UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO DE CRISOTILA DA MINA DE CANA BRAVA, GO.

Mírian Cruxên Barros de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Valarelli

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

SÃO PAULO
1996

ERRATA

- **Final da página 10**

Atualmente os maiores produtores mundiais de amianto são: os países da ex-URSS (Rússia, Cazaquistão e Sibéria), ***Canadá,*** China, Brasil, Zimbábue, África do Sul. São identificados ***a nível mundial 200 x 10^6t de reserva medida e 45 x 10^6t de***

- **Final da página 47**

Na 1ª etapa dos trabalhos foram também efetuadas análises termodiferenciais (ATD) e análises por difração de raios X, com o objetivo de auxiliar na identificação ***das fases de serpentina presentes nos tipos petrográficos SP-1 e SP-2. A partir de***

- **Final da página 48**

finos resultantes das sucessivas britagens e peneiramentos. Compreendeu também a ***análise mineralógica dos materiais com granulometria < 0,074 mm, provenientes da rocha britada e da britada atritada.***

- **Topo da página 59**

Por fim, foi testado o aparelho Pressley, apropriado para medidas de tração em fibras de algodão. Para obter parâmetros de comparação entre o Pressley e o Pulmac foram executados inicialmente ensaios em fibras de viscose, nos dois aparelhos.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO DE CRISOTILA DA MINA DE CANA BRAVA, GO.

Mírian Cruxên Barros de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Valarelli

TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	nome	ass.
Presidente :	*José Vicente Valarelli*	
Examinadores:	*Yushiro Kihara*	
	Inês Joekes	
	Valdir Aparecido Zampieri	
	Arthur Pinto Chaves	

SÃO PAULO
1996

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC
30900005348

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO DE CRISOTILA DA MINA DE CANA BRAVA, GO.

Mírian Cruxên Barros de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Valarelli

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
BIBLIOTECA
T2287
USP

SÃO PAULO
1996

+
048
MCB.C
e.2

Ficha catalográfica

OLIVEIRA, Mírian Cruxên Barros de
Caracterização tecnológica do minério de crisotila da Mina de Cana Brava, GO. São Paulo, 1996.
250p.
Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

1. Caracterização tecnológica 2. Fibra 3. Amianto 4. Crisotila 5. Serpentina 6. Compósito 7. Minério 8. Serpentinito 9. Mina de Cana Brava. I Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. II. Título

"Das Utopias

Se as coisas são inatingíveis ... ora!

Não é motivo para não querê-las ...

Que tristes os caminhos, se não fora

A mágica presença das estrelas!"

Mário Quintana

AGRADECIMENTOS

À alegria de ver a tese terminada, junta-se a de lembrar de tantas pessoas e instituições que colaboraram para que este trabalho se realizasse a contento.

Ao Prof. Dr. José Vicente Valarelli devo a orientação dedicada, o interesse, estímulo e cobrança nos momentos decisivos.

À Heloísa agradeço pelas contribuições no estudo petroquímico e especialmente pelo estímulo, amizade e companheirismo constantes.

Devo um agradecimento especial à Daniela pela competência e profissionalismo demonstrados no acompanhamento da pesquisa, bem como pela dedicação e afeto.

Ao Prof. Dr. José Moacyr Vianna Coutinho devo importante contribuição nos estudos petrográficos e mineralógicos, além de valiosas críticas e sugestões.

Quero agradecer ao Fábio pelo encorajamento em vários momentos difíceis, pela permanente disponibilidade, pelas discussões e proveitosas idéias, especialmente no tocante aos aspectos geológicos e estruturais da área estudada.

Agradeço ao Eduardo pela colaboração nos estudos de resistência mecânica das fibras de crisotila e também pelo apoio e amizade.

Devo à Sara as fotomicrografias e análises por dispersão de energia obtidas no microscópio eletrônico de varredura, e à Sandra, a importação das imagens.

Ao Prof. Dr. Pedro Kiyohara quero agradecer pelas bibliografias gentilmente fornecidas e principalmente pela cessão das fotomicrografias obtidas em microscópio eletrônico de transmissão.

Ao Prof. Dr. Paulo Roberto do Lago Helene muito obrigada pelo incentivo, pelas idéias criativas e pelo auxílio específico nos aspectos referentes a compósitos.

Agradeço também à Lucia e ao Naohiko pela colaboração prestada no tratamento estatístico.

Devo ao Frazão o apoio administrativo e operacional, o estímulo permanente, além de importante contribuição na interpretação dos ensaios tecnológicos dos serpentinitos.

Agradeço à Cristina pela amizade, leitura crítica e proveitosas idéias; e também ao Jairo pela atenção e auxílio na interpretação dos difratogramas.

Desejo agradecer à Solange e à Inês, pela rapidez e eficiência na recuperação e revisão bibliográficas, bem como pela demonstração permanente de estímulo e amizade.

Também gostaria de referenciar Márcio Cunha e Valdir Ponçano por me proporcionarem as condições necessárias para o desenvolvimento desta pesquisa; ao Valdir, agradeço ainda pelo incentivo.

As análises de espectroscopia de infravermelho ficaram a cargo do Laboratório de Análise Térmica Prof. Dr. Ivo Giolito, do Instituto de Química da USP, sob a responsabilidade do Prof. Dr. Jivaldo do Rosário Matos e do técnico Moacir Francisco de Brito, e a preparação das amostras para ensaio ficaram a cargo do Laboratório de Análise Química Orgânica da Divisão de Química do IPT, nas pessoas dos pesquisadores Koichi Mizuta e Shoko Ota, aos quais agradeço.

Sou agradecida também ao Dr. Valdir Zampieri e ao Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves, pela atenção que sempre me dedicaram, bem como pelas valiosas críticas e sugestões.

Quero agradecer ao Sbrighi pelo incentivo e proveitosas idéias e ao Dr. Francisco Dantas pelas sugestões e fornecimento de bibliografias.

Reconhecimento especial devo ao Aroldo, pelo cuidado e eficiência na execução da maior parte das figuras e, mais do que isso, pela dedicação e amizade.

À Renata e à Lucinha agradeço pelo cuidado na digitação e editoração da tese, bem como pela paciência e indispensável suporte administrativo.

Desejo agradecer a todos os colegas do Agrupamento de Tecnologia de Materiais Rochosos do IPT, pela ajuda prestada nas várias fases do trabalho, em especial ao Valentim (pela paciência e cuidado nos ensaios de tração das fibras brutas), ao Dogival, ao Jilson, ao Eli e ao Nílson, pelo apoio e presteza em todas as fases deste trabalho.

Agradeço ao Luizinho e à Damaris pela execução cuidadosa de alguns desenhos.

Pela colaboração prestada na revisão bibliográfica desejo agradecer à então estagiária-aluna Andréia Barbin.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas S.A. (IPT) meus agradecimentos pela oportunidade e apoio, bem como pelo financiamento da parte final da pesquisa.

Agradeço à S.A. Mineração de Amianto (Sama) pela autorização e fornecimento de dados e amostras. Em especial, gostaria de agradecer a Renato Pamplona, pelo estímulo e atenção que sempre me dispensou e ainda pelas críticas, sugestões e leitura criteriosa dos manuscritos. Expresso também meu reconhecimento a outros profissionais da Sama, pela colaboração nas amostragens, fornecimentos de informações e proveitosas discussões: Afonso Inhanez, Norberto Queiroga, Willian Bretas Linhares, Mauro Tavares, Domingos Sávio de Lima Lana, Vincent Guelfucci e José Aurélio Medeiros da Luz.

A confecção das capas e encadernação dos exemplares, ficou a cargo da equipe do Sr. Dalton Machado, da Gráfica do IGUSP, aos quais agradeço pelo cuidado e eficiência.

Desejo agradecer ainda ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - IGUSP pela oportunidade de cursar o doutorado e por financiar a edição dos volumes da tese; ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e à Coordenação de

Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudos e auxílio à pesquisa.

Pelo encorajamento e apoio agradeço ainda aos amigos: Vilmondes, Mário Sérgio, Farjallat, Eloísa, Fabíola, Mané, Lesir, Ivan, Amarílis, Evelyne, Carolina, Fábio Conrado, Marcão e Edgard.

Finalmente, agradeço àqueles que me deram força e coragem para executar esta tese: minha família. A vocês, Sílvio, Marina e Clarissa e a meus pais, Yolanda e Gaspar, dedico este trabalho.

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO MINÉRIO DE CRISOTILA DA MINA DE CANA BRAVA, GO.

SUMÁRIO

p.

Agradecimentos ii

Lista de Figuras x

Lista de Fotos xii

Lista de Quadros xv

Lista de Tabelas xv

Resumo xviii

Abstract xx

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO 1

1.1. Justificativa 1

1.2. Pesquisas na área 2

1.3. Objetivos 3

1.4. Originalidade 3

1.5. Conteúdo 4

1.6. Aspectos geográficos da área estudada 5

p.

CAPÍTULO II

DEFINIÇÃO E CONCEITUAÇÃO DE FIBRAS, SERPENTINAS E COMPÓSITOS 7

2.1. Fibra - definição e características 7

2.1.1. Amianto - definição e características 10

Considerações iniciais 10

Características principais 11

Propriedades físicas e químicas 12

Resistência à tração 13

Superfície específica 14

Decomposição térmica 15

Propriedades superficiais 16

Principais usos 17

2.1.2. Características dos minerais do grupo das serpentinas 20

Identificação das serpentinas 22

2.1.3. Compósitos 29

Definição 29

Compósitos de fibrocimento 30

Cimento-amianto 32

Fabricação de produtos de cimento-amianto 35

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS 37

3.1. Introdução 37

3.2. Materiais 37

3.2.1. Rocha *in natura* 40

3.2.2. Rocha britada 40

p.

3.2.3. Rocha britada atritada 40

3.2.4. Fibra bruta 40

3.2.5. Fibra semi-bruta 41

3.2.6. Fibra beneficiada 41

3.3. Métodos 41

3.3.1. Trabalhos de campo 41

3.3.2. Caracterização petrográfica e mineralógica das rochas 42

3.3.3. Caracterização tecnológica das rochas 48

Ensaios de determinação de índices físicos 49

Ensaio de resistência à abrasão *Los Angeles* 49

Ensaio de resistência ao impacto Treton 50

Ensaio de velocidade de propagação de ondas P 53

Ensaio de resistência à compressão uniaxial 53

Análises mineralógicas dos materiais com granulometria <0,074 mm 55

3.3.4. Caracterização tecnológica das fibras 55

Análises mineralógicas 56

Ensaios de resistência à tração 57

Ensaios de determinação do índice de comprimento (IC) 61

Ensaio de determinação do conteúdo de finos (LA) 61

Ensaio de determinação da unidade de resistência à flexão (UR) 61

CAPÍTULO IV

A MINA DE CANA BRAVA 63

4.1. Geologia 63

4.1.1. Geologia regional 63

O Complexo máfico-ultramáfico de Cana Brava 67

p.

4.1.2. Geologia e evolução das estruturas da Mina de Cana Brava 69

Geologia local 69

Modelo estrutural 74

4.2. Processo de beneficiamento do amianto crisotila 76

CAPÍTULO V

CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO - RESULTADOS OBTIDOS 82

5.1. Caracterização petrográfica das rochas da Mina de Cana Brava 82

5.1.1. Mineralogia e petrografia dos serpentinitos 82

Serpentinas 82

Minerais opacos e semi-opacos 93

Carbonatos 94

Clorita magnesiana ou Brucita 94

Olivina 94

Piroxênio 95

5.1.2. Petrografia das rochas não serpentínicas 103

5.1.3. Estudo petroquímico dos serpentinitos 104

5.2. Caracterização tecnológica dos serpentinitos 106

5.2.1. Análise dos materiais com granulometria <0,074 mm 113

5.3. Caracterização tecnológica das fibras brutas 118

5.3.1. Caracterização mineralógica 118

5.3.2. Caracterização mecânica 128

Estudos anteriores 128

Ensaios de resistência à tração 136

5.4. Caracterização tecnológica das fibras semi-brutas e beneficiadas 138

5.4.1. Análises mineralógicas 138

5.4.2. Análises tecnológicas 151

p.

CAPÍTULO VI

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 156

6.1. Introdução 156

6.2. Caracterização petrográfica das rochas da Mina de Cana Brava 156

6.3. Caracterização tecnológica dos serpentinitos 158

6.4. Caracterização tecnológica das fibras brutas 159

6.5. Caracterização tecnológica das fibras semi-brutas e beneficiadas 160

6.6. Caracterização do minério 175

6.7. Considerações 194

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 195

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 200

ANEXO A 208

p.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Mapa de localização e acessos da Mina de Cana Brava. 6

FIGURA 2 - Desenho esquemático da camada tetraédrica dos minerais do grupo das serpentinas (WICKS, 1979) 20

FIGURA 3 - Desenho esquemático da camada octaédrica dos minerais do grupo das serpentinas (WICKS, 1979) 21

FIGURA 4 - Projeção da face [001] de uma camada idealizada de serpentina, com Mg na posição octaédrica em relação ao eixo *x* (BAILEY, 1969, *apud* WICKS, 1979) 21

FIGURA 5 - Esquema de um corte transversal de feixes de fibrilas de crisotila, tendo cristais de tobermorita aderidos à superfície cilíndrica pelas faces planas (vistas transversalmente) (KIYOHARA, 1991) 34

FIGURA 6 - Articulação dos blocos crustais do norte de Goiás (modificado de HASUI, COSTA, HARALYI, 1994) 64

FIGURA 7 - Mapa geológico regional com indicação da sutura crustal de Ceres separando os blocos Porangatú e Brasília 65

FIGURA 8 - Mapa geológico do Maciço de Cana Brava 68

FIGURA 9 - Mapa geológico simplificado da Mina de Cana Brava e de localização das amostras (2ª etapa dos trabalhos) 70

FIGURA 10 - Unidade de beneficiamento na Mina de Cana Brava 78

FIGURA 11 - Curvas termodiferenciais das amostras de serpentinito (1ª etapa dos trabalhos)
(a) predomínio de crisotila; (b) predomínio de antigorita e/ou lizardita; (c) exclusivamente crisotila 102

FIGURA 12 - Diagramas SiO_2 x óxidos das amostras de serpentinito 107

FIGURA 13 - Diagramas SiO_2 x traços e SiO_2 x H_2O^+ das amostras de serpentinito 108

FIGURA 14 - Diagramas H_2O^+ x Cl, H_20+ x Co e H_2O^+ x Fe_2O_3 das amostras de serpentinito 109

FIGURA 15 - (a) - Análise por dispersão de energia (EDS 1) de material fibroso (crisotila) 120
(b) - Análise por dispersão de energia (EDS 2) de material granular (serpentina) 121
(c) - Análise por dispersão de energia (EDS 3) de material granular (serpentina) 122

p.

FIGURA 16 - (a) - Curvas TG e TD das amostras de fibras brutas 1, 2 e 3 (2ª etapa dos trabalhos) 126

(b) - Curvas TG e TD das amostras de fibras brutas 5, 6 e 7 (2ª etapa dos trabalhos) 127

FIGURA 17 - (a) - Espectro de infra-vermelho das amostras de fibras brutas (2ª etapa dos trabalhos) 130

(b) - "Zoom" dos espectros de infra-vermelho das amostras de fibras brutas (2ª etapa dos trabalhos) 131

FIGURA 18 - (a) - Difratogramas das amostras de fibras semi-brutas e beneficiadas 1 e 2 (2ª etapa dos trabalhos) 143

(b) - Difratogramas das amostras de fibras semi-brutas e beneficiadas 3 e 4 (2ª etapa dos trabalhos) 144

(c) - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 5 (2ª etapa dos trabalhos) 145

(d) - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 6 (2ª etapa dos trabalhos) 146

(e) - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 7 (2ª etapa dos trabalhos) 147

(f) - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 8 (2ª etapa dos trabalhos) 148

(g) - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 9 (2ª etapa dos trabalhos) 149

(h) - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 10 (2ª etapa dos trabalhos) 150

FIGURA 19 - Análise por dispersão de energia (EDS) dos grãos associados às fibras semi-brutas 153

FIGURA 20 - (a) - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, das amostras de fibra bruta 1 e 2 (2ª etapa dos trabalhos) 161

(b) - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, das amostras de fibras brutas 3 e 5 (2ª etapa dos trabalhos) 162

(c) - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, das amostras de fibras brutas 6 e 7 (2ª etapa dos trabalhos) 163

FIGURA 21 - (a) - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 300°C, das amostras de fibras brutas 2 e 3 (2ª etapa dos trabalhos) 164

(b) - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 300°C, das amostras de fibras brutas 6 e 7 (2ª etapa dos trabalhos) 165

p.

FIGURA 22 - (a) - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 500°C, das amostras de fibras brutas 2 e 3 (2ª etapa dos trabalhos) 166

(b) - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 500°C, das amostras de fibras brutas 6 e 7 (2ª etapa dos trabalhos) 167

FIGURA 23 - (a) - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, para as amostras de fibras brutas 1 e 2 (2ª etapa dos trabalhos) 168

(b) - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, para as amostras de fibras brutas 3 e 5 (2ª etapa dos trabalhos) 169

(c) - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, para as amostras de fibras brutas 6 e 7 (2ª etapa dos trabalhos) 170

FIGURA 24 - (a) - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 300°C, para as amostras de fibras brutas 2 e 3 (2ª etapa dos trabalhos) 171

(b) - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 300°C, para as amostras de fibras brutas 6 e 7 (2ª etapa dos trabalhos) 172

FIGURA 25 - (a) - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 500°C, para as amostras de fibras brutas 2 e 3 (2ª etapa dos trabalhos) 173

(b) - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 500°C, para as amostras de fibras brutas 6 e 7 (2ª etapa dos trabalhos) 174

LISTA DE FOTOS

FOTO 1 - Vista aérea da Mina de Cana Brava (cavas A e B) tendo ao fundo a Serra de Cana Brava 5

FOTO 2 - Fibrila de crisotila de Cana Brava vista longitudinalmente, sob microscópio eletrônico de transmissão (MET), mostrando a estrutura cristalina (1.120.000x). Foto cedida por Pedro Kiyohara 25

FOTO 3 - Fibrilas de crisotila de Cana Brava, sob microscópio eletrônico de transmissão (MET), com a parte interna vazia ou preenchida por material não cristalino (165.000x). Foto cedida por Pedro Kiyohara.. 25

FOTO 4 - Fibrila de crisotila de Cana Brava, sob microscópio eletrônico de transmissão (MET), submetidas ao tratamento com citrato de chumbo (300.000x). Foto cedida por Pedro Kiyohara 26

p.

FOTO 5 - Corte transversal de feixe de fibrilas de crisotila de Cana Brava sob microscópio eletrônico de transmissão (MET), mostrando a "espiral" em sentido horário e anti-horário (800.000x). Foto cedida por Pedro Kiyohara 26

FOTO 6 - Ensaio de abrasão Los Angeles. Amostras e esferas metálicas no interior do tambor da máquina de ensaio 51

FOTO 7 - Aspecto de uma amostra antes e de outra após ensaio de abrasão Los Angeles. Na bandeja circular está o material de dimensão menor que 1,68 mm (perdas) 51

FOTO 8 - Aspecto de uma amostra antes do ensaio de impacto Treton 52

FOTO 9 - Aspecto da amostra da foto anterior após ensaio de impacto Treton 52

FOTO 10 - Ilustração do procedimento adotado para determinação da velocidade de propagação de ondas P 54

FOTO 11 - Aspecto dos corpos-de-prova de uma amostra destinados a ensaio de compressão uniaxial 54

FOTO 12 - Aspecto do equipamento *Pressley* 60

FOTO 13 - Ensaio Turner & Newall utilizado para medida do índice de comprimento das fibras (IC) 62

FOTO 14 - Equipamento utilizado no ensaio para determinação da unidade de resistência à flexão 62

FOTO 15 - Aspecto de uma mineralização do tipo *stockwork*, no domínio de SP-1, com "paredes" de SP-2 73

FOTO 16 - Aspecto geral de uma frente de lavra com domínio de SP-2, intensamente fraturado. A mineralização é do tipo tabular (A 348 NW) 73

FOTO 17 - Detalhe da mineralização com fibras longas. Domínio de SP-1, com "paredes" de SP-2 (B 318 W) 77

FOTO 18 - Detalhe da mineralização com fibras curtas. Domínio de SP-1 (B 318 SW) 77

FOTO 19 - Vista geral do complexo mínero-industrial da Mina de Cana Brava . 81

FOTO 20 - Aspecto macroscópico de serpentinito tipo 1 (SP-1), com alteração intempérica de coloração amarronzada 95

FOTO 21 - (a) - Aspecto microscópico de serpentinito tipo 1 (SP-1). Cristal de olivina (1); enstatita (2); picotita (3); entre os quais ocorre antigorita e/ou lizardita (4). Polarizadores cruzados. Aumento 38x (Amostra CB 967 (61,10 m)) 96

p.

(b) Aspecto microscópico de serpentinito tipo 1 (SP-1). Vênula de crisotila Z (1); bordejada por magnetita (+hematita) (2) e com calcita associada (3), cortando os cortes de antigorita e/ou lizardita (4). Polarizadores cruzados. Aumento 38x (Amostra CB-994 (66,70m)) 96

FOTO 22 - (a) - Corpos de antigorita e/ou lizardita sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) em serpentinito tipo 1 (SP-1). (Amostra CB-994 (66,70 m)) 97

(b) - Detalhe da foto anterior 97

(c) - Outro aspecto da rocha, observando-se grãos placóides e raras fibras 97

FOTO 23 - Aspecto macroscópico de serpentinito tipo 2 (SP-2) 98

FOTO 24 - (a) - Aspecto microscópico de serpentinito tipo 2 (SP-2). Crisotila predominante em cristais bem desenvolvidos (1); antigorita e/ou lizardita em agregados de cristais finíssimos (2); magnetita em pequenos cristais esparsos (3). Polarizadores cruzados. Aumento 38x. (Amostra A-318 WNW) 99

(b) - Aspecto microscópico de serpentinito tipo 1 (SP-1). Porfiroblasto deformado de crisotila Z (1), em meio à matriz formada por agregados de fibras curtas de crisotila Z (2). Cristais de hidromagnesita (3) em vênulas. Polarizadores cruzados. Aumento 38x. (Amostra A-358W) 99

FOTO 25 - (a) - Corpos de crisotila Z sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) em serpentinito tipo 2 (SP-2). (Amostra B-358N) 100

(b) - Detalhe da foto anterior 100

(c) - Outro aspecto da mesma amostra, observando-se conjuntos de fibrilas de crisotila da matriz rochosa 100

FOTO 26 - Aspecto macroscópico de serpentinito tipo 1/2 101

FOTO 27 - (a) - Aspecto geral dos finos da rocha britada atritada sob microscópio eletrônico de varredura (MEV). (Amostra 6) 119

(b) - Detalhe do "substrato" da foto anterior, com abundância de microfibras de crisotila 119

(c) - Detalhe do "substrato" da foto 27b; o sinal "+" marca os locais onde se fez EDS (FIGURA 15 (a)/(c)) 119

FOTO 28 - (a) - Aspecto de vênula de fibras de crisotila, destacada da rocha, observando-se fibras retilíneas e crenuladas, de gerações distintas (Amostra 1) 125

(b) - Aspecto de vênula de fibras de crisotila, destacada da rocha; ao longo da fratura ocorrem cristais de magnetita (Amostra 6) 125

p.

FOTO 29 - (a) - Aspecto dos feixes de fibra bruta sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Amostra 6) 129

(b) - Detalhe dos feixes de fibrilas levemente flexionadas 129

FOTO 30 - (a) - Aspecto de amostra de fibra semi-bruta sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Amostra 6) 152

(b) - Detalhe dos feixes de fibrilas flexionadas 152

(c) - Presença de microfibrilas e micrograos associados às fibras... 152

FOTO 31 - (a)- Aspecto de amostra de fibra beneficiada sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Amostra 6) 154

(b) - Detalhe dos feixes de fibras; presença de microfibrilas e micrograos associados às fibras 154

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Principais propriedades dos minerais de amianto 13

QUADRO 2 - Identificação das 10 amostras estudadas na 2ª etapa dos trabalhos 42

QUADRO 3 - Comparação entre os valores especificados pela ABNT para agregados para construção civil e os valores apresentados pelos serpentinitos 112

QUADRO 4 - Classificação de resistência à compressão uniaxial de rochas (ISRM, 1978, *apud* NÓBREGA, 1985) e categorização das amostras de serpentinitos 113

QUADRO 5 - Valores médios de resistência à tração longitudinal de fibras de amianto crisotila (ruptura total) de várias procedências 139

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Ensaios efetuados e quantidade de amostras ensaiadas (1ª etapa dos trabalhos) 39

TABELA 2 - Ensaios efetuados e quantidade de amostras ensaiadas (2ª etapa dos trabalhos) 39

TABELA 3 - Relação das amostras e os respectivos ensaios realizados (2ª etapa dos trabalhos) 43

TABELA 4 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 1 (SP-1) (1ª etapa dos trabalhos) 83

TABELA 5 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 2 (SP-2) (1ª etapa dos trabalhos) 86

p.

TABELA 6 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 1 (SP-1) (2ª etapa dos trabalhos) 89

TABELA 7 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 2 (SP-2) (2ª etapa dos trabalhos) 90

TABELA 8 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 1/2 (SP-1/2) (2ª etapa dos trabalhos) 92

TABELA 9 - Resultados analíticos dos serpentinitos tipo 1 (SP-1) e tipo 2 (SP-2) (1ª etapa dos trabalhos) comparados com valores de dunito e peridotito 105

TABELA 10 - Valores médios dos resultados dos ensaios tecnológicos das amostras de rocha *in natura* (2ª etapa dos trabalhos) 110

TABELA 11 - Teores de finos da rocha britada e britada atritada, comparados com os valores do ensaio de Abrasão *Los Angeles* da rocha britada (2ª etapa dos trabalhos) 114

TABELA 12 - Análise mineralógica por microscopia óptica do material com granulometria < 0,074 mm procedente da rocha britada (2ª etapa dos trabalhos) 115

TABELA 13 - Análise mineralógica por microscopia óptica do material com granulometria < 0,074 mm procedente da rocha britada atritada (2ª etapa dos trabalhos) 116

TABELA 14 - Caracterização mineralógica das amostras de fibras brutas (1ª etapa dos trabalhos) 123

TABELA 15 - Caracterização mineralógica das amostras de fibras brutas (2ª etapa dos trabalhos) 124

TABELA 16 - Valores médios dos ensaios de resistência à tração (MPa) das amostras de fibras brutas (1ª etapa dos trabalhos) comparados com fibras de outras procedências 137

TABELA 17 - Valores médios dos ensaios de resistência à tração das amostras de fibras brutas (2ª etapa dos trabalhos) 140

TABELA 18 - Caracterização microscópica das amostras de fibras semi-brutas (a) e beneficiadas (b) (2ª etapa dos trabalhos) 141

TABELA 19 - Resultados das análises de difração de raios X das amostras de fibras semi-brutas e beneficiadas (2ª etapa dos trabalhos) 142

TABELA 20 - Síntese dos resultados dos ensaios tecnológicos das amostras de fibras semi-brutas e beneficiadas (2ª etapa dos trabalhos) 155

TABELA 21 - Aspectos petrográficos distintivos dos serpentinitos tipo 1 (SP-1) e tipo 2 (SP-2) 157

p.

TABELA 22 - Matriz de correlação para todas as amostras analisadas (2ª etapa dos trabalhos) 177

TABELA 23 - Matriz de correlação para as amostras de serpentinito tipo 1 (SP-1) 179

TABELA 24 - Matriz de correlação para as amostras de serpentinito tipo 2 (SP-2) 181

TABELA 25 - Matriz de correlação para as amostras de serpentinitos tipo 1/2 (SP-1/2) 183

TABELA 26 - Ensaios com forte correlação (≥ 0,9) para todas as amostras analisadas (2ª etapa dos trabalhos) 185

TABELA 27 - Ensaios com forte correlação (≥ 0,9) para as amostras de serpentinito tipo 1 (SP-1) 185

TABELA 28 - Ensaios com forte correlação (≥ 0,9) para as amostras de serpentinito tipo 2 (SP-2) 186

TABELA 29 - Ensaios com forte correlação (≥ 0,9) para as amostras de serpentinitos tipo 1/2 (SP-1/2) 188

RESUMO

Este trabalho, de caráter multidisciplinar, procura efetuar a necessária integração entre Geologia e Engenharia através da caracterização tecnológica do minério da Mina de Cana Brava na sua forma bruta até o produto comercial (fibra beneficiada).

A Mina de Cana Brava, da S.A. Mineração de Amianto (SAMA), localiza-se no maciço de mesmo nome, no município de Minaçu (GO), responde por quase todo o amianto produzido no país. A mineralização relaciona-se com serpentinitos associados a rochas metabásicas e metaultrabásicas do Maciço de Cana Brava. Estes serpentinitos são oriundos de hidrotermalismo sobre dunitos ou peridotitos. Cortando os serpentinitos ocorrem veios de crisotila com direções, comprimentos e espessuras muito variadas. A jazida consiste de duas cavas a céu aberto, A e B, nas quais se lavram os corpos de minério.

Para efetuar a caracterização global do minério desde a cava até o produto comercial, foram estudados: a rocha *in natura*, o material com granulometria <0,074 mm procedente da rocha britada e da rocha britada atritada, a fibra de crisotila no seu estado bruto, semi-bruto e beneficiado. Na rocha, os estudos, de caráter inédito, foram petrográficos e tecnológicos; nas fibras, foram mineralógicos e tecnológicos. Nas fibras brutas as propriedades mecânicas foram enfatizadas, por serem estas as mais importantes para a utilização no cimento-amianto. Todos os parâmetros obtidos nos vários ensaios efetuados, nos diversos tipos de materiais, foram correlacionados entre si. Observou-se que os tipos de serpentinito são facilmente distingüidos não só do ponto de vista macroscópico, como nos aspectos petrográfico e físico-mecânico.

O serpentinito tipo 1 (SP-1), de cor marrom, é caracterizado pela presença freqüente de minerais silicáticos remanescentes do protólito ultramáfico (olivina e piroxênio); os minerais do grupo das serpentinas são geralmente antigorita e/ou lizardita, secundados por crisotila, e os opacos são hematita e magnetita. Estas características petrográficas o tornam mais resistente mecanicamente, principalmente à compressão uniaxial. As fibras beneficiadas procedentes do SP-1 apresentam teores mais elevados de finos (<0,074 mm) e conseqüentemente, menores valores de índice de comprimento e de resistência à flexão.

O serpentinito tipo 2 (SP-2), de cor verde, é caracterizado pela ausência dos minerais originais da rocha-mãe, sendo constituído predominantemente por serpentinas, das quais a crisotila é a mais comum; o mineral opaco principal é a magnetita. Como conseqüência desta mineralogia, o SP-2 é menos resistente à compressão e à abrasão; as fibras beneficiadas dele procedentes exibem menores teores de finos (<0,074 mm), maiores valores de índices de comprimento e de resistência à flexão.

O serpentinito tipo 1/2 (SP-1/2) apresenta geralmente características intermediárias entre SP-1 e SP-2.

O estudo mineralógico e mecânico das fibras brutas, foi realizado em duas etapas; na 1ª, procurou-se desenvolver um método adequado para medir sua resistência à tração; na 2ª, as fibras foram caracterizadas mineralógica e mecanicamente, revelando excelente qualidade e alta resistência à tração, com valores muito próximos para todas as amostras analisadas, tanto à temperatura ambiente, como após aquecimento a 300°C e a 500°C.

Foi efetuado ainda, pela primeira vez, um estudo mineralógico do material com granulometria <0,074 mm, proveniente da rocha britada e da rocha britada atritada, de forma a se conhecer o comportamento de cada mineral frente aos processos de britagem e atrição.

Observou-se que o comportamento dos minerais é diferenciado em relação ao tipo de processo mecânico envolvido (abrasão, britagem, atrição) e também em relação ao tipo de serpentinito.

O estudo tecnológico das fibras semi-brutas e beneficiadas permitiu sua caracterização e discriminação por tipo de serpentintito.

Finalmente, através da interação dos vários estudos setorizados verificou-se que o entendimento das características e propriedades da fibra beneficiada são dependentes, não só da natureza da fibra bruta, como da rocha hospedeira e de como ambas se comportam frente aos processos de desmonte, extração e beneficiamento.

ABSTRACT

This multidisciplinary work aims to achieve an integration of Geology and Engineering by technological characterization of the Cana Brava Mine ore from its crude state up to the milling fiber.

The Cana Brava Mine belongs to the S.A. Mineração de Amianto (Sama) and is located in the like-named massif at the Minaçu country (GO). This mine accounts for nearly all the brazilian asbestos production.

The mineralization took place in serpentinites which occur intermingled with the metabasic and metaultrabasic rocks of the Cana Brava Massif. The serpentinites were produced by hydrothermal action on dunites and peridotites. Chrysotile veins in variable directions, lengths and thicknesses cut the serpentinite body. The ore bodies are worked in two open pits, A and B.

In order to make a global characterization of the ore, studies were executed on the natural rock, in the <0,074 mm grain-size material coming from both crushed and ball-milling rocks, and also on the crude fiber and fibers from pilot-plant and milling plant. Petrographical, mineralogical and technological unpublished studies were carried out in rock and in fiber samples. Being of major importance for the utilization of the asbestos-cement, the mechanical properties of the fiber were emphasized. The results obtained in analyses for the different types of material were correlated. It was found out that serpentinite types are easily distinguished under the physico-mechanical, petrografic and macroscopic point of view.

The brown serpentinite type 1 (SP-1) frequently contains reliquiar silicate minerals (olivine and pyroxene); the serpentine minerals are usually antigorite and/or lizardite, with some chrysotile, and the opaque minerals are hematite and magnetite. Such petrographical composition makes the rock more resistant to mechanical stresses, especially to the uniaxial compression. The milling fiber from SP-1 generates a larger volume of <0,074 mm powder and therefore lesser length indices and weaker flexure strength.

On the other hand, the green type 2 (SP-2) serpentinite does not contain minerals from the mother rock. It is constituted mainly by serpentines, among which chrysotile is most frequent. The chief opaque mineral is magnetite. As a consequence, the SP-2 is less resistant to compression and abrasion, its milling fiber contains less <0,074 mm powder and exhibit larger length indices and stronger flexure strength.

The properties of the type 1/2 serpentinite (SP 1/2) are usually intermediate between the ones of SP-1 and SP-2.

The mechanical and mineralogical study of the crude fibers was effected in two stages; firstly, a proper way to measure the tensile strength was searched for and, secondly, the

fibers were found to be of prime quality and display close figures of high tensile strength for all analyzed samples, at a room temperature, or at 300°C and 500°C.

Mineralogical examination of the <0,074 mm grain-size material was performed for the first time, on both crushed and ball-milling rock, so that the response of each mineral to the crushing and attrition processes has become known. Each process (abrasion, crushing, attrition) presented different results, according to the type of serpentinite analyzed.

By technological examination it was possible to characterize and distinguish pilot-plant and milling fibers related to the various serpentinites.

Finally, joining the several partial study results one could deduce that the characteristics and properties of the milling fibers depend not only on the nature of the crude fiber as well as on the host rock and also how they behave under the processes of blasting, mining and milling.

CAPÍTULO I
INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

Várias razões levaram a autora a escolher o amianto crisotila como tema de tese.

O amianto crisotila é um material singular, por suas propriedades de incombustão, isolamento térmico e resistência mecânica, principalmente. Daí resultam inúmeras aplicações, das quais a mais importante é na construção civil. Cerca de 85% a 90% do amianto produzido é utilizado para o fabrico do cimento-amianto. Além disso, usos alternativos da crisotila vêm sendo pesquisados com sucesso.

Por outro lado, os riscos e danos provocados pelo amianto são bem conhecidos. Medidas preventivas e seu uso controlado - abrangendo cuidados na extração, processamento, manuseio e industrialização - vêm sendo postos em prática, nos últimos anos, a nível nacional. Além disso, existe uma grande conscientização dos que trabalham ou mesmo só se utilizam do amianto, com relação à sua periculosidade. Entre os amiantos, a crisotila, que corresponde hoje a 98,5% de todo o amianto consumido no mundo, apresenta efeitos diferenciados e menos significativos para a saúde humana (CHURG, 1988). A nível nacional é o único mineral do grupo cujo uso controlado é aceito pelas normas de legislação ambiental.

Embora existam muitas pesquisas buscando um substituto à altura do amianto, especialmente como reforçador da pasta de cimento, não se encontrou até agora nenhum material, natural ou sintético que iguale suas propriedades, com custo tão baixo. Também não são conhecidos os efeitos destes novos materiais para a saúde humana, uma vez que as pesquisas são recentes. É possível que sejam tão danosos ou mais do que o amianto. Portanto, o uso destes materiais de efeitos ainda desconhecidos consiste num risco muito maior.

No entanto, o maior desafio consistiu na idéia ambiciosa de unir Geologia e Engenharia, na tentativa de mostrar que Ciência e Técnica precisam andar juntas, lado a lado, interagindo e se completando.

Finalmente, almeja-se deixar como contribuição para o desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia a certeza de que a pesquisa científica ultrapassa as barreiras políticas, econômicas e sociais. Pois essas passam, porém o trabalho sério de um cientista que busca o ideal do saber e de transmitir esses conhecimentos, em contraposição ao medo e à ignorância, é atemporal.

1.2. Pesquisas e pesquisadores na área

Após extensa pesquisa bibliográfica, concluiu-se que trabalhos recentes sobre o amianto, a nível nacional e internacional são bastante raros, excetuando-se a área de saúde ocupacional e preservação do meio ambiente.

A seguir é apresentado um breve histórico dos principais trabalhos sobre amianto a nível nacional, excluindo-se os trabalhos nas áreas de meio ambiente e saúde ocupacional.

Wolfang Kolbe desenvolveu ampla pesquisa bibliográfica e estudos analíticos visando a caracterização de vários tipos de amianto nacionais, englobando aspectos da industrialização dos mesmos (extração, beneficiamento, fatores de saúde e segurança, classificação do minério, produção, usos gerais e especiais) (KOLBE, 1970).

Pesquisa efetuada por Shiroyuki Oniki enfocou as propriedades reforçadoras do cimento-amianto, em virtude das variações dos tipos de amiantos e cimentos empregados em sua fabricação, através da execução de ensaios tecnológicos em condições padronizadas (ONIKI, 1970).

Pesquisa realizada por Pedro Maurício Büchler em 1974 visou o estudo de algumas propriedades dos amiantos brasileiros quando tratados por períodos prolongados de tempo em moinhos de bolas, com acompanhamento por difração de raios X e microscopia eletrônica de transmissão (BÜCHLER, 1974).

Os pesquisadores Pérsio de Souza Santos e Helena de Souza Santos trouxeram inestimável constribuição ao estudar o mineral crisotila, especialmente o que provém da mina de Cana Brava, através da sua caracterização mineralógica, utilizando as técnicas de difração de raios X, microscopia eletrônica de varredura e de transmissão (SANTOS, 1975; SANTOS, SANTOS, 1978).

Posteriormente, Pedro K. Kiyohara desenvolveu uma pesquisa, que resultou em Tese de Doutorado, sobre a interface crisotila-cimento portland em compósitos de fibro-cimento por métodos óptico-eletrônicos (KIYOHARA, 1991). O mesmo autor informou que pretende retomar estes estudos utilizando agora microscopia eletrônica de transmissão de alta resolução (HRTM).

Estudos enfocando a zona de transição entre fibras e pasta de cimento Portland, foram efetuados por Holmer Savastano Júnior, que comparou o desempenho mecânico do cimento-amianto com outros compósitos de fibrocimento confeccionados com fibras vegetais e de polipropileno (SAVASTANO JR., 1992).

Mônica Speck Cassola, pesquisadora do IPT, efetuou interessante trabalho sobre a Mina de Cana Brava, visando a proposição de uma classificação do minério com base na sua fragilidade, determinada por meio de ensaios preliminares de atrição (CASSOLA, 1993a).

Ultimamente, usos alternativos do amianto crisotila vêm sendo pesquisados por um grupo de químicos da Universidade de Campinas - UNICAMP, coordenados pelos professores Paulo José Moran e Inês Joekes. Este grupo vem efetuando pesquisas sob os seguintes aspectos: a) propriedades de adsorção/adesão; b) caracterização como suporte de catalisadores; c) aplicação específica de um catalisador suportado em crisotila em reações de oxidação para determinação de atividades; d) como suportar, em crisotila, ácidos de Lewis para explorar o potencial em reações orgânicas; e) como suportar agentes oxidantes como o permanganato de potássio em reações com álcoois em geral, sulfetos, ligações duplas etc; f) como usar no fermento de pão para reduzir cetonas proquirais, para obtenção de substâncias de interesse farmacológico; g) como suportar o fermento de pão em crisotila e estudar seu potencial para substituir o fermento livre em reações de redução de cetonas e na fermentação do açúcar.

Somente na área de meio ambiente, onde a crisotila pode ajudar a despoluir rios, (pois suportando o óxido de titânio auxilia na degradação de detergentes domésticos) o grupo já efetuou mais de 70 trabalhos científicos, entre teses de mestrado e doutorado, comunicações em congressos e publicações em revistas nacionais e internacionais, e alguns trabalhos foram expandidos, com novos estudos iniciados. O sucesso alcançado motivou o aprofundamento das pesquisas e a equipe de pesquisadores deseja continuar avançando no tema (FUNÇÕES..., 1995).

1.3. Objetivos

O principal objetivo desta pesquisa foi efetuar a caracterização tecnológica do minério *in natura* (rocha e fibra bruta), do minério britado (com ênfase no material de granulometria inferior a 0,074 mm), das fibras semi-brutas e beneficiadas, visando discriminar características físico-mecânicas e petrográficas que contribuíssem para a melhoria da qualidade do processo de beneficiamento.

1.4. Originalidade

O caráter de originalidade do presente estudo consiste nos seguintes aspectos:

a) desenvolvimento metodológico para medida de resistência à tração de fibras de crisotila no seu estado bruto;
b) caracterização petrográfica e físico-mecânica dos serpentinitos mineralizados;
c) caracterização mineralógica do material com granulometria <0,074 mm associado à rocha britada e britada atritada;

d) interação entre as características petrográficas/físico-mecânicas das rochas com as características mineralógicas e mecânicas das fibras brutas e das fibras semi-brutas e beneficiadas.

1.5. Conteúdo

O Capítulo II apresenta a definição e conceituação de fibras, serpentinas e compósitos. São apresentadas as principais propriedades das fibras, das quais fazem parte os minerais de amianto, cujas variedades e propriedades são discutidas e comparadas. No item específico sobre os minerais do grupo das serpentinas são discutidas as características cristalográficas e químicas das variedades mineralógicas do grupo. Da mesma forma, também são discutidas as principais características dos materiais compósitos, especialmente do fibrocimento e, dentre esses, do cimento-amianto, enfatizando-se os aspectos comuns entre o comportamento mecânico do cimento-amianto e da fibra de crisotila.

No Capítulo III são apresentados os materiais e métodos utilizados para elaboração da pesquisa. Os estudos foram realizados em duas etapas distintas. A 1ª, de caráter exploratório, visou o conhecimento preliminar das rochas hospedeiras e da fibra bruta de crisotila, e o desenvolvimento de um método para medir a resistência à tração das fibras brutas. Na 2ª etapa efetuou-se a caracterização do minério desde o estado bruto, até a fibra comercial.

No Capítulo IV é apresentada a Geologia da região onde se insere a Mina de Cana Brava, com a discussão de alguns modelos geológicos da área, abordando-se o aspecto evolutivo das estruturas, de forma que o leitor possa situar os materiais estudados no contexto geológico da mina.

Ainda neste capítulo é apresentado o processo de beneficiamento do amianto crisotila, para dar ao leitor uma noção de como acontecem as transformações físicas da rocha e da fibra, até o produto final.

No Capítulo V são apresentados os resultados dos ensaios efetuados para a caracterização das rochas, fibras brutas, fibras semi-brutas e beneficiadas, diferenciados por etapa de trabalho e tipo de ensaio. Assim, para as rochas, foi efetuada a caracterização petrográfica, petroquímica e físico-mecânica, além do estudo mineralógico dos materiais com granulometira <0,074 mm provenientes da rocha britada e da britada atritada.

Para as fibras brutas foi efetuado um estudo mineralógico e de resistência à tração direta, à temperatura ambiente e sob aquecimento. Finalmente são apresentados os resultados do estudo mineralógico e tecnológico das fibras semi-brutas e beneficiadas.

No Capítulo VI são processados e discutidos os resultados dos ensaios efetuados para cada tipo de material estudado, e, posteriormente, é feita uma análise global, buscando a interrelação entre os diversos tipos de materiais e/ou ensaios.

Finalmente, no Capítulo VII, são apresentadas as conclusões da pesquisa e as idéias para prosseguimento dos estudos.

1.6. Aspectos geográficos da área estudada

A Mina de Cana Brava, localiza-se no município de Minaçu, Goiás, na porção central norte do Estado de Goiás.

O acesso ao município de Minaçu dá-se, por via terrestre, a partir de Goiânia, pela rodovia GO - 080, seguindo-se 97 km até o entroncamento com a rodovia Belém-Brasília (BR - 153). Percorre-se então 279 km nessa rodovia, até a cidade de Santa Tereza, e então, pela rodovia GO - 241, mais 136 km parcialmente asfaltados, até o município de Minaçu (FIGURA 1).

O acesso por via aérea dá-se através de aeronaves mono e bimotoras, dada a existência do Aeroporto de Minaçu, contando com linhas aéreas regulares fornecidas pela Empresa Brasil Central, Linha Aérea Regional S.A., pertencente à Transportes Aéreos Regionais Socidedade Anônima - TAM.

A topografia local é dominada pela Serra de Cana Brava, que se eleva até 830m de altitude a partir dos terrenos arrasados à sua volta, com altitudes médias ao redor de 320m (FOTO 1).

FOTO 1 - Vista aérea da Mina de Cana Brava (Cavas A e B), tendo ao fundo a Serra de Cana Brava.

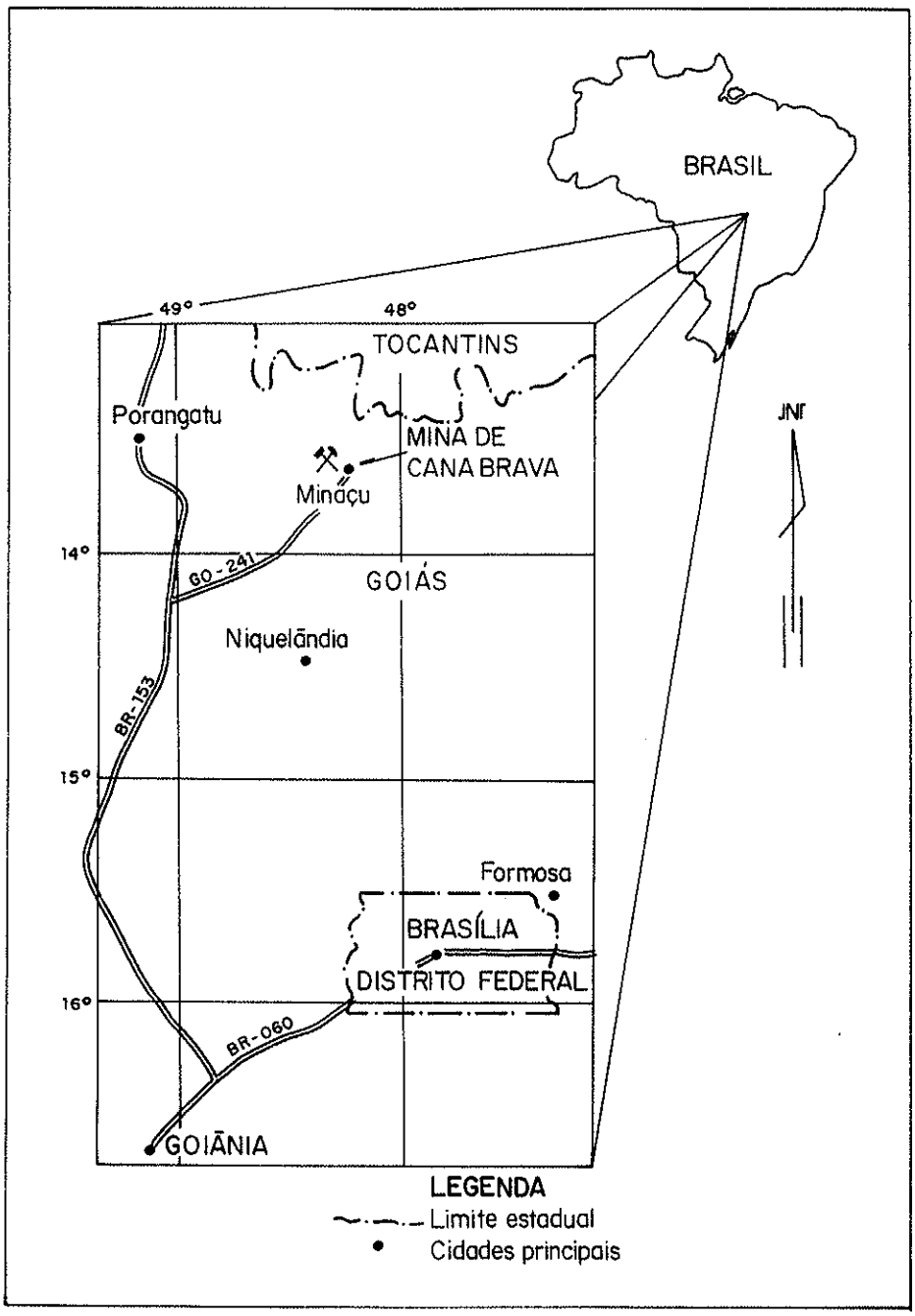


FIGURA 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO E ACESSOS DA MINA DE CANA BRAVA.

CAPÍTULO II

DEFINIÇÃO E CONCEITUAÇÃO DE FIBRAS, SERPENTINAS E COMPÓSITOS

2.1. Fibra - definição e características

Segundo o dicionário de Aurélio Buarque de Holanda Ferreira, fibra pode ser definida como "cada uma das estruturas alongadas que, dispostas em feixes, constituem tecidos animais e vegetais ou certas substâncias minerais".

Outra definição e aspectos das fibras são apresentados por SKINNER, ROSS, FRONDEL (1988), a saber:

O termo fibra era originalmente referido a substâncias produzidas biologicamente, como algodão ou fibra muscular. Hoje o termo é aplicado a muitas substâncias e qualquer porção alongada de matéria pode ser chamada de fibra, independente da sua origem ou composição. Fibras podem ser biológicas ou não biológicas, orgânicas ou inorgânicas, naturais ou sintéticas.

Apesar das muitas aplicações do termo, não existe definição científica precisa. O "British Health and Safety Executive" definiu fibra como uma partícula com comprimento maior que 5 mμ e um diâmetro inferior a 3 mμ (ASBESTOS, 1977 *apud* SKINNER, ROSS, FRONDEL *op.cit.*).

Fibras inorgânicas, num senso geral, podem ser definidas como pequenos objetos sólidos alongados constituídos por qualquer composto ou elemento, usualmente de origem não biológica e freqüentemente exibindo propriedades distintivas físicas e especialmente mecânicas. Esta definição engloba a enorme diversidade de materiais atualmente abrigados pelo termo. A definição, no entanto, requer amplificação.

As fibras inorgânicas mais comuns e certamente mais familiares são as fibras minerais conhecidas como asbestos. Muitos minerais têm sido explorados como asbestos. São largamente distribuídos na natureza, mas sua exploração só é economicamente viável quando ocorrem como agregados fibrosos contínuos (veios ou vênulas) cortando maciços rochosos. Esses veios ou vênulas são constituídos de fibras capilares ordenadas paralelamente que, numa observação mais minuciosa, apresentam-se encurvadas. Assim, o termo mineralógico asbestiforme tem sido usado para descrever esse subtipo de materiais inorgânicos.

O termo asbestiforme tem sido também aplicado a outros minerais sintéticos quando eles ocorrem como agregados fibrosos. Nemalita, a variedade fibrosa do mineral brucita, tem sido descrita como asbestiforme. Uma semelhança física forte existe entre a nemalita e a crisotila, o mineral asbesto mais comum. Entretanto, o termo asbestiforme é incorretamente

aplicado à nemalita. Esse mineral tem uma composição química diferente, e não exibe a resistência e a elasticidade típica dos minerais asbestos, sendo sua morfologia fibrosa a única similaridade com aqueles minerais. O termo geral "fibroso" descreve mais apropriadamente nemalita e outros minerais não asbestos ou fibras sintéticas.

Dificuldades também aparecem quando os termos fibra e fibroso são usados pela inexistência de termos mais precisos. Por exemplo, nem todas as partículas inorgânicas alongadas obtêm sua distinta morfologia através do seu crescimento. Alguns objetos finos, pequenos e alongados, apresentam tal morfologia como resultado da desintegração de grandes partículas sólidas. Nesses casos, segundo alguns pesquisadores, o termo "acicular" é mais adequado para indicar uma morfologia em forma de agulha.

Uma fibra, numa inspeção mais minuciosa, pode apresentar outras características distintivas, além de sua forma típica alongada. Extremidades esfiapadas observadas em partículas fibrosas indicam que esses "fiapos" são compostos por pequenos e rijos componentes fibrilares, usualmente referidos como "fibrilas".

A superfície de uma partícula fibrosa pode ser planar ou curvada, resultado do seu crescimento e fraturamento. Muitas fibras naturais são cilíndricas. Uma única estrutura enrolada, típica de uma série de minerais silicáticos, produz "fibrilas" com contornos arredondados. Fibras de grafita, por exemplo, têm uma estrutura similar, aparentemente composta de fibrilas cilíndricas.

Materiais descritos como fibras ou "fibrosos" variam enormemente em tamanho. Dependendo do contexto, fibras podem ser macroscópicas, microscópicas ou submicroscópicas. A idéia geral de objetos alongados como fibras não é limitada por dados de comprimento ou espessura, embora partículas com diâmetros maiores que alguns milímetros sejam descritas por outros termos, como vareta ou haste.

Há uma relação que acomoda o largo espectro de tamanhos de fibras e é independente da composição ou constituição da fibra ou do material fibroso: o "aspect ratio", ou seja, a relação entre o comprimento e o diâmetro da partícula, e que pode ser calculado ou estimado com relativa facilidade.

Quando a razão comprimento/diâmetro (*aspect-ratio*) de uma partícula é $\geq$ 10, mineralogistas usam o termo fibra. Abaixo de 10, termos como colunar, prismático ou maciço são usados, e quando esta razão é 1, o termo equidimensional é aplicado. Se uma fibra tem diâmetro menor que alguns poucos micrômetros, mineralogistas podem enfatizar sua fineza com o termo "fino-fibroso". Partículas com diâmetros de poucos milímetros devem ser examinadas no microscópio. Microscópio eletrônico de varredura é requerido para se identificar fibrilas com diâmetros de alguns poucos angstrons (1Å = 10^{-10}m ou 0,1ηm).

Em qualquer resolução, o *aspect ratio* pode ser estimado ou medido como parte da identificação de uma fibra.

As propriedades superficiais das fibras são influenciadas pela composição do material, pelo ambiente reinante durante seu crescimento ou sua geração, e a "história" da partícula. O termo "história" se refere a algumas trocas na superfície após a formação da fibra. A carga ou distribuição de carga afeta as reações de uma fibra.

A resistência de um material depende de sua estrutura cristalina e das ligações interatômicas no composto. A direção de alongamento da fibra é freqüentemente a direção de crescimento, do alinhamento paralelo das unidades químicas poliméricas, ou, em fibras cristalinas, uma direção especial no ordenamento tridimensional.

A deformação ("strain") desenvolvida no material em resposta às forças externas pode ser aliviada por simples deslocamento, translação, alongamento (estiramento, por exemplo) ou uma combinação de distorções. O tipo de resposta é influenciado pela razão com que a força é aplicada, bem como pela composição e cristalinidade do sólido.

Medir a resistência ao curvamento de uma fibra - na verdade, quantificar sua flexibilidade - é um procedimento mais complicado. Um lado da curva está sob tensão e o lado oposto, sob compressão. As reações de uma partícula sólida fibrosa dependem, não obstante, da composição química e da estrutura cristalina do material, bem como da disposição das forças durante a flexão, e de qualquer tipo de fenômeno superficial que o material possa apresentar.

A resistência mais elevada de "whiskers" e fibras naturais em comparação à resistência de materiais de mesma composição e outra morfologia poderia ser uma coincidência: nestas fibras cristalinas sintéticas e naturais uma direção particular do cristal é paralela à direção da força aplicada. No entanto, a relação inversa diâmetro-resistência indica que outros fatores além da estrutura do cristal contribuem para a resistência mecânica de materiais fibrosos.

A grande superfície específica das fibras finas pode contribuir significativamente para a resistência mecânica. Superfícies podem prover uma zona estrutural ou química distinta onde as tensões são dissipadas. Uma estrutura de superfície distintamente diferente da estrutura do núcleo foi descoberta por exame óptico de algumas fibras (WOODS 1955 *apud* SKINNER, ROSS, FRONDEL, 1988). Cones invertidos desenvolvidos nas pontas de fibras de vidro e de asbestos submetidos a ataque químico sugere que a superfície da fibra é mais resistente quimicamente que o interior (HRAPKA 1977,1978, *apud* SKINNER, ROSS, FRONDEL, 1988). Um exemplo de sofisticação da pesquisa em materiais fibrosos é a descoberta de que recobrimentos alteram as propriedades de superfície das fibras de vidro, por exemplo,

aumentando a estabilidade e a resistência à abrasão, mantendo, porém, a flexibilidade e a resistência da fibra.

2.1.1. Amianto - definição e características

Considerações iniciais

Amianto e *asbesto* são termos genéricos aplicados a silicatos fibrosos naturais de diferentes composições químicas, que se apresentam em muitos tipos e texturas, variando desde uma fibra longa, macia e sedosa, com uma orientação definida dos cristais, até uma massa de fibras curtas, duras e quebradiças, sem orientação dos cristais. A cor dos diferentes tipos de amianto varia do branco ao cinza-esverdeado, marrom-amarelado ou azul e o brilho pode ser sedoso ou nacarado.

Os termos amianto e asbesto são palavras de origem latina ("amianthus") e grega, e significam respectivamente "incorruptível" (amianto) e "incombustível" (asbesto), revelando duas notáveis propriedades físicas destas fibras minerais. Seu largo uso industrial se baseia não só na combinação dessas duas características (alta resistência à flexão e incombustão), bem como nas suas propriedades de resistência à tração, baixa densidade, boa absorção, grande superfície específica, resistência ao calor, estabilidade ante a ação de ácidos e álcalis, alta resistividade elétrica, baixa permeabilidade magnética e capacidade de tecelagem (BADOLLET, 1963).

Apesar da expansão da indústria de amianto ter-se dado apenas neste século, essa fibra mineral é conhecida pela humanidade há mais de dois mil anos. Diversas civilizações antigas, como a grega, a egípcia e a chinesa, já utilizavam o amianto para confecção de tapetes e tecidos. Os romanos utilizaram as fibras de amianto como pavio de lamparinas a óleo, já aproveitando as propriedades incombustíveis desse mineral (GIRODO, PAIXÃO, 1973).

Por volta de 1720, a Rússia iniciou a produção de amianto em seus depósitos nos Montes Urais; aproximadamente na metade do século XIX, foram descobertas as jazidas de anfibólio fibroso nos Alpes italianos; e em 1877 descobriu-se as jazidas de Thetfand e Celersins no Canadá, iniciando assim um maior desenvolvimento da indústria. No início do século XX foram descobertos depósitos de amianto do tipo crisotila nos Estados Unidos, Rodésia e África do Sul e de amianto anfibólico na Província do Cabo e do Transvaal (GIRODO, PAIXÃO, *op.cit.*).

Atualmente os maiores produtores mundiais de amianto são: os países da ex-URSS (Rússia, Cazaquistão e Sibéria), China, Brasil, Zimbábue, África do Sul. São identificados a

reserva inferida. Em 1992 a produção mundial foi de 3.120.524 de toneladas, dos quais o Brasil participou em 7,5% (DEPARTAMENTO DO INTERIOR DOS ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, 1993 *apud* ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AMIANTO - ABRA, 1995).

A produção brasileira em grande escala iniciou-se em 1967 com a exploração da Mina de Cana Brava, com uma produção de 400 t/ano (ABRA, 1993), e em 1980 o Brasil atingiu a auto-suficiência na produção desse bem mineral. Entre 1987 e 1992 a quantidade de amianto produzida no Brasil manteve-se em torno de 200 mil t/ano. Atualmente, a Sama é a única produtora desse bem mineral no Brasil, com uma produção que atingiu, em 1994, 181.420 toneladas, das quais 115.400 t foram destinadas ao mercado interno e 76.650 t foram exportadas para inúmeros países, como Tailândia, Índia, México, Irã, Indonésia, Argentina, Uruguai, Bolívia, Japão, Arábia Saudita, Chile, Malásia, Líbano, entre outros (AS MAIORES da mineração, 1995).

Características principais

As variedades de amianto dividem-se em dois grandes grupos, de acordo com sua composição química e estrutura cristalina: o grupo das serpentinas e o grupo dos anfibólios (SANTOS, 1975). As pertencentes ao grupo dos anfibólios, que se caracterizam por fibras duras, retas e pontiagudas, são: antofilita, amosita, crocidolita, tremolita e actinolita. Seus usos são limitados por serem fracas e quebradiças (antofilita e tremolita), ou ainda por não possuírem valor comercial (actinolita). Muito utilizados até os anos 70, os anfibólios asbestiformes estão atualmente em desuso, por causa de seus efeitos sobre a saúde (ABRA, 1995).

No grupo das serpentinas, a principal variedade é a crisotila, que corresponde a 98,5% de todo o amianto consumido no mundo e é, de longe, o mais abundante tipo de material asbestiforme encontrado na natureza (ABRA, *op.cit.*). Suas fibras são curvas e sedosas, e seus efeitos na saúde humana são diferenciados e menos significativos do que os dos outros tipos de amianto (CHURG, 1988).

Todas as formas de asbestos são minerais metamórficos associados a suas rochas hospedeiras. A maioria das crisotilas são formadas em rochas ultrabásicas, nas quais olivina e piroxênio foram alterados em serpentina por ação hidrotermal. Parte dessa serpentina é recristalizada como material fibroso em fissuras e fendas desenvolvidas no resfriamento do magma original. O fraturamento ocorre durante o resfriamento dos dunitos e peridotitos originais, e posteriormente pode ocorrer intrusão de magma ácido, resultando em uma serpentinização parcial ou completa dessas rochas. Subseqüentemente, num período final de atividade hidrotermal, dá-se o preenchimento de fissuras e fendas com veios de crisotila.

Talco e magnetita são as impurezas que prevalecem nos depósitos de crisotila asbestiforme (HODGSON, 1979).

As fibras de amianto podem ocorrer de três formas na rocha hospedeira (GIRODO, PAIXÃO, 1973):

a) fibra *cross*: forma de ocorrência mais comum, apresenta as fibras enfeixando-se lado a lado e dispondo-se perpendicularmente às paredes rochosas que limitam o veio;
b) fibra *slip*: apresenta as fibras deitadas, paralelas às paredes das fraturas em que se formam. Esses depósitos são decorrentes de movimentos de escorregamento diferencial entre os blocos rochosos em virtude de tensões de cisalhamento e falhas. Essa fibra é muito quebradiça e não possui importância econômica;
c) fibra *mass*: apresenta-se como um inter-relacionamento entre as fibras, com total ausência de orientação das mesmas. É mais comum nas variedades de amianto anfibólio.

A grande maioria dos asbestos do mundo se desenvolve em veios irregulares ou em paredes paralelas, lembrando "camadas", de fibra do tipo *cross* em suas rochas hospedeiras. As "camadas" (ou veios) contêm fibras compactamente empacotadas e paralelas, e sua largura geralmente varia de 0,5 a 20mm. As fibras longas são as menos abundantes, mas não é raro encontrar fibras de crisotila, crocidolita e tremolita com comprimento superior a 100mm.

Propriedades físicas e químicas

Há diferenças fundamentais entre as fibras de anfibólio e as de crisotila. A crisotila é excessivamente pequena na seção transversal (180Å a 300Å) e tem estrutura tubular, enquanto os anfibólios são muito maiores na seção transversal, parecendo lâminas estreitas, e suas fibras são menos simétricas que às de crisotila. Em geral, os anfibólios são duros, ásperos e elásticos, e não tão flexíveis e dúcteis como a crisotila (WINSON, 1975 e MANN, 1983).

As principais propriedades físicas e químicas das diferentes variedades de asbestos encontram-se resumidas no QUADRO 1.

MINERAL / PROPRIEDADE	Crisotila	Antofilita	Amosita	Crocidolita	Tremolita	Actinolita
Resistência à tração (MPa) [1]	3040	2350	2450	3430	<500	<500
Módulo de Young (kg/cm^2) [1]	$1,65 \times 10^6$	$1,58 \times 10^6$	$1,65 \times 10^6$	$1,9 \times 10^6$	-	-
Flexibilidade [1][2][3]	boa	pobre	pobre	razoável	pobre	pobre
Densidade ($10^3 kg.m^{-3}$) [1]	2,55	2,85 - 3,1	3,43	3,37	2,9 - 3,2	3,0 - 3,2
Dureza na escala de Mohs [1]	2,5 - 4,0	5,5 - 6,0	5,5 - 6,0	4,0	5,5	6,0
Calor específico (kcal/g/°C) [1]	0,266	0,210	0,193	0,201	0,212	0,217
Volume de resistividade (MΩcm) [1]	0,003 - 0,15	2,5 - 7,5	acima de 500	0,2 - 0,5	-	-
pH [2]	10,3	9,4	9,1	9,1		
Carga elétrica [2][3]	positiva	negativa	negativa	negativa	negativa	negativa
Ponto de fusão (°F) [2][3]	2770	2675	2550	2180	2400	2540
Resistência ao calor [3]	muito boa, quebradiça a altas T.	muito boa	boa, que-bradiça a altas T.	pobre, funde	regular a boa	-
Fiabilidade [3]	muito boa	pobre	regular	regular	pobre	pobre

Nota: [1] HOGDSON, 1979
[2] ASBESTOS ..., 1979
[3] GIRODO, PAIXÃO, 1973

QUADRO 1 - Principais propriedades dos minerais de amianto.

Resistência à tração

O amianto é usado, principalmente, como fibra de reforço. Sua resistência à tração é, assim, de suma importância. A avaliação das propriedades de resistência é dificultada pelo pequeno comprimento das fibras e seus pequenos diâmetros (SPEIL, LEINEWEBER, 1969).

Essa propriedade dos amiantos (especialmente da crisotila) encontra-se detalhadamente descrita e discutida no Capítulo V -item 5.3.2, desta tese.

Superfície específica

Enquanto a resistência à tração é a propriedade intrínseca mais importante dos asbestos, sua superfície específica é o parâmetro mais importante para sua aplicação industrial.

A importância da superfície específica dos diversos tipos de asbestos é evidenciada pela influência direta que ela exerce nas propriedades de capacidade de adsorção e absorção (umidade, gases, aerosóis, etc.), ação filtrante, habilidade de absorver pigmentos, resistência à ácidos e outras substâncias químicas, como reforçador em agentes aglutinantes e de ligação, orgânicos e inorgânicos, na habilidade dielétrica, como amortecedor e abafador de som, como escudo termal, na utilização em técnicas especiais de combate à poeira, e nos processos de separação de partículas por sedimentação numa corrente fluida (BERGER, 1963).

Na linguagem industrial a superfície específica é entendida como *grau de fibrilação* ou *grau de desfibramento* da fibra. Cada processo industrial requer um grau de fibrilação diferente, dependendo do propósito. Como exemplo, a crisotila preparada para inclusão em pastilhas de freio terá um grau de fibrilação diferente daquela preparada para manufatura têxtil. O grau correto de fibrilação é obtido pela moagem da fibra bruta num equipamento apropriado. A habilidade das fibras de se abrirem ou se dividirem em fibrilas através de tratamento adequado é uma de suas propriedades mais valiosas (HODGSON, 1979). Idealmente, os pacotes de fibras deveriam ser desfibrados sem redução do comprimento da fibra. No entanto, na prática, as fibras são encurtadas a um grau controlado não só pela ação mecânica violenta, mas principalmente, pela fragilidade ou durabilidade do material. Assim, as crisotilas mais dúcteis (flexíveis e maleáveis) mostram uma desintegração de comprimento mínima durante o desfibramento, enquanto que, pelo mesmo processo de desgaste mecânico, as crisotilas mais rúpteis (duras e ásperas) sofrem um encurtamento significativo (SPEIL, LEINEWEBER, 1969). O termo *grau de fibrilação* pode ser explicado da seguinte forma: se uma seção a se quebra em n fibras, tendo assim uma seção transversal a/n, então seu grau de fibrilação aumentou n vezes. Se o raio médio da seção transversal das n fibras é r, então é facilmente demonstrado que sua superfície específica é proporcional a $1/r$. O grau de fibrilação pode então ser expresso diretamente em termos da medida da superfície específica das fibras. A superfície específica dos asbestos usados em processos manufaturados fica entre 30.000 e 90.000cm^2/g. Medidas tomadas nessas mesmas fibras após aquecimento a altas temperaturas (100°C e 400°C) podem atingir um limite de superfície específica de 140.000cm^2/g. Crisotilas não processadas apresentam uma superfície específica de 30.000cm^2/g. Esses dados mostram que enquanto a superfície específica média

das fibras de asbestos comerciais é muito maior que aquela dos depósitos maciços, a quantidade de moagem que as fibras recebem nos processos de manufatura fará aumentar o grau de fibrilação para um fator de somente 5 ou 6 (vezes) no máximo (HODGSON, 1979).

Normalmente, quanto maior o grau de fibrilação, maior a energia adicional requerida para os desfibramentos seguintes, impondo um limite prático no grau de fibrilação para produtos comerciais triturados (SPEIL, LEINEWEBER, 1969).

Em comparação com outras fibras, a crisotila apresenta os maiores valores de superfície específica; a fibra de viscose, lã, seda e algodão, por exemplo, chegam, no máximo, a valores inferiores a 10.000 cm^2/g (HANDBOOK OF ASBESTOS TEXTILES, 1967).

Decomposição térmica

Desde a década de 50, as fibras de asbestos têm sido lembradas como um material resistente à temperatura e à prova de fogo. Sabe-se que o ponto de fusão dos asbestos é superior a 1000°C, seus produtos de decomposição a altas temperaturas são conhecidos, mas seus limites precisos de resistência ao calor não o são (HODGSON, 1979). A decomposição da crisotila é bem mais simples que a dos anfibólios, e suas reações independem da atmosfera circundante (SPEIL, LEINEWEBER, 1969). Na zona de transformação, entre 550°C e 750°C, a crisotila perde somente 1/5 da sua água estrutural, enquanto que os anfibólios já perderam a maior parte de sua água nesse ponto (BERGER, 1963).

Em geral, a perda d'água de cristalização e a diminuição da resistência ocorrem na mesma proporção devido à tendência dos asbestos de aumentar a fragilidade, como resultado das mudanças moleculares e estruturais que acompanham uma desidratação progressiva (BERGER, *op.cit.*).

A perda de peso dos anfibólios sob calor é consideravelmente menor que a da crisotila, devido à menor quantidade de OH^- disponível para ser tirado na forma de água. Apesar disso, os anfibólios, após um aquecimento de 800°F (≅ 430°C), ainda são mais frágeis que a crisotila aquecida de 100°F (≅ 40°C) a 1100°F (≅600°C) (WINSON, 1975).

Segundo HODGSON (1979), todas as variedades de asbestos se "quebram" progressivamente através de uma série de reações internas que podem começar a temperaturas desde 200°C. Isso não significa que suas propriedades como isolantes térmicos diminuem; pelo contrário, esta propriedade ablativa faz com que o produto de decomposição de uma camada pobremente condutora isole as camadas sucessivas.

No caso específico da crisotila, a decomposição térmica segue dois estágios de desidroxilação e quebra. Entre 600° a 780°C dá-se a desidroxilação, e entre 800° e 850°C os anidridos se quebram, numa transformação brusca para forsterita e sílica.

A decomposição total corresponde a:

$2Mg_3[Si_2O_3](OH)_4 \rightarrow 3Mg_2SiO_4 + SiO_2 + 4H_2O$

A forsterita é bem cristalizada e persiste junto com a sílica até aproximadamente 1000°C; acima dessa temperatura produz-se uma mistura de enstatita e forsterita (SPEIL, LEINEWEBER, 1969 e HODGSON, 1979).

Curvas de análise termodiferencial e termogravimétrica mostram uma perda de peso gradual entre 100° e 600°C, e uma perda brusca acima de 600°C, com a desidratação total somando aproximadamente 13% de água. Num estudo de crisotilas do Canadá, HODGSON (*op.cit.*), observou três estágios de desidratação: entre 100° a 500°C, com perda de 1% de H_2O; entre 500° a 700°C, com perda de 10% a 13% de H_2O; e entre 700° e 900°C,e acima, com perda de 1% de H_2O. A desidratação total alcança entre 12% a 15,5% para 16 espécimes analisados.

Uma composição teórica da crisotila, baseada em considerações estruturais, mostra que 9,75% de H_2O, o equivalente a $3(OH)^-$, sobra na camada de hidroxila externa, com 3,25% de H_2O, equivalente a $1(OH)^-$, na camada de hidroxila interna. HODGSON (1979) conclui então que a desidratação média da crisotila está relacionada com a ruptura da camada de hidroxila externa, e a soma de perdas abaixo de 600°C e acima de 700°C, aos grupos de hidroxilas remanescentes.

Propriedades superficiais

As propriedades superficiais dos dois grupos de asbestos, anfibólios e serpentinas, são totalmente diferentes, segundo HODGSON (*op.cit.*). A crisotila tem uma camada superficial predominante de hidroxila, conectada a uma camada interna adjacente de magnésio. É esperado que esses sítios alcalinos exerçam uma atividade superficial forte, ou por solução parcial ou por atração de íons de carga oposta.

Carga superficial

O comportamento eletrocinético da crisotila é outra manifestação da sua camada superficial de magnésio, e está intimamente relacionado ao pH. O ponto isoelétrico da crisotila é 11,8; em valores de pH mais baixos, a carga superficial é positiva; acima do ponto isoelétrico, a carga fica negativa (HODGSON, 1979).

A maioria dos materiais têm uma carga elétrica superficial negativa em sistemas aquosos, como é o caso das fibras do grupo dos anfibólios. Já que a crisotila tem carga positiva, atrai ou é atraída pela maioria dos minerais dispersos, característica importante para muitas aplicações comerciais. Além disso, a alta reatividade superficial causa muitas reações interessantes, desde simples adsorção até verdadeiras reações químicas (HODGSON, 1979).

Ataque químico

A diferença da habilidade de resistir à ação de ácidos da crisotila e dos anfibólios é importante com relação às aplicações industriais, seja como material filtrante, diafragmas, materiais resistentes à corrosão, etc.

Em todos os casos, conforme relatado por BERGER (1963), o ataque aos asbestos conduz a uma perda máxima de peso; o tempo requerido para atingir essa perda máxima depende da duração da exposição do material ao ácido, do tipo e da concentração do ácido, da temperatura, e do grau de fibrilação do asbestos.

Em contraste com os anfibólios, BERGER (*op.cit.*) percebeu que devido à razão $SiO_2/MgO = 1$, a crisotila perde praticamente toda sua resistência na perda máxima de peso, e consequentemente, pode ser designada como não-resistente aos ácidos.

O trabalho realizado por BADOLLET (1963) demonstrou que os ácidos atacam rapidamente o magnésio da crisotila, restando a maior parte da estrutura de sílica. Ácidos orgânicos agem mais lentamente que os inorgânicos, mas em altas concentrações ambos reagem de maneira similar.

Já os estudos de BERGER (*op.cit*) demonstraram que a perda de peso como resultado da ação de álcalis cáusticos varia de 1% a 15% na crisotila, 6% a 7% na amosita, e 1% a 2% em outros anfibólios asbestos.

Principais usos

Os usos de materiais asbestiformes são numerosos e pelo menos 3000 diferentes produtos são manufaturados em todo o mundo, aproveitando suas propriedades físicas e químicas únicas.

A maior parte do amianto consumido no Brasil e no mundo é empregado nas indústrias de fibro-cimento e materiais de fricção. Segundo o GIUNTINI (1994), do total produzido pela Sama, 85% é usado na construção civil para fabricação do cimento-amianto. Isso inclui chapas planas e corrugadas, telhas, telhados e coberturas, calhas, tubulação e encanamento pressurizado capaz de suportar pressões hidráulicas acima de 12,5 atm. Esses produtos normalmente contêm de 10% a 15% de fibras, cuja principal função é agir como reforçador do cimento. A maior parte das fibras de amianto utilizadas nesses produtos é a crisotila, mas até 40% de crocidolita e amosita podem ser incorporadas para intensificar o reforço (HODGSON, 1979).

Produtos de fibro-cimento têm, em geral, massas específicas entre 1,60 e 2,0g/cm^3. São apropriados para revestimentos e coberturas externas, mas não são resistentes a

choques termais à temperaturas acima de 800°C. Esses produtos também apresentam uma condutividade térmica relativamente alta (HODGSON, 1979).

A categoria de crisotilas mais longas e valiosas está relacionada à manufatura de materiais asbestiformes têxteis para utilização em tecidos, vestimentas de segurança e correias de transporte. Tecidos produzidos à base de fios de amianto são flexíveis, impermeáveis e especialmente vantajosos por sua capacidade de isolamento térmico e elétrico e por sua resistência química e mecânica. Daí sua aplicação na confecção de mantas para isolamento térmico de caldeiras, motores, automóveis, tubulações, e equipamentos diversos utilizados em particular nas indústrias química e petrolífera, e também na produção de roupas especiais (macacões, aventais e luvas) e biombos de proteção contra fogo. Uma quantidade considerável de crisotila é incorporada em asfaltos, pisos e pavimentos (ABRA, 1995).

Crisotila é uma fibra natural crucial e insubstituível em certos produtos automotivos. Combinações de mais de 60% de crisotila com resinas fenólicas participam da manufatura de pastilhas de freios e embreagens, e outros materiais de fricção. Material de vedação, papéis e papelões, *sprays* isolantes e decorativos, tintas especiais, filtros, isolantes térmicos, isolantes acústicos e plásticos reforçados resistentes à corrosão e à eletricidade são alguns exemplos da enorme variedade de aplicações dos asbestos (HODGSON, 1979).

O uso do amianto crisotila, especificamente, depende principalmente do comprimento das fibras. KOLBE (1970) pesquisou os prováveis usos do amianto crisotila, diferenciando o uso de fibras *slip* e *cross*. A utilização de fibras *slip*, após a retirada manual da porção intemperizada, é recomendada na produção de fiação e tecelagem, uso mais "nobre" da crisotila, devido a seu comprimento e sua provável facilidade de separação mecânica da magnetita. Quando se dá a separação, esse tipo de fibra é utilizado para isolamento elétrico. Já as porções da fibra quebradas e os resíduos do beneficiamento podem ser utilizados em lonas de freio, enchimentos, tubos, calhas e placas isolantes, papel de amianto, artigos de cimento-amianto, tintas isolantes, etc. A utilização de fibras *cross* é recomendada praticamente sem restrições, devido à elevada resistência à tração e à finura das fibras. Seu uso na indústria têxtil é mais raro, já que o tamanho das fibras *cross* é geralmente reduzido. Entretanto, esse material pode ser empregado na fabricação de qualquer produto de cimento-amianto, tubos, calhas, placas isolantes, coberturas, tintas isolantes, etc. Uma única observação deve ser feita, em relação ao teor de magnetita, já que muitas vezes esta se encontra fortemente aderida à fibra, e de difícil separação. Nesses casos, se uma boa separação não for obtida, ela se tornará imprópria para o isolamento elétrico e para a fabricação de lonas de freios, devido à abrasividade.

Na maioria dos países adota-se a "Canadian Standart Classification", uma classificação padronizada das fibras que as reúne em vários grupos e subgrupos:

- Os grupos 1 e 2 referem-se a blocos de fibras longas, selecionadas manualmente e portanto não submetidas a nenhum tratamento mecânico;
- Os grupos 3 a 7, conhecidos como fibras beneficiadas (*mill fibers*) são classificados de acordo com os ensaios procedidos através do aparelho denominado "Quebec Standart Testing Machine";
- Os grupos 8 e 9 são classificados na base do peso do material em libras, e pelo volume ocupado por ele em m^3;

Assim, os principais usos do amianto crisotila em função dessa classificação seriam (BADOLLET, 1948 *apud* WINSON, 1975, GIRODO, PAIXÃO, 1973 e SANTOS *et al.* 1970, apud CASSOLA 1993a):

As fibras longas ou grupos canadenses 1, 2 e 3 corresponderiam a peças contendo fibras entre 0,95 cm e 1,9 cm aproximadamente, e são empregadas nas indústrias têxteis para confecção de tecidos, fitas, cordas, feltros, etc. Os tecidos de amianto são usados para vestimentas de segurança, lonas de freios, filtros, mantas isolantes, etc.

As fibras curtas, como as do grupo 4, são empregadas no fabrico de produtos de cimento-amianto, placas planas, chapas onduladas, calhas, perfis, tubulações de água e esgoto, caixas d'água e moldados diversos. As pertencentes ao grupo 5 são empregadas na fabricação de papéis e papelões, e também como substitutas das fibras do grupo 4. O grupo 6 é utilizado como agregado de cimento-amianto, em telhas, chapas planas ou onduladas, lonas de freio, papéis e plásticos. As fibras do grupo 7 encontram emprego em certos papéis e papelões, cimentos-cola, adesivos, colas, misturas plásticas para fins diversos, filtros, tintas, etc.

Os grupos 8 e 9 corresponderiam, respectivamente, a areias e pedriscos, com densidades inferiores a 1,2 g/cm^3. O grupo 8 é utilizado em estuque, cargas para argamassas e gesso; o 9, na fabricação de ladrilhos de peso e azulejos reforçados com amianto.

2.1.2. Características dos minerais do grupo das serpentinas

As serpentinas são silicatos de magnésio hidratado, de fórmula de cela unitária $Mg_6Si_4O_{10}$ $(OH)_8$, que apresentam estrutura cristalina em folhas e cristalizam no sistema monoclínico (DEER, HOWIE, ZUSSMAN, 1962).

Embora o grupo das serpentinas seja quimicamente mais simples que o dos anfibólios, estruturalmente aquele é bem mais complexo. Os minerais do grupo das serpentinas são divididos estruturalmente em três tipos: com estrutura cilíndrica, crisotila, com estrutura planar, lizardita e com estrutura alternadamente ondulada e corrugada, antigorita (WICKS, 1979).

Tais estruturas representam três soluções diferentes para um problema estrutural gerado por uma defasagem de translação entre as duas unidades básicas dessas estruturas; as camadas tetraédrica e octaédrica.

A camada tetraédrica é composta de tetraedros de SiO_4, arranjados em 6 anéis com simetria hexagonal (FIGURA 2). A camada octaédrica é composta de octaedros de magnésio com simetria trigonal. As duas camadas são unidas através dos oxigênios apicais das camadas tetraédricas que substitui 2/3 das hidroxilas na base da camada octaédrica (FIGURA 3).

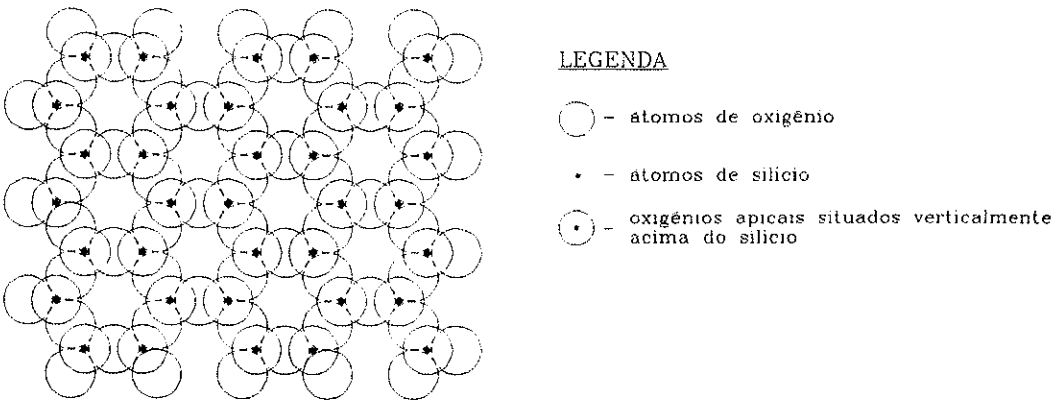


FIGURA 2 - Desenho esquemático da camada tetraédrica dos minerais do grupo das serpentinas (WICKS, 1979).

