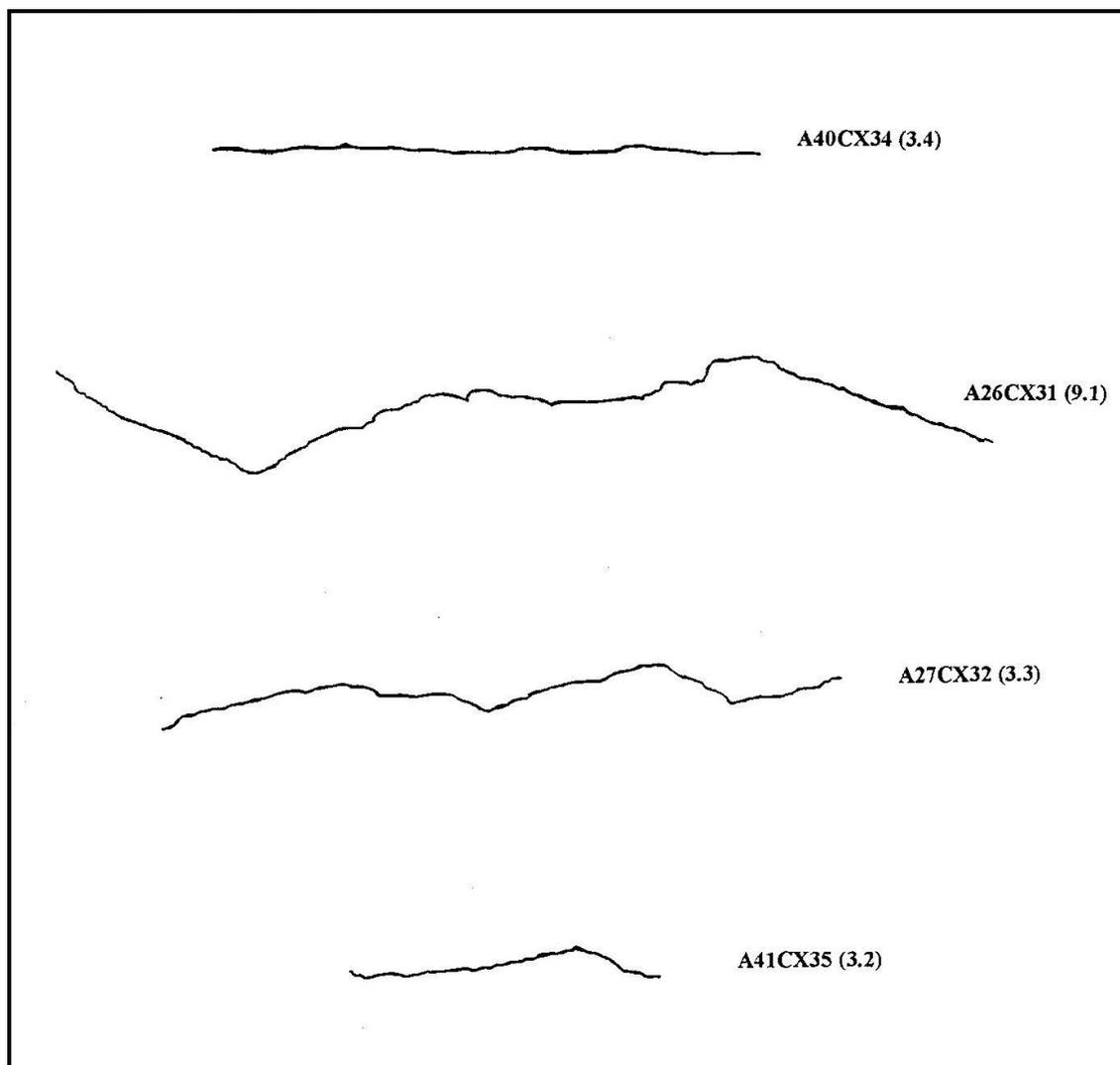


Figura 5.6.3 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio de compressão uniaxial. Filito sericítico.



Figura 5.6.5 - Foto de amostra submetida a ensaio brasileiro. Filito sericítico, furo de sonda 03 (1982).

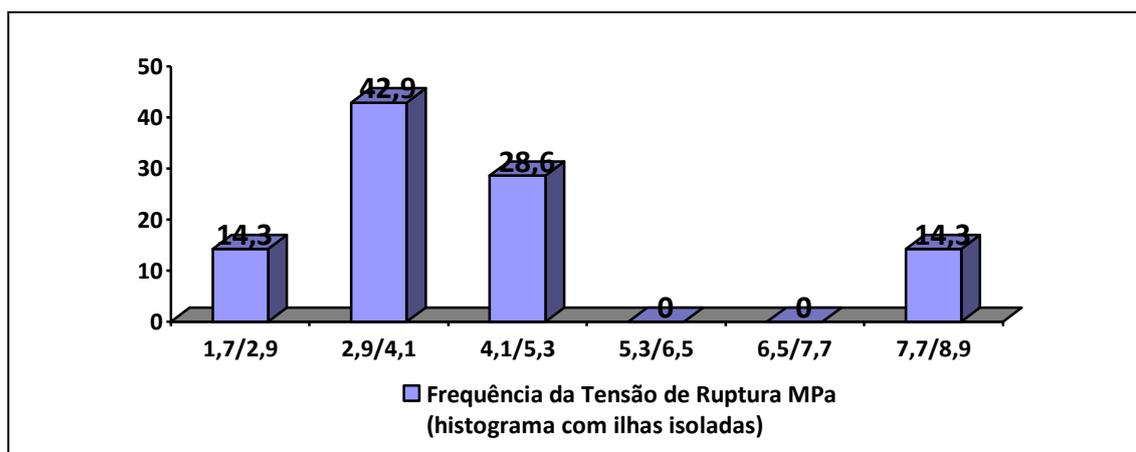


Figura 5.6.6 - Histograma dos valores de resistência à ruptura obtida em ensaio brasileiro. Filito sericítico, furo de sonda 03 (1982).

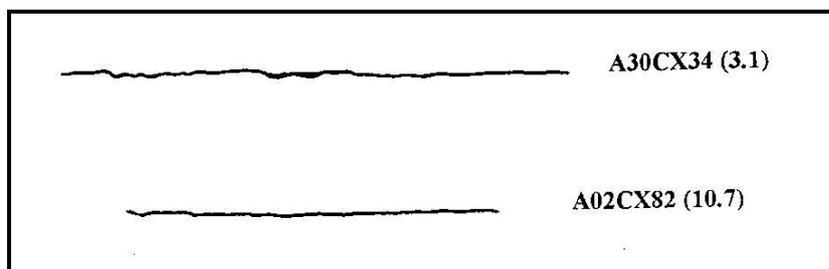


Figura 5.6.7 - Perfis da superfície de ruptura de amostras submetidas a ensaio brasileiro. Filito sericítico.

Tabela V.26 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o filito sericítico, referente ao furo de sonda 03 de 1982 e furo de sonda 02 de 1985.

Identificação: ensaio 14	A27 CX32	Origem	MBR		
Diâmetro (mm)	75.70	75.70	75.70	75.65	75.65
Diâmetro médio (mm)	75.68				
Altura (mm)	141.65	141.50	141.30	141.45	141.40
Altura média (mm)	141.46				
Altura entre anéis (mm)	109.50	110.60	109.95	108.45	108.30
L médio (mm)	101.16				
Área de topo (m ²)	0.0045	Relação L/D			1.87
Tempos de propagação de onda longitudinal (microseg.)					
43.0	42.5	42.5	41.9	41.5	
Tempo médio propagação de onda longitudinal (microseg.)					42.3
Velocidade da onda longitudinal (m/s)			3346		
Conteúdo de água na amostra durante o teste		Seca	Amostra retificada		
Leitura do manômetro na ruptura		15840			
Força de Ruptura (kgf)		15454			
Tensão de Ruptura (MPa)		33.67			
Tempo do ensaio (s)	2010	Velocidade de carregamento (kgf/s)		7.69	
(até a ruptura)		Velocidade de carregamento (MPa/s)		0.02	

Tabela V.27 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o filito sericítico, referente ao furo de sonda 03 de 1982.

No Leitura	Leitura Manômetro	Carga Corrigida(kgf)	Tensão (MPa)	Deformação Axial (mm)	Deformação Específica
1	1200	1253.33	2.73	0.100	9.89E-04
2	1400	1447.33	3.15	0.110	1.09E-03
3	1600	1641.33	3.58	0.120	1.19E-03
4	1800	1835.33	4.00	0.130	1.29E-03
5	2000	2029.33	4.42	0.140	1.38E-03
6	2600	2611.33	5.69	0.160	1.58E-03
7	2800	2805.33	6.11	0.170	1.68E-03
8	3200	3193.33	6.96	0.180	1.78E-03
9	3400	3387.33	7.38	0.190	1.88E-03
10	3800	3775.33	8.22	0.200	1.98E-03
11	4200	4163.33	9.07	0.210	2.08E-03
12	4800	4745.33	10.34	0.230	2.27E-03
13	5000	4939.33	10.76	0.240	2.37E-03
14	5400	5327.33	11.61	0.250	2.47E-03
15	6400	6297.33	13.72	0.260	2.57E-03
16	7200	7073.33	15.41	0.270	2.67E-03
17	7600	7461.33	16.26	0.280	2.77E-03
18	8000	7849.33	17.10	0.290	2.87E-03
19	8800	8625.33	18.79	0.310	3.06E-03
20	9200	9013.33	19.64	0.320	3.16E-03
21	9400	9207.33	20.06	0.330	3.26E-03
22	10000	9789.33	21.33	0.340	3.36E-03
23	11800	11535.33	25.13	0.350	3.46E-03
24	12600	12311.33	26.82	0.360	3.56E-03
25	13200	12893.33	28.09	0.370	3.66E-03
26	13600	13281.33	28.93	0.380	3.76E-03
27	14200	13863.33	30.20	0.390	3.86E-03
28	14400	14057.33	30.63	0.400	3.95E-03
29	15800	15415.33	33.58	0.410	4.05E-03

Tabela V.28 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o filito sericítico, referente ao furo de sonda 02 de 1985.

Identificação: ensaio 20	A40 CX34	Origem	MBR		
Diâmetro (mm)	75.35	75.40	75.40	75.50	75.35
Diâmetro médio (mm)	75.40				
Altura (mm)	133.15	133.30	133.25	133.00	133.20
Altura média (mm)	133.18				
Altura entre aneis (mm)	110.05	109.45	115.15	110.55	110.25
L médio (mm)	102.89				
Área de topo (m ²)	0.0045		Relação L/D		1.77
Tempos de propagação de onda longitudinal (microseg.)					
58.0	55.0	52.7	50.9	51.5	
Tempo médio propagação de onda longitudinal (microseg.)				53.6	
Velocidade da onda longitudinal (m/s)			2484		
Conteúdo de água na amostra durante o teste			Seca	Amostra retificada	
Leitura do manômetro na ruptura		11720			
Força de Ruptura (kgf)		11458			
Tensão de Ruptura (MPa)		25.15			
Tempo do ensaio (s)	480	Velocidade de carregamento (kgf/s)		23.87	
(até a ruptura)		Velocidade de carregamento (MPa/s)		0.05	

Tabela V.29 – Resultados de ensaio de compressão uniaxial para o filito sericítico, referente ao furo de sonda 02 de 1985.