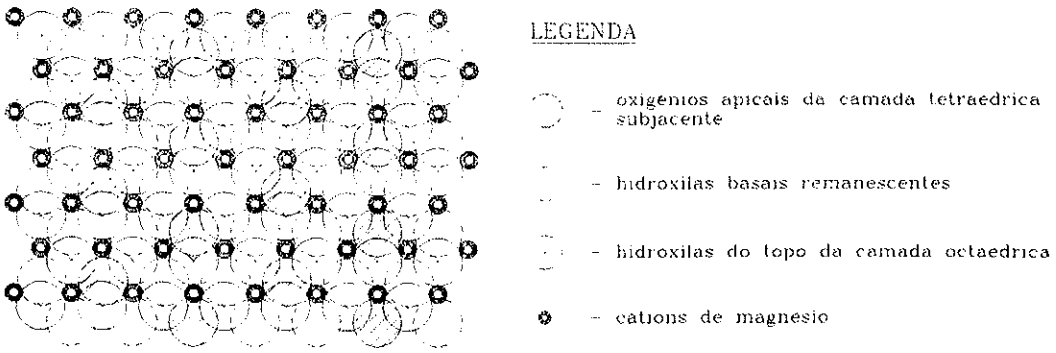


FIGURA 3 - Desenho esquemático da camada octaédrica dos minerais do grupo das serpentinas (WICKS, 1979).

A fórmula estrutural para essa estrutura ideal é $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$, e representa tanto a crisotila como a lizardita, mas não a antigorita, cuja composição varia leve e sistematicamente em relação à fórmula ideal.

A FIGURA 4 representa a projeção da face [001] de uma camada idealizada de serpentina. Nos politipos de crisotila monoclínicos é necessário reverter a direção positiva do eixo *x* para satisfazer a convenção que deve ser obtusa e tão pequena quanto possível (WICKS, WHITTAKER, 1975).

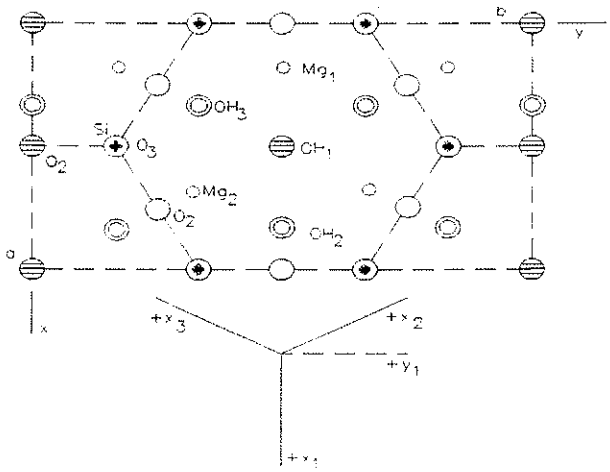


FIGURA 4 - Projeção da face [001] de uma camada idealizada de serpentina, com Mg na posição octaédrica II em relação ao eixo *x*, (BAILEY, 1969 *apud* WICKS, 1979).

As dimensões laterais de uma camada octaédrica ideal, essencialmente ocupada por Mg (b=9,45Å) são maiores que as dimensões laterais de uma camada tetraédrica ideal essencialmente ocupada por Si (b=9,15Å). Essa defasagem de translação de 0,30Å entre as duas camadas ao longo de b é responsável pelo desenvolvimento de três diferentes estruturas, por deslocamentos das posições atômicas ideais, e indiretamente, pela variação sistemática da fórmula da antigorita em relação à fórmula ideal. A defasagem de translação entre as camadas tetraédricas e octaédricas é comumente expressa em relação a b (no caso acima $b_{oct}>b_{tet,}$), mas essa defasagem não é restrita a b.

A lizardita apresenta estrutura planar com similaridades em relação a outras estruturas trioctaédricas 1:1. A crisotila possui estrutura cilíndrica com algumas semelhanças com a haloisita. A antigorita tem estrutura modulada curva relacionada com outras estruturas moduladas. Na lizardita, o deslocamento é acomodado dentro da estrutura normal, planar, 1:1; na crisotila, o deslocamento é parcialmente compensado pela curvatura cilíndrica das camadas; na antigorita, o deslocamento é compensado pela curvatura da alternância modulada entre camadas. Estas serpentinas constituem um dos poucos exemplos de filossilicatos em que estruturas diferentes ocorrem em minerais de composição química idêntica ou similar. Assim, os minerais do grupo das serpentinas formam um importante grupo de estudo, em que cada estrutura apresenta uma solução diferente para o mesmo problema de defasagem translacional. Variações nos empilhamentos das camadas básicas na lizardita e na crisotila produzem uma variedade de politipos, o que não ocorre na antigorita devido à natureza engrenada da estrutura, que inibe trocas entre as camadas (WICKS, O'HANLEY, 1988).

Os minerais do grupo das serpentinas discutidos aqui são minerais formadores de rocha que ocorrem em ambientes geológicos similares. Outras espécies pertencentes ao mesmo grupo, amesita, berthierita, cronstedtita, etc., são muito menos freqüentes, mas ocorrem em grande variedade de ambientes geológicos (WICKS, O'HANLEY, *op.cit*).

A composição química dos minerais de serpentina é controlada em grande parte pela composição total da rocha ultrabásica na qual o serpentinito se formou.

Identificação das serpentinas

Não se pode identificar os minerais do grupo das serpentinas sem dados de difração de algum tipo, visto que eles têm cores, hábitos e modos de ocorrência similares. A exceção é material asbestiforme em fibra *cross,* que pode ser identificado seguramente como crisotila.

As condições geológicas podem indicar a presença mais provável ou abundância de determinado mineral de serpentina, mas a identificação segura ainda depende de métodos de

difração que identificarão a estrutura e a seqüência de empilhamento (WICKS, O'HANLEY, 1988).

Os métodos de análise mais utilizados são os seguintes:

a) difração de raios X;

b) difração de elétrons de um cristal único;

c) difração de fibra (métodos de raios X com câmera Weissenberg);

d) câmera de raios X *microbeam*;

e) estudos com HRTEM (High-Resolution Transmission Electron Microscopy);

f) isótopos estáveis (O e H);

Lizardita

Lizardita é o mais abundante dos minerais de serpentina. Ocorre comumente nos serpentinitos oriundos de retrometamorfismo e é formada por substituição pseudomórfica de minerais preexistentes. Varia de maciça a placóide a pseudofibrosa, e em veios pode ocorrer associada à crisotila, porém como fase separada (WICKS, O'HANLEY, 1988).

A lizardita tem uma estrutura planar que compensa a defasagem translacional de 0,3Å entre as camadas tetraédricas e octaédricas. O processo envolve ajustes internos das posições dos átomos dentro das camadas. A espessura da camada octaédrica aumenta de 2,11Å para 2,20Å na lizardita. Sucessivas camadas tetraédricas e octaédricas de lizardita são empilhadas, de modo a formar ligações de hidrogênio entre os oxigênios basais de uma camada e as hidroxilas externas da camada adjacente. Esse tipo de empilhamento é encontrado na maioria dos filossilicatos 1:1 (WICKS, 1979).

MELLINI, ZANAZZI (1987) *apud* WICKS, O'HANLEY (1988) constataram que as estruturas da lizardita são essencialmente similares em todas as feições maiores, com pequenos desvios da geometria ideal. As camadas octaédricas e tetraédricas apresentam simetria trigonal bem definida, com os dois átomos do oxigênio basal, os átomos de silício, os de magnésio e os três átomos de oxigênio mais externos da hidroxila dispostos em planos específicos dentro da estrutura.

As principais substituições na lizardita são: Mg por Al na camada octaédrica, usualmente acompanhada com substituição de Si por Al na camada tetraédrica. Fe^{+3} também pode substituir Mg e Si. As substituições de Al e Fe^{+3} ajudam a aliviar o problema do deslocamento. Fe^{+2} substitui Mg na camada octaédrica e aumenta o deslocamento. A substituição dupla de Mg ou Si por Al e Fe^{+3} alivia o deslocamento na estrutura planar da serpentina mesmo quando o Mg é substituído por Fe^{+2}; assim, pode-se estabelecer a solução sólida entre lizardita - $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ e amesita - $(Mg_2Al)SiAlO_5(OH)_4$ e entre lizardita e cronstedtita - $(Fe_4^{+2}Fe_2^{+3}(OH)_8Si_2Fe_2^{+3}O_{10})$. A simples substituição de Mg por Fe^{+2} poderá,

eventualmente, aumentar o tamanho da camada octaédrica até o ponto no qual a estrutura planar da serpentina possa acomodar o deslocamento dando origem à estrutura da greenalita. Os limites composicionais para estas duas estruturas não são conhecidos (WICKS, O'HANLEY, 1988).

Imagina-se que ocorre uma série de solução sólida entre lizardita e amesita. A maior parte das lizarditas aproxima-se do membro mais magnesiano da série, sendo a amesita um mineral muito raro.

ROZENSON, BANNINGER, HELLER-KALLAI (1979) mostraram que a ocorrência de Fe^{+3} na posição tetraédrica é rara. Assim, Fe^{+3} é efetivamente restrito à posição octaédrica na maior parte das lizarditas, como é o Fe^{+2}. Seus estudos em *Mossbauer* indicam algumas diferenças significativas nos teores de Fe^{+2} e Fe^{+3} quando comparados com dados de análise química por via úmida; portanto, deve-se ter cuidado ao usar estes últimos dados, principalmente quando o conteúdo total de Fe for pequeno. Substituição por outros elementos, como o Ni, Co, Mn, Cr e Zn, é pequena.

Crisotila

É provavelmente o menos abundante dos minerais de serpentina, porém, sua estrutura cilíndrica curva gera um hábito fibroso distintivo, facilmente reconhecido; é o mineral asbestiforme mais comum na natureza. Ocorre comumente em veios com fibra tipo *cross* em serpentinitos de metamorfismo progradante, hospedeiros de depósitos de asbestos, ou como fibras tipo *slip* ao longo de zonas de cisalhamento e, menos freqüentemente, como fibra tipo *mass*, (WICKS, O'HANLEY, 1988).

SANTOS, SANTOS (1978) caracterizaram as fibras de crisotila por meio de difração de raios X, difração de elétrons e microscopia eletrônica; constataram que essas fibras são constituídas por feixes de fibrilas cilíndricas paralelas, empacotadas hexagonalmente, e com diâmetro razoavelmente uniforme, o que lhes confere a alta flexibilidade.

Segundo WHITTAKER (1963) *apud* SANTOS (1975), as fibrilas de crisotila, de perfil circular, possuem um diâmetro externo de cerca de 100Å a 250Å. Embora geralmente ocas (FOTO 2), as fibrilas podem estar preenchidas por um material amorfo, de composição semelhante (FOTOS 3 e 4). A curvatura da crisotila pode produzir um crescimento em espiral ou um crescimento circular concêntrico (FOTO 5). O crescimento pode ser composto de uma ou mais camadas (WICKS, 1979).

WHITTAKER (1953, 1956 a, b, c) definiu três tipos de crisotila: *clino*, *orto* e *para*crisotila. A clinocrisotila tem duas camadas monoclínicas na cela unitária (desconsiderando a natureza cilíndrica da estrutura), sem rotação entre as camadas e tem o

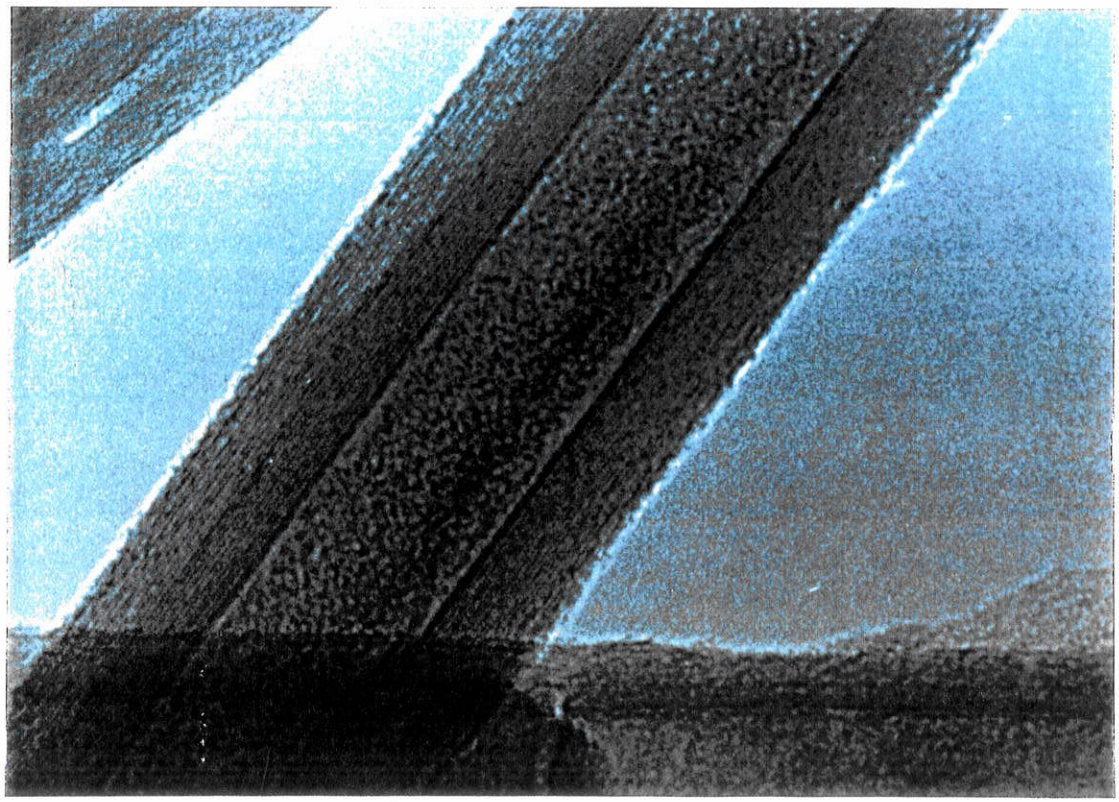


FOTO 2 - Fibrila de crisotila de Cana Brava vista longitudinalmente, sob microscópio eletrônico de transmissão (MET), mostrando a estrutura cristalina (1.120.000x). Foto cedida por Pedro Kiyohara.

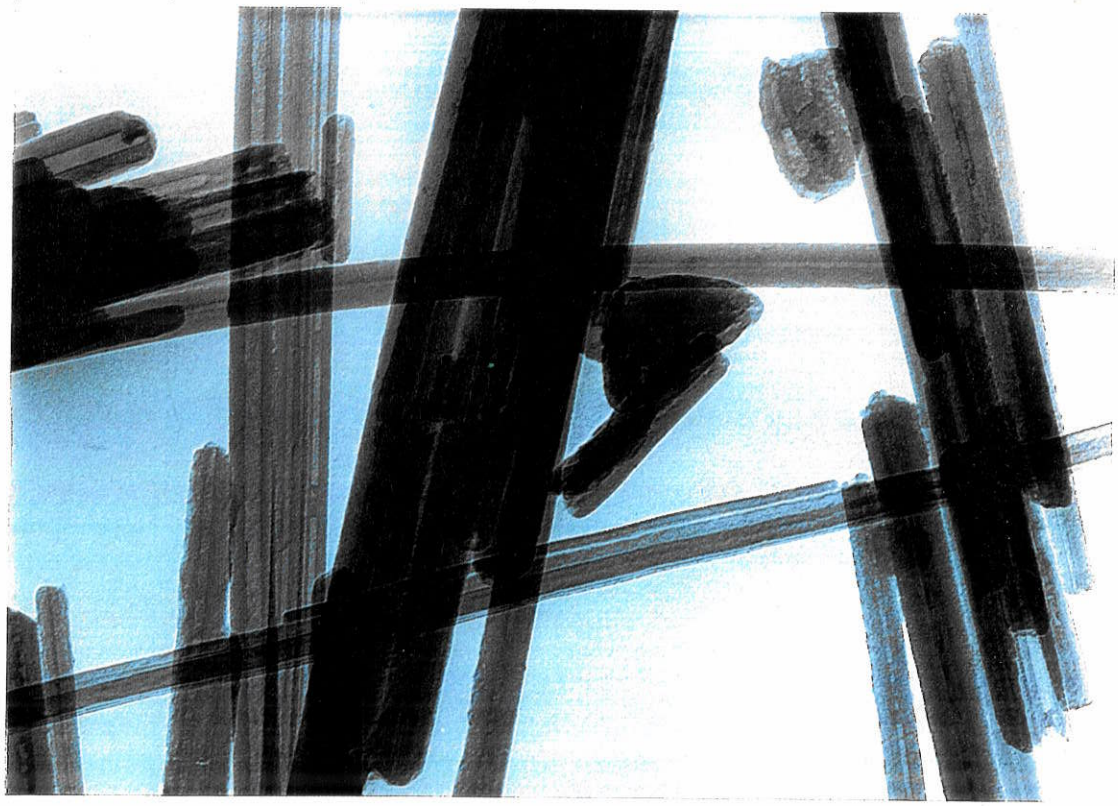


FOTO 3 - Fibrilas de crisotila de Cana Brava, sob microscópio eletrônico de transmissão (MET), com a parte interna vazia ou preenchida por material não-cristalino (165.000x). Foto cedida por Pedro Kiyohara.

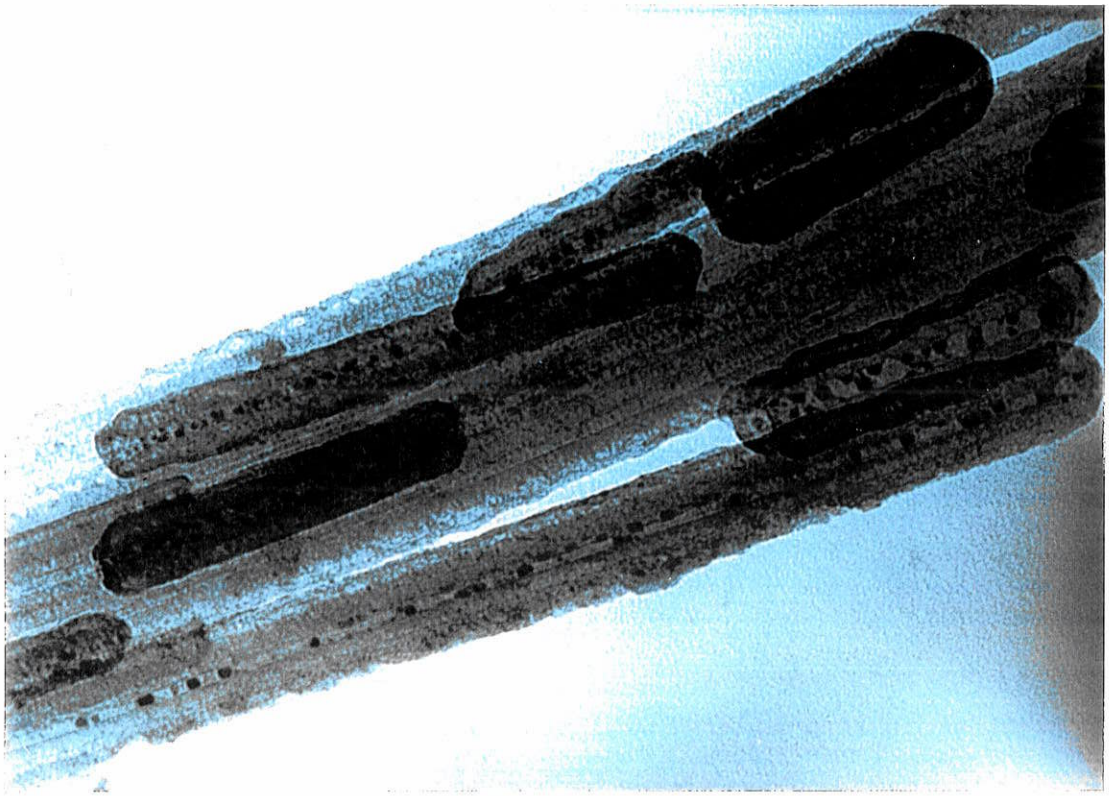


FOTO 4 - Fibrila de crisotila de Cana Brava, sob microscópio eletrônico de transmissão (MET), submetida a tratamento com citrato de chumbo (300.000x). Foto cedida por Pedro Kiyohara.

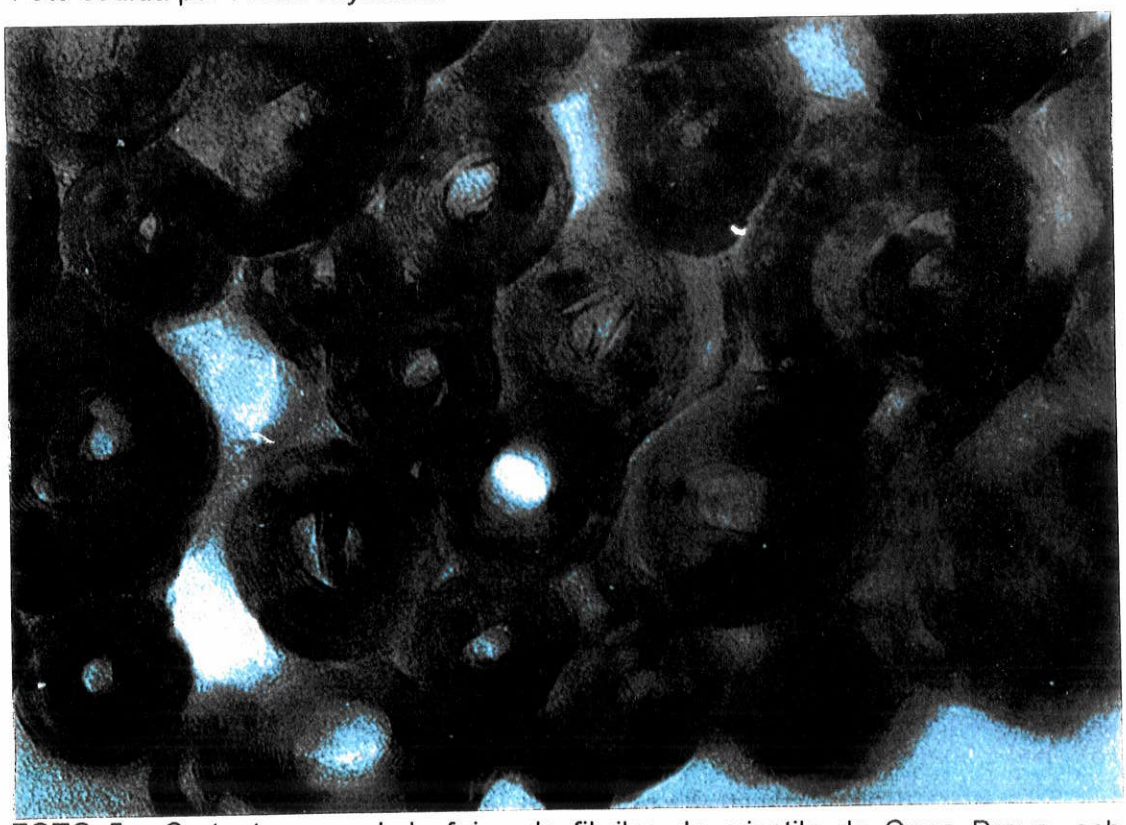


FOTO 5 - Corte tranversal de feixe de fibrilas de crisotila de Cana Brava, sob microscópio eletrônico de transmissão (MET), mostrando a "espiral" em sentido horário e anti-horário (800.000x). Foto cedida por Pedro Kiyohara.

eixo *x* paralelo ao eixo do cilindro. A ortocrisotila tem duas camadas ortorrômbicas na cela unitária, com rotações de 180° entre camadas e tem também o eixo *x* paralelo ao eixo cilíndrico. A paracrisotila, por sua vez, tem duas camadas ortorrômbicas na cela unitária com rotações de 180° entre camadas e o eixo *y* paralelo ao eixo cilíndrico. Normalmente o que se denomina crisotila são as variedades clino e orto. A paracrisotila é bem mais rara, não sendo ainda conhecidos muitos detalhes da sua estrutura (NEMECZ, 1981).

Essa curvatura das camadas têm sido citada como um mecanismo para compensar a defasagem de translação entre duas camadas de diferentes tamanhos, e a crisotila é um exemplo excelente dessa variação estrutural. Entretanto, numa fibra qualquer, somente uma camada terá um raio ideal de curvatura para uma perfeita compensação da defasagem, isto é, quando os cilindros de crisotila são formados, um determinado raio de curvatura pode ser mais estável, o que impõe um limite para o diâmetro dos tubos. Desse diâmetro depende a resistência da fibra, ou seja, quanto menor o diâmetro, maior a resistência, e é essa propriedade que controla a qualidade das fibras (ASBESTIFORM FIBERS, 1984).

É importante ter em mente que a estrutura cilíndrica não compensa completamente o deslocamento no folheto octaédrico e tetraédrico. As camadas curvadas em raios maiores terão compensação deficiente, e aquelas curvadas em raios menores serão supercompensadas (WICKS, 1979).

O raio de curvatura dessa camada ideal foi calculado em 88Å por WHITTAKER (1957) *apud* WICKS, O'HANLEY (1988), para um alinhamento perfeito dos folhetos octaédricos e tetraédricos ao longo do eixo *y*. Como as fibras apresentam comumente raios externos de 100-135Å (YADA, 1971), o grande volume da estrutura fora do raio ideal terá o deslocamento apenas parcialmente compensado ao longo do eixo *y*, e o pequeno volume da estrutura dentro do raio ideal será supercompensado ao longo do eixo *y*. Além disso, o deslocamento ao longo do eixo *x*, o eixo da fibra, não é compensado pela curvatura em nenhuma das camadas. Dentro do raio ideal, um folheto octaédrico estará sob tensão ao longo de *x*, devido ao deslocamento (o folheto tetraédrico fará a pressão oposta).

Crisotila, assim, tem basicamente o mesmo problema de defasagem da lizardita, porém a defasagem, nesse caso, é parcialmente compensada pela curvatura (WICKS, WHITTAKER, 1975). Assim, a camada octaédrica comprimida tem espessura de 2,08Å na crisotila, menor que o 2,20Å da lizardita, e a camada tetraédrica estendida tem 2,19Å na crisotila, maior que o 2,15Å da lizardita. As mudanças das posições atômicas da posição ideal na crisotila são similares às observadas na lizardita, mas são mais reduzidas.

Os limites da eficácia da curvatura como solução para o problema da defasagem podem ser ilustrados pela crisotila não-fibrosa denominada *Povlen*-crisotila (KRSTANOVIC, PAVLOCIC, 1964 *apud* WICKS, 1979). Seções transversais desse mineral revelam, sob

microscopia eletrônica (CRESSEY, ZUSSMAN, 1976; CRESSEY, 1979 *apud* WICKS, 1979), grandes "fibras" de raio de 1000 a 8000Å com núcleos cilíndricos rodeados por sobrecrescimento poligonal de camadas de serpentina planar. Assim, parece que num determinado raio a crisotila não é capaz de adotar uma estrutura curvada e então forma estruturas planares. Entretanto, a existência de estruturas completamente poligonais, sem nenhum núcleo cilíndrico indica que pode não ser essencial para a crisotila ser curvada. Nesses casos, a defasagem de translação na crisotila deve ser compensada interiormente, como na lizardita, e assim, a única diferença entre crisotila e lizardita está no modo de empilhamento. Tanto na crisotila como na paracrisotila há uma série de estruturas, desde totalmente cilíndrica a totalmente poligonal. No entanto crisotila-asbesto deve ter predominantemente estrutura cilíndrica, ou a importante propriedade asbestiforme não se desenvolverá.

Antigorita

Depois da lizardita, é o segundo mineral em ordem de abundância. Ocorre mais comumente como o principal mineral nos serpentinitos de metamorfismo progradante, nos quais usualmente forma texturas não pseudomórficas. Em veios *slip* ou em superfícies de cisalhamento nestes serpentinitos, a antigorita é foliada ou se apresenta na forma de lascas. Freqüentemente ocorre em veios preenchendo fraturas (WICKS, O'HANLEY, 1988). São usualmente mais consistentes e menos porosas que a lizardita e a crisotila.

A antigorita não é um polimorfo de outras serpentinas no senso estrito, mas sim uma fase, de composição levemente diferente.

A estrutura é ondulada ao longo do eixo *x*, que é a direção da superestrutura. O folheto do tetraedro é contínuo através da estrutura, mas reverte a polaridade no ponto onde a onda muda sua direção de curvatura. O folheto octaédrico é também contínuo, porém reverte na metade da onda e é ligado a diferentes folhetos tetraédricos em cada metade da estrutura. Uma feição importante da reversão da curvatura é a omissão de 3Mg e 6(OH), em relação ao Si, em cada cela unitária. Assim, a fórmula da antigorita é diferente da fórmula ideal da serpentina (WICKS, O'HANLEY, *op.cit.*).

A substituição na antigorita é limitada (como na crisotila) à condição de que o deslocamento entre os folhetos octaédricos e tetraédricos seja mantido. Como a antigorita é mais um mineral formador de rocha que um mineral de veio, isto pode ser uma expressão da química total da rocha mais do que diferenças substitutivas entre antigorita e crisotila. Por esta

razão, a antigorita parece aceitar mais Al que crisotila, a substituição de Fe está sujeita a condições similares às da crisotila, a substituição do Si é usualmente baixa e se dá por Al e raramente Fe^{+3}. O conteúdo de H_2O da antigorita é significativamente diferente da lizardita e da crisotila (WICKS, O'HANLEY, 1988).

2.1.3. Compósitos

Definição

Segundo HOLLIDAY (1966) é conveniente distinguir entre materiais simples (ou monolíticos) e complexos (freqüentemente chamados heterofásicos ou compósitos). Infelizmente, a distinção entre estas duas classes é arbitrária, embora exemplos extremos possam ser prontamente distinguidos. Nesses termos quartzo fundido é um material monolítico e, concreto, um material compósito.

KIYOHARA (1991) define material compósito como sendo a combinação ou conjugação de dois ou mais materiais sólidos, apresentando propriedades distintamente diferentes daquelas dos seus constituintes. Segundo este autor, a palavra compósito significa que dois ou mais materiais estão combinados ou conjugados, numa escala macroscópica, para fazer um material útil. A sutileza deste conceito está na "escala macroscópica", pois alguns materiais podem estar combinados em escala microscópica (como nas ligas metálicas), porém o material resultante é macroscopicamente homogêneo. A vantagem dos materiais compósitos é que eles, usualmente, apresentam qualidades que nenhuma fase componente possui isoladamente. As propriedades individuais que podem ser melhoradas pela fabricação de um material compósito são as seguintes:

a) resistência mecânica (tração; compressão; torção, tenacidade; impacto);
b) rigidez;
c) resistência química à corrosão;
d) resistência à abrasão e desgaste;
e) resistência à fadiga;
f) resistência a altas temperaturas;
g) isolamento térmico;
h) condutividade térmica;
i) isolamento acústico e outros.

Naturalmente , nem todas essas propriedades podem ser melhoradas ao mesmo tempo, ou então, nem sempre isso é necessário. Por outro lado, existem três aspectos que devem ser incluídos para uma caracterização aceitável de um "material compósito" para aplicação estrutural em Engenharia:

a) deve ser constituído por dois ou mais materiais sólidos, fisicamente distintos e opticamente separáveis;
b) o material compósito pode ser fabricado pela operação unitária de mistura dos materiais componentes, de tal forma que a dispersão de um material no outro material possa ser feita de forma controlada, possibilitando assim otimizar os valores das propriedades desejadas no compósito;
c) as propriedades dos compósitos são superiores às das fases componentes e, possivelmente, únicas, em relação a alguns aspectos específicos em comparação com cada um dos componentes.

Quanto às fases componentes, existem três tipos de compósitos (KIYOHARA, 1991):

a) compósitos fibrosos, que consistem de fibras embutidas em uma matriz;
b) compósitos laminados, que consistem de camadas de vários materiais;
c) compósitos particulados, que são constituídos por partículas embutidas em uma matriz.

Na presente pesquisa só serão tratados os compósitos fibrosos, (ou de fibro-cimento) onde está inserido o cimento-amianto.

O bom aproveitamento da grande resistência mecânica e a rigidez das fibras num compósito, dependem da estrutura e das propriedades da interface matriz/fibra, pois é através dela que as tensões aplicadas na matriz são transmitidas às fibras (KIYOHARA, *op.cit.*; SAVASTANO JR., 1992).

Compósitos de Fibro-cimento

Fibro-cimento é um material compósito constituído por uma matriz de cimento Portland, endurecido em presença de quantidade adequada de água, reforçada por fibras inorgânicas ou orgânicas, naturais ou sintéticas.

Cimento Portland de pega normal é uma mistura do chamado "clinquer" de cimento Portland moído, adicionado de pequena porcentagem de sulfato de cálcio em qualquer de suas formas (gipsita; gesso; anidrita; fosfo-gesso"). O "clinquer" é um material sólido, granulado, constituído por fases cristalinas e fases vítreas, obtidas pela reação, em tmperaturas de ordem de 1450°C, de argilas caulinítícas e calcários calcíticos, contendo também minerais de ferro como impurezas não-voláteis provenientes das rochas usadas como matérias-primas.

O cimento Portland é constituído em mais de 90% por: silicato tricálcico ($3CaO.SiO_3$ = C_3S); silicato dicálcico ($2CaO.SiO_2$ = C_2S); aluminato tricálcico ($3CaO.Al_2O_3$ = C_3A); aluminoferrita tetracálcica ($4CaO.Al_2O3.Fe_2O_3$ = C_4AF) e sulfato de cálcio ($CaO.SO_4$).

Cimentos Portland podem apresentar variações nas composições químicas e nas proporções ponderais das fases constituintes.

As fases do cimento Portland em contato com água, sofrem reações químicas em solução e no estado sólido, as quais constituem a chamada "pega" e endurecimento do cimento Portland hidratado. Nessas reações químicas formam-se compostos sólidos e cristalinos, com cristais de morfologia alongada ou acicular e lamelar; o entrecruzamento desses cristais, tridimensionalmente, gera uma resistência mecânica muito grande de compressão que permite obter boas propriedades ligantes em compósitos como argamassas, concretos, cimento-amianto e outros produtos fabricados com cimento Portland (KIYOHARA, 1991).

A matriz de cimento Portland possui as seguintes funções:

a) fornecer um meio pelo qual a carga ou solicitação externa seja aplicada à fase forte, isto é, mecanicamente resistente; o que se dá pelo atrito entre as fibras (se for uma corda ou barbante);
b) separar as fibras individuais e evitar que uma trinca se propague da superfície da peça até atingir a fase forte;
c) protejer a superfície dessas fibras, de forma que o atrito e a abrasão das fibras entre si sejam reduzidos, não afetando a sua elevada resistência à tração (KIYOHARA, *op.cit.*).

As principais propriedades mecânicas dos materiais reforçados com fibras podem ser explicadas a partir das características de sua microestrutura. Pelo estudo da microestrutura obtém-se a resposta para a influência do tipo de fibra, idade de hidratação e relação água-cimento, e de como esses fatores devem ser corretamente definidos, para uma dosagem racional do compósito a ser empregado na prática (SAVASTANO JR., DANTAS, AGOPYAN, 1994).

Um fator relevante no comportamento de compósitos de fibra embebida em matriz é a aderência, propriedade fundamental na correlação entre a transferência de esforços na junta fibra-matriz e as propriedades mecânicas do compósito.

A zona ou auréola de transição é a região da pasta de cimento próxima à fibra, com espessura que varia de 10μm a 100μm, e que apresenta propriedades diferenciadas do restante da matriz (MINDESS *et al.*, 1986, *apud* SAVASTANO JR., DANTAS, AGOPYAN, *op.cit.*). A maior aderência fibra-matriz, por sua vez, é obtida por meio do melhor desempenho da zona de transição, conforme mostraram os estudos de MORRISON, SHAH, JENQ (1988). As reduções da porosidade e da concentração de portlandita são expostas por MASSAZZA, COSTA (1986), como os principais indicadores para modificação da zona de transição.

As eventuais descontinuidades, dentro de uma fase ou entre fases, tais como poros ou fissuras, interferem tanto no comportamento mecânico quanto na durabilidade do material. É o caso dos compósitos fibrosos, em que o aumento da aderência interfacial pode reverter-se em ganho na resistência mecânica, na durabilidade e, dentro de certos limites, na ductilidade. SAVASTANO JR, DANTAS, AGOPYAN (1994) alertam para o fato de que quantificar a participação da zona de transição nas propriedades dos compósitos é difícil, pois outros fatores importantes, tais como, o tipo de fibra e de aglomerante, interagem no sentido de modificar o material. Além disso, muitas técnicas adotadas para otimizar a zona de transição acabam por melhorar o desempenho do compósito como um todo.

Cimento-amianto

Cimento-amianto é um tipo de fibro-cimento, onde o reforço é feito com fibras de amianto. No Brasil, atualmente, é utilizado apenas o amianto crisotila.

O amianto industrializado (denominado nesta pesquisa de fibra beneficiada ou fibra comercial) é enviado para as indústrias de cimento-amianto compactado em sacos; sendo posteriormente "aberto" ou "desagregado" ou "desfibrado" em equipamento próprio; em seguida, é misturado com o cimento Portland e água, para posterior processamento no fabrico de peças de cimento-amianto.

Desde a extração na mina, até a mistura com o cimento Portland e água, na fábrica de produtos de cimento-amianto, o amianto crisotila é submetido apenas a operações unitárias, isto é, a operações industriais de natureza puramente física.

Estudando as fraturas nos compósitos de cimento-amianto submetidos a uma determinada carga AKERS, GARRETT (1983a) observaram que geralmente o relaxamento local da deformação tende a ocorrer depois que a fibra é arrancada. Esta constatação coincide com um dos mecanismos apresentados por BRYANS, LINCOLN (1971) para explicar como se dá a fratura num feixe de fibrilas de crisotila (assunto tratado em mais detalhe no Capítulo V, item 5.3.2 desta tese).

AKERS, GARRET (*op.cit.*) concluíram, através de estudos realizados com auxílio de microscópio eletrônico de varredura, que o processo de quebra no cimento-amianto indica extensivas e múltiplas fraturas, com uma interação complexa de microfraturas e fissuras de dimensões e distribuição variadas. O arrancamento fibrilar é o principal mecanismo, embora a separação interfibras e fraturas também sejam observadas. Apesar da grande variação na relação comprimento/diâmetro dos feixes de fibras ("aspect ratios"), e dos complexos efeitos da orientação das mesmas, existe boa concordância entre os valores de tração e flexão, previstos e medidos.

Das observações sobre a natureza e comportamento da zona interfacial das fibras de crisotila com a matriz de cimento, sob carga, AKERS, GARRETT (1983b) concluíram que o descolamento e arrancamento de fibras no cimento-amianto envolvem uma combinação complexa de mecanismos de fratura. O valor do cisalhamento interfacial, portanto, deve ser visto como uma combinação tanto de descolamento interfacial (primariamente através da falha da matriz adjacente à interface), como de separação interfibra.

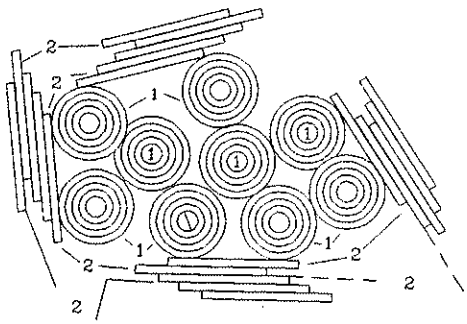
Muitos trabalhos experimentais têm sido feitos nos últimos anos enfocando particularmente os compósitos de cimento-amianto e a interface do cimento com a fibra de amianto. SAVASTANO JR. (1992) efetuou estudos na zona de transição entre fibras (vegetais, amianto crisotila, polipropileno) e a matriz da pasta de cimento Portland comum, e interrelacionou suas principais características com as propriedades mecânicas dos compósitos produzidos, com ênfase ao aspecto da aderência fibra-matriz, durabilidade dos compósitos e análise de sua microestrutura. Os compósitos foram analisados com várias idades e relação água-cimento constante e vice-versa. A zona de transição (estudada por microscopia eletrônica de varredura e análises por espectroscopia de raios X) apresentou-se diferenciada do restante da matriz, por sua maior porosidade, maior concentração de macrocristais de portlandita e microfissuras.

Segundo aquele autor, a maior aderência fibra-matriz é obtida por meio do melhor desempenho da interface. Além das fibras, os responsáveis pelo melhor desempenho dos compósitos (no sentido de aumentos na resistência à tração e ductilidade) são a proporção adequada de agregados e da relação água-cimento, com o fim de aumentar a resistência da aderência na zona de transição.

No seu estudo comparativo SAVASTANO JR., DANTAS, AGOPYAN (1994) constataram que as fibras de amianto, apesar do pequeno comprimento ($\cong$ 5 mm) e baixa porcentagem em volume com que foram empregadas (1%), conferiram ao compósito resistência à tração significativamente maior que as registradas para as demais fibras testadas, devido à estrutura fibrilada da crisotila, que aumenta a aderência com a matriz e, também, porque a zona de transição gerada, além de pouco porosa, tem pequena espessura ($\cong$ 5 ηm).

No entanto, investigações realizadas por AKERS, GARRETT (1983b) mostraram que no cimento-amianto, não há evidência de uma zona estruturalmente mais fraca adjacente à interface enriquecida em hidróxido de cálcio, ao contrário de outros compósitos fibrosos (MORRIS, GARRETT, 1979; PINCHIN, TABOR, 1978 *apud* AKERS, GARRETT, 1983b). As razões para esta diferença no comportamento têm sido investigadas por vários pesquisadores, como por exemplo KIYOHARA (1991), e constituem tema de estudos futuros para o autor da presente pesquisa.

KIYOHARA (*op.cit.*) estudou a crisotila bruta e o cimento-amianto, do ponto de vista morfológico e de estrutura cristalina, através das técnicas de microscopia eletrônica de transmissão, difração eletrônica de área selecionada, microscopia eletrônica de varredura, espectroscopia de raios X por energia dispersiva e difração de raios X. Deu ênfase à interface do cimento Portland com a superfície da fibra de amianto-crisotila na tentativa de explicar cientificamente a alta resistência mecânica do cimento-amianto, verificando que, exatamente no contato das fibras e fibrilas do amianto crisotila com a pasta de cimento Portland, formam-se monocristais lamelares de tobermorita, $Ca_5Si_6O_{15}(OH)_2.4H_2O$, fortemente aderidos à superfície das fibras/fibrilas do amianto crisotila que estão, ao mesmo tempo, inseridos, imbricados e/ou entrecruzados com as pilhas de cristais lamelares de tobermorita (e também de portlandita e de aluminatos de cálcio hidratados) da matriz da pasta endurecida de cimento Portland. Portanto, esses monocristais são os pontos de fixação ou de ancoragem das fibras de crisotila; com isso, impedem o deslizamento das mesmas dentro dos vazios do corpo poroso de cimento endurecido e conferem flexibilidade e resistência mecânica ao cimento-amianto. Ainda segundo este autor, a aderência da superfície maior dos cristais lamelares de tobermorita à superfície das fibras/fibrilas de crisotila é tão boa, porque existe grande semelhança entre a estrutura cristalina de ambos componentes (de argilominerais ou filossilicatos), crisotila e tobermorita, conferindo a elas um excelente poder de ligação (FIGURA 5).



LEGENDA

1 - Fibrila de amianto crisotila

2 - Monocristal lamelar de tobermorita

FIGURA 5 - Esquema de um corte transversal de feixes de fibrilas de crisotila, tendo cristais de tobermorita aderidos à superfície cilíndrica, pelas faces planas (vistas transversalmente) (KIYOHARA, 1991).

Segundo PERLIN, GRACHEVA, ZEVIN (1975) *apud* AKERS, GARRET (1983b) o processo de desfibramento a que são submetidas as fibras de amianto para confecção de cimento-amianto pode resultar em mudança no potencial zeta das fibras, e aumentar a adsorção de moléculas de água pelos feixes de fibras. Juntamente com o aumento

significativo da superfície específica, avaliável pela adsorção de água na região interfacial, dá-se um enriquecimento em hidróxido de cálcio durante o processo de hidratação.

O estudo do comportamento das fibras de crisotila, quando submetidas a esforços, permite que se façam analogias entre elas e o compósito de cimento-amianto. O conhecimento das características intrínsecas da crisotila pode contribuir para o entendimento do comportamento mecânico do cimento-amianto.

Fabricação dos produtos de cimento-amianto

Segundo HUNENBERG, (1971) *apud* KIYOHARA, (1991), o cimento-amianto foi patenteado por Louis Hatschek em 1901.

O processo industrial de fabricação de produtos de cimento-amianto, por via-úmida, utiliza equipamento semelhante ao equipamento de fabricação de papel e segue as seguintes etapas:

a) o amianto crisotila é retirado dos sacos de material plástico oriundos da mina e as fibras são separadas, mecanicamente, em fibrilas, procurando-se evitar ao máximo, a redução do comprimento das mesmas;

b) as fibras "abertas" são misturadas com cimento Portland normal (contendo gipsita como retardador) em um misturador do tipo "Holandesa" usado na indústria de celulose e papel; a proporção normal, em peso, é de 12% a 15% de crisotila em relação ao cimento Portland; as partículas de crisotila e de cimento Portland, se misturadas a seco, aderem umas às outras de forma que é impossível, após alguns minutos, separar a crisotila do cimento (ROSATO, 1971 *apud* KIYOHARA, *op.cit.*);

c) a água adicionada à mistura cimento e amianto deve ser bastante pura, não deve conter matéria orgânica, nem possuir sais dissolvidos; geralmente utiliza-se água com pH alcalino, reciclada das prensas e formas onde são conformadas as peças. A relação ponderal água/cimento deve ser maior que 0,4, necessária para iniciar o primeiro estágio da reação do cimento Portland com água (HUNENBERG, 1968 *apud* KIYOHARA, 1991). A alcalinidade da água pode ser assegurada juntando-se $CaCO_3$ à mistura de cimento com amianto;

   Geralmente utiliza-se 90% a 95% de água e 10% a 5% de cimento + amianto (VOROBYEV, 1965 *apud* KIYOHARA, *op.cit.*);

d) após a mistura das matérias-primas, inicia-se o primeiro estágio onde as partículas e a água reagem quimicamente;

e) faz-se a filtração da suspensão da mistura cimento + amianto + água, em filtros-prensas, reduzindo a relação água/cimento a um valor igual a 0,3 (HUNENBERG,

1968 *apud* KIYOHARA, 1991) para iniciar o 2º estágio ou período dormente, em que a mistura está "plástica";

f) ocorre a recristalização da etringita ($C_6AS_3H_{32}$);

g) reiniciam-se as reações químicas entre as partículas de cimento e água;

h) as fibrilas do amianto crisotila adsorvem o hidróxido de cálcio formado nas diversas reações químicas, o qual se cristaliza na superfície das mesmas, formando ligações do tipo "ponte de hidrogênio" com as hidroxilas das folhas de brucita superficiais das fibrilas, formando sítios para a fixação desses cristais. Essa cristalização de hidróxido de cálcio acelera as reações químicas de endurecimento do cimento Portland, e aumenta a resistência mecânica do mesmo após a pega completa (VOROBYEV, 1965 *apud* KIYOHARA ,*op.cit.*);

i) termina o processo de cura, finalizando, assim, a produção de peças constituídas pelo material compósito cimento-amianto.

CAPÍTULO III
MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Introdução

A presente pesquisa desenvolveu-se em duas etapas distintas. A primeira compreendeu um estudo global da Mina de Cana Brava, visando o conhecimento preliminar das rochas e da fibra bruta de crisotila. Nesta fase procurou-se conhecer todos os litotipos presentes na área da mina, bem como diferenciar os serpentinitos hospedeiros da crisotila, através de características petrográficas e petroquímicas, e desenvolver um método para medir a resistência à tração das fibras brutas, visando sua qualificação. Os materiais estudados foram amostras de rocha (testemunhos de sondagem e amostras coletadas nas cavas) e fibras brutas coletadas nas cavas.

Na segunda etapa efetuou-se a caracterização do minério, visando contribuir para a melhoria do controle da qualidade do produto final. A seleção das amostras foi feita com base nos estudos realizados na primeira etapa desta pesquisa e em trabalhos anteriores (PAMPLONA, NAGAO, 1982; CASSOLA, 1993 (a e b); HASUI, MAGA-LHÃES, 1985). Foram estudadas amostras típicas de dez frentes de lavra em operação na mina em 1994. Os materiais estudados foram amostras de rocha *in natura*, rochas britadas, fibras brutas, fibras semi-brutas e fibras beneficiadas.

A quantificação das amostras ensaiadas encontra-se nas TABELAS 1 (1ª etapa dos trabalhos) e 2 (2ª etapa dos trabalhos).

Estudos bibliográficos objetivaram o conhecimento dos trabalhos já realizados na área, bem como de vários trabalhos sobre serpentinitos, amianto (uso e propriedades), serpentinas, estudos sobre a caracterização mecânica da crisotila, compósitos e fibro-cimento. Utilizou-se o sistema Dialog, com base de dados Georef e Copendex.

Inicialmente executou-se um levantamento dos dados obtidos em projetos executados pelo IPT, a pedido da SAMA, selecionando-se aqueles cuja utilização era importante para a presente pesquisa.

3.2. Materiais

Os materiais estudados acham-se definidos a seguir:

Siglas utilizadas nas TABELAS 1, 2 e 3:

PET - Caracterização Petrográfica.

CT - Caracterização tecnológica (ensaios de índices físicos, abrasão *Los Angeles*, impacto Treton, velocidade de propagação de ondas P, compressão uniaxial).

RX - Análises mineralógicas por difração de raios X.

ATD/ATG - Análises termodiferencial e termogravimétrica.

% <0,074 mm - Determinação do teor de finos com granulometria menor que 0,074 mm (passantes na peneira de #200).

MO - Análises mineralógicas por microscopia óptica.

IV - Espectroscopia de infra-vermelho.

MEV - Microscopia eletrônica de varredura.

RT-T.amb - Ensaios de resistência à tração a temperatura ambiente.

RT-100°C - Ensaios de resistência à tração sob aquecimento a 100°C.

RT transv. - Ensaios de resistência à tração transversal.

IC - Ensaio de determinação do índice de comprimento.

LA - Ensaio de determinação do teor de finos (<0,074 mm) associados às fibras.

UR - Ensaio de determinação da unidade de resistência à flexão.

AQ - Análises químicas.

EMO - Estudo de minerais opacos.

TABELA 1 - Ensaios efetuados e quantidade de amostras ensaiadas **(1ª etapa dos trabalhos)**.

TIPO DE AMOSTRA	ENSAIOS															
	PET	EMO	AQ	MEV	RX	ATD ATG	MO	Ensaios exploratórios de resistência à tração								
								RT Tamb	RT 100°C	RT 300°C	RT 350°C	RT 400°C	RT 450°C	RT 500°C	RT 550°C	RT transv.
Rocha *in natura*	31	08	12	02	33	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fibra bruta	-	-	-	02	05	03	05	07	02	02	04	02	02	02	03	03

TABELA 2 - Ensaios efetuados e quantidade de amostras ensaiadas **(2ª etapa dos trabalhos)**.

TIPO DE AMOSTRA	ENSAIOS														
	Descrição Macrosc.	PET	CT	RX	ATD ATG	%<*0,074 mm*	MO	MEV	IV	Ensaios de resistência à tração			IC	LA	UR
										T.amb	300°C	500°C			
Rocha *in natura*	15	15	15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rocha britada	-	-	10	-	-	10	10*	-	-	-	-	-	-	-	-
Rocha britada atritada	-	-	-	-	-	10	10*	01*	-	-	-	-	-	-	-
Fibra bruta	6	-	-	06	06	-	06	01	05	06	04	04	-	-	-
Fibra semi-bruta	-	-	-	10	-	-	10	01	-	-	-	-	10	10	10
Fibra beneficiada	-	-	-	10	-	-	10	01	-	-	-	-	10	10	10

* **Nota:** Ensaios efetuados em amostras de material com granulometria ***<0,074 mm.***

3.2.1. Rocha *in natura*

Por rocha *in natura* entende-se as rochas que não sofreram nenhum tipo de processamento. Na 1ª etapa, correspondem a amostras "de mão" e testemunhos de sondagem.

Na 2ª etapa, correspondem a blocos de rocha maciça com dimensões aproximadas de 30 x 30 x 50 cm, coletados, em cada uma das frentes de lavra consideradas representativas da jazida. Quando havia muita heterogeneidade eram coletados dois blocos por frente de lavra, que recebiam a denominação de "a" e "b", acrescida do nome da amostra. Estas amostras foram sempre coletadas em duplicata, de forma que uma era encaminhada ao IPT e outra permanecia sob os cuidados da Sama.

3.2.2. Rocha britada

Cada amostra (cerca de 80 kg) foi homogeneizada no Agrupamento de Tratamento de Minérios do IPT, onde foram efetuadas, em duplicata, análises granulométricas a úmido. No presente estudo foram utilizados somente os dados referentes ao material com granulometria <0,074 mm (<#200), por constituir os finos indesejáveis associados às fibras.

3.2.3. Rocha britada atritada

A origem desta amostra, o procedimento e o local de ensaio são os mesmos descritos para a "rocha britada", acrescidos de uma atrição a que foi submetida cada uma das amostras durante 30 minutos, em moinho de aço sem corpos moedores, a uma velocidade de 73 rotações por minuto. Este ensaio foi sugerido por CASSOLA (1993b), para discriminar as rochas quanto ao grau de "fragilidade", simulando a geração de finos aderidos ao minério nas operações de manuseio e secagem, processadas a baixo nível de energia.

3.2.4. Fibra bruta

Por fibra bruta entende-se as fibras de crisotila exatamente como ocorrem na natureza. Por limitação do método utilizado para os ensaios de resistência à tração das fibras, que exige um comprimento mínimo de 11 mm, foram coletadas apenas fibras longas (cerca de 5 kg por amostra), somente em seis frentes de lavra.

3.2.5. Fibra semi-bruta

Estas fibras foram obtidas a partir das amostras de rocha coletadas nas frentes de lavra. As amostras (cerca de 80kg de cada) foram enviadas à Usina Piloto da Sama, onde foi feita a separação das fibras.

Nestas fibras foram executados ensaios de laboratório para determinação do índice de comprimento (IC), determinação do conteúdo de finos (LA) e determinação da unidade de resistência à flexão (UR). Estas fibras se diferenciam das fibras beneficiadas pela escala do processamento (piloto), tipo de equipamento utilizado e controle maior na gestão da qualidade. Não são submetidas à secagem nos fornos rotativos horizontais; a secagem é feita sob a luz do sol.

3.2.6. Fibra beneficiada

Esta fibra corresponde ao produto final da Sama, também denominada "fibra comercial". O processo de beneficiamento acha-se descrito no Capítulo IV, item 4.2, desta tese.

Nestas fibras foram também executados ensaios de IC, LA e UR.

3.3. Métodos

3.3.1. Trabalhos de campo

Na 1ª etapa de trabalho, em 1992, a coleta de amostras de rocha foi efetuada em conjunto com técnicos da Sama, em frentes de lavra e arquivos de testemunhos de sondagem. As amostras de fibras brutas para execução dos ensaios exploratórios foram selecionadas e coletadas conforme critérios da Sama.

Para a 2ª etapa, a seleção das frentes de lavra a serem estudadas baseou-se principalmente nos seguintes critérios:

a) natureza da rocha encaixante;

b) comprimento dominante da fibra;

c) teor de finos (<0,074 mm associado às fibras);

A amostragem foi realizada pela autora desta pesquisa, em conjunto com técnicos da Sama.

Nas duas fases, a denominação das amostras foi estabelecida com base na sigla da cava, na cota da bancada e na posição azimutal da frente de explotação.

Na 2ª etapa as amostras receberam números de 1 a 10, conforme a ordem em que foram efetuados os ensaios no laboratório da Mina de Cana Brava. A identificação dessas 10 amostras é dada no QUADRO 2.

Nº de ordem dos ensaios	Denominação da amostra
1	A 348 W
2	B 308 N
3	B 318 W
4	A 348 N
5	A 348 SW
6	B 308 SW
7	A 358 N
8	A 348 NW
9	B 318 SW
10	A 358 NE

QUADRO 2 - Identificação das amostras estudadas na 2ª etapa dos trabalhos

Na presente pesquisa as amostras serão designadas pelo número de ordem dos ensaios correspondentes.

Os trabalhos de laboratório foram efetuados em consonância com o tipo de material estudado, quais sejam: rocha *in natura*, rocha britada, rocha britada atritada, fibra bruta, fibra semi-bruta, fibra beneficiada, material com granulometria <0,074 mm associado à rocha britada e britada atritada. A TABELA 3 apresenta uma relação das amostras e os respectivos ensaios efetuados na 2ª etapa dos trabalhos.

3.3.2. Caracterização petrográfica e mineralógica das rochas

Foram efetuadas seções delgadas e polidas das amostras de rochas e executadas análises petrográficas, visando determinar a mineralogia, relações texturais, gra-nulometria e estruturas. Foram estudadas 39 amostras na 1ª etapa dos trabalhos

TABELA 3 - Relação das amostras e os respectivos ensaios realizados **(2ª etapa dos trabalhos)**.

AMOSTRAS		ENSAIOS													
Nº	MATERIAL	PET	CT	RX	ATG ATD	% < *0,074 mm*	MO	IV	MEV	RT T.amb	RT 300°C	RT 500°C	IC	LA	UR
1	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada					X	X								
	Rocha britada atritada					X	X								
	Fibra bruta			X	X		X			X					
	Fibra semi-bruta			X									X	X	X
	Fibra beneficiada			X									X	X	X
2	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada					X	X								
	Rocha britada atritada					X	X								
	Fibra bruta			X	X		X	X		X	X	X			
	Fibra semi-bruta			X									X	X	X
	Fibra beneficiada			X									X	X	X
3	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada					X	X								
	Rocha britada atritada					X	X								
	Fibra bruta			X	X		X	X		X	X	X			
	Fibra semi-bruta			X									X	X	X
	Fibra beneficiada			X									X	X	X

continua

continuação

AMOSTRAS		ENSAIOS													
Nº	MATERIAL	PET	CT	RX	ATG ATD	% < 0,074 mm	MO	IV	MEV	RT T.amb	RT 300°C	RT 500°C	IC	LA	UR
4	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada				X	X									
	Rocha britada atritada				X	X									
	Fibra bruta														
	Fibra semi-bruta			X			X								
	Fibra beneficiada			X			X						X	X	X
5	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada					X	X								
	Rocha britada atritada					X	X								
	Fibra bruta			X	X		X	X		X					
	Fibra semi-bruta												X	X	X
	Fibra beneficiada												X	X	X
6	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada					X	X								
	Rocha britada atritada					X	X		X						
	Fibra bruta			X	X		X	X	X	X	X	X			
	Fibra semi-bruta			X					X				X	X	X
	Fibra beneficiada			X					X				X	X	X

continua

continuação

AMOSTRAS		ENSAIOS													
Nº	MATERIAL	PET	CT	RX	ATG ATD	% < 0,074 mm	MO	IV	MEV	RT T.amb	RT 300°C	RT 500°C	IC	LA	UR
7	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada					X	X								
	Rocha britada atritada					X	X								
	Fibra bruta			X	X		X	X		X	X	X			
	Fibra semi-bruta			X									X	X	X
	Fibra beneficiada			X									X	X	X
8	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada					X	X								
	Rocha britada atritada					X	X								
	Fibra bruta														
	Fibra semi-bruta			X			X						X	X	X
	Fibra beneficiada			X			X						X	X	X
9	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada					X	X								
	Rocha britada atritada					X	X								
	Fibra bruta														
	Fibra semi-bruta			X			X						X	X	X
	Fibra beneficiada			X			X						X	X	X

continua

continuação

AMOSTRAS		ENSAIOS													
Nº	MATERIAL	PET	CT	RX	ATG ATD	% < *0,074 mm*	MO	IV	MEV	RT T.amb	RT 300°C	RT 500°C	IC	LA	UR
10	Rocha *in natura*	X	X												
	Rocha britada					X	X								
	Rocha britada atritada					X	X								
	Fibra bruta														
	Fibra semi-bruta			X			X						X	X	X
	Fibra beneficiada			X			X						X	X	X

das quais 31 são de rocha (sendo 23 de serpentinitos e 8 de outras rochas) e em 8 foi efe-tuado estudo dos minerais opacos. Na 2ª etapa foram estudadas 15 amostras de rocha.

A preparação das lâminas delgadas e seções polidas, bem como seu estudo em microscópio óptico de luz transmitida e refletida, foram feitos no Agrupamento de Tecnologia de Materiais Rochosos (ATR) da Divisão de Geologia (Digeo) do IPT.

Dentre as amostras de rocha estudadas petrograficamente (na 1ª etapa), foram selecionadas 12 para análise química, sendo seis do serpentinito tipo 1 (SP-1) e seis do serpentinito do tipo 2 (SP-2), com o objetivo de efetuar estudos petroquímicos. Foram analisados 28 elementos, entre maiores, menores e traços, além de perda ao fogo e teor de umidade. As análises foram todas executadas na GEOLAB - Divisão de Laboratórios da Geosol - Geologia e Sondagens Ltda. Os métodos utilizados acham-se listados a seguir:

ELEMENTOS	MÉTODOS	PRECISÃO RELATIVA
SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, TiO_2, Cr_2O_3, P_2O_5	Fluorescência de raios-X com amostras fundidas com tetraborato de lítio+óxido de lantânio	± 1%
FeO	Via úmida com titulação com $KMnO_4$	± 1%
K_2O, MnO, Na_2O, Zn, Pb	Dissolução total das amostras com HF-HNO_3 e determinação por Absorção Atômica	± 1%
S, Cl, Rb, Sr, Th, Ta, Co, Ba, Nb, V, Zr, Y	Fluorescência de raios-X usando técnica de pó prensado	± 5%
F	Fusão alcalina e determinação com eletrodo de íons-específico	± 5%
H_2O^-	Método do tubo de Penfield	± 5%
H_2O^+	Água de constituição. Gravimetria "Método Penfield"	± 5%

As análises petrográficas seguiram as recomendações da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, 1992a (NBR 12768). A classificação petrográfica seguiu os critérios propostos por LE MAITRE (1989).

Na 1ª etapa dos trabalhos foram também efetuadas análises termodiferenciais (ATD) e análises por difração de raios X, com o objetivo de auxiliar na identificação

porções representativas de 13 amostras selecionadas, foram trituradas e moídas 110g de cada amostra, a uma granulometria menor que 0,074mm. O aparelho utilizado para as análises termodiferenciais e termogravimétricas foi um derivatógrafo pertencente à Coordenação de Caracterização de Materiais do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP).

As condições instrumentais de operação foram as seguintes:

	FAIXA DE TEMPERATURA	ATM	TAXA DE AQUECIMENTO
ATD	ambiente até 1200°C	-	20°C/min
ATG	ambiente até 900°C	Arg/150ml/min	10°C/min

A interpretação dos diagramas de ATD e ATG foi baseada em MACKENZIE (1957).

Para as análises por difração de raios X, o equipamento utilizado, Rigaku Denki, modelo Geigerflex, foi operado com radiação K_α do cobre, 2000 CPS, a 2°/min, 40 KV e 20mA. As análises foram efetuadas no Agrupamento de Tecnologia de Materiais Rochosos, Digeo, IPT.

Na interpretação dos difratogramas, foi utilizado o fichário do JOINT COMMITEE ON POWDER DIFRACTION STANDARDS - JCPDS (1974).

Nos trabalhos iniciais foi selecionada uma amostra representativa do serpentinito tipo SP-1 e outra do SP-2, para análises por microscopia eletrônica de varredura, com objetivo de complementar e enriquecer a caracterização petrográfica. O estudo foi efetuado em porções da amostra com uma superfície plana e recorbertas com ouro.

O equipamento utilizado é um Stereoscan 440, da Leica, pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia da Escola Politécnica da USP e foi operado com uma tensão de 20KV.

3.3.3. Caracterização tecnológica das rochas

A caracterização tecnológica das rochas compreendeu a determinação das propriedades físicas e físico-mecânicas das amostras de serpentinitos *in natura*, visando obter subsídios para conhecer o comportamento da rocha durante o beneficiamento, procurando discriminar os tipos de serpentinito quanto a geração de finos resultantes das sucessivas britagens e peneiramentos. Compreendeu também a

Todos estes ensaios foram efetuados no Agrupamento de Tecnologia de Materiais Rochosos, Digeo, IPT.

Ensaio de determinação de índices físicos

São denominados índices físicos de rocha aqueles que definam as propriedades de massas específicas aparentes seca e saturada, porosidade aparente e absorção d'água. Refletem, quando associados a outros parâmetros, o grau de alteração e de coesão de um determinado tipo de rocha.

Para a determinação dos valores dessas propriedades, foram utilizados 10 fragmentos de rocha com 5 a 7 cm de diâmetro de cada amostra, os quais são pesados ao ar, após secagem em estufa a 110 ± 5°C (peso A), após saturação em água por 48 horas (peso B) e na condição submersa, após saturação (peso C), segundo as diretrizes da ABNT, 1992b (NBR 12766).

Os valores foram obtidos através da utilização das seguintes expressões:

- massa específica aparente seca:

$$\delta_{sec} = \frac{A}{B-C} \quad (kg/m^3)$$

- massa específica aparente saturada:

$$\delta_{sat} = \frac{B}{B-C} \quad (kg/m^3)$$

- porosidade aparente:

$$\eta = \frac{B-A}{B-C} \times 100$$

- absorção d'água:

$$\alpha = \frac{B-A}{A} \times 100$$

Ensaio de resistência à abrasão *Los Angeles*

A abrasão *Los Angeles* de agregados, é um ensaio no qual os agregados sofrem desgaste por atrito e impacto quando colocados na máquina *Los Angeles* juntamente com esferas metálicas, e submetido a 500 revoluções à velocidade de 30 a 38 r.p.m. durante 15'09". O desgaste é convencionalmente expresso pela porcentagem em peso do material que, após o ensaio, passa pela peneira de malhas quadradas de 1,70 mm ABNT, 1988 (NBR 5734).

Este método fornece o resultado final com aproximação de 1%.

A abrasão *Los Angeles* do agregado é calculada pela fórmula:

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \times 100$$

onde:

A_n = abrasão *Los Angeles* das graduações n, com aproximação de 1%

n = graduação (A, B, C, D, E, F ou G) escolhida para o ensaio

m_n = massa total da amostra seca, colocada na máquina

m'_n = massa da amostra lavada e seca após o ensaio

Os ensaios de abrasão *Los Angeles* foram executados na graduação A (mais usual), seguindo as diretrizes da ABNT, 1983 (NBR 6465) (FOTOS 6 e 7).

Ensaio de resistência ao impacto Treton

Este ensaio tem por objetivo determinar o índice de tenacidade de agregados pelo aparelho Treton. Tenacidade Treton é a resistência ao impacto oferecida pelo agregado, quando submetido a 10 golpes de martelo no aparelho Treton (FOTOS 8 e 9).

A amostra é constituída por 3 porções de 30 fragmentos de rocha, de dimensões entre 19 mm e 16 mm, de forma aproximadamente cúbica.

A resistência ao impacto Treton é a relação porcentual entre as diferenças do peso inicial (A) e final (B) dividida pelo peso inicial (A) vezes 100:

$$I_T = \frac{A - B}{A} \times 100$$

onde:

I_T = desgaste ao impacto Treton (%)

A = peso da amostra antes do ensaio (g)

B = peso da amostra depois do ensaio (g), descartados os fragmentos <1,68 mm

O resultado final será a média aritmética dos resultados dos ensaios nas três porções e terá a aproximação de 0,1%.

Os ensaios de impacto Treton foram executados de acordo com as diretrizes da ABNT, 1978 (MB 964).

FOTO 6 - Ensaio de abrasão *Los Angeles*. Amostra e esferas metálicas no interior do tambor da máquina de ensaio.

FOTO 7 - Aspecto de uma amostra antes e de outra após ensaio de abrasão *Los Angeles*. Na bandeja circular está o material de dimensão menor que 1,68 mm ("perdas").

FOTO 8 - Aspecto de uma amostra antes do ensaio de impacto Treton.

FOTO 9 - Aspecto da amostra da foto anterior após ensaio de impacto Treton.

Ensaio de velocidade de propagação de ondas P

A velocidade de propagação do ultra-som em uma rocha é dependente do seu estado de alteração ou deterioração (ILIEV, 1966 e FARJALLAT, TATAMIYA, YOSHIDA, 1974). A velocidade é maior para materiais sãos, e decresce à medida que a alteração progride. Para uma mesma variedade de rocha, portanto, a comparação entre as velocidades de ultra-som é uma maneira prática de se avaliar o estado de alteração.

A velocidade de propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais (P) foi determinada de acordo com procedimento interno do IPT, em que se utiliza o aparelho *Pundit* (Portable Ultrassonic Non-Destructiv Indicator Testing) na freqüência de 80 kHz (CNS, 1972), no estado seco, e foi executada nos corpos-de-prova destinados a ensaios de compressão (FOTO 10).

Ensaio de resistência à compressão uniaxial

Os ensaios de compressão uniaxial visam determinar qual a tensão que provoca a ruptura da rocha quando submetida a esforços compressivos.

Estes ensaios foram executados em corpos-de-prova prismáticos, de base quadrada, com relação base:altura de, aproximadamente, 1:2, ou em relações menores quando as amostras não permitiam a obtenção de corpos-de-prova com a relação considerada ideal (FOTO 11).

Utilizaram-se cinco corpos-de-prova por amostra (no estado seco), os quais foram submetidos a esforços compressivos (taxa de carregamento de 6 MPa/s) em uma prensa hidráulica com capacidade de 200 toneladas.

A tensão de ruptura, na compressão, foi determinada pela relação:

$$C = \frac{W}{A}$$

onde:

C = tensão de ruptura (Mpa)

W = força de ruptura (kN)

A = área de carga do corpo-de-prova (m^2)

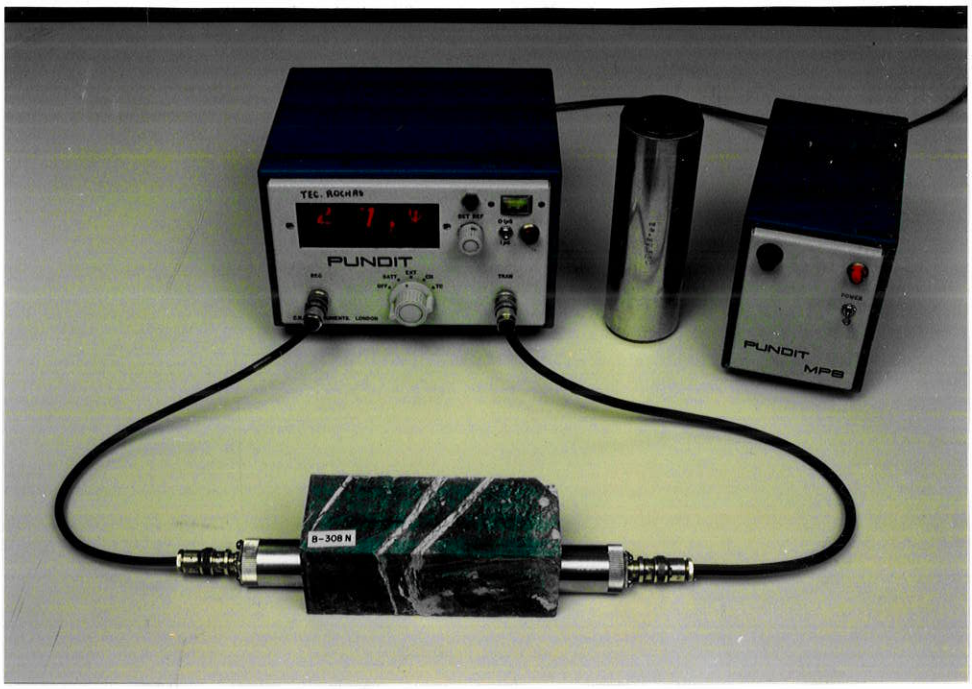


FOTO 10 - Ilustração do procedimento adotado para determinação da velocidade de propagação de ondas P.

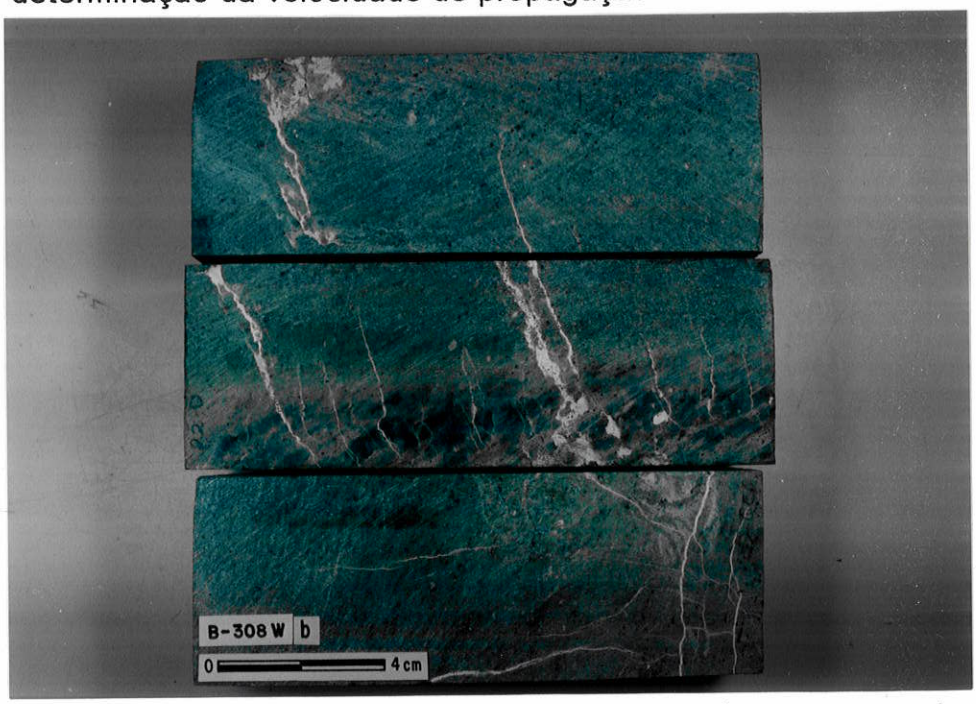


FOTO 11 - Aspecto dos corpos-de-prova de uma amostra destinados a ensaio de compressão uniaxial.

Análises mineralógicas dos materiais com granulometria <0,074 mm

Os materiais com granulometria <0,074 mm procedentes da rocha britada e da rocha britada atritada foram examinados ao microscópio óptico, com o objetivo de identificar os minerais presentes e estimar a proporção relativa de cada um, conforme procedimento relatado a seguir. Estas análises foram feitas no Agrupamento de Tecnologia de Materiais Rochosos, Digeo, IPT.

Pequenas porções do material fino foram desmanchadas sobre lâminas de vidro, imersas em líquidos de índices de refração 1,56 ou 1,57. A operação foi executada com o auxílio de pinça de ponta fina. A função dos líquidos no preparado foi simplesmente a de melhorar a visão microscópica, eliminando excessos de luz totalmente refletida nas bordas das partículas.

Assim preparada, a lâmina foi estudada em microscópio petrográfico em aumentos médios de 63x a 160x, empregando-se iluminação de luz branca polarizada com polarizadores cruzados e descruzados.

A seguir estimaram-se as quantidades de cada um dos componentes através da sua contagem (de até 1000 pontos) e registradas em contador apropriado.

Ressalta-se que, no caso, os resultados podem estar sujeitos a erros relativamente grandes (cerca de 20%) tanto pelo fato de fibras e agregados de fibras se grudarem sem distinção nítida, como também pelo fato de os componentes apresentarem-se em formas e tamanhos extremamente diferentes.

Foi selecionada uma amostra para análise por microscopia eletrônica de varredura e por dispersão de energia (EDS), com o objetivo de verificar a morfologia dos minerais constituintes, com equipamento e método já descritos no item 2.3.2.

3.3.4. Caracterização tecnológica das fibras

A caracterização tecnológica das fibras compreendeu os ensaios descritos a seguir. Seu objetivo era o de investigar as eventuais diferenças existentes entre a fibra nos seus três estados (bruta, semi-bruta e beneficiada). Para completar a caracterização das fibras brutas, todas elas foram descritas macroscopicamente de forma detalhada.

Análises mineralógicas

As análises mineralógicas englobaram: difratometria de raios X, análises termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG), microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de infra-vermelho.

Foram efetuadas análises mineralógicas por difratometria de raios-X em 11 amostras de fibra bruta, 10 amostras de fibra semi-bruta e 8 de fibra beneficiada, objetivando auxiliar na identificação das fases de serpentina presentes, bem como identificar também a natureza mineralógica de possíveis impurezas.

As amostras (cerca de 6 g) foram moídas em moinho de panela "Renard" por três minutos, e em seguida peneiradas em #200. A fração menor que 0,074 mm de cada amostra foi prensada em suporte de cavidade, de maneira não orientada, e submetida à análise por difratometria de raios X, com equipamento e método já descritos no item 3.3.2 desse capítulo.

Foram efetuadas ATD e ATG em 9 amostras de fibras brutas, objetivando também auxiliar na identificação das fases de serpentina presentes e ainda identificar a natureza mineralógica das possíveis impurezas.

Para as análises térmicas, porção representativa da amostra foi moída em gral de ágata até granulação menor que 0,074 mm, pesada e acondicionada em porta-amostra de cerâmica, sendo submetida a aquecimento, acompanhado de registros gráficos (curvas TD e TG) de seu comportamento térmico. O equipamento utilizado foi o Derivatograph-PC, da MOM (Hungarian Optical Works), pertencente ao Agrupamento de Tecnologia de Materiais Rochosos (Digeo/IPT). As condições instrumentais de operação foram as seguintes: temperatura ambiente até 1000°C, taxa de aquecimento de 10°C/min. No caso específico do ATG, a atmosfera utilizada foi o ar.

Na interpretação dos diagramas, utilizaram-se como referências MACKENZIE (1957), SMYKATZ-KLOSS (1974) e NEMECZ (1981).

Para caracterizar opticamente as fibras brutas, semi-brutas e beneficiadas, foi efetuado estudo pelo método de imersão em líquidos da Coleção Cargille, com índices de refração (n) conhecidos. Os índices de refração foram determinados pelo método da linha de Becke, em grãos com cerca de 0,1mm. Para a determinação das características ópticas dos minerais foram utilizados os critérios propostos por TRÖGER (1979).

Com o objetivo de complementar as análises por microscopia óptica foram efetuadas análises por microscopia eletrônica de varredura em uma amostra de fibra,

no seu estado bruto, semi-bruto e beneficiada, com equipamento e método já descritos no item 3.3.2.

Visando reconhecer o mecanismo das ligações moleculares que ocorrem na crisotila, foram efetuadas análises de espectroscopia de infra-vermelho em 5 amostras de fibra bruta, no Espectrofotômetro de Infravermelho por Transformada de Fourier BOMEM MB102 do Laboratório de Análise Térmica Ivo Giolito do Instituto de Química da USP. As condições de operação do aparelho foram as seguintes: resolução: 4 cm^{-1} e 12 varreduras; foi dado um "zoom" na região de 800 a 1400 cm^{-1}.

Para as análises foram quarteadas e pesadas cerca de 10g de cada amostra, que posteriormente foram moídas e peneiradas a #325. Cerca de 1g da amostra moída, na proporção de 2%, foi adicionada ao KBr. O material foi prensado para fazer as "pastilhas", que foram colocadas em dessecadoras até o momento da análise.

Ensaios de resistência à tração

A execução de ensaios de resistência à tração em fibras brutas objetivou conhecer seu comportamento quanto a esta propriedade para verificar a existência de eventuais diferenças significativas nos valores de resistência à tração, segundo o método descrito a seguir.

Os ensaios de resistência à tração foram efetuados em duas etapas distintas. A 1ª etapa objetivou desenvolver uma metodologia para execução dos ensaios, e a 2ª etapa, conhecer o comportamento das fibras com relação a esta propriedade.

Ensaios exploratórios (1ª etapa)

Foram testados três aparelhos, a saber:

a) Trouble Shooter, da *Pulmac*;

b) Dinamômetro *Instron*;

c) Testador de resistência de algodão *Pressley*.

O Trouble Shooter, da *Pulmac*, é indicado para medidas de resistência à tração de tiras de papel. Foram ensaiadas quatro amostras de fibras longas procedentes da Mina de Cana Brava e, para efeitos comparativos, uma amostra de fibra longa procedente da Mina de Cassiar, no Canadá. O aparelho utilizado pertence ao Agrupamento de Celulose e Papel da Divisão de Produtos Florestais, Têxteis e Couros (DPFTC) do IPT.

Os ensaios foram realizados com espaçamento (*gap*) zero, ou seja, sem nenhuma distância intergarras. O resultado apresentado pelo aparelho é a pressão no pistão de carga no momento de ruptura, dada em libras por polegada quadrada (psi).

Para que este valor seja convertido em força de tração de ruptura (Kgf) é necessário subtraí-lo de uma constante de calibração do aparelho, que vale 1,8, e multiplicá-lo por uma constante de ajuste bimensional, 0,369:

$$TR = (\text{leitura (psi)} - 1{,}8) \times 0{,}369$$

$$\text{Ten. rupt.} = \frac{TR}{dl}$$

A partir do valor da tração de ruptura, pode-se calcular a tenacidade de ruptura segundo diretrizes da ASTM-1990 (D 3822), que é a tração de ruptura dividida pela densidade linear (título) da fibra. Supondo-se que um feixe de fibras possui densidade e densidade linear homogêneas em qualquer porção, pode-se estimar o diâmetro do feixe. Para este cálculo foi considerada a densidade das fibras como 2,5 g/cm^3, (BERGER, 1963; HODGSON, 1979; PUNDSACK, 1955), sendo calculada, então, a tensão de ruptura, que é a tração de ruptura dividida pela área calculada do feixe.

Utilizaram-se fibras não aquecidas (estado natural - temperatura ambiente) e aquecidas nas temperaturas de: 100°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C e 550°C. Foram efetuados no mínimo 40 ensaios para cada amostra e para cada temperatura. No entanto, muitos corpos de prova apresentaram apenas ruptura parcial.

Nesta primeira etapa foram efetuados também ensaios utilizando o equipamento *Instron*, com as fibras de amianto em corpos-de-prova montados com resina sintética. Foram ensaiados cerca de 50 corpos-de-prova,mas os resultados foram insatisfatórios, uma vez que o rompimento do feixe de fibras se dava sempre numa das extremidades do corpo-de-prova e não no meio, como seria desejável. Também era comum o descolamento da fibra da resina.

Para garantir a qualidade do produto final, é desejável que os feixes de fibras permaneçam íntegros e coesos até o final do processo de beneficiamento. Na tentativa de medir a resistência dos feixes ao desfibramento, foram efetuados também ensaios exploratórios de resistência à tração transversal dos feixes de fibras.

Os corpos-de-prova foram confeccionados da seguinte forma: feixes de fibras (com área maior variando de 0,8 a 3,0 cm^2) foram colados com cola de secagem rápida e alta resistência à tração, em suporte de cortiça e, nas faces externas deste suporte, foram fixadas duas tiras de papel vegetal, uma de cada lado, que por sua vez foram presas nas garras do aparelho (*Instron*), cujas condições experimentais foram: velocidade de carga de 20 mm/min. e fundo de escala de 2 kgf. Este ensaio foi realizado em três amostras de fibra, sendo 44 corpos-de-prova de uma fibra, 20 de outra e 15 de uma terceira amostra.

foram executados inicialmente ensaios em fibras de viscose, nos dois aparelhos. Posteriormente foram ensaiadas duas amostras de feixes de crisotila, sendo 40 corpos-de-prova de uma, e 35 da outra. Já que verificou-se ser este o aparelho mais eficiente para os ensaios propostos, na 2ª etapa os ensaios foram todos efetuados nele.