No Leitura	Leitura Manômetro	Carga Corrigida(kgf)	Tensão (MPa)	Deformação Axial (mm)	Deformação Específica
1	1200	1253.33	2.75	0.260	2.53E-03
2	1400	1447.33	3.18	0.280	2.72E-03
3	1600	1641.33	3.60	0.290	2.82E-03
4	1800	1835.33	4.03	0.310	3.01E-03
5	1900	1932.33	4.24	0.320	3.11E-03
6	2000	2029.33	4.45	0.340	3.30E-03
7	2200	2223.33	4.88	0.350	3.40E-03
8	2400	2417.33	5.31	0.360	3.50E-03
9	2600	2611.33	5.73	0.380	3.69E-03
10	2800	2805.33	6.16	0.390	3.79E-03
11	3000	2999.33	6.58	0.400	3.89E-03
12	4000	3969.33	8.71	0.440	4.28E-03
13	4600	4551.33	9.99	0.470	4.57E-03
14	4800	4745.33	10.42	0.490	4.76E-03
15	5000	4939.33	10.84	0.500	4.86E-03
16	5400	5327.33	11.69	0.520	5.05E-03
17	6400	6297.33	13.82	0.550	5.35E-03
18	6800	6685.33	14.67	0.570	5.54E-03
19	7200	7073.33	15.52	0.580	5.64E-03
20	7600	7461.33	16.38	0.600	5.83E-03
21	8000	7849.33	17.23	0.620	6.03E-03
22	8500	8334.33	18.29	0.630	6.12E-03
23	9000	8819.33	19.36	0.650	6.32E-03
24	9500	9304.33	20.42	0.670	6.51E-03
25	10000	9789.33	21.49	0.690	6.71E-03
26	10500	10274.33	22.55	0.720	7.00E-03
27	11000	10759.33	23.61	0.740	7.19E-03
28	11500	11244.33	24.68	0.770	7.48E-03

5.7 – Quartzo-filito

Somente uma amostra foi fornecida. A figura 5.7.1 e 5.7.2 mostram fotos da amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial. Descrição: apresenta camadas mais claras e moles (caulim), cor cinza esbranquiçado. Praticamente são. A ruptura não acompanha a foliação, ela ocorre na rocha intacta, com uma resistência a compressão de 41 MPa. Ver tabela V.4, relativa a furo de sonda 03 de 1982.

A curva tensão x deformação específica foi traçada, ver figura 5.7.3.

Apresenta uma velocidade de onda longitudinal de 2836 m/s e módulo de elasticidade de 10,5 GPa.

O perfil correspondente foi obtido com um perfilador e pode ser visto na figura 5.7.4, em escala.

Os dados apresentados nas tabelas V.30 e V.31 são resultados de um ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-filito, referente ao furo de sonda 03 de 1982, A23CX15.



Figura 5.7.1. Ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-filito. Foto



Figura 5.7.2. Ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-filito. Foto

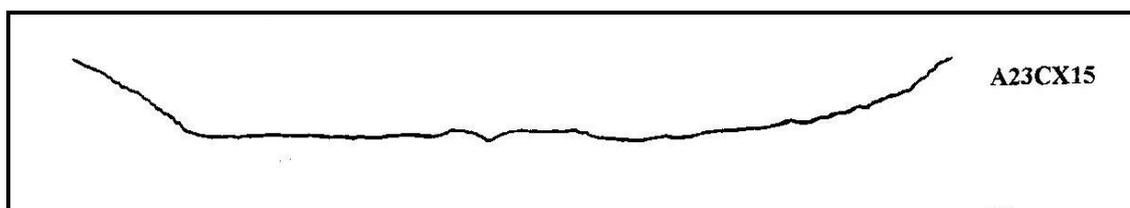


Figura 5.7.4. Perfil da superfície de ruptura de amostra submetida a ensaio de compressão uniaxial. Quartzo-filito.

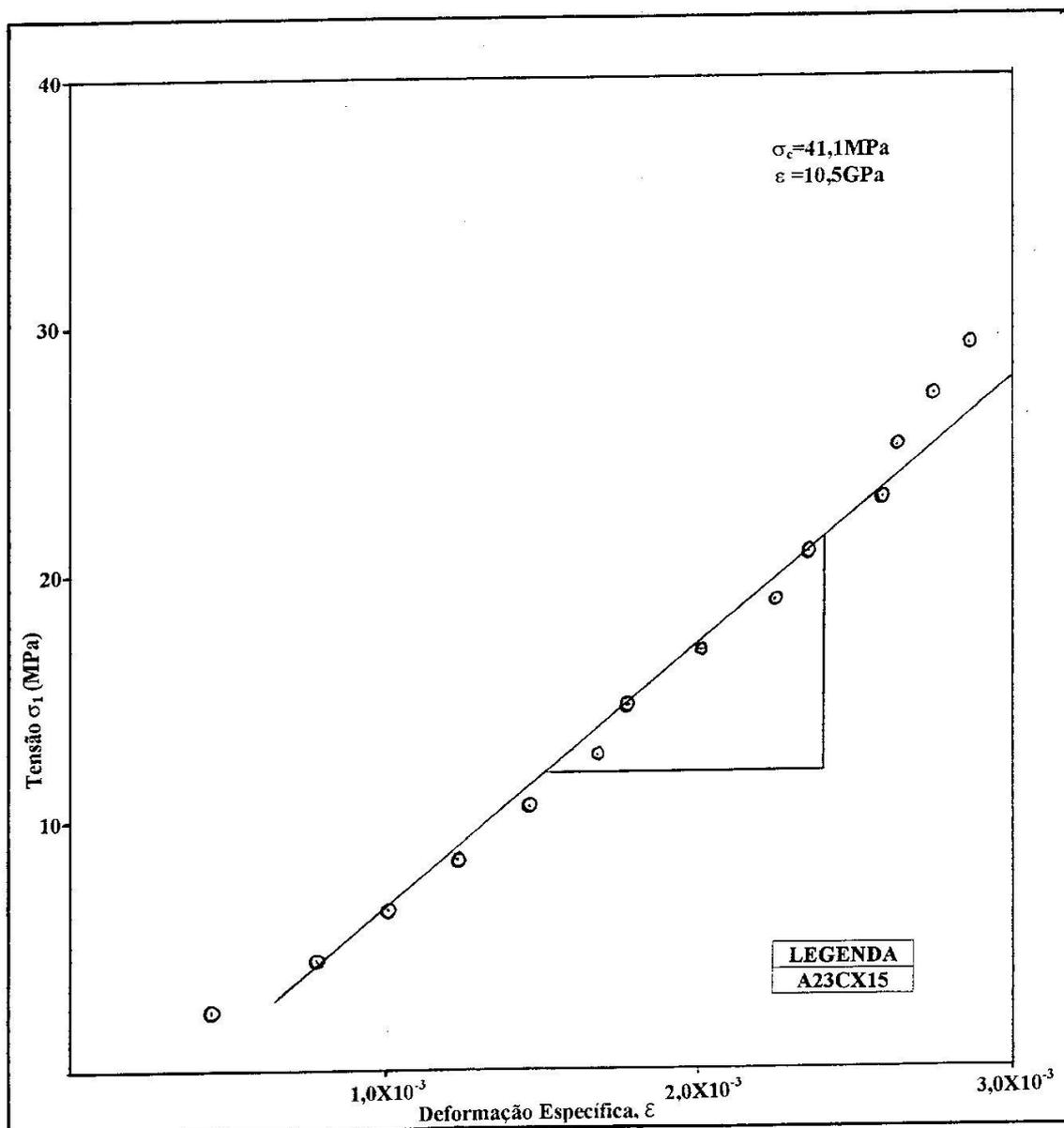


Figura 5.7.3. Curva tensão x deformação específica relativa a ensaio de compressão uniaxial. Quartzofilito.

Tabela V.30 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-filito, referente ao furo de sonda 03 de 1982.

Identificação: ensaio 12	A23 CX15	Origem	MBR		
Diâmetro (mm)	76.30	76.50	76.30	76.50	76.35
Diâmetro médio (mm)	76.39				
Altura (mm)	170.85	171.15	171.85	171.25	171.10
Altura média (mm)	171.24				
Altura entre anéis (mm)	97.35	97.70	97.75	97.45	96.95
L médio (mm)	89.24				
Área de topo (m ²)	0.0046	Relação L/D			2.24
Tempos de propagação de onda longitudinal (microseg.)					
61.0	60.6	60.2	60.2	60.5	59.8
Tempo médio de propagação de onda longitudinal (microseg.)					60.4
Velocidade da onda longitudinal (m/s)			2836		
Conteúdo de água na amostra durante o teste			Seca	Amostra não retificada	
Leitura do manômetro na ruptura		19720			
Força de Ruptura (kgf)		19218			
Tensão de Ruptura (MPa)		41.09			
Tempo do ensaio (s) (até a ruptura)	522	Velocidade de carregamento (kgf/s)		36.82	
		Velocidade de carregamento (MPa/s)		0.08	
Observações	Ruptura tanto na rocha intacta (grosseira ao tato) quanto ao longo do plano sericítico (sedoso ao tato).				

Tabela V.31 - resultados de ensaio de compressão uniaxial para o quartzo-filito, referente ao furo de sonda 03 de 1982.

No Leitura	Leitura Manômetro	Carga Corrigida(kgf)	Tensão (MPa)	Deformação Axial (mm)	Deformação Específica
1	1000	1059.33	2.27	0.040	4.48E-04
2	2000	2029.33	4.34	0.070	7.84E-04
3	3000	2999.33	6.41	0.090	1.01E-03
4	4000	3969.33	8.49	0.110	1.23E-03
5	5000	4939.33	10.56	0.130	1.46E-03
6	6000	5909.33	12.64	0.150	1.68E-03
7	7000	6879.33	14.71	0.160	1.79E-03
8	8000	7849.33	16.78	0.180	2.02E-03
9	9000	8819.33	18.86	0.200	2.24E-03
10	10000	9789.33	20.93	0.210	2.35E-03
11	11000	10759.33	23.01	0.230	2.58E-03
12	12000	11729.33	25.08	0.235	2.63E-03
13	13000	12699.33	27.15	0.245	2.75E-03
14	14000	13669.33	29.23	0.255	2.86E-03

5.8 - Medidas da velocidade do som

Foi realizado um programa de medidas de velocidade das ondas longitudinais, os resultados são apresentados.

Devido à dificuldade de obtenção de amostras para ensaio e para medida de velocidade do som e considerando a disponibilidade de material no galpão de testemunhos tentou-se verificar a consistência dos dados obtidos em medidas na direção do comprimento e na direção da largura do testemunho.

Para o quartzo-xisto não foi possível fazer medidas de velocidade do som na direção da largura. Para os valores de velocidade do som medidos na direção do comprimento 27% dos valores estão entre 2187 e 2951 m/s, ver tabela V.12. Para o quartzito 42% dos valores de velocidade do som medidos na direção do comprimento estão entre 3141 e 3961 m/s, ver tabela V.12. Para o filito sericítico 27,3% dos valores de velocidade do som medidos na direção do comprimento estão entre 2708 e 3272 m/s, ver tabela V.13. Os histogramas correspondentes são apresentados respectivamente nas figuras 5.8.4, 5.8.5, 5.8.6.

Para o itabirito dolomítico 46% dos valores de velocidade do som medidos na direção do comprimento estão entre 6236 e 6662 m/s e 38% dos valores de velocidade do som medidos na direção da largura estão entre 6167 e 6609m/s. Juntando as medidas feitas na direção do comprimento e da largura 42% dos valores medidos estão entre 6202 e 6654 m/s, ver tabela V.11. Os histogramas correspondentes são apresentados respectivamente nas figuras 5.8.1, 5.8.2, 5.8.3.