Os aparelhos Pressley e Instron utilizados pertencem ao Agrupamento de Produtos Têxteis, DPFTC, IPT.

O aparelho utilizado foi um "Testador de resistência de algodão *Pressley*" (FOTO 12), fabricado por Joseph M. Doebrich & Co. As garras do aparelho são recobertas por um tipo de couro inadequado para materiais muito mais duros que algodão, e por esta razão foi substituído por um couro curtido com sais de cromo.

As amostras foram reduzidas manualmente, com auxílio de lâmina de aço, a feixes de fibras com peso aproximado da ordem de 1 a 3 mg, conforme o comprimento do feixe. Após colocado no aparelho, o corpo-de-prova tem seu comprimento reduzido a 11,9 mm, dimensão exigida pela configuração do aparelho. As rupturas realizaram-se com as duas garras que prendem o feixe encostadas uma à outra (*gap* = 0).

Consideram-se apenas as leituras maiores ou iguais a 10 libras-força, por recomendação do fabricante.

Os corpos-de-prova rompidos foram então pesados em balança analítica. Para fins de cálculo, considerou-se a densidade da fibra de crisotila como 2,5 g/cm^3 (BERGER, 1963; HODGSON, 1979 e PUNDSACK, 1955). Assim, a tensão de ruptura do corpo-de-prova, em quilogramas-força por centímetro quadrado (T), é dada pela fórmula:

$$\text{Tensão de ruptura} = \frac{\text{força de ruptura}}{\text{área da fibra}} = \frac{\text{força.l.d}}{\text{massa}} = \frac{\text{lbf x 0,4536 (kgf) x 1,19 (cm) x 2,5 (g/cm}^3\text{)}}{\text{mg x 10}^{-3}\text{ (g)}}$$

onde *l* é o comprimento da fibra e *d* a densidade;

$$\text{Então,} \qquad T\ (\text{kgf/cm}^2) = \frac{\text{leitura x 1350}}{\text{massa}}$$

onde a "leitura" é feita em libras e a "massa" expressa em miligramas. Posteriormente os valores foram convertidos em Mpa (kgf/cm^2 = 0,9807 MPa)

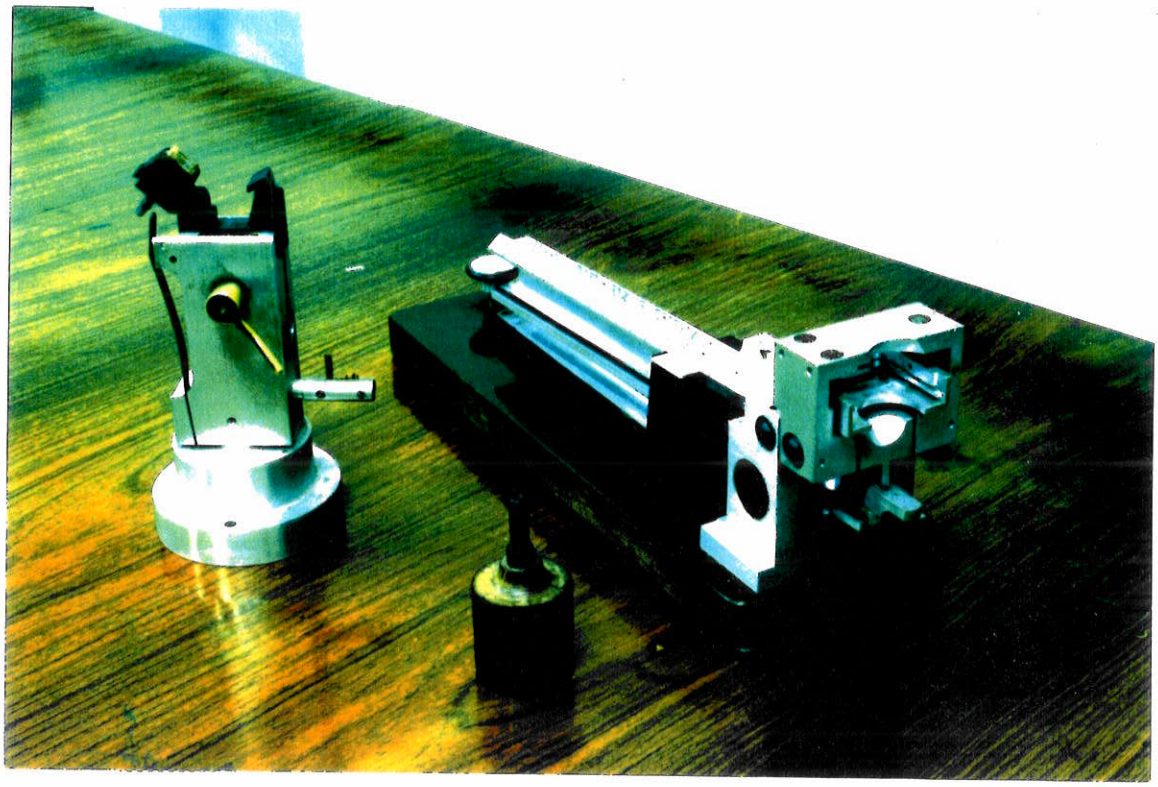


FOTO 12 - Aspecto do equipamento *Pressley*.

Ensaios definitivos (2ª etapa)

Nesta etapa utilizou-se somente o aparelho *Pressley*, segundo o método descrito anteriormente.

Foram ensaiadas 6 amostras de fibra bruta à temperatura ambiente (cerca de 200 corpos-de-prova de cada uma), e 4 amostras de fibras aquecidas às temperaturas de 300°C e 500°C (cerca de 100 corpos-de-prova). O número de corpos-de-prova ensaiados é elevado, porque nos ensaios exploratórios verificou-se que o coeficiente de variação era alto.

Os corpos de prova foram colocados em cadinho de porcelana e levados a muflas Forlabo e Quimis. O tempo de aquecimento foi sempre de 20 minutos à temperatura indicada, mais o tempo necessário até atingir a temperatura desejada e o tempo de resfriamento na própria mufla.

Quando retirados das muflas, os corpos-de-prova eram colocados em dessecadoras (para não recuperarem a umidade) enquanto aguardavam a oportunidade de se submeterem ao ensaio de tração.

Ensaio para determinação do índice de comprimento (IC)

Este ensaio é efetuado rotineiramente pela Sama em seus laboratórios localizados junto à Mina de Cana Brava, tanto sobre amostras na unidade piloto (com fibras semi-brutas) quanto na usina de beneficiamento (com fibras comerciais). É obtido a partir da distribuição das fibras retidas nas peneiras de #7, 14, 25, 52 e 200 (ensaio Turner e Newall-TN, de distribuição granulométrica). Segue as diretrizes propostas pela QUEBEC ASBESTOS MINING ASSOCIATION - QAMA, 1974b (C-5-72). Consiste no somatório dos produtos obtidos entre os fatores de multiplicação (aberturas das telas em milímetros x 10) e a porcentagem de fibra retida em cada tela do classificador TN (FOTO 13).

Ensaio para determinação do conteúdo de finos (LA)

Este ensaio, denominado "ensaio de lavagem", também é efetuado pela SAMA e objetiva determinar a quantidade de finos associados às fibras (semi-brutas e comerciais) obtida através do equipamento de lavagem da fibra, passante por uma tela de #200. Este ensaio segue as diretrizes propostas pela QAMA, 1974a (C-4-72).

Ensaio para determinação da unidade de resistência à flexão (UR)

Este ensaio é efetuado rotineiramente pela SAMA, pois a resistência à flexão (ou tração indireta) é a propriedade mais importante do fibro-cimento. Seus valores qualificam o produto inclusive quanto ao seu valor comercial.

São confeccionados corpos de prova que utilizam fibras semi-brutas procedentes da usina-piloto e também fibras beneficiadas, procedentes da usina industrial.

O método utilizado para confecção das placas de fibro-cimento e execução do ensaio, segue as diretrizes propostas pela QAMA, 1974c (F-2-72) (FOTO 14).

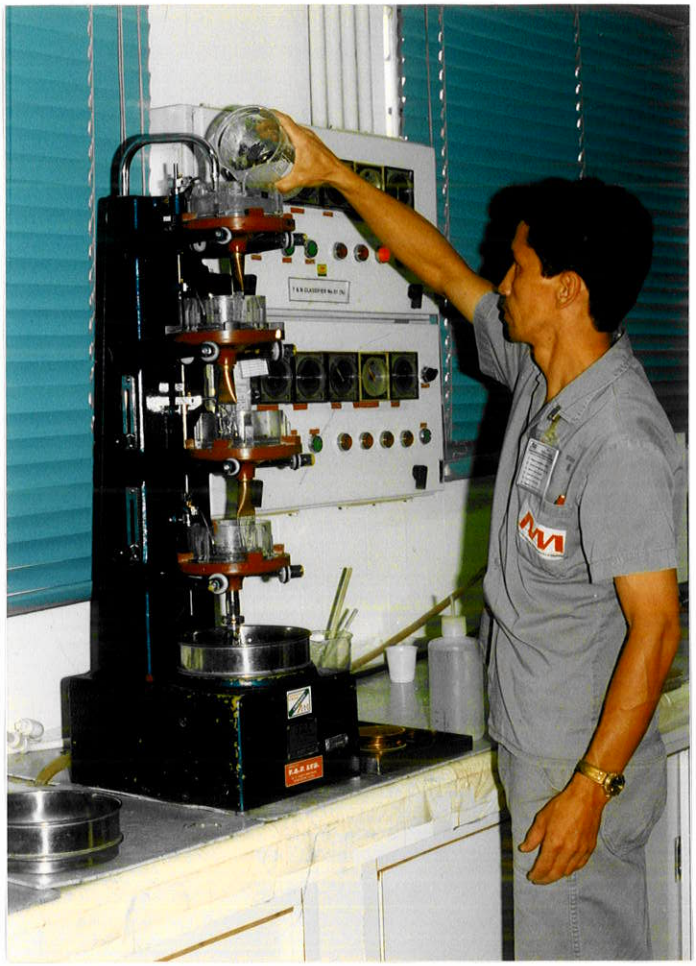


FOTO 13 - Ensaio Turner & Newall utilizado para medida do índice de comprimento das fibras (IC).

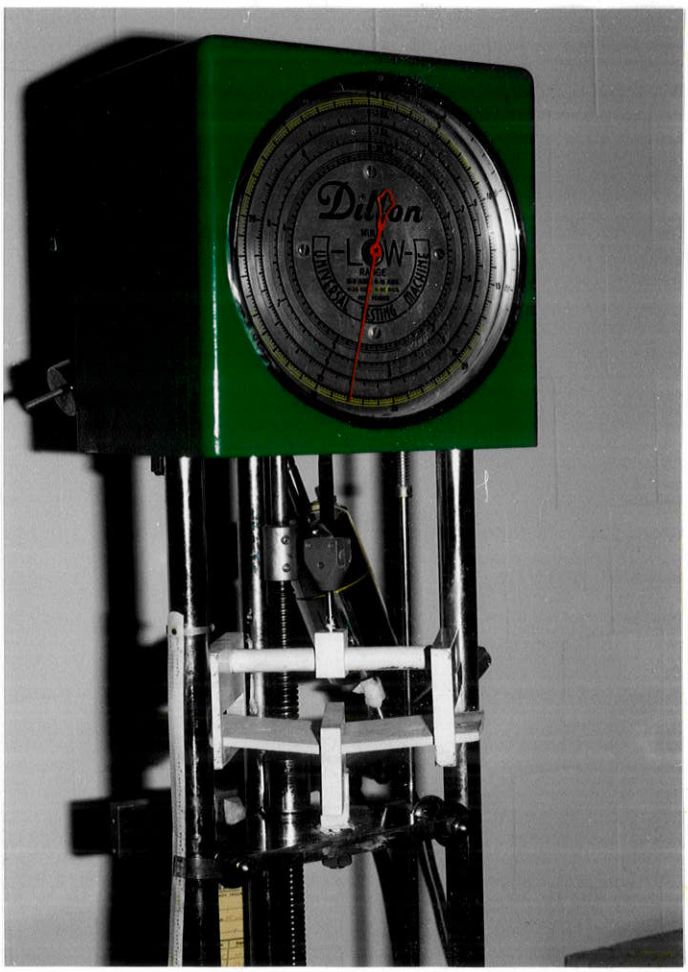


FOTO 14 - Equipamento utilizado no ensaio para determinação da unidade de resistência à flexão (UR).

CAPÍTULO IV
A MINA DE CANA BRAVA

4.1. Geologia

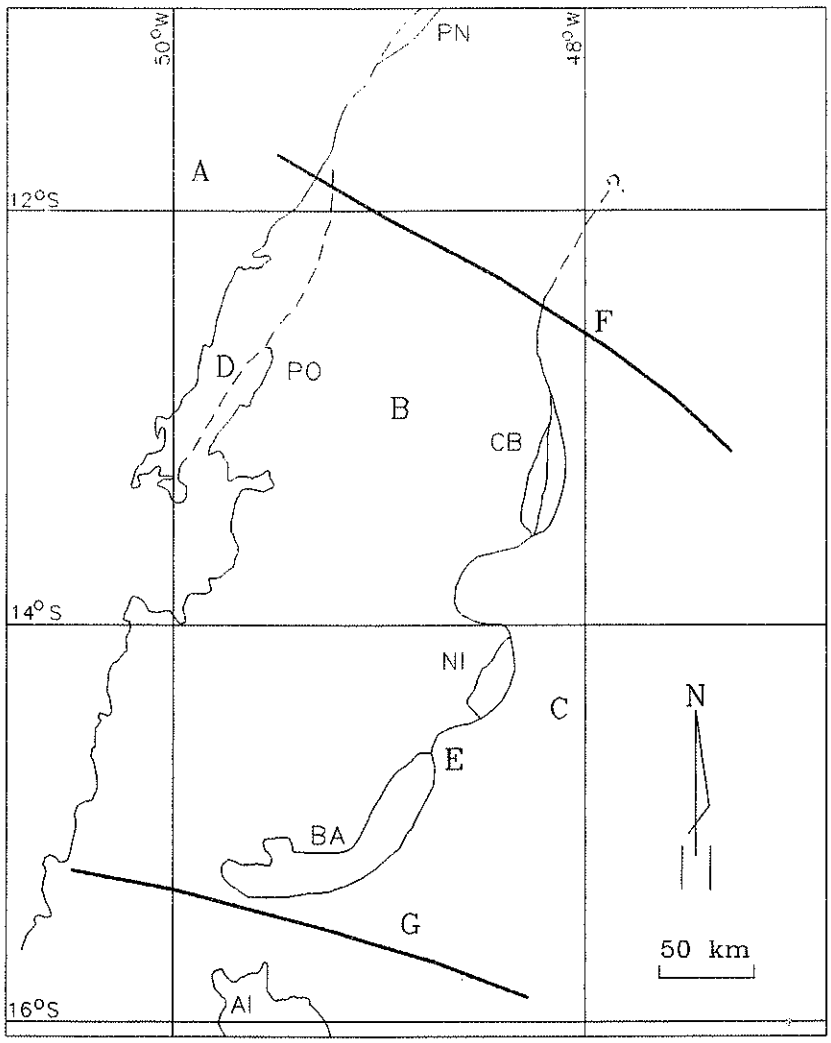
4.1.1. Geologia regional

A Mina de Cana Brava, localizada na porção central-norte do Estado de Goiás, está geologicamente inserida no Maciço de Cana Brava, que é um dos corpos básicos-ultrabásicos do Cinturão Granulítico de Goiás (WERNICK, ALMEIDA, 1979; DANNI, FUCK, LEONARDOS, 1982; MARINI, DARDENNE, FUCK, 1977).

Segundo HASUI, HARALYI (1986), esse cinturão corresponderia à porção da crosta inferior do bloco estrutural Porangatú, exposto após cavalgamento desse bloco sobre o Bloco Araguacema do lado ocidental, e cavalgamento sobre o bloco Brasília do lado oriental (FIGURA 6). Esses cavalgamentos seriam originados por obducção e delaminação da crosta, e a deformação envolvida no processo seria de cisalhamento dúctil de baixo ângulo.

Para HASUI, COSTA, HARALYI (1994), o quadro geológico do pré-Cambriano mais antigo do norte de Goiás/sul de Tocantins inclui três áreas de terrenos granito-greenstone constituídos por gnaisses de médio grau com *greenstone-belts* e alguns corpos nefelina-sieníticos associados, separados por dois cinturões orogênicos, configurando a Estrutura em Quilha Brasil Central, resultante da colisão dos três blocos continentais (Pocangatu, Brasília, Araguacema). Eles são quase paralelos e marcados por sistemas de cavalgamento com vergências opostas, ambos tendo pilhas de lascas do tipo peculiar delgado. Os deslocamentos dos blocos crustais foram primeiramente oblíquos para NW ao longo da sutura Porto Nacional, de direção NNE-SSW, e depois essencialmente frontais ao longo da sutura Ceres, esta com geometria encurvada de direção variando de N-S a norte até WNW-ESE a sul (FIGURA 7). O bloco Porangatú, isolado pelas suturas, acavalou em suas bordas os adjacentes intra-empurrados, Araguacema a noroeste e Brasília a sudeste, e a ele se associam duas faixas metavulcano-sedimentares geradas em bacias intraplaca ou de retroarco. Estas descontinuidades crustais (suturas) acham-se bem marcadas por dados gravimétricos e magnetométricos (HASUI, COSTA, HARALYI, 1994).

Têm sido realizados muitos estudos geológicos na região, porém os modelos geológicos diferem bastante, muitas vezes sendo totalmente opostos. Assim, só para citar um exemplo, DANNI, FUCK, LEONARDOS (1982) sugerem que a formação dos maciços de Niquelândia, Barro Alto e Cana Brava estaria relacionada ao 1° estágio de abertura oceânica,



L E G E N D A

Complexos de alto grau:

PN – Porto Nacional

PO – Porangatú

CB – Cana Brava

NI – Niquelândia

BA – Barro Alto

AL – Anápolis–Itauçú

Blocos:

A – Araguacema

B – Porangatú

C – Brasília

Suturas:

D – Porto Nacional

E – Ceres

Lineamentos:

F – Paranã

G – Pirenópolis

FIGURA 6 - Articulação dos blocos crustais do norte de Goiás (modificado por HASUI, COSTA, HARALYI, 1994).

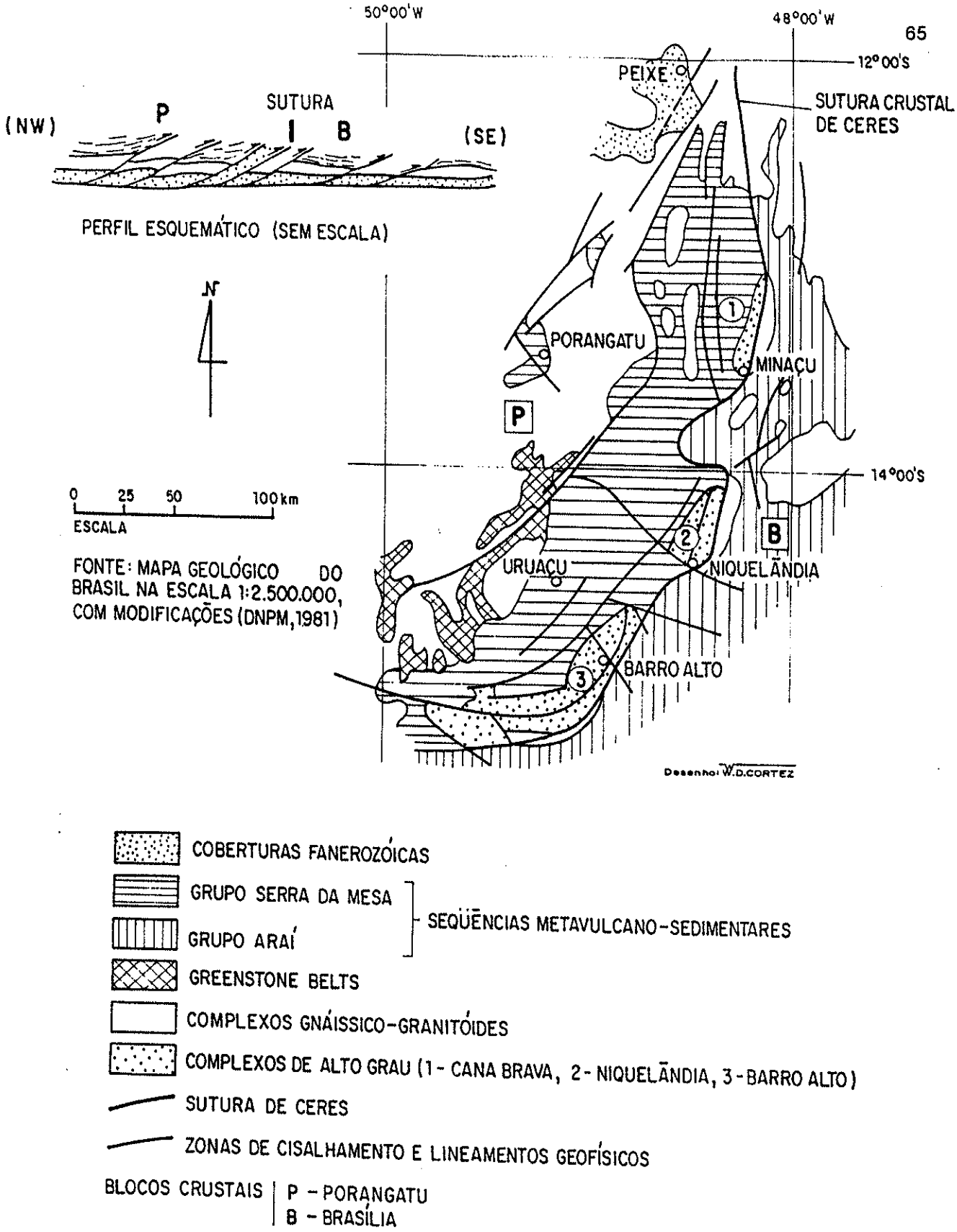


FIGURA 7 - MAPA GEOLÓGICO REGIONAL COM INDICAÇÃO DA SUTURA CRUSTAL DE CERES SEPARANDO OS BLOCOS PORANGATU E BRASÍLIA. (HASUI, MAGALHÃES, MANGOLIN Fº, 1992)

seguida por subducção (consumo) de crosta oceânica sob o bloco continental a oeste, ilustrando a possibilidade de uma evolução do Ciclo de Wilson durante o Proterozóico no Brasil Central.

Com relação à idade do Cinturão Granulítico de Goiás, as controvérsias também são grandes, as datações variando de 500 Ma até 4000 Ma (DANNI, FUCK, LEONARDOS, 1982), as idades mais novas devendo representar rejuvenescimento das rochas durante os ciclos Uruaçuano e Brasiliano.

No presente trabalho foi adotado o modelo proposto por HASUI ; HARALYI (1986), com as mudanças sugeridas por HASUI, COSTA, HARALYI (1994).

Segundo esses autores, as informações sobre as estruturas das unidades que formam o Bloco Porangatú são ainda incipientes. A feição estrutural mais importante é a foliação, que aparece de modo proeminente e resultou de deformação não-coaxial dúctil. Sua postura é de paralelismo às bordas do Bloco Porangatú: na borda noroeste mergulha para sudeste, com ângulos altos a médios, concordantemente com aqueles da borda sudeste do Bloco Araguacema; na borda sudeste, os mergulhos são baixos/médios voltados para o norte na porção sul (ali, mergulhos altos relacionam-se com o desenvolvimento do Lineamento Pirenópolis), tornando-se mais empinados e voltados para oeste na porção leste, e tendendo à verticalização na porção norte. Ao se afastar das bordas, a estruturação de baixo ângulo passa a predominar, sendo as variações de mergulhos devidas a deformações superpostas sobretudo por zonas de transcorrência e crenulações.

As lineações de estiramento mineral mostram na borda oeste direção geral em torno de NW-SE, com os deslocamentos para NW, diagonalmente à direção da foliação (movimentos em rampa oblíqua); na borda sudeste, onde foram observadas, mostram direção em torno de WNW-ESE, com deslocamentos para ESE, essencialmente na transversal à direção da foliação (em rampa frontal) e obliquamente em trechos da borda sinuosa do bloco (HASUI, COSTA, HARALYI, 1994).

Zonas transcorrentes de direções WNW-ESE a EW aparecem especialmente nas regiões dos maciços de Barro Alto e Cana Brava. Correspondem a zonas de rasgamento, afetando a foliação, por vezes com assinaturas magnéticas expressivas.

As principais unidades adjacentes ao Complexo Cana Brava compreendem a Seqüência vulcano-sedimentar de Palmeirópolis, os corpos graníticos de Serra Dourada e da Serra da Mesa e os grupos Serra da Mesa, Araí e Paranoá.

Essas unidades, de acordo com HASUI, HARALYI (1986), estariam localizadas no Bloco Estrutural Porangatú, configurado e cratonizado provavelmente desde o Arqueano. No Proterozóico Inferior teriam se iniciado os processos de cisalhamento dúctil; no Proterozóico Médio teriam acontecido intrusões de granitos variados, e na segunda metade desse período

teriam iniciado processos distensionais, embaciamento e cerragens, com dobramento e metamorfismo das seqüências supracrustais que vieram a se formar. Esses últimos eventos corresponderiam aos ciclos Uruaçuano e Brasiliano.

Segundo HASUI, COSTA, HARALYI (1994), na borda sudeste do bloco Porangatú, as rochas de alto grau afloram em três janelas decaquilométricas, compondo os Complexos Cana Brava, Niquelândia e Barro Alto (FIGURA 6). A origem destes corpos é controvertida (ambiente intraplaca, ofiolitos ou corpos infracrustais acamadados). Parece que a última alternativa é a mais plausível, como corpos intrusivos que se alojaram na crosta inferior, foram alçados a níveis superiores e se encontram atualmente expostos.

O Complexo Máfico-Ultramáfico de Cana Brava

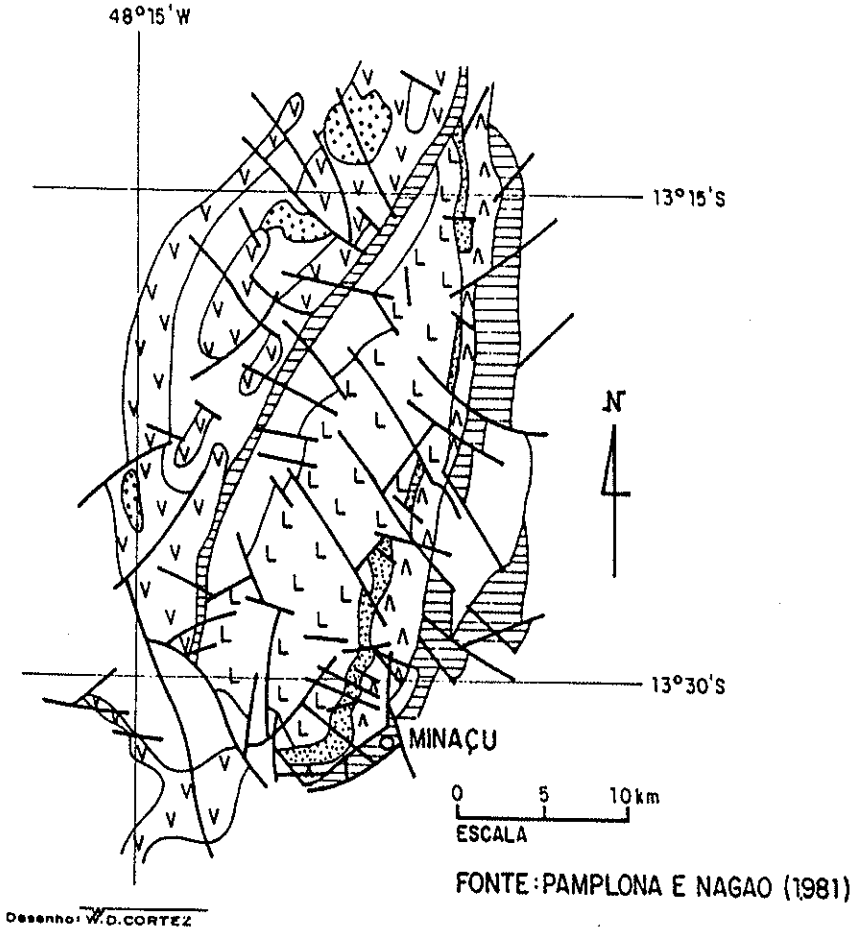
Apresenta-se como um corpo alongado com cerca de 40 km de comprimento e 14km de espessura; possui mergulhos entre 30° e 50° para NW e é constituído, segundo GIRARDI, KURAT (1982), por metagabros, metagabronoritos, metanoritos, anfibolitos, metapiroxenitos e serpentinitos (FIGURA 8).

MARINI, DARDENNE, FUCK (1977), o classificam, quanto à gênese, como um maciço do tipo Alpino, enquanto DANNI, FUCK, LEONARDOS (1982), o classificam como uma faixa móvel granulítica, que segundo ALMEIDA (1979) demarcaria, ao sul de Minas Gerais e ao centro de Goiás, os limites de um antigo cráton arqueano (Cráton do Paramirim). GIRARDI, KURAT (1982) afirmam que o complexo corresponde a um corpo magmático intrusivo diferenciado, recristalizado e soerguido por falhamentos em bloco.

PAMPLONA, NAGAO, (1982) reconhecem, dentro do conjunto básico-ultrabásico de Cana Brava, três unidades litológicas, sendo a basal constituída por rochas metabásicas da fácies epídoto-anfibolito, outra formada por rochas ultrabásicas (serpentinitos e piroxenitos) e finalmente uma unidade constituída por rochas gábricas e gabronoríticas.

CORREIA (1994) define o Complexo de Cana Brava como um corpo ígneo estratiforme, máfico-ultramáfico, anorogênico, originado da cristalização fracionada de magma basáltico original, com caráter toleítico, enriquecido em olivina e pobre em álcalis. Segundo este autor, relações de campo indicariam que a massa magmática original intrudiu as rochas pré-existentes já deformadas e metamorfizadas da Seqüência vulcano-sedimentar de Palmeirópolis.

Segundo CORREIA (*op.cit.*), o Complexo é composto por cinco unidades constituídas por estratos caracterizados por diferentes associações de fases *cumulus* com maior ou menor



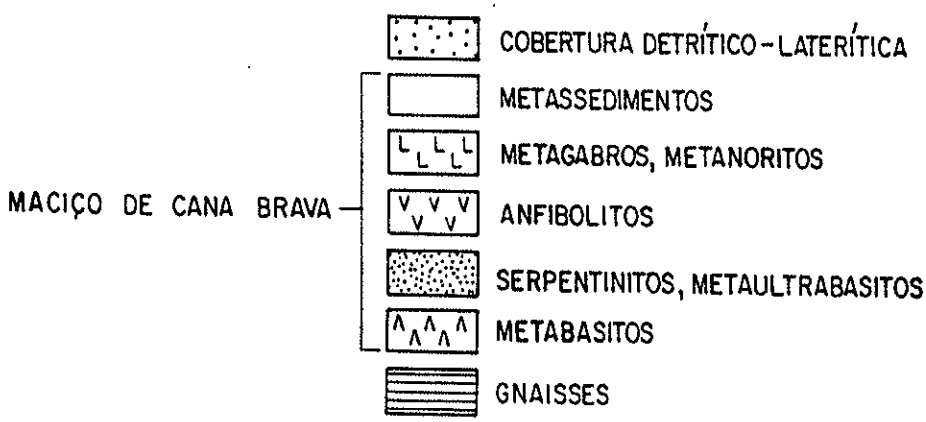


FIGURA 8 - MAPA GEOLÓGICO DO MACIÇO DE CANA BRAVA. (HASUI, MAGALHÃES, MANGOLIN Fº, 1992)

quantidade de material *intercumulus*, cuja transição é marcada pela mudança geralmente abrupta da natureza das fases.

A interpretação defendida por CORREIA (1994) está em desacordo com o modelo tectônico proposto por HASUI, COSTA, HARALYI (1994), e com as feições estruturais observadas na área da Mina, por HASUI; MAGALHÃES (1985), cujo modelo foi adotado na presente pesquisa. O primeiro interpreta o maciço como um corpo ígneo estratiforme, enquanto os dados estruturais e geofísicos, regionais e locais apontam para um processo de cavalgamento de blocos, conforme descrito no ítem anterior.

4.1.2. Geologia e evolução das estruturas da Mina de Cana Brava

Geologia local

A Mina de Cana Brava, constituída por três corpos mineralizados principais, com área total de 14km^2, situa-se na extremidade sudeste do pacote de rochas ultrabásicas, representadas por serpentinitos e piroxenitos, do Complexo básico-ultrabásico de Cana Brava (FIGURA 9).

O cinturão de rochas ultrabásicas, concordante com a estrutura regional, dobrado e falhado, encaixado entre metabasitos na base e metagabros no topo, aflora descontinuamente ao longo dos flancos sudeste e leste da Serra de Cana Brava, com mergulhos de 30° a 50° para NW e W. Seu contato superior com o gabro é gradacional, enquanto o inferior com o metabasito é tectônico.

O corpo ultrabásico tem sua maior expressão e continuidade na borda SE da serra (cerca de 1,5km de largura). Segundo PAMPLONA, NAGAO (1982) é constituído de piroxenitos e serpentinitos com as seguintes características:

Serpentinitos

Apresentam maior expressão na zona da mina, com aproximadamente 1km de largura, e se tornam mais delgados em direção ao norte do maciço.

Sua coloração varia do cinza escuro, próximo ao contato basal, gradando para cinza esverdeado, cinza amarelado e marrom, na região do topo. O serpentinito mineralizado tem cor verde maçã, como característica principal de boa mineralização.

Sua composição essencial é serpentina, associada à clorita, opacos e espinélio. Material reliquiar e pseudomorfos de clinopiroxênio, olivina e ortopiroxênio foram identificados. A origem dessa rocha é provavelmente um peridotito (talvez harzburgito), muitas vezes intensamente serpentinizado.

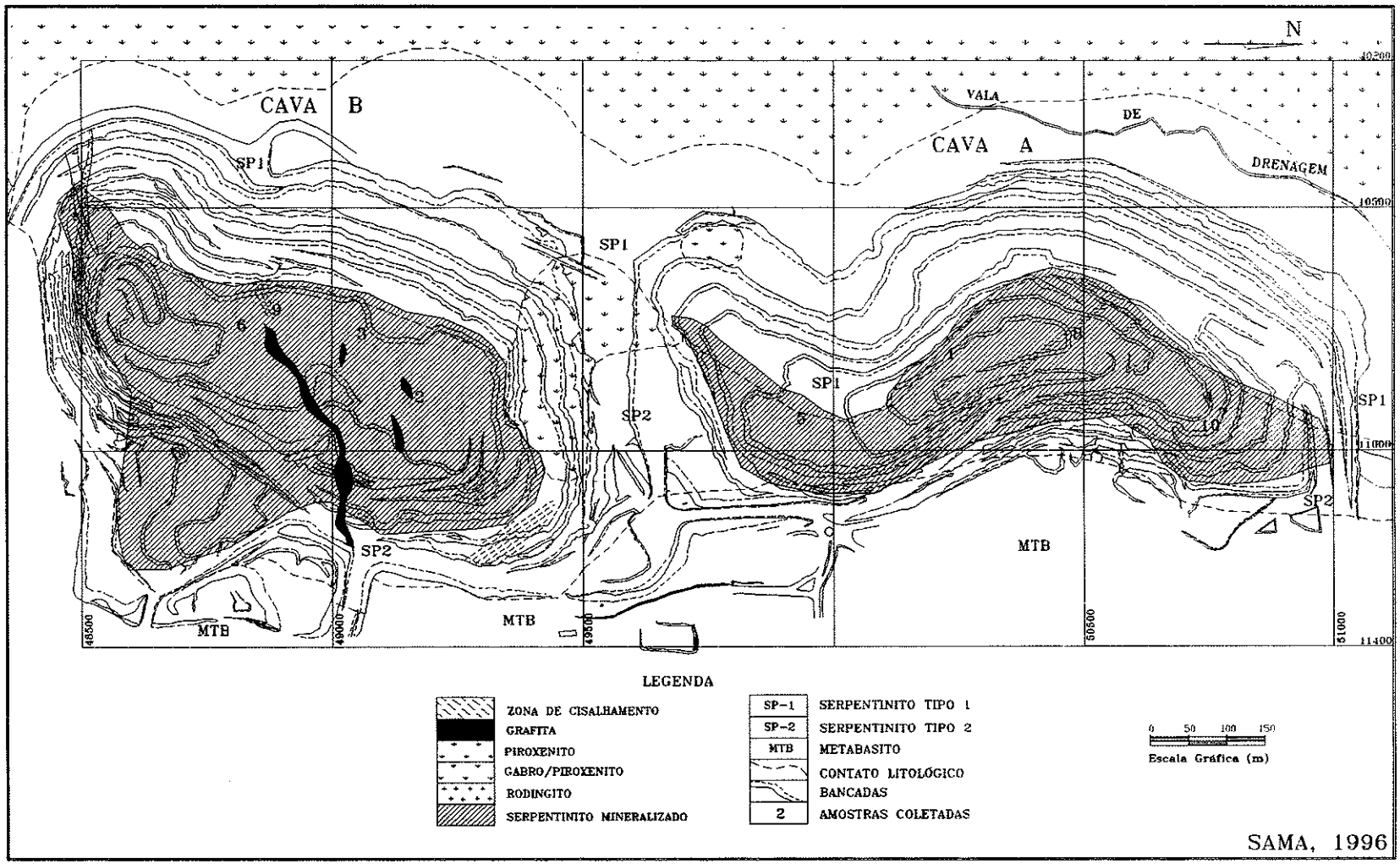


FIGURA 9 – Mapa Geológico da Mina de Cana Brava e de localização das amostras (2ª etapa dos trabalhos)

Os serpentinitos da área da mina estão freqüentemente associados a uma assembléia de minerais calciossilicáticos (formadores dos rodingitos) e minerais carbonáticos (magnesita e dolomita) com desenvolvimento de talco nas zonas de contato e de cisalhamento. Sobrepõem-se aos metabasitos (epídoto-anfibolitos e xistos magnesianos) por contato tectônico, sendo comum o desenvolvimento de uma estrutura planar nos metabasitos, e brechas e cisalhamentos nos serpentinitos. Observam-se ainda, na zona de contato, feições indicativas de eventos metassomáticos posteriores, responsáveis pela formação de talco xistos e veios carbonáticos.

Piroxenitos

Ocorrem associados ao serpentinito e geralmente são constituídos de clino e ortopiroxênios em proporção equivalente. Entretanto, na zona da mina, parece haver um predomínio de clinopiroxênios, que se mostram serpentinizados.

Os contatos entre piroxenitos e serpentinitos são geralmente gradacionais.

A Sama, trabalhando na região desde 1962, delimitou três corpos mineralizados principais, denominados A, B e F, descontínuos em superfície e encaixados na parte basal (A e B) e central (F) do pacote serpentinítico. Dados de testemunhos de sondagem mostraram que os corpos A e B, abaixo da cota 303, constituem um corpo único*.

A faixa mineralizada, de forma grosseiramente tabular, estende-se por cerca de 6300m no sentido N-NE; correspondendo à borda sul do Maciço de Cana Brava. Apresenta espessura de 70 a 120m e mergulho de 30° a 50° para NW-W; a profundidade máxima conhecida para o corpo A é de 260m*; para o corpo B, 250m*; e para o corpo F, 50m, que correspondem aos limites de informação obtidos pelas sondagens executadas. Praticamente toda a faixa mineralizada encontra-se coberta por solo residual, que varia de poucos centímetros a 15 metros.

Em 1985 HASUI, MAGALHÃES diferenciaram os serpentinitos mineralizados em tipo 1 (SP-1) e 2 (SP-2), utilizando, como critério principal, a cor macroscópica das rochas. Assim, as de cor marrom foram denominadas de SP-1 e as de cor verde, de SP-2; rochas espacialmente intermediárias, ou com cores entre os dois extremos foram denominadas de SP-1/2. Foram utilizados como critérios também algumas características morfológicas diferentes, que dizem respeito à espessura, mergulho e estruturas locais, bem como mineralogia e texturas das rochas.

Os corpos mineralizados contêm veios de crisotila distribuídos erraticamente na massa serpentinítica (mineralização do tipo *stockwork* - FOTO 15) ou na forma paralela (tabular -

* Informação verbal do geólogo Normando Queiroga, da Sama (maio/96).

FOTO 16), em menor freqüência. A fibra é geralmente do tipo *cross*, (raramente do tipo *slip*), flexível, não talcosa e medianamente sedosa; normalmente com uma ou mais partições (fraturamento da fibra causado por movimento tectônico) em cujos planos ocorrem grãos de magnetita. O comprimento real da fibra varia de 1 a 20mm (mas em média, apresenta comprimento de 6mm).

Aparentemente há um aumento de magnetita com o aumento do grau de serpentinização, apesar do conteúdo em magnetita ser relativamente baixo, tanto nos serpentinitos como nos veios de crisotila.

O serpentinito mineralizado, de coloração característica verde-maçã, apresenta um grau de serpentinização bastante elevado, com raros cristais reliquiares de olivina e piroxênio. O processo de serpentinização deve ter ocorrido em mais de um período, o último estando ligado diretamente à fase de mineralização.

As principais observações geológicas foram realizadas nos corpos A e B, e por estarem em fase de lavra, permitiram a obtenção de maior número de informações sobre as condições petrográficas, estruturais, tectônicas e ainda sobre a gênese da mineralização.

A descrição geométrica dos corpos mineralizados é apresentada a seguir:

CORPO A

Exibe forma de um "S" alongado, que se estende por 1400m no sentido N-S, com largura média de 590m, 70 a 110m de espessura e mergulho de 40° a 55° para W. Ao sul é limitado por uma zona de cisalhamento, que intercepta a continuidade da mineralização e, ao norte, em direção à zona F, o corpo se estreita. A profundidade final da mineralização é desconhecida, mas as sondagens rotativas têm mostrado continuidade até 260m*.

CORPO B

É o corpo de minério melhor estudado, exibe forma grosseiramente tabular, com 1110m de comprimento, largura média de 800m, 70 a 100m de espessura, orientado na direção N-S, com mergulho variando de 30° a 45° para W. A profundidade também é desconhecida, e sondagens rotativas indicaram até 250m de mineralização*.

O limite norte é definido por uma zona de cisalhamento (a mesma do corpo A), truncando a continuidade norte da mineralização em superfície, enquanto que no limite sul o corpo sofre uma inflexão para SW, permitindo a continuidade física para a zona C (HASUI; MAGALHÃES, 1985).

---

* Informação verbal do geólogo Normando Queiroga, da Sama (maio/96).

FOTO 15 - Aspecto de uma mineralização do tipo *stockwork* no domínio de SP-1, com "paredes" de SP-2.

FOTO 16 - Aspecto geral de uma frente com domínio de SP-2, intensamente fraturado. A mineralização é do tipo tabular (A 348NW).

CORPO F

Este corpo, bem mais estreito que os outros, exibe forma grosseiramente tabular, com 2300m de comprimento por 60m de largura média; é interceptado por falhas, e sua profundidade é desconhecida.

Ao norte, provavelmente o corpo mineralizado apresenta-se fechado, enquanto que para o sul seu limite não está definido, podendo estar interligado à zona A (HASUI; MAGALHÃES, 1985). Encontra-se atualmente em fase de definição para lavra*.

A reserva do minério (corpos A, B e F) é de 305.000.000 de toneladas, dos quais 213.250.000 t são lavráveis, com um teor aproximado de 5%*.

Modelo estrutural

Em HASUI ; MAGALHÃES (1985) é proposto um modelo estrutural e evolutivo da Mina de Cana Brava a partir da definição da geometria das estruturas geológicas e das etapas de formação das mesmas. Este, com ligeiras modificações pode ser assim configurado:

a) um primeiro evento termotectônico (E_1) relacionando-se com o cavalgamento do Bloco Porangatú sobre o Bloco Brasília, gera, na área, as foliações S_1, bem como dobras intrafoliais e em bainha. As transformações metamórficas de rochas ultrabásicas (talvez harzburgito) levariam à formação dos serpentinitos tipo 1;
b) num segundo evento termo-tectônico (E_2) teriam ocorrido deslocamentos dextrais ao longo de zonas de cisalhamento de alto ângulo com direção ENE, induzindo inflexões em S_1, falhamentos e fraturamentos, serpentinização (serpentinitos tipo 2), mineralização de amianto (fibras *cross* e *slip*), dobras locais, crenulação e formação de *kinks*;

Em relação ao evento E_1, os seguintes aspectos podem ser realçados:

a) a deformação ocorrida foi do tipo progressivo;
b) nesse evento, a geometria de S_1 configurava uma ampla sinforme, bastante espessa apicalmente;
c) o deslocamento tectônico no evento E_1 é de direção ESE-WNW, definida pelas dobras intrafoliais e em bainha.

Em relação ao evento E_2, os seguintes aspectos podem ser realçados:

a) a deformação ocorrida foi também progressiva;

* Informação verbal do geólogo Normando Queiroga, da Sama (maio/96).

b) a sinforme formada em E_1 sofreu grandes inflexões em S, atestando a deformação plástica do maciço;
c) as falhas e juntas são as feições estruturais proeminentes;
d) nesse evento, fluidos remobilizados, percolando descontinuidades e fraturas de distensão abertas, devido ao estiramento durante a deformação progressiva, teriam gerado alterações metassomáticas que deram origem aos serpentinitos tipo 2 e aos veios de amianto em fibras *cross*;
e) após essa serpentinização, juntas e posteriormente falhas teriam sido geradas, crenulando as fibras *cross*;
f) os eixos distensivos e o maciço como um todo (por se achar ainda plástico), sofreram rotação; isso explica a variabilidade das direções de cristalização da mineralização;
g) todas as falhas apresentam fibras do tipo *slip*, indicando que foram também acompanhadas de alguma remobilização;
h) nesse evento E_2 se desenvolveram também crenulações, *kinks* e dobras locais.

Os principais fatores que controlaram a formação de depósitos econômicos de amianto crisotila na Mina de Cana Brava foram provavelmente a rocha-mãe, as rochas hospedeiras apropriadas, a adequada formação de soluções serpentínicas, apropriado fraturamento e controle estrutural.

No que diz respeito à mineralização, pode-se realçar os seguintes aspectos:

a) uma remobilização discreta ocorreu no início do evento E_2, gerando as fibras *slip* associadas aos planos de falha. No instante em que o estiramento propiciou a abertura de descontinuidades é que a percolação foi intensiva, induzindo a formação do serpentinito tipo 2 (SP-2) e dos veios com fibra *cross*; no entanto, a geração de fibras *slip* continuou ocorrendo durante todo o processo;
b) essa remobilização se deu dentro do serpentinito tipo 1 (SP-1), gerando o tipo 2 (SP-2), e foi mais intensa onde essas rochas têm maior espessura, ou seja, na zona apical da sinforme;
c) as zonas mineralizadas tendem a ocorrer na parte inferior dos serpentinitos, próximo ao contato com os metabasitos, provavelmente em virtude dos deslocamentos diferenciais que essas litologias distintas propiciaram;
d) a geometria geral dos corpos de minério obedece o quadro deformativo do evento E_2, isto é, são alongados em forma de S, e os corpos não se estendem para as zonas de cisalhamento NE, provavelmente por serem estas zonas trechos mais deformados;

e) embora os veios de crisotila não tenham relação direta com a geometria das foliações S_1 (são discordantes em relação a S_1, em termos de direção e mergulho), existe uma concordância a nível geral entre a geometria dos corpos de minério e S_1;

f) a formação dos veios com fibra *cross* provavelmente terminou antes do fim do evento E_2, pois elas estão crenuladas. Esta crenulação induz à partição das fibras, as quais se desmembram em segmentos com facilidade;

g) a orientação das fibras reflete o eixo *X* de deformação;

h) a mineralização é possivelmente do Proterozóico Inferior (Transamazônico), vinculando-se com o evento de cisalhamento de alto ângulo.

As FOTOS 17 e 18 ilustram aspectos da mineralização com fibras longas (FOTO 17) e curtas (FOTO 18).

4.2. Processo de beneficiamento do amianto crisotila

O beneficiamento do minério de amianto crisotila na Mina de Cana Brava consiste, basicamente, na liberação da fibra contida na rocha em forma de veio, através de sucessivos estágios de britagem, peneiramento e aspiração, com posteriores estágios de limpeza e classificação. O processo utiliza exclusivamente métodos físicos, a seco, sem aditivos, em todos os estágios de tratamento. A FIGURA 10 apresenta o diagrama dos métodos utilizados, no processo de beneficiamento.

A seguir são caracterizados, de forma sintética, os processos tecnológicos envolvidos (ALMEIDA, FORNASARI Fº, BRAGA, 1992 e CASSOLA, 1993a*):

a) britagem primária: um britador do tipo giratório recebe os blocos de minério bruto provenientes das cavas A e B, com dimensão de até 120 cm, reduzindo-os a um tamanho máximo médio de aproximadamente 30 cm, seguindo diretamente para a britagem secundária;

b) britagem secundária: o minério chega à unidade de britagem secundária através de transportadores de correia. O produto do britador primário é peneirado em peneira vibratória, separando uma fração fina, que segue diretamente para a secagem, e uma fração grossa, que é submetida à rebritagem, seguindo então para a unidade de concentração.

* Informações atualizadas verbalmente pelo geólogo Renato Pamplona, da Sama (maio 1996)

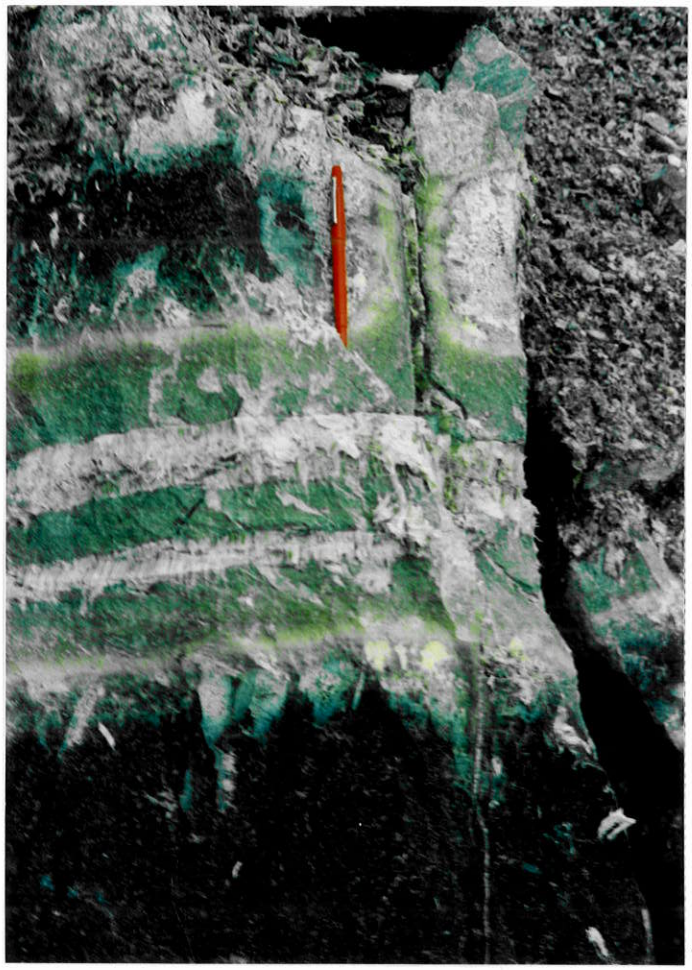


FOTO 17 - Detalhe da mineralização com fibras longas. Domínio de SP-1, com "paredes" de SP-2 (B 318 W).

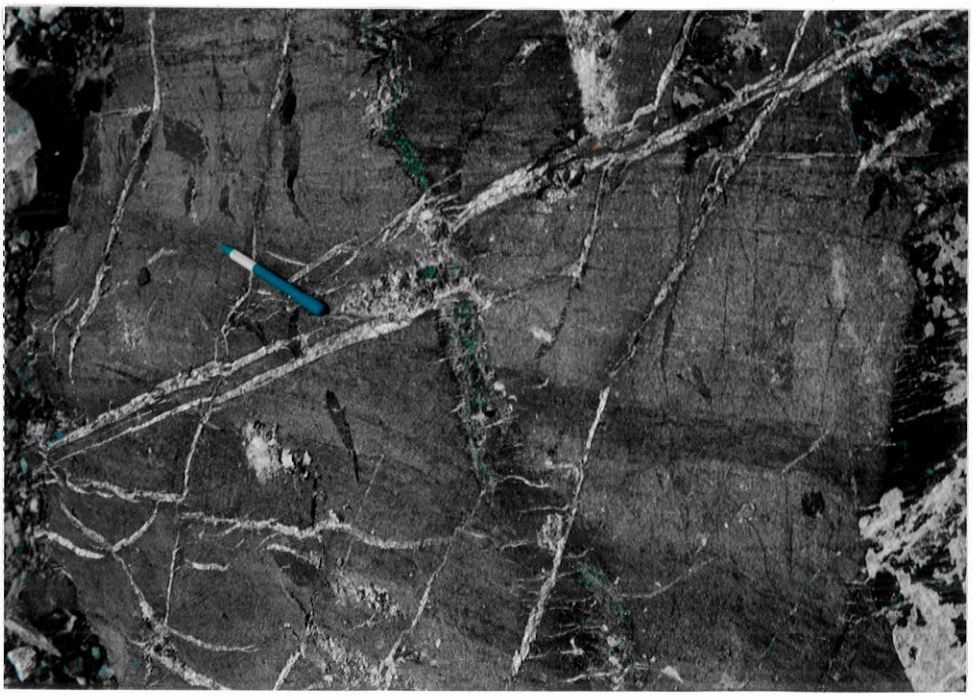


FOTO 18 - Detalhe da mineralização com fibras curtas. Domínio de SP-1 (B 318 SW).

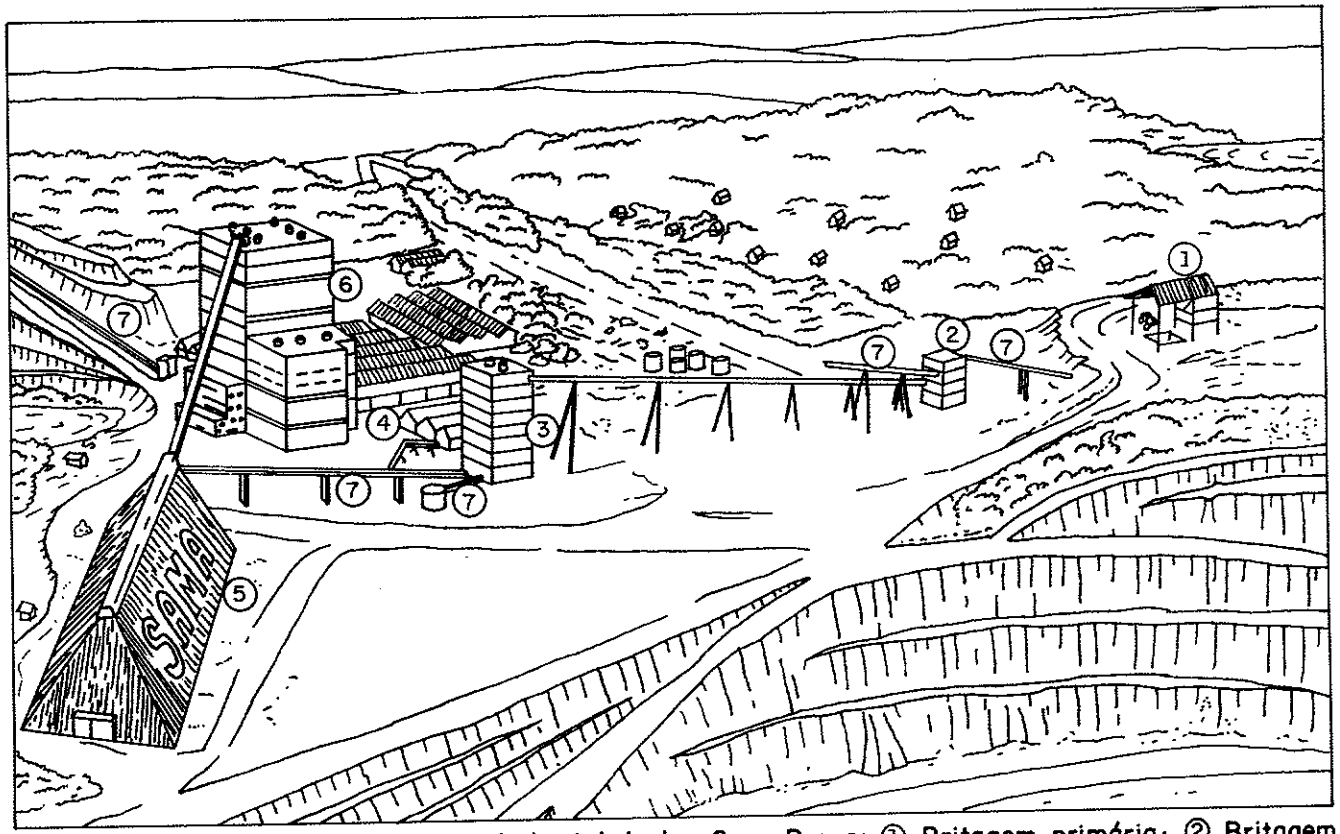


FIGURA 10 - Croqui do complexo industrial de Cana Brava: ① Britagem primária; ② Britagem secundária: ③ Concentração; 4 Secagem; ⑤ Silo de minério seco; ⑥ Usina de tratamento; ⑦ Transportadores de correia (ALMEIDA, FORNASARI Fº, BRAGA, 1992)*

*Modificado pelo geólogo Renato Pamplona, da Sama (maio, 1996)

a) concentração: o minério britado em estágio secundário chega por transportadores de correia à concentração com uma granulometria inferior a 12cm, e sofre três estágios de peneiramento, com peneiras vibratórias e giratórias, intercalados com dois estágios de britagem. No final do 3º estágio de peneiramento, os finos são submetidos a dois estágios de peneiramento, em peneiras giratórias, com aspiração e intercalações com impactadores verticais. A concentração tem dois objetivos básicos: 1º) produzir minério concentrado mais rico em fibra, descartando as frações grossa e/ou média das últimas peneiras vibratórias, bem como as frações fina e grossa das peneiras giratórias finais (o descarte total corresponde a 35-45%, do minério alimentado na concentração); 2º) evitar a perda de fibra no rejeito grosso;

b) secagem: a fração de minério oriunda dos finos da peneira secundária, segue para o setor de secagem. Nos fornos rotativos horizontais a umidade é reduzida a 3% aproximadamente. A umidade média do minério na entrada é de 10%, e no período chuvoso, 15%. A operação de secagem faz-se necessária principalmente na época de chuvas, pois a umidade das fibras acima de 4% dificulta a aspiração das fibras. O material submetido à secagem nos fornos corresponde ao material mais úmido que o desviado proveniente da concentração, e ambos são conduzidos para uma unidade de estocagem em silo coberto. Os objetivos da secagem são: 1º) permitir boa aspiração das fibras desprovidas de pedriscos; 2º) reduzir o pó nos estágios de peneiramento (no processo de secagem são tomadas precauções para evitar a deterioração térmica pela perda de OH^- das fibras e para evitar sua deterioração mecânica);

c) ensilagem do minério concentrado seco: após a secagem, o minério é estocado em silo coberto, e sua retomada se dá através de alimentadores vibratórios montados sobre transportadores de correia. Os objetivos da ensilagem são: manter uma reserva estratégica de minério concentrado seco e coberto; 2º) permitir a redução da umidade do minério de até 2% por evaporação na época seca; 3º) promover a homogeneização do minério concentrado; 4º) permitir uma alimentação constante às usinas de tratamento;

d) usina de tratamento: o minério concentrado seco chega às usinas por transportadores de correia, alimentando peneiras giratórias, providas de rolos de aspiração. As peneiras possuem duas telas diferentes, a fração leve (aspirada) segue para o circuito de fibras longas; a fração média segue para o circuito de fibras médias gerando fibras com baixo teor de finos (<0,074 mm), e a fração pesada, a qual contém fibra "presa", segue para os impactadores; os finos das

peneiras seguem para o circuito de tratamento de minério curto. No final da concentração do minério a fração não aspirada segue para o rejeito fino.

Cada circuito possui finalidades específicas, quais sejam:

- circuito de minério: tem a função de recuperar as fibras livres por aspiração em peneiras giratórias e liberar as fibras presas à rocha, por meio de estágios de britagens em impactadores, sempre intercalados por peneiramento e aspiração. A cada estágio de impactação, as fibras livres são aspiradas e seguem para o circuito das fibras; a fração fina segue para o circuito de tratamento de minério curto e a não aspirada, para o rejeito.
- circuito da fibra: promove a limpeza do material aspirado do circuito de minério em peneiras giratórias e rotativas para eliminação dos finos (<0,074 mm), e em separadores pneumáticos para eliminação de pedriscos;
- circuito de retorno: tem a finalidade de recuperar as fibras, em forma de feixes, contidas na fração pesada dos separadores pneumáticos;
- circuito de tratamento de minério de fibras curtas: visa recuperar as fibras curtas, para a produção de fibras especiais dos grupos 6 e 7;
- circuito de homogeneização de fibras: constitui a fase final do beneficiamento, buscando obter um produto homogêneo em silos de homogeneização;
- circuito de embalagem e expedição: corresponde ao acondicionamento do produto em embalagens, através do sistema de ensacamento, paletização e cobertura com material plástico termo-retrátil.

Uma característica importante das instalações de beneficiamento de amianto é a utilização de grandes volumes de ar no processo.

O controle ambiental nas correias que antecedem a secagem e nos transportadores de rejeitos é feito através de umidificação do material e aspiração em pontos de transferência de equipamentos. O número máximo de fibras permissível no ambiente do tratamento é de 0,8 fibras/cm^3.

A FOTO 19 apresenta uma vista geral do complexo mínero-industrial da Mina de Cana Brava.

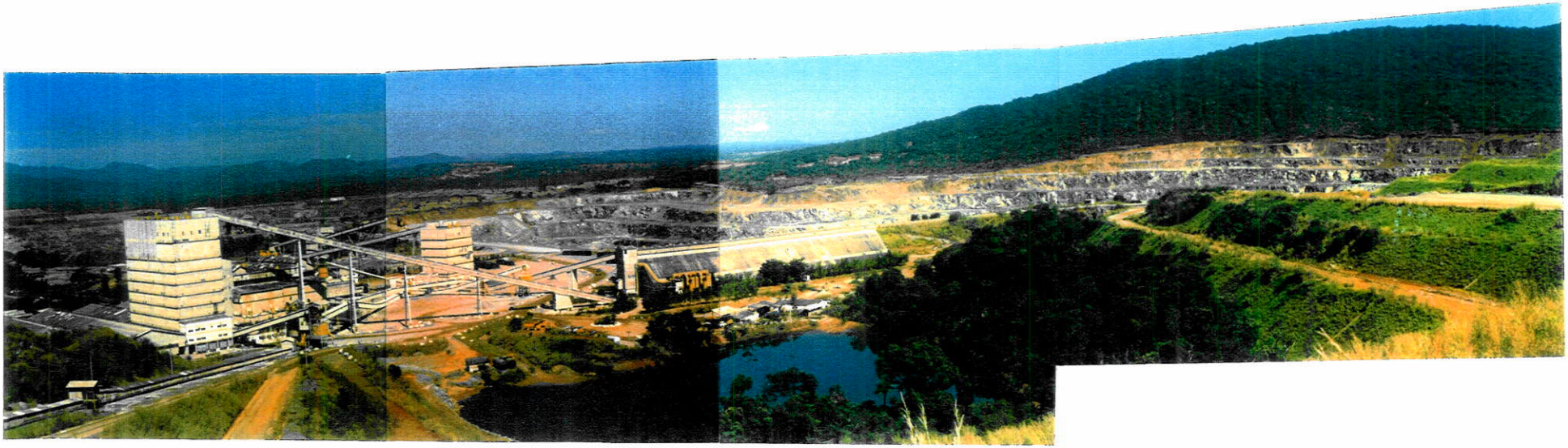


FOTO 19 - Vista do complexo mínero-industrial da Mina de Cana Brava.

CAPÍTULO V
CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO - RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios e análises efetuados nas duas etapas de trabalho.

A localização das amostras estudadas na 2ª etapa encontra-se na FIGURA 9.

5.1. Caracterização petrográfica das rochas da Mina de Cana Brava

A caracterização dos serpentinitos hospedeiros das fibras de amianto, bem como das rochas não-serpentínicas baseou-se em caracterização macroscópica, análises petrográficas em seções delgadas e polidas, em análises termodiferenciais e termogravimétricas e em estudos por difração de raios X; contou também com importante contribuição de estudos por microscopia eletrônica de varredura e de estudos petroquímicos.

5.1.1. Mineralogia e petrografia dos serpentinitos

As TABELAS 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam os resultados das análises petrográficas dos serpentinitos. A caracterização e discriminação dos serpentinitos (SP-1, SP-2, SP-1/2) é apresentada após a caracterização dos minerais, neste capítulo.

Estão descritas a seguir as propriedades ópticas e aspectos microscópicos dos principais minerais encontrados nesses serpentinitos:

Serpentinas

São os minerais formadores dos serpentinitos, comparecendo geralmente em porcentagens superiores a 90%. Em virtude de suas propriedades ópticas, foram classificadas em:

Crisotila Z (γ): biaxial (+); 2V=20-70°; plano dos eixos ópticos paralelo à direção das fibras; Bissetriz aguda=n_z=eixo das fibras. Elongação positiva; n_x= 1,532 - 1,552; n_z= 1,545 - 1,561; n_z-n_x= 0,013 - 0,009.

Por vezes, ocorrendo desidratação ou incorporação de Fe, os índices de refração e a birrefringência apresentam valores maiores.

A crisotila Z constitui as fibras de comprimento milimétrico a centimétrico que comumente preenchem fraturas. Nos serpentinitos foi ainda reconhecida em porfiroblastos regulares a irregulares, em pseudomorfos monocristalinos (a partir de

TABELA 4 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 1 (SP-1) **(1ª etapa dos trabalhos).**

DESIGNAÇÃO	MINERALOGIA	DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
B-308 Sul (contato com SP-2)	Olivina Piroxênio (diopsídio) Serpentinas Opacos: magnetita, "picotita" (ou cromita), hematita	Textura "*mesh*". A rocha principal é constituída por manchas, faixas e lentes de dunito ou peridotito não totalmente serpentinizado. Mais de 50% da rocha é constituída de ilhotas de olivina imersas principalmente em crisotila Z, com quantidade maior de clinopiroxênio. Em faixas intercaladas ocorre crisotila Z decussada. Restos de clinopiroxênio, em cristais originalmente maiores, também se concentram em faixas. Picotita ou cromita (rara) e magnetita (comum) espalham-se uniformemente pela rocha, rodeados por possível clorita. Pigmentação e tintura por óxidos de ferro é comum. Faixa transversal na lâmina contém fragmentos girados de serpentina indeterminada, turva (com extinção oblíqua) associados a clinopiroxênio em cristais maiores e parcialmente serpentinizados em "*mesh*". Vênulas com crisotila Z (transversal) se associam a hematita e podem conter núcleos com outra serpentina (antigorita e/ou lizardita). A rocha original parece ter sido um peridotito (wherlito) atualmente serpentinizado.
CB 965 (98.70)	Olivina Serpentina Clorita Serpofita Opacos:magnetita, hematita	Textura "*mesh*". Olivina preservada em pequenos restos. "*Mesh*" formado por crisotila (Z e X), antigorita e/ou lizardita. Pigmentação e tintura fornecidas principalmente pela hematita a partir de cristais de magnetita. Alguns tipos de serpentina, em fitas de corpos "*mesh*" são mais pigmentados. Magnetita com corpos de clorita está pouco alterada em hematita. Vênulas finas contendo "serpofita" (+ crisotila Z?) aparecem em faixas lixiviadas de seus óxidos de ferro.
CB 967 (61.10m)	Olivina Enstatita Serpentinas "Picotita" (ou cromita) Carbonato	Textura "*mesh*" deformada com muitos restos de olivina. Originalmente a olivina deveria compor mais que 80% da rocha em cristais medindo 0,5 a 3,0 mm. Agora só é observada em ilhotas rodeadas de possíveis crisotila Z, outras serpentinas e hidromagnesita (rara). Bastante pigmentação e tinta de óxidos de ferro, ausente em veios e zonas irregulares. Outros minerais primários: picotita vermelho pardo com alguma magnetita periférica: enstatita, menos alterada em cristais de aproximadamente 1 mm. Vênulas são preenchidas por serpentina não identificada e carbonato.

continua

continuação

DESIGNAÇÃO	MINERALOGIA	DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
CB 971 (88.20m)	Serpentinas Olivina Opacos: magnetita Clorita	Textura "*mesh*" mal definida. Poucos núcleos de olivina. Nos corpos "*mesh*": fitas (amareladas sem pigmentação e tinta) e núcleos de palhetas (amarelo-claro a incolor) parecem ser antigorita e/ou lizardita; manchas irregulares porfiroblásticas e vênulas de crisotila Z incolor. Magnetita tem coroas de possível clorita azul anômala.
CB 973 (28m)	Serpentinas Olivina Opacos: magnetita, hematita Clorita	Textura "*mesh*" obliterada por deformação e recristalização. Massa principal com antigorita e/ou lizardita nematoblástica em placas maiores e mais límpidas que as faixas olivínicas diagonais. Abundante olivina acha-se segregada em lentes. Magnetita hematitizada apresenta coroas cloríticas e por vezes mineral não identificado também em grãos irregulares.
CB 985 (56.60m)	Serpentinas Opacos: magnetita, hematita	Textura nematoblástica. Fitas de antigorita e/ou lizardita com bastante pigmentação de magnetita-hematita: poucos corpos maiores de magnetita-hematita tingem levemente os arredores, em amarelo.
CB 994 (66.70m)	Serpentinas Olivina Opacos: magnetita, "picotita" (ou cromita) Carbonato	Textura "*mesh*" deformada a nematoblástica. Fitas de crisotila X com alguns núcleos de olivina ou agregados de possível antigorita e/ou lizardita amarela. Cristais esparsos de espinélio picotita (ou cromita) estão parcial a totalmente opacificados (magnetita?) e com coroas cloríticas. Pigmentação esparsa tinge levemente os arredores. Vênulas com crisotila Z, magnetita, hematita e carbonato em granulações e gerações diferentes.
CB 1000 (33.20m)	Serpentinas Opacos: magnetita, picotita Clorita	Textura decussada ou "*mesh*", deformada (sem olivina). Abundante antigorita/lizardita com cores variáveis e tingimento amarelo também variável. Corpos de magnetita (alguns com picotita interna) têm coroas de clorita. Pigmentação hematítica abundante mas o tingimento é parcial. Vênulas e corpos irregulares de crisotila Z.

continua

continuação

DESIGNAÇÃO	MINERALOGIA	DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
CB 1001 (98.80m)	Serpentinas Olivina Opacos: magnetita, "picotita" (ou cromita) Clorita	Rocha bandada. A estruturação é fornecida pelo bandamento e orientação de opacos e é afetada por inúmeras vênulas ou fraturas de espessura submilimétrica a milimétrica plano-axiais. Arcabouço de crisotila X, estrutura "*mesh*" com rara olivina reliquiar. Fitas de crisotila X englobam núcleos límpidos de serpentina quase isótropa (possível serpofita), por vezes verdes. Mancha mais oxidada com óxidos de Fe, pigmentação e tinta Banda rica em espínelídeo pardo-escuro (picotita ou cromita). Banda B: arcabouço fortemente pigmentado em núcleos de corpos "*mesh*". Clorita azul anômalo é rara e ocorre esparsa ou próxima de magnetita ou espinélio. Vênulas longitudinais e transversais de diversas granulações e idades concentram-se na banda B: contém crisotila Z e serpentina e/ou clorita finíssima a vítrea (amorfa) ("serpofita"). Carbonato é raro.
CB 1009 (B258m)	Serpentinas Olivina Opacos: (magnetita?)	Estrutura "*mesh*", com crisotila X (0,2 - 1,0 mm). Corpos de olivina (crisólita), com 0,5 - 1,2 mm, formavam originalmente mais que 95% da rocha (dunito) conservando-se agora em ilhotas e ocupando cerca de 40% do volume da rocha. Opacos primários (magnetita?), parcialmente hematitizados pigmentam a rocha ao seu redor, tingindo-a de amarelo. Vênulas de crisotila Z e opacos hematitizados. Trata-se de dunito serpentinizado.
CB 1009 (187.50m)	Serpentinas Olivina Opacos: magnetita, hematita	Estrutura "*mesh*" deformada contém aproximadamente 20-30% de restos olivínicos, cujos cristais originalmente mediam 1 - 3 mm. Fitas de crisotila X envolvem antigorita e/ou lizardita. Crisotila Z acha-se em vênulas e corpos irregulares maiores; faixas paralelas não possuem olivina, só antigorita e/ou lizardita e crisotila X. Há faixas olivínicas intercaladas com bastante Fe: magnetita (+hematita). Não há pigmentação, mas tintura. Trata-se de dunito serpentinizado.

Nota: Legenda da designação das amostras: A e B 308: corpo de minério e bancada
CB 965: nº de testemunho de sondagem

TABELA 5 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 2 (SP-2) **(1ª etapa dos trabalhos).**

DESIGNAÇÃO	MINERALOGIA	DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
B-308 S (Porção rica)	Serpentinas Magnesita Hidromagnesita Opacos: magnetita	Textura "*mesh*" mal definida. Bordas de corpos "*mesh*" com crisotila Z e núcleos com antigorita e/ou lizardita microcristalina. Hidromagnesita ocorre na forma de pequenos cristais incolores espalhados. Vênula está preenchida por serpentina (variedade indeterminada), verde amarela de alto índice. Magnetita não-oxidada ocorre esparsamente.
B-318 (Centro-leste)	Serpentinas Opacos: magnetita	Textura "*mesh*" vestigial (linhas de magnetita delimitam polígonos). Nos corpos "*mesh*" aparentemente só ocorre crisotila Z, em fibras divergentes ou intercruzadas. Há poucos corpos pequenos de antigorita e/ou lizardita de granulação fina, amarelada e turva. Magnetita não-oxidada ocorre esparsamente, geralmente envolta por serpentina amarelada.
B-318 WNW (187.50) minério curto-frente da ilha	Serpentinas Opacos: magnetita "picotita" (ou cromita) Carbonato Hidromagnesita	Rocha muito semelhante à B-318 (centro-leste). Textura "*mesh*" vestigial. Corpos "*mesh*" limitados por pontos de magnetita e preenchidos predominantemente por crisotila Z, por vezes em fibras divergentes. Há concentrações de possíveis antigorita e/ou lizardita e/ou clorita, associadas ou não à hidromagnesita. Cristais maiores de magnetita podem ter núcleos de cromita ou espinélio vermelho-escuros; não está oxidada. Manchas carbonáticas são esparsamente observadas.

continua

continuação

DESIGNAÇÃO	MINERALOGIA	DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
B-328 N	Serpentinas Opacos: magnetita Titanita	Incipiente estruturação é fornecida pela isorientação de cristais de magnetita. Textura "*mesh*" vestigial (linhas de magnetita fina periférica). Preenchimento de corpos "*mesh*" com crisotila Z, principalmente (com pouca antigorita e/ou lizardita, fina). Esparsa magnetita não oxidada; localmente, observa-se titanita Vênula centimétrica preenchida por crisotila Z e pouca magnetita levemente oxidada.
B 328 NNE (Lapa)	Serpentinas Magnetita Carbonato Clorita magnesiana + argilominerais.	Textura "*mesh*" vestigial denotada apenas pelas linhas periféricas de magnetita fina. Há total substituição por crisotila Z e recristalização em feixes, não respeitando, freqüentemente, antigos limites de corpos "*mesh*". Resíduos de material "sujo" (clorita magnesiana ou brucita e argilominerais) não são raros no interior de corpos "*mesh*" e de magnetita. Magnetita não-oxidada e carbonato porfiroblástico ocorre esparsamente. Local pigmentação da matriz se deve ao material "sujo". Vênulas estão preenchidas por crisotila Z, mas ocorre, por vezes, concentração externa de carbonato.
A-348 NNW (Porção rica zona de cisalhamento)	Serpentinas Opacos: magnetita, hematita	Textura orientada (milonítica). Restos irregulares de crisotila Z numa massa ultrafina de serpentina indeterminada. Magnetita ocorre em cristais alongados segundo a estruturação da rocha, e está em grande parte hematitizada, todavia não pigmenta ou tinge a rocha. Em geral acha-se envolta por crisotila Z, em cujos planos de clivagem alojam-se filetes de hematita. Magnetita também preenche fraturas discordantes que cortam a rocha.
A-348 W (Capa Contato SP-1/SP-2)	Serpentinas Magnetita	Rocha exibindo forte orientação de corpos serpentínicos. É formada em sua maior parte, por grãos irregulares de crisotila Z associada em bordas e intercrescimentos com antigorita e/ou lizardita e grupos pseudomórficos mais raros, com possível serpofita. Magnetita não-oxidada ocorre esparsamente.

continua

continuação

DESIGNAÇÃO	MINERALOGIA	DESCRIÇÃO PETROGRÁFICA
A-358 W (Capa)	Serpentinas Magnetita Hidromagnesita	Rocha fortemente orientada. É formada principalmente por crisotila Z com interstícios e linhas paralelas preenchidas por serpentina muito fina (antigorita e/ou lizardita?). Pequenos cristais de hidromagnesita encontram-se dispersos neste material. Crisotila Z porfiroblástica está deformada e parcialmente transformada em antigorita e/ou lizardita e "serpofita": Há alguma hidromagnesita associada. Magnetita não está oxidada. Há leve pigmentação da matriz. Vênula com grupos de cristais eqüidimensionais de hidromagnesita corta a rocha.
CB 1008 (B-178)	Serpentinas Magnetita	"Porfiroblastos" de crisotila Z e magnetita (pouco ou nada oxidada, com infiltração periférica de óxidos de ferro), distribuem-se em matriz decussada composta de antigorita e/ou lizardita).
CB 1009A (Cava B)	Serpentinas Magnetita	Rocha orientada e bandada. Uma banda é composta somente por crisotila Z preenchendo vênulas e substituindo piroxênios em textura poligonal e preenchendo vênulas. Resto da rocha apresenta textura "*mesh*" mal definida (núcleos com antigorita e/ou lizardita) e crisotila Z, sem olivina. Magnetita, em cristais dispersos e não-oxidados, ocorre esparsamente.
CB 1009B (Cava B)	Serpentinas Magnetita	Semelhante à massa principal da CB 1009A, porém com maior quantidade de opacos (às vezes em pseudomorfos) geralmente em agregados alongados segundo direção preferencial. Espessas vênulas preenchidas por crisotila Z cortam irregularmente as estruturas.

TABELA 6 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 1 (SP-1) **(2ª etapa dos trabalhos).**

Amostra/ Classificação	Características Macroscópicas	Características Microscópicas		
		Textura	Mineralogia (%) estimada	Descrição Petrográfica
1	Cor pardo-vermelha a verde, em bandas. Vênulas amarelas.	*Mesh*.	BANDA VERDE: Crisotila + óxidos de ferro ~100 BANDA PARDO-VERMELHA: Serpentina (crisotila - antigorita) ~100 Opacos - Carbonato - Serpentina Z ferrífera (?) -	Rocha constituída por bandas verdes, em que ocorrem corpos pseudomórficos preenchidos por serpentina + óxidos Fe e bandas pardo-vermelhas de serpentina e opacos (magnetita + outros óxidos Fe). As vênulas amarelas contém essencialmente carbonato e filossilicato amarelo ou verde-pardacento (serpentina Z ferrífera?).
3b	Cor cinza-escuro, localmente arroxeado. Estrutura maciça, Presença de material pulverulento, amarelo-claro e de abundantes microfraturas.	*Mesh* nítida em zonas sem silicato.	Serpentina Z 60 Olivina forsterítica 30 Opacos 10 Outros: tr Carbonato Ortopiroxênio (?) Nontronita (?)	Rocha heterogênea, com subárea de textura *mesh* (antigorita e/ou lizardita, crisotila e magnetita fina), subárea com restos de olivina forsterítica e sua alteração (serpentina acircular), bem como magnetita (cristais maiores com centro de cromita ou picotita rodeada de Mg-clorita ou brucita). Pequena área da lâmina é rica em corpos carbonáticos com restos de possível ortopiroxênio rodeados ou tomados inteiramente por filossilicatos não identificados (nontronita?), tudo em matriz fina de serpentina. A rocha original deve ter sido um dunito, hoje serpentinizado
7a	Cor pardo-avermelhada, com fibras foscas impregnadas de hidróxidos de ferro de cor vermelha. Presença de banda de cor verde clara amarelada.	*Mesh* deformada, orientada por fitas paralelas	Serpentina 70 Opacos e semi-opacos 30	Rocha constituída predominantemente por serpentina: em fitas paralelas, em pequenos corpos de agregados finos e em porfiroclastos. Ocorrem também opacos e semi-opacos (magnetita, hematita, picotita ou cromita) freqüentemente alinhados em direção quase perpendicular à das fitas.
9	Cor pardo-arroxeada com manchas vermelhas suborientadas associadas a material pulverulento de cor verde clara. Presença freqüente de vênulas de fibra curta/média.	*Mesh* e decussada	Serpentina 80 Limonita 15 Opacos 5	Rocha constituída predominantemente por serpentina, especialmente em fibras e localmente microgranular. Limonita "fibrosa" (goethita?) acha-se possivelmente depositada paralelamente às fibras de crisotila.

Nota: tr = traços

TABELA 7 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 2 (SP-2) **(2ª etapa dos trabalhos).**

Amostra/ Classificação	Características Macroscópicas	Características Microscópicas		
		Textura	Mineralogia (%) estimada	Descrição Petrográfica
4	Cor cinza com corpos arredondados maiores, claros. Estrutura orientada. Vênulas de fibras longas com espessura centimétrica.	Blastoporfirítica ou porfiroblástica e decussada ou *mesh*.	Serpentina 95 Opacos 5	Rocha constituída predominantemente por cristais de crisotila Z, num arranjo decussado ou *mesh*. Ocorrem também corpos redondos, maiores formados por crisotila Z deformada. Aparece ainda vênula grossa (de espessura milimétrica) verde, contendo serpentina verde (crisotila?) e magnetita.
5b	Cor cinza-médio a escura com fitas de cor cinza mais escuro. Ocorre banda de cor amarelo-claro com serpentina amorfa, de cor verde maçã. Localmente crosta de fibra slip com carbonato associado.	*Mesh* deformada	Serpentina 100	Rocha constituída por matriz de crisotila Z muito fina e manchas de crisotila Z fibrosa. Localmente ocorrem porfiroblastos deformados com crisotila Z que também comparece em vênulas
6a	Cor cinza-escuro e cinza-esverdeado. Estrutura orientada em bandas finas. Presença de raríssimas vênulas de fibra curta.	*Mesh* parcialmente destruída. Possível milonitização.	Serpentina 75 Xenocristais ou Xenólitos 20 Opacos 5	Rocha constituída principalmente por crisotila Z (microgranular em cristais pequenos). Xenocristais ou xenólitos são atualmente constituídos por crisotila Z, carbonato e magnetita. Opacos (essencialmente magnetita) ocorrem em cristais maiores (100-300mm) e miúdos (<100mm).
6b	Cor cinza-esverdeado e cinza. Estrutura orientada em lentes espessas. Presença de finas vênulas verde-claras.	*Mesh* parcialmente destruída por possível milonitização	Serpentina 90 Opacos 10	Rocha muito semelhante à anterior, porém com ausência de xenocristais ou xenólitos.
7b	Cor cinza-esverdeada com corpos arredondados mais claros. Estrutura orientada. Raras microfraturas preenchidas por fibras curtas. Crosta de cor amarela-clara, com fibra curta e carbonato. Presença de manchas de cor verde-clara.	*mesh* deformada	Serpentina 90 Opacos 10	Rocha semelhante à 7a. Constitui-se predominantemente de crisotila Z em fitas paralelas, em agregados de grã-fina e sob a forma de *augens* (porfiroclastos). Magnetita ocorre em cristais bem desenvolvidos ou com granulação fina.

continua

continuação

Amostra/ Classificação	Características Macroscópicas	Características Microscópicas			
		Textura	Mineralogia (%) estimada		Descrição Petrográfica
8a	Cor cinza com corpos claros. Vênulas de fibra curta e média em vária direções. Localmente observam-se manchas escuras.	*Mesh* residual a granoxeno-blástica.	Serpentina Opacos Outros: Carbonato Nontronita	90 10 tr	Rocha constituída predominantemente por crisotila Z xenoblástica (prováveis pseudomorfos monocristalinos) ou microgranular, muito fina. Magnetita ocorre em porfiroblastos, por vezes ocupados por corpos nontronítticos. Ocorrem vênulas com crisotila Z e faixas constituídas por carbonato microgranular.
8b	Cor cinza com vênulas amarelas, estartificações de cor marrom e raras fibras curtas.	*Mesh* residual a granoxenoblástica microgranular.	Serpentina Opacos (magnetita) Brucita Carbonato	90 5 5 -	Rocha constituída essencialmente por crisotila Z (em matriz finíssima ou em agregados de monocristais xenoblásticos, por vezes amebóides), magnetita(em cristais maiores e poeira) e brucita, (em pequenos corpos lamelares). Vênulas amarelas contém essencialmente carbonato, mas a cor amarela é fornecida por filossilicato amarelo ou verde-pardacento (serpentina ferrífera?).

TABELA 8 - Resultados das análises petrográficas dos serpentinitos tipo 1/2 (SP-1/2) **(2ª etapa dos trabalhos).**

Amostra/ Classificação	Características Macroscópicas	Características Microscópicas		
		Textura	Mineralogia (%) estimada	Descrição Petrográfica
2	Cor cinza com manchas e filetes finos esbranquiçados. Estrutura maciça. Presença de vênulas de espessura milimétrica de fibras curtas. As vênulas às vezes acham-se microfalhadas.	*Mesh* reliquiar	Serpentina 85 Olivina + pseudomor-fos 10 Opacos 5	Rocha constituída principalmente de corpos estrelados com serpentina. Ocorrem restos de olivina nos pseudomorfos constituídos por brucita e pouco talco. Opacos são essencialmente magnetita.
3a	Cor cinza-esverdeado com pontuações pretas esparsas (magnetita); lentes finas isorientadas. Presença de bandas enriquecidas em material amarelo.	Granoblástica xenoblástica.	Serpentina 95 Opacos 5	Rocha constituída predominantemente por monocristais xenoblásticos de crisotila; serpentina microcristalina é rara, bem como magnetita em agregados e fina.
5a	Rocha com estrutura bandada. Bandas de cor verde intercalam-se com bandas de cor cinza. Presença de microfraturas subparalelas e raros núcleos de SP-1, de cor marrom. Presença de fina crosta de material pulverulento amarelo-esverdeado. Finas vênulas isorientadas.	*Mesh* vestigial e xenoblástica	Serpentina 95 Opacos 5	Rocha constituída predominantemente por crisotila Z: fibrosa nos corpos *mesh*, microcristailina intesticial e, em monocristais xenoblásticos. Ocorrem alguns corpos maiores com franja de magnetita e centros com crisotila X, Z (elongação negativa e positiva), contorno aproximadamente poligonal. Outros corpos com serpentina de baixa birrefringência parecem pseudomorfos de máficos (xenocristais ou xenólitos) de contorno irregular.
10	Cor cinza-esverdeado a cinza escuro, bandada. Presença de crosta de cor amarelo-claro	*Mesh* bem con-servada	Serpentina + filos-silicatos (?) 90 Opacos 10	Rocha constituída predominantemente por corpos poligonais com núcleo de filossilicato (?) turvo, rodeado de serpentina Z (crisotila). Magnetita ocorre em cristais bem desenvolvidos ou com granulação fina.

piroxênios), em pseudomorfos policristalinos *mesh* ou *hour glass* (a partir de olivinas), ou ainda em intercrescimentos, núcleos ou capas de outras variedades serpentínicas.

Crisotila X (α): biaxial (-); 2V pequeno; índices de refração semelhantes aos da crisotila Z; elongação negativa; n_z-n_x= 0,005 - 0,010;

Distingue-se opticamente da crisotila Z, especialmente pela elongação negativa. Apresenta-se também em feixes de fibras (com birrefringência aparentemente menor que a da crisotila Z), comumente incorporada em fitas, limitando corpos pseudomórficos de olivina, em textura *mesh*.

Antigorita e/ou Lizardita: biaxial (-); 2V pequeno; plano dos eixos ópticos perpendicular às linhas de alongamento ou clivagem; índices de refração não determinados, provavelmente variáveis em pequena amplitude e semelhantes aos da crisotila Z; elongação positiva; n_z-n_x= 0,005 - 0,010, podendo atingir 0,015 se, contiver Fe, o que lhe conferiria cor amarela. Nos serpentinitos forma agregados maciços de granulação muito fina e textura reticulada ou decussada. Por vezes exibe textura nematoblástica ou forma fitas subparalelas, neste caso confundindo-se com crisotila X.

Serpofita: isótropa, com índices de refração variáveis; provavelmente, quando seu conteúdo de Fe é maior, adquire cor amarela e índices maiores. Macroscopicamente pode apresentar cor verde-maçã. Trata-se provavelmente de serpentina criptocristalina ou amorfa. Ocorre em núcleos de corpos *mesh* ou, ainda, nas imediações ou no interior de vênulas, associada à crisotila Z.

Minerais opacos e semi-opacos

Magnetita: (Fe_3O_4) aparece predominantemente nos serpentinitos tipo 2 (SP-2), em cristais irregulares a subédricos, submilimétricos a milimétricos (às vezes centimétricos), dispersos na rocha ou concentrados em lentes ao longo do eixo central de vênulas, ou ainda, entre fibras de crisotila das mesmas vênulas. Quando em vênulas associadas à crisotila, a magnetita pode ocorrer em cristais fraturados, alongados, suborientados e parcialmente alterados em hematita, ao longo das bordas e microfraturas. Localmente apresenta bordas corroídas. Também compõe "poeira" de partículas secundárias nos limites dos corpos *mesh*, como co-produto das transformações hidrotermais da olivina.

Hematita: (Fe_2O_3) aparece predominantemente nos serpentinitos tipo 1 (SP-1). Apresenta ligeira susceptibilidade magnética, talvez devido à sua comum associação com magnetita ou de sua sucedânea, a maghemita. Ocorre por vezes em agregados esponjosos, orientados, alongados, milimétricos a centimétricos, dispersos pela

rocha. Associa-se por vezes à limonita em bordas de magnetita, sendo neste caso um produto de alteração. A hematita ocorre ainda preenchendo microfissuras e como pontuações dispersas. Localmente, apresenta núcleo de sulfeto (calcopirita).

Nos serpentinitos tipo 1 pode-se observar, ocasionalmente, hematita envolvendo cristais de magnetita e, contrariamente, nos serpentinitos tipo 2, magnetita recobrindo hematita.

Um "espinelídeo" pardo foi observado microscopicamente, freqüentemente envolto ou alterado para magnetita. Opticamente pode tratar-se tanto de picotita (Mg-Fe-Cr espinélio), como de cromita transparente. Ocorre disseminado, à maneira da magnetita primária.

Pirrotita: É rara, ocorre em cristais subédricos, submilimétricos a milimétricos, podendo substituir agregado serpentínico. Localmente ocorre como inclusão na magnetita, ou em cristais finíssimos (<0,1 mm), euédricos a subédricos, dispersos pela rocha.

Carbonatos

São encontrados em pequenas proporções, associados à crisotila, em algumas vênulas, ou formando "poeira" secundária em serpentinitos. Na maioria das vezes é calcita; embora ocorra também dolomita.

Como mineral metamórfico primário (porfiroblástico), foi identificada hidromagnesita. Piroaurita, reconhecida opticamente, foi encontrada em fraturas e cavidades nos serpentinitos tipo 1.

Clorita magnesiana ou Brucita

Foram registradas pequenas quantidades de clorita magnesiana ou brucita na massa fina dos serpentinitos. Estes dois minerais, com hábito placóide, cor de interferência levemente anômala, sinal positivo e elongação negativa, não são facilmente distinguíveis ao microscópio. Concentra-se em espaços abertos e associa-se à magnetita porfiroblástica.

Olivina

É o silicato primário mais comum nos serpentinitos tipo 1. Forma núcleos mais resistentes à alteração no interior dos corpos *mesh*. Opticamente identificou-se a variedade crisólita e, em menor número de ocorrências, a forsterita.

Piroxênio

Foram reconhecidos clinopiroxênios (enstatita e diopsídio) em raros núcleos de corpos *mesh* em alguns exemplares de serpentinito tipo 1.

Aos aspectos macroscópicos distintivos dos dois tipos de serpentinito, já observados por HASUI, MAGALHÃES(1985) somaram-se aspectos microscópicos, obtendo-se uma melhor caracterização dos serpentinitos (OLIVEIRA, COUTINHO, FRASCÁ, 1992). Assim, os SP-1 se caracterizam por apresentar:

a) cor macroscópica marrom fornecida pela disseminação de pigmentos de óxidos e/ou hidróxidos de Fe^{+3} e típica de alteração intempérica (FOTO 20) ;
b) textura afanítica ou fanerítica fina;
c) presença freqüente de restos não completamente serpentinizados de silicatos primários duros: piroxênios e, especialmente, olivinas (FOTO 21 (a));
d) desenvolvimento de serpentinas, que tanto podem ser crisotila (Z e X), como antigorita e/ou lizardita, estas últimas com hábito placóide (FOTOS 21(b) e 22 (a)/(c));
e) textura decussada ou *mesh*, por vezes deformada a nematoblástica, acarretando uma orientação preferencial dos cristais de antigorita e/ou lizardita. Quando a deformação é muito intensa, a textura passa a milonítica;

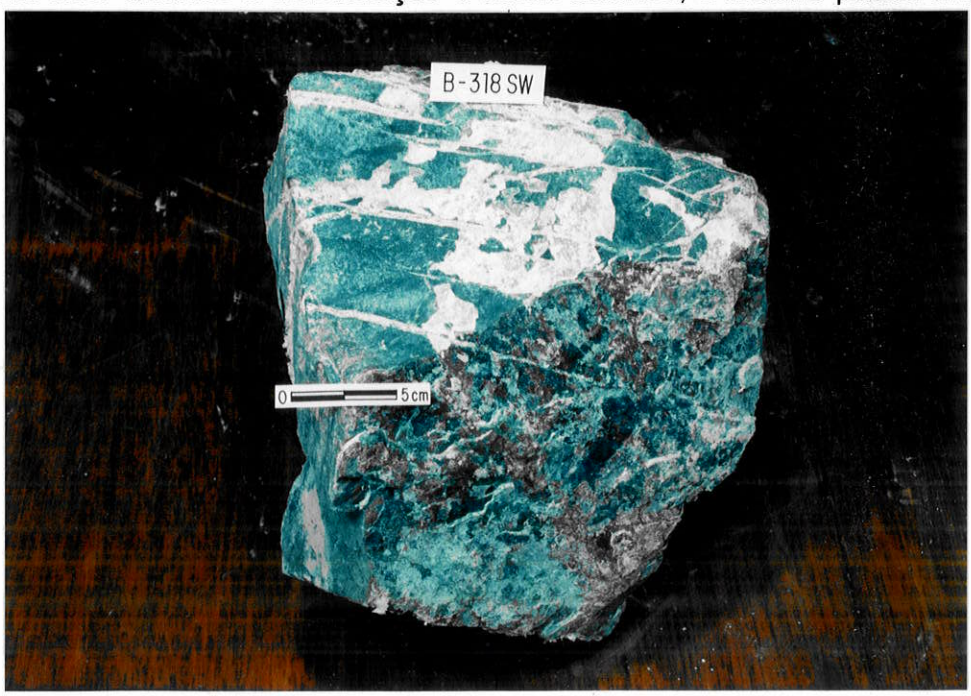


FOTO 20 - Aspecto macroscópico de serpentinito tipo 1 (SP-1), com alteração intempérica de coloração amarronzada.

FOTO 21 (a) - Aspecto microscópico do serpentinito tipo 1 (SP-1). Cristal de olivina (1); enstatita (2); picotita (3), entre os quais ocorre antigorita e/ou lizardita (4). Po-larizadores cruzados. Aumento 38x (Amostra CB-967 (61,10 m)).

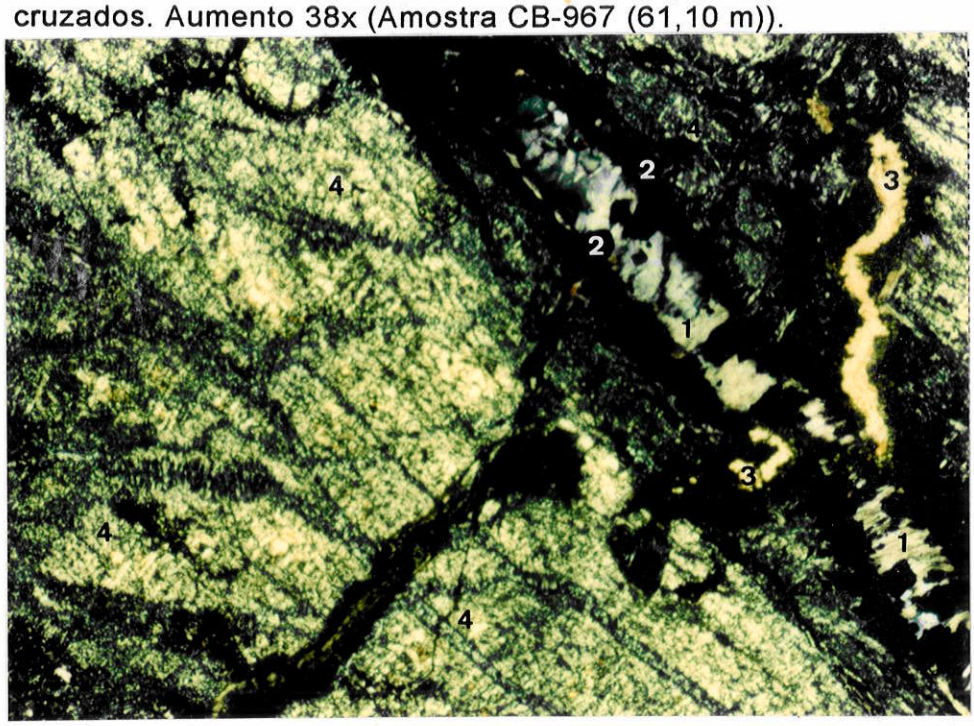


FOTO 21 (b) - Aspecto microscópico do serpentinito tipo 1 (SP-1) - Vênula de crisotila Z (1), bordejada por magnetita (+hematita) (2) e com calcita associada (3), cortando corpos de antigorita e/ou lizardita (4). Polarizadores cruzados. Aumento 38x. (Amostra CB-994 (66,70 m)).

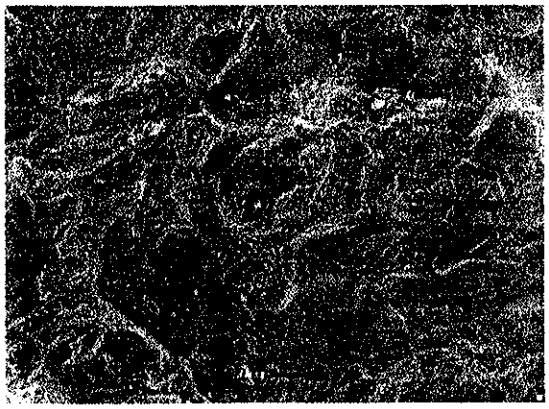


FOTO 22a - Corpos de antigorita e/ou lizardita sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) em serpentinito tipo 1 (SP-1) (Amostra CB-994 (66,70 m)).

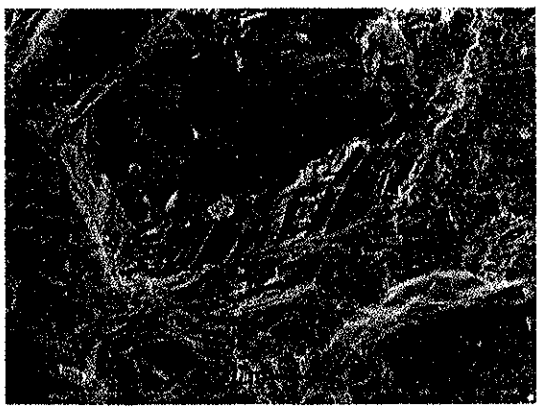


FOTO 22b - Detalhe da foto anterior.

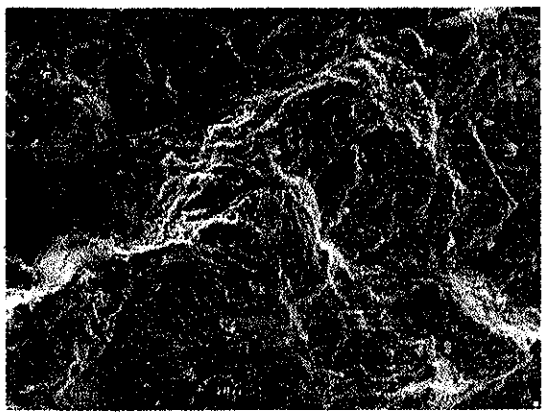


FOTO 22c - Outro aspecto da rocha, observando-se grãos placóides e raras fibras.

f) magnetita sempre presente, moderada a fortemente martitizada, e calcopirita rara, em cristais dispersos.

Por seu turno, os SP-2 apresentam:

a) cor macroscópica verde, devido à cor natural dos minerais serpentínicos (FOTO 23);

b) textura afanítica ou fanerítica fina;

c) serpentinização completa de silicatos primários duros, atualmente pseudomorfizados;

d) textura *mesh* vestigial ou destruída por deformação;

e) predominância de crisotila Z na matriz da rocha, em agregados de fibras de comprimento submilimétrico a milimétrico; antigorita e/ou lizardita normalmente estão presentes em menor quantidade (FOTOS 24(a)/(b) e 25 (a)/(c));

f) magnetita primária conservada ou reconstituída, raramente com alteração parcial em hematita; presença muito rara de pirrotita e calcopirita.

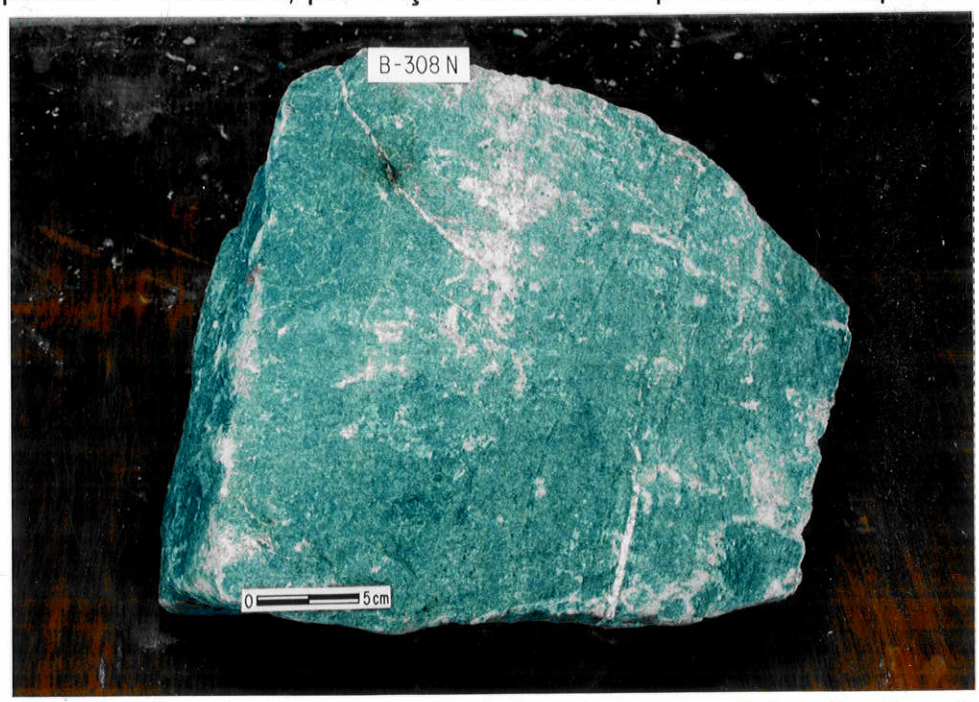


FOTO 23 - Aspecto macroscópico de serpentinito do tipo 2 (SP-2).

Rochas com feições intermediárias entre os serpentinitos 1 e 2 ou que ocorrem em zonas de transição são denominadas de serpentinitos tipo 1/2 (SP-1/2). A FOTO 26 ilustra aspecto macroscópico dessas rochas.

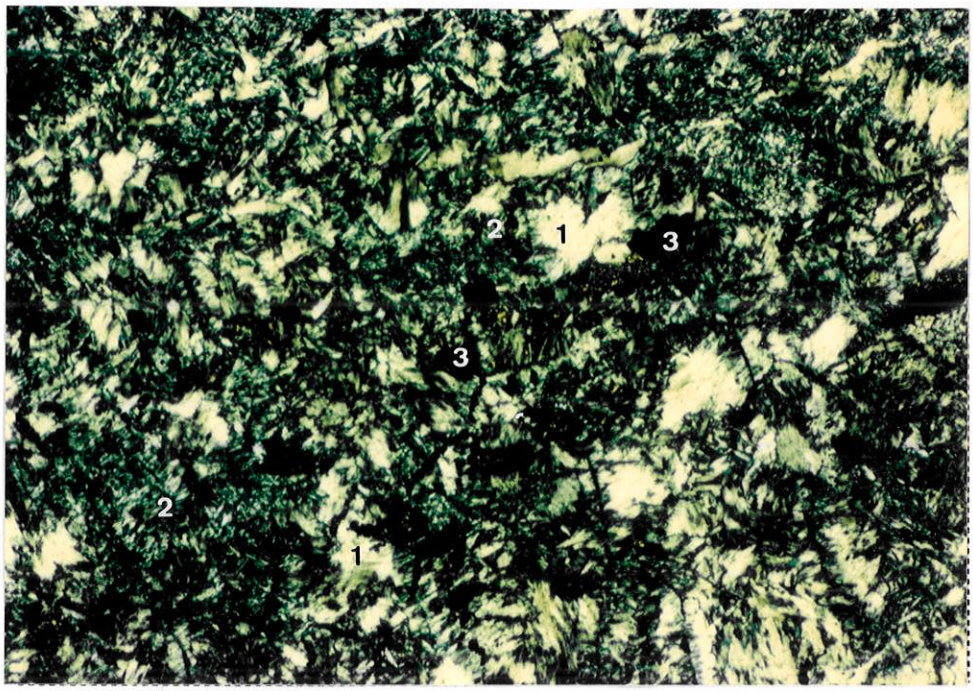


FOTO 24 (a) - Aspecto microscópico do serpentinito tipo 2 (SP-2) - Crisotila Z predominante em cristais bem desenvolvidos (1); antigorita e/ou lizardita em agregados de cristais finíssimos (2); magnetita em pequenos cristais esparsos (3). Polarizadores cruzados. Aumento 38x. (Amostra B-318 WNW).

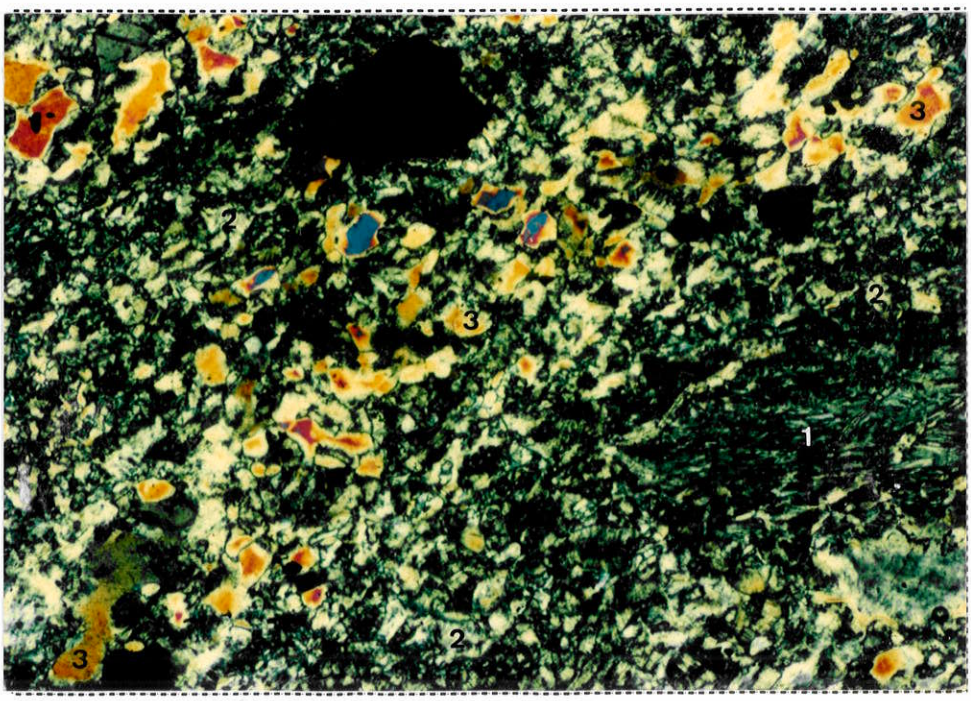


FOTO 24 (b) - Aspecto microscópico do serpentinito tipo 2 (SP-2) - Porfiroblasto deformado de crisotila Z (1), em meio a matriz formada por agregados de fibras curtas de crisotila Z (2); cristais de hidro-magnesita (3), em vênulas. Polarizadores cruzados. Aumento 38x. (Amostra A-358W).

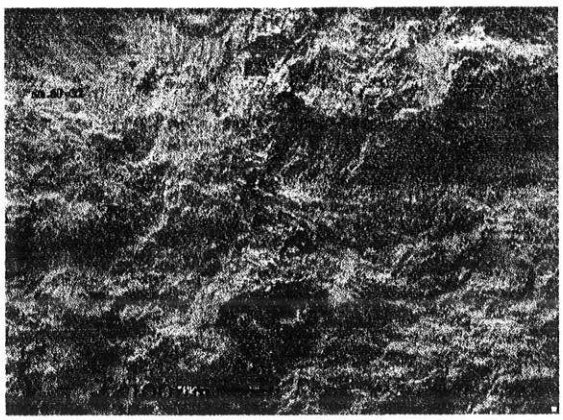


FOTO 25a - Corpos de crisotila Z sob microscópio eletrônico de varredura (MEV) em serpentinito tipo 2 (SP-2) (Amostra B-358 N).

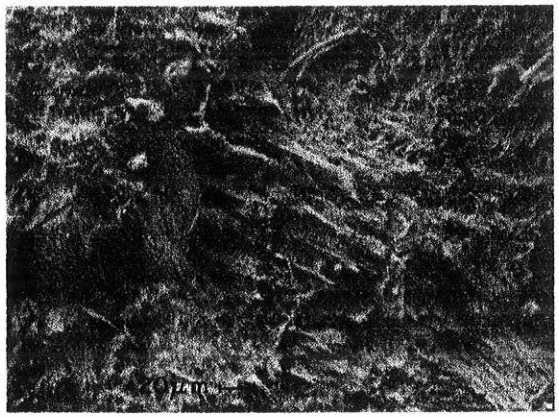


FOTO 25b - Detalhe da foto anterior.

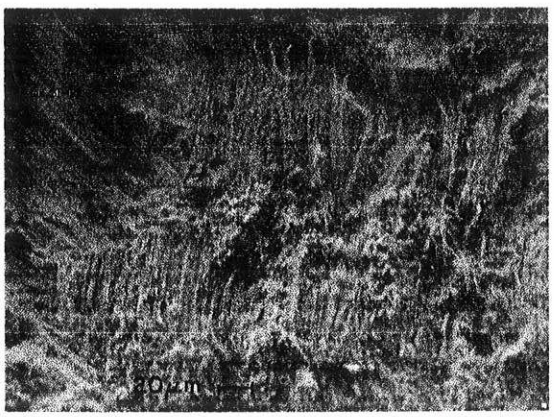


FOTO 25c - Outro aspecto da mesma amostra, observando-se conjuntos de fibrilas de crisotila da matriz rochosa.

T8287

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - USP
— BIBLIOTECA —

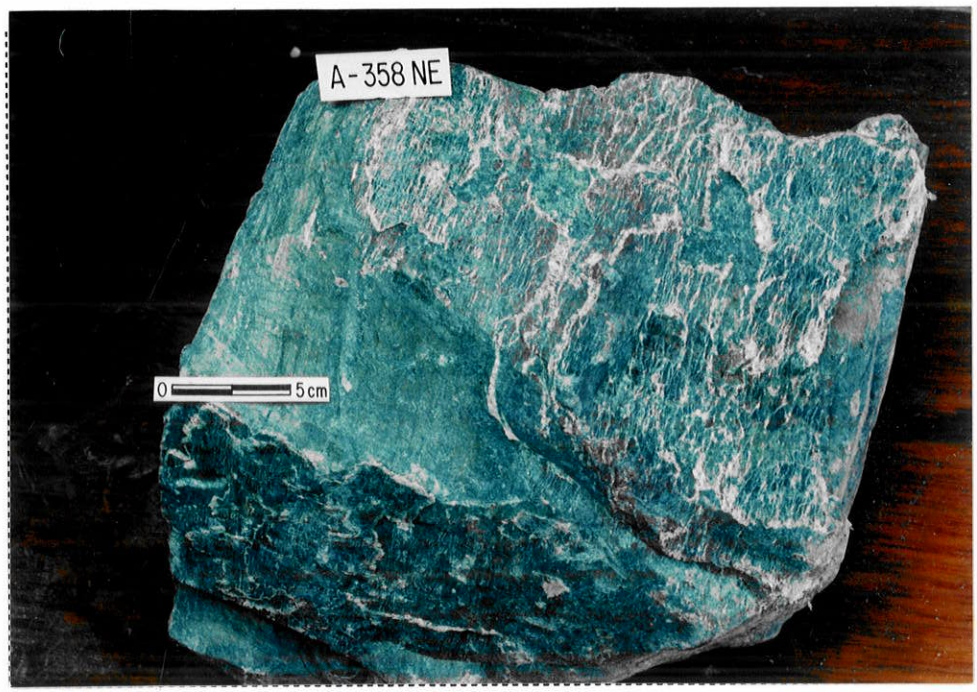


FOTO 26 - Aspecto macroscópico de serpentinito tipo 1/2 (SP-1/2).

Veios e vênulas de crisotila Z, por vezes associada à magnetita e/ou calcita, ocorrem tanto nos SP-1 como nos SP-2. Observam-se feições indicativas de várias fases de deformação (dúctil, dúctil-rúptil e rúptil), nos SP-1, nos SP-2 e até mesmo em veios e vênulas de crisotila.

O material amarelo que preenche fraturas ou ocorre em crostas, principalmente nos SP-1, foi identificado como piroaurita (carbonato hidratado de Mg e Fe) e agregado serpentínico de granulação finíssima, composto predominantemente de crisotila X ferruginosa.

As curvas termodiferenciais (ATD) obtidas para os serpentinitos podem ser agrupadas em três padrões distintos, a julgar pelo comportamento térmico da associação mineral presente (FIGURA 11):

a) um grupo de curvas caracterizadas especialmente pela presença de picos endotérmicos a aproximadamente 660°C e 770°C, o primeiro de maior intensidade, interpretados como reação de desidroxilação de crisotila e de antigorita-lizardita, respectivamente; e também pela presença constante de pico a ~400°C, interpretado como reação de desidratação de goethita. Nesse grupo parece dominar a crisotila;

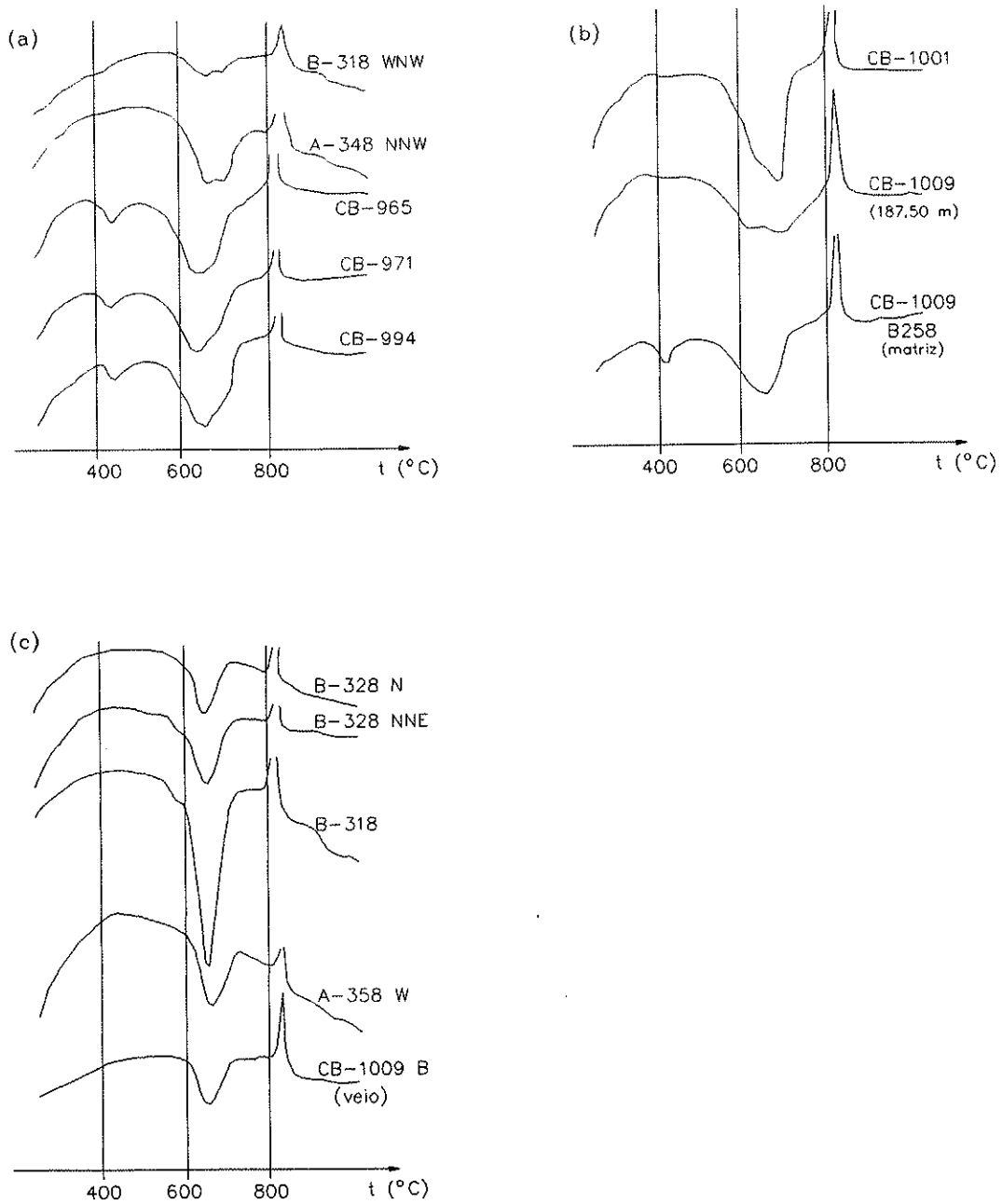


FIGURA 11 - Curvas termodiferenciais das amostras de serpentinito (1ª etapa dos trabalhos).
(a) predomínio de crisotila; (b) predomínio de antigorita e/ou lizardita; (c) exclusivamente crisotila.

outro grupo de curvas, semelhante às do grupo anterior, mas com o pico a 700°C mais intenso que o de 660°C, sugerindo que a serpentina predominante, neste caso, seria antigorita-lizardita. Nessas curvas a goethita também está presente;

a) um terceiro grupo de curvas apresenta como característica um pico único na região de ~660°C, indicando a presença exclusiva de crisotila. Nesse grupo de curvas não aparece a goethita.

Os resultados das análises termodiferenciais (ATD) estão em concordância com os dados obtidos nos estudos de microscopia óptica e eletrônica, evidenciando que nos SP-1 ocorrem crisotila e antigorita-lizardita, predominando uma ou outra espécie, enquanto nos SP-2 ocorre quase que exclusivamente crisotila.

As análises por difração de raios X efetuadas nos serpentinitos mostraram espectros de serpentinas, com os picos principais em 7,2Å; 3,6Å e outros secundários. Não foi possível, através dos difratogramas, identificar a espécie de serpentina, ou as espécies, quando se tratava de misturas. Em alguns casos, no entanto, confirmou-se a presença de antigorita, pela existência nestes do pico 1,56Å; exclusivo de antigorita (WHITTAKER; ZUSSMAN, 1956, *apud* BRINDLEY, 1972).

5.1.2. Petrografia das rochas não-serpentínicas

As amostras de rochas máficas e ultramáficas não serpentinizadas ou pouco serpentinizadas aqui analisadas procedem da Cava B e podem ser agrupadas como segue:

a) **Piroxenitos***: São rochas verde-escuras, formadas em grande parte por clinopiroxênios. Em quantidades subordinadas ocorre possível olivina, totalmente alterada em tremolita. "Serpofita", variedade amorfa ou criptocristalina de serpentina, parece co-produto de alteração dos máficos originais (especialmente olivina). A presença original de olivina tenderia a levar tais rochas para o campo dos peridotitos do tipo werhlito.

b) **Leucogabros***: São rochas de cor branco-acinzentada, contendo minerais máficos escuros, por vezes em agregados centimétricos. Em uma das amostras estudadas, a parte branca é formada por plagioclásio albítico alterado e porções restritas de hornblenda parda, parcialmente

* A existência de um evento metamórfico no fácies granulítico é ainda hoje discutida pelos especialistas, não tendo sido encontradas evidências claras neste sentido. Hidrotermalismo ou metassomatismo certamente ocorreram mas não são considerados na notação sistemática.

hidrotermalizada. Segundo DREHER (1983), seriam metaleucogabros e se encontram comumente associados a rodingitos.

c) **Rodingitos**: As amostras analisadas são diferentes quanto à textura, granulação e composição mineral. De comum, assinala-se a riqueza de minerais de Ca, normalmente silicatos de Ca e Al (grossulária e hidrogrossulária, vesuvianita, zoisita e clinozoisita), mas é também comum o clinopiroxênio (silicato de Ca e Mg), bem como a pectolita, (silicato de Ca e Na hidratado), Mg-clorita e carbonato. No presente estudo, persistem ainda dúvidas quanto à existência dos minerais pectolita (ou prehnita) e xonotlita (ou thomsonita) assinalados por DREHER (1983).

Parece clara, entretanto, a derivação sincrônica de leucogabros e rodingitos, encontrados amiúde em íntima associação. Nesses casos, teriam sido os gabros originais a fonte fornecedora de todo o Ca necessário à formação metassomática dos rodingitos.

5.1.3. Estudo petroquímico dos serpentinitos

Os resultados das análises químicas efetuadas em cinco amostras de serpentinito do tipo 1 (SP-1) e em sete do tipo 2 (SP-2) (TABELA 9) demonstrou que são compostos essencialmente de Mg, Si, Fe e H_2O^+, elementos formadores dos silicatos hidratados de magnésio e dos óxidos de ferro; outros elementos perfazem cerca de 5% da composição total da rocha.

A composição química (elementos maiores e traços) dos SP-1 e SP-2, quando comparados com dados da literatura fornecidos por WILSON (1989) é semelhante à das rochas ultramáficas (peridotitos e lherzolitos).

Os valores químicos médios de SP-1 e SP-2 foram comparados com composições químicas de dunitos e peridotitos e fornecidas por ZONENSHAIN, KUZMIN (1978) e também incluídas na TABELA 9. Os padrões de distribuição são bastante semelhantes entre si, especialmente entre os serpentinitos de Cana Brava e dunitos. É notável, entretanto, o forte empobrecimento de Ca nos serpentinitos estudados, fato que deve refletir a natureza do protólito, provavelmente composto essencialmente de olivina, com pequena quantidade de piroxênios. Esta mineralogia ainda está parcialmente preservada em algumas amostras de SP-1, e sua textura reliquiar pode ser observada na maior parte dos SP-2.

TABELA 9 - Resultados analíticos dos serpentinitos tipo 1 (SP-1) e tipo 2 (SP-2) (1ª etapa dos trabalhos) comparados com valores de dunito e peridotito (*).

	SERPENTINITO TIPO 1					SERPENTINITO TIPO 2							ULTRAMÁFICAS	
	CB-965 (98,70)	CB-971 (88,20)	CB-994 (66,70)	CB-1001 (98,80)	CB-1009 (187,50)	B-308S	B-318 WNW	B-328N	A-348 NNW	A-348W	A-358W	CB-1009B	Dunito	Peridotito
SiO_2%	34,0	32,8	33,5	35,1	37,2	39,9	37,9	38,4	39,4	39,7	40,1	34,4	37,3	40,41
TiO_2%	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	0,01
Al_2O_3%	1,1	0,63	0,66	0,42	0,63	1,1	0,56	1,5	0,95	0,89	0,99	0,61	0,75	0,97
Fe_2O_3%	7,9	8,8	8,3	8,5	8,5	3,8	7,9	4,8	6,7	4,5	3,2	7,6	7,9	7,6
Cr_2O_3%	0,61	0,57	0,56	0,37	0,31	0,35	0,28	0,53	0,47	0,34	0,52	0,84	-	-
FeO%	0,21	0,14	0,14	0,35	0,14	<0,10	0,8	0,14	0,49	0,21	0,14	0,56	-	3,68
Fe_t%	5,69	6,26	5,92	6,21	6,05	2,68	6,15	3,47	5,07	3,31	2,35	5,76	-	-
NiO%	0,33	0,22	0,34	0,3	0,29	0,31	0,25	0,32	0,26	0,35	0,25	0,3	-	-
MnO%	0,12	0,11	0,11	0,11	0,1	0,06	0,07	0,05	0,05	0,05	0,05	0,13	0,13	0,09
MgO%	40,2	40,5	40,7	39,7	39,5	41	39,2	40,6	39,4	40,7	41,1	40,5	41,02	35,07
CaO%	<0,05	<0,05	0,08	0,1	0,11	<0,05	0,08	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,57	0,12
Na_2O%	0,02	0,03	0,3	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,13
K_2O%	0,02	0,02	0,05	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,03	0,03
P_2O_5%	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-	-
S%	0,042	0,073	0,088	0,038	0,035	0,059	0,044	0,076	0,018	0,035	0,032	0,061	-	-
H_2O^+%	15,15	16,01	15,15	14,83	12,91	13,34	12,87	13,27	11,79	12,75	12,91	14,71	-	-
H_2O^-%	0,4	0,4	0,5	0,54	0,41	1,1	0,65	1,03	0,55	1,25	0,97	0,82	-	-
F%	0,005	0,006	0,01	0,007	0,009	0,011	0,006	0,006	0,006	0,011	<0,003	0,011	-	-
Cl ppm	330	610	410	460	380	31	85	50	<20	30	39	310	-	-
Cu ppm	6	363	7	18	6	23	21	18	11	7	8	14	8,2	6
Pb ppm	27	31	30	30	24	28	25	27	26	32	34	30	-	-
Zn ppm	32	24	20	32	28	20	36	24	20	28	20	52	-	-
Zr ppm	22	21	20	20	18	25	22	23	24	25	20	21	-	-
Rb ppm	9	9	10	8	7	11	9	8	7	10	8	10	2,2	1,6
Sr ppm	<5	<5	<5	8	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	-	
V ppm	32	35	25	34	36	38	35	61	53	41	46	29	35	38
Co ppm	120	150	120	120	110	79	110	110	94	92	66	140	170	-
Cr ppm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2800	2500
Ni ppm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1600	1800
Ba ppm	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19

(*) Dados extraídos de ZONENSHAIN; KUZMIN (1978)

As diferenças nos teores de álcalis (K_2O e Rb) podem refletir alterações metassomáticas posteriores à colocação do corpo ultramáfico, por influência de intrusões graníticas próximas.

Os dois tipos de serpentinitos exibem teores muito semelhantes de MgO, CaO, Al_2O_3, e K_2O (FIGURAS 12 e 13). Os SP-2 são mais enriquecidos em SiO_2 e os SP-1 destacam-se pelo relativo enriquecimento em MnO, Fe_2O_3, Na_2O e H_2O^+. A amostra CB-1009 B (SP-2) discrimina-se das demais por apresentar teor em SiO_2 abaixo e de MnO, H_2O+, Cl e Co, acima, de seu respectivo grupo.

Os elementos traços: Ni, Cr e Zr não se diferenciam nos dois tipos de serpentinitos; porém os SP-1 estão bastante enriquecidos em Co e, principalmente, em Cl (FIGURA 13).

Há uma correlação positiva de Fe_2O_3, Cl e Co em relação à H_2O^+ sugerindo a associação destes elementos com as fases hidratadas (serpentinas) dos SP-1 (FIGURA 14).

5.2. Caracterização tecnológica dos serpentinitos

Os resultados médios dos ensaios tecnológicos por tipo de serpentinito encontram-se na TABELA 10.

Algumas amostras não foram submetidas à totalidade dos ensaios tecnológicos previstos, em razão da dificuldade gerada pelo grau de fraturamento em espaçamentos menores que as dimensões prescritas pelas normas para obtenção dos corpos-de-prova.

A observação da TABELA 10 permite as seguintes constatações para as propriedades medidas:

a) massa específica aparente:

- os valores distribuem-se em quatro classes: 2450/2500 kg/m^3; 2550/2600 kg/m^3; 2600/2650 kg/m^3 e 2650/2700 kg/m^3;

b) porosidade aparente:

- os valores distribuem-se em seis classes: 0,5/1,0%; 1/1,5%; 1,5/2,0%; 2,0/2,5%; 3,0/3,5%; 3,5/4,0%;

c) absorção d'água:

- os valores distribuem-se em cinco classes: 0,25/0,50%; 0,50/0,75%; 0,75/1,00%; 1,00/1,25%; 1,25/1,5%;

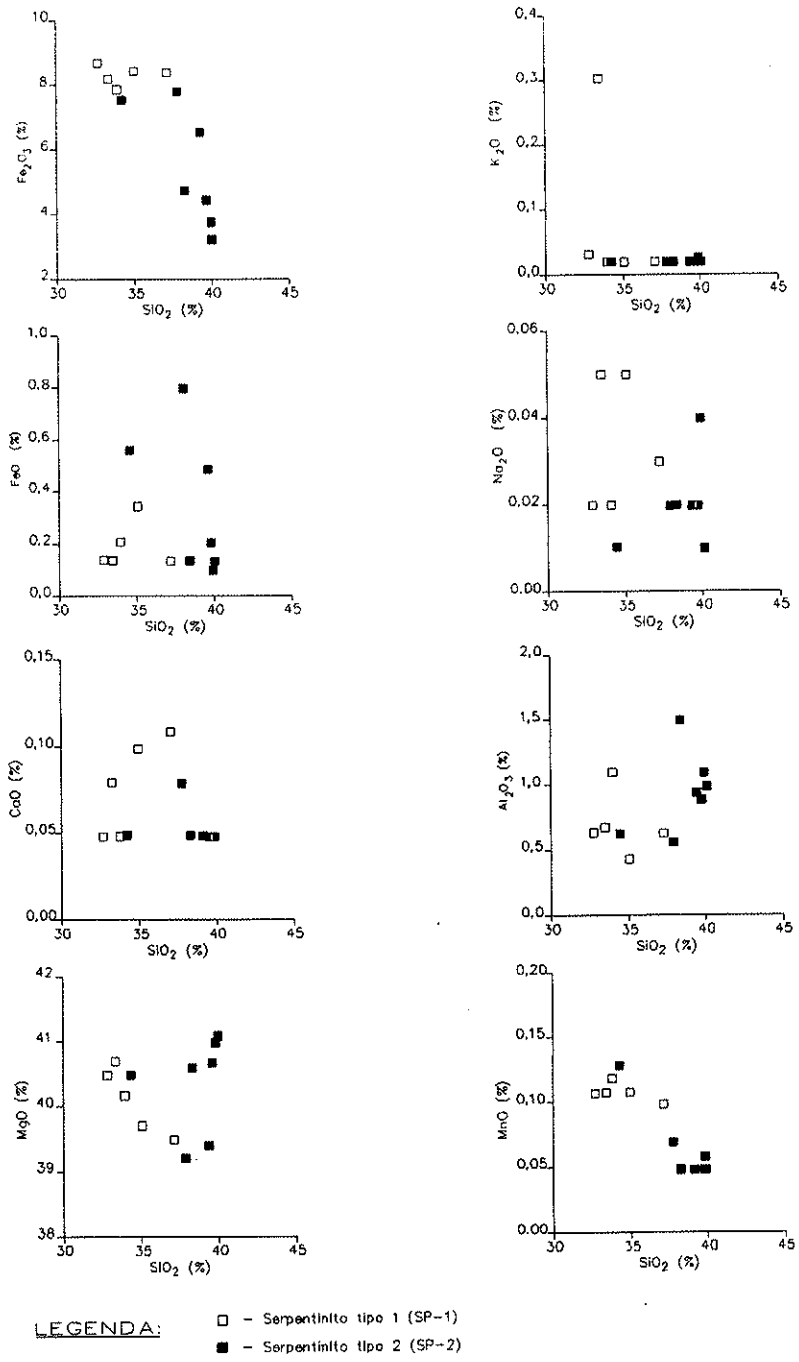


FIGURA 12 - Diagramas SiO_2 x óxidos das amostras de serpentinito.

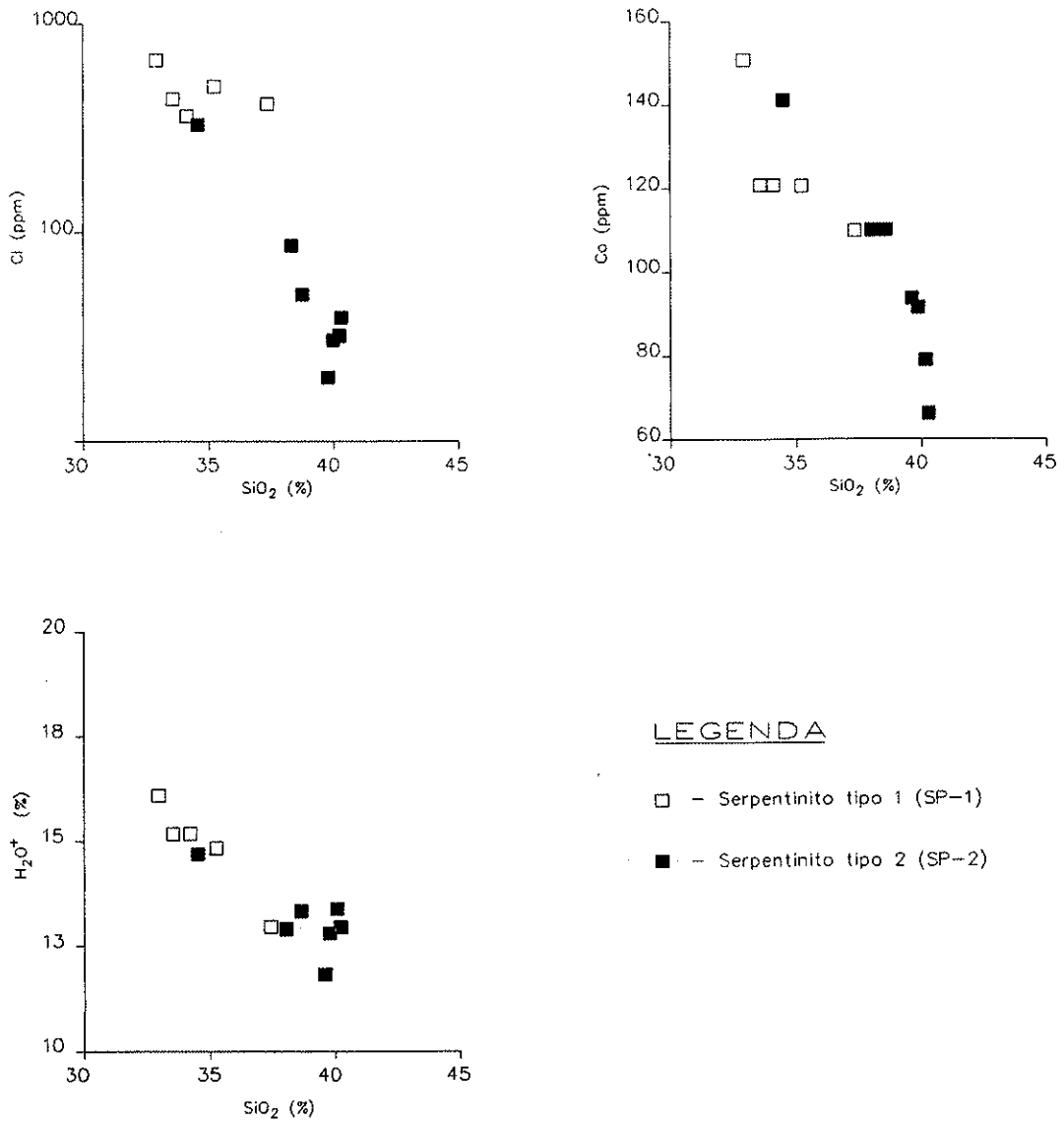


FIGURA 13 - Diagramas SiO_2 x traços e SiO_2 x H_2O^+ das amostras de serpentinito.

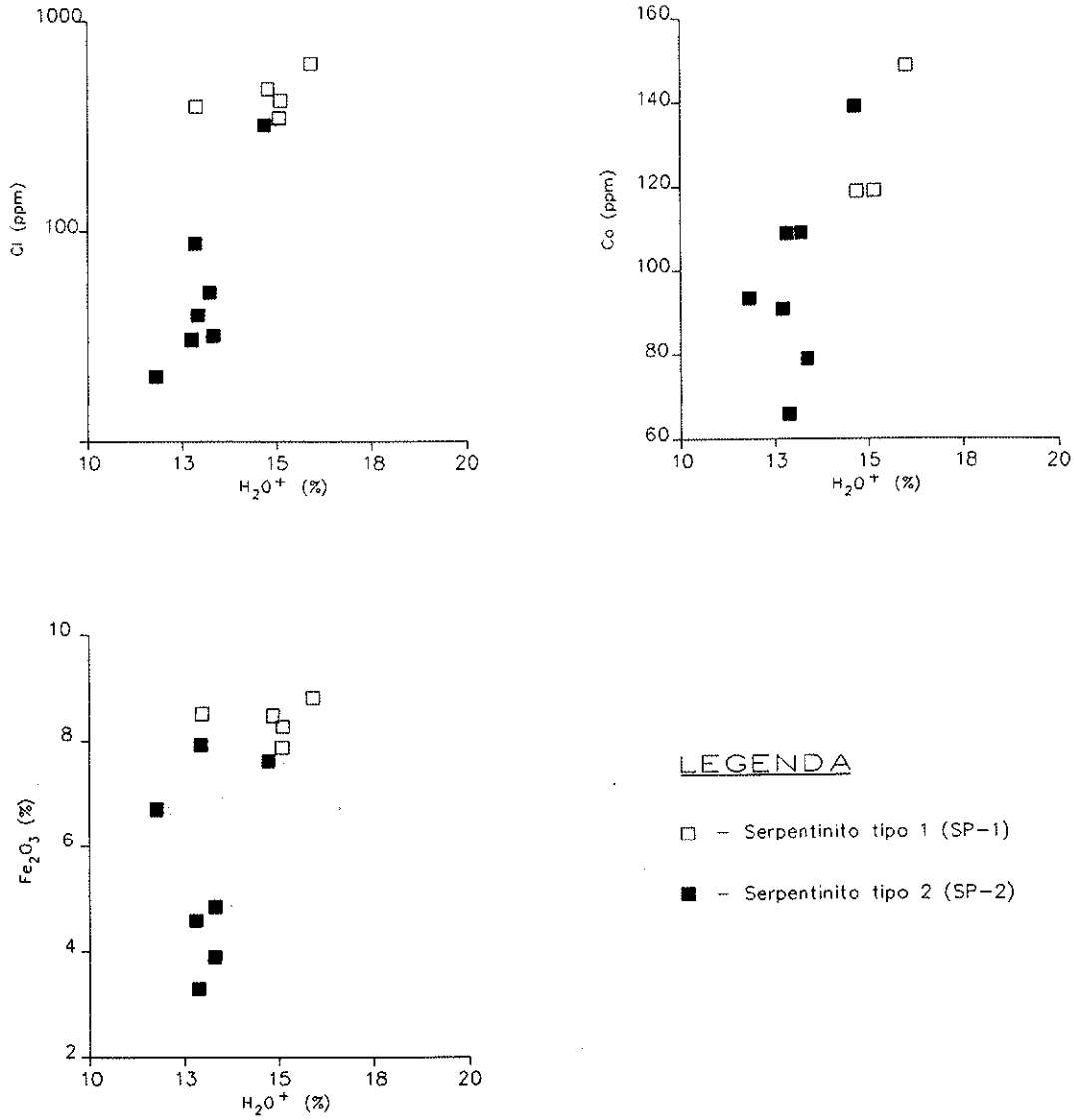


FIGURA 14 - Diagramas H_2O^+ x Cl, H_2O^+ x Co e H_2O^+ x Fe_2O_3 das amostras de serpentinito.

TABELA 10 - Valores médios dos resultados dos ensaios tecnológicos das amostras de rocha *in natura* **(2ª etapa dos trabalhos).**

Tipo	Amostra	Índices Físicos			Abrasão Los Angeles (%)	Impacto Treton (m/s)	Velocidade Propagação de Onda P (m/s)	Compressão Uniaxial (MPa)
		ρ (kg/m³)	η (%)	α (%)				
SP-1	1	2 492	2,18	0,88	17	13,9	-	-
	3b	2 617	0,72	0,28	11	10,7	5 260	106,47
	7a	2 574	3,03	1,17	11	8,7	4 738	131,08
	9	2.654	0,51	0,19	13	7,0	5.888	176,28
SP-2	4	-	-	-	16	15,4	4.389	70,37
	5b	2 576	1,12	0,43	15	8,8	5 661	79,34
	6a	2 552	2,26	0,88	17	9,5	4 642	99,16
	6b	2 591	1,45	0,57	14	11,7	4 735	30,88
	7b	2 462	3,63	1,48	18	19,3	3 485	48,31
	8a	2.569	2,95	1,15	16	12,3	4.882	55,09
	8b	-	-	-	14	-	-	-
SP-1/2	2	2 604	0,77	0,30	10	8,8	5 050	100,26
	3a	2 602	1,56	0,62	13	10,7	5 670	117,18
	5a	2 491	3,69	1,48	15	13,1	4 463	68,03
	10	2.493	4,10	1,65	15	14,0	4.154	75,27

Nota: ρ = massa específica aparente seca;

η = porosidade aparente;

α = absorção d'água aparente.

d) abrasão *Los Angeles*:

- os valores distribuem-se em quatro classes: 10/12%; 12/14%; 14/16% e 16/18%;

e) Impacto Treton:

- os valores distribuem-se em três classes: 5/10%; 10/15% e 15/20%;

f) velocidade de propagação de ondas P:

- os valores distribuem-se em cinco classes: 3500/4000 m/s; 4000/4500 m/s; 4500/5000 m/s; 5000/5500 m/s; 5500/6000 m/s;

g) compressão uniaxial:

- os valores distribuem-se em cincos classes: 25/50 MPa; 50/75 MPa; 75/100 MPa; 100/125 MPa; 125/150 MPa.

Conforme já observado por FRAZÃO, OLIVEIRA (1995) a categorização geomecânica ou tecnológica das amostras estudadas torna-se, entretanto, difícil de ser efetuada, pelo fato de não haver disponibilidade suficiente de dados na literatura sobre características físicas e físico-mecânicas de materiais semelhantes a estes.

Pode-se, contudo, tomar como referência os limites especificados por órgãos normalizadores para escolha de materiais para uso na construção civil. Esta alternativa serviria, entretanto, apenas para simples avaliação.

O QUADRO 3 apresenta limites especificados pela ABNT para diversos usos de materiais em construção civil e os valores obtidos neste estudo.

Nota-se que os valores referentes às propriedades de desgaste (abrasão), tenacidade (impacto) e massa específica categorizam os serpentinitos como materiais de boa qualidade. Não atendem plenamente, contudo, no que toca à porosidade e à absorção.

Quanto às propriedades de resistência à compressão, e à velocidade de propagação de ondas, não há valores especificados pela ABNT.

Os valores individuais da determinação de índices físicos para as amostras estudadas encontram-se nas TABELAS 1 a 13, ANEXO A. Os valores individuais dos ensaios de abrasão Los Angeles, impacto Treton, velocidade de propagação de ondas P e de compressão uniaxial acham-se, respectivamente, nas TABELAS 14 a 17, ANEXO A.

Ensaios	Agregados para Construção	Agregados para Pavimento	Agregados Lastro Ferroviário	Valores Serpentinitos (*)	(**)
Abrasão Los Angeles	máx. 50%	máx.40[1] 50%[2]	máx. 40%	100%	0%
Impacto Treton	n.e.	máx.20[1] 35%[2]	máx. 40%	100%	0%
Massa Específica	n.e.	n.e.	min. 2400 kg/m^3	0%	100%
Porosidade	n.e.	n.e.	máx. 1%	23%	77%
Absorção	n.e.	n.e.	máx. 1%	62%	38%
Compressão	n.e.	n.e.	n.e.	-	
Flexão	n.e.	n.e.	n.e.	-	
Velocidade Propagação de Ondas	n.e.	n.e.	n.e.	-	

Nota: (1) = para base;
(2) = para sub-base;
(*) = quantidade de amostras com valores inferiores aos especificados;
(**) = quantidade de amostras com valores superiores aos especificados;
n.e. = não especificado

QUADRO 3 - Comparação entre os valores especificados pela ABNT para agregados para construção civil e os valores apresentados pelos serpentinitos.

No entanto, a classificação de resistência à compressão uniaxial proposta pela International Society for Rock Mechanics (ISRM, 1978, *apud* NÓBREGA, 1985), permite a categorização dos serpentinitos de Cana Brava da seguinte forma: (QUADRO 4):

Resistência à Compressão Uniaxial (MPa)	Categoria de Resistência	Serpentinitos de Cana Brava
0,2-1,0	extremamente fraca	-
1,0-5,0	muito fraca	-
5,0-25,0	fraca	-
25,0-50,0	medianamente resistente	SP-2
50,0-100,0	resistente	SP-2 e SP-1/2
100,0-250,0	muito resistente	SP-1 e SP-1/2
acima de 250,0	extremamente resistente	-

QUADRO 4 - Classificação de resistência à compressão uniaxial de rochas (ISRM 1978, *apud* NÓBREGA, 1985) e categorização dos serpentinitos de Cana Brava.

O teor de finos da rocha britada, da rocha britada atritada e os valores do ensaio de abrasão Los Angeles executado a partir da rocha britada (CASSOLA, 1995) encontram-se na TABELA 11.

5.2.1. Análise dos materiais com granulometria <0,074 mm

Os resultados das análises mineralógicas dos materiais com granulometria <0,074 mm (#200), procedentes da rocha britada e da rocha britada atritada encontram-se nas TABELAS 12 e 13.

Todas as amostras estudadas apresentavam-se sob a forma de placas de espessura milimétrica relativamente flexíveis, mas facilmente desfeitas quando puxadas com os dedos. Ao microscópio observam-se, freqüentemente, algumas fibras

TABELA 11 - Teores de finos da rocha britada e britada atritada, comparados com os valores do ensaio de abrasão *Los Angeles* da rocha britada **(2ª etapa dos trabalhos)**.

Tipo de serpentinito	**Amostra nº**	**Conteúdo de finos (%) (*)**		**Abrasão Los Angeles da rocha britada (%)**
		Rocha britada	Rocha britada atritada	
SP-1	1	2,84	3,25	16
	9	2,33	2,91	13
SP-2	4	4,98	5,24	14
	6	3,57	3,85	11
	7b	3,46	3,85	13
	8	6,36	6,74	14,5
SP-1/2	2	3,8	4,27	14
	3a	3,04	3,21	11
	5a	4,13	4,56	14
	10	3,46	3,7	7

(*) Dados extraídos de CASSOLA (1995)

TABELA 12 - Análise mineralógica por microscopia óptica do material com granulometria <0,074 mm procedente da rocha britada **(2ª etapa dos trabalhos).**

Tipo de serpentinito		**SP-1**		**SP-2**				**SP - 1/2**			
Amostra nº		**1**	**9**	**4**	**6**	**7b**	**8**	**2**	**3a**	**5a**	**10**
MACROS-COPIA	**Aspecto**	placas	placas	placas	placas	placas	placas	placas	placas	placas	placas
	Cor	pardo-claro	pardo-ró-seo claro	pardo-claro	cinza-claro	cinza-claro	cinza-claro	cinza-claro	bege-claro	cinza-ver-de claro	pardo-ró-seo claro
MICROSCOPIA	**Crisotila**	20	20	20	25	25	25	25	20	25	20
	Antigorita e/ou lizardita	55	40	45	40	40	45	45	40	40	40
	Opaco	20	20	25	25	20	25	25	15	15	25
	Carbonato	3	15	10	5	15	5	5	20	15	15
	Silicatos	2	5	tr	5	tr	tr	5	5	5	tr

Nota: valores em porcentagens avaliadas visualmente.
tr = traços

TABELA 13 - Análise mineralógica por microscopia óptica do material com granulometria <0,074 mm procedente da rocha britada atritada (**2ª etapa dos trabalhos**).

Tipo de serpentinito		**SP-1**		**SP-2**					**SP-1/2**			
Amostra nº		**1**	**9**	**4**	**6a**	**6b**	**7b**	**8**	**2**	**3a**	**5a**	**10**
MACROS-COPIA	**Aspecto**	placas	placas	placas	placas	placas	placas	placas	placas	placas	placas	placas
	Cor	pardo-claro	pardo-ró-seo claro	cinza-claro	cinza-claro	bege-claro	cinza-claro	cinza-claro	cinza-claro	bege-claro	cinza-claro	cinza-claro
MICROSCOPIA	**Crisotila**	25	20	20	40	20	20	30	15	20	15	15
	Antigorita e/ou lizardita	45	35	40	40	35	40	35	45	35	35	40
	Opaco	20	25	30	15	30	25	20	25	25	25	30
	Carbonato	5	15	10	5	15	15	15	10	20	25	10
	Silicatos	5	5	tr	tr	tr	tr	tr	5	tr	tr	5

Nota: valores em porcentagens avaliadas visualmente.
tr = traços

com alongamentos ("aspect ratio") de até 40:1. Do material restante, parte parece aderir às fibras, mas a maior parte parece "flutuar" (observação microscópica).

As cores macroscópicas variam do cinza ao pardo, sempre claros. Acredita-se que esta variação se deva ao estado de oxidação do Fe presente, derivado especialmente da magnetita. Esta, por efeito de intemperismo incipiente, tenderia a transformar-se em hematita e limonita, com conseqüente mudança na coloração da rocha hospedeira.

O material foi examinado, microscopicamente, na sua condição natural de coerência, apesar de tentativas infrutíferas para desintegrá-lo completamente.

Muitas partículas se soltam, mas sempre restam núcleos de emaranhados e aglutinados de difícil observação microscópica. Assim, as porcentagens de cada tipo de mineral, informadas em tabela, estão sujeitas a erros relativamente grandes. Verifica-se portanto, que, salvo pela maior incidência de carbonato em algumas amostras, os demais componentes aparecem em proporções constantes. São eles:

a) fibras - certamente de serpentina Z (crisotila);
b) agregado - agregado microcristalino de lâminas ou plaquetas de antigorita e/ou lizardita; menor quantidade de outros filossilicatos; clorita, talco e, ocasionalmente, brucita;
c) opaco - essencialmente magnetita, podendo também ocorrer cromita ou picotita, hematita e limonita em partículas de 1 a 150 μm;
d) silicatos - alguns restos de olivina, piroxênio, e talvez epídoto em grãos de 10 a 150 μm;
e) carbonato - em partículas de 1 a 150 μm.

Como pode-se observar nas TABELAS 12 e 13, a antigorita e/ou lizardita em agregados é o material predominante em todos as amostras estudadas, seguida da crisotila, ou dos opacos e, em algumas amostras, de carbonato. Os silicatos ocorrem sempre em quantidades acessórias.

As análises mineralógicas do material fino procedente da rocha britada e da rocha britada atritada são muito semelhantes.

A análise por microscopia eletrônica do produto da atrição da amostra 6 revelou que seu aspecto geral, mesmo com um aumento da ordem de 1000x, é de uma "massa" (FOTO 27a). Aumentos da ordem de 30000x (FOTO 27b) revelaram que a "massa" é constituída principalmente de um emaranhado de microfibras. Desse substrato se destacam fibrilas de comprimentos muito diversos, desde 20μm a 200μm

e mais raramente "grãos" subarredondados a subangulosos, variando de 1μm a 20μm. Foram efetuadas análises por dispersão de energia (EDS) de três materiais (FOTO 27c e FIGURAS 15 (a)/(c)) um com morfologia fibrosa (crisotila, sem dúvida) e outros com aspecto "granular". Todos forneceram espectro de serpentina.

5.3. Caracterização tecnológica das fibras brutas

5.3.1. Caracterização mineralógica

As amostras de fibras brutas foram analisadas macroscopicamente, por microscopia óptica, por difração de raios X, análise termodiferencial e termogravimétrica (ATD e ATG). As TABELAS 14 e 15 resumem as principais características das fibras.

Macroscopicamente apresentam cor verde, brilhante, são compactas, flexíveis e sedosas ao tato. Localmente podem ser atravessadas por magnetita, ou serpentina amorfa. Intercalações de rocha de cor cinza-escura também são observadas. São comuns fibras dobradas e quebradas. As FOTOS 28 (a)/(b) ilustram aspectos macroscópicos das fibras.

Na 1ª etapa dos trabalhos foi examinado um tipo de fibra "fosca", esbranquiçada. Constatou-se que ela se diferencia das outras fibras, brilhantes, apenas porque sua superfície externa encontra-se mais alterada, por efeito de intemperismo. Internamente, o feixe de fibras é igual às outras fibras *cross* examinadas. O exemplar de fibra da Mina de Cassiar apresenta características muito semelhantes às da Mina de Cana Brava.

As amostras estudadas são compostas essencialmente por serpentina; podem ocorrer pequenas quantidades de hematita, quartzo e/ou mica; calcita, brucita e dolomita também podem estar presentes.

As curvas TD e TG indicam três eventos distintos: o primeiro, identificado como pico endotérmico (variando de 101°C a 139°C), representa a perda de água higroscópica; o segundo, caracterizado também como pico endotérmico (variando de 663°C a 680°C) e associado à maior perda de massa, deve-se à liberação da água estrutural (composicional) da serpentina; o último evento, identificado como pico exotérmico próximo a 808°C, indica a transformação do retículo cristalino, possivelmente com formação de forsterita (FIGURA 16 (a)/(b)). As curvas de ATD da crisotila de Cana Brava exibem a mesma configuração apresentada por NEMECZ (1981),

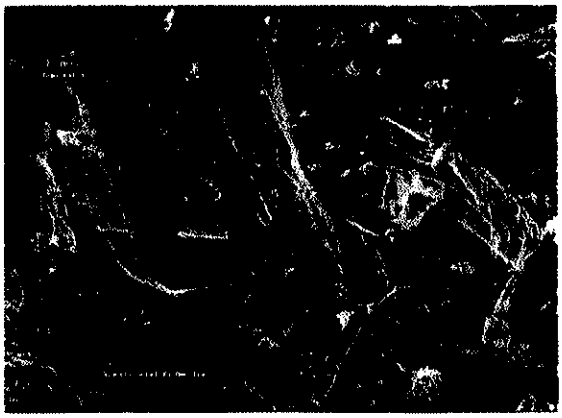


FOTO 27a - Aspecto geral dos finos da rocha britada atritada sob microscópio eletrônico de varredura (MEV). (Amostra 6).

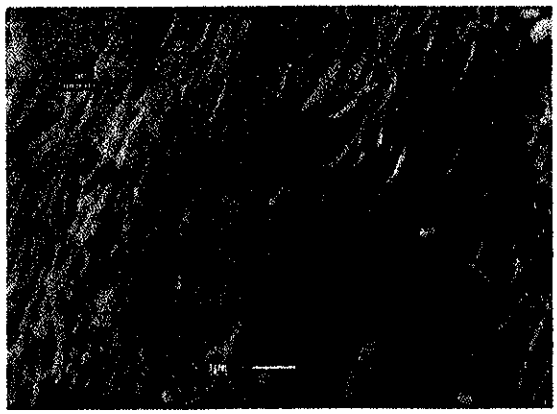


FOTO 27b - Detalhe do "substrato" observado da foto anterior, com abundância de microfibras de crisotila.

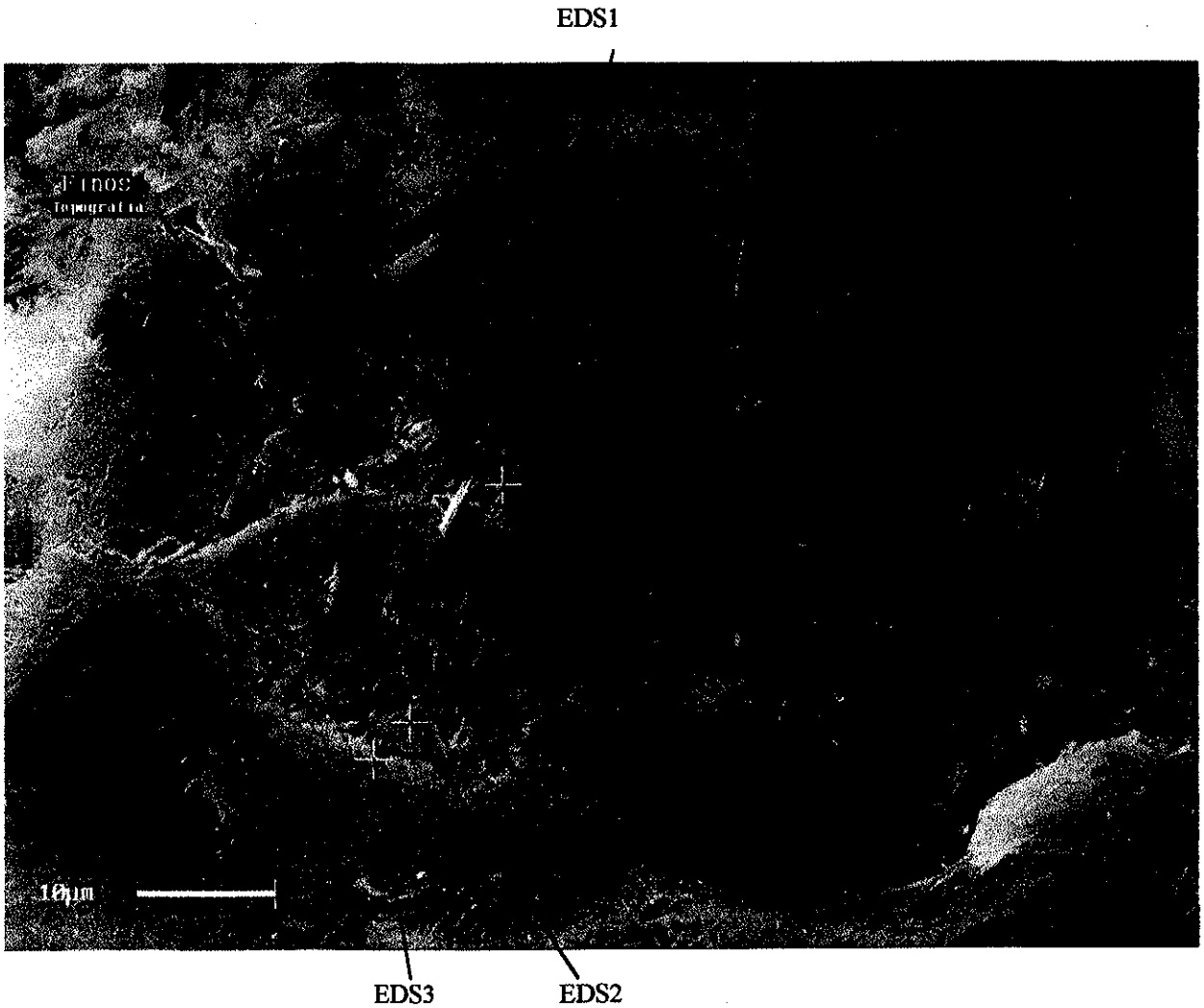


FOTO 27c - Detalhe do "substrato" da foto 27b; o sinal "+" marca os locais onde se fez EDS (FIGURA 15 (a)/(c)).

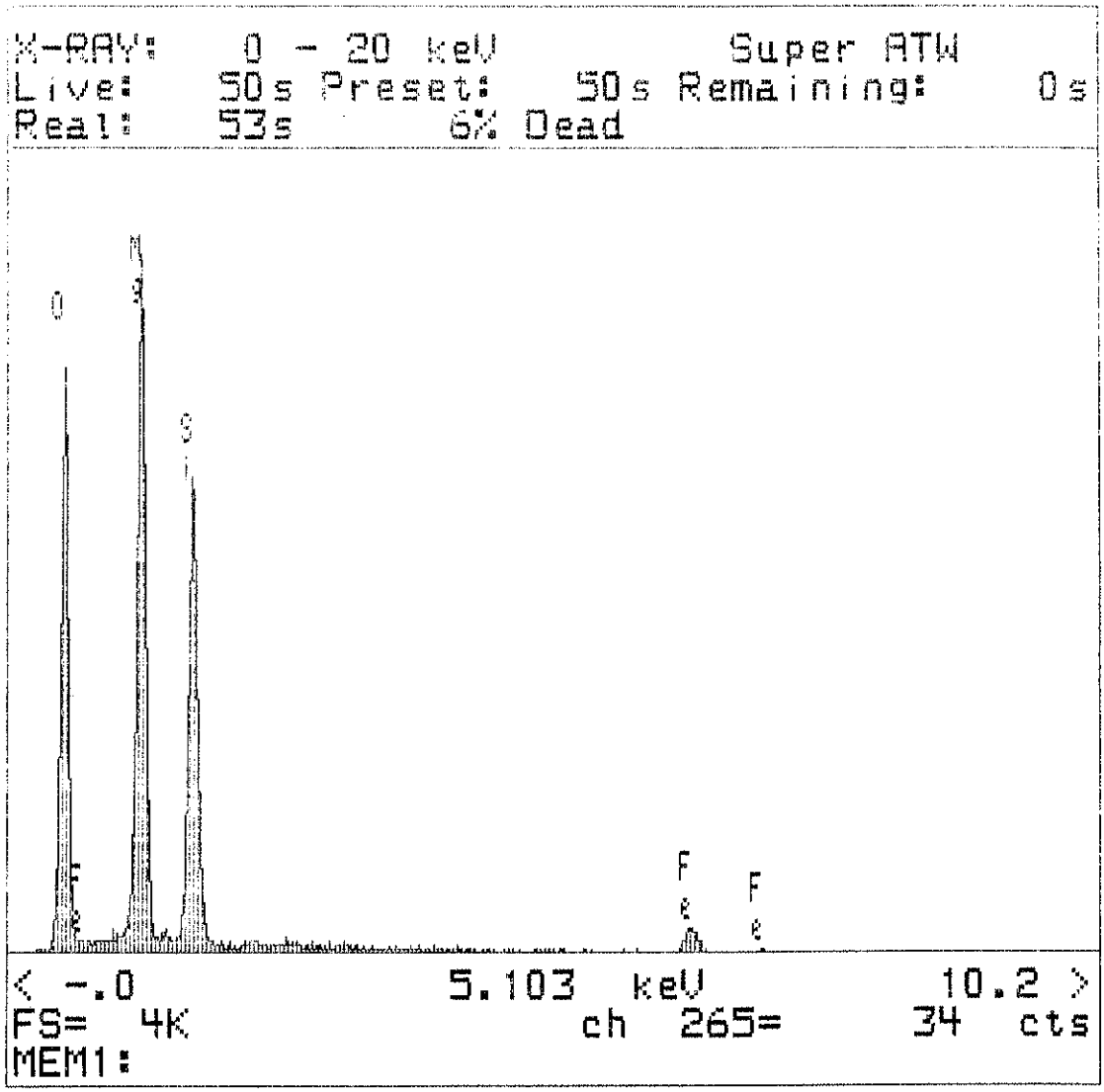


FIGURA 15a - Análise por dispersão de energia (EDS1) de material fibroso (crisotila).

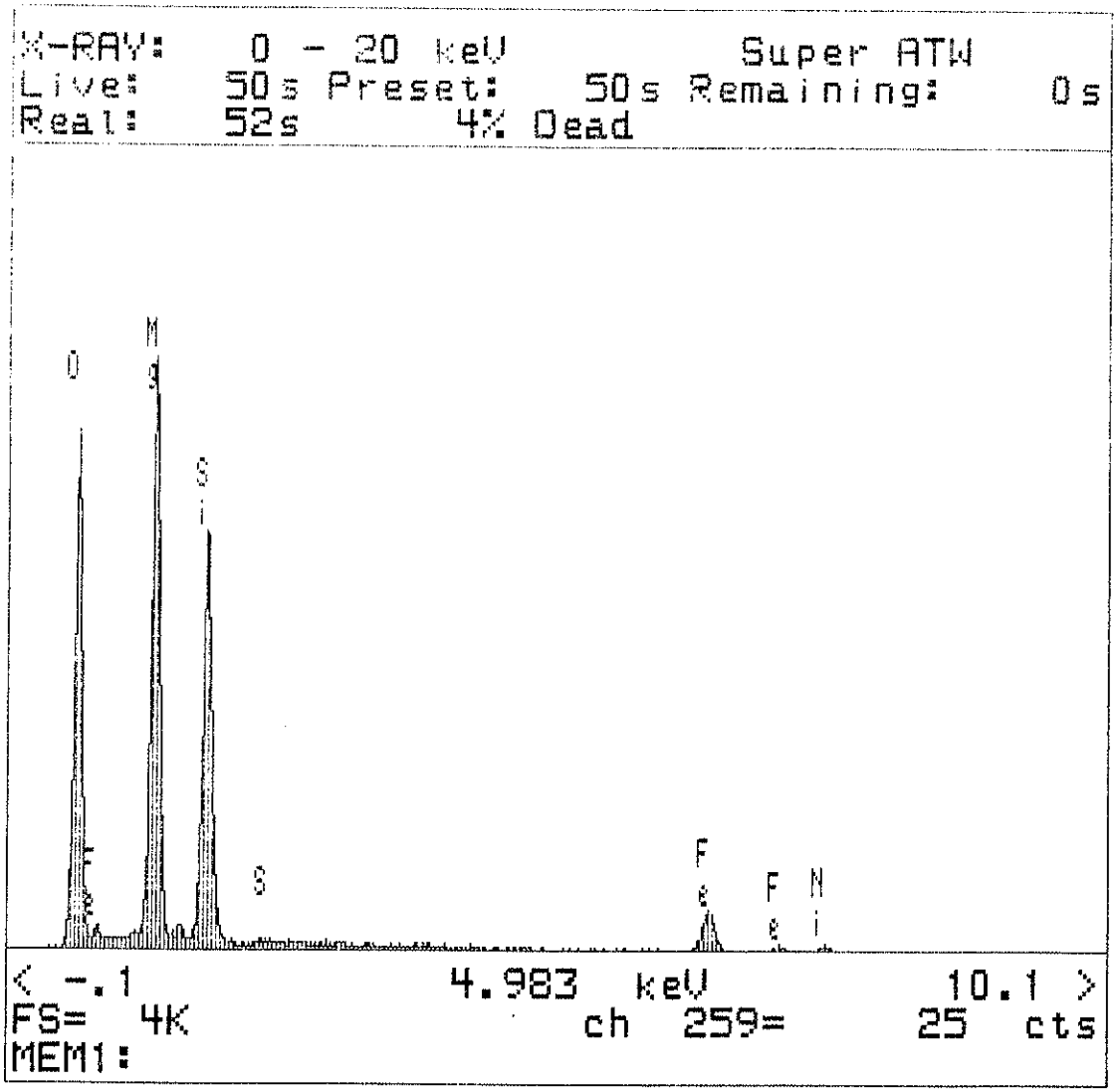


FIGURA 15b - Análise por dispersão de energia (EDS2) de material granular (serpentina).