Os resultados obtidos com medidas na direção do comprimento e na direção da largura para o itabirito dolomítico são apresentados. O gráfico relativo a estes resultados mostra alguma dispersão dos dados em torno de uma reta de 45° , ver figura 5.8.7. Conclui-se que para o itabirito dolomítico a medida da velocidade do som medida na direção da largura apresenta resultados bastante semelhantes aqueles obtidos para direção do comprimento. O mesmo não acontece para as demais litologias.

Conclui-se que para o itabirito dolomítico a medida de velocidade do som segundo a direção do comprimento é equivalente a medida segundo a direção da largura. Já para os outros tipos de rocha analisados, para as quais seria útil fazer estas medidas, não foram obtidos resultados aceitáveis, a partir destas evidências conclui-se que a abordagem estudada não pode ser considerada válida.

Tabela V.11 - Velocidade da onda sonora medida nas amostras de itabirito dolomítico

Tipo de Rocha	Amostra/Caixa	Velocidade da onda medida na direção do comprimento (m/s)	Velocidade da onda medida na direção da largura (m/s)
Itabirito dolomítico	A43CX21	6627	6490
Itabirito dolomítico	A43CX21	5923	5688
Itabirito dolomítico	A44CX21	6878	6828
Itabirito dolomítico	A45CX21	6252	-
Itabirito dolomítico	A45CX21	6753	-
Itabirito dolomítico	A46CX22	6712	6426
Itabirito dolomítico	A48CX22	6263	6426
Itabirito dolomítico	A48CX22	6780	6746
Itabirito dolomítico	A49CX22	6461	6220
Itabirito dolomítico	A49CX22	6484	6787
Itabirito dolomítico	A50CX23	6441	5925
Itabirito dolomítico	A50CX23	5994	-
Itabirito dolomítico	A54CX23	6341	6420
Itabirito dolomítico	A56CX55	5437	-
Itabirito dolomítico	A57CX55	5706	-
Itabirito dolomítico	A57CX55	5210	-
Itabirito dolomítico	A58CX55	5390	-
Itabirito dolomítico	A59CX55	5843	-
Itabirito dolomítico	A60CX56	5834	-
Itabirito dolomítico	A60CX56	6142	-
Itabirito dolomítico	A60CX56	5781	-
Itabirito dolomítico	A61CX56	4806	-
Itabirito dolomítico	A62CX56	5819	6092
Itabirito dolomítico	A67CX58	4743	4954
Itabirito dolomítico	A67CX58	5313	4620
Itabirito dolomítico	A00CX19	6556	6667
Itabirito dolomítico	A00CX20	6897	7013
Itabirito dolomítico	A00CX21	5871	5684
Itabirito dolomítico	A00CX22	6691	6506
Itabirito dolomítico	A00CX23	6534	6506
Itabirito dolomítico	A00CX24	6638	6923
Itabirito dolomítico	A00CX44	4841	5400
Itabirito dolomítico	A00CX49	4245	5094
Itabirito dolomítico	A00CX51	5092	5745
Itabirito dolomítico	A00CX53	4794	5143
Itabirito dolomítico	A00CX55	5489	6353
Itabirito dolomítico	A00CX65	4962	5400

Tabela V.12 - Velocidade da onda sonora medida nas amostras de quartzo-xisto e quartzito.

Tipo de Rocha	Amostra/Caixa	Velocidade da onda medida na direção do comprimento (m/s)
Quartzo-xisto	A09CX52	3959
Quartzo-xisto	A10CX49	3550
Quartzo-xisto	A11CX49	4404
Quartzo-xisto	A12CX48	2653
Quartzo-xisto	A13CX45	4861
Quartzo-xisto	A14CX18	2723
Quartzo-xisto	A22CX11	3212
Quartzo-xisto	A00CX21	1467
Quartzo-xisto	A00CX22	1041
Quartzo-xisto	A00CX39	1886
Quartzo-xisto	A00CX41	2300
Quartzito	A16CX16	1565
Quartzito	A17CX19	3289
Quartzito	A19CX19	2225
Quartzito	A21CX15	1091
Quartzito	A33CX06	4194
Quartzito	A33CX06	3665
Quartzito	A34CX06	3536
Quartzito	A35CX06	3069
Quartzito	A36CX06	3430
Quartzito	A00CX24	3750
Quartzito	A00CX34	2655
Quartzito	A00CX38	5208

Tabela V.13 - Velocidade da onda sonora medida nas amostras de filito sericítico e quartzo-filito

Tipo de Rocha	Amostra/Caixa	Velocidade da onda medida na direção do comprimento (m/s)
Filito sericítico	A26CX31	3867
Filito sericítico	A27CX32	3346
Filito sericítico	A40CX34	2484
Filito sericítico	A40CX34	3017
Filito sericítico	A41CX35	4122
Filito sericítico	A00CX34	2594
Filito sericítico	A00CX41	2943
Filito sericítico	A00CX28	2128
Filito sericítico	A00CX30	1563
Filito sericítico	A00CX35	2819
Filito sericítico	A00CX37	1298
Quartzo-filito	A23CX15	2836
Quartzo-filito	A00CX09	3779
Quartzo-filito	A00CX10	6159
Quartzo-filito	A00CX12	2206
Quartzo-filito	A00CX14	2491