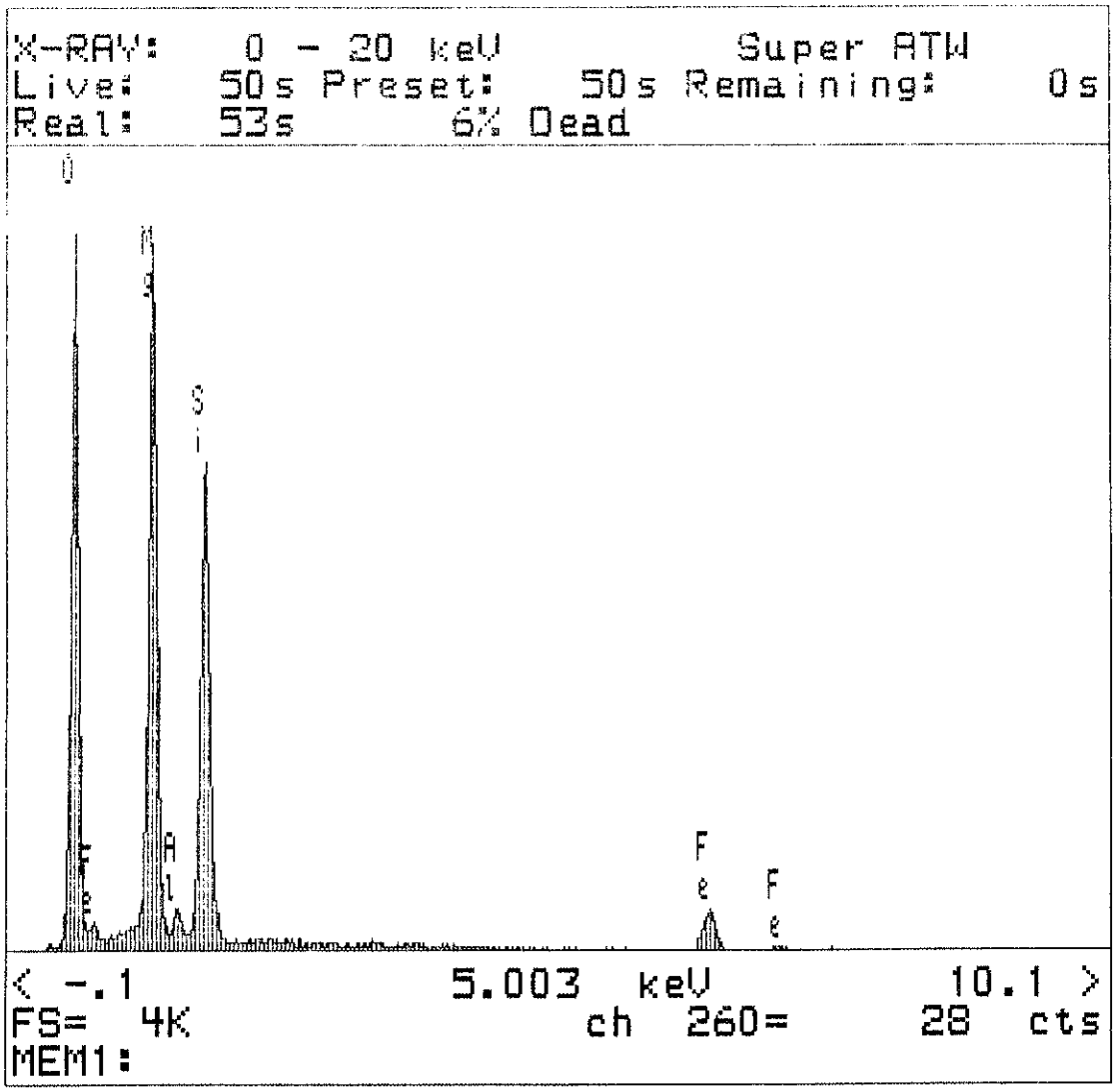


FIGURA 15c - Análise por dispersão de energia de material granular (serpentina).

TABELA 14 - Caracterização mineralógica das amostras de fibras brutas **(1ª etapa dos trabalhos).**

Amostra	Características da Rocha Encaixante	Características Macroscópicas	Difração de Raios X	Óptica	ATD		ATG	
					T	Evento	T	Perda de Massa
B-328NW (*cross*)	Predomínio de serpentinito tipo 1. Parede do veio é de serpentinito tipo 2.	Cor verde, brilhante, compacta, flexível, longa (compr. médio de 12 mm)	crisotila e calcita subordinada	Incolor $n_z = 1,554$ $n_x = 1,545$ n_z-$n_x = 0,009$	106 °C 679 °C 820 °C	- perda da água de absorção - perda da água estrutural - formação de forsterita (e enstatita)	28-324 °C 324-717 °C 717-1000 °C Resíduo a 1000°C	5,56% 11,43% 0,60% 82,41%
B-308W (*cross*)	Predomínio de serpentinito tipo 2.	Cor verde, brilhante, compacta, flexível, longa (compr. médio de 20 mm). Presença de magnetita no topo e na base das fibras.	crisotila	Incolor $n_z = 1,554$ $n_x = 1,546$ n_z-$n_x = 0,008$	112 °C 407 °C 670 °C 821 °C	- perda da água de absorção - desidratação de goethita - perda da água estrutural - formação de forsterita (e enstatita)	33-205°C 205-588 °C 588-1000 °C Resíduo a 1000°C	4,68% 6,59% 6,59% 82,14%
B-318SW (*slip*)	Predomínio de serpentinito tipo 1. Presença de material verde-claro a amarelo preenchendo fraturas (piroaurita + agregado serpentínico + crisotila fina).	Cor verde, brilhante, sedosa ao tato, compacta, quebradiça, ondulada (compr. médio de 30 mm). Presença de magnetita in-clusive no interior das fibras.	crisotila hematita, brucita, dolomita e quartzo subordinados	Incolor $n_z = 1,558$ $n_x = 1,548$ n_z-$n_x = 0,010$	98 °C 415 °C 676 °C 823 °C	- perda da água de absorção - desidratação de goethita e/ou brucita - perda da água estrutural - formação de forsterita (e enstatita)	23-357 °C 357-599 °C 599-1000 °C Resíduo a 1000°C	5,51% 5,29% 7,80% 81,40%
"Fosca" R4 (*cross*)	Predomínio de serpentinito tipo 1.	Cor branca na superfície dos feixes, fosca, macia. Para o terior do veio, vai se tornando mais verde e brilhante e também mais com-pacta. Longa (compr. médio de 15 mm)	Superfície: crisotila e calcita subordinada	Incolor	104 °C 673 °C 821 °C	- perda da água de absorção - perda da água estrutural - formação de forsterita (e enstatita)	24-127 °C 127-618 °C 618-712 °C 712-1000 °C Resíduo a 1000°C	3,24% 7,73% 7,21% 0,93% 80,89%
			Interior: crisotila	$n_z = 1,554$ $n_x = 1,546$ n_z-$n_x = 0,008$	101 °C 671 °C 823 °C	- perda da água de absorção - perda da água estrutural - formação de forsterita (e enstatita)	23-125 °C 125-555 °C 555-714 °C 714-1000 °C Resíduo a 1000°C	2,83% 3,94% 10,14% 0,72% 72,33%
Fibra da Mina de Cassiar (Canadá) (*cross*)	-	Cor verde, brilhante, compacta, longa (compr. médio de 40 mm)	crisotila	Incolor $n_z = 1,556$ $n_x = 1,545$ n_z-$n_x = 0,011$	101 °C 674 °C 823 °C	- perda da água de absorção - perda da água estrutural - formação de forsterita (e enstatita)	24-267 °C 267-564 °C 564-721 °C 721-1000 °C Resíduo a 1000°C	5,59% 3,56% 8,47% 0,70% 81,28%

Nota: n_z = índice máximo de refração
n_x = índice mínimo de refração
n_z - n_x = birrefringência máxima.

TABELA 15 - Caracterização mineralógica das amostras de fibras brutas **(2ª etapa dos trabalhos).**

Amostra nº	Características Macroscópicas	Difração de Raios X	ATD		ATG		Caract. Ópticas
			T	Evento	T	Perda Massa	
1	**Comprimento:** 3,0 a 20 mm **Assoc.ou Intercalações:** Fibra *slip* Serpentina amorfa Rocha cinza-escura cisalhada Magnetita **Aspecto Fibras:** Dobradas e quebradas	Serpentina(p)	120°C 680°C 805°C	Perda d'água de absorção Perda d'água estrutural Formação de forsterita (e enstatita)	25-340°C 340-730°C 730-1000°C Resíduo a 1000 °C	5,75% 11,6% 0,7% 82,0%	Cor: Incolor n_z: 1,556 n_z-n_x= 0,009 Observam-se algumas fraturas com material da rocha hospedeira e magnetita inclusa. Próximo destas fraturas a crisotila apresenta-se pleocróica: z = amarelo-limão; x = amarelo a laranja. Nestas zonas: Nz = 1,561 Nz-Nx=0,011
2	**Comprimento:** 5,0 a 20 mm **Assoc.ou Intercalações:** Magnetita Rocha cinza-escura **Aspecto Fibras:** Quebradiças	Serpentina(p)	120°C 671°C 812°C	Perda d'água de absorção Perda d'água estrutural Formação de forsterita (e enstatita)	25-340°C 340-730°C 730-1000°C Resíduo a 1000 °C	6,7% 10,5% 0,8% 82,0%	
3	**Comprimento:** 10 a 20 mm **Assoc.ou Intercalações:** Magnetita Piroaurita **Aspecto Fibras:** Onduladas	Serpentina(p)	140°C 670°C 810°C	Perda d'água de absorção Perda d'água estrutural Formação de forsterita (e enstatita)	25-350°C 350-730°C 730-1000°C Resíduo a 1000 °C	7,2% 9,4% 0,7% 82,7%	
5	**Comprimento:** 10 a 25 mm **Assoc.ou Intercalações:** Magnetita Carbonato Rocha cinza-escura Serpentina amorfa **Aspecto Fibras:** Flexíveis e retilíneas	Serpentina(p) Calcita (s)	100°C 665°C 810°C	Perda d'água de absorção Perda d'água estrutural Formação de forsterita (e enstatita)	25-355°C 355-730°C 730-1000°C Resíduo a 1000 °C	8,0% 8,0% 0,50% 83,5%	
6	**Comprimento:** 15 a 25 mm **Assoc.ou Intercalações:** Rocha cinza-escura Magnetita Serpentina amorfa **Aspecto Fibras:** Quebradiças localmente	Serpentina (p) Hematita (s) Quartzo (s)	130°C 675°C 805°C	Perda d'água de absorção Perda d'água estrutural Formação de forsterita (e enstatita)	25-345°C 345-730°C 730-1000°C Resíduo a 1000 °C	7,1% 10,8% 0,6% 81,5%	
7	**Comprimento:** 4,0 a 20 mm **Assoc.ou Intercalações:** Magnetita Rocha cinza-escura Serpentina amorfa **Aspecto Fibras:** Quebradiças localmente	Serpentina(p) Mica (s) Hematita (s)	120°C 680°C 810°C	Perda d'água de absorção Perda d'água estrutural Formação de forsterita (e enstatita)	25-335°C 335-730°C 730-1000°C Resíduo a 1000 °C	5,3% 10,8% 0,8% 83,1%	

Nota: (p) = predominante; (s) = subordinada
n_z = índice máximo de refração
n_z - n_x = birrefringência máxima

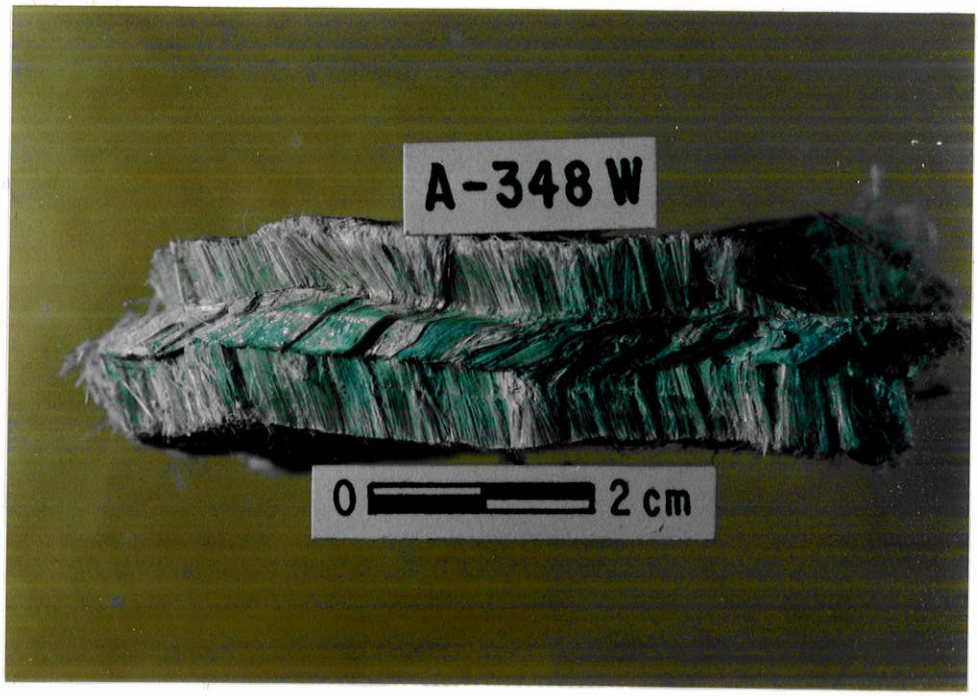


FOTO 28 (a) - Aspecto de vênula de fibras de crisotila, destacada da rocha, observando-se fibras retilíneas e crenuladas, de gerações distintas (Amostra 1).

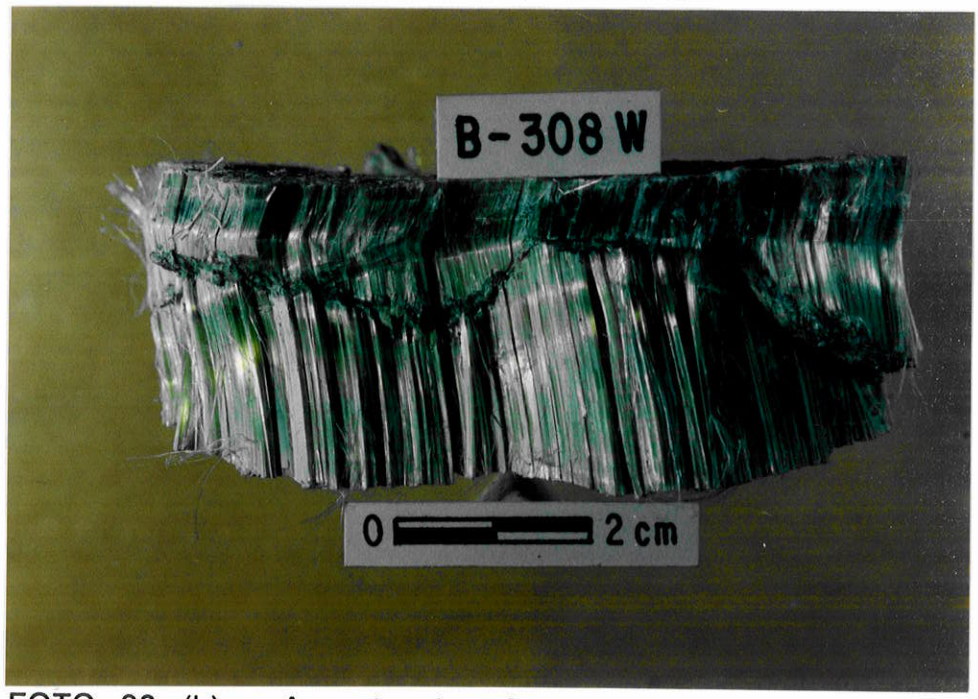


FOTO 28 (b) - Aspecto de vênula de fibras de crisotila, destacada da rocha. Ao longo da fratura ocorrem cristais de magnetita (Amostra 6).

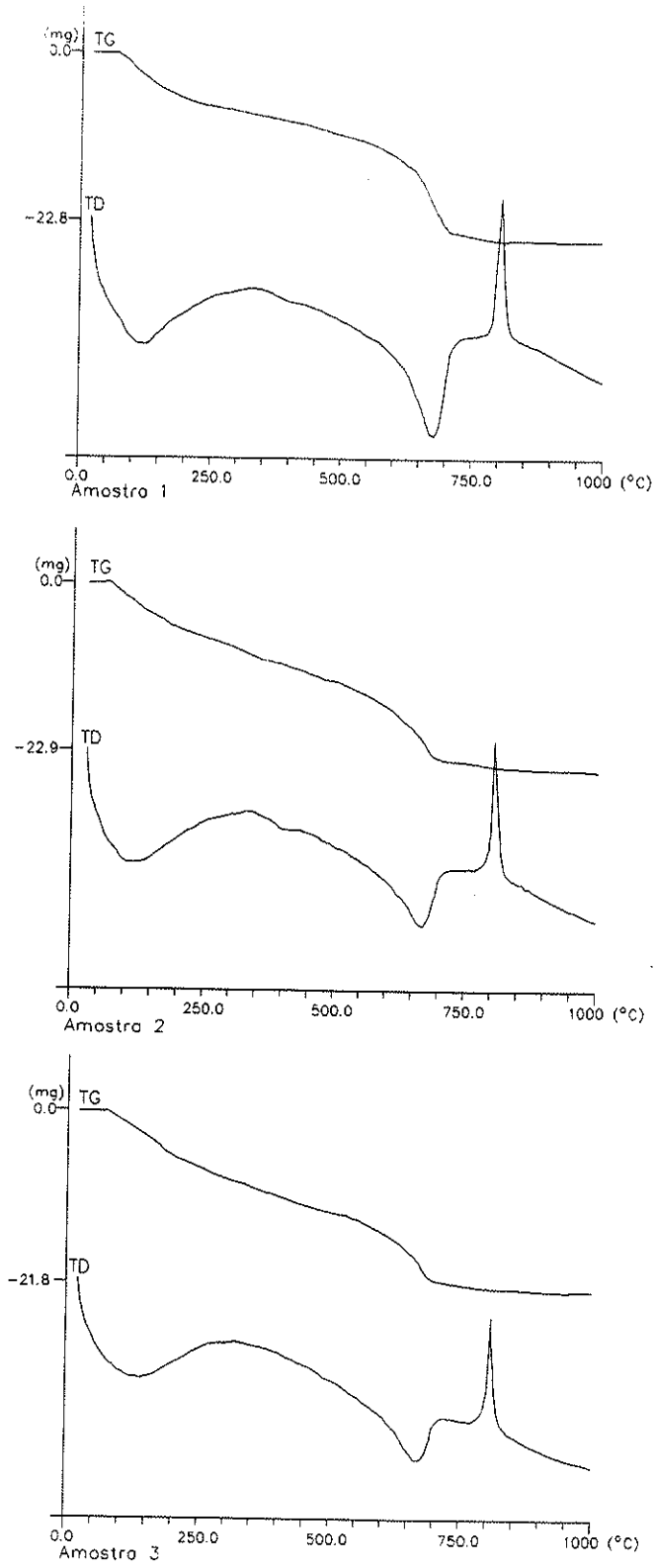


FIGURA 16a - Curvas TG e TD das amostras de fibras brutas 1, 2 e 3 (2ª etapa dos trabalhos).

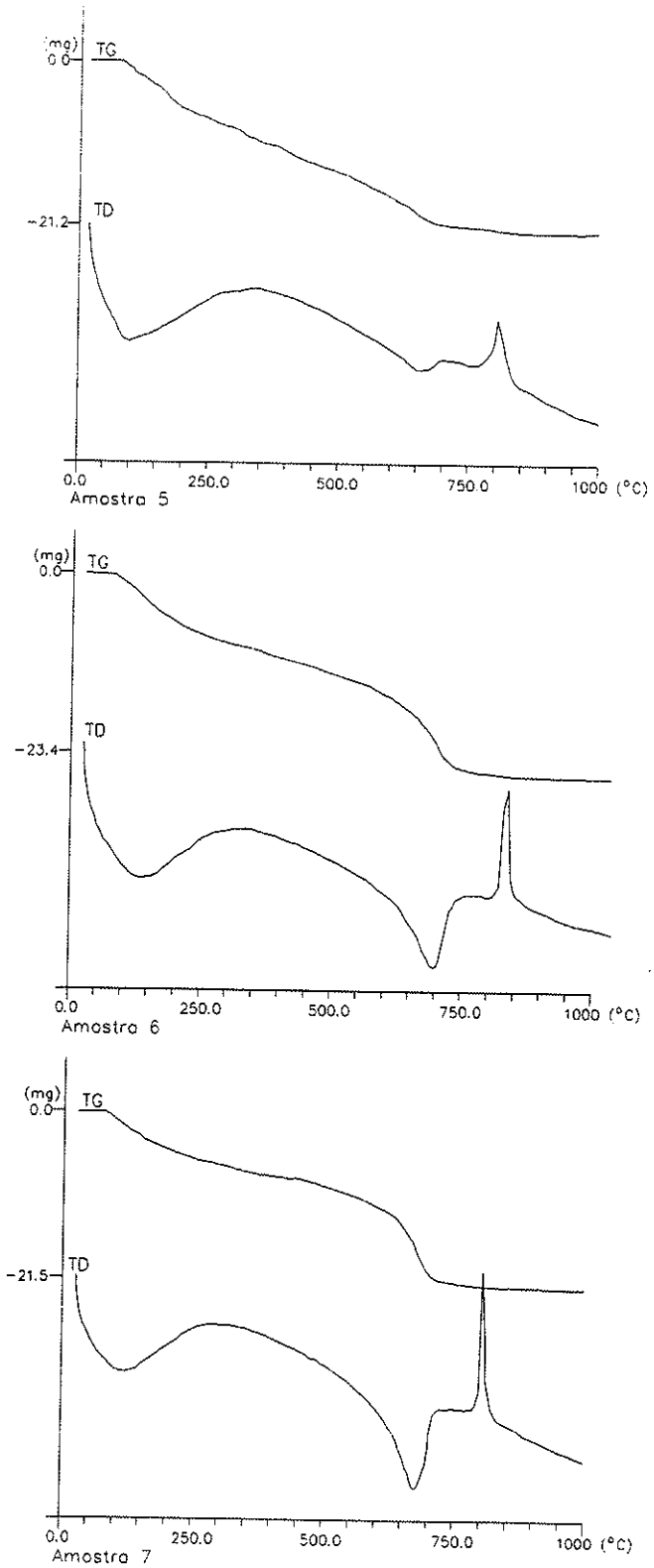


FIGURA 16b - Curvas TG e TD das amostras de fibras brutas 5, 6 e 7 (2ª etapa dos trabalhos).

porém diferem daquela apresentada por SMYKATZ-KLOSS (1974). Segundo NEMECZ (1981) granulometrias diferentes podem ser a causa de configurações distintas para o mesmo mineral. Diferenças nas composições químicas também poderiam resultar em curvas diferenciadas.

A amostra 6 foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (FOTOS 29 (a)/(b)), observando-se que a superfície dos feixes é limpa, as fibras são predominantemente retilíneas e na zona de rompimento as fibrilas apresentam ligeira abertura. Os feixes são coesos, compactos, sem fibrilas isoladas. Nos pontos de flexão observa-se algum arrancamento de fibrilas. Raríssimas fibrilas destacam-se dos feixes; não se observa material fino associado às fibras.

Os espectros de infra-vermelho das cinco amostras analisadas apresentam três picos de absorção entre 950 e 1100cm^{-1}, muito bem definidos (FIGURAS 17 (a)/(b)), como era esperado para fibras *cross*, de alta resistência à tração (VARFALOMEYEVA, IVOYLOVA, LUZIN, 1983). Essa região do espectro, correspondente às ligações Si-O, é muito semelhante para todas as amostras, confirmando seus valores muito próximos de resistência à tração.

5.3.2. Caracterização mecânica

Estudos anteriores

Na natureza são observadas vênulas de dois tipos de fibras de crisotila: a fibra *cross* e a fibra *slip*, com histórias geológicas distintas. Na mina de Cana Brava as fibras *slip* correspondem a estrias de atrito, enquanto as fibras *cross* são o resultado de cristalização por tração, e ambas podem ter se formado na mesma época, porém sob condições tectônicas distintas.

Os veios preenchidos por fibra *cross* teriam se formado pela abertura de descontinuidades pré-existentes, por efeito de estiramento, o que teria criado espaços para a percolação de fluidos. As fibras *slip* aparecem ao longo de planos de falhas, tendo-se formado durante toda a história deformacional do maciço (HASUI, MAGALHÃES, MANGOLIN Fº, 1992).

Vários pesquisadores (MARTINEZ, COMER, 1964; BRYANS, LINCOLN, 1971, 1975; MARTIN, PHILLIPS, 1977; etc.) estudaram o comportamento das fibras *cross* (macias, flexíveis) e *slip* (quebradiças), apontando diferenças importantes entre elas no que diz respeito à resistência à tração, pesquisando o modo de fratura das mesmas, seu comportamento mecânico após aquecimento a várias temperaturas e quando submetidas à cominuição.

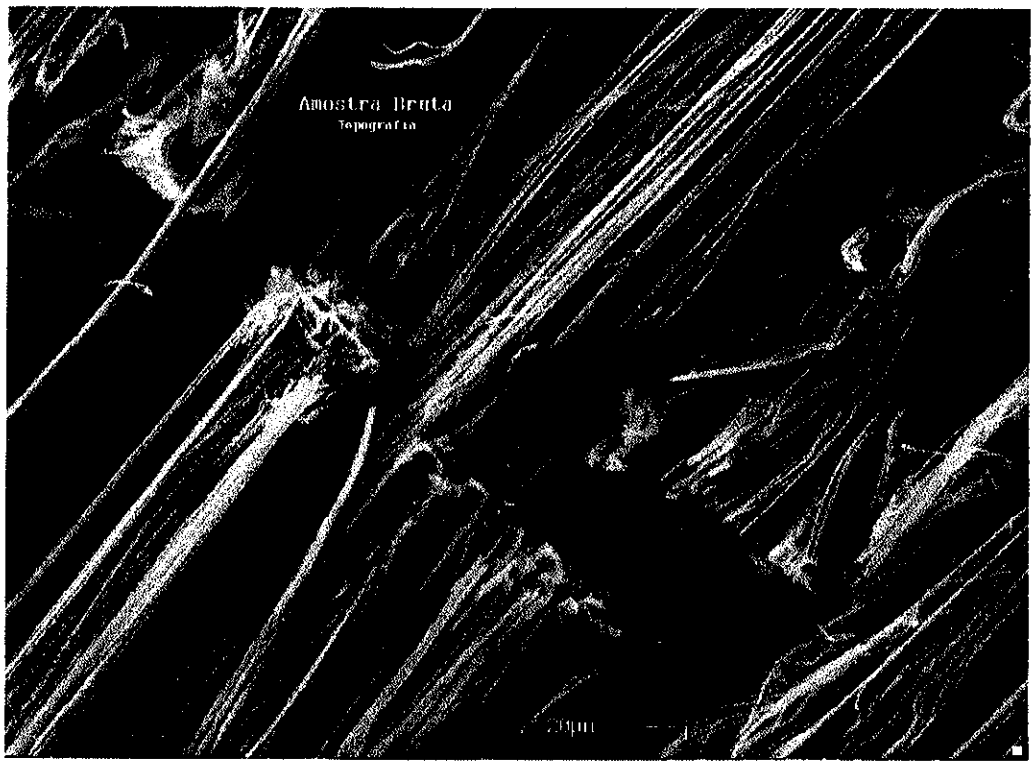


FOTO 29(a) - Aspecto dos feixes de fibra bruta sob microscópio eletrônico de varredura (MEV). (Amostra 6).

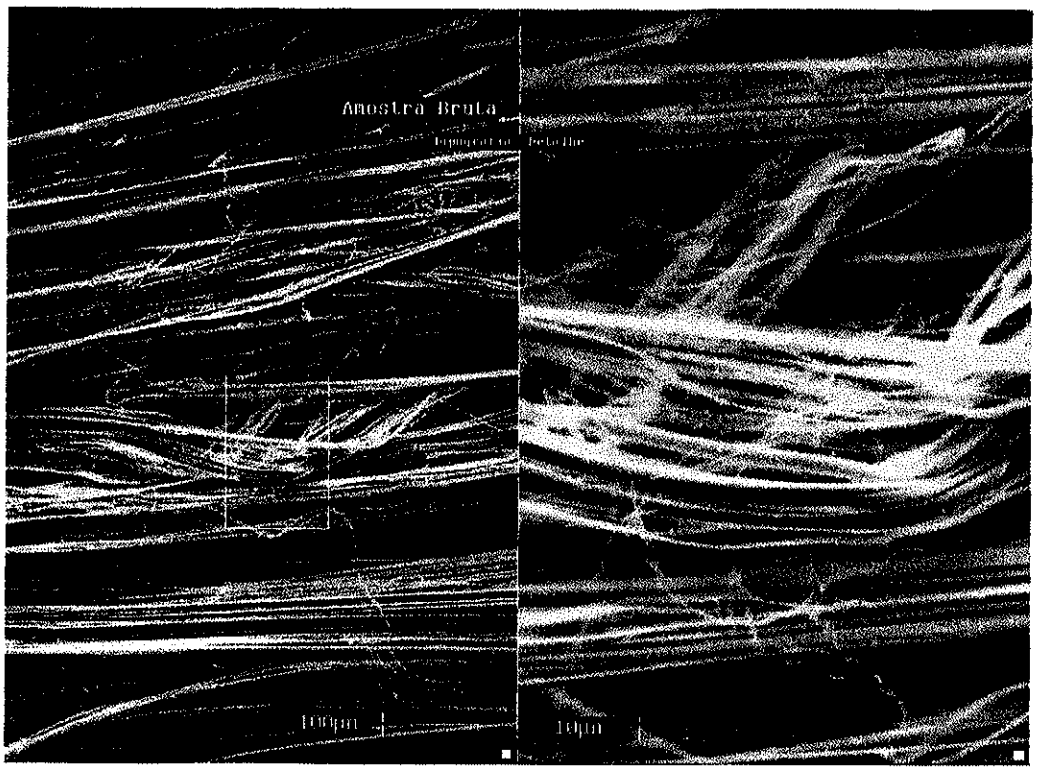


FOTO 29(b) - Detalhes dos feixes de fibrilas levemente flexionadas.

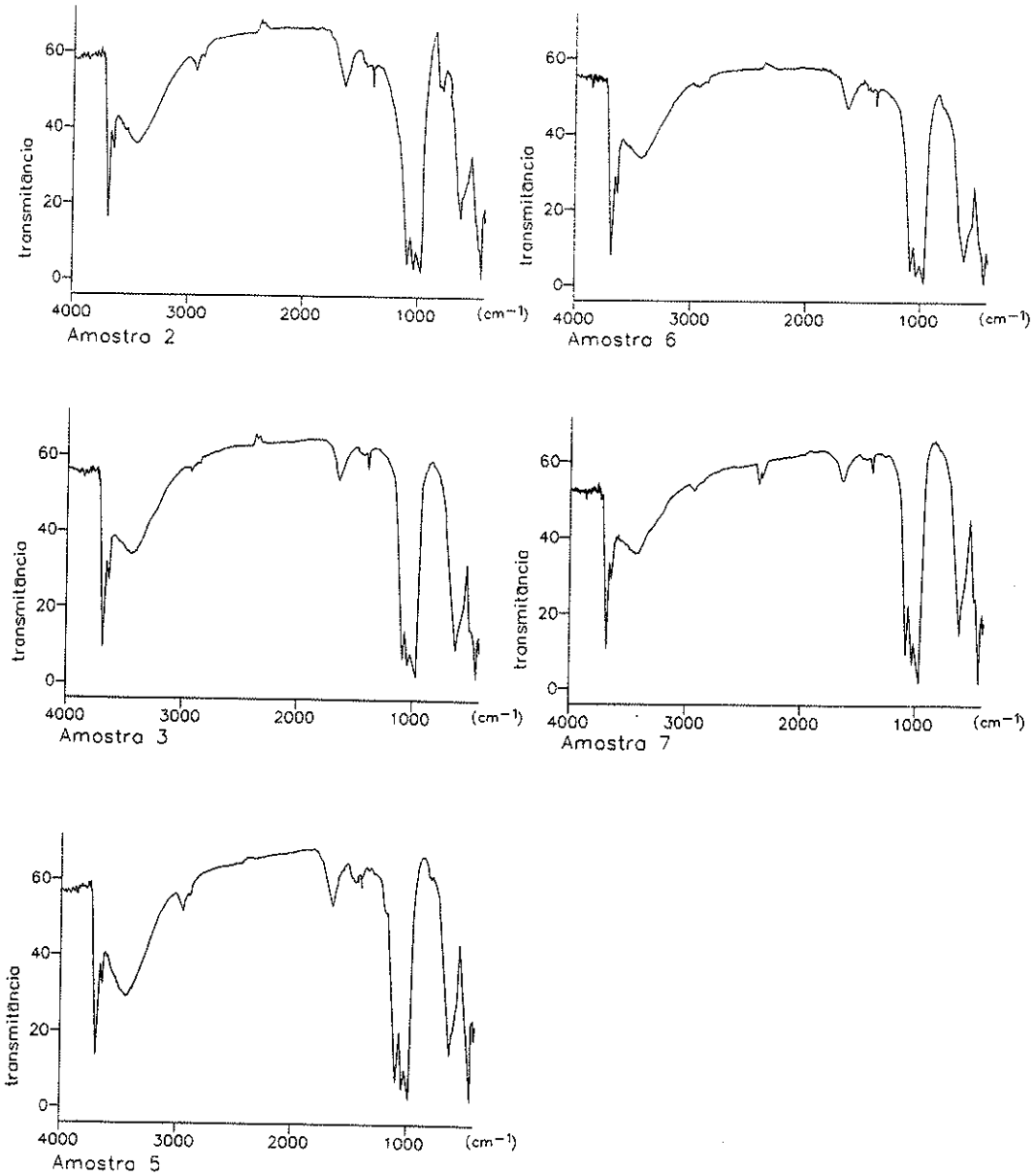


FIGURA 17a - Espectros de infra-vermelho das amostras de fibras brutas (2ª etapa dos trabalhos).

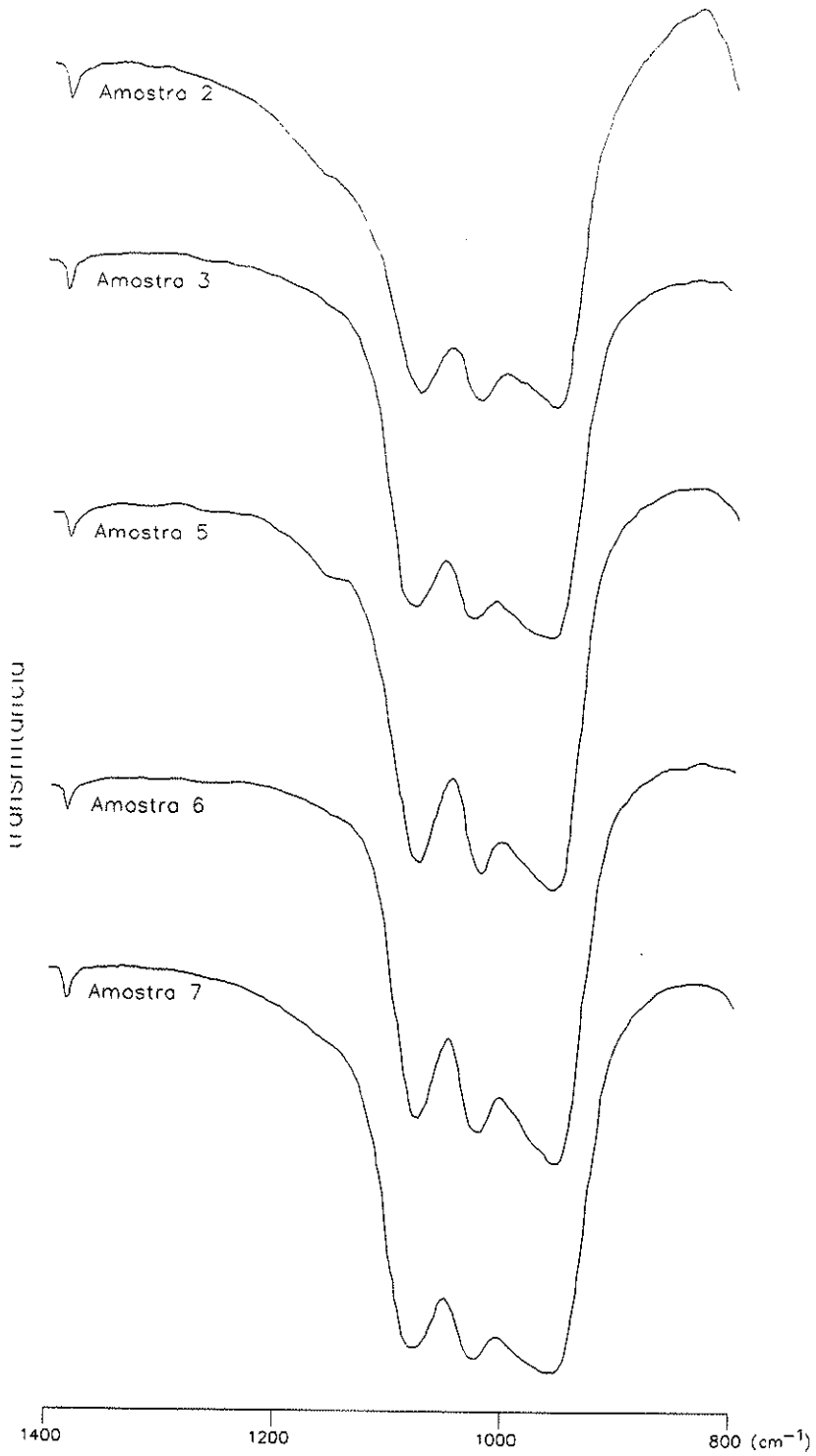


FIGURA 17b - "Zoom" dos espectros de infra-vermelho das amostras de fibras brutas (2ª etapa dos trabalhos).

As fibras *slip* (quebradiças) não serão tratadas neste trabalho, pois sua expressão volumétrica na Mina de Cana Brava é desprezível.

O estudo da resistência à tração das fibras tem mostrado que os valores de resistência à tração são dependentes do comprimento das fibras testadas, e os menores comprimentos (2 a 35mm) resultam nas mais altas resistências (HODGSON, 1979). Os altos valores de resistência à tração dos silicatos devem-se a dois fatores: à resistência das cadeias estáveis de sílica-oxigênio, característica desses minerais, e à pressão coesiva dos sólidos. Para ocorrer a ruptura dessa espécie mineral é necessário que ambos os fatores sejam equalizados (ZUKOWSKI, GAZE, 1959).

Muitos estudos mostraram que o fraturamento da fibra ocorre principalmente pela ruptura de fracas ligações interfibrilares, e não por fraturas de tração legítimas da fibra (HODGSON, 1979).

Em comparação com valores de resistência à tração de outras fibras, a crisotila aparece com o valor mais alto de resistência à tração máxima, ao redor de 1320 MPa. O fio de aço, conhecido pela sua alta resistência, atinge 550 MPa. A fibra de vidro aparece em terceiro lugar, com uma resistência de até 495 MPa. As fibras de algodão (196 MPa), nylon (entre 125 Mpa e 184 MPa), seda (130 MPa), apresentam valores bastante inferiores à crisotila (HANDBOOK OF ASBESTOS TEXTILES, 1967).

MARTIN, PHILLIPS (1977) comparam a fibra de crisotila a um compósito quebradiço-frágil, constituído por fibrila e material interfibrilar. Assim, modificações interfibrilares resultariam em alterações nas propriedades de tensão macroscópicas, como acontece em compósitos de cimento reforçados com vidro (BRYANS, LINCOLN 1975). Vários trabalhos têm demonstrado a importância das propriedades da interface fibra-matriz no comportamento mecânico dos compósitos (MAJUMDAR, 1974; KIYOHARA, 1991; SAVASTANO JR., 1992).

Quando uma fibra quebra dentro de um compósito, ela para de receber sua porção de carga somente na região próxima da ruptura, uma vez que a carga é transferida entre as partes separadas da fibra, por forças de cisalhamento na matriz. A carga recebida pela fibra rompida aumenta de zero, na ruptura, até seu valor original, a uma distância S da ruptura, sendo S proporcional à E_J/G_b, onde E_J = módulo elástico da fibra e G_b = módulo de cisalhamento da matriz (ROSEN 1964, 1965, *apud* BRYANS, LINCOLN 1971). Quando a interface é fraca, S é grande e vice-versa. O valor S, conhecido como comprimento não efetivo, foi considerado como o comprimento de um feixe unitário.

Estes conceitos podem ser aplicados à crisotila se as fibrilas forem

consideradas como fibras suportantes de carga e o material interfibrilar como matriz. Cada fibrila pode ser subdividida em uma série de anéis de comprimento *S*, cada uma tendo uma resistência pequena. As ligações paralelas e as interfaces entre elas compõem os feixes unitários. Quando tal modelo recebe carga, as ligações interfibrilares se romperão, mas segundo BRYANS, LINCOLN (1971) o efeito só será observado na curva carga *versus* alongamento (para as fibras flexíveis) se:

a) as ligações se interromperem em direções variadas nos feixes vizinhos; nesse caso todas as fibrilas apresentarão pelo menos uma fratura, existindo duas possibilidades:
   - a próxima interrupção dar-se-á pelo rompimento de um número suficiente de ligações fibrilares, em posições diversas;
   - dá-se o rompimento de uma série de ligações adjacentes, provocando cisalhamento por tração nas regiões interfibrilares próximas do rompimento da fibrila, tendendo a iniciar o fraturamento longitudinal e uma tração radial através das interfaces, facilitando a propagação da fratura ao longo do comprimento do feixe. Este comportamento ocorrerá desde que o início do cisalhamento não resulte em um decréscimo imediato na carga registrada, sendo provavelmente o fenômeno relatado por ZUKOWSKI, GAZE (1959) e denominado por eles de deformação plástica;

b) a carga foi suficiente para causar cisalhamento interfibrilar, conduzindo a rompimentos por arrancamento fibrilar.

BRYANS, LINCOLN (1975) efetuaram experiências de cominuição com as fibras, e concluíram que os danos sofridos pelas fibrilas durante o tratamento mecânico apresentam um efeito relativamente pequeno nas propriedades de tensão macroscópica da fibra.

Estes autores verificaram que as fibras *cross* apresentam tanto módulo de cisalhamento como resistência ao cisalhamento da região interfibrilar aumentados após aquecimento a 450°C, aumentando a resistência à tração da fibra como um todo.

Segundo MARTIN, PHILLIPS (1977), alguma desidratação ocorre, quando se aquece a fibra por algumas horas, mas isso parece ser devido à expulsão da água da matriz, porque a estrutura da fibrila permanece intacta até pelo menos 550°C (REIMSCHUSSEL, 1975 *apud* MARTIN; PHILLIPS, *op.cit.*). Segundo SPEIL, LEINEWEBER (1969), a esta temperatura a fibra alcança sua resistência máxima. Sob a influência do calor numa temperatura ao redor de 800°C, a resistência à tração da maioria das fibras aumenta suavemente, antes de rapidamente diminuir, quando

mudanças estruturais e composicionais acontecem. A diminuição da resistência a altas temperaturas ocorre, inicialmente, através de mudanças estruturais, como a perda de um pouco de água estrutural no caso da crisotila (SPEIL, LEINEWEBER, 1969). Essas perdas de água nos estágios iniciais da desidratação da crisotila estão provavelmente associadas à redução das ligações laterais entre as fibrilas, desencadeando uma redução da resistência à tração da fibra (HODGSON, 1979). Após essa fase inicial, predominam a desidroxilação e rearranjos estruturais, e a eventual resistência a altas temperaturas das fibras corresponde somente entre 10 a 20% de sua resistência original.

MARTIN, PHILLIPS (1977) observaram que a resistência das forças de ligação depende dos seguintes fatores:

a) da magnitude das forças atômicas entre a camada externa de hidróxido de magnésio (brucita) da fibra e o material da matriz;
b) da área de contato entre a fibra e a matriz, sobre as quais estas forças podem agir;
c) da textura da interface matriz-fibra, que determina a facilidade com que as fibrilas deslizam umas sobre as outras.

O caráter físico, então, torna-se dependente da extensão dos espaços preenchidos entre as fibrilas e da composição química da matriz. Medidas de densidade das fibras feitas por vários autores, como HUGGINS, SHELL (1965) *apud* MARTIN, PHILLIPS (1977), indicaram que há uma variação no volume de vazios, mas não está claro o quanto destes espaços vazios podem ser devidos aos centros ocos das fibras.

Amostras procedentes da Mina de Cassiar, no Canadá, foram aquecidas a 450°C por poucas horas, quando então suas propriedades mecânicas foram testadas. A maior parte das fibras se rompeu por fratura simples e menos por arrancamento fibrilar (MARTIN, PHILLIPS, *op.cit.*). Se os espaços intrafibrilares destes espécimes estivessem quase vazios, a desidratação da camada mais externa das fibrilas individuais deveria ter ocorrido mais prontamente a uma temperatura abaixo da qual ocorrem mudanças visíveis. Isto interromperia as superfícies uniformes e aumentaria as forças de ligação friccional entre as fibrilas.

A quantidade de impurezas na matriz é provavelmente maior que no conjunto fibra-matriz. Sua importância na determinação das forças de coesão entre as fibras é grande.

As observações sugerem que a textura externa das fibras deve-se tanto à quantidade de material na matriz como à sua composição química e granulometria. MARTINEZ, COMER (1964) observaram que o material interfibrilar presente em amostras de fibra quebradiça (*slip*) apresenta granulometria mais grossa que o das fibras flexíveis (*cross*). A camada mais externa das fibrilas é hidróxido de magnésio, assim os principais mecanismos de coesão interfibrilar parecem ser a ligação do hidrogênio e a ligação de Van Der Waal's. Se não houvesse material ocupando os espaços entre as fibrilas, este seria o único tipo de ligação, e como a área de contato entre as fibrilas adjacentes é limitada, a força de ligação seria fraca. É possível que a textura sedosa das amostras resulte de ligação física mais fraca entre as fibrilas, causada por uma baixa densidade do material da matriz.

A força de ligação entre fibrila e matriz é principalmente friccional em origem, como no cimento reforçado por vidro. Assim, quando há uma matriz presente, tanto as forças de ligação atômica como as friccionais podem ser importantes, e ambas se relacionarão à densidade do material do interior da matriz.

Estudos realizados por MARTINEZ, COMER (1964) em várias amostras de fibra de crisotila, utilizando difração de elétrons, indicaram que o material interfibrilar ("matriz") não é cristalino. Segundo estes autores, como ele preenche os interstícios entre as fibrilas, é lógico admitir que exerça influência sobre as propriedades físicas e químicas de uma dada fibra.

Embora o feixe de fibras possa ser considerado um compósito do ponto de vista de comportamento mecânico, existem diferenças fundamentais entre a fibra de crisotila e um compósito, como por exemplo, cimento reforçado com fibra de vidro.

A analogia foi feita por MARTIN, PHILLIPS (*op.cit.*) uma vez que um feixe de fibras é constituído pelo conjunto fibrilas (agregado) e material interfibrilar (matriz ou cimento). Em ambos os casos a interface entre estes dois componentes tem uma importância muito grande na resistência do conjunto. No caso do cimento reforçado com fibra de vidro, segundo MAJUMDAR (1974), a interface deve ser considerada não como uma superfície de ligação bidimensional, através da qual ocorre algum tipo de descontinuidade, mas como uma zona, cuja espessura depende das condições ambientais e através da qual ocorrem transições mais ou menos rápidas nas propriedades tanto das fibras, como da matriz. Devido à natureza particulada da matriz, esta zona exibe caráter heterogêneo e os pontos de contato fibra-matriz são separados por vazios e também por poros na matriz, de maneira irregular. As propriedades dos materiais desta zona podem se alterar com a idade.

Segundo MAJUMDAR (1974) a força máxima de cisalhamento é desenvolvida

nas terminações das fibras; ao ser atingida, os dois componentes se desprendem e a transferência da força dependerá então das forças de fricção na interface. A resistência do compósito, por sua vez, depende da força máxima que um feixe de fibras atravessado por uma grande fratura pode suportar.

MAJUMDAR (1974.) estudou a durabilidade do compósito de cimento reforçado com fibra de vidro (GRC) examinando a mudança nas suas propriedades mecânicas como uma função do tempo de armazenagem sob condições diferentes.

As fibras de vidro silicáticas colocadas na matriz de cimento são reativas em relação aos hidróxidos alcalinos e alcalino-terrosos produzidos durante a hidratação do cimento, e o efeito desta interação na resistência da fibra é de crucial importância na determinação da durabilidade do compósito GRC (MAJUMDAR, *op.cit.*).

KOLBE (1970) ressalta que a resistência à tração de amiantos, de modo geral, depende não só da espécie mineral, mas também do modo de ocorrência e dos métodos utilizados na extração e no beneficiamento do minério. Como exemplo, compara fibras de amianto indeformadas com fibras submetidas à flexões, constatando que os valores de resistência à tração diminuem consideravelmente com a deformação das fibras. Conseqüentemente, a utilização de métodos adequados no beneficiamento que protejam a fibra de deformação (torções) é tão importante quanto o conhecimento da própria resistência da fibra.

Ensaios de resistência à tração

Os ensaios de resistência à tração foram realizados em duas etapas distintas, denominadas de ensaios exploratórios (OLIVEIRA, QUITETE, 1992; OLIVEIRA, 1994; OLIVEIRA, QUITETE, 1994) e de ensaios definitivos.

Ensaios exploratórios

A TABELA 16 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios exploratórios efetuados. Pode-se observar que as medidas de tração são semelhantes para os três tipos de fibras ensaiados, não variando significativamente com a temperatura; após aquecimento a 100°C todas elas apresentaram queda da resistência. Os valores da tensão de ruptura parcial são próximos dos valores de tensão de ruptura completa,

TABELA 16 - Valores médios dos ensaios de resistência à tração (MPa) das amostras de fibras brutas (**1ª etapa dos trabalhos**), comparados com fibras de outras procedências.

Tipo de Fibra		EQUIPAMENTO /TEMPERATURA DE AQUECIMENTO PRÉVIO DA FIBRA				
		Pulmac (diam. fibra (ϕ) = 0,17-0,40 mm)			*Pressley* (diam.fibra (ϕ) = 0,09 a 0,17 mm)	*Instron*
		T-ambiente	350°C	550°C	T-ambiente	T-ambiente
CRISOTILA	Fibra *cross* (SP-1)	385 V = 60%	263 V = 41%	283 V = 43%	1.969 (*)	- -
	Fibra *cross* (SP-2)	177 V = 49%	168 V = 38%	216 V = 46%	3.511 V = 20%	- -
	Fibra *cross* "fosca" (SP-1)	484 V = 32%	319 (*)	193 V = 23%	-	- -
	Fibra *cross* do Canadá (1)	453	444	-	-	-
FIBRA TÊXTIL	Nailon	35 gf/tex V = 20%	-	-	-	68 gf/tex V = 2,9%
	Viscose	5,8 gf/tex V = 22% (600-300 tex)	-	-	9,3 gf/tex V = 13% (330 tex)	-

Nota: (1) dados de ruptura parcial

V = coeficiente de variação: $V = \frac{\text{desvio padrão}}{\text{média}} \%$

(*) somente dois corpos-de-prova apresentaram ruptura total.

embora, na maioria dos casos, ligeiramente mais elevados. As rupturas parciais estão comumente associadas aos feixes de fibras com diâmetros maiores.

O QUADRO 5 apresenta valores médios de resistência à tração de fibras de crisotila de várias procedências, cujos ensaios foram realizados sob condições diversas, em amostras com diâmetros e comprimentos variados. Os resultados são completamente diferentes, com valores médios que variam de 300 Mpa a 4400 MPa.

Ensaios definitivos

Os valores médios de resistência à tração realizados na 2ª etapa dos trabalhos, efetuados com o equipamento Pressley, revelaram valores médios entre 2580 MPa a 2730 MPa, com coeficiente de variação da ordem de 10 a 17%. Em relação aos ensaios exploratórios, houve diminuição do desvio-padrão, atestando maior confiabilidade. Com o aquecimento, houve uma ligeira queda no desvio-padrão.

Os valores de resistência à tração são muito semelhantes para as amostras ensaiadas à temperatura ambiente e ligeiramente superiores para as amostras aquecidas a 300°C e 500°C, conforme a TABELA 17.

Os valores de tensão de ruptura à tração de todos os corpos-de-prova ensaiados, à temperatura ambiente e sob aquecimento (a 300°C e 500°C), encontram-se nas TABELAS 18 a 23, ANEXO A.

5.4. Caracterização tecnológica das fibras semi-brutas e beneficiadas

5.4.1. Análises mineralógicas

As análises mineralógicas revelaram semelhanças quanto às características ópticas, como índices de refração e birrefringência. Não foi observada mudança no comprimento das fibras maiores, porém em algumas amostras observou-se nas fibras beneficiadas ligeiro acréscimo na quantidade de finos em relação às semi-brutas (TABELA 18). Constatou-se também, pelas análises de difração de raios X, que as fibras beneficiadas apresentam mais impurezas que as fibras semi-brutas. (TABELA 19, FIGURA 18 (a)/(h)).

As análises por microscopia eletrônica revelaram aspectos morfológicos muito semelhantes entre as fibras semi-brutas (FOTOS 30 (a)/(c)) e as fibras beneficiadas (FOTOS 31 (a)/(b)). Os feixes já não apresentam superfícies muito limpas, observando-se desfibramentos com presença de agregados de fibrilas emaranhadas sobre os feixes. Nos pontos de inflexão os desfibramentos são mais vigorosos que

FONTE	PROCEDÊNCIA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa) E COEF. VARIAÇÃO (V)					OBSERVAÇÕES
		sem aquecimento (20°C)	após aquecimento por 3'			a 500°C (1h)	
			a 315°C	a 430°C	a 540°C		
KOLBE, 1970	Quebec	294 a 657 V = 31-62%	-	-	-	-	equipamento não discriminado
	Ural	736 a 2256	-	-	-	-	condições de ensaio extremamente diferentes
	Rodésia do Sul	98 a 1079	-	-	-	-	distância entre garras 16-39 mm
	Transvaal	333 a 775 V = 39-41%	-	-	-	-	condições de ensaio diferenciadas
	China	451 a 569 V = 47,4%	-	-	-	-	equipamento não discriminado
MANN, 1983	não discriminada	904	828	662	538	-	equipamento não discriminado
MARTIN; PHILLIPS, 1977	a) Mina Shabanie (Rodésia) b) Mina King (Rodésia)	a) 3591 b) 3361	-	-	-	-	equipamento Instron a) fibra quebradiça b) fibra intermediária diâm.fibra = 0,04-0,08 mm
	Mina Cassiar (Canadá)	3121 V = 32%	-	-	-	-	equipamento Instron fibra sedosa diâm.fibra = 0,04-0,08 mm
AVESTON, 1969	Thetford (Canadá)	a) 4394 V = 22% b) 3001 V = 27%	-	-	-	B) 2265 V = 20%	equipamento Instron a) comp. fibra = 0,3 cm b) comp. fibra = 3,0 cm Atmosfera de nitrogênio
SPEIL, LEINEWEBER, 1968	não discriminada	3638 a 3776 V = 37%	-	-	-	-	equipamento não discriminado diâm. fibra = 0,016 mm
ZUKOWSKI & GAZE, 1959	Arizona Thetford (Canadá)	a) 1282 a b) 2206 V = 58% a) 1937 a b) 3006 V = 44%	- -	- -	- -	- -	diâm. fibra <0,034 mm a) comp. fibra = 2,5 a 3,5 cm b) comp. fibra = 0,2 cm
SANTOS (*apud* BADOLLET 1951; ROSATO 1959; BERGER 1963)	várias	552 a 1379	-	-	-	-	valores médios de fibras de várias procedências. equipamento não discriminado.

QUADRO 5 - Valores médios de resistência à tração longitudinal e coeficiente de variação de fibras de amianto crisotila (ruptura total) de várias procedências.

TABELA 17 - Valores médios dos ensaios de resistência à tração das amostras de fibras brutas **(2ª etapa dos trabalhos).**

Amostra Nº	Temperatura Ambiente			Aquecimento a 300°C por 20'			Aquecimento a 500°C por 20'		
	Valores Médios resist.tração (MPa)	Nº corpos de Prova Rompidos	V (%)	Valores Médios RT (MPa)	Nº corpos de Prova Rompidos	V (%)	Valores Médios RT (MPa)	Nº corpos de Prova Rompidos	V (%)
1	2638	162	10	-	-	-	-	-	-
2	2579	175	9	2520	172	17	2687	183	11
3	2579	147	13	2717	158	10	2717	185	10
5	2668	117	14	-	-	-	-	-	-
6	2618	87	11	2746	172	10	2687	173	13
7	2687	152	11	2697	48	7	2726	32	8

Nota: V = Coeficiente de Variação = $\frac{\text{desvio padrão}}{\text{média}}$ (%)

TABELA 18 - Caracterização microscópica das amostras de fibras semi-brutas (a) e beneficiadas (b) **(2ª etapa dos trabalhos).**

Amostra / Característica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cor (a,b)	Cinza muito claro	Branco azulado	Cinza esverdeado muito claro	Cinza muito claro	Cinza esverdeado muito claro	Cinza muito claro	Cinza muito claro	Cinza muito claro	Róseo acinzentado	Cinza muito claro
compr. fibras maiores em mm (a,b)	8-10	4-6	10-15	3-5	8-10	8-10	8-10	6-8	5-7	4-6
teor de finos (a)	pequeno	médio	pequeno	médio	médio	médio	médio	grande	grande	médio
teor de finos (b)	-	grande	-	grande	médio	médio	médio	grande	grande	grande
n_z (a)	1,554 - 1,556	1,554 - 1,555	1,554	1,554 - 1,556	1,554	1,554	1,554	1,553 - 1,555	1,555 - 1,557	1,554 - 1,555
n_z (b)	-	1,554 - 1,557	-	1,554 - 1,557	1,554 - 1,556	1,555 - 1,557	1,554 - 1,556	1,554 - 1,556	1,556 - 1,558	1,554 - 1,557
$n_z - n_x$ (a,b)	0,009 (±0,001)	0,009 (±0,001)	0,009 (±0,001)	0,009 (±0,001)	0,009 (±0,001)	0,009 (±0,001)	0,009 (±0,001)	0,009 (±0,001)	0,009 (±0,001)	0,009 (±0,001)

Nota: n_z = índice máximo de refração
$n_z - n_x$ = birrefringência máxima

TABELA 19 - Resultados das análises de difração de raios X das amostras de fibras semi-brutas e beneficiadas **(2ª etapa dos trabalhos).**

Amostra Nº	**Resultados dos Ensaios de Difração de Raios X**	
	Fibra Semi-Bruta	**Fibra Beneficiada**
1	Serpentina (p) Hematita (s)	-
2	Serpentina (p) Hematita (s) Magnetita (s)	Serpentina (p) Magnetita (s)
3	Serpentina (p) Hematita (s) Magnetita (s) Piroxênio (s)	-
4	Serpentina (p) Hematita (s) Magnetita (s)	Serpentina (p) Hematita (s)
5	Serpentina (p) Magnetita (s) Calcita (s) Hematita (s)	Serpentina (p) Magnetita (s) Calcita (s)
6	Serpentina (p) Hematita (s) Magnetita (s)	Serpentina (p) Hematita (s)
7	Serpentina (p) Hematita (s)	Serpentina (p) Magnetita (s) Hematita (s)
8	Serpentina (p) Hematita (s)	Serpentina (p) Hematita (s) Magnetita (s)
9	Serpentina (p) Hematita (s) Calcita (s)	Serpentina (p) Hematita (s) Magnetita (s) Calcita (s)
10	Serpentina (p) Hematita (s) Magnetita (s)	Serpentina (p) Hematita (s) Magnetita (s)

Nota: p = predominante; s = subordinado

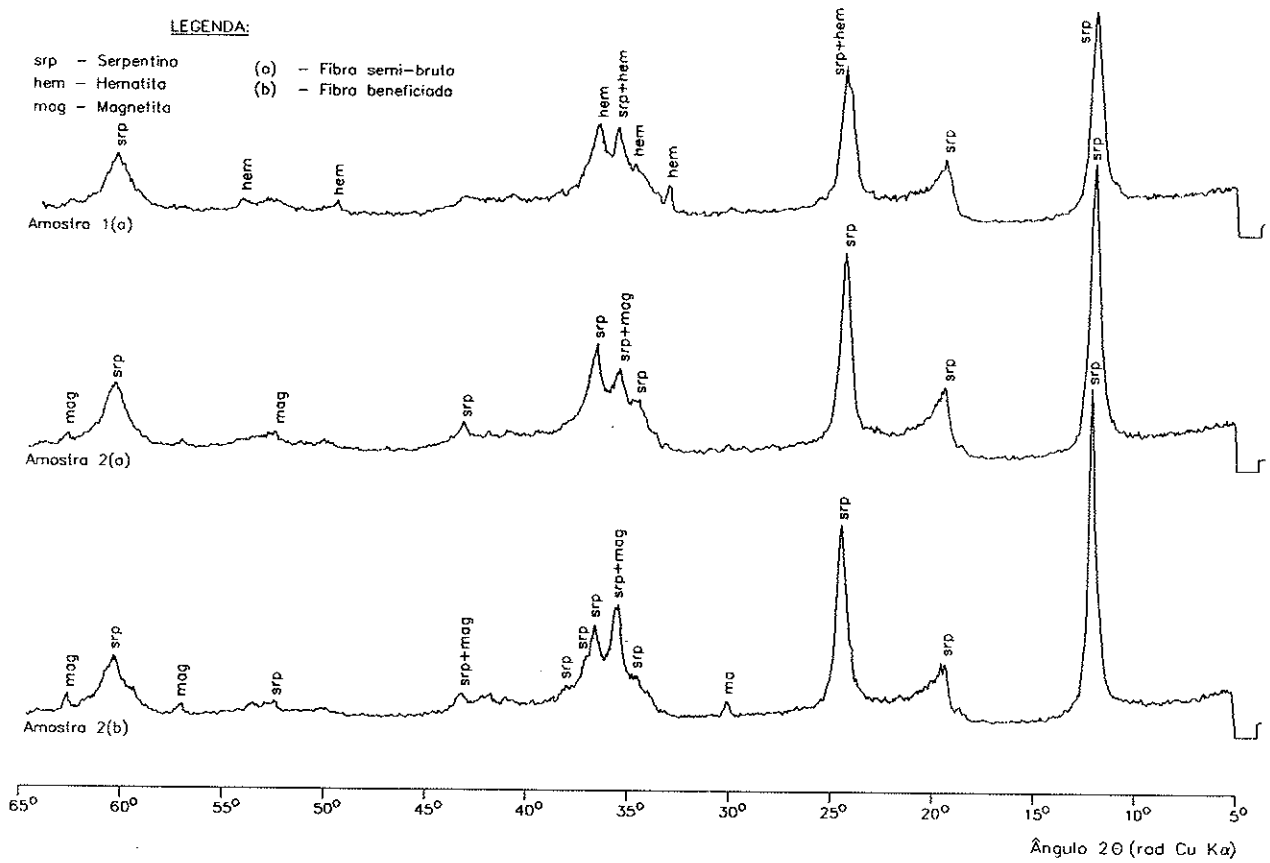


FIGURA 18a - Difratogramas das amostras de fibras semi-brutas e beneficiadas 1 e 2 (2° etapa dos trabalhos)

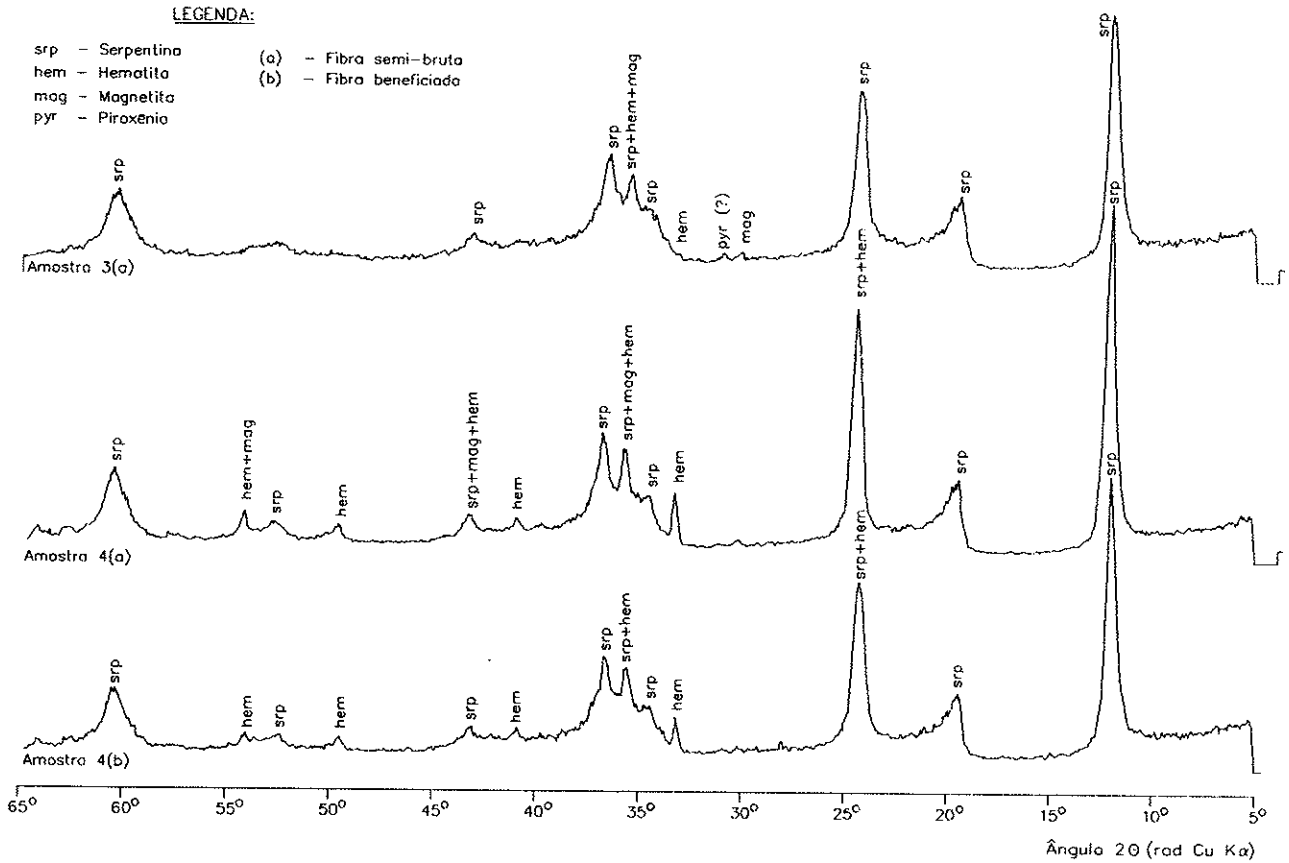


FIGURA 18b - Difratogramas das amostras de fibras semi-brutas e beneficiadas 3 e 4 (2° etapa dos trabalhos)

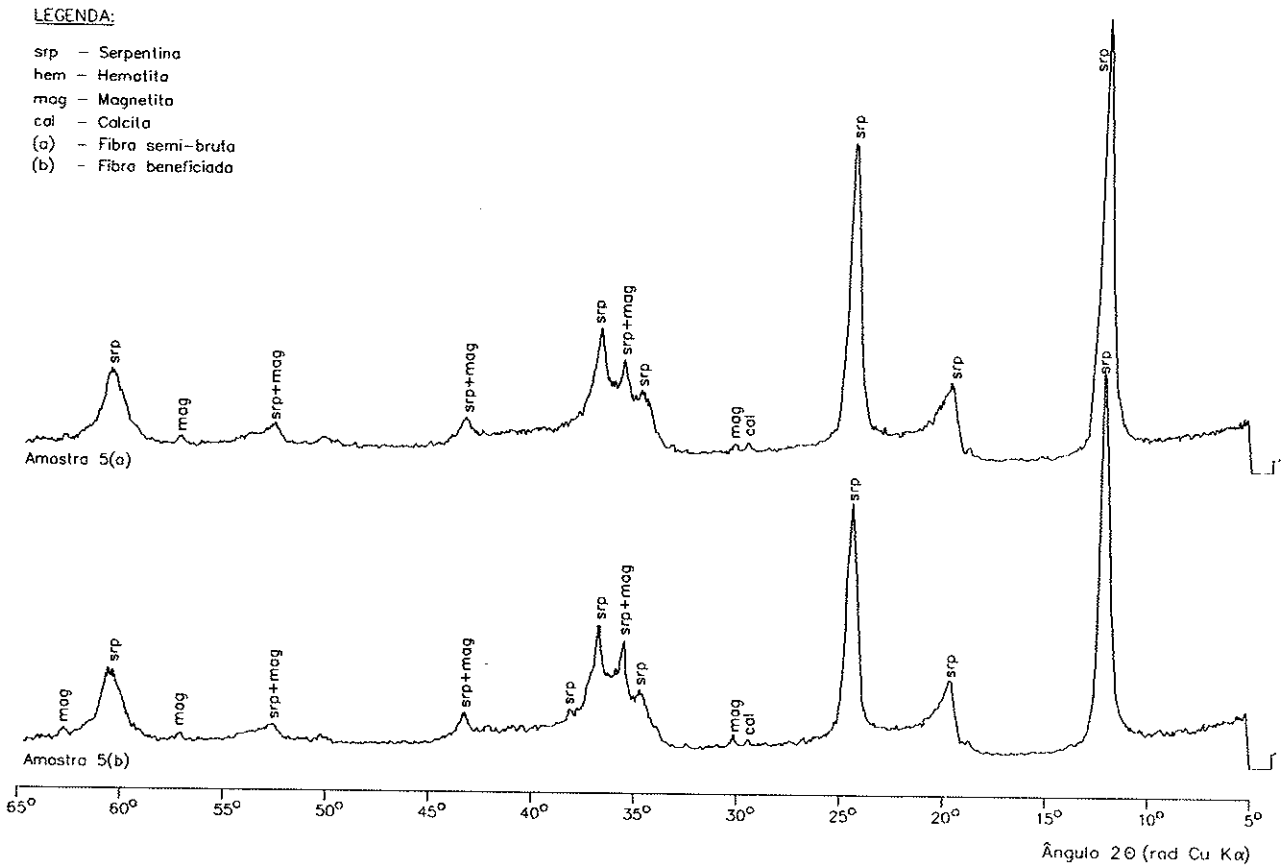


FIGURA 18c - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 5 (2° etapa dos trabalhos)

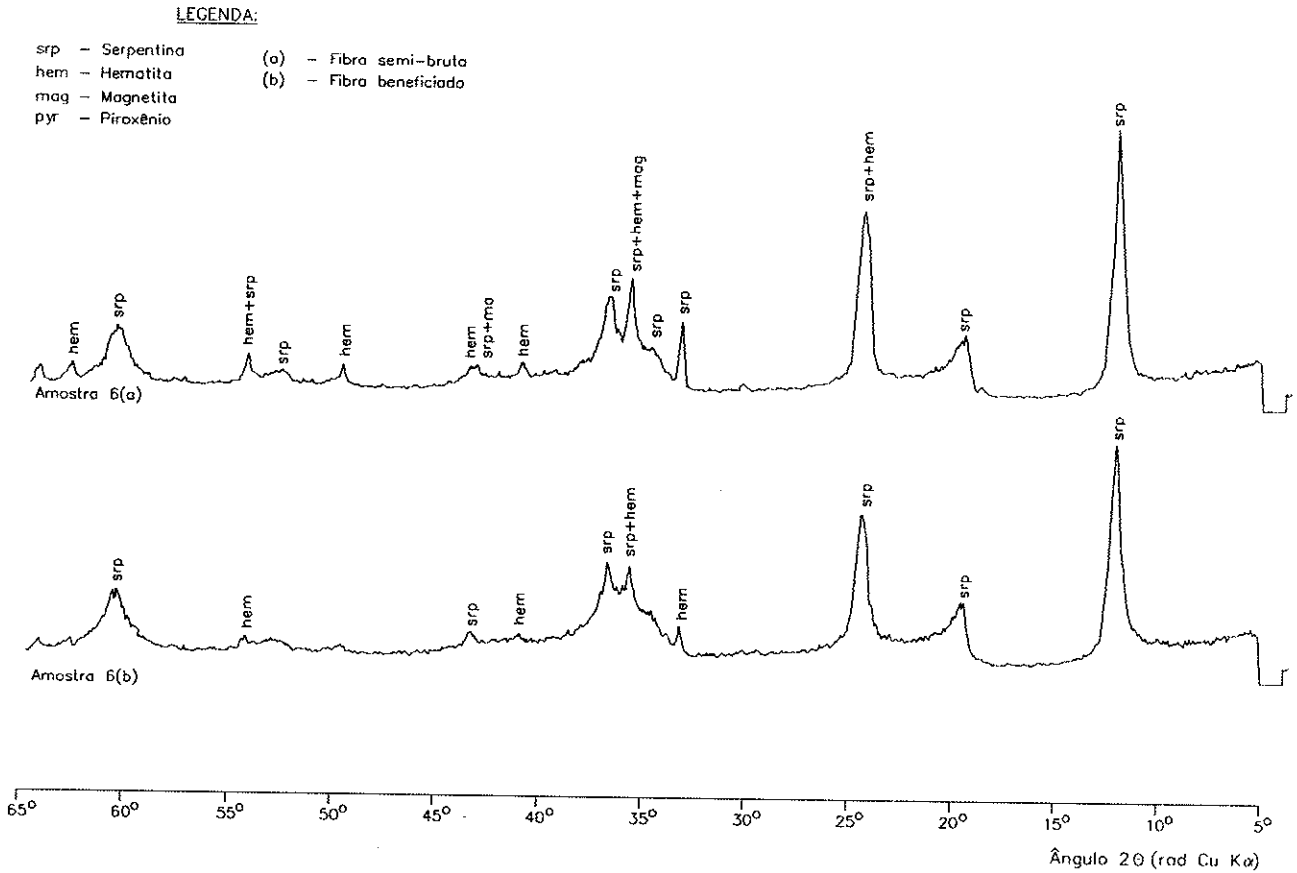


FIGURA 18d - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 6 (2° etapa dos trabalhos)

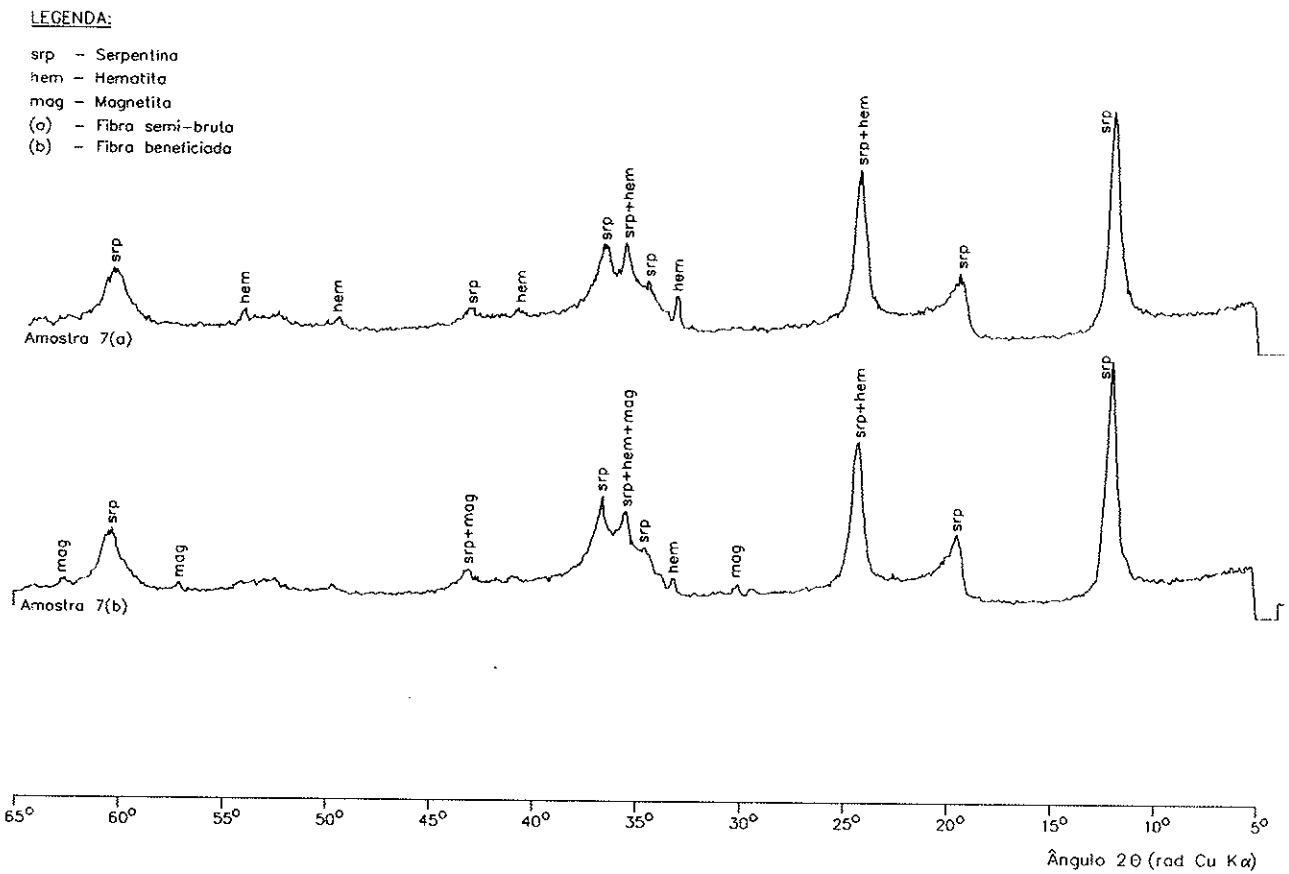


FIGURA 18e - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 7 (2° etapa dos trabalhos)

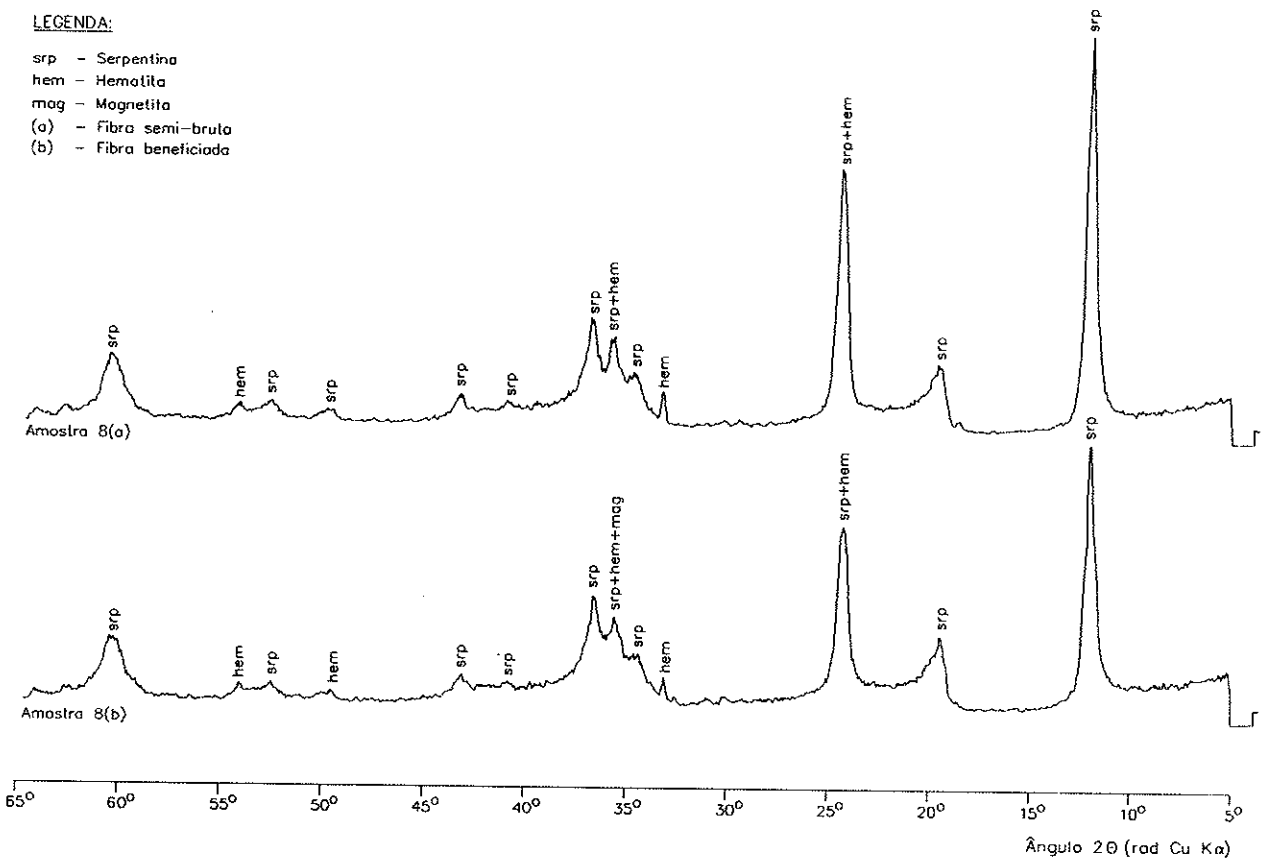


FIGURA 18f - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 8 (2° etapa dos trabalhos)

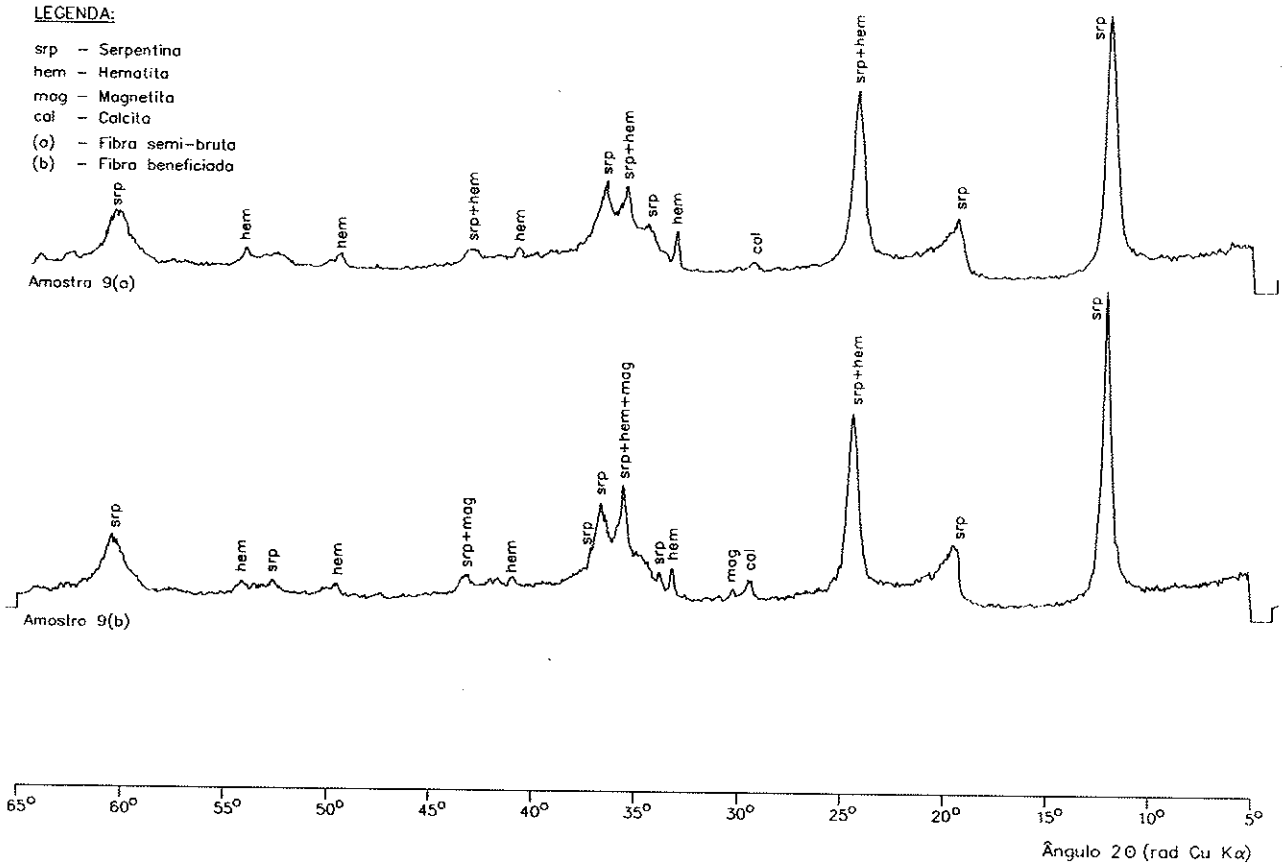


FIGURA 18g - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 9 (2° etapa dos trabalhos)

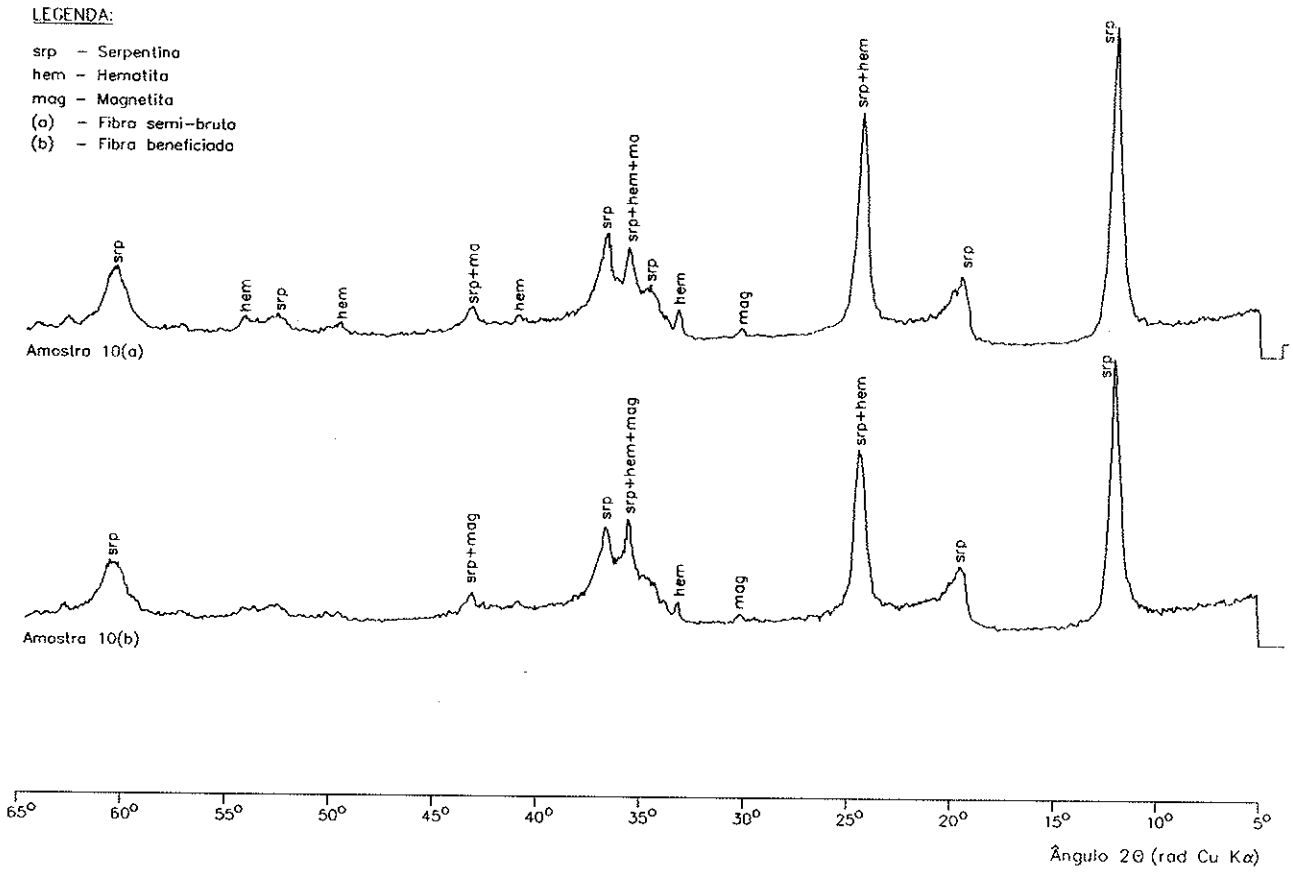


FIGURA 18h - Difratogramas da amostra de fibra semi-bruta e beneficiada 10 (2° etapa dos trabalhos)

nas fibras brutas. São comuns pequenos "grãos" associados às fibras, com dimensões que variam de 3 a 5μm, ou localmente até 50μm. Foi efetuada a análise por dispersão de energia (EDS) de um deles, e embora o espectro não seja conclusivo, possivelmente é de olivina, uma vez que o pico do oxigênio é um pouco menor do que se esperaria na serpentina (FIGURA 19). Os feixes se abrem nas pontas, adquirindo aspecto de "chumaço de algodão".

Nos aumentos de 10000x observam-se microfibrilas, com comprimentos da ordem de 1 a 3μm, associados aos feixes de fibras. As fibras beneficiadas acham-se um pouco mais "sujas".

5.4.2. Ensaios tecnológicos

Os ensaios efetuados foram os seguintes: determinação do índice de comprimento das fibras (IC), ensaio de determinação do conteúdo de finos associados às fibras (LA) e ensaio de unidade de resistência à flexão do fibro-cimento (UR). A análise preliminar destes dados foi efetuada por OLIVEIRA, QUITETE (1995).

A TABELA 20 é uma síntese de todos os ensaios tecnológicos executados nas fibras semi-brutas e beneficiadas.

FOTO 30a - Aspecto de amostra de fibra semi-bruta sob microscópio eletrônico de varredura (MEV). (Amostra 6).

FOTO 30b - Detalhe dos feixes de fibrilas flexionadas.

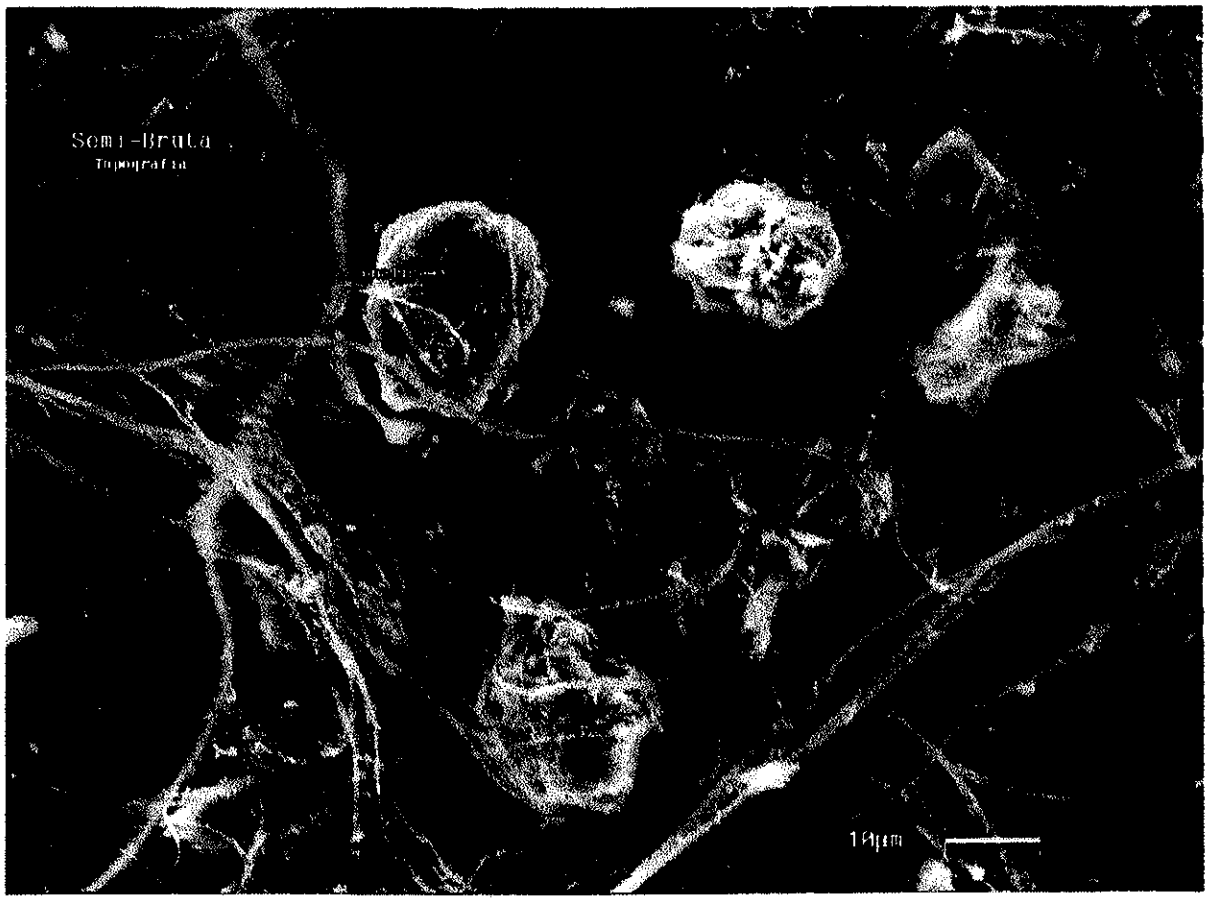


FOTO 30c - Presença de microfibrilas e micrograõs associados à fibras.

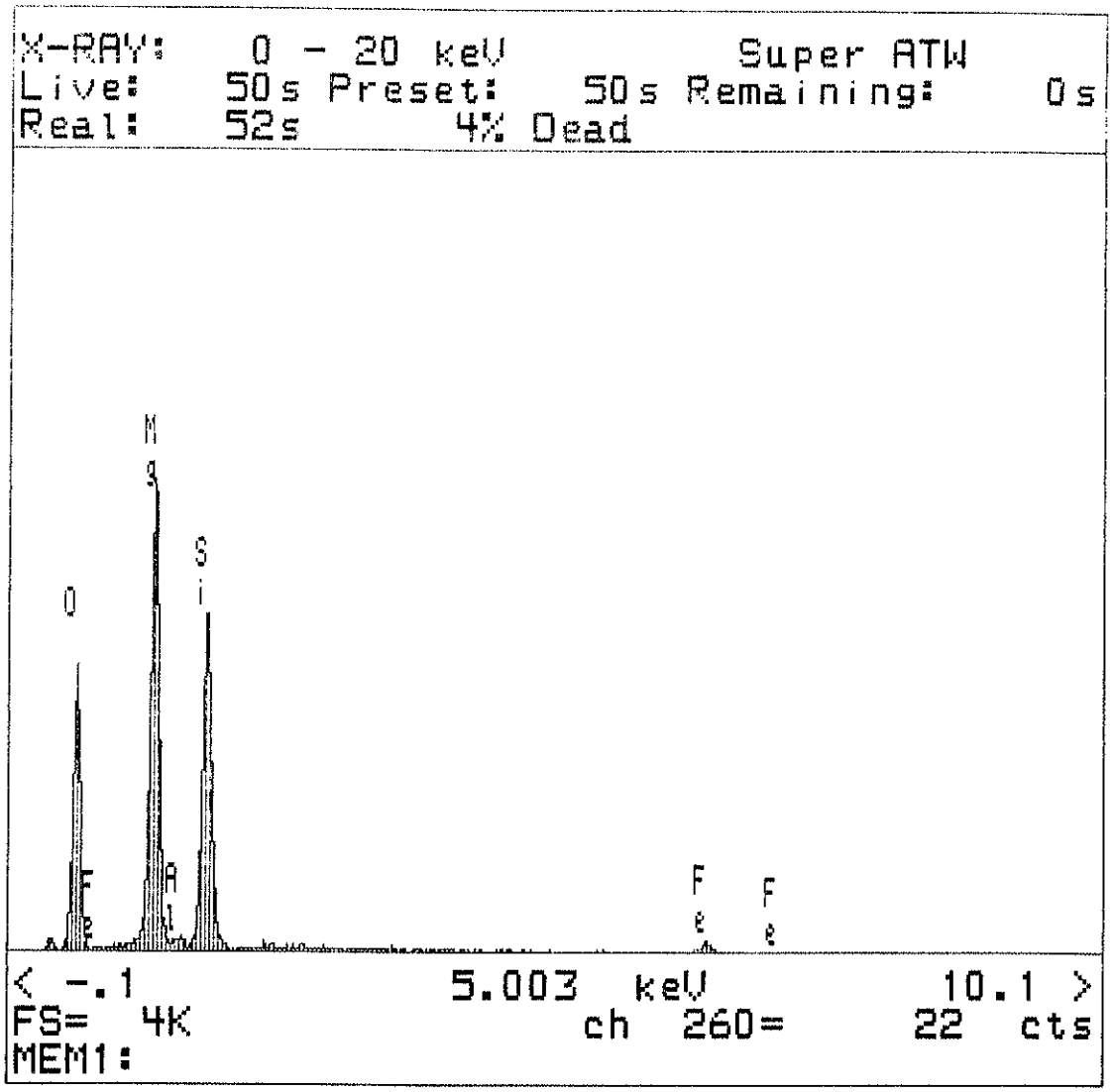


FIGURA 19 - Análise por dispersão de energia (EDS) dos grãos associados aos feixes de fibras semi-brutas.

FOTO 31a - Aspecto de amostra de fibra beneficiada sob microscópio eletrônico de varredura (MEV). (Amostra 6).

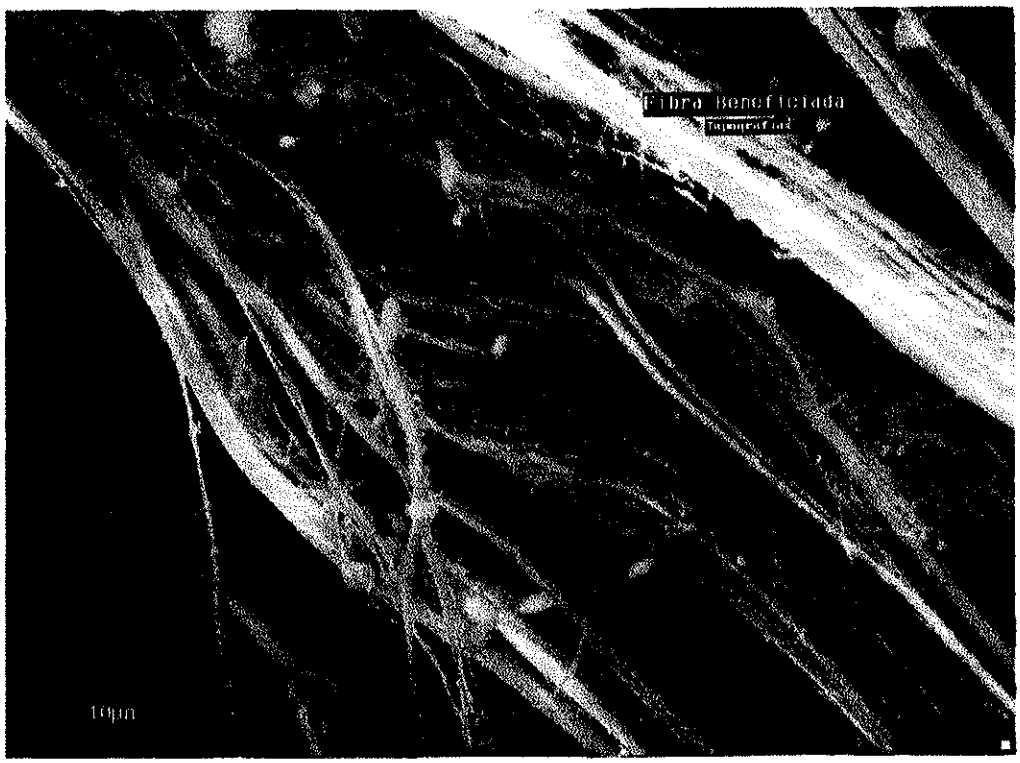


FOTO 31b - Detalhe dos feixes de fibras; presença de microfibrilas e micrograõos associados às fibras.

TABELA 20 - Síntese dos resultados dos ensaios tecnológicos das amostras de fibras semi-brutas (a) e beneficiadas (b) **(2ª etapa dos trabalhos).**

Amostras	IC (a)	IC (b)	LA (%) (a)	LA (%) (b)	UR (a)	UR (b)
1	761	588	27	44	136	106
2	441	221	24	61	121	81
3	972	1017	28	31	135	133
4	739	679	23	37	126	118
5	937	769	22	37	136	125
6	1092	963	24	32	139	129
7	828	868	25	33	131	125
8	680	619	29	40	122	109
9	617	324	28	53	130	91
10	437	379	21	50	107	87

Nota: IC = índice de comprimento;
LA = teor de finos (<0,074 mm)
UR = unidade de resistência à flexão

CAPÍTULO VI
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1. Introdução

Este capítulo inicia com a análise do conjunto dos ensaios efetuados para caracterizar cada tipo de material estudado.

Posteriormente são apresentadas e analisadas as matrizes de correlação. Uma delas, de correlação entre todos os ensaios executados, para todas as amostras estudadas na 2ª etapa dos trabalhos (excetuando-se a 8b, para a qual inexistem muitos ensaios) e as matrizes considerando as propriedades das amostras pertencentes aos grupos SP-1, SP-2, SP-1/2, num total de 4 matrizes de correlação.

O conhecimento das características do minério de crisotila da Mina de Cana Brava pressupõe o entendimento das amostragens realizadas, que serão reafirmadas aqui.

Os ensaios efetuados na rocha *in natura* (análises petrográficas, determinação de índices físicos, ensaios de resistência à abrasão *Los Angeles*, ao impacto Treton e à compressão uniaxial, determinação de velocidade de propagação de ondas P) utilizaram blocos de rocha (com dimensão aproximada de 30X30X50 cm) com características petrográficas e estruturais bem marcantes. As amostras de fibras brutas também foram selecionadas e coletadas diretamente das cavas. Desta forma, tanto os ensaios da rocha *in natura*, como os das fibras brutas não sofreram nenhuma interferência de processos mecânicos, a não ser, obviamente, o de desmonte.

Para os outros ensaios, a amostragem foi totalmente distinta. Foram coletados cerca de 3000 a 4000 toneladas de rocha por frente de lavra, britadas e separadas, conforme local e ensaios a que se destinavam. Assim, 80 kg foram destinados ao ensaio de fragilidade, 80 kg aos ensaios efetuados na usina-piloto, e o restante foi encaminhado para a usina de beneficiamento. Estes ensaios, são, portanto muito mais representativos das frentes de lavra, cuja caracterização dá-se por domínios petrográficos (SP-1, SP-2, SP-1/2), com as heterogeneidades naturais, que podem parecer "contaminações", do que os ensaios efetuados na rocha *in natura*.

6.2. Caracterização petrográfica das rochas da Mina de Cana Brava

Os principais aspectos petrográficos dos serpentinitos são apresentados a seguir (TABELA 21).

TABELA 21 - Aspectos petrográficos distintivos dos serpentinitos tipo 1 (SP-1) e tipo 2 (SP-2)

CARACTERÍSTICAS	SP-1	SP-2
Cor	marrom	verde
Minerais principais	serpentinas, olivina, magnetita + hematita, piroxênio	serpentinas, magnetita,
Natureza da serpentina	antigorita e/ou lizardita crisotila (Z e X)	clara predominância de crisotila Z
Grau de alteração intempérica	fraca a moderada	praticamente sã
Textura	decussada ou *mesh*, preservada (por vezes deformada) a nematoblástica	textura *mesh* vestigial ou destruída por deformação; blastoporfirítica a porfiroblástica

O estudo petroquímico e petrográfico indicou que:

a) os serpentinitos de Cana Brava são rochas resultantes da ação de processos geológicos caracterizados por duas fases de hidrotermalismo, em que o principal fluido foi a água;

b) a primeira fase hidrotermal, de características oxidantes e rica em íons Cl^- e Co^{-2}, provocou a hidratação dos minerais silicáticos magnesianos anidros (essencialmente olivina) e oxidação dos minerais ferrosos (magnetita), gerando as serpentinas do tipo antigorita e/ou lizardita e hematita. Nesta fase teriam se formado os SP-1, em que a destruição dos silicatos primários foi incompleta;

c) a segunda fase hidrotermal, temporalmente indefinida e de características redutoras, foi responsável pela formação dos SP-2 e pela mineralização de crisotila em fraturas, acompanhada da total alteração dos silicatos primários e da "lixiviação" de sílica dos SP-1;

d) a semelhança química entre os SP-1 e SP-2, no que concerne à distribuição dos principais elementos formadores de rochas ultramáficas (Mg, Si, Fe, Cr, Ni e V), sugere que ambos foram gerados a partir de um mesmo protólito (provavelmente dunito ou peridotito);

e) veios e vênulas de crisotila Z, por vezes associada à magnetita e/ou calcita, ocorrem tanto nos SP-1 como nos SP-2, mas são notavelmente mais espessos nos SP-2. Os veios preenchidos por fibra *cross* teriam se formado pela abertura de descontinuidades, o que teria criado espaços para a percolação de fluídos. As fibras *slip* aparecem ao longo de planos de falhas, tendo-se formado durante toda a história deformacional do maciço.

6.3. Caracterização tecnológica dos serpentinitos

Pela análise dos valores dos ensaios físico-mecânicos verifica-se que há uma grande variação na distribuição das propriedades tecnológicas das rochas, em conseqüência da heterogeneidade física e estrutural dos serpentinitos. A heterogeneidade física é refletida no comportamento da "matriz" rochosa; a estrutural se deve às inúmeras fraturas preenchidas, ou não, com as fibras de crisotila. O próprio preenchimento das fraturas não é homogêneo, pois algumas estão mais densamente ocupadas pelas fibras que outras.

Os ensaios que representam maior influência da "matriz" rochosa são os de índices físicos, abrasão *Los Angeles* e de impacto Treton, pois normalmente as fibras são removidas na própria preparação das amostras.

Os ensaios nos quais os fatores estruturais estão representados junto com a "matriz" rochosa são os de compressão uniaxial e de velocidade de propagação de ondas, pois são executados em corpos-de-prova prismáticos individuais de maior dimensão que os anteriormente mencionados.

Em outras palavras, os ensaios primeiramente mencionados (mais indicados para tratar do comportamento das rochas frente aos processos de britagem) tendem a representar o comportamento do material na forma granular, enquanto que os outros são mais representativos do comportamento do maciço rochoso, por melhor abranger as heterogeneidades deste, guardado o efeito escala.

Os três tipos de serpentinitos distinguem-se uns dos outros em relação a várias propriedades físico-mecânicas. Assim, os SP-1 apresentam maiores valores de massa específica aparente, de velocidade de propagação de ondas P e de resistência à compressão uniaxial, e menores valores de porosidade e absorção d'água aparentes, de abrasão *Los Angeles* e de impacto Treton, refletindo um maior grau de coesão e de resistência mecânica. Os SP-2 apresentam maiores valores de abrasão *Los Angeles* e de impacto Treton, e os menores valores de velocidade de propagação de ondas P e de compressão uniaxial, significando que são rochas mais brandas e

menos resistentes à abrasão, à compressão e ao impacto. Os SP-1/2 apresentam os menores valores de massa específica aparente (porém semelhantes aos dos SP-2), e os maiores valores de porosidade e de absorção d'água. Os valores dos outros ensaios tecnológicos são intermediários entre os SP-1 e SP-2, refletindo comportamento mecânico também intermediário.

Especificamente com relação à resistência à compressão uniaxial, utilizando-se a proposição da ISRM (1978), *apud* NÓBREGA (1985), os SP-1 podem ser considerados muito resistentes, os SP-1/2, muito resistentes a resistentes, e os SP-2, resistentes a medianamente resistentes.

6.4. Caracterização tecnológica das fibras brutas

No seu estado natural as fibras são bastante puras, limpas, coesas, quase isentas de impurezas.

Os ensaios exploratórios de resistência à tração das fibras revelaram que os valores médios obtidos no *Pulmac* são bem inferiores aos obtidos com o equipamento *Pressley*. Provavelmente isso se deve ao fato de os diâmetros dos feixes das fibras ensaiadas serem 10 a 15 vezes maiores que os das fibras utilizadas por outros autores.

Deste estudo experimental, pode-se chegar às seguintes conclusões:

a) de modo geral, o coeficiente de variação e o desvio-padrão diminuíram com o aquecimento, chegando até a 17%. Esta observação também se aplica à fibra procedente do Canadá, onde o coeficiente de variação diminuiu 19% da temperatura ambiente para a temperatura de 350°C;

b) as medidas obtidas no *Pulmac* e no *Pressley* para as fibras de viscose forneceram resultados diferentes. O mesmo ocorreu com a fibra de *nylon* no *Pulmac* e no *Instron*. As medidas do *Pulmac* foram sempre inferiores;

c) os valores médios obtidos no *Pressley* foram cerca de 15 a 20 vezes maiores que os obtidos no *Pulmac* para uma amostra de fibra e cerca de 10 vezes para uma outra;

d) os valores obtidos no *Pressley* são semelhantes aos da literatura;

e) os valores obtidos apresentaram altos coeficientes de variação.

Os valores de ruptura à tração transversal revelaram resultados semelhantes para as três amostras de fibras ensaiadas, porém o coeficiente de variação é extremamente alto, entre 72 a 80%. Não foi encontrado na literatura nenhum trabalho que trate deste assunto, de forma que não se pode estabelecer nenhum tipo de

comparação. Tendo em vista o elevado desvio-padrão destes ensaios e a ausência de referências bibliográficas a respeito, devem ser encarados com ressalva.

Os ensaios exploratórios de resistência à tração mecânica efetuados no equipamento *Pressley* são aqui considerados como sendo os mais interessantes.

Os ensaios finais de resistência à tração das fibras brutas revelaram altos valores à temperatura ambiente, com ligeiro aumento a temperaturas de 300°C e 500°C, confirmando trabalhos realizados por vários autores (SPEIL, LEINEWEBER, 1969; BRYANS, LINCOLN, 1975). Os coeficientes de variação, da ordem de 15%, são considerados bastante razoáveis para materiais naturais.

A distribuição dos valores de tensão de ruptura à tração para as 6 amostras de fibras de crisotila encontram-se na FIGURA 20 (a)/(c) (temperatura ambiente), na FIGURA 21 (a)/(b) (aquecimento a 300°C), e na FIGURA 22 (a)/(b) (aquecimento a 500°C).

Nos gráficos de controle apresentados nas FIGURAS 23 (a)/(c), 24 (a)/(b) e 25 (a)/(b) observa-se que os valores de tensão de ruptura à tração geralmente acham-se dentro da faixa de 2 a 3σ (desvio-padrão), significando que a confiabilidade estatística do ensaio é muito boa. Observa-se também que todos os valores seguem a mesma lei de distribuição.

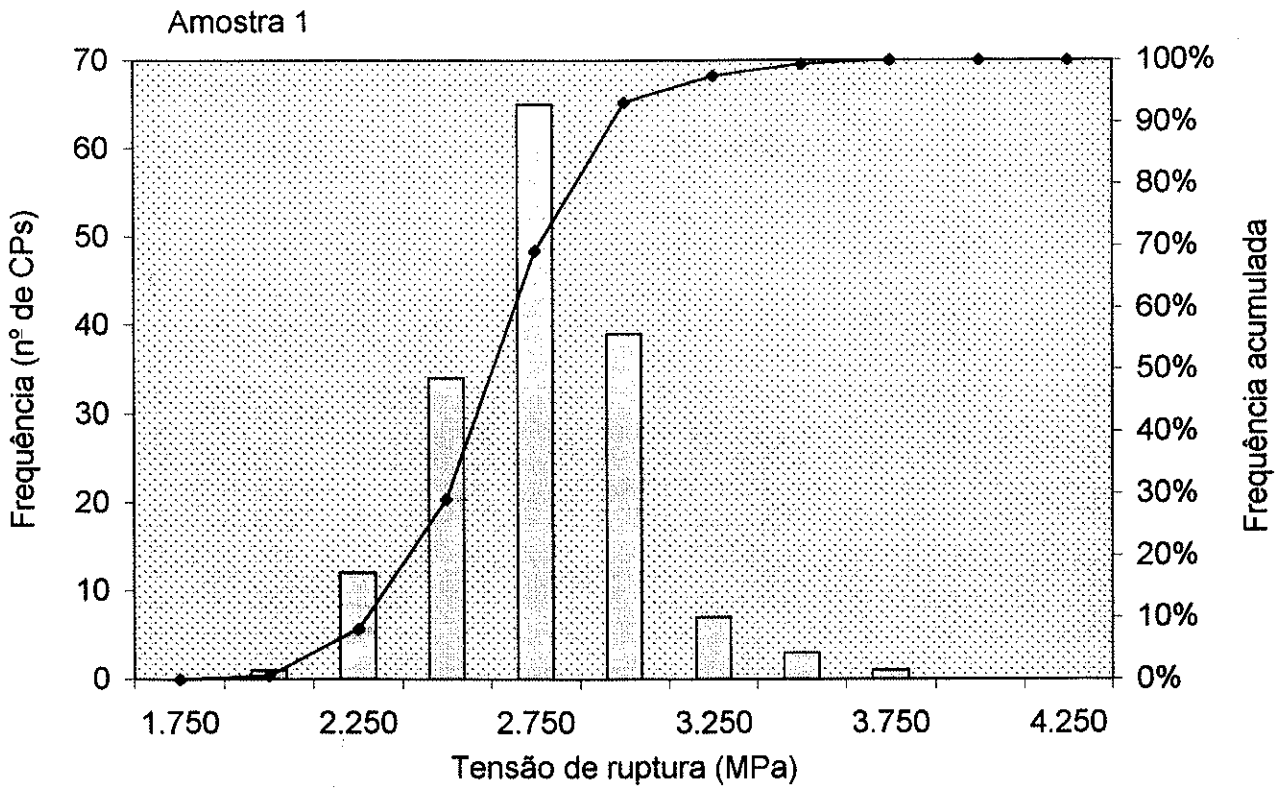
Não foram observadas diferenças nos valores de resistência à tração das fibras brutas com relação à sua procedência (SP-1, SP-2, SP-1/2).

As análises por espectroscopia de infra-vermelho atestam a pureza dos exemplares de crisotila bruta. A constância dos diagramas reforça os dados obtidos nos ensaios de resistência à tração.

Com relação à analogia feita por MARTIN, PHILLIPS (1977) da crisotila com um compósito de cimento reforçado com fibra de vidro (GRC), observa-se que na primeira não existe reatividade entre o material da matriz e as fibrilas e que não há modificação do comportamento mecânico do feixe de fibras em relação ao tempo (idade). Estas parecem ser as principais diferenças entre as fibras de crisotila e um compósito GRC.

6.5. Caracterização tecnológica das fibras semi-brutas e beneficiadas

Em relação às fibras brutas ocorrem algumas diferenças. Opticamente as fibras semi-brutas e beneficiadas apresentam índices de refração e birrefringência



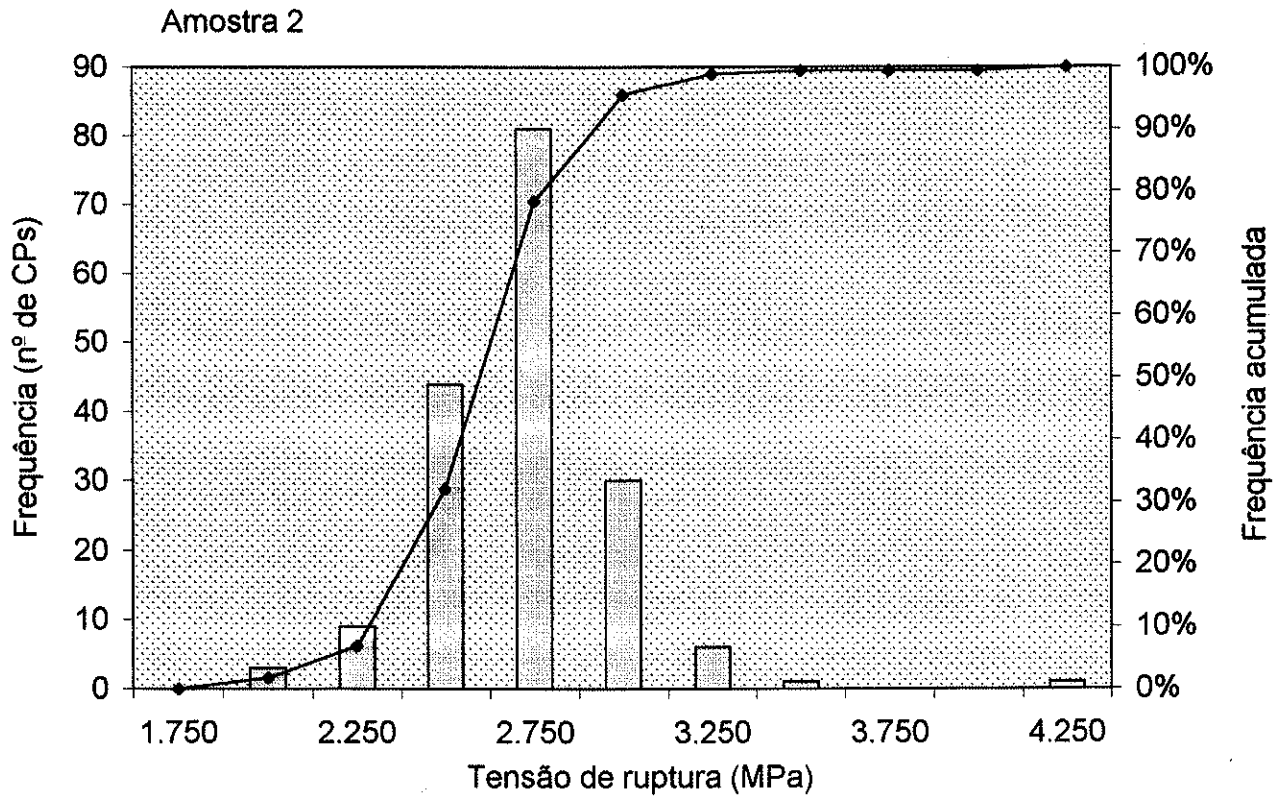
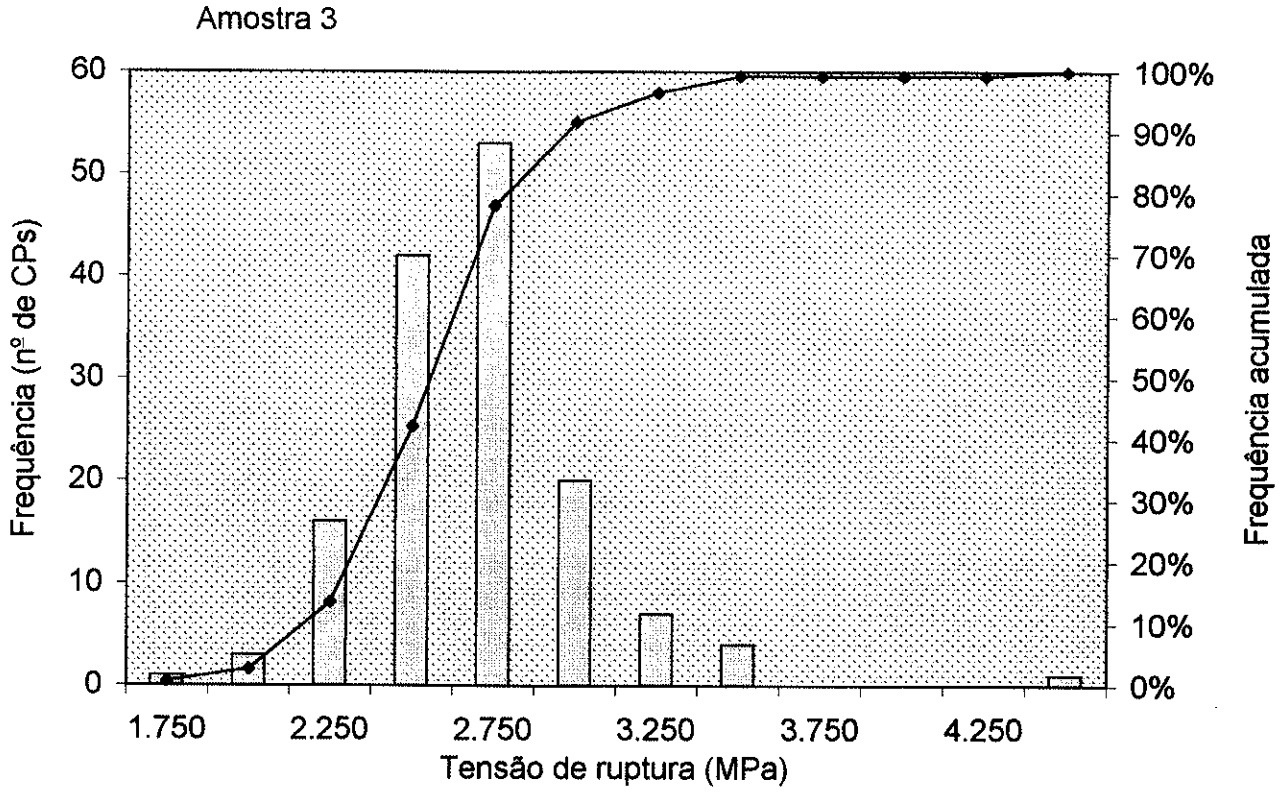


FIGURA 20a - Distribuição dos valores de tensão de ruptura à, temperatura ambiente, das amostras de fibras brutas 1 e 2 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



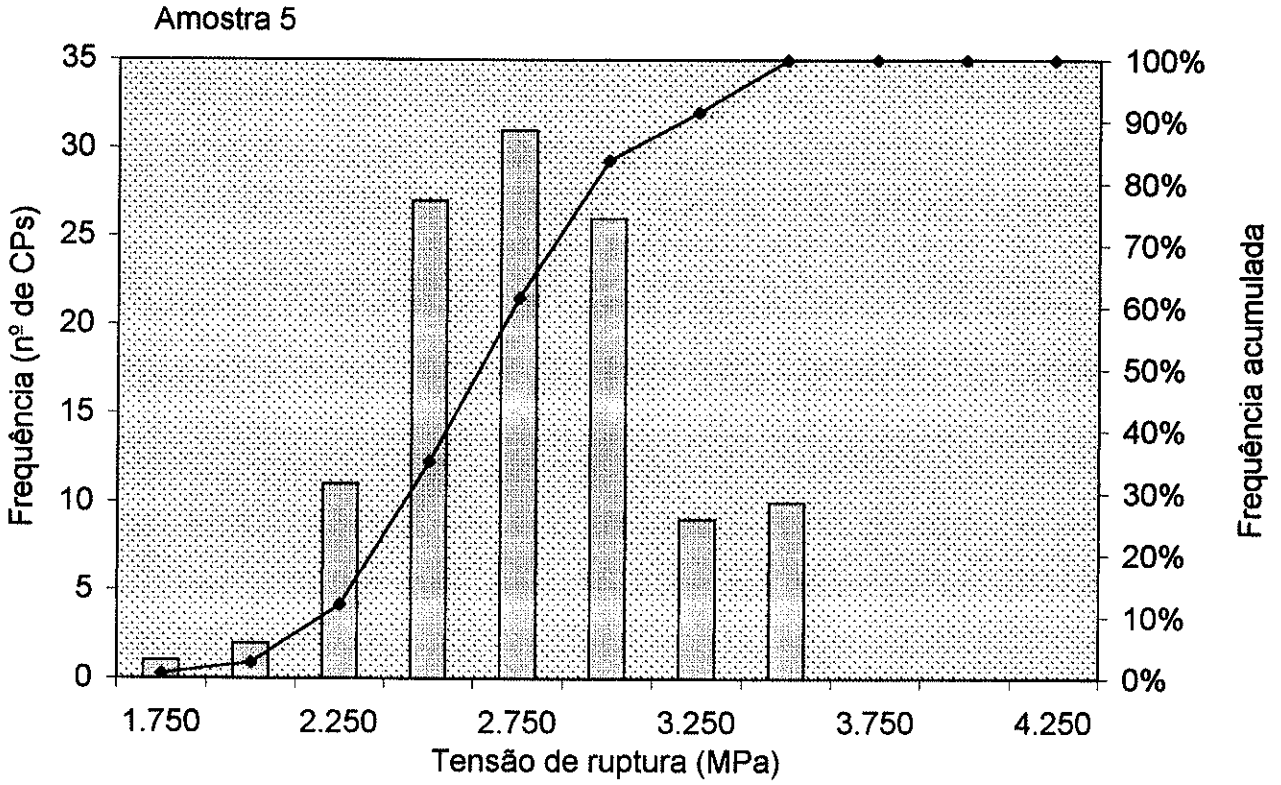
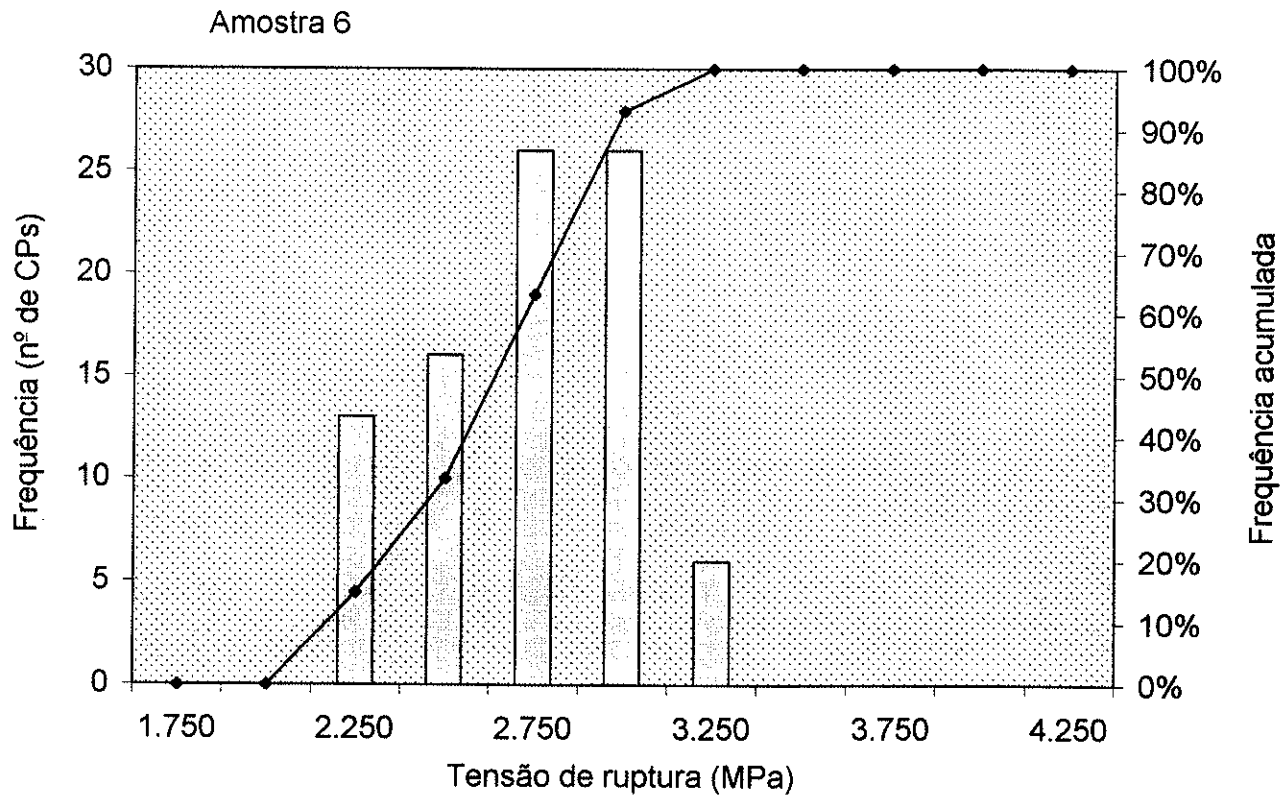


FIGURA 20b - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, das amostras de fibras brutas 3 e 5 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



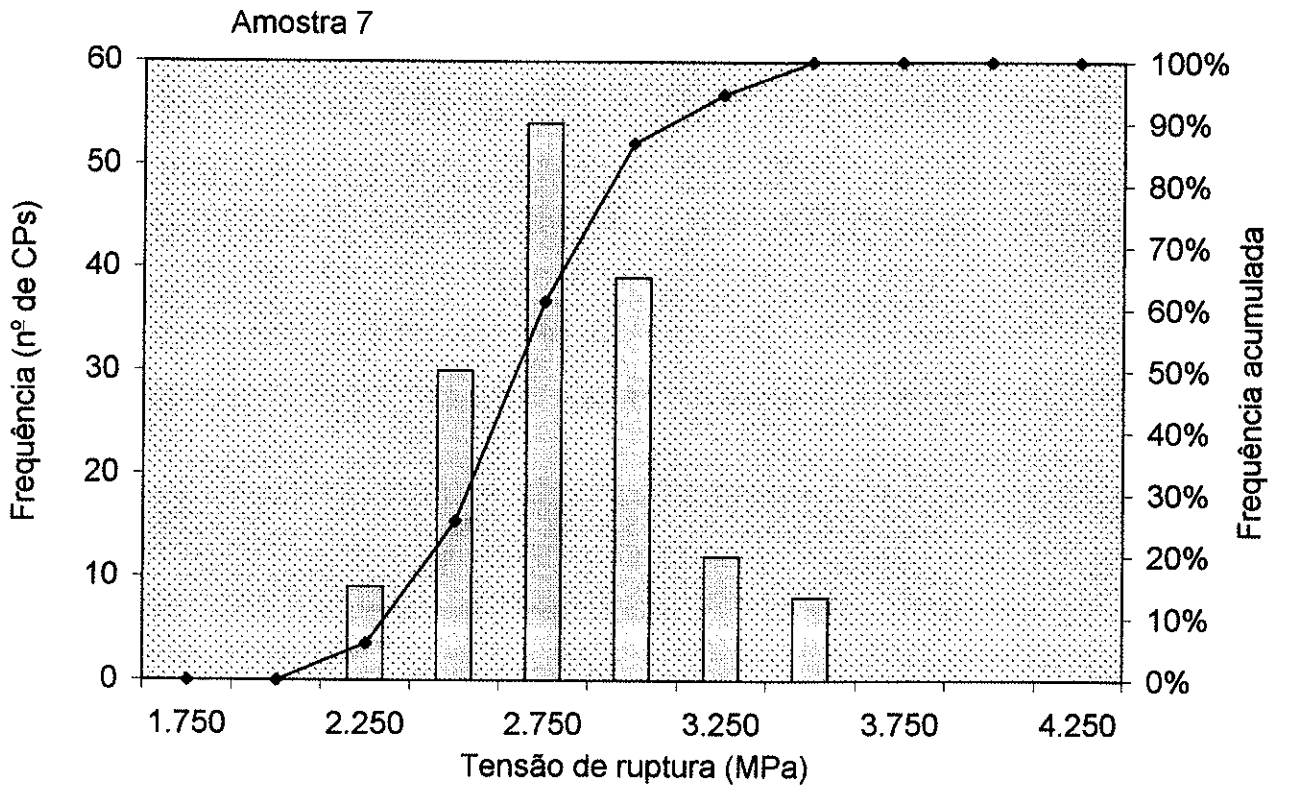
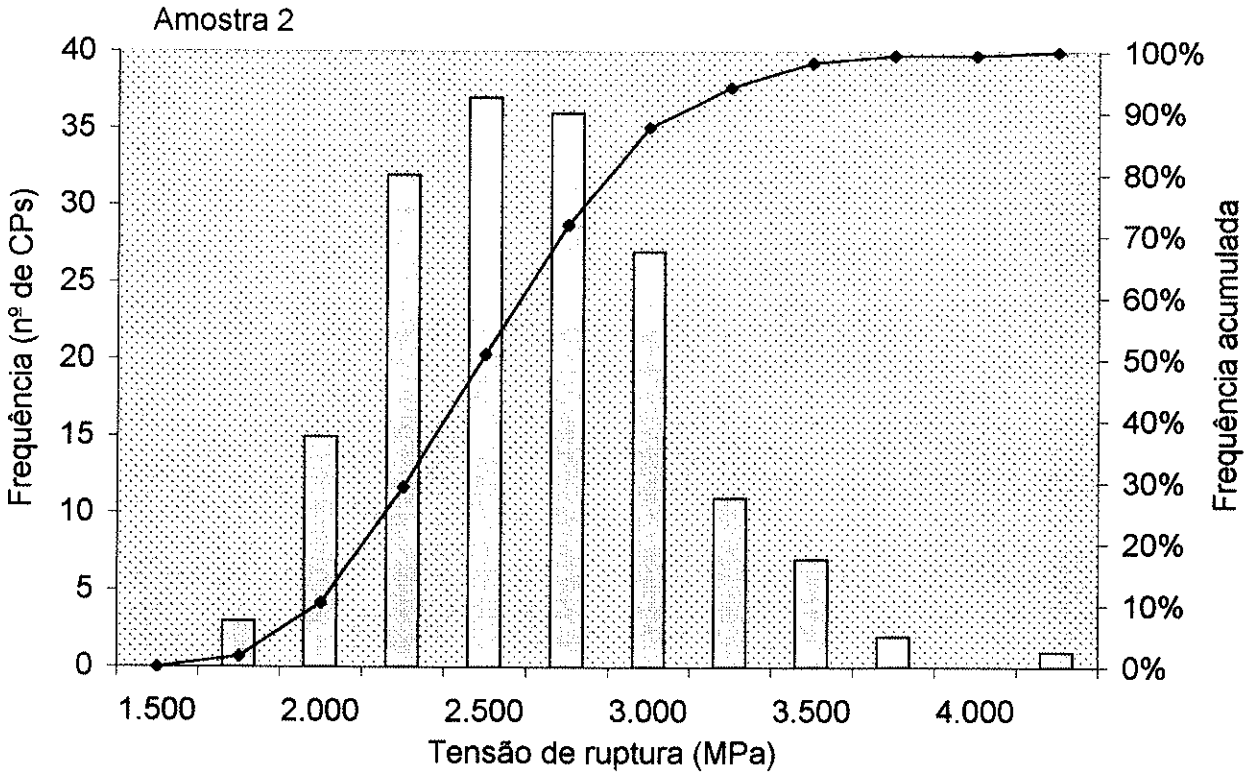


FIGURA 20c - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, das amostras de fibras brutas 6 e 7 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



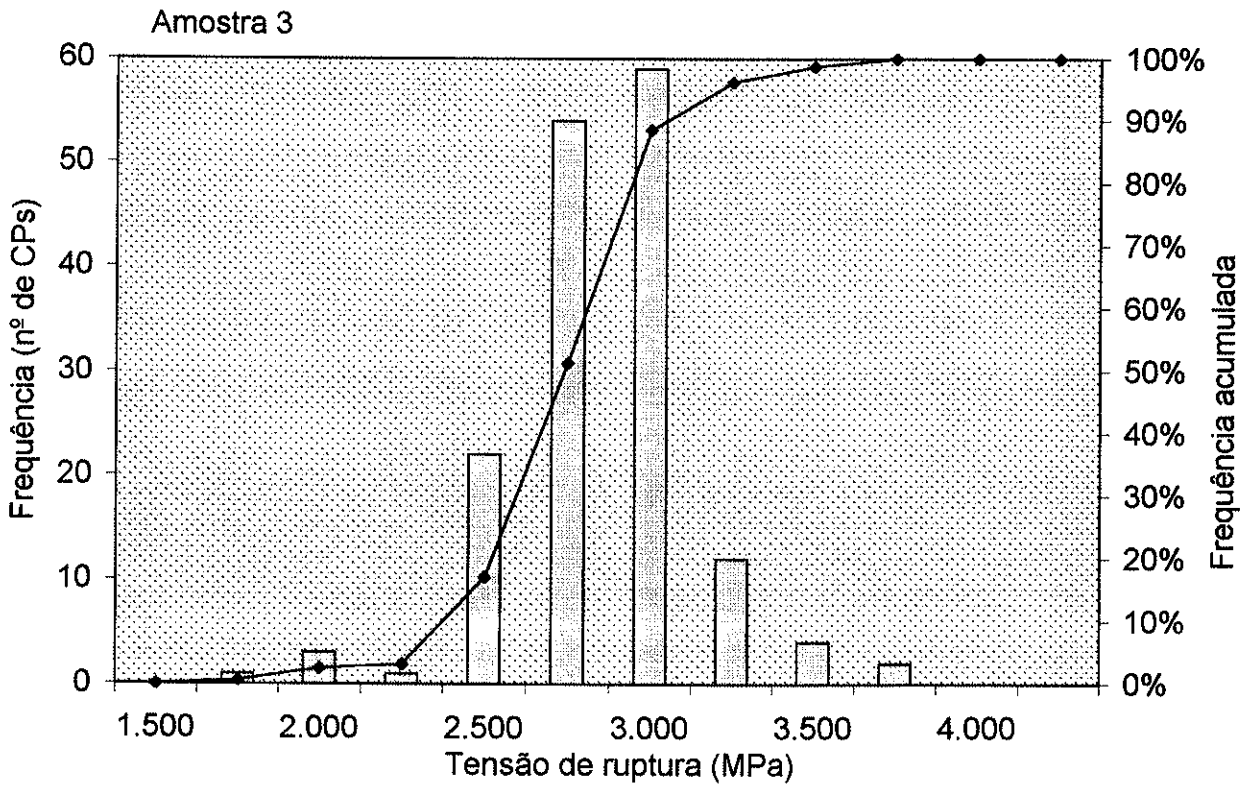
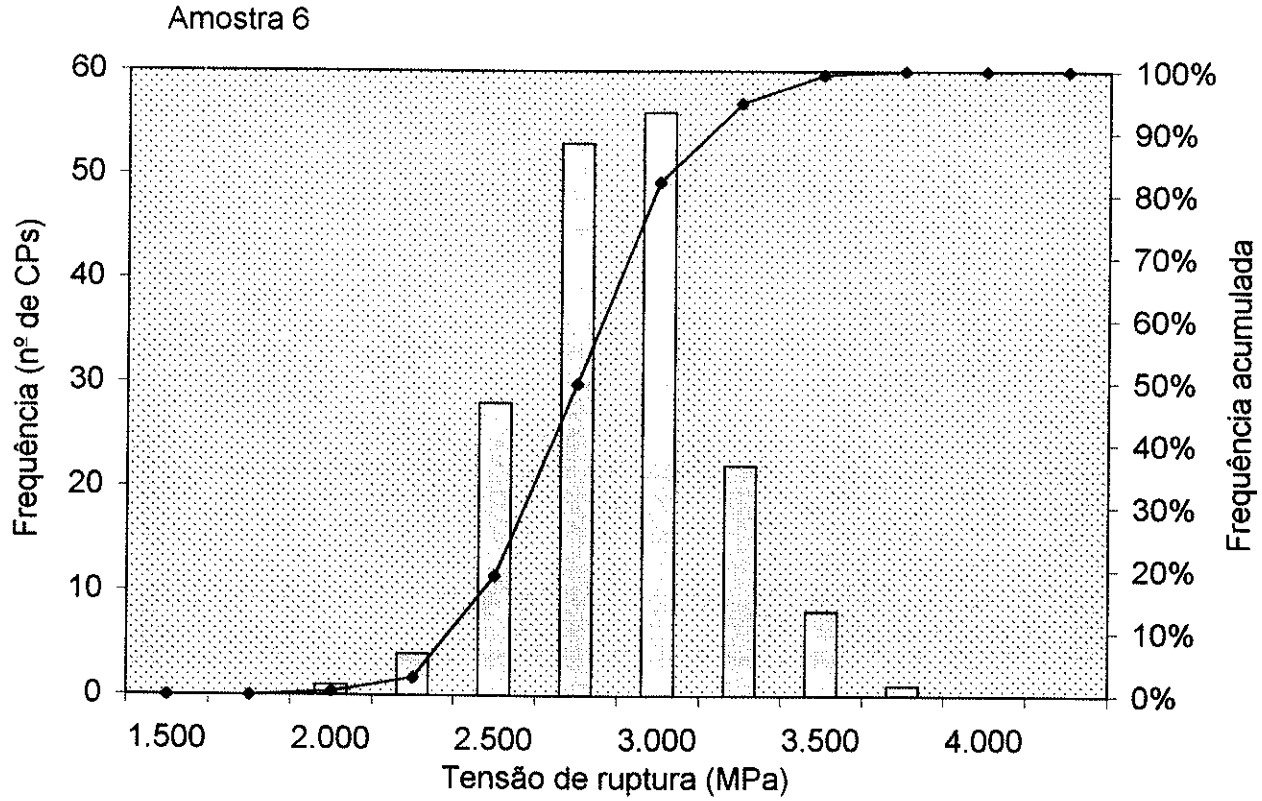


FIGURA 21a - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 300°C, das amostras de fibras brutas 2 e 3 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



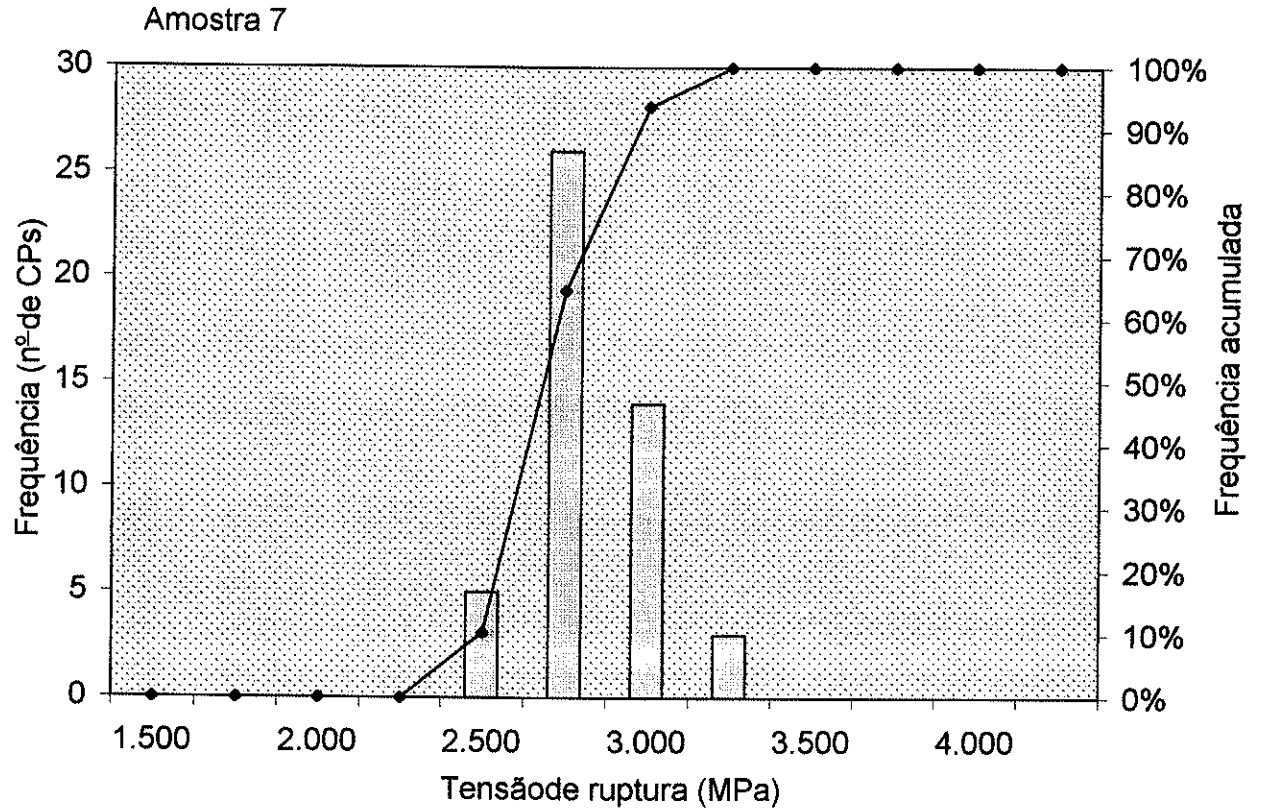
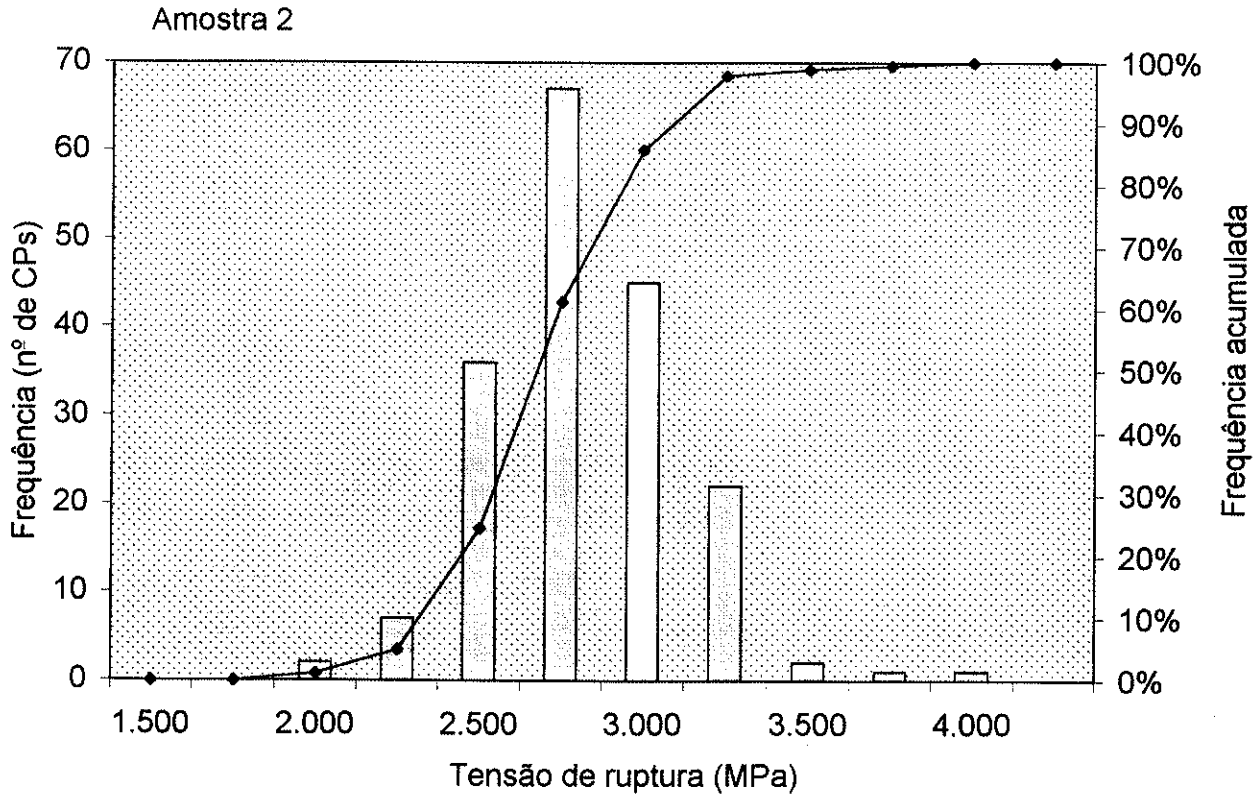


FIGURA 21b - Distribuição dos valores de tensão de ruptura,após aquecimento a 300°C, das amostras de fibras brutas 6 e 7 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



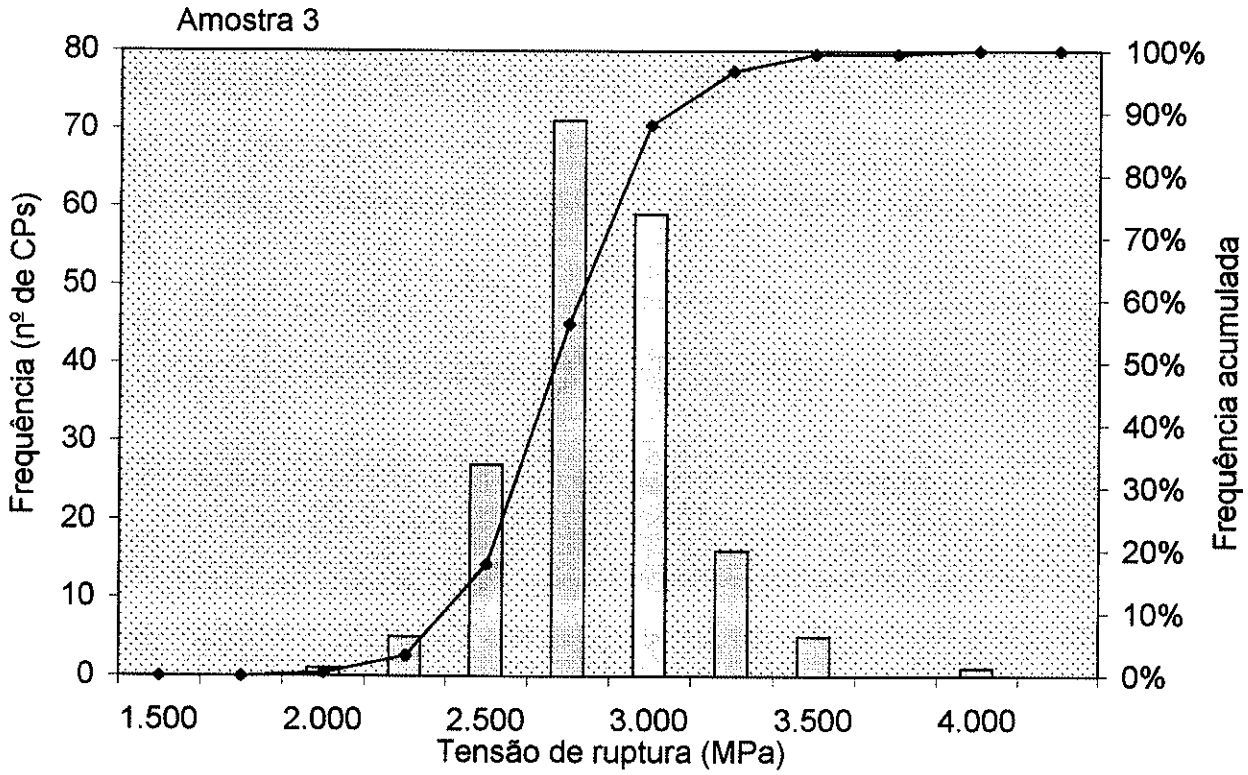
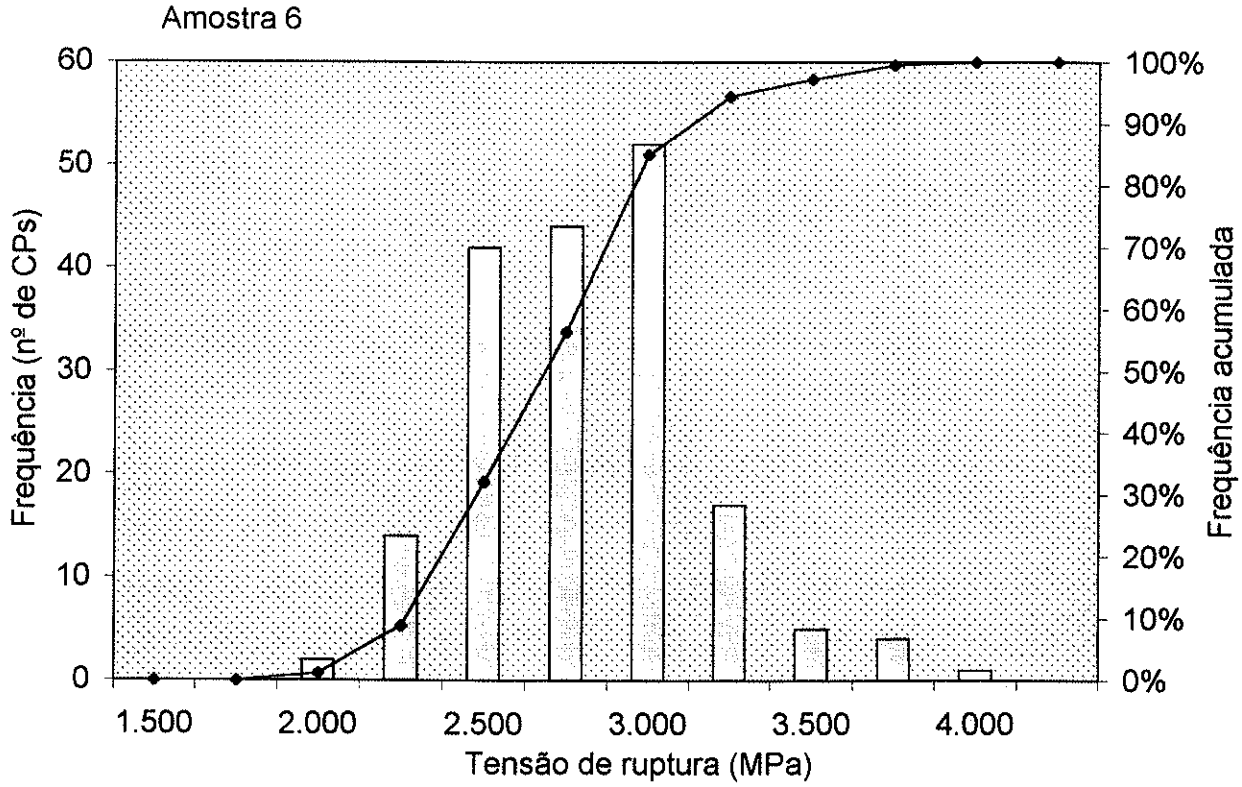


FIGURA 22a - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 500°C, das amostras de fibras brutas 2 e 3 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



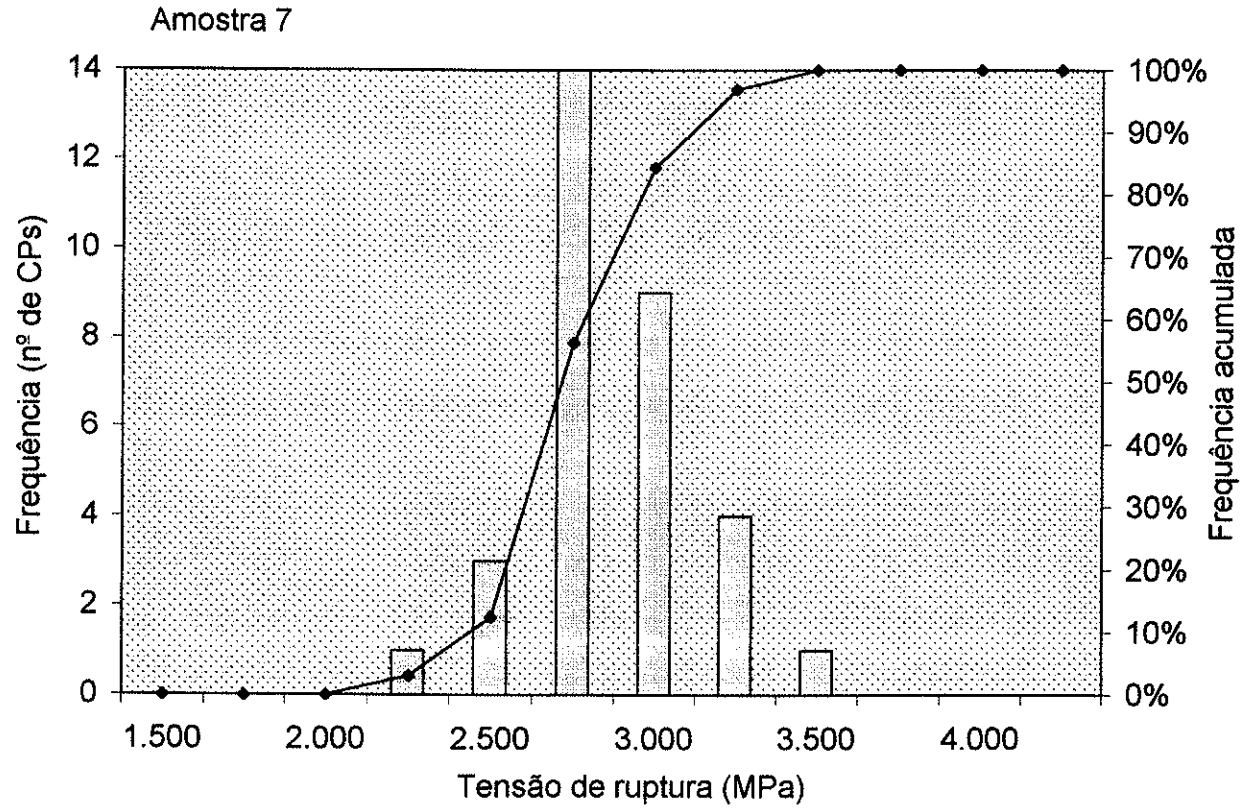
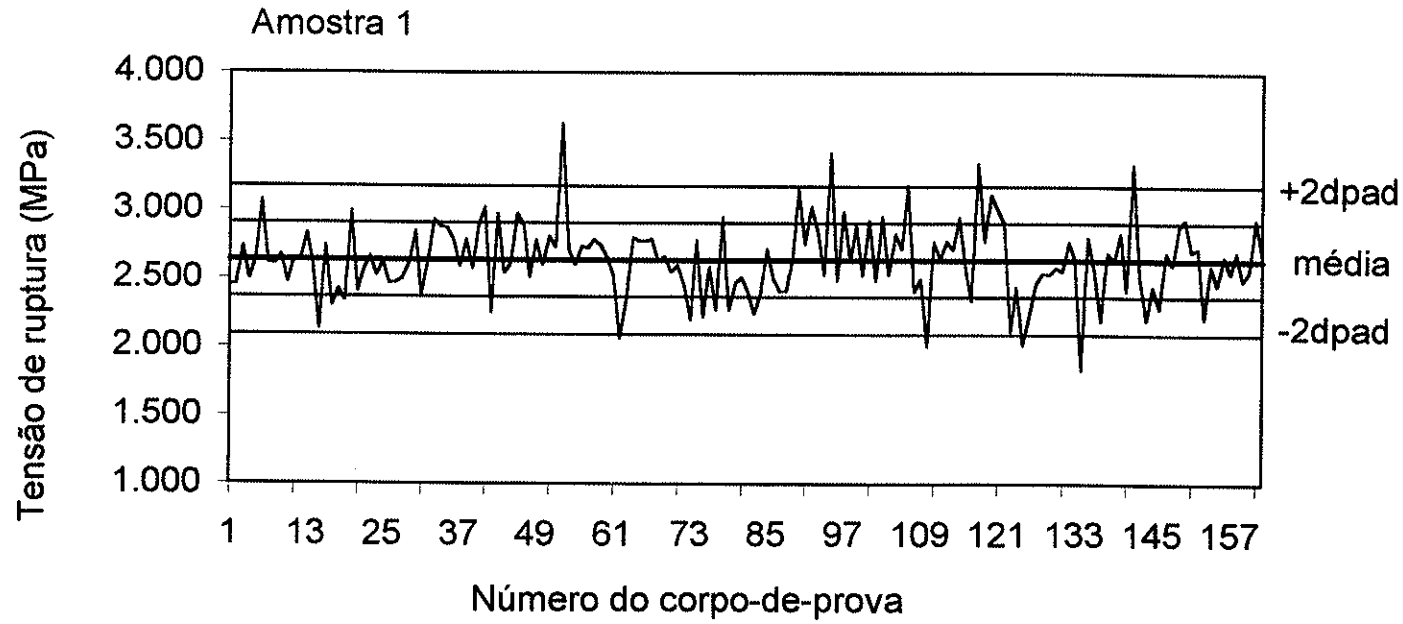


FIGURA 22b - Distribuição dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 500 °C, das amostras de fibras brutas 6 e 7 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



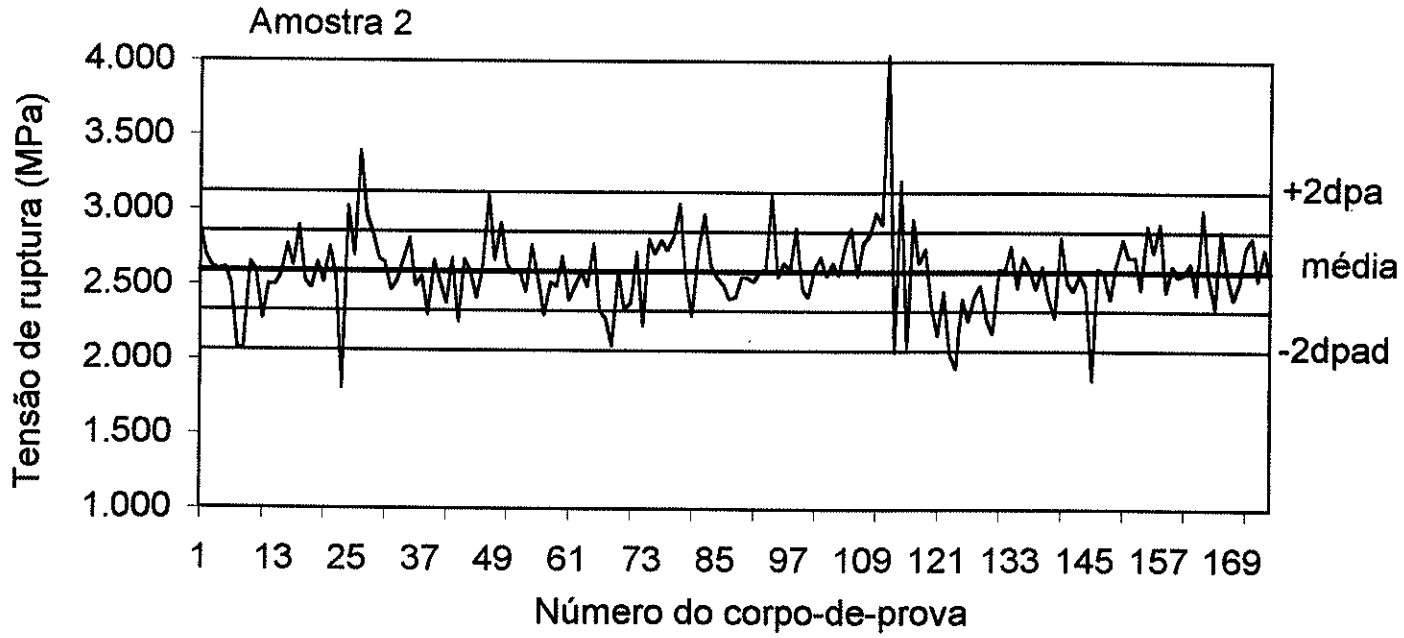
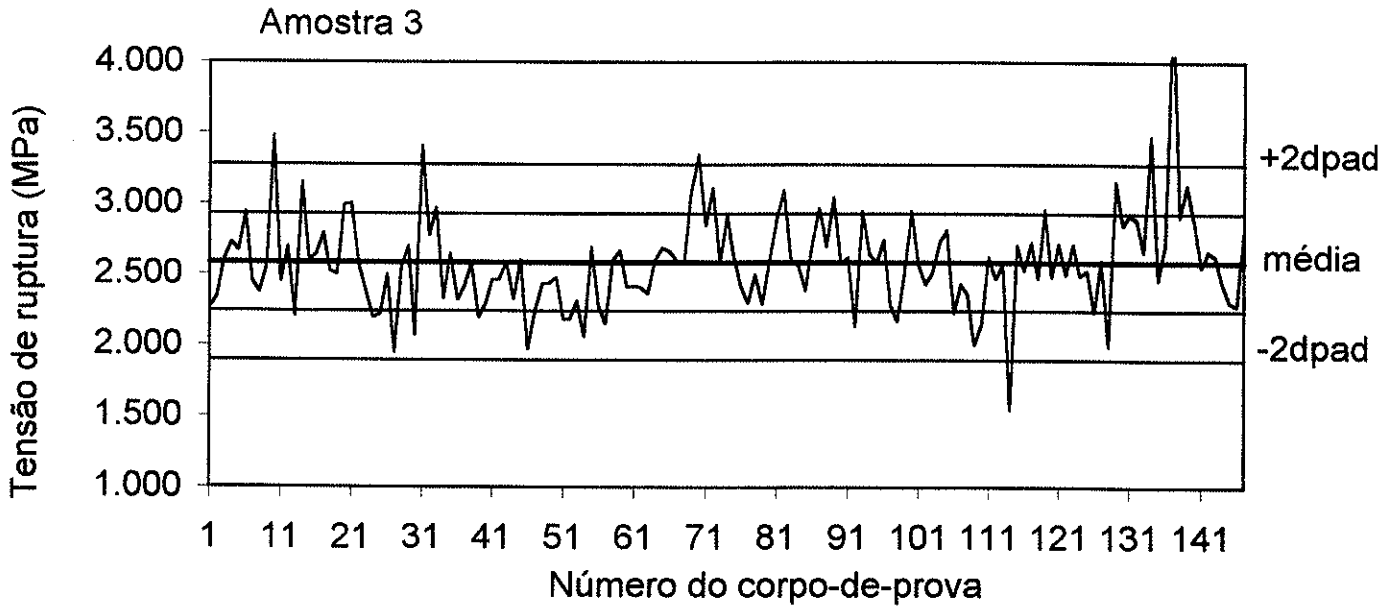


FIGURA 23a - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, para as amostras de fibras brutas 1 e 2 **(2ª etapa dos trabalhos).**