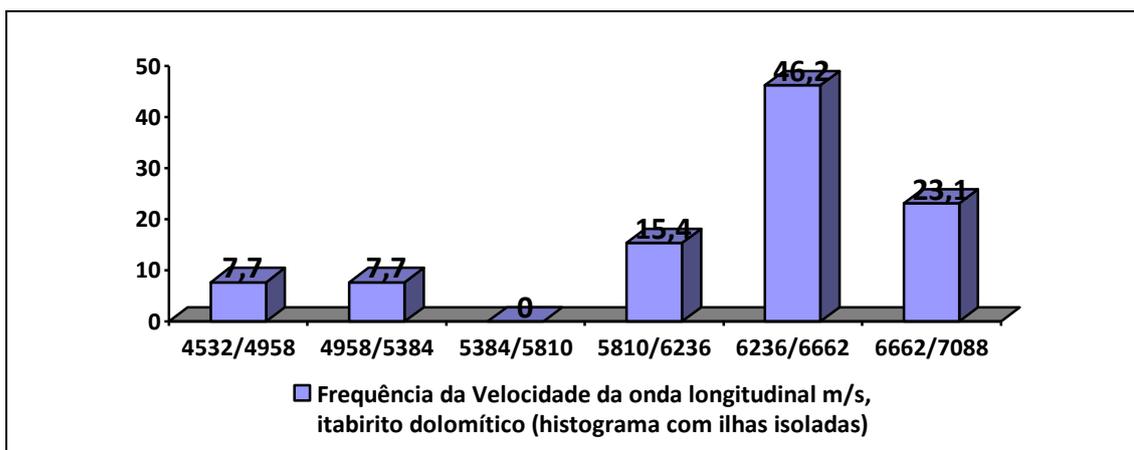


Figura 5.8.1 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Itabirito dolomítico, direção do comprimento.

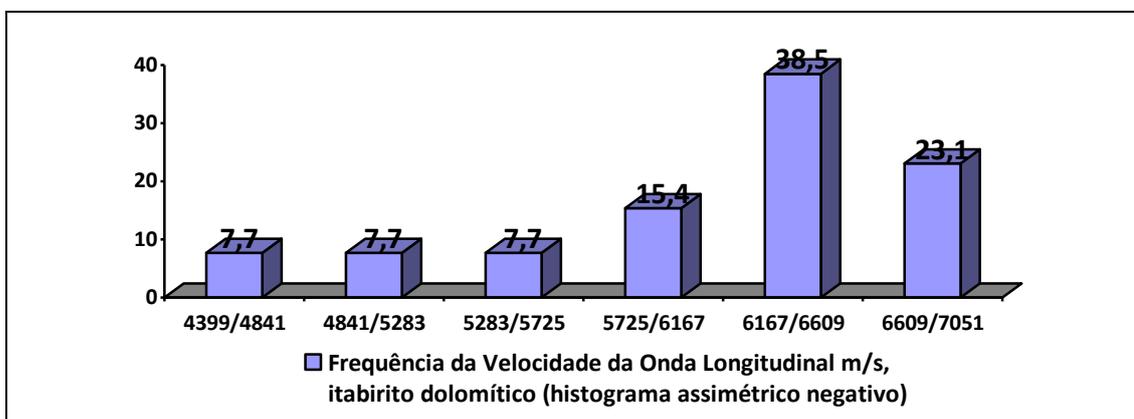


Figura 5.8.2 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Itabirito dolomítico, direção da largura.

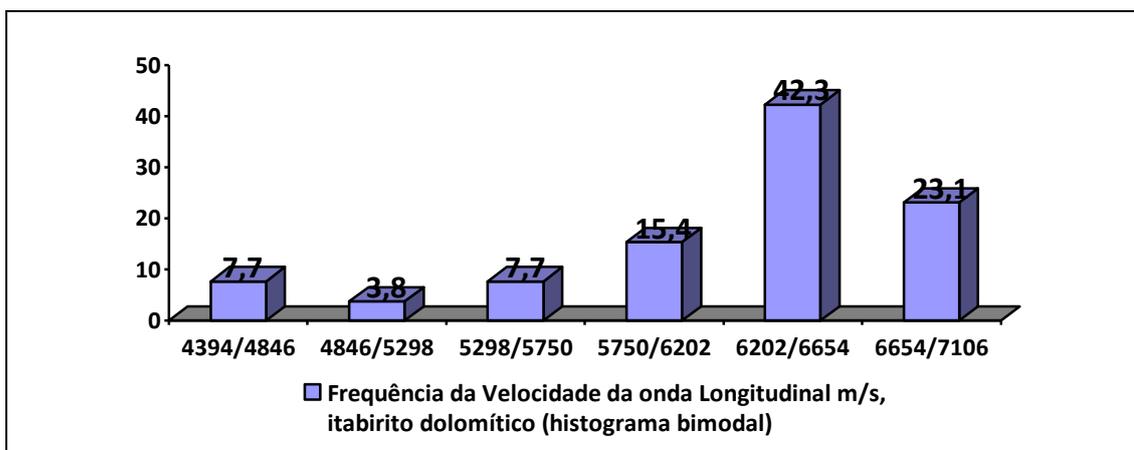


Figura 5.8.3 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Itabirito dolomítico, direção do comprimento e da largura.

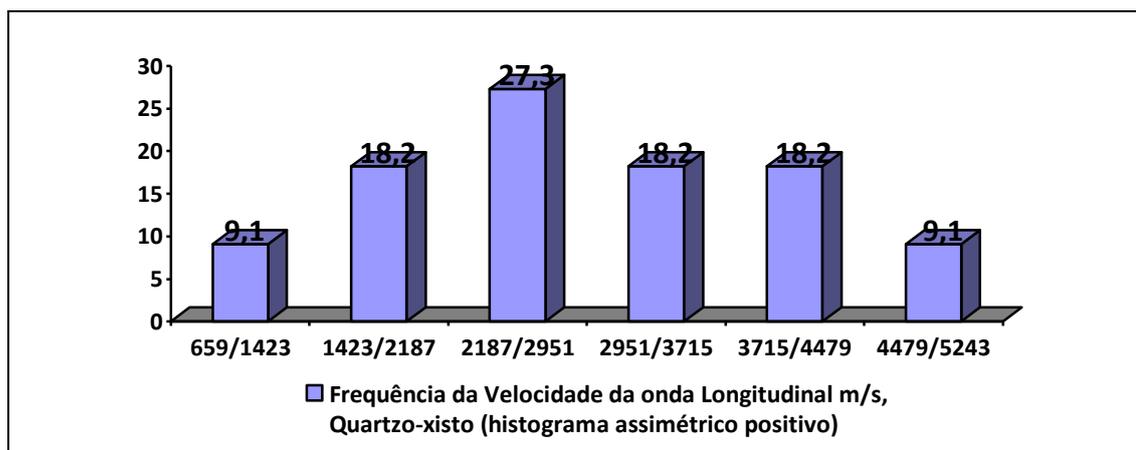


Figura 5.8.4 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Quartzo-xisto, direção do comprimento.