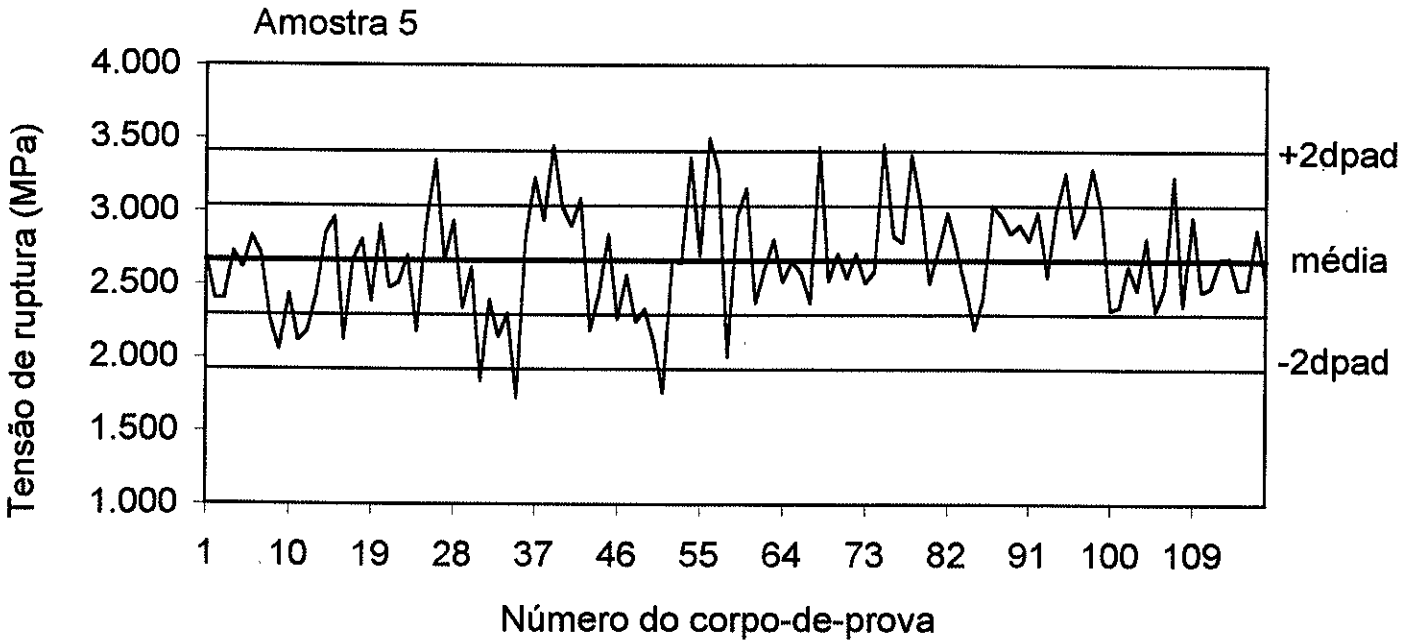
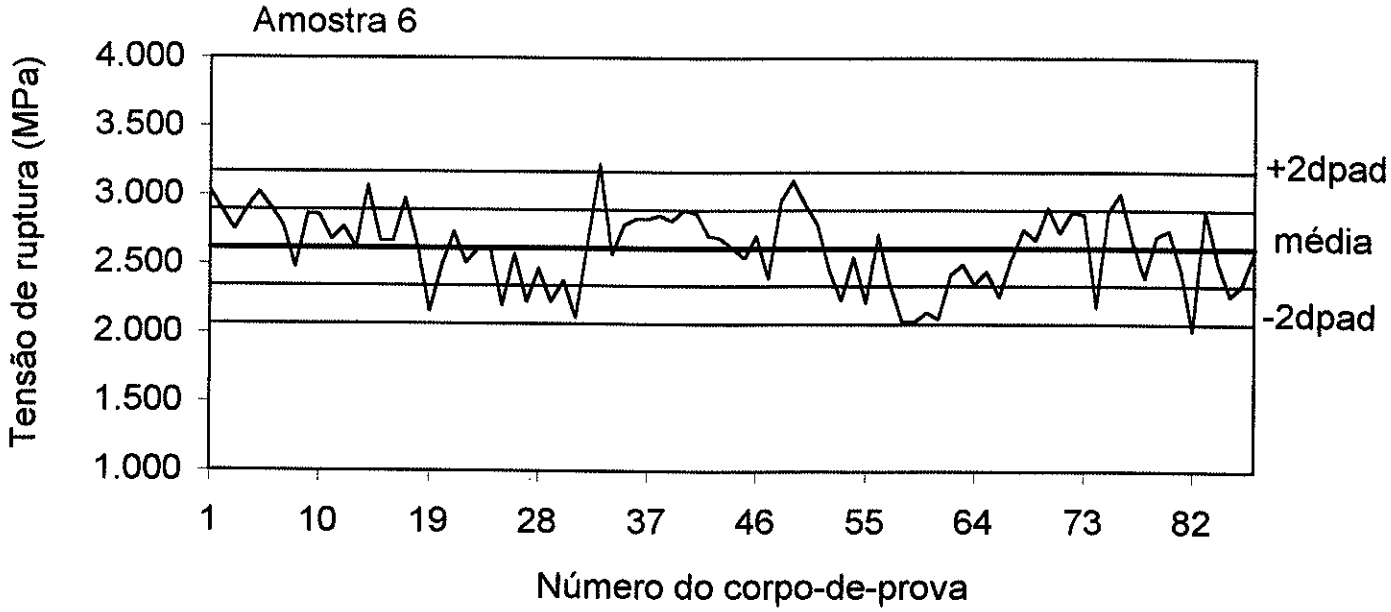


FIGURA 23b - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, para as amostras de fibras brutas 3 e 5 **(2ª etapa dos trabalhos).**



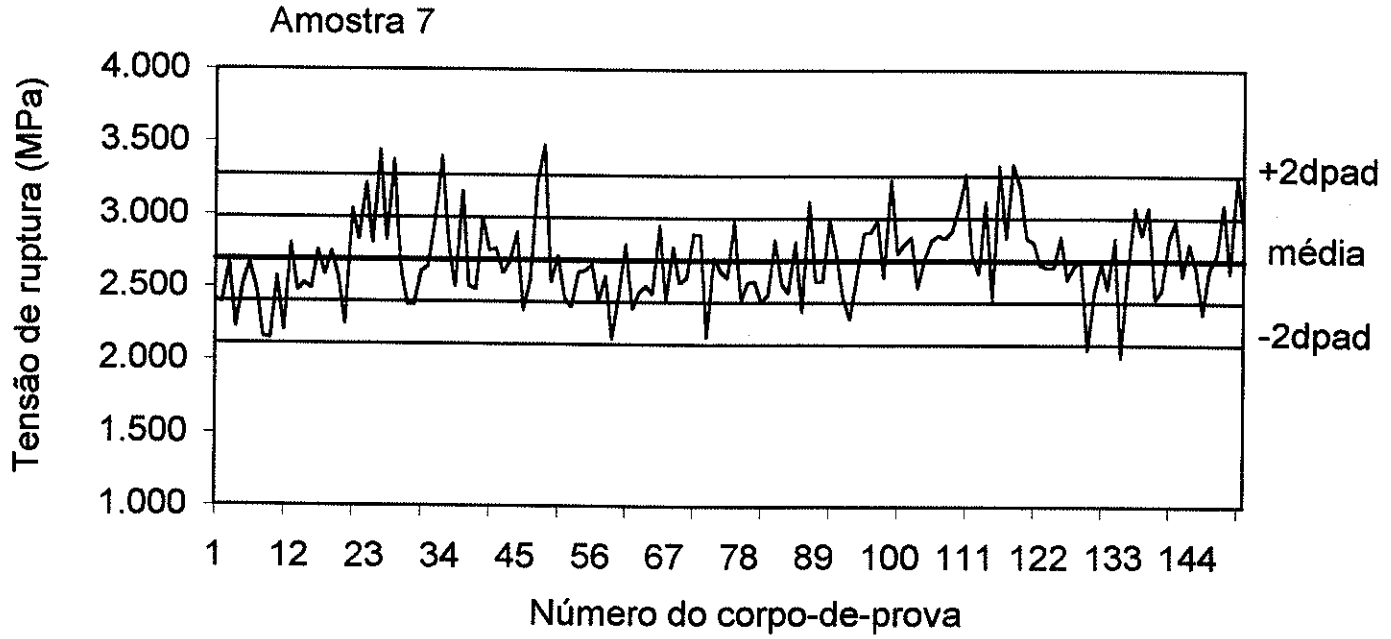
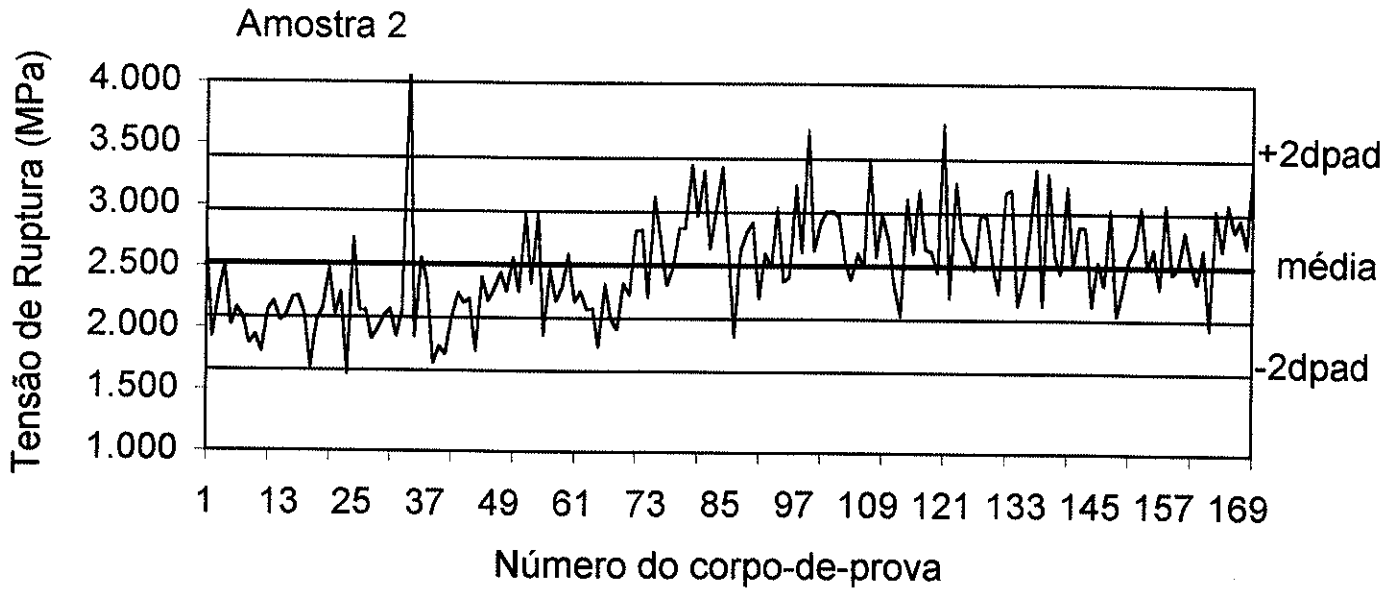


FIGURA 23c - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, à temperatura ambiente, para as amostras de fibras brutas 6 e 7 **(2ª etapa dos trabalhos).**



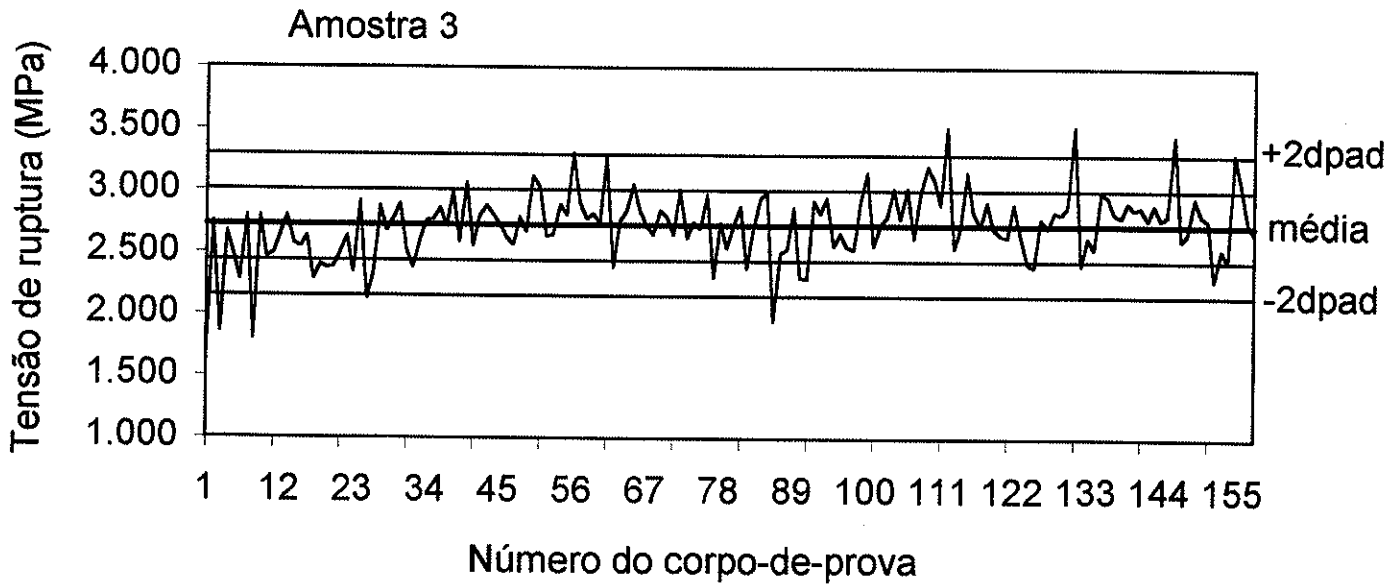
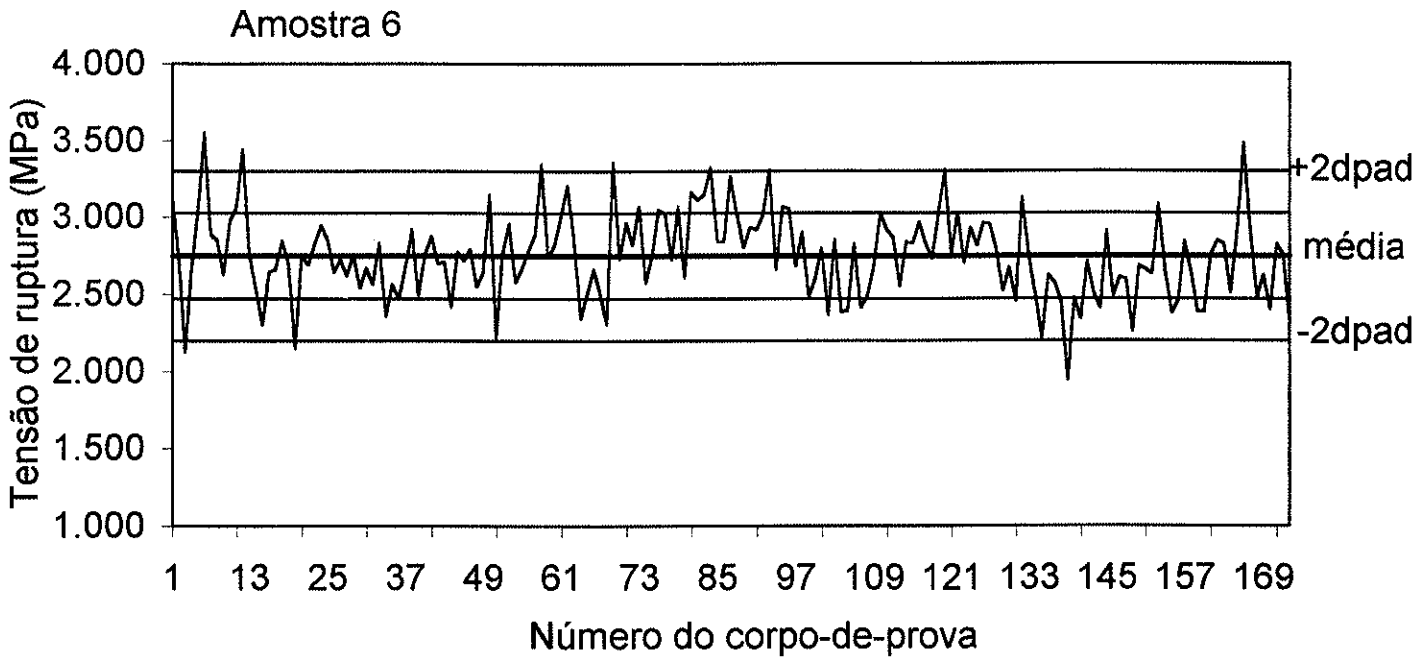


FIGURA 24a - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 300 °C, para as amostras de fibras brutas 2 e 3 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



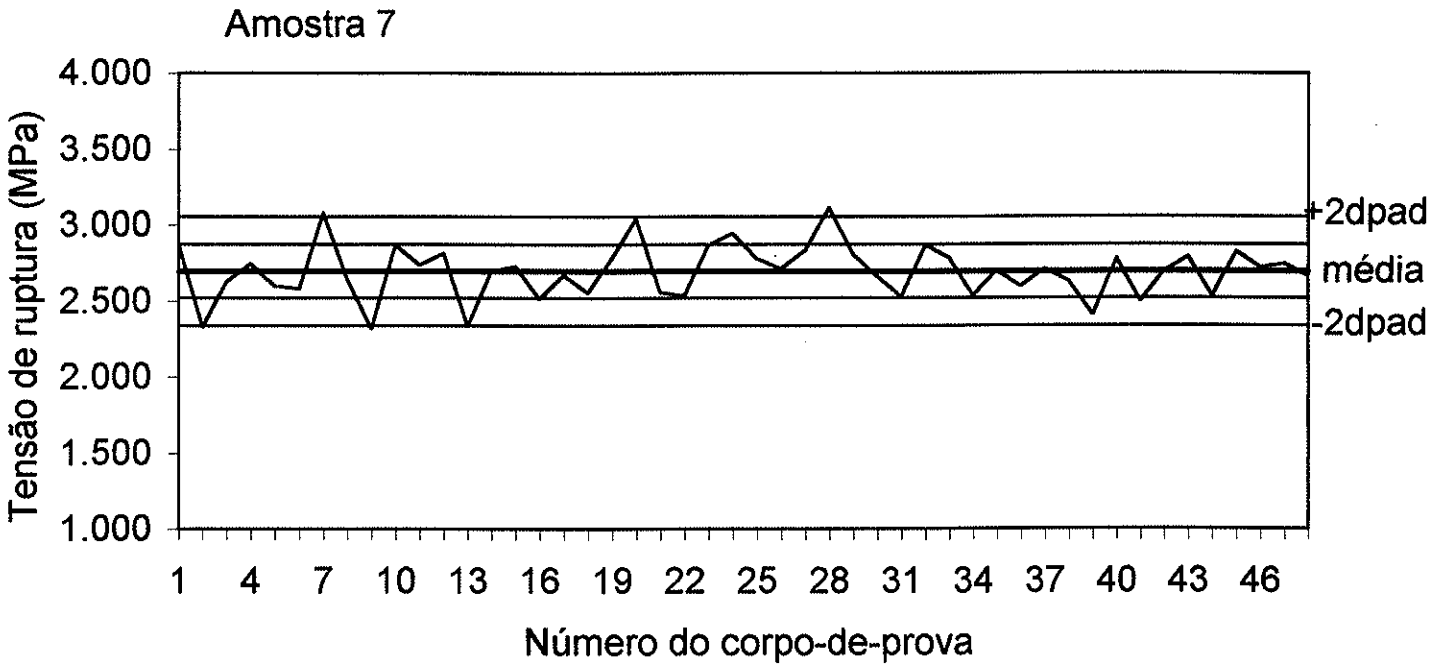
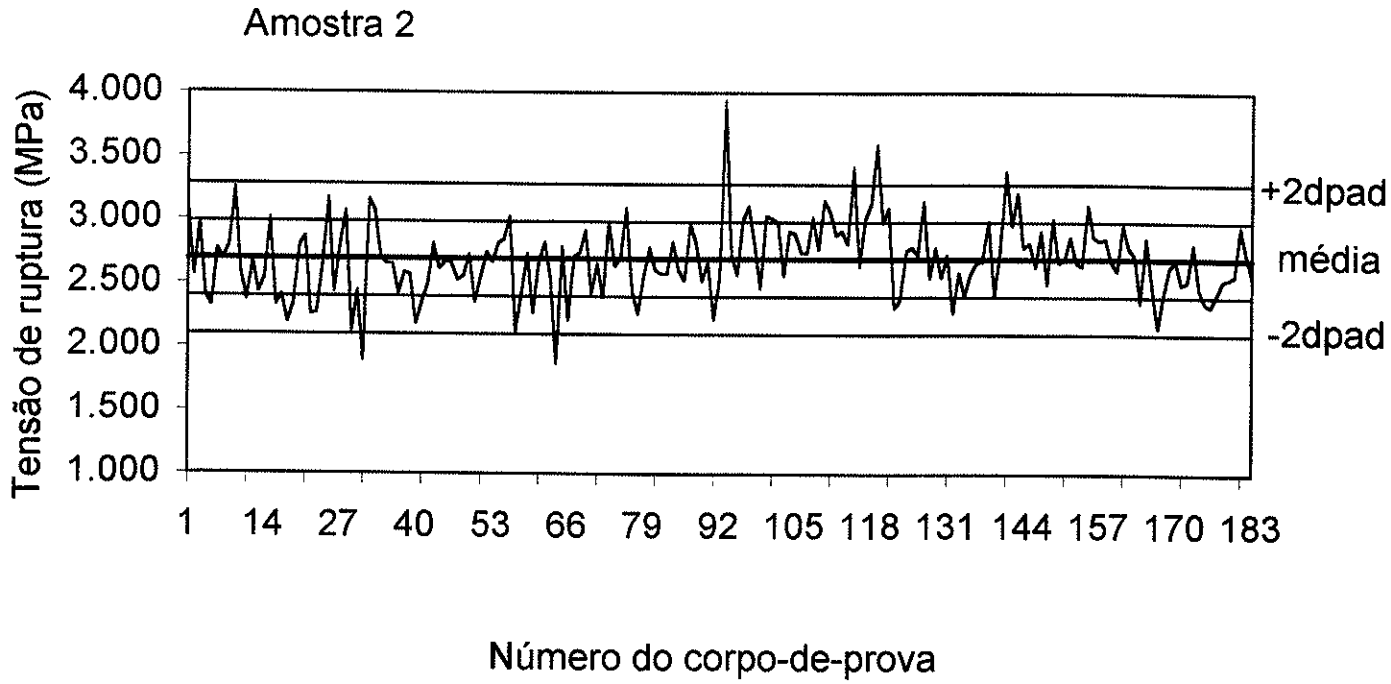


FIGURA 24b - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 300°C, para as amostras de fibras brutas 6 e 7 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



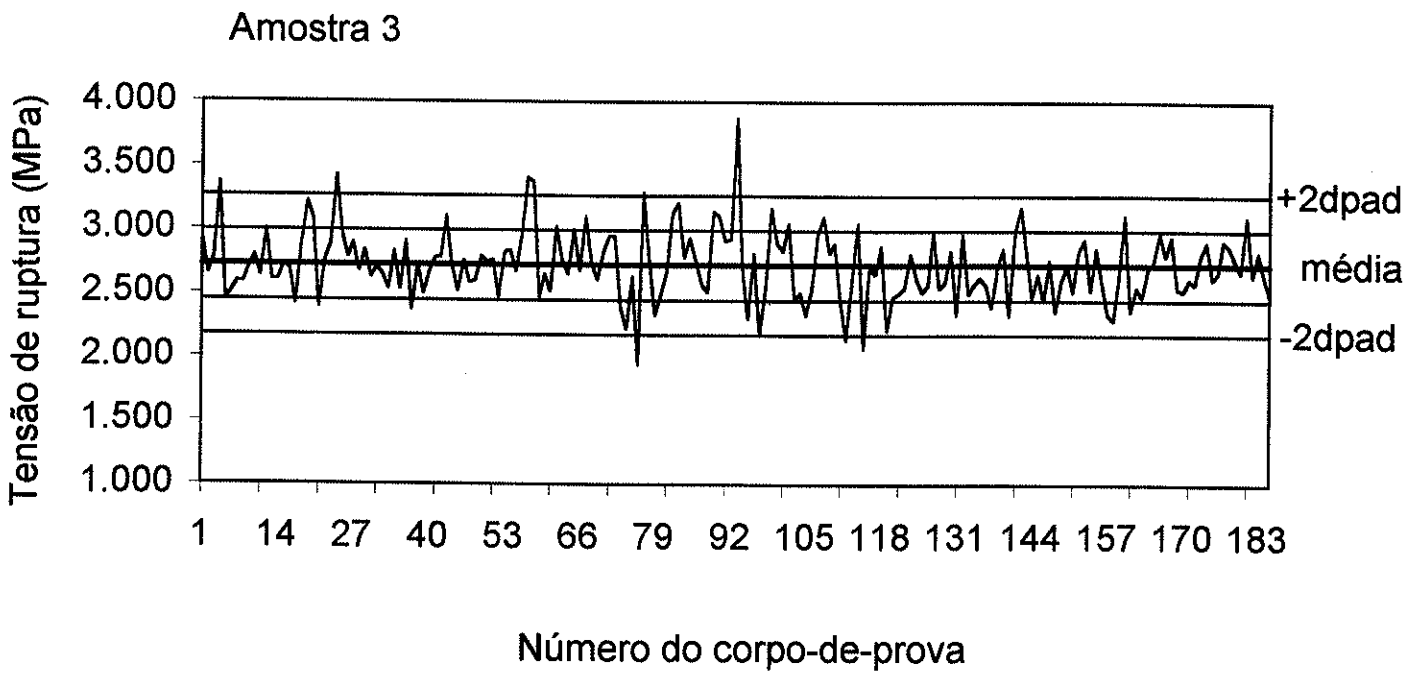
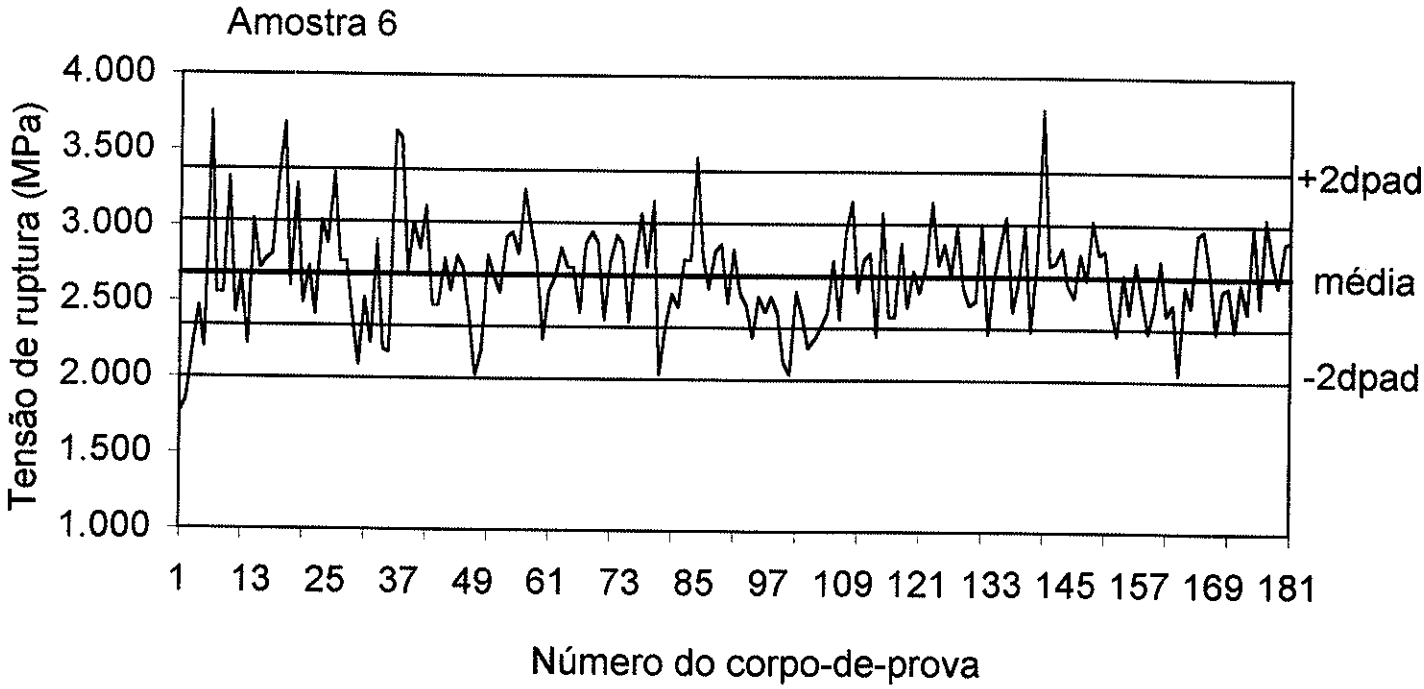


FIGURA 25a - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 500 °C, para as amostras 2 e3 **(2ª etapa dos trabalhos)**.



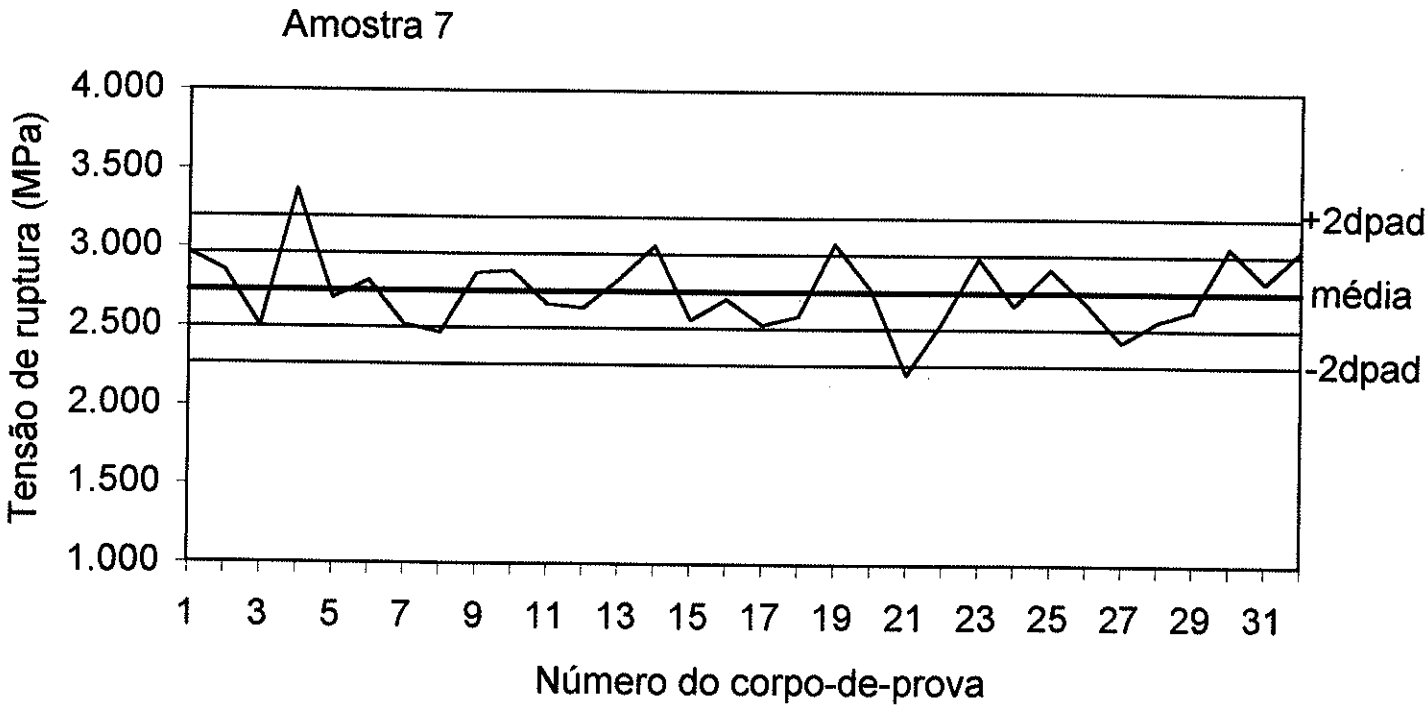


FIGURA 25b - Gráficos de controle dos valores de tensão de ruptura, após aquecimento a 500°C, para as amostras de fibras brutas 6 e 7 **(2ª etapa dos trabalhos)**.

ligeiramente superiores, o teor de impurezas também é maior; geralmente ocorrem, associados às fibras: magnetita, hematita e calcita, em proporções <5%.

As fibras semi-brutas e beneficiadas agregam impurezas, que vão ocorrer sob a forma de grãos associados às fibrilas. Os feixes já não são tão coesos, observando-se freqüentemente emaranhados de fibrilas, bem como microfibrilas associadas aos feixes. Na fibra beneficiada, o teor de material fino associado é ainda um pouco maior. Opticamente não se observa redução no comprimento das fibras maiores presentes nas amostras semi-brutas e beneficiadas, porém essas apresentam índices de refração ligeiramente superiores.

A análise dos ensaios tecnológicos efetuados nas fibras semi-brutas e beneficiadas conduz às seguintes observações:

- a resistência à flexão das fibras semi-brutas é mais alta que a das fibras beneficiadas;
- o índice de comprimento das fibras é diretamente proporcional à sua resistência à flexão;
- o índice de comprimento das fibras beneficiadas é menor que o das fibras semi-brutas;
- o índice de comprimento das fibras é inversamente proporcional ao teor de finos (<0,074 mm) presente nas fibras;
- as fibras beneficiadas do SP-2 apresentam teor de finos menor e portanto resistência à flexão maior, quando comparadas às fibras beneficiadas de SP-1 e SP-1/2.

6.6. Caracterização do minério

As matrizes de correlação de propriedades e suas análises encontram-se na forma de tabelas. Assim, na TABELA 22 é apresentada a matriz de correlação de dados de todas as amostras e nas TABELAS 23, 24 e 25, as matrizes de correlação de dados para as amostras de SP-1, SP-2 e SP-1/2, respectivamente, enquanto que o resumo dos resultados das análises encontra-se nas TABELAS 26, 27, 28 e 29.

Nas análises são ressaltados somente os parâmetros com correlação ≥0,9, positiva (relação direta) ou negativa (relação inversa).São discutidas aqui apenas as correlações consideradas mais importantes.

LEGENDA DAS TABELAS 22, 23 24 e 25

RO - massa específica aparente seca
N - porosidade aparente
A - absorção d'água aparente
ALA - abrasão *Los Angeles*
IT - impacto Treton
VP - velocidade de propagação de ondas P
CU - compressão uniaxial
ALA-B - abrasão *Los Angeles* - rocha britada
IC-P - índice de comprimento - fibra semi-bruta
IC-B - índice de comprimento - fibra beneficiada
LA-P - teor de finos (<0,074 mm) - fibra semi-bruta
LA-B - teor de finos (<0,074 mm) - fibra beneficiada
UR-P - unidade de resistência à flexão - fibra semi-bruta
UR-B - unidade de resistência à flexão - fibra beneficiada
Tr - resistência à tração - temperatura ambiente
Tr-3 - resistência à tração - 300°C
Tr-5 - resistência à tração - 500°C
PO-B - teor de finos (<0,074 mm) da rocha britada
PO-BA - teor de finos (<0,074 mm) da rocha britada atritada
CRIS-B - teor de crisotila da rocha britada
CRIS-BA - teor de crisotila da rocha britada atritada
ANT-B - teor de antigorita e/ou lizardita da rocha britada
ANT-BA - teor de antigorita e/ou lizardita da rocha britada atritada
OP-B - teor de opacos da rocha britada
OP-BA - teor de opacos da rocha britada atritada
CARB-B - teor de carbonatos da rocha britada
CARB-BA - teor de carbonatos da rocha britada atritada
SIL-B - teor de silicatos da rocha britada
SIL-BA - teor de silicatos da rocha britada atritada

Tabela 22: Matriz de correlação para todas as amostras

	RO	*N*	*A*	*A.L.A*	*I.T.*	*V.P.*	*C.U.*	*ALA-B*	*IC-P*	*IC-B*	*LA-P*	*LA-B*	*UR-P*	*UR-B*	*Tr*
RO	1														
N	-0.838	1													
A	-0.851	0.999	1												
A.L.A	-0.706	0.529	0.538	1											
I.T.	-0.836	0.677	0.698	0.659	1										
V.P.	0.880	-0.809	-0.818	-0.547	-0.837	1									
C.U.	0.612	-0.454	-0.462	-0.547	-0.690	0.629	1								
ALA-B	-0.579	0.483	0.480	0.493	0.532	-0.444	-0.677	1							
IC-P	-0.168	0.120	0.115	0.474	0.089	-0.035	-0.077	0.580	1						
IC-B	-0.301	0.310	0.307	0.548	0.334	-0.210	-0.297	0.683	0.924	1					
LA-P	0.530	-0.525	-0.530	-0.050	-0.300	0.617	0.385	-0.226	0.127	0.099	1				
LA-B	0.375	-0.430	-0.426	-0.668	-0.448	0.296	0.385	-0.709	-0.874	-0.973	-0.079	1			
UR-P	0.022	-0.252	-0.250	0.268	-0.097	0.200	0.209	0.349	0.851	0.649	0.327	-0.567	1		
UR-B	-0.291	0.297	0.294	0.541	0.345	-0.201	-0.301	0.712	0.936	0.981	0.087	-0.972	0.701	1	
Tr	-0.972	0.948	0.953	0.766	0.853	-0.908	-0.954	0.376	0.256	0.255	-0.380	-0.390	0.321	0.349	1
Tr-3	-0.388	0.613	0.595	0.787	0.285	-0.158	-0.077	0.977	0.981	0.984	0.369	-0.983	0.971	0.982	0.379
Tr-5	-0.562	0.641	0.660	0.416	0.821	-0.357	-0.509	0.343	0.226	0.504	0.619	-0.554	0.178	0.534	0.553
PO-B	-0.106	0.382	0.361	0.193	0.245	-0.271	-0.679	0.442	-0.049	0.072	-0.005	-0.190	-0.273	0.127	0.216
PO-BA	-0.077	0.340	0.319	0.168	0.215	-0.248	-0.645	0.380	-0.087	0.010	0.021	-0.130	-0.266	0.075	0.272
CRIS-B	-0.198	0.233	0.224	0.088	0.059	-0.369	-0.476	0.146	0.220	0.176	-0.114	-0.126	0.164	0.192	0.340
CRIS-BA	0.084	-0.062	-0.081	0.529	-0.087	0.093	-0.068	0.232	0.446	0.396	0.559	-0.425	0.379	0.357	0.000
ANT-B	-0.149	-0.187	-0.183	0.092	0.098	0.102	-0.256	0.261	-0.172	-0.231	0.260	0.224	0.116	-0.211	-0.105
ANT-BA	-0.250	-0.138	-0.123	-0.061	0.243	-0.344	-0.192	0.115	-0.471	-0.442	-0.311	0.451	-0.260	-0.451	-0.143
OP-B	0.073	0.002	-0.011	0.056	-0.038	-0.237	-0.202	-0.093	-0.480	-0.424	-0.210	0.358	-0.571	-0.470	-0.245
OP-BA	-0.075	0.229	0.240	-0.202	0.211	-0.272	-0.020	-0.040	-0.326	-0.185	-0.671	0.128	-0.509	-0.167	-0.052
CARB-B	0.024	0.167	0.178	-0.148	0.128	0.082	0.221	-0.166	0.122	0.248	-0.100	-0.247	-0.036	0.250	0.143
CARB-BA	0.070	0.182	0.180	-0.159	-0.037	0.175	-0.005	0.047	0.383	0.376	0.045	-0.359	0.267	0.447	0.209
SIL-B	0.171	-0.249	-0.243	-0.636	-0.278	0.328	0.098	0.145	0.110	0.057	-0.070	0.097	0.220	0.084	-0.494
SIL-BA	0.205	-0.378	-0.368	-0.448	-0.355	0.297	0.519	-0.680	-0.739	-0.839	-0.031	0.875	-0.428	-0.881	-0.340
SER	-0.400	0.239	0.252	0.509	0.352	-0.098	-0.447	0.565	0.023	0.211	-0.064	-0.275	-0.040	0.289	0.217
OP	0.019	0.292	0.270	-0.326	-0.145	-0.158	0.117	-0.114	-0.325	-0.053	-0.025	-0.055	-0.593	-0.125	0.645

Tr-3	Tr-5	PO-B	PO-BA	CRIS-B	CRIS-BA	ANT-B	ANT-BA	OP-B	OP-BA	CARB-B	CARB-BA	SIL-B	SIL-BA	SER	OP
1															
0.394	1														
-0.639	-0.667	1													
-0.694	-0.567	0.994	1												
-0.305	-0.404	0.427	0.459	1											
0.785	-0.225	0.315	0.308	0.186	1										
-0.971	-0.521	0.058	0.076	-0.209	0.237	1									
-0.918	-0.424	-0.118	-0.115	-0.198	-0.218	0.645	1								
-0.411	-0.802	0.422	0.421	0.128	0.285	0.102	0.443	1							
-0.498	0.566	-0.091	-0.127	-0.385	-0.700	-0.460	0.180	0.128	1						
0.423	0.889	-0.350	-0.379	-0.319	-0.554	-0.665	-0.500	-0.623	0.543	1					
0.411	0.802	0.099	0.105	0.273	-0.287	-0.567	-0.780	-0.710	0.049	0.668	1				
-0.584	-0.140	-0.134	-0.136	0.167	-0.497	0.044	-0.054	-0.565	-0.030	0.224	0.502	1			
-0.980	-0.566	-0.514	-0.472	-0.408	-0.341	0.359	0.514	0.209	0.063	-0.188	-0.520	-0.023	1		
-0.061	0.781	0.225	0.195	-0.303	-0.368	0.361	0.141	-0.480	0.210	0.298	0.276	0.364	-0.240	1	
0.177	0.728	0.376	0.366	0.218	0.081	-0.237	-0.135	0.307	0.050	0.101	-0.020	-0.475	-0.089	-0.429	1

Tabela 23: Matriz de correlação para as amostras de serpentinito tipo 1 (SP-1)

	RO	*N*	*A*	*A.L.A*	*I.T.*	*V.P.*	*C.U.*	*ALA-B*	*IC-P*	*IC-B*	*LA-P*	*LA-B*	*UR-P*	*UR-B*	*Tr*	*Tr-3*
RO	1															
N	-0.688	1														
A	-0.716	0.999	1													
A.L.A	-0.701	0.119	0.155	1												
I.T.	-0.860	0.285	0.321	0.668	1											
V.P.	0.995	-0.877	-0.881	0.891	-0.506	1										
C.U.	0.604	-0.241	-0.249	0.938	-0.977	0.678	1									
ALA-B	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1								
IC-P	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1							
IC-B	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1.000	1						
LA-P	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	1					
LA-B	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1				
UR-P	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1			
UR-B	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	1		
Tr	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1	
Tr-3	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1
Tr-5	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
PO-B	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
PO-BA	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
CRIS-B	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
CRIS-BA	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
ANT-B	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
ANT-BA	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
OP-B	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
OP-BA	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
CARB-B	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
CARB-BA	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
SIL-B	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
SIL-BA	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
SER	-0.580	0.278	0.301	0.896	0.341	0.430	0.955	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!
OP	-0.037	0.723	0.696	-0.594	-0.295	-0.926	-0.351	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!

Tr-5	PO-B	PO-BA	CRIS-B	CRIS-BA	ANT-B	ANT-BA	OP-B	OP-BA	CARB-B	CARB-BA	SIL-B	SIL-BA	SER	OP
1														
#DIV/0!	1													
#DIV/0!	1.000	1												
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1											
#DIV/0!	1.000	1.000	#DIV/0!	1										
#DIV/0!	1.000	1.000	#DIV/0!	1.000	1									
#DIV/0!	1.000	1.000	#DIV/0!	1.000	1.000	1								
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1							
#DIV/0!	-1.000	-1.000	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	1						
#DIV/0!	-1.000	-1.000	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	1.000	1					
#DIV/0!	-1.000	-1.000	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	1.000	1.000	1				
#DIV/0!	1.000	1.000	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	1			
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1		
#DIV/0!	1.000	1.000	#DIV/0!	1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	#DIV/0!	1	
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	-0.358	1

Tabela 24: Matriz de correlação para as amostras de serpentinito tipo 2 (SP-2)

	RO	*N*	*A*	*A.L.A*	*I.T.*	*V.P.*	*C.U.*	*ALA-B*	*IC-P*	*IC-B*	*LA-P*	*LA-B*	*UR-P*	*UR-B*	*Tr*	*Tr-3*
RO	1															
N	-0.802	1														
A	-0.825	0.999	1													
A.L.A	-0.872	0.838	0.841	1												
I.T.	-0.865	0.813	0.837	0.572	1											
V.P.	0.856	-0.822	-0.841	-0.703	-0.896	1										
C.U.	0.059	-0.163	-0.181	0.319	-0.466	0.314	1									
ALA-B	0.366	-0.868	-0.836	-0.492	-0.045	0.159	0.390	1								
IC-P	0.013	-0.636	-0.587	0.466	-0.463	-0.015	0.804	-0.039	1							
IC-B	-0.391	-0.271	-0.211	0.764	-0.111	-0.382	0.534	-0.189	0.925	1						
LA-P	0.463	0.193	0.132	-0.232	-0.157	0.365	-0.492	-0.717	-0.477	-0.495	1					
LA-B	0.529	0.119	0.057	-0.800	-0.065	0.531	-0.457	0.064	-0.854	-0.975	0.634	1				
UR-P	-0.181	-0.474	-0.419	0.594	-0.291	-0.198	0.715	-0.032	0.983	0.972	-0.562	-0.935	1			
UR-B	-0.463	-0.193	-0.132	0.724	0.016	-0.475	0.537	0.054	0.872	0.961	-0.712	-0.992	0.947	1		
Tr	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1	
Tr-3	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	-1.000	1
Tr-5	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-1.000	1.000	-1.000
PO-B	0.648	-0.029	-0.091	-0.838	-0.224	0.654	-0.340	0.024	-0.759	-0.927	0.679	0.986	-0.867	-0.976	-1.000	1.000
PO-BA	0.623	0.004	-0.058	-0.810	-0.201	0.631	-0.375	-0.019	-0.771	-0.926	0.709	0.987	-0.876	-0.982	#DIV/0!	#DIV/0!
CRIS-B	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0.522	-0.202	-0.043	-0.063	-0.943	0.351	0.429	0.570	-0.271	0.319	0.171	#DIV/0!	#DIV/0!
CRIS-BA	0.989	-0.864	-0.893	-0.302	-0.885	0.780	0.455	-0.408	0.325	0.063	0.549	0.156	0.158	-0.165	-1.000	1.000
ANT-B	0.623	0.004	-0.058	-0.905	-0.075	0.541	-0.281	0.408	-0.795	-0.958	0.329	0.937	-0.867	-0.889	#DIV/0!	#DIV/0!
ANT-BA	-0.930	0.496	0.549	0.011	0.532	-0.460	-0.012	0.798	-0.120	-0.026	-0.813	-0.182	-0.003	0.251	1.000	-1.000
OP-B	0.989	-0.864	-0.893	-0.870	-0.820	0.944	0.588	0.471	0.025	-0.356	0.063	0.451	-0.137	-0.361	-1.000	1.000
OP-BA	-0.930	0.496	0.549	-0.051	0.502	-0.409	-0.003	0.828	-0.149	-0.074	-0.798	-0.132	-0.040	0.206	1.000	-1.000
CARB-B	-0.989	0.864	0.893	0.636	0.962	-0.964	-0.581	0.000	-0.209	0.148	-0.364	-0.330	-0.024	0.288	1.000	-1.000
CARB-BA	-0.366	0.868	0.836	0.302	0.460	-0.314	-0.845	-0.816	-0.512	-0.279	0.768	0.312	-0.473	-0.428	1.000	-1.000
SIL-B	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
SIL-BA	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
SER	0.116	-0.323	-0.304	-0.210	0.140	0.293	-0.329	0.302	-0.893	-0.742	0.055	0.583	-0.809	-0.582	1.000	-1.000
OP	-0.100	0.223	0.241	0.114	0.286	-0.146	-0.852	-0.816	-0.512	-0.279	0.768	0.312	-0.473	-0.428	1.000	-1.000

Tr-5	PO-B	PO-BA	CRIS-B	CRIS-BA	ANT-B	ANT-BA	OP-B	OP-BA	CARB-B	CARB-BA	SIL-B	SIL-BA	SER	OP
1														
-1.000	1													
#DIV/0!	0.999	1												
#DIV/0!	-0.189	-0.155	1											
-1.000	0.315	0.314	0.577	1										
#DIV/0!	0.910	0.896	-0.577	0.000	1									
1.000	-0.301	-0.324	-0.847	-0.865	0.113	1								
-1.000	0.552	0.517	-0.333	0.577	0.577	-0.152	1							
1.000	-0.248	-0.273	-0.878	-0.845	0.169	0.998	-0.098	1						
1.000	-0.478	-0.460	-0.174	-0.905	-0.302	0.601	-0.870	0.561	1					
1.000	0.268	0.314	0.577	0.000	0.000	-0.489	-0.577	-0.507	0.302	1				
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1			
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1		
1.000	0.441	0.446	-0.602	-0.707	0.639	0.535	-0.214	0.552	0.538	0.303	#DIV/0!	#DIV/0!	1	
1.000	0.268	0.314	0.577	0.000	0.000	-0.489	-0.577	-0.507	0.302	1.000	#DIV/0!	#DIV/0!	0.396	1

Tabela 25: Matriz de correlação para as amostras de serpentinito tipo 1/2 (SP-1/2)

	RO	*N*	*A*	*A.L.A*	*I.T.*	*V.P.*	*C.U.*	*ALA-B*	*IC-P*	*IC-B*	*LA-P*	*LA-B*	*UR-P*	*UR-B*	*Tr*	*Tr-3*
RO	1															
N	-0.976	1														
A	-0.975	1.000	1													
A.L.A	-0.862	0.937	0.936	1												
I.T.	-0.933	0.989	0.989	0.967	1											
V.P.	0.899	-0.827	-0.828	-0.579	-0.749	1										
C.U.	0.941	-0.845	-0.845	-0.649	-0.758	0.946	1									
ALA-B	-0.094	0.126	0.124	0.402	0.167	0.319	0.027	1								
IC-P	0.020	0.037	0.036	0.345	0.098	0.438	0.168	0.988	1							
IC-B	0.055	0.063	0.062	0.403	0.160	0.486	0.283	0.908	0.955	1						
LA-P	0.831	-0.726	-0.726	-0.444	-0.628	0.985	0.935	0.378	0.506	0.590	1					
LA-B	0.124	-0.246	-0.245	-0.565	-0.339	-0.322	-0.125	-0.899	-0.930	-0.983	-0.443	1				
UR-P	0.258	-0.274	-0.276	-0.018	-0.253	0.570	0.273	0.906	0.908	0.774	0.565	-0.694	1			
UR-B	0.004	0.079	0.077	0.400	0.153	0.436	0.190	0.969	0.992	0.983	0.522	-0.967	0.854	1		
Tr	-1.000	0.965	0.965	0.803	0.898	-0.858	-0.941	0.610	0.448	0.213	-0.756	-0.327	0.551	0.371	1	
Tr-3	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	-1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	1
Tr-5	-1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	-1.000	1.000	1.000	#DIV/0!	1.000
PO-B	-0.463	0.259	0.257	0.052	0.122	-0.561	-0.716	0.048	-0.100	-0.371	-0.663	0.325	0.102	-0.201	0.733	-1.000
PO-BA	-0.373	0.161	0.159	-0.053	0.021	-0.502	-0.649	0.004	-0.138	-0.415	-0.617	0.386	0.102	-0.245	0.666	-1.000
CRIS-B	0.000	-0.214	-0.216	-0.367	-0.343	-0.134	-0.307	0.076	-0.030	-0.323	-0.280	0.366	0.317	-0.154	0.500	-1.000
CRIS-BA	0.567	-0.400	-0.400	-0.071	-0.269	0.832	0.793	0.486	0.616	0.773	0.915	-0.683	0.500	0.672	-0.500	1.000
ANT-B	0.647	-0.789	-0.789	-0.938	-0.867	0.323	0.354	-0.424	-0.421	-0.563	0.159	0.697	-0.009	-0.505	-0.500	-1.000
ANT-BA	0.288	-0.385	-0.384	-0.670	-0.459	-0.160	0.059	-0.918	-0.920	-0.940	-0.279	0.982	-0.678	-0.948	-0.500	-1.000
OP-B	0.018	-0.068	-0.066	-0.367	-0.123	-0.400	-0.123	-0.994	-0.999	-0.944	-0.466	0.925	-0.908	-0.988	-0.500	-1.000
OP-BA	-0.567	0.647	0.649	0.494	0.665	-0.677	-0.438	-0.574	-0.581	-0.400	-0.592	0.261	-0.866	-0.494	#DIV/0!	#DIV/0!
CARB-B	-0.242	0.418	0.418	0.701	0.534	0.160	0.080	0.649	0.699	0.855	0.321	-0.913	0.344	0.781	0.189	1.000
CARB-BA	-0.210	0.212	0.210	0.447	0.231	0.185	-0.122	0.986	0.948	0.832	0.233	-0.840	0.882	0.917	0.756	1.000
SIL-B	0.567	-0.647	-0.649	-0.494	-0.665	0.677	0.438	0.574	0.581	0.400	0.592	-0.261	0.866	0.494	#DIV/0!	#DIV/0!
SIL-BA	0.018	-0.068	-0.066	-0.367	-0.123	-0.400	-0.123	-0.994	-0.999	-0.944	-0.466	0.925	-0.908	-0.988	-0.500	-1.000
SER	-0.513	0.709	0.710	0.918	0.831	0.016	-0.177	0.991	0.998	0.953	0.189	-0.982	0.998	0.990	0.500	1.000
OP	-0.567	0.647	0.649	0.494	0.665	-0.677	-0.438	-0.574	-0.581	-0.400	-0.592	0.261	-0.866	-0.494	#DIV/0!	#DIV/0!

Tr-5	PO-B	PO-BA	CRIS-B	CRIS-BA	ANT-B	ANT-BA	OP-B	OP-BA	CARB-B	CARB-BA	SIL-B	SIL-BA	SER	OP
1														
-1.000	1													
-1.000	0.994	1												
-1.000	0.884	0.922	1											
1.000	-0.810	-0.804	-0.577	1										
-1.000	0.293	0.391	0.640	-0.246	1									
-1.000	0.166	0.237	0.272	-0.533	0.741	1								
-1.000	0.056	0.096	0.000	-0.577	0.426	0.923	1							
#DIV/0!	-0.211	-0.261	-0.577	-0.333	-0.492	0.220	0.577	1						
1.000	-0.540	-0.615	-0.688	0.662	-0.880	-0.885	-0.688	0.132	1					
1.000	0.206	0.157	0.192	0.333	-0.410	-0.888	-0.962	-0.556	0.574	1				
#DIV/0!	0.211	0.261	0.577	0.333	0.492	-0.220	-0.577	-1.000	-0.132	0.556	1			
-1.000	0.056	0.096	0.000	-0.577	0.426	0.923	1.000	0.577	-0.688	-0.962	-0.577	1		
1.000	-0.222	-0.313	-0.500	0.500	-1.000	-1.000	-1.000	#DIV/0!	0.945	0.945	#DIV/0!	-1.000	1	
#DIV/0!	-0.211	-0.261	-0.577	-0.333	-0.492	0.220	0.577	1.000	0.132	-0.556	-1.000	0.577	#DIV/0!	1

TABELA 26 - Ensaios com forte correlação (≥0,9) para todas as amostras analisadas (**2ª etapa dos trabalhos**).

Ensaio	Correlação Positiva	Correlação Negativa
Porosidade	Absorção d'água	-
Índice de comprimento das fibras semi-brutas	Índice de comprimento das fibras beneficiadas Resistência à flexão das fibras beneficiadas Resistência à tração das fibras brutas a 300°C	-
Índice de comprimento das fibras beneficiadas	Resistência à flexão das fibras beneficiadas Resistência à tração das fibras brutas a 300°C	Teor de finos das fibras beneficiadas
Teor de finos das fibras beneficiadas	-	Resistência à flexão das fibras beneficiadas Resistência à tração das fibras brutas a 300°C
Resistência à flexão das fibras semi-brutas e beneficiadas	Resistência à tração das fibras brutas a 300°C	-
Teor de finos da rocha britada	Teor de finos da rocha britada atritada	-

TABELA 27- Ensaios com forte correlação (≥0,9) para as amostras de SP-1.

Ensaio	Correlação Positiva	Correlação Negativa
Massa específica aparente	Velocidade de propagação de Ondas P	-
Porosidade	Absorção d'água	-
Abrasão Los Angeles	Compressão Uniaxial	-
Impacto Treton	-	Compressão Uniaxial
Velocidade de propagação de ondas P	-	Teor de opacos dos finos da rocha *in natura*

TABELA 28 - Ensaios com forte correlação (≥0,9) para as amostras de SP-2.

Ensaio	Correlação Positiva	Correlação Negativa
Massa específica aparente	Teor de opacos dos finos da rocha britada	Impacto Treton Teor de carbonato dos finos da rocha britada
Porosidade	Absorção d'água	-
Abrasão Los Angeles	Índice de comprimento das fibras beneficiadas Resistência à flexão das fibras beneficiadas	Teor de finos dos finos das fibras beneficiadas Teor de silicatos dos finos da rocha britada Teor de silicatos dos finos da rocha britada atritada
Impacto Treton	Teor de carbonato dos finos da rocha britada	-
Velocidade de propagação de ondas P	Teor de opacos dos finos da rocha britada	Teor de carbonato dos finos da rocha britada
Índice de comprimento das fibras semi-brutas	Índice de comprimento das fibras beneficiadas Resistência à flexão das fibras semi-brutas Resistência à flexão das fibras beneficiadas Resistência à tração das fibras brutas a 300°C	Teor de finos da fibra beneficiada
Teor de finos da fibra semi-bruta	Resistência à tração das fibras brutas	-
Teor de finos da fibra beneficiada	Teor de silicatos dos finos da rocha britada Teor de silicatos dos finos da rocha britada atritada	Resistência à flexão das fibras beneficiadas Resistência à tração das fibras brutas a 300°C
Resistência à flexão das fibras semi-brutas	Resistência à tração das fibras brutas a 300°C	Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada
Resistência à flexão das fibras beneficiadas	Resistência à tração das fibras brutas a 300°C	Teor de silicatos dos finos da rocha britada e da rocha britada atritada
Resistência à tração das fibras brutas	Resistência à tração das fibras brutas a 500°C Teor de opacos dos finos da rocha *in natura* Teor de carbonato dos finos da rocha britada Teor de carbonato dos finos da rocha britada atritada	Teor de finos dos finos da rocha britada Teor de opacos dos finos da rocha britada atritada

continua

continuação

Ensaio	Correlação Positiva	Correlação Negativa
Resistência à tração das fibras brutas a 300°C	-	Teor de finos na rocha britada atritada Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada e da rocha britada atritada Teor de silicatos dos finos da rocha britada e da rocha britada atritada
Teor de finos da rocha britada	Teor de finos da rocha britada atritada	-
Teor de crisotila-dos finos da rocha britada atritada	-	Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada

TABELA 29 - Ensaios com forte correlação (≥0,9) para as amostras de SP-1/2.

Ensaio	Correlação Positiva	Correlação Negativa
Massa específica aparente	Teor de finos das fibras semi-brutas Teor de crisotila dos finos da rocha britada atritada Teor de carbonato dos finos da rocha britada	Porosidade Absorção d'água Abrasão Los Angeles Impacto Treton
Porosidade	Absorção d'água Abrasão Los Angeles Impacto Treton	Teor de finos da fibra semi-bruta Teor de crisotila dos finos da rocha britada atritada Teor de carbonato dos finos da rocha britada
Absorção d'água	Impacto Treton	Teor de finos da fibra semi-bruta Teor de crisotila dos finos da rocha britada atritada Teor de carbonato dos finos da rocha britada
Abrasão Los Angeles	Impacto Treton	Teor de finos da fibra semi-bruta
Impacto Treton	-	Velocidade de propagação de ondas P Índice de comprimento da fibra beneficiada Teor de finos da fibra semi-bruta Teor de crisotila dos finos da rocha britada atritada Teor de carbonato da rocha britada
Velocidade de propagação de ondas P	Teor de finos da fibra semi-bruta Teor de crisotila dos finos da rocha britada atritada Teor de carbonato dos finos da rocha britada	-
Compressão Uniaxial	Teor de finos da fibra semi-bruta Teor de crisotila dos finos da rocha britada atritada Teor de carbonato dos finos da rocha britada	-
Abrasão Los Angeles da rocha britada	Índice de comprimento das fibras semi-bruta e beneficiada. Resistência à flexão das fibras semi-bruta e beneficiada Teor de antigorita e/ou lizardita da rocha britada Teor de carbonato dos finos da rocha britada atritada Teor de silicatos dos finos da rocha britada	Teor de finos da fibra beneficiada Teor de antigorita e/ou lizardita da rocha britada atritada Teor de opacos da rocha britada e da britada atritada Teor de silicatos da rocha britada atritada Teor de opacos da rocha *in natura*

continua

continuação

Ensaio	Correlação Positiva	Correlação Negativa
Índice de comprimento da fibra semi-bruta	Resistência à flexão das fibras semi-bruta e beneficiada Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada Teor de carbonato dos finos da rocha britada atritada Teor de silicatos dos finos da rocha britada	Teor de finos da fibra beneficiada Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha britada e da britada atritada Teor de silicatos dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha *in natura*
Índice de comprimento da fibra beneficiada	Resistência à flexão das fibras semi-bruta e beneficiada Teor de antigorita e/ou lizardita da rocha britada Teor de silicatos dos finos da rocha britada	Teor de finos da fibra beneficiada Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha britada e da britada atritada Teor de silicatos dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha *in natura*
Teor de finos da fibra semi-bruta	Teor de crisotila dos finos da rocha britada atritada Teor de carbonato da rocha britada	-
Teor de finos da fibra beneficiada	Teor de antigorita e/oulizardita dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha britada e da britada atritada Teor de silicatos dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha *in natura*	Resistência à flexão das fibras semi-bruta e beneficiada Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada Teor de silicatos dos finos da rocha britada
Resistência à flexão da fibra semi-bruta	Resistência à flexão da fibra beneficiada Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada Teor de carbonato dos finos da rocha britada atritada Teor de silicatos dos finos da rocha britada	Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha britada e da britada atritada Teor de silicatos dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha *in natura*

continua

continuação

Ensaio	Correlação Positiva	Correlação Negativa
Resistência à flexão da fibra beneficiada	Teor de antigorita e/ou lizardita da rocha britada Teor de silicatos dos finos da rocha britada	Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha britada e da britada atritada Teor de silicatos dos finos da rocha britada atritada Teor de opacos dos finos da rocha *in natura*
Teor de finos da rocha britada	Teor de finos da rocha britada atritada Teor de crisotila dos finos da rocha britada	-
Teor de finos da rocha britada atritada	Teor de crisotila dos finos da rocha britada	-
Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada	Teor de carbonato dos finos da rocha britada atritada	-
Teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada	-	Teor de carbonato dos finos da rocha britada atritada
Teor de opacos dos finos da rocha britada	-	Teor de carbonato dos finos da rocha britada atritada
Teor de opacos dos finos da rocha britada atritada	-	Teor de carbonato dos finos da rocha britada atritada
Teor de carbonato dos finos da rocha britada atritada	Teor de silicatos dos finos da rocha britada	Teor de silicato dos finos da rocha britada Teor de opacos dos finos da rocha *in natura*

Alguns parâmetros das análises petrográficas não foram considerados por não serem comuns a todas as amostras, como presença de: xenocristais, limonita, carbonato, serpentina + filossilicato e silicatos.

Quando se considera o universo das amostras ensaiadas, observam-se correlações esperadas, ou óbvias, que refletem propriedades intrínsecas dos materiais estudados e, por esse motivo, não são comentadas (TABELA 26). No entanto, a análise da matriz de correlação dos dados, por grupo de amostras, pode oferecer correlações interessantes.

Amostras de SP-1

Observa-se na TABELA 27 uma correlação negativa entre a velocidade de propagação de ondas P e o teor de opacos da rocha *in natura*. Sabe-se que a velocidade de propagação do ultra-som em uma rocha reflete o seu estado de alteração e que, nos SP-1, os opacos são principalmente hematita, com magnetita subordinada. O teor de opacos, por sua vez, consiste num dado importante a respeito do grau de alteração intempérica dos SP-1. Este fato é corroborado pela coloração rósea das fibras beneficiadas resultantes de rochas alteradas intempericamente.

Observa-se ainda que a resistência à compressão uniaxial apresenta correlação positiva com o teor de serpentina da rocha *in natura*. Esta correlação pode indicar que antigorita e/ou lizardita influenciam diretamente a resistência. Isso se deve, provavelmente, à morfologia e à trama dos cristais. A lizardita apresenta estrutura planar, hábito placóide, ou pseudofibroso; a antigorita é foliada, ou apresenta-se na forma de lascas. Segundo WICKS, O'HANLEY (1988), a antigorita é usualmente mais consistente, e menos porosa que a lizardita e a crisotila, e seu conteúdo de água também é menor.

Amostras de SP-2

Observa-se na TABELA 28 uma correlação positiva entre a massa específica aparente, a velocidade de propagação de ondas P e o teor de opacos da rocha britada. Sabendo-se que a magnetita é o opaco predominante, pode-se concluir que o teor de magnetita influencia o grau de coesão do SP-2.

Quanto ao ensaio de abrasão *Los Angeles*, cabe ressaltar as correlações positivas com o índice de comprimento e a resistência à flexão das fibras beneficiadas. O valor do ensaio de abrasão *Los Angeles* reflete o teor de material com granulometira <1,68 mm apresentado por uma rocha submetida à abrasão. Sua relação direta com o índice de comprimento das fibras beneficiadas, e inversa com o

teor de finos destas, conduz à hipótese de que este material (<1,68 mm) seja constituído predominantemente de fibrilas de crisotila.

Já a resistência à flexão das fibras semi-brutas e das beneficiadas apresenta correlação positiva com a resistência à tração das fibras brutas a 300°C e negativa com o teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada. Ou seja, o teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada contribui para diminuir a resistência à flexão das fibras semi-brutas, porque se o teor de antigorita e/ou lizardita aumenta, o de crisotila diminui.

A resistência à tração das fibras brutas é diretamente proporcional para a mesma propriedade, sob aquecimento a 500°C.

Amostras de SP-1/2

Devido à natureza intermediária dos SP-1/2, tanto do ponto de vista petrográfico, como físico-mecânico, torna-se difícil discutir as correlações observadas, pois ora se comportam como SP-1, ora, como SP-2. No entanto, exatamente por essa razão, acredita-se que os SP-1/2 sejam os que melhor refletem as rochas da mina como um todo, conforme revelado na TABELA 29.

Observa-se relação inversa entre abrasão *Los Angeles* e o teor de finos da fibra semi-bruta. Isto já foi constatado nos SP-2.

Os dados de impacto Treton exibem correlação negativa com diversos parâmetros, quais sejam, velocidade de propagação de ondas P, índice de comprimento da fibra beneficiada, teor de crisotila dos finos da rocha britada atritada e teor de carbonato dos finos da rocha britada.

O processo de impactação (representado de certa forma pelo ensaio de impacto Treton) provavelmente rompe as fibras, reduzindo seu tamanho, e conseqüentemente, o índice de comprimento. Porém quando o minério é rico em fibras (mesmo fibras pequenas, submilimétricas, provenientes da matriz rochosa), possivelmente o teor de finos associados às fibras será menor. A relação inversa com a crisotila dos finos da rocha britada atritada pode ser um indicador da resistência ao impacto deste material, bem como o teor de carbonato dos finos da rocha britada. Mais uma vez, parece que a explicação para estas correlações estaria na natureza mineralógica do material <1,68 mm, gerado no impacto Treton e na do material <0,074 mm associado às fibras.

A velocidade de propagação de ondas P e a resistência à compressão uniaxial apresentam relação direta com os teores de finos da fibra semi-bruta, de crisotila dos finos da rocha britada atritada e de carbonato dos finos da rocha britada. É

importante lembrar que os valores destas propriedades refletem o grau de alteração e de coesão de uma rocha.

As correlações observadas no ensaio de abrasão *Los Angeles* da rocha britada, coincidem com as do SP-2 no que diz respeito ao índice de comprimento e também à resistência à flexão das fibras semi-brutas e beneficiadas.

Os teores de opacos e de antigorita e/ou lizardita da rocha *in natura*, influenciam diretamente na resistência à abrasão dos SP-1/2.

O índice de comprimento das fibras semi-brutas e beneficiadas apresenta correlação negativa com o teor de opacos da rocha *in natura*, britada e britada atritada. Pois quanto maior a resistência à abrasão da rocha, menor o índice de comprimento das fibras, sendo assim necessário submetê-la a processos de britagem mais agressivos, ou aumentar seus estágios.

O teor de finos das fibras beneficiadas apresenta correlações positivas com os teores de opacos da rocha *in natura*, britada e britada atritada e teores de silicatos e de antigorita e/ou lizardita da rocha britada atritada. Como estes minerais são bastante resistentes à abrasão, sua presença condiciona britagens mais agressivas e, conseqüentemente, aumento no teor de finos associados às fibras beneficiadas.

Por sua vez, o teor de crisotila dos finos da rocha britada apresenta relação direta com o teor de finos da rocha britada e da rocha britada atritada. Portanto, espera-se que os finos associados às fibras beneficiadas tenham altos teores de crisotila, a qual não traz consequências indesejáveis para a resistência das fibras.

Quanto aos finos da rocha britada, observa-se relação direta entre o teor de antigorita e/ou lizardita e o de carbonato, enquanto que, nos finos da rocha britada atritada a relação é inversa, significando que com a atrição ocorre modificação no comportamento destes minerais.

Nos finos da rocha britada atritada, o teor de opacos é inversamente proporcional ao teor de carbonato e este apresenta correlação negativa com o teor de silicatos. Esta relação inversa é facilmente explicável, pois os comportamentos destes minerais, face à atrição, são bastante diversos.

6.7. Considerações

As diferenças petrográficas dos SP-1 e SP-2 conduzem a comportamentos físico-mecânicos distintos, que se refletem na resposta destas rochas frente ao processo de beneficiamento.

Assim, nos SP-1 a separação dos veios de crisotila da matriz da rocha, por meio de sucessivos estágios de britagem, peneiramento e aspiração, provoca um aumento no teor de finos das fibras beneficiadas. Isso acontece porque os veios de crisotila apresentam, muitas vezes, espessura submilimétrica (fibras curtas), dificultando sua liberação.

Nos SP-2, o processo de beneficiamento separa tanto os veios de crisotila da rocha como as fibras que constituem a matriz. Desta forma, os mesmos estágios de britagem, peneiramento e aspiração utilizados para o SP-1 tenderiam aqui a diminuir o comprimento das fibras e, aumentar seu teor nos finos associados às fibras beneficiadas.

A explicação para estes comportamentos distintos reside principalmente nos minerais constituintes. Assim, nos SP-1, a desagregação da rocha, com a conseqüente liberação dos veios de fibra curta, é dificultada pela predominância, na matriz rochosa, de antigorita e/ou lizardita e silicatos duros (olivina e piroxênio). A hematita agiria no sentido contrário, porém seu teor não é significativo para mudar o comportamento da rocha como um todo.

Nos SP-2, a ausência de silicatos duros e baixos teores de antigorita e/ou lizardita, torna a rocha mais desagregável, facilitando a aspiração das fibras. A magnetita agiria no sentido contrário, porém seu teor não é significativo para mudar o comportamento da rocha como um todo.

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo dos serpentinitos mineralizados permitiu uma caracterização petrográfica-tecnológica dos mesmos, confirmando a distinção entre três tipos, de características diferentes, de propriedades tecnológicas próprias e de comportamentos distintos frente ao beneficiamento. A classificação em três tipos (SP-1, SP-2 e SP-1/2) havia sido anteriormente proposta por HASUI, MAGALHÃES (1985), com base em características de campo, ora ampliadas a nível petrográfico e físico-mecânico.

Os serpentinitos de Cana Brava são rochas resultantes da ação de processos geológicos aos quais se associou intensa ação hidrotermal, em que o principal fluido foi a água. A semelhança química entre os SP-1 e SP-2, no que concerne à distribuição dos principais elementos formadores de rochas ultramáficas, sugere que ambos foram gerados a partir de um mesmo protólito (provavelmente dunito ou peridotito). Uma primeira fase hidrotermal, com características oxidantes, provocou a hidratação dos minerais silicáticos anidros e oxidação dos minerais ferrosos, com formação de antigorita e/ou lizardita e hematita, sem a completa destruição dos silicatos primários, originando os SP-1. Numa segunda fase, com características redutoras, deu-se a formação dos SP-2, com a destruição total dos silicatos primários, através de uma serpentinização completa. Nesta fase ter-se-iam formado os veios e vênulas de crisotila.

A análise global de todos os ensaios efetuados nos diversos materiais estudados permitiu que se chegasse, às seguintes conclusões:

<u>Serpentinito tipo 1 (SP-1)</u>

1) é constituído principalmente por olivina, magnetita e piroxênio reliquiares e serpentinas e hematita neoformados;
2) as serpentinas são antigorita e/ou lizardita e crisotila;
3) a textura predominante é *mesh*, bem preservada;
4) o grau de alteração intempérica é fraco a moderado;
5) apresenta os maiores valores de massa específica aparente, velocidade de propagação de ondas P e compressão uniaxial;
6) apresenta os menores valores de porosidade aparente, absorção d'água aparente, de abrasão *Los Angeles* e de impacto Treton;
7) o teor de opacos (principalmente hematita) está relacionado ao grau de alteração intempérica das rochas;

8) o teor de antigorita e/ou lizardita influencia diretamente a resistência à compressão uniaxial da rocha.

Serpentinito tipo 2 (SP-2)

1) é constituído principalmente por serpentinas e magnetita neoformados;
2) a serpentina predominante é a crisotila;
3) a textura geralmente é *mesh* vestigial;
4) o grau de alteração intempérica é quase nulo;
5) apresenta os maiores valores de abrasão *Los Angeles* e de impacto Treton;
6) apresenta os os menores valores de velocidade de propagação de ondas P e de compressão uniaxial;
7) o teor de opacos (principalmente magnetita) influencia diretamente o grau de coesão da rocha;
8) o ensaio de abrasão *Los Angeles* apresenta correlação positiva com o índice de comprimento e a resistência à flexão das fibras beneficiadas;
9) o teor de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada contribui para diminuir a resistência à flexão das fibras semi-brutas;
10) nos finos da rocha britada atritada o teor de crisotila é inversamente proporcional ao de antigorita e/ou lizardita.

Serpentinito tipo 1/2 (SP-1/2)

1) apresenta características petrográficas intermediárias entre SP-1 e SP-2;
2) apresenta os maiores valores de porosidade e absorção d'água aparentes;
3) apresenta os menores valores de massa específica aparente;
4) os valores dos outros ensaios físico-mecânicos são intermediários entre os encontrados para SP-1 e SP-2.
5) o ensaio de abrasão *Los Angeles* apresenta correlação negativa com o teor de finos da fibra semi-bruta;
6) o ensaio de impacto Treton apresenta relação inversa com o índice de comprimento das fibras beneficiadas;
7) o ensaio de abrasão *Los Angeles* da rocha britada é diretamente proporcional ao índice de comprimento e à resistência a flexão das fibras semi-brutas e beneficiadas;
8) os teores de opacos e de antigorita/lizardita da rocha *in natura* influenciam diretamente a resistência à abrasão da rocha;

9) o índice de comprimento das fibras semi-brutas e beneficiadas apresenta correlação negativa com o teor de opacos da rocha *in natura*, britada e britada atritada;
10) o teor de finos das fibras beneficiadas apresenta correlação positiva com os teores de opacos da rocha *in natura* e dos finos da rocha britada e britada atritada, bem como, com os teores de silicatos e de antigorita e/ou lizardita dos finos da rocha britada atritada;
11) o teor de crisotila dos finos da rocha britada apresenta relação direta com os teores de finos da rocha britada e britada atritada;
12) nos finos da rocha britada a relação entre o teor de antigorita e/ou lizardita e de carbonato, é direta, enquanto que nos finos da rocha britada atritada a relação é inversa;
13) nos finos da rocha britada atritada a relação entre os teores de opacos e de carbonato e entre este e silicatos é inversa.

Fibras brutas

1) as amostras estudadas são muito semelhantes entre si, do ponto de vista mineralógico;
2) as fibras são limpas, quase sem impurezas, flexíveis, brilhantes e sedosas ao tato;
3) o equipamento *Pressley* é mais adequado para medidas de resistência à tração das fibras, do que o *Pulmac*;
4) os valores de resistência à tração são altos à temperatura ambiente;
5) com o aquecimento, há uma ligeira elevação dos valores de resistência à tração;
6) os coeficientes de variação da ordem de 15%, são considerados bastante razoáveis para os ensaios de resistência à tração.

Fibras semi-brutas e beneficiadas

1) as amostras estudadas já não se apresentam tão limpas quanto as fibras brutas; os feixes são menos coesos, com muitas microfibrilas e grãos associados;
2) nas fibras beneficiadas o teor de finos é um pouco maior que nas fibras semi-brutas;
3) a resistência à flexão (e portanto o índice de comprimento) é maior nas fibras semi-brutas que nas beneficiadas;
4) o índice de comprimento das fibras é inversamente proporcional ao teor de finos (<0,074 mm) presente nas fibras;

5) as fibras beneficiadas procedentes do SP-2 apresentam teor de finos menor e, portanto, resistência à flexão maior, quando comparados às fibras beneficiadas do SP-1 e do SP-1/2.

Resumindo, pode-se concluir que os três tipos de serpentinitos mineralizados apresentam características diversas, que vão provocar respostas diferentes frente ao processo de beneficiamento. O comportamento dos minerais é diferenciado em relação ao tipo de processo mecânico envolvido (abrasão, britagem, atrição) e também em relação ao tipo de serpentinito.

Embora, na sua forma bruta, a fibra crisotila não apresente diferenças nos valores de resistência mecânica em relação à sua procedência (SP-1, SP-2, SP-1/2), o produto final exibe propriedades tecnológicas distintas.

Visando uma contribuição à melhoria da qualidade da fibra comercial, no que diz respeito, especificamente, ao processo de beneficiamento, o presente estudo indicou que:

a) a secagem das fibras, efetuada em fornos horizontais, com temperaturas da ordem de 400°C não provoca sua degradação;
b) por meio de sucessivos estágios de impactação e peneiramento a fibra vai agregando material fino (<0,074 mm);
c) o material com granulometria <0,074 mm associado às fibras beneficiadas, é constituído predominantemente de fibrilas de crisotila, nas fibras procedentes do SP-2 e de antigorita e/ou lizardita, olivina e piroxênio, nas fibras procedentes do SP-1.

Este trabalho representa uma contribuição para a interação entre, de um lado, as características petrográficas e físico-mecânicas das rochas, e de outro, as características mineralógicas e as mecânicas das fibras. Constitui um campo de estudo importante, necessário, vasto e ainda pouco explorado. Na presente pesquisa as características petrográficas das rochas foram pormenorizadamente descritas, porém a dispersão dos valores dos ensaios físico-mecânicos sugere a necessidade de se efetuar esses mesmos ensaios num número maior de amostras, e se possível, de forma rotineira, na própria mina. Se forem efetivamente comprovados os resultados encontrados na presente pesquisa, sugere-se estudos posteriores para verificar a possibilidade de modificação do processo de beneficiamento.

Por outro lado, o estudo do comportamento dos minerais frente aos principais processos mecânicos utilizados no beneficiamento também merece continuidade e aprimoramento, pela importância da sua aplicação industrial.

Com relação ao material fino (<0,074 mm) associado às fibras beneficiadas seria importante pesquisar, por tipo de serpentinito:

a) sua natureza mineralógica;

b) sua granulometria;

c) acompanhar estes dados com ensaios de resistência à flexão da placa de cimento-amianto resultante (UR).

A intenção deste estudos seria a de melhorar o aproveitamento das fibras beneficiadas e, conseqüentemente, diminuir o teor de material fino, atualmente indesejável.

Se for realmente comprovado que os finos procedentes do SP-2 são principalmente fibrilas, como sugere o presente estudo, são também recomendadas pesquisas sobre os possíveis aproveitamentos deste material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKERS, S.A.S., GARRET, G.G. 1983a. Observations and predictions of fracture in asbestos-cement composites. *Journal of Material Science*, v.18, p. 2209-2214.

_____. 1983b. Fibre-matrix interface effects in asbestos-cement composites. *Journal of Material Science*, v.18, p. 2200-2208.

ALMEIDA, A.S., FORNASARI Fº, N., BRAGA, T.O. 1992. *Controle e recuperação ambiental na Mina de Cana Brava*, Goiás. São Paulo: IPT: Sama. 65p. (IPT. Publicação, 2006; Boletim, 66).

ALMEIDA, F.F.M. 1979. O Cráton do Paramirim e suas relações com o do São Francisco. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRÁTON DO SÃO FRANCISCO E SUAS FAIXAS MARGINAIS, 1981, Salvador. *Anais...* Salvador: SBG. p.1-10.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. 1979. *Standard test method for unconfined compressive strength of rock core specimens*. 4 p. (D 2938).

_____. 1990. *Standard test method for tensile fibers*. 4 p. (D 3822)

ASBESTIFORM FIBERS. 1984. Nonoccupational health risks. Washington: National Academy Press. p. 25-47.

ASBESTOS, applications and asbestos substitutes. 1979. *Asbestos Bulletin*. v. 20, part 2, p. 27-38.

AS MAIORES da mineração. 1995. *Brasil Mineral*, n.130, p. 46.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. 1978. *Lastro padrão:* determinação da resistência ao choque. Rio de Janeiro. 2 p. (ABNT. MB 964).

_____. 1983. *Agregados:* determinação de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro. 3 p. (ABNT. NBR 6465).

_____. 1988. Peneiras para ensaio. Rio de Janeiro. 2p. (ABNT. NBR 5 734).

_____. 1992a. *Rochas para revestimento:* análise petrográfica. Rio de Janeiro. 2p. (ABNT. NBR 12 768).

_____. 1992b. *Rochas para revestimento:* determinação da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção d'água aparente. Rio de Janeiro. 2p. (ABNT. NBR 12 766).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AMIANTO - ABRA. 1993. *Amianto, saúde*: atualização. São Paulo: ABRA. 67p.

_____. 1995. *O amianto no Brasil.* São Paulo: ABRA. 47p.

BADOLLET, M.S. 1963. Asbestos. In: *ENCYCLOPEDIA of chemical technology.* New York: Interscience. v.2, p.734-747

BAILEY, S.W. 1969. Polytypism of trioctahedral 1:1 layer silicates. *Clays and Clay Minerals*, n.17, p.355-371.

BERGER, H. 1963. *Asbestos fundamentals.* New York. Chemical Publishing. 171p.

BRINDLEY, G. W. 1972. Kaolin, serpentine and kindred minerals. In: BROWN, G. (ed.). *The X-ray identification and crystal structures of clay minerals.* London: Mineralogical Society. p. 51-131.

BRYANS, R.G., LINCOLN, B. 1971. Deformation and fracture phenomena in chrysotile asbestos. In: INTERNATIONAL ASBESTOS CONFERENCE ON THE PHYSICS AND CHEMISTRY OF ASBESTOS MINERALS,.2. Louvain, 1971. Paper 3:6.

BRYANS, R.G., LINCOLN, B. 1975. The role of the interfibrilar bond in the deformation and fracture of chrysotile asbestos. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASBESTOS MINERALS, 3, 1975. Paper 6:24.

BÜCHLER, P.M. 1974. *Estudo do tratamento de alguns amiantos brasileiros em moinhos de bolas, visando à individualização das fibras.* São Paulo. 48p. (Dissertação de Mestrado, apres. EPUSP).

CASSOLA, M.S. 1993a. *Características primárias do amianto crisotila de Minaçu, Goiás, e sua influência na qualidade do produto final.* São Paulo. 151p. (Dissertação de Mestrado apres. EPUSP).

_____. 1993b. *Estudo preliminar de caracterização tecnológica de minério de crisotila com vistas à definição das características por tipologia*. São Paulo: IPT, 1993 (IPT. Relatório, 31.401).

_____. 1995. *Caracterização tecnológica de diversas tipologias do serpentinito da mina de Cana Brava*, Minaçu, GO. São Paulo: IPT. (IPT. Relatório, 33 035).

CHURG, A. 1988. Chrysotile, tremolite and malignant mesothelioma in man. *Chest*, v.93, n.3. p. 621-628.

C.N.S. INTRUMENTS LTD. 1972. *Pundit manual for use with the portable ultrassonic non-destructiv digital indicator tester*. s.l. 35p.

CORREIA, C.T. 1994. *Petrologia do Complexo Máfico-Ultramáfico de Cana Brava, Goiás*. São Paulo. 151p. (Tese de Doutorado, apres. IGUSP).

DANNI, J.C.M., FUCK, R.A., LEONARDOS, O.H. 1982. Archean and lower proterozoic units in central Brasil. *Geologische Rundschau,* Band 71, Heft 1, p.291-317.

DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J. 1962. Serpentines. In: _____. *Rock forming minerals*.London: Longmans. v.3, p. 170-190.

DREHER, A.M. 1983. *Petrologia dos rodingitos de Cana Brava, Goiás*. São Paulo. 112p. (Dissertação de Mestrado, apres. IGUSP).

FARJALLAT, J.E.S., TATAMIYA, C.I., YOSHIDA, R. 1974. An experimental evaluation of rock weatherability. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 2. São Paulo. *Proceedings*...São Paulo: ABGE. v.1, tema 4, trab. 30. 9p.

FRAZÃO E.B., OLIVEIRA, M.C.B. 1995. *Caracterização tecnológica de amostras de serpentinitos procedentes da Mina de Cana Brava, Goiás*. São Paulo: IPT. 81p. (IPT. Relatorio, 32 820).

FUNÇÕES nobres para o amianto. 1995. Informe PADCT, v.6, n..20, abr., p. 10-11.

GIRARDI, V.A.V., KURAT, G. 1982. Precambrian mafic and ultramafic rocks of the Cana Brava Complex, Brasil, mineral compositions and evolution. *Revista Brasileira de Geociências*, v12, n.1-3, p.313-323.