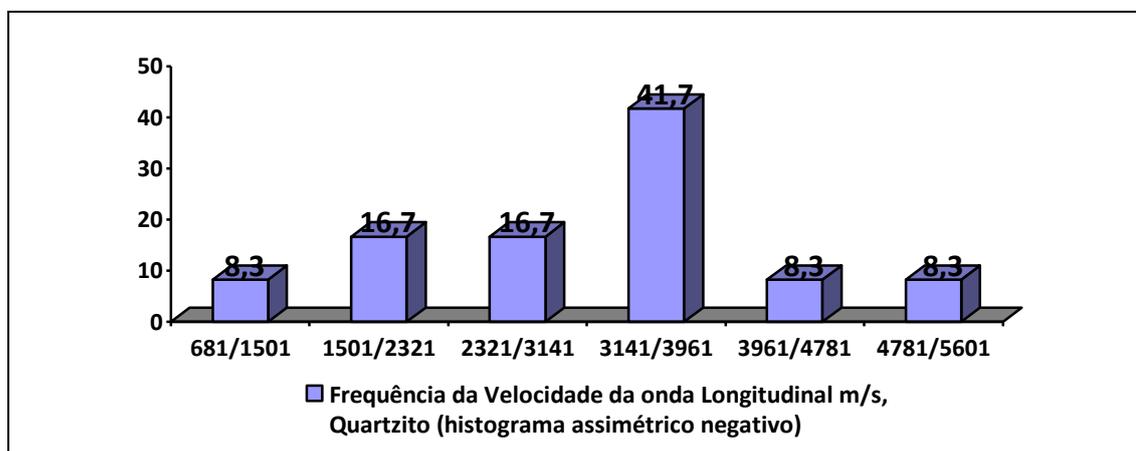


Figura 5.8.5 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Quartzito, direção do comprimento.

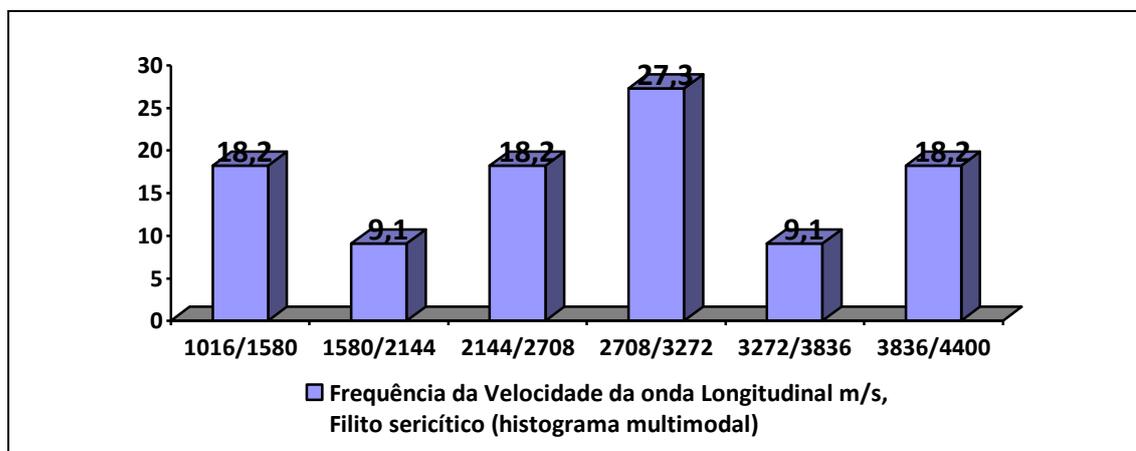


Figura 5.8.6 - Histograma da velocidade da onda longitudinal. Filito sericítico, direção do comprimento.

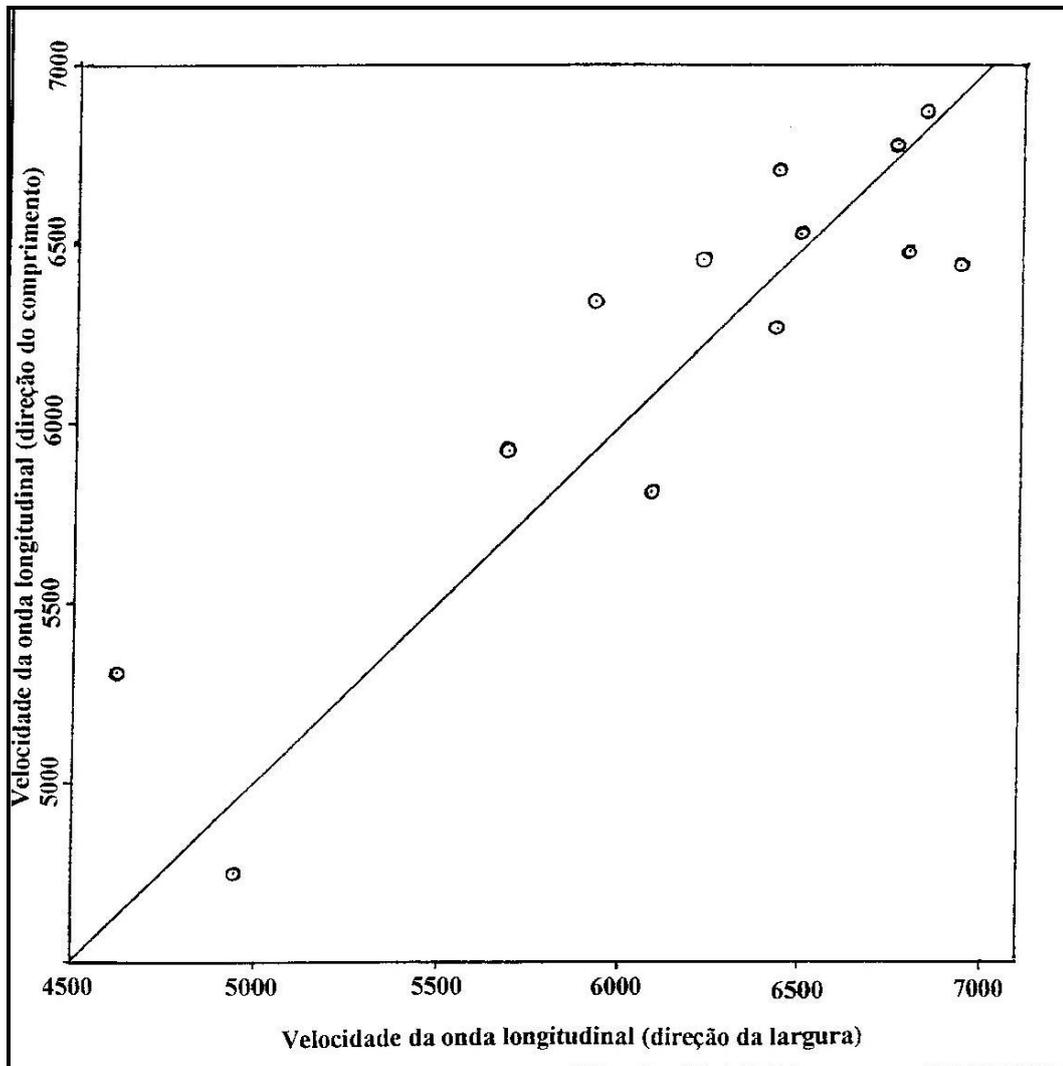


Figura 5.8.7 - Velocidade da onda longitudinal na direção do comprimento x velocidade da onda longitudinal na direção da largura. Itabirito dolomítico.

5.9 – Comentários finais.

O programa exigiu atenção cuidadosa em cada etapa. Para cada ensaio realizado foi dedicado elevado número de horas de trabalho. Todos os pontos considerados relevantes foram anotados. Tentou-se correlacionar as observações e resultados obtidos.

Pode-se admitir que o conhecimento das propriedades de mecânicas e físicas das rochas é ainda pequeno para propósitos de elaboração de projetos de Engenharia de Rochas tendo em conta a complexidade geológica e heterogeneidade dos maciços rochosos no quadrilátero ferrífero bem como a importância econômica e ambiental dos projetos de mineração.

O aproveitamento sistemático e a coleta de informações geológicas e geomecânicas a cada etapa do desenvolvimento do projeto pode ser um dos caminhos para um melhor equacionamento das questões geomecânicas. A realização sistemática de programas de ensaios de laboratório a cada obra executada permitiria a construção de um rico banco de dados.

A presença de rocha alterada indica a necessidade de uma metodologia diferente daquela utilizada neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARTON, N. & CHOUBEY, V. *The shear strength of rock joints in theory and practice*, Rock Mech., 1977. vol. 10, pp.1-54.

BROWN, E. T. *Rock Characterization Testing and Monitoring ISRM Suggested Methods*. Oxford: Pergamon Press, 1981. 211p.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA NUCLEAR-CDTN. *Manual Técnico*. Rio de Janeiro. Geologia de Campo. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP. [198-]. 13p. (Notas de aula).

DANA, J. D. *Manual de Mineralogia*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984. 644p.

DEERE, D.U. & PATTON, F.D. *Slope stability in residual soils*. PACSMFE, 4, v.1, Puerto Rico, 1971. p. 87-170. c

FARMER, I.W. *Engineering behaviour of rocks*. London: Chapman and Hall Ltd, 1983. 208p.

GOODMAN, R.E. *Introduction to Rock Mechanics*. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1989. 562p.

GIANI, G.P. *Rock Slope Stability Analysis*. Rotterdam: A. A. Balkema Publishers, 1992. 361p.

GRIPP, M.F.A. *Estudos Geomecânicos no Planejamento e Projeto de Minas a Céu Aberto*. Belo Horizonte: Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais, 1996. 9 p. (Resumo do Projeto de Pesquisa TEC 100196)

GUIDICINI, G., OLIVEIRA, A.M.S., CAMARGO, F.P., KAJI, N. *Um método de classificação geotécnica preliminar de meios rochosos*. SPGA, São Paulo, 1972. n.4, p. 275-282 apud VAZ, L. F. (1996) *Grau de Alteração de Rochas*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 8, v.1, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABGE, 1996. p.71-84.

NONATO, C. A. *Estudos geomecânicos no projeto de engenharia de taludes*. Belo Horizonte: UFMG, Proposta de tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. 80 p.

NONATO, C. A. *Utilização de Classificações de Maciços Rochosos no Estudo da Estabilidade de Taludes Pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero, MG*. Belo Horizonte: UFMG, Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994. 162 p

NONATO, C.A. & GRIPP, M.F.A. *Contribuição à Caracterização Geológica-Geomecânica no Quadrilátero Ferrífero*. In: Simpósio Brasileiro de Mecânica de Rochas, 1, 1994, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: ABMS/ABGE, 1994. p. 231-238.

OBERT, L. & DUVALL, W. I. *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*. Nova York: John Wiley and Sons, 1967. 459p.

SPIEGEL, M. R. *Estatística*. São Paulo: 2 ed. Mc Graw-Hill do Brasil, 1985. 454p.

STACEY, T. R., PAGE C. H. *Practical Handbook For Underground Rock Mechanics*. Clausthal, Trans Tech, 1986. 144p.

VAZ, L. F. *Grau de Alteração de Rochas*. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 8, v.1, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABGE, 1996. p.71-84.