GIRODO, A.C., PAIXÃO, J.E. 1973. *Perfil analítico do amianto.* Rio de Janeiro: DNPM. (DNPM. Boletim, 2).

GIUNTINI, D. 1994. Sama investe mais US$ 8 mi este ano. *Diário Comércio & Indústria* - DCI. São Paulo. 17 de fev.

HANDBOOK of asbestos textiles. 1967. 3.ed. New Jersey: Asbestos textile Institute. p. 10-11.

HASUI, Y., HARALYI, N.L.E. 1986. A megaestruturação de Goiás. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 2. 1986, Goiânia. *Atas...* Goiânia: SBG/Núcleo Centro-Oeste. p.120-144.

HASUI, Y., MAGALHÃES, F.S. 1985. *Modelo geométrico e evolutivo das estruturas geológicas da Mina de Cana Brava.* São Paulo: IPT. 88p. (IPT. Relatório, 22 889).

HASUI, Y., COSTA, J.B.S., HARALYI, N.L.E. 1994. Estrutura em Quilha Brasil Central, uma feição fundamental na Geologia de Goiás e Tocantins. *Geociências*, São Paulo, v.13, n.2, p 463-497.

HASUI, Y., MAGALHÃES, F.S., MANGOLIN Fº, A. 1992. Modelo geoestrutural da Mina de Cana Brava (GO) com vista à análise da estabilidade de taludes. In: HASUI, Y., MIOTO, J.A. (eds.). *Geologia estrutural aplicada.* São Paulo: ABGE: Votorantim. p.363-382.

HODGSON, A. A. 1979. Chemistry and physics of asbestos. In: MICHAELS, L., CHISSICK, S. S. (eds.). *Asbestos:* porperties, applications and hazards. v.1, chap. 3, p. 67-114.

HOLLIDAY, L. 1966. Geometrical considerations and phase relationships. In: HOLLIDAY, L. (ed.). *Composite minerals.* Amsterdam: Elsevier. p. 1-27.

ILIEV, I. G. 1966. An attempt to estimate the degree of weathering of intrusive rocks from their physico-mechanical properties. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS. 1. Lisboa, 1966. *Proceedings...* Lisboa: ISRM. p.109-114.

JOINT COMMITEE ON POWDER DIFRACTION STANDARDS - JCPDS. 1974. *Selected powder difraction data for minerals*, databook. Swarthmore. 833p.

KIYOHARA, P.K. 1991. *Estudo da interface crisotila-cimento Portland em compósitos de fibro-cimento por métodos óptico-eletrônicos*. São Paulo. 124p. (Tese de Doutorado, apres. EPUSP).

KOLBE, W. 1970. *Estudos para a caracterização tecnológica de amiantos crisotila nacionais*. São Paulo. 92p. (Dissertação de Mestrado, apres. EPUSP).

LE MAITRE, R.W. (ed.). 1989. *A classification of igneous rocks and glossary of terms:* Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford: Blackwell Scientific Publications. 193p.

MACKENZIE, R.C. 1957. *Differential thermal investigation of clays*. London: Mineralogical Society. 456p.

MAJUMDAR, A.J. 1974. The role of the interface in glass fibre reinforced cement. *Cement and Concrete Research,* v.4, p. 247-266.

MANN, E.L. 1983. Asbestos. In: LEFOND, S. J.(ed.). *Industrial minerals and rocks*. New York. American Institute of Minning, Metallurgical and Petroleum Engineers. p. 435-484.

MARINI, O.J., DARDENNE, M.A., FUCK, R.A. 1977. Contribuição a geologia do Pré-Cambriano da porção central de Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, v.7, p.304-324.

MARTIN, C.J., PHILLIPS, V.A. 1977. The texture of chrysotile asbestos in relationship to mechanical properties. *Material Science and Engineering*, v.30. p. 81-87.

MARTINEZ, E., COMER, J.J. 1964. The concentration and study of the interstitial material in chysotile asbestos. *American Miner.*, v.49. p. 153-157.

MASSAZA, F.; COSTA, U. 1986. Bond: paste - aggregate, paste-reinforcement and paste-fibres. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8. Rio de Janeiro. *Proceedings*. Rio de Janeiro: ABLA. v.1, p.158-180.

MORRISON, J.K., SHAH, S.P., JENQ, Y.S. 1988. Analysis of fiber debonding and pullout in composites. *Journal of Engineering Mechanics*, v.114, n.2, p. 277-294.

NEMECZ, E. 1981. *Clay minerals*. Budapest: Akadémiai Kiadó. 547p.

NÓBREGA, C.M. 1985. *Considerações sobre a caracterização da resistência e deformabilidade em rochas de baixa resistência, através de ensaios de laboratório e "in*

situ". São Carlos. 106p. (Dissertação de mestrado apres. Escola de Engenharia de São Carlos, USP).

OLIVEIRA, M.C.B. 1994. Caracterização mineralógica, petrogenética e física das fibras de amianto da Mina de Cana Brava, GO. In: WORKSHOP CIENTÍFICO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 1. São Paulo. *Resumos*. São Paulo: IGc/USP. p.35.

OLIVEIRA, M.C.B., QUITETE, E.B. 1992. *Caracterização mineralógica e desenvolvimento metodológico de ensaios de tração a diferentes temperaturas das fibras de amianto procedentes de Cana Brava, GO*. São Paulo: IPT. 56p. (IPT. Relatório, 30 859).

_____. 1994. Amianto crisotila de Cana Brava: mineralogia e propriedades físicas. In: WORKSHOP: RECURSOS MINERAIS NÃO-METÁLICOS PARA O ESTADO DE SÃO PAULO, 1994, São Paulo. *Resumos Expandidos*. São Paulo: SBG: IPT: IG: CPRM: Cesp. 82p.

_____. 1995. *Comparação entre a resistência à tração das fibras brutas de amianto da Mina de Cana Brava e a resistência à flexão do fibro-cimento*. São Paulo: IPT. 48p. (IPT. Relatório, 33 283).

OLIVEIRA, M.C.B.; COUTINHO, J.M.V.;FRASCÁ, M.H.B.O. 1992. *Estudo mineralógico-petrográfico das rochas e minério da Mina de Cana Brava, GO*. São Paulo: IPT. 78p. (IPT. Relatório 30 538).

ONIKI, S. 1970. *Estudo tecnológico de amiantos brasileiros visando à sua aplicação em produtos de cimento-amianto*. São Paulo. 62p. (Dissertação de Mestrado apres. EPUSP).

PAMPLONA, R.I., NAGAO, M. 1982. Jazimentos de amianto crisotila da mina de Cana Brava-GO. In: SCMALTZ, N.G. (coord.). *Os principais depósitos minerais da região Centro-Oeste*. 3.ed. Brasilia: DNPM/MME, p.1-138.

PUNDSACK, F.L. 1955. The properties of asbestos. I, the colloidal and surface chemistry of chrysotile. *Journal of Physical Chemistry,* v. 59, n.9, p. 892-895.

QUEBEC ASBESTOS MINING ASSOCIATION - QAMA. 1974a. *Chrysotile asbestos test manual*. 3.ed. New Jersey: Asbestos Textile Institute. 80p. (Designação C-4-72 - Método de ensaio por lavagem; traduzido pela Sama).

_____. 1974b. *Chrysotile asbestos test manual.* 3.ed. New Jersey: Asbestos Textile Institute. 80p. (Designação C-5-72 - Método de classificação à úmido TN; traduzido pela Sama).

_____. 1974c. *Chrysotile asbestos test manual.* 3.ed. New Jersey: Asbestos Textile Institute. 80p. (Designação F-2-72- Método para unidade de resistência de fibra de amianto; traduzido pela Sama).

ROZENSON, I., BANNINGER, E.R., HELLER-KALLAI, L. 1979. Mossbauer espectra of iron in 1:1 phyllosilicates. *American Mineralogist*, v.64, p.893-901.

SANTOS, P.S. 1975. Amiantos industriais e argilas niquelíferas. In: _____. *Tecnologia de argilas*. São Paulo: Edgard Blucher: Edusp. v. 2, cap. 31, p. 728-775.

SANTOS, P.S., SANTOS, H.S. 1978. Estudos comparativos de amiantos por microscopia eletrônica. *Cerâmica*, v.24, n.98, p. 77-90.

SAVASTANO JR, H. 1992. *Zonas de transição entre fibras e pasta de cimento Portland*: caracterização e inter-relação com as propriedades mecânicas do compósito. São Paulo. 249p. (Tese de Doutorado, apres. EPUSP).

SAVASTANO JR, H., DANTAS, F.A.S., AGOPYAN, V. 1994. *Materiais reforçados com fibras*: correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas. São Paulo: IPT. (IPT. Publicação, 2158; Boletim, 67).

SKINNER, H.C.W., ROSS, M., FRONDEL, C. 1988. *Asbestos and other fibrous materials:* mineralogy, crystal, chemistry and health effects. Oxford: University Press. 204p.

SMYKATZ-KLOSS, W. 1974. *Differential thermal analysis*; application and results mineralogy. Berlim: Springer-Verlag. v.11.

SPEIL, S., LEINEWEBER, J.P. 1969. Asbestos minerals in modern technology. *Environmental Research*, v.2, n.3,. p. 166-208.

TRÖGER, W.E. 1979. *Optical determination of rock forming minerals*: part I determinative tables. Stuttgart: E. Schweizerbartshe Verlagsbuchhandlung. 188p.

VARFALOMEYEVA, Ye.K., IVOYLOVA, E.Kh., LUZIN, V.P. 1983. An infrared spectroscopic study of natural chrysotile asbestos. *International Geology Review,* 1984, p. 830-836.

WERNICK, E., ALMEIDA, F.F.M. 1979. The geotectonic environments of Early Precambrian granulites in Brazil. *Prec.Research*, v.8, p. 1-17.

WHITTAKER, E.J.W. 1953. The structure of chrysotile. *Acta Cryst,* v.6, p.747-867.

_____. 1956a. The structure of chysotile: II Clino-chrysotile. *Acta Cryst,* v.9, p.855.

_____ 1956b. The structure of chrysotile: III Ortho-chrysotile. *Acta Cryst*, v.9, p.862.

_____. 1956.c The structure of chrysotile: IV Para-chrysotile. *Acta Cryst*, v.9, p.865.

WICKS, F. J. 1979. Mineralogy, chemistry and chrystallography of chrysotile asbestos. In: LEDOUX, R. L. (ed.). *Mineralogical techniques of asbestos determination.* Quebec: International Association of Canada. p. 35-78. (Short Course Handbook, 4)

WICKS, F.J.; O'HANLEY, D.S. 1988. Serpentine minerals: structures and petrology. In: BAILEY, S.W. (ed.) *Review in mineralogy*. Virginia: Mineralogical Society of America. v.19, p.91-167.

WICKS, F.J., WHITTAKER, E.J.W. 1975. A reappraisal of the structures of the serpentine minerals. *Canadian Mineralogist*, v.13, p.227-243.

WILSON, M. 1989. *Igneous petrogenesis*: a global tectonic approach. London: Unwin Hyman. 466p.

WINSON, R. W. 1975. Asbestos. In: LEFOND, S. J.(ed.). *Industrial minerals and rocks*. New York: American Institute of Minning, Metallurgical and Petroleum Engineers, p. 379-425.

YADA, K. 1971. Study of microstruture of chrysotile asbestos by high-resolution electron microscopy. *Acta Cryst.*, v. A27, p.659-664.

ZONENSHAIN, L.P., KUZMIN, M.I. 1978. The Khan-Taishir Ophiolitic Complex of Western Mongolia, its petrology, origin and comparison with other Ophiolitics Complexes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, v.67, p.95-109.

ZUKOWSKI, R., GAZE, R. 1959. Tensile strength of asbestos. *Nature*, v.183, n.4653, p. 35-37.

ANEXO A

TABELA 1: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 1 (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	290,32	293,31	176,45	2,484	2,510	2,559	1,030
2	301,82	304,29	183,17	2,492	2,512	2,039	0,808
3	276,33	278,62	167,63	2,490	2,510	2,063	0,829
4	308,76	310,93	187,56	2,503	2,520	1,759	0,703
5	329,42	331,68	200,33	2,508	2,525	1,721	0,686
6	326,01	328,62	198,28	2,501	2,521	2,002	0,801
7	316,32	318,63	191,98	2,498	2,516	1,824	0,730
8	318,91	321,83	193,46	2,484	2,507	2,275	0,916
9	334,1	336,96	202,83	2,491	2,512	2,132	0,856
10	318,72	323,21	193,94	2,466	2,500	3,473	1,409
			Média	2,492	2,513	2,185	0,878
			Desvio Padrão	0,011	0,007	0,491	0,202
			Coeficiente Variação	0,459	0,279	22,457	23,014

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 2: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 2 (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	376,35	377,49	233,03	2,605	2,613	0,789	0,303
2	295,81	296,70	183,19	2,606	2,614	0,784	0,301
3	377,19	378,17	233,34	2,604	2,611	0,677	0,260
4	302,20	303,08	187,18	2,607	2,615	0,759	0,291
5	325,06	325,97	201,08	2,603	2,610	0,729	0,280
6	284,36	285,37	175,96	2,599	2,608	0,923	0,355
7	318,97	319,92	197,45	2,604	2,612	0,776	0,298
8	299,15	299,96	185,06	2,604	2,611	0,705	0,271
9	302,88	303,70	187,34	2,603	2,610	0,705	0,271
10	315,56	316,62	195,53	2,606	2,615	0,875	0,336
			Média	2,604	2,612	0,772	0,297
			Desvio Padrão	0,002	0,002	0,074	0,028
			Coeficiente Variação	0,085	0,082	9,529	9,558

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 3: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 3a (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	337,56	337,60	211,30	2,673	2,673	0,032	0,012
2	371,50	371,57	232,10	2,664	2,664	0,050	0,019
3	315,27	317,30	194,41	2,565	2,582	1,652	0,644
4	351,84	352,86	217,76	2,604	2,612	0,755	0,290
5	316,93	322,69	195,24	2,487	2,532	4,519	1,817
6	328,40	328,44	204,98	2,660	2,660	0,032	0,012
7	368,95	369,00	230,01	2,655	2,655	0,036	0,014
8	329,66	329,67	205,78	2,661	2,661	0,008	0,003
9	304,02	309,09	189,98	2,552	2,595	4,257	1,668
10	317,86	323,20	196,27	2,504	2,546	4,207	1,680
			Média	2,602	2,618	1,555	0,616
			Desvio Padrão	0,067	0,050	1,881	0,749
			Coeficiente Variação	2,579	1,893	120,963	121,661

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 4: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 3b (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	356,99	357,30	221,53	2,629	2,632	0,228	0,087
2	338,67	338,74	211,85	2,669	2,670	0,055	0,021
3	358,15	360,70	220,71	2,558	2,577	1,822	0,712
4	340,93	341,20	212,50	2,649	2,651	0,210	0,079
5	367,31	370,31	226,21	2,549	2,570	2,082	0,817
6	309,29	309,56	192,13	2,634	2,636	0,230	0,087
7	326,14	326,76	201,87	2,611	2,616	0,496	0,190
8	360,10	362,78	221,72	2,553	2,572	1,900	0,744
9	295,30	295,43	184,35	2,658	2,660	0,117	0,044
10	299,86	299,94	186,96	2,654	2,655	0,071	0,027
			Média	2,617	2,624	0,721	0,281
			Desvio Padrão	0,044	0,036	0,805	0,316
			Coeficiente Variação	1,686	1,385	111,632	112,636

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 5: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 5a (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	301,18	305,75	184,91	2,492	2,530	3,782	1,517
2	331,47	335,88	203,57	2,505	2,539	3,333	1,330
3	327,05	332,41	200,46	2,479	2,519	4,062	1,639
4	329,39	334,88	201,79	2,475	2,516	4,125	1,667
5	293,03	297,39	180,05	2,497	2,534	3,716	1,488
6	370,21	374,85	227,06	2,505	2,536	3,140	1,253
7	341,35	345,87	209,49	2,503	2,536	3,314	1,324
8	350,99	356,03	215,51	2,498	2,534	3,587	1,436
9	325,23	329,98	199,57	2,494	2,530	3,642	1,461
10	329,00	334,59	201,02	2,463	2,505	4,185	1,699
			Média	2,491	2,528	3,689	1,481
			Desvio Padrão	0,014	0,010	0,342	0,145
			Coeficiente Variação	0,542	0,411	9,259	9,780

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 6: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 5b (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	277,64	278,97	176,80	2,717	2,730	1,302	0,479
2	342,49	343,80	209,60	2,552	2,562	0,976	0,382
3	338,07	339,42	207,95	2,571	2,582	1,027	0,399
4	329,62	331,08	202,79	2,569	2,581	1,138	0,443
5	365,45	366,98	224,10	2,558	2,568	1,071	0,419
6	299,73	301,06	183,20	2,543	2,554	1,128	0,444
7	359,47	361,14	220,11	2,549	2,561	1,184	0,465
8	334,29	335,84	204,96	2,554	2,566	1,184	0,464
9	325,81	327,31	198,73	2,534	2,546	1,167	0,460
10	342,87	344,24	212,82	2,609	2,619	1,042	0,400
			Média	2,576	2,587	1,122	0,435
			Desvio Padrão	0,051	0,052	0,090	0,032
			Coeficiente Variação	1,984	1,993	8,052	7,251

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 7: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 6a (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	312,59	315,14	193,06	2,561	2,581	2,089	0,816
2	362,34	365,33	222,92	2,544	2,565	2,100	0,825
3	365,46	368,46	225,56	2,557	2,578	2,099	0,821
4	300,73	303,11	185,81	2,564	2,584	2,029	0,791
5	334,64	337,40	206,77	2,562	2,583	2,113	0,825
6	258,32	260,89	159,14	2,539	2,564	2,526	0,995
7	332,06	334,99	205,02	2,555	2,577	2,254	0,882
8	327,78	331,06	201,83	2,536	2,562	2,538	1,001
9	348,28	351,76	214,70	2,541	2,566	2,539	0,999
10	353,35	356,48	218,41	2,559	2,582	2,267	0,886
			Média	2,552	2,574	2,255	0,884
			Desvio Padrão	0,010	0,008	0,195	0,080
			Coeficiente Variação	0,390	0,327	8,661	9,004

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 8: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 6b (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	333,45	337,30	206,50	2,549	2,579	2,943	1,155
2	360,01	360,22	225,02	2,663	2,664	0,155	0,058
3	302,21	304,66	185,78	2,542	2,563	2,061	0,811
4	356,82	356,98	222,60	2,655	2,656	0,119	0,045
5	344,30	344,47	214,58	2,651	2,652	0,131	0,049
6	337,98	342,14	209,32	2,545	2,576	3,132	1,231
7	355,98	356,88	219,85	2,598	2,604	0,657	0,253
8	330,01	333,85	204,72	2,556	2,585	2,974	1,164
9	352,33	353,74	217,65	2,589	2,599	1,036	0,400
10	310,72	312,29	191,23	2,567	2,580	1,297	0,505
			Média	2,591	2,606	1,451	0,567
			Desvio Padrão	0,046	0,036	1,173	0,462
			Coeficiente Variação	1,769	1,370	80,888	81,406

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 9: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 7a (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	332,65	336,82	210,29	2,629	2,662	3,296	1,254
2	340,06	343,89	209,33	2,527	2,556	2,846	1,126
3	316,72	320,29	194,79	2,524	2,552	2,845	1,127
4	344,92	349,31	221,32	2,695	2,729	3,430	1,273
5	321,04	324,68	199,41	2,563	2,592	2,906	1,134
6	330,09	333,87	206,14	2,584	2,614	2,959	1,145
7	314,56	318,30	196,71	2,587	2,618	3,076	1,189
8	329,30	333,39	204,35	2,552	2,584	3,170	1,242
9	340,70	344,10	209,74	2,536	2,561	2,531	0,998
10	323,34	327,39	200,48	2,548	2,580	3,191	1,253
			Média	2,574	2,605	3,025	1,174
			Desvio Padrão	0,050	0,052	0,248	0,081
			Coeficiente Variação	1,958	2,008	8,204	6,868

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 10: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 7b (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	313,97	319,01	190,19	2,437	2,476	3,912	1,605
2	326,33	329,94	199,91	2,510	2,537	2,776	1,106
3	317,42	322,03	192,63	2,453	2,489	3,563	1,452
4	319,91	324,49	194,55	2,462	2,497	3,525	1,432
5	317,81	322,86	193,55	2,458	2,497	3,905	1,589
6	325,31	329,37	199,44	2,504	2,535	3,125	1,248
7	299,53	306,30	181,40	2,398	2,452	5,420	2,260
8	314,82	319,26	190,84	2,451	2,486	3,457	1,410
9	317,12	321,96	192,29	2,446	2,483	3,733	1,526
10	322,71	326,45	197,44	2,501	2,530	2,899	1,159
			Média	2,462	2,498	3,632	1,479
			Desvio Padrão	0,033	0,026	0,703	0,307
			Coeficiente Variação	1,331	1,058	19,345	20,765

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 11: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 8a (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	348,88	352,79	219,34	2,614	2,644	2,930	1,121
2	338,95	343,80	213,66	2,605	2,642	3,727	1,431
3	342,30	346,13	215,50	2,620	2,650	2,932	1,119
4	319,98	323,41	197,20	2,535	2,562	2,718	1,072
5	328,66	333,18	204,97	2,563	2,599	3,525	1,375
6	341,56	345,65	211,35	2,543	2,574	3,045	1,197
7	349,51	352,82	215,93	2,553	2,577	2,418	0,947
8	352,31	355,93	218,12	2,556	2,583	2,627	1,028
9	361,94	365,77	224,16	2,556	2,583	2,705	1,058
10	343,22	347,07	212,12	2,543	2,572	2,853	1,122
			Média	2,569	2,598	2,948	1,147
			Desvio Padrão	0,030	0,032	0,381	0,143
			Coeficiente Variação	1,169	1,222	12,941	12,488

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 12: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 9 (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	312,,87	313,46	195,63	2,655	2,660	0,501	0,189
2	317,32	317,88	198,53	2,659	2,663	0,469	0,176
3	314,59	315,20	196,56	2,652	2,657	0,514	0,194
4	325,96	326,67	203,67	2,650	2,656	0,577	0,218
5	314,14	314,74	196,32	2,653	2,658	0,507	0,191
6	325,55	326,18	203,46	2,653	2,658	0,513	0,194
7	318,82	319,39	199,35	2,656	2,661	0,475	0,179
8	329,76	330,44	206,10	2,652	2,658	0,547	0,206
9	327,75	328,39	205,12	2,659	2,664	0,519	0,195
10	300,67	301,23	187,82	2,651	2,656	0,494	0,186
			Média	2,654	2,659	0,512	0,193
			Desvio Padrão	0,003	0,003	0,030	0,012
			Coeficiente Variação	0,111	0,104	5,938	6,006

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 13: Valores individuais da determinação de índices físicos para a amostra 10 (rocha *in natura*)

Corpo-de-prova n°	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso submerso (g)	Mea seca (kg/m^3)	Mea saturada (kg/m^3)	Porosidade aparente (%)	Absorção d'água (%)
1	303,47	308,67	186,10	2,476	2,518	4,242	1,714
2	325,13	329,88	201,64	2,535	2,572	3,704	1,461
3	311,80	316,62	192,47	2,511	2,550	3,882	1,546
4	323,28	329,54	197,82	2,454	2,502	4,753	1,936
5	333,39	339,08	204,74	2,482	2,524	4,236	1,707
6	353,99	359,09	218,86	2,524	2,561	3,637	1,441
7	309,49	314,90	190,30	2,484	2,527	4,342	1,748
8	317,21	322,68	194,86	2,482	2,524	4,279	1,724
9	312,92	318,14	191,98	2,480	2,522	4,138	1,668
10	358,40	363,78	220,57	2,503	2,540	3,757	1,501
			Média	2,493	2,534	4,097	1,645
			Desvio Padrão	0,023	0,020	0,331	0,147
			Coeficiente Variação	0,940	0,805	8,069	8,957

Nota: Mea = Massa específica aparente

TABELA 14 : Valores individuais dos ensaios de Abrasão *Los Angeles* para as amostras de rocha *in natura*

AMOSTRA	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	PERDAS (%)
1	5000,4	4131,5	17,4
2	5005,8	4490,0	10,3
3 a	4999,6	4329,3	13,4
3 b	5005,1	4466,1	10,8
4	5002,6	4212,2	15,8
5a	5003,1	4257,1	14,9
5b	5000,7	4229,2	15,4
6a	5010,5	4173,7	16,7
6b	5005,2	4312,1	13,9
7a	4999,8	4469,8	10,6
7b	5003,0	4095,5	18,1
8a	5003,4	4221,8	15,6
8b	5001,8	4278,3	14,5
9	5003,5	4335,0	13,4
10	5000,1	4241,7	15,2

TABELA 15 : Valores individuais dos ensaios de Impacto Treton para as amostras de rocha *in natura*

AMOSTRA	MASSA INICIAL (g)	MASSA FINAL (g)	PERDA INDIVIDUAL (%)	PERDA MÉDIA (%)
1	217,30	190,78	12,2	14,0 ± 1,70 (12,15)
	216,26	182,49	15,6	
	217,18	186,87	14,0	
2	231,16	210,71	8,9	8,9 ± 0,25 (2,83)
	231,46	211,64	8,6	
	230,61	209,74	9,1	
3a	193,41	173,17	10,5	10,7 ± 0,17 (1,62)
	192,46	171,69	10,6	
	192,77	171,96	10,8	
3b	247,49	221,28	10,6	10,6 ± 1,35 (12,74)
	247,35	217,59	12,0	
	247,23	224,17	9,3	
4	202,68	170,72	15,8	15,4 ± 0,51 (3,33)
	202,89	171,53	15,5	
	200,74	170,95	14,8	
5a	191,70	168,16	12,3	13,1 ± 1,33 (10,14)
	191,58	168,02	12,3	
	190,60	162,77	14,6	
5b	247,87	225,58	9,0	8,8 ± 0,29 (3,28)
	247,99	226,80	8,5	
	247,88	225,64	9,0	
6a	240,17	215,38	10,3	9,5 ± 1,33 (13,98)
	241,43	216,64	10,3	
	242,70	223,30	8,0	
6b	235,26	207,67	11,7	11,7 ± 0,06 (0,49)
	235,62	207,85	11,8	
	236,48	208,87	11,7	
7a	225,39	207,41	8,0	8,7 ± 0,75 (8,68)
	225,53	206,05	8,6	
	225,18	203,89	9,5	
7b	218,17	172,13	21,1	19,3 ± 1,67 (8,65)
	218,41	176,83	19,0	
	217,32	178,62	17,8	
8a	193,64	168,82	12,8	12,3 ± 0,61 (4,97)
	193,43	170,93	11,6	
	193,62	169,55	12,4	
9	233,28	215,88	7,5	7,0 ± 0,40 (5,77)
	233,62	217,72	6,8	
	233,00	217,27	6,8	
10	210,27	179,31	14,7	14,0 ± 0,70 (5,02)
	210,45	182,56	13,3	
	210,29	180,67	14,1	

TABELA 16 : Valores individuais da determinação da velocidade de propagação de ondas P para as amostras de rocha *in natura*

AMOSTRA	ALTURA (cm)	TEMPO (s)	VEL. PROP. (m/s)	MÉDIA (m/s)
2	11,76	22,9	5.135	5,050 ± 147,7 (2,93)
	12,67	24,4	5.192	
	12,60	24,3	5.185	
	10,72	21,3	5.033	
	8,17	16,5	4.951	
	7,22	15,0	4.813	
3a	10,85	17,9	6.061	5,670 ± 446,3 (7,87)
	11,05	18,5	5.973	
	10,16	18,7	5.433	
	5,95	11,9	5.000	
	8,30	14,1	5.887	
3b	12,21	26,8	4.556	5,260 ± 628,6 (11,85)
	13,49	23,4	5.765	
	12,61	23,1	5.459	
4	10,81	24,2	4.467	4,389 ± 155,0 (3,53)
	11,01	24,2	4.550	
	12,22	28,8	4.243	
	10,77	24,8	4.343	
	10,50	23,1	4.545	
	7,12	17,0	4.188	
5a	12,26	25,6	4.769	4,463 ± 331,0 (7,42)
	8,95	21,3	4.202	
	11,20	23,8	4.706	
	5,85	20,8	2.812	
	7,81	18,8	4.154	
5b	9,26	16,5	5.162	5,661 ± 122,2 (2,16)
	4,85	8,3	5.843	
	11,55	20,3	5.690	
	8,15	14,7	5.544	
	10,23	18,5	5.530	
	10,46	18,2	5.747	

continua

continuação

AMOSTRA	ALTURA (cm)	TEMPO (s)	VEL. PROP. (m/s)	MÉDIA (m/s)
6a	8,94	18,6	4.806	4,642 ± 109,2 (2,35)
	9,33	20,3	4.596	
	9,06	19,2	4.719	
	8,26	18,3	4.514	
	8,56	18,8	4.553	
	6,76	14,5	4.662	
6b	13,86	26,6	5.211	4,735 ± 454,0 (9,59)
	13,45	28,7	4.686	
	13,61	31,6	4.307	
7a	10,17	20,1	5.060	4,738 ± 223,1 (4,71)
	9,53	20,7	4.604	
	9,71	20,0	4.855	
	7,88	16,2	4.864	
	7,83	17,5	4.474	
	4,80	10,5	4.571	
7b	11,00	31,4	3.503	3,485 ± 92,6 (2,66)
	11,11	33,4	3.326	
	12,37	35,8	3.455	
	10,68	30,7	3.479	
	10,35	26,6	3.594	
	7,14	20,1	3.552	
8a	11,23	22,6	4.969	4,882 ± 257,2 (5,27)
	12,31	26,8	4.593	
	12,51	24,6	5.085	
9	9,43	15,9	5.931	5,888 ± 78,2 (1,33)
	9,46	16,0	5.913	
	9,01	15,0	6.007	
	8,74	14,9	5.866	
	8,94	15,4	5.805	
	8,13	14,0	5.807	
10	7,48	18,4	4.065	4,154 ± 61,5 (1,48)
	11,20	26,8	4.179	
	6,77	16,1	4.205	
	5,21	12,5	4.168	

TABELA 17 : Valores individuais dos ensaios de compressão uniaxial para as amostras de rocha *in natura*

AMOSTRA	ALTURA (cm)	DIMENSÕES a x b	CARGA (kg)	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA (Mpa)
2	11,76	5,05 x 5,06	20.400	78,30	100,3 ± 17,70 (17,66)
	7,22	5,08 x 5,14	21.200	79,60	
	12,67	5,10 x 5,11	27.800	104,60	
	12,60	5,01 x 5,04	27.100	105,30	
	6,17	5,05 x 5,09	29.200	111,40	
	10,72	5,09 x 5,10	32.400	122,40	
3a	11,05	5,07 x 5,10	15.800	59,20	117,2 ± 57,30 (48,90)
	5,95	5,02 x 5,04	21.800	84,50	
	10,16	5,00 x 5,05	22000	85,50	
	8,30	5,07 x 5,11	44.500	168,50	
	10,85	5,01 x 5,02	48.300	188,30	
3b	12,21	5,07 x 5,08	19.600	74,60	106,5 ± 38,73 (36,38)
	12,61	5,05 x 5,06	24.800	95,20	
4	12,22	5,03 x 5,10	11.400	43,60	70,4 ± 16,83 (23,92)
	10,81	5,07 x 5,11	14.600	55,30	
	7,12	5,05 x 5,11	20.600	78,30	
	10,77	5,09 x 5,11	21.000	79,20	
	10,50	5,07 x 5,11	21.200	80,30	
	11,01	5,06 x 5,07	22.400	85,60	
5a	12,26	5,10 x 5,10	14.400	54,30	68,0 ± 8,89 (13,07)
	7,81	5,23 x 5,24	18.400	85,80	
	11,20	5,12 x 5,16	18.500	68,70	
	8,95	5,08 x 5,16	19.800	74,10	
	5,85	5,10 x 5,15	20.700	77,30	
5b	10,23	5,07 x 5,08	16.500	62,80	79,3 ± 20,19 (25,45)
	10,46	5,07 x 5,08	16.500	62,80	
	11,55	5,05 x 5,10	18.800	71,60	
	9,26	5,06 x 5,08	19.500	74,40	
	8,15	5,04 x 5,11	23.300	88,70	
	4,65	5,08 x 5,09	30.500	115,70	
6a	9,06	5,15 x 5,21	22.400	81,90	99,2 ± 18,34 (18,50)
	8,56	5,14 x 5,17	23.000	84,90	
	9,33	5,17 x 5,19	23.300	85,20	
	8,26	5,14 x 5,17	28.100	103,70	
	6,76	5,13 x 5,21	30.500	111,90	
	8,94	5,17 x 5,18	34.800	127,40	

continua

continuação

AMOSTRA	ALTURA (cm)	DIMENSÕES a x b	CARGA (kg)	TENSÃO (MPa)	TENSÃO MÉDIA (Mpa)
6b	13,61	5,04 x 5,09	5.200	19,90	31,0 ± 13,65 (44,21)
	13,86	5,08 x 5,08	7.000	26,60	
	13,45	5,06 x 5,08	12.100	46,20	
7a	7,83	5,14 x 5,14	26.600	106,20	131,1 ± 19,17 (14,62)
	7,88	5,08 x 5,14	29.400	110,40	
	9,53	5,08 x 5,13	35.700	134,40	
	4,80	5,16 x 5,17	37.000	136,00	
	10,17	5,06 x 5,07	37.800	144,50	
	9,71	5,08 x 5,13	41.200	155,00	
7b	11,11	5,04 x 5,07	7.800	29,90	48,3 ± 11,03 (22,84)
	12,37	5,03 x 5,04	10.800	41,80	
	10,35	5,06 x 5,06	12.600	48,30	
	7,14	5,05 x 5,12	14.400	54,60	
	11,00	5,05 x 5,10	14.400	54,60	
	10,68	5,04 x 5,09	15.800	60,40	
8a	11,23	5,06 x 5,09	12.400	47,20	55,1 ± 7,94 (14,41)
	12,31	5,10 x 5,11	14.600	54,90	
	12,51	5,10 x 5,12	16.800	63,10	
9	8,74	4,99 x 5,03	27.800	108,60	176,3 ± 34,48 (19,56)
	8,13	5,00 x 5,08	44.800	173,00	
	9,46	5,04 x 5,13	50.000	189,70	
	9,43	5,02 x 5,03	49.300	191,50	
	9,01	5,03 x 5,16	51.000	192,70	
	8,94	5,00 x 5,10	52.600	202,30	
10	6,77	5,05 x 5,10	18.800	71,60	75,3 ± 3,14 (4,18)
	7,48	5,07 x 5,09	19.600	74,50	
	5,21	5,08 x 5,09	20.000	75,90	
	11,20	5,12 x 5,13	21.200	79,20	

TABELA 18 - Valores de tensão de ruptura para a amostra 1 (à temperatura ambiente).

Corpo de Prova nº	Peso (mg)	Leitura (lb)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	1,16	21,4	2441
2	0,7	13,0	2458
3	0,65	13,4	2728
4	0,68	12,8	2491
5	1,05	21,0	2647
6	0,78	18,1	3071
7	0,76	15,0	2612
8	0,62	12,2	2604
9	1,06	21,4	2672
10	0,6	11,2	2470
11	0,78	15,6	2647
12	0,69	13,8	2647
13	0,51	10,9	2828
14	0,67	13,2	2607
15	0,74	11,9	2128
16	0,72	14,9	2739
17	0,77	13,4	2303
18	0,58	10,6	2419
19	0,69	12,2	2340
20	0,77	17,4	2991
21	0,55	10,0	2406
22	0,72	14,0	2573
23	0,84	16,9	2663
24	1,05	20,0	2521
25	0,6	11,9	2625
26	0,57	10,6	2461
27	1,06	19,8	2472
28	0,72	13,6	2500
29	0,79	15,6	2613
30	0,74	15,9	2844
31	0,72	12,9	2371
32	0,69	13,7	2628
33	0,52	11,5	2927
34	0,46	10,0	2877
35	0,6	13,0	2867
36	0,01	21,0	2779
37	0,65	12,7	2586
38	0,5	10,5	2779
39	0,88	17,1	2572
40	0,8	17,4	2878

Corpo de Prova nº	Peso (mg)	Leitura (lb)	Tensão de Ruptura (MPa)
41	0,64	14,6	3019
42	0,97	16,5	2251
43	0,82	18,4	2970
44	0,73	14,0	2538
45	0,01	19,7	2607
46	0,49	11,0	2971
47	0,55	12,0	2887
48	0,94	17,8	2506
49	0,62	13,0	2775
50	0,83	16,3	2599
51	0,68	14,4	2803
52	0,63	13,0	2731
53	0,54	14,8	3627
54	0,62	12,7	2711
55	0,81	15,9	2598
56	0,77	15,9	2733
57	0,87	17,9	2723
58	0,01	21,0	2779
59	0,67	13,9	2746
60	0,94	18,9	2661
61	0,73	13,9	2520
62	1,35	21,0	2059
63	0,79	14,0	2345
64	0,9	19,0	2794
65	0,62	13,0	2775
66	0,55	11,5	2767
67	0,85	17,9	2787
68	0,71	14,1	2628
69	0,98	19,7	2660
70	0,81	15,6	2549
71	0,79	15,5	2597
72	0,88	16,3	2451
73	0,97	16,1	2197
74	0,91	19,1	2778
75	0,68	11,4	2219
76	1,03	20,1	2583
77	0,81	13,9	2271
78	0,85	18,9	2943
79	0,7	12,0	2269
80	0,59	11,0	2467

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Peso (mg)	Leitura (lb)	Tensão de Ruptura (MPa)
81	0,76	14,4	2508
82	0,98	17,8	2404
83	0,95	16,1	2243
84	0,81	14,6	2385
85	0,75	15,4	2717
86	0,01	18,9	2501
87	0,82	14,9	2405
88	0,55	10,0	2406
89	0,95	19,0	2647
90	0,62	14,8	3159
91	0,61	12,7	2755
92	0,6	13,7	3022
93	0,89	19,1	2840
94	0,97	18,5	2524
95	0,5	12,9	3414
96	0,89	16,7	2483
97	0,78	17,6	2986
98	0,69	13,7	2628
99	0,73	15,9	2883
100	1,05	20,0	2521
101	0,58	12,8	2921
102	0,97	18,2	2483
103	0,56	12,5	2954
104	0,55	10,5	2527
105	0,53	11,3	2822
106	0,93	19,1	2718
107	0,74	17,8	3183
108	1,1	20,0	2406
109	0,68	12,8	2491
110	0,93	14,1	2006
111	0,66	13,8	2767
112	0,59	11,8	2647
113	0,75	15,7	2770
114	0,58	11,9	2715
115	0,49	10,9	2944
116	0,78	15,3	2596
117	0,76	13,4	2333
118	0,46	11,6	3337
119	0,63	13,2	2773
120	0,54	12,7	3112
121	0,78	17,7	3003

Corpo de Prova nº	Peso (mg)	Leitura (lb)	Tensão de Ruptura (MPa)
122	0,6	13,2	2912
123	0,69	11,0	2110
124	0,76	14,0	2438
125	0,69	10,5	2014
126	0,65	11,0	2240
127	0,79	14,7	2463
128	0,75	14,4	2541
129	0,68	13,0	2530
130	0,6	11,7	2581
131	0,87	16,8	2556
132	0,67	14,0	2765
133	0,91	18,2	2647
134	0,73	10,1	1831
135	0,7	14,8	2798
136	0,79	15,3	2563
137	0,61	10,1	2191
138	0,65	13,2	2688
139	0,85	16,9	2631
140	0,88	18,8	2827
141	0,67	12,2	2410
142	0,64	16,1	3329
143	1,04	19,9	2532
144	0,7	11,6	2193
145	0,75	13,8	2435
146	0,69	11,9	2282
147	0,65	13,2	2688
148	0,63	12,4	2605
149	0,73	15,9	2883
150	0,89	19,7	2929
151	0,98	20,0	2701
152	0,73	15,0	2719
153	0,75	12,5	2206
154	0,68	13,3	2588
155	0,82	15,2	2453
156	0,88	17,7	2662
157	1,1	21,1	2539
158	0,88	17,9	2692
159	0,81	15,2	2483
160	0,72	13,9	2555
161	0,89	19,7	2929
162	0,99	20,0	2674

TABELA 19 - Valores de tensão de ruptura para a amostra 2 (à temperatura ambiente e sob aquecimento a 300°C e 500°C).

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
1	0,48	10,4	2867	0,85	17,2	2678	0,52	12,1	3079
2	0,68	13,8	2686	0,77	11,2	1925	1,05	20,3	2559
3	0,82	16,2	2615	0,65	11,2	2280	0,86	19,3	2970
4	1,04	20,4	2596	0,58	11,0	2510	1,16	21,1	2407
5	0,68	13,4	2608	0,85	13,0	2024	0,6	10,5	2316
6	0,72	13,6	2500	0,85	13,9	2164	0,01	20,9	2766
7	0,69	10,8	2071	1,14	17,9	2078	0,61	12,4	2690
8	0,72	11,3	2077	0,77	10,9	1873	0,01	21,1	2792
9	0,54	10,8	2647	1,44	21,1	1939	0,77	18,9	3248
10	0,54	10,6	2598	1,21	16,5	1805	0,8	15,6	2581
11	1,05	18,0	2269	0,67	10,9	2153	1,17	20,9	2364
12	0,73	13,8	2502	1,07	17,9	2214	0,82	16,6	2679
13	1,07	20,2	2498	1,28	19,9	2058	1,14	20,9	2426
14	0,77	14,9	2561	1,33	21,1	2100	1,1	21,1	2539
15	0,66	13,8	2767	1,12	19,0	2245	0,91	20,7	3010
16	0,73	14,5	2629	1,05	17,9	2256	1,2	21,1	2327
17	0,54	11,8	2892	0,75	11,9	2100	1,15	20,9	2405
18	1,04	19,8	2520	1,41	17,9	1680	0,81	13,4	2189
19	1,08	20,2	2475	0,89	13,9	2067	1,22	21,5	2332
20	0,51	10,2	2647	0,9	14,7	2162	0,99	20,9	2794
21	0,6	11,4	2514	0,57	10,7	2484	0,8	17,3	2862
22	0,01	20,8	2753	1,000	16,0	2117	1,24	21,1	2252
23	0,65	12,6	2565	0,96	16,6	2288	1,22	20,9	2267
24	0,91	12,4	1803	0,98	12,0	1621	0,99	19,9	2660
25	0,56	12,8	3025	1,000	20,6	2726	0,51	12,2	3166
26	0,78	15,9	2698	1,05	17,0	2143	0,91	16,7	2429
27	0,69	17,7	3395	1,17	19,0	2149	0,78	16,5	2800
28	0,51	11,4	2958	0,9	13,0	1912	0,82	19,0	3066
29	0,6	12,9	2845	0,97	14,6	1992	1,31	21,0	2122
30	0,98	19,8	2674	1,12	17,8	2103	0,57	10,5	2438
31	0,75	15,0	2647	0,91	14,8	2152	1,47	21,0	1891
32	0,86	16,0	2462	1,15	16,8	1933	0,6	14,3	3154
33	1,1	21,0	2527	1,02	16,6	2154	0,6	13,9	3066
34	0,67	13,5	2667	0,4	12,8	4235	0,78	15,9	2698
35	0,56	11,9	2812	1,07	15,6	1929	0,81	16,2	2647
36	0,87	16,4	2495	0,76	14,8	2577	0,95	19,0	2647
37	0,7	13,5	2552	0,87	15,7	2388	1,15	21,0	2417
38	0,75	13,0	2294	1,15	14,9	1715	1,05	20,5	2584
39	1,05	21,1	2659	0,85	11,9	1853	0,64	12,4	2564

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
40	1,07	20,4	2523	1,17	15,8	1787	0,79	13,0	2178
41	0,69	12,4	2378	1,13	17,7	2073	0,61	10,8	2343
42	0,86	17,4	2678	1,07	18,5	2288	1,01	19,0	2490
43	0,67	11,4	2252	1,27	21,2	2209	0,91	19,3	2807
44	0,6	12,1	2669	0,72	12,2	2242	0,8	15,8	2614
45	0,59	11,6	2602	0,73	10,0	1813	0,65	13,1	2667
46	0,67	12,2	2410	0,69	12,6	2417	0,89	17,9	2662
47	0,9	17,7	2603	1,25	21,0	2223	1,06	20,2	2522
48	0,49	11,5	3106	1,02	17,9	2322	0,01	19,3	2554
49	0,69	13,9	2666	0,68	12,6	2452	0,67	13,8	2726
50	0,5	11,0	2912	0,77.	13,4	2303	1,19	21,1	2347
51	0,01	19,9	2634	0,99	19,3	2580	0,86	16,6	2554
52	1,1	21,4	2575	1,06	18,4	2297	0,67	13,9	2746
53	0,54	10,6	2598	0,82	18,2	2937	0,78	15,7	2664
54	0,94	17,4	2450	1,000	17,9	2369	0,9	19,1	2809
55	0,75	15,7	2770	0,82	18,2	2937	0,93	20,0	2846
56	0,61	11,7	2538	1,24	18,2	1942	0,6	13,7	3022
57	0,79	13,7	2295	1,07	20,1	2486	0,85	13,6	2117
58	1,1	20,9	2514	1,26	21,2	2227	1,15	20,9	2405
59	0,75	14,1	2488	0,78	13,8	2341	0,01	20,6	2726
60	0,92	18,7	2690	1,05	20,7	2609	0,69	11,8	2263
61	0,59	10,7	2400	0,77	12,9	2217	0,59	11,9	2669
62	0,75	14,1	2488	1,08	18,8	2304	0,61	13,0	2820
63	0,89	17,4	2587	0,73	11,9	2157	0,8	15,3	2531
64	0,58	10,9	2487	0,91	14,9	2167	0,76	10,7	1863
65	0,85	17,8	2771	1,35	18,9	1853	0,68	14,3	2783
66	0,59	10,4	2333	1,18	21,1	2366	0,66	11,0	2206
67	0,81	13,9	2271	0,99	15,6	2085	0,95	19,4	2703
68	0,76	12,0	2090	1,06	16,0	1998	0,87	18,0	2738
69	0,76	14,9	2595	1,000	17,9	2369	0,66	14,5	2908
70	0,99	17,5	2339	0,9	15,5	2279	1,1	20,1	2418
71	0,6	10,8	2382	0,79	16,7	2798	0,54	10,8	2647
72	0,53	10,9	2722	0,5	10,6	2806	1,17	21,1	2387
73	0,6	10,1	2228	1,25	21,3	2255	0,71	16,0	2982
74	0,58	12,3	2807	0,8	18,6	3077	1,05	20,9	2634
75	0,66	13,5	2707	1,02	21,1	2738	0,95	19,4	2703
76	0,78	16,5	2800	1,17	20,8	2353	0,72	16,8	3088
77	0,91	18,8	2734	1,06	20,0	2497	1,15	21,3	2451
78	0,97	20,7	2824	0,68	14,5	2822	1,25	21,3	2255
79	0,47	10,8	3041	0,75	16,0	2823	0,9	17,4	2559

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
80	1,05	20,0	2521	0,67	16,9	3338	0,69	14,5	2781
81	0,82	14,2	2292	0,83	18,3	2918	0,64	12,6	2605
82	0,54	11,2	2745	0,7	17,4	3290	1,09	21,2	2574
83	0,78	17,5	2969	1,05	21,1	2659	0,96	18,7	2578
84	0,01	19,9	2634	0,7	15,8	2987	0,83	17,7	2822
85	0,72	13,9	2555	0,49	12,3	3322	0,6	11,8	2603
86	1,12	21,2	2505	0,72	14,2	2610	0,73	13,9	2520
87	0,78	14,2	2409	0,84	12,3	1938	0,7	15,7	2968
88	1,17	21,4	2421	0,69	13,8	2647	0,55	11,7	2815
89	0,81	15,6	2549	0,99	20,9	2794	0,72	13,7	2518
90	0,55	10,6	2551	0,71	15,4	2871	0,88	17,7	2662
91	0,64	12,2	2523	1,27	21,6	2251	1,25	20,9	2213
92	0,66	12,9	2587	1,000	19,8	2620	1,1	21,1	2539
93	0,7	13,8	2609	0,82	15,6	2518	0,42	12,5	3939
94	0,76	17,8	3100	0,57	12,9	2995	0,67	13,8	2726
95	0,87	16,8	2556	0,62	11,2	2391	1,09	21,1	2562
96	0,59	11,8	2647	0,73	13,4	2429	0,79	17,9	2999
97	0,65	12,8	2606	0,7	16,8	3176	0,75	17,6	3106
98	0,57	12,4	2879	0,99	19,7	2633	0,85	18,0	2803
99	1,05	19,6	2470	0,5	13,7	3626	1,13	21,0	2459
100	0,99	18,1	2420	1,05	21,0	2647	0,52	11,9	3029
101	0,8	15,8	2614	0,6	13,0	2867	0,73	16,6	3009
102	0,88	17,9	2692	0,7	15,7	2968	0,8	18,0	2978
103	0,93	18,0	2561	0,49	11,0	2971	1,07	20,7	2560
104	0,68	13,6	2647	0,8	17,7	2928	0,5	11,0	2912
105	0,67	13,0	2568	0,93	17,9	2547	0,49	10,7	2890
106	0,54	11,3	2769	1,1	20,0	2406	0,82	17,0	2744
107	0,73	15,9	2883	0,9	17,9	2632	0,01	20,7	2739
108	0,61	11,8	2560	1,1	20,9	2514	0,78	17,8	3020
109	0,85	17,9	2787	0,54	13,8	3382	0,01	20,9	2766
110	0,47	10,1	2844	1,07	21,0	2597	0,5	11,9	3150
111	0,46	10,6	2985	0,88	19,6	2948	0,79	18,3	3066
112	0,55	10,1	2906	0,5	10,3	2726	0,86	18,7	2878
113	0,8	17,0	4091	1,17	20,9	2364	0,95	20,9	2912
114	0,67	12,4	2051	1,35	21,6	2117	0,49	10,4	2809
115	0,8	16,2	3200	0,69	16,0	3069	0,6	15,5	3419
116	0,63	12,6	2084	0,75	14,9	2629	0,01	19,9	2634
117	0,45	10,0	2941	0,88	20,9	3143	0,73	16,6	3009
118	0,68	13,6	2647	1,05	21,1	2659	0,75	17,7	3123
119	0,55	11,4	2743	0,8	16,0	2647	0,42	11,4	3592

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
120	0,67	12,0	2370	0,83	15,5	2471	0,69	15,5	2973
121	1,1	18,0	2166	0,36	10,0	3676	0,57	13,3	3088
122	0,85	15,8	2460	1,07	18,3	2263	1,2	20,9	2305
123	0,65	10,0	2036	0,5	12,1	3203	0,58	10,4	2373
124	0,75	11,0	1941	0,74	15,5	2772	0,85	17,7	2756
125	0,99	18,0	2406	0,94	18,9	2661	0,95	20,0	2786
126	0,69	11,8	2263	0,78	14,7	2494	0,84	17,3	2726
127	1,09	20,0	2428	0,94	20,9	2942	0,74	17,6	3148
128	0,9	17,0	2500	0,66	14,6	2928	0,65	12,5	2545
129	0,63	10,8	2269	0,85	16,3	2538	0,9	18,9	2779
130	1,24	20,4	2177	0,69	12,0	2302	0,82	15,8	2550
131	0,75	14,8	2612	0,75	17,7	3123	0,53	10,9	2722
132	0,55	10,8	2599	0,5	11,9	3150	1,22	20,9	2267
133	0,9	18,8	2764	0,6	10,0	2206	0,82	16,0	2582
134	0,79	14,8	2479	1,15	20,9	2405	0,92	16,7	2402
135	0,87	17,7	2692	0,65	13,9	2830	0,76	14,8	2577
136	0,68	13,4	2608	0,6	15,0	3309	0,75	15,1	2664
137	0,62	11,6	2476	0,6	10,0	2206	0,55	11,1	2671
138	0,7	13,9	2628	0,74	18,3	3273	0,5	11,3	2991
139	1,15	21,0	2417	1,07	21,1	2610	1,06	19,2	2397
140	0,69	11,9	2282	0,93	17,3	2462	0,8	16,8	2779
141	0,83	17,7	2822	0,86	20,6	3170	0,7	17,9	3384
142	0,62	11,8	2519	1,11	21,1	2516	0,9	20,1	2956
143	1,15	21,4	2463	0,66	14,2	2847	0,82	19,9	3212
144	0,85	16,5	2569	0,97	20,8	2838	0,01	21,0	2779
145	0,83	15,6	2487	0,84	14,0	2206	0,84	17,9	2820
146	0,71	10,0	1864	0,78	15,1	2562	0,79	15,7	2630
147	0,79	15,6	2613	1,14	20,4	2368	0,5	11,0	2912
148	0,92	18,0	2589	0,78	17,6	2986	1,12	21,1	2493
149	1,1	20,0	2406	0,84	13,5	2127	0,92	20,9	3006
150	0,95	18,9	2633	0,7	12,3	2325	0,74	14,9	2665
151	0,99	21,0	2807	0,95	18,5	2577	0,67	13,6	2686
152	0,65	13,2	2688	0,54	11,0	2696	0,97	21,0	2865
153	0,68	13,8	2686	0,88	20,0	3008	0,93	18,7	2661
154	0,9	16,8	2470	0,93	17,6	2505	0,95	18,9	2633
155	0,63	13,8	2899	0,69	13,9	2666	0,65	15,3	3115
156	0,86	17,7	2724	0,75	13,3	2347	0,92	19,9	2863
157	0,7	15,4	2912	0,9	20,6	3029	0,98	21,0	2836
158	0,64	11,9	2461	1,12	20,9	2470	0,85	18,3	2849
159	0,95	18,9	2633	0,56	10,7	2529	0,57	11,5	2670

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
160	0,9	17,4	2559	0,91	19,3	2807	1,05	20,6	2596
161	0,8	15,6	2581	1,1	21,3	2563	0,73	16,3	2955
162	0,92	18,4	2647	0,72	13,0	2390	0,6	12,6	2779
163	0,65	12,0	2443	0,79	15,9	2664	0,9	18,5	2720
164	0,71	16,1	3001	1,07	16,3	2016	1,19	21,1	2347
165	1,09	21,1	2562	0,85	19,2	2989	0,83	17,9	2854
166	0,79	14,0	2345	0,82	16,5	2663	1,09	20,4	2477
167	0,55	11,9	2863	0,78	17,9	3037	0,93	15,1	2149
168	1,07	20,8	2573	0,7	14,9	2817	0,58	10,6	2419
169	0,66	12,0	2406	0,85	18,7	2912	0,82	16,3	2631
170	0,68	13,0	2530	0,69	14,0	2685	0,87	17,6	2677
171	0,72	15,0	2757	0,55	13,9	3345	1,11	20,9	2492
172	0,83	17,7	2822				0,72	13,7	2518
173	1,1	21,1	2539				0,94	19,9	2802
174	0,69	14,3	2743				0,7	13,0	2458
175	0,62	12,0	2561				1,19	21,1	2347
176							1,12	19,6	2316
177							0,91	16,6	2414
178							1,05	20,0	2521
179							0,95	18,2	2535
180							0,81	15,7	2565
181							0,49	10,9	2944
182							0,67	13,8	2726
183							0,58	11,2	2556

TABELA 20 - Valores de tensão de ruptura para a amostra 3 (à temperatura ambiente e sob aquecimento a 300°C e a 500°C).

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
1	0,91	15,6	2269	1,6	20,2	1671	0,68	15,1	2939
2	0,91	16,1	2341	0,56	11,6	2741	0,7	14,0	2647
3	0,99	19,5	2607	0,82	11,5	1856	0,73	15,3	2774
4	0,49	10,1	2728	0,72	14,5	2665	0,52	13,2	3359
5	0,58	11,7	2670	0,78	14,7	2494	0,55	10,2	2454
6	0,59	13,1	2938	0,65	11,2	2280	0,99	18,8	2513
7	0,55	10,2	2454	0,54	11,4	2794	0,7	13,7	2590
8	0,77	13,8	2372	1,06	14,4	1798	0,6	11,7	2581
9	0,7	13,5	2552	0,73	15,4	2792	0,66	13,5	2707
10	0,43	11,3	3478	1,07	19,9	2461	0,01	21,1	2792
11	0,89	16,5	2454	0,53	10,0	2497	0,01	19,9	2634
12	0,8	16,3	2696	1,05	21,0	2647	0,49	11,1	2998
13	0,6	10,0	2206	1,000	21,1	2792	0,64	12,6	2605
14	0,55	13,1	3152	0,76	14,8	2577	1,07	21,1	2610
15	0,9	17,7	2603	0,53	10,2	2547	0,7	14,4	2722
16	0,01	20,0	2647	0,79	15,7	2630	0,97	19,7	2688
17	0,01	21,1	2792	1,06	18,3	2285	0,84	15,3	2411
18	1,1	21,0	2527	1,15	20,9	2405	0,6	13,1	2889
19	0,62	11,7	2497	0,68	12,2	2374	0,79	19,2	3216
20	0,66	14,9	2988	0,86	15,5	2385	0,73	17,0	3082
21	0,49	11,1	2998	0,62	11,7	2497	0,82	14,8	2389
22	0,99	19,3	2580	0,9	17,9	2632	0,84	17,5	2757
23	0,79	14,2	2379	0,78	13,8	2341	0,73	15,9	2883
24	0,91	15,1	2196	0,5	11,0	2912	0,41	10,6	3422
25	0,01	16,8	2223	1,000	16,1	2131	0,9	20,1	2956
26	0,63	11,9	2500	1,2	21,1	2327	0,79	16,6	2781
27	0,7	10,3	1947	0,76	16,5	2873	0,6	13,1	2889
28	1,1	21,3	2563	0,95	19,2	2675	0,5	10,1	2673
29	0,49	10,0	2701	0,61	12,8	2777	0,77	16,5	2836
30	1,28	20,0	2068	0,65	14,2	2891	0,57	11,3	2624
31	0,42	10,8	3403	1,1	20,9	2514	0,93	19,0	2704
32	0,51	10,7	2777	1,04	18,7	2380	0,68	13,6	2647
33	0,79	17,7	2965	1,07	21,1	2610	0,82	15,7	2534
34	0,63	11,1	2332	0,73	15,2	2756	0,65	13,9	2830
35	0,55	11,0	2647	0,78	16,3	2766	0,68	13,0	2530
36	0,69	12,1	2321	0,51	11,0	2854	0,92	20,2	2906
37	0,75	13,7	2417	0,83	17,0	2711	0,62	11,1	2369
38	0,76	14,8	2577	0,68	15,4	2997	0,86	17,7	2724
39	0,88	14,6	2196	0,65	12,7	2586	0,63	11,9	2500

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
40	0,9	15,6	2294	0,44	10,2	3068	0,73	14,7	2665
41	1,15	21,4	2463	0,71	13,7	2554	0,52	10,9	2774
42	1,09	20,3	2465	0,8	16,9	2796	0,95	20,0	2786
43	0,88	17,2	2587	0,92	20,0	2877	0,52	12,2	3105
44	0,7	12,3	2325	0,9	19,1	2809	0,79	16,2	2714
45	0,57	11,2	2600	0,62	12,8	2732	0,69	13,1	2513
46	0,86	12,8	1970	0,63	12,5	2626	0,49	10,2	2755
47	0,8	13,5	2233	0,81	15,7	2565	0,6	11,7	2581
48	0,73	13,4	2429	0,69	14,5	2781	0,8	15,7	2597
49	1,15	21,2	2440	0,59	11,9	2669	0,66	13,9	2787
50	0,99	18,5	2473	0,7	16,5	3119	0,95	19,7	2744
51	0,88	14,5	2181	0,45	10,3	3029	0,72	15,0	2757
52	0,66	10,9	2186	0,9	17,9	2632	0,59	11,0	2467
53	0,75	13,1	2312	1,05	21,0	2647	0,99	21,1	2821
54	0,95	14,8	2062	0,5	10,9	2885	0,7	15,0	2836
55	0,85	17,3	2694	0,68	14,4	2803	0,68	13,7	2666
56	0,93	16,0	2277	0,56	14,0	3309	0,94	21,0	2957
57	0,85	13,8	2149	0,95	20,9	2912	0,7	18,0	3403
58	0,89	17,5	2602	0,72	15,1	2775	0,62	15,8	3373
59	0,56	11,3	2670	0,47	10,0	2816	0,74	13,8	2468
60	0,72	13,1	2408	0,59	12,2	2737	0,54	10,8	2647
61	0,81	14,8	2418	0,45	11,2	3294	0,7	13,3	2514
62	0,6	10,9	2404	0,85	15,3	2382	0,82	18,7	3018
63	0,65	11,6	2362	0,6	12,5	2757	0,88	18,3	2752
64	0,89	17,5	2602	0,49	10,5	2836	0,57	11,4	2647
65	0,65	13,2	2688	0,49	11,3	3052	0,88	19,9	2993
66	0,77	15,5	2664	0,71	15,2	2833	0,55	11,1	2671
67	0,9	17,7	2603	0,52	10,7	2723	0,44	10,3	3098
68	1,05	20,4	2571	0,63	12,6	2647	0,77	15,9	2733
69	0,78	18,2	3088	0,83	17,8	2838	0,9	17,7	2603
70	0,63	15,9	3340	0,72	15,2	2794	0,94	20,0	2816
71	0,6	12,9	2845	0,57	11,4	2647	0,62	13,8	2946
72	0,49	11,5	3106	0,65	14,8	3013	0,48	10,7	2950
73	0,61	11,9	2582	1,000	19,8	2620	0,78	14,1	2392
74	0,5	11,0	2912	0,53	11,0	2747	0,83	13,9	2216
75	0,01	19,9	2634	0,53	10,8	2697	0,63	12,5	2626
76	0,75	13,7	2417	0,7	15,7	2968	0,71	10,4	1939
77	0,88	15,3	2301	0,72	12,5	2298	0,85	21,1	3285
78	0,9	17,0	2500	1,000	20,7	2739	0,72	15,1	2775
79	0,67	11,6	2291	0,78	15,0	2545	1,2	21,1	2327

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
80	0,76	14,9	2595	0,6	12,4	2735	0,58	10,9	2487
81	0,53	11,6	2897	0,46	10,0	2877	0,99	19,9	2660
82	0,71	16,6	3094	0,83	14,9	2376	0,5	11,8	3123
83	0,6	11,8	2603	0,52	10,6	2698	0,85	20,6	3207
84	0,82	15,9	2566	0,83	18,5	2950	0,8	16,8	2779
85	0,61	11,0	2386	0,5	11,3	2991	0,7	15,5	2930
86	0,95	19,5	2716	0,83	12,2	1945	0,88	18,3	2752
87	0,7	15,7	2968	0,92	17,4	2503	1,02	19,8	2569
88	0,72	14,7	2702	0,58	11,1	2533	0,58	11,0	2510
89	0,5	11,5	3044	0,9	19,5	2867	0,75	17,8	3141
90	0,99	19,3	2580	0,7	12,2	2307	0,7	16,4	3101
91	0,91	18,0	2618	1,22	21,1	2289	0,85	18,7	2912
92	0,62	10,0	2135	0,67	14,8	2923	0,72	15,9	2923
93	0,79	17,6	2948	0,99	21,1	2821	0,4	11,7	3871
94	0,68	13,6	2647	0,52	11,6	2952	0,8	16,4	2713
95	0,7	13,7	2590	1,08	20,9	2561	1,21	21,0	2297
96	0,56	11,6	2741	1,000	20,1	2660	0,73	15,5	2810
97	0,73	12,6	2284	0,85	16,4	2553	1,28	21,0	2171
98	0,75	12,3	2170	1,11	21,2	2528	0,01	19,0	2514
99	1,12	21,2	2505	0,95	21,0	2925	0,69	16,5	3165
100	0,7	15,6	2949	0,68	16,2	3153	0,8	17,5	2895
101	0,68	13,2	2569	0,6	11,6	2559	0,79	16,9	2831
102	0,79	14,5	2429	0,76	15,7	2734	0,7	16,1	3044
103	0,6	11,4	2514	0,7	14,8	2798	0,62	11,5	2455
104	0,79	16,3	2731	0,74	16,9	3022	0,64	12,1	2502
105	0,48	10,2	2812	0,71	14,9	2777	0,79	13,9	2329
106	0,63	10,6	2227	0,45	10,3	3029	0,82	15,7	2534
107	0,74	13,6	2432	1,000	19,8	2620	0,79	17,7	2965
108	0,7	12,5	2363	0,81	18,3	2990	0,85	19,9	3098
109	0,72	10,9	2004	0,83	20,1	3205	0,8	17,0	2812
110	0,76	12,3	2142	0,74	17,3	3094	0,56	12,2	2883
111	0,61	12,1	2625	0,59	12,9	2894	0,66	12,2	2446
112	0,6	11,2	2470	0,77	20,5	3523	0,74	11,9	2128
113	0,7	13,6	2571	0,63	12,1	2542	0,7	13,7	2590
114	0,97	11,3	1542	1,03	21,1	2711	0,5	11,5	3044
115	0,91	18,6	2705	0,49	11,7	3160	0,8	12,5	2068
116	0,57	10,9	2531	0,86	18,4	2831	0,64	13,1	2709
117	0,64	13,2	2730	0,89	18,3	2721	0,64	12,8	2647
118	0,82	15,3	2469	0,7	15,4	2912	0,73	15,8	2864
119	0,55	12,3	2960	0,86	17,5	2693	0,69	11,5	2206

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
120	0,71	13,3	2479	0,8	16,0	2647	0,59	11,0	2467
121	0,94	19,3	2717	0,85	16,9	2631	1,1	20,8	2502
122	1,12	21,1	2493	0,53	11,6	2897	0,88	16,9	2542
123	0,58	11,9	2715	0,59	11,8	2647	0,97	20,6	2811
124	1,1	20,7	2490	1,05	19,2	2420	0,89	17,6	2617
125	1,1	21,0	2527	0,71	12,8	2386	0,86	16,3	2508
126	0,7	11,8	2231	0,61	12,8	2777	0,99	19,2	2567
127	0,91	17,9	2603	0,69	14,1	2704	0,82	18,5	2986
128	0,79	11,9	1993	0,78	16,7	2833	0,64	12,3	2543
129	0,65	15,5	3156	0,94	20,0	2816	0,68	13,3	2588
130	0,47	10,1	2844	0,81	17,6	2876	0,73	15,6	2828
131	0,68	15,0	2919	0,6	16,0	3529	1,1	19,4	2334
132	0,55	12,0	2887	0,55	10,0	2406	0,76	17,0	2960
133	0,87	17,5	2662	0,7	13,9	2628	0,7	13,2	2496
134	0,4	10,5	3474	1,1	21,1	2539	0,7	13,6	2571
135	0,7	13,0	2458	0,65	14,7	2993	0,59	11,7	2624
136	0,63	12,9	2710	0,85	19,0	2958	0,64	12,4	2564
137	0,3	10,0	4411	0,59	12,6	2826	1,16	20,9	2384
138	0,67	14,7	2904	0,92	19,4	2791	0,01	20,5	2713
139	0,44	10,4	3128	0,7	15,4	2912	0,97	20,9	2851
140	0,54	11,7	2867	0,89	19,2	2855	0,82	14,4	2324
141	0,68	13,1	2550	0,94	20,4	2872	0,65	14,7	2993
142	0,71	14,3	2665	0,95	19,9	2772	0,78	18,7	3173
143	0,77	15,3	2630	0,76	16,6	2891	0,86	18,3	2816
144	0,56	10,3	2434	0,62	13,0	2775	0,72	13,4	2463
145	0,58	10,1	2305	0,9	19,1	2809	0,64	12,8	2647
146	0,68	11,7	2277	0,41	10,7	3454	0,71	13,1	2442
147	0,51	10,9	2828	1,07	21,1	2610	0,83	17,3	2758
148				0,69	13,9	2666	0,58	10,3	2350
149				0,78	17,4	2952	0,95	18,6	2591
150				0,73	15,5	2810	0,93	19,1	2718
151				1,000	20,9	2766	0,88	16,7	2511
152				0,69	11,9	2282	0,98	21,0	2836
153				0,82	15,7	2534	0,85	18,8	2927
154				1,09	20,1	2440	0,53	10,1	2522
155				0,52	13,0	3309	0,84	18,1	2852
156				0,82	19,0	3066	0,52	10,1	2570
157				0,78	16,2	2749	0,96	16,9	2330
158				0,7	14,1	2666	1,22	21,1	2289
159							0,55	11,1	2671

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
160							0,71	16,7	3113
161							1,11	19,8	2361
162							0,63	12,1	2542
163							1,13	21,1	2471
164							0,84	17,1	2694
165							0,91	18,9	2749
166							0,61	13,7	2972
167							0,74	15,6	2790
168							0,45	10,0	2941
169							0,62	11,9	2540
170							0,81	15,4	2516
171							0,01	19,7	2607
172							0,88	17,1	2572
173							0,01	21,1	2792
174							0,95	20,8	2898
175							0,73	14,4	2611
176							0,81	16,3	2663
177							0,6	13,2	2912
178							0,92	19,9	2863
179							0,76	15,8	2751
180							0,88	17,7	2662
181							0,73	17,1	3100
182							0,85	16,9	2631
183							0,7	14,9	2817
184							0,69	13,7	2628
185							1,12	21,0	2481

TABELA 21 - Valores de tensão de ruptura para a amostra 5 (à temperatura ambiente).

Corpo de Prova nº	Peso (mg)	Leitura (lb)	Tensão de Ruptura (MPa)
1	0,99	20,2	2700
2	0,76	13,8	2403
3	0,66	12,0	2406
4	0,69	14,2	2724
5	0,88	17,4	2617
6	0,58	12,4	2829
7	0,68	13,9	2705
8	0,75	12,8	2259
9	0,87	13,5	2054
10	1,08	19,9	2439
11	0,95	15,2	2117
12	1,16	19,1	2179
13	0,57	10,5	2438
14	0,85	18,3	2849
15	0,68	15,2	2958
16	0,68	10,9	2121
17	0,59	11,9	2669
18	0,57	12,1	2809
19	0,91	16,4	2385
20	0,82	18,0	2905
21	0,62	11,6	2476
22	0,68	12,9	2511
23	0,77	15,7	2698
24	0,82	13,5	2179
25	0,59	12,9	2894
26	0,51	12,9	3347
27	0,8	16,1	2663
28	0,56	12,4	2930
29	0,68	12,0	2335
30	0,88	17,4	2617
31	0,72	10,0	1838
32	0,84	15,2	2395
33	0,71	11,5	2144
34	0,69	12,0	2302
35	0,8	10,4	1720
36	0,81	17,4	2843
37	0,75	18,3	3229
38	0,55	12,2	2936
39	0,71	18,5	3448

Corpo de Prova nº	Peso (mg)	Leitura (lb)	Tensão de Ruptura (MPa)
40	0,55	12,6	3032
41	0,48	10,5	2895
42	0,78	18,2	3088
43	0,74	12,2	2182
44	1,09	20,1	2440
45	0,9	19,3	2838
46	0,62	10,6	2263
47	0,81	15,7	2565
48	0,82	13,9	2243
49	0,8	14,1	2333
50	0,71	11,3	2106
51	0,85	11,3	1759
52	0,7	14,1	2666
53	0,83	16,6	2647
54	0,59	15,0	3365
55	0,74	15,1	2700
56	0,45	11,9	3500
57	0,57	14,1	3274
58	0,7	10,6	2004
59	0,53	11,9	2971
60	0,7	16,7	3157
61	0,63	11,3	2374
62	0,95	18,7	2605
63	0,89	18,9	2810
64	0,72	13,7	2518
65	1,07	21,5	2659
66	1,02	19,9	2582
67	0,91	16,3	2371
68	0,45	11,7	3441
69	0,53	10,1	2522
70	0,59	12,1	2714
71	0,62	11,9	2540
72	0,81	16,6	2712
73	0,68	12,9	2511
74	0,7	13,7	2590
75	0,54	14,1	3456
76	0,64	13,7	2833
77	0,57	12,0	2786
78	0,45	11,5	3382

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Peso (mg)	Leitura (lb)	Tensão de Ruptura (MPa)
79	0,63	14,5	3046
80	0,56	10,6	2505
81	0,01	20,7	2739
82	0,66	14,9	2988
83	0,69	14,3	2743
84	0,75	14,1	2488
85	0,67	11,1	2193
86	0,76	13,9	2420
87	0,67	15,4	3042
88	0,62	13,9	2967
89	0,86	18,5	2847
90	0,46	10,1	2906
91	0,61	12,9	2799
92	0,5	11,3	2991
93	0,7	13,5	2552
94	0,65	14,8	3013
95	0,8	19,7	3259
96	0,57	12,2	2833
97	0,75	16,9	2982
98	0,6	14,9	3286
99	0,47	10,7	3013
100	0,69	12,1	2321
101	0,75	13,3	2347
102	0,65	12,9	2626
103	0,57	10,6	2461
104	0,47	10,0	2816
105	0,77	13,5	2320
106	0,71	13,3	2479
107	0,45	11,0	3235
108	0,59	10,5	2355
109	0,64	14,3	2957
110	0,74	13,7	2450
111	0,72	13,5	2481
112	0,85	17,2	2678
113	0,99	20,1	2687
114	0,59	11,0	2467
115	0,86	16,1	2478
116	0,75	16,3	2876
117	1,1	21,1	2539

TABELA 22 - Valores de tensão de ruptura para a amostra 6 (à temperatura ambiente e sob aquecimento a 300°C e 500°C).

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
1	0,79	18,1	3032	0,67	15,8	3121	0,84	11,2	1765
2	0,56	12,2	2883	0,58	12,0	2738	1,5	21,0	1853
3	0,51	10,6	2751	1,31	21,0	2122	0,89	14,6	2171
4	0,63	13,8	2899	0,83	16,8	2679	1,10	20,5	2466
5	0,49	11,2	3025	0,57	13,1	3042	1,27	21,1	2199
6	0,66	14,5	2908	0,7	18,8	3554	0,66	18,7	3750
7	0,72	15,1	2775	0,55	12,0	2887	0,72	13,9	2555
8	0,55	10,3	2478	0,97	20,9	2851	1,1	21,3	2563
9	0,61	13,2	2864	0,77	15,3	2630	0,81	20,3	3317
10	0,51	11,0	2854	0,92	20,7	2978	1,15	21,1	2428
11	0,76	15,4	2682	0,76	17,6	3065	0,80	16,1	2663
12	0,65	13,6	2769	0,6	15,6	3441	0,71	11,9	2218
13	0,54	10,7	2622	0,99	20,7	2767	0,83	19,1	3045
14	0,75	17,4	3070	1,08	20,7	2537	0,72	14,8	2720
15	0,53	10,7	2672	0,69	12,0	2302	0,01	21,0	2779
16	0,71	14,3	2665	0,56	11,2	2647	0,95	20,2	2814
17	0,48	10,8	2978	0,84	16,9	2663	0,8	19,9	3292
18	0,7	14,0	2647	0,85	18,3	2849	0,5	13,9	3679
19	0,89	14,5	2156	0,82	16,7	2695	0,9	17,7	2603
20	0,59	11,1	2490	1,3	21,1	2148	0,61	15,1	3276
21	0,88	18,2	2737	0,75	15,6	2753	0,95	17,9	2494
22	0,58	11,0	2510	0,6	12,2	2691	0,78	16,1	2732
23	0,85	16,8	2616	0,51	10,9	2828	0,69	12,6	2417
24	0,75	14,8	2612	0,57	12,7	2949	0,92	21,1	3035
25	0,62	10,3	2199	0,51	11,0	2854	0,78	17,0	2884
26	0,74	14,4	2575	0,65	13,0	2647	0,53	13,4	3346
27	0,63	10,6	2227	0,66	13,6	2727	0,53	11,1	2772
28	0,59	11,0	2467	0,52	10,3	2621	0,01	20,9	2766
29	0,76	12,8	2229	0,7	14,6	2760	0,61	11,1	2408
30	0,59	10,6	2378	0,76	14,6	2542	0,66	10,4	2085
31	0,64	10,2	2109	0,56	11,3	2670	0,66	12,6	2527
32	0,91	18,2	2647	0,67	13,0	2568	1,25	21,1	2234
33	0,71	17,3	3225	0,49	10,5	2836	0,56	12,3	2907
34	0,52	10,1	2570	0,74	13,2	2361	1,19	19,7	2191
35	0,57	12,0	2786	0,81	15,7	2565	0,01	16,4	2170
36	0,65	13,9	2830	0,67	12,5	2469	0,58	15,9	3628
37	0,8	17,1	2829	0,52	10,5	2672	0,65	17,6	3583
38	0,5	10,8	2859	0,58	12,8	2921	0,66	13,5	2707
39	0,71	15,1	2815	0,7	13,2	2496	0,77	17,6	3025

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
40	0,64	14,0	2895	0,85	17,7	2756	0,78	16,8	2850
41	0,53	11,5	2872	0,92	20,0	2877	0,57	13,5	3134
42	0,63	12,9	2710	0,74	15,1	2700	1,12	21,0	2481
43	0,6	12,2	2691	0,83	17,0	2711	0,66	12,4	2486
44	0,52	10,3	2621	1,15	21,0	2417	0,95	20,0	2786
45	0,66	12,7	2547	0,61	12,8	2777	0,75	14,6	2576
46	0,67	13,7	2706	0,54	11,1	2720	0,97	20,6	2811
47	0,58	10,5	2396	0,8	16,9	2796	0,64	13,2	2730
48	0,46	10,3	2963	0,68	13,1	2550	0,78	14,1	2392
49	0,54	12,7	3112	0,91	18,2	2647	1,31	20,0	2020
50	0,54	12,0	2941	0,45	10,7	3147	0,87	14,4	2190
51	0,54	11,4	2794	0,62	10,4	2220	0,48	10,2	2812
52	0,55	10,2	2454	0,56	11,7	2765	0,57	11,5	2670
53	0,65	11,0	2240	0,6	13,4	2956	0,99	19,2	2567
54	0,57	11,0	2554	0,6	11,7	2581	0,56	12,4	2930
55	0,75	12,6	2223	0,53	10,7	2672	0,92	20,6	2963
56	0,56	11,5	2718	0,66	13,9	2787	0,99	21,1	2821
57	0,65	11,6	2362	0,61	13,3	2885	0,73	17,9	3245
58	0,93	14,7	2092	0,55	13,9	3345	0,7	15,8	2987
59	0,75	11,8	2082	1,000	20,7	2739	0,54	11,3	2769
60	0,8	13,0	2151	0,77	16,4	2819	1,23	21,0	2259
61	0,76	12,1	2107	0,73	16,6	3009	0,57	11,1	2577
62	0,95	17,4	2424	0,52	12,6	3207	0,99	20,0	2674
63	0,99	18,7	2500	0,55	11,8	2839	0,55	11,9	2863
64	0,86	15,3	2354	0,61	10,8	2343	0,59	12,2	2737
65	0,74	13,7	2450	0,66	12,5	2506	0,62	12,8	2732
66	0,59	10,1	2266	0,95	19,1	2661	0,81	14,9	2434
67	0,63	12,1	2542	0,64	12,1	2502	0,86	18,8	2893
68	0,74	15,4	2754	1,09	19,0	2307	0,95	21,3	2967
69	0,8	16,2	2680	0,54	13,7	3358	0,91	19,9	2894
70	0,6	13,2	2912	0,82	16,9	2728	1,17	21,1	2387
71	0,63	13,0	2731	0,54	12,1	2965	0,69	14,5	2781
72	0,63	13,7	2878	0,91	19,4	2821	0,57	12,7	2949
73	0,62	13,4	2860	0,72	16,7	3070	0,75	16,4	2894
74	0,61	10,1	2191	0,55	10,7	2575	1,18	21,2	2378
75	0,7	15,2	2874	0,63	13,1	2752	0,79	16,6	2781
76	0,61	13,9	3016	0,53	12,2	3046	0,68	15,9	3094
77	0,55	11,1	2671	0,74	16,9	3022	0,7	14,5	2741
78	0,6	10,9	2404	0,52	10,7	2723	0,6	14,4	3176
79	0,71	14,5	2703	0,6	13,9	3066	0,73	11,2	2030

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
80	0,64	13,3	2750	0,69	13,6	2608	1,19	21,2	2358
81	0,58	10,8	2464	0,54	12,9	3161	0,62	12,0	2561
82	0,99	15,1	2019	0,68	16,0	3114	1,1	20,6	2478
83	0,59	12,9	2894	0,42	10,0	3151	0,01	21,1	2792
84	0,85	16,2	2522	0,45	11,3	3323	0,87	18,3	2784
85	0,89	15,3	2275	0,88	18,9	2842	0,7	18,3	3460
86	0,67	11,9	2351	0,62	13,3	2839	0,99	21,0	2807
87	0,76	14,9	2595	0,49	12,1	3268	0,55	10,8	2599
87				0,6	13,7	3022	0,78	16,8	2850
88				0,51	10,8	2803	0,48	10,5	2895
89				0,46	10,2	2935	1,11	21,0	2504
90				0,49	10,8	2917	0,74	16,0	2861
91				0,61	13,9	3016	0,95	18,4	2563
92				0,4	10,0	3309	1,05	19,8	2496
93				0,88	17,7	2662	0,65	11,2	2280
94				0,66	15,3	3068	0,68	13,1	2550
95				0,71	16,4	3057	1,14	21,1	2449
96				0,75	15,2	2682	0,67	12,9	2548
97				0,93	20,4	2903	0,65	12,0	2443
98				0,8	15,0	2481	0,67	10,7	2114
99				0,6	11,8	2603	0,8	12,3	2035
100				0,88	18,6	2797	0,99	19,3	2580
101				0,57	10,2	2368	0,92	16,8	2417
102				0,69	14,9	2858	0,91	15,2	2211
103				0,7	12,6	2382	0,63	10,8	2269
104				0,74	13,4	2396	0,91	16,1	2341
105				0,66	14,1	2827	0,58	10,7	2441
106				0,62	11,3	2412	0,57	12,0	2786
107				0,74	13,9	2486	0,7	12,7	2401
108				0,52	10,5	2672	0,91	20,4	2967
109				0,69	15,8	3030	0,57	13,7	3181
110				0,63	13,9	2920	0,8	15,6	2581
111				0,93	20,2	2875	0,85	18,0	2803
112				1,08	20,8	2549	0,83	17,8	2838
113				0,48	10,3	2840	1,22	21,1	2289
114				0,86	18,4	2831	0,87	20,4	3103
115				0,62	13,9	2967	1,09	19,9	2416
116				0,57	12,2	2833	0,69	12,6	2417
117				0,61	12,6	2734	0,88	19,3	2902
118				0,46	10,5	3021	1,13	21,2	2483
119				0,4	10,0	3309	0,73	15,0	2719

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
120				0,79	16,5	2764	0,58	11,3	2578
121				0,69	15,8	3030	0,48	10,0	2757
122				0,72	14,7	2702	0,7	16,8	3176
123				0,74	16,4	2933	0,79	16,5	2764
124				0,85	18,1	2818	0,69	15,1	2896
125				0,75	16,8	2964	0,62	12,6	2690
126				0,47	10,5	2957	0,66	15,0	3008
127				0,65	13,7	2789	0,7	13,8	2609
128				0,54	10,3	2524	1,12	21,1	2493
129				0,51	10,3	2673	0,55	10,5	2527
130				0,75	13,9	2453	0,8	18,3	3027
131				0,55	13,0	3128	1,08	18,8	2304
132				0,85	17,7	2756	1,05	21,2	2672
133				0,78	14,7	2494	0,88	19,3	2902
134				0,61	10,2	2213	0,49	11,4	3079
135				0,56	11,1	2623	0,77	14,3	2458
136				0,79	15,4	2580	0,59	11,8	2647
137				0,72	13,3	2445	0,5	11,4	3017
138				0,86	12,6	1939	0,57	10,0	2322
139				0,7	13,1	2477	0,94	19,9	2802
140				1,08	19,1	2340	0,44	12,6	3790
141				0,97	19,9	2715	0,48	10,0	2757
142				0,8	15,2	2514	0,69	14,5	2781
143				0,9	16,4	2412	0,58	12,6	2875
144				0,95	20,9	2912	0,68	13,5	2627
145				1,12	21,1	2493	1,09	21,0	2550
146				0,79	15,6	2613	0,98	21,0	2836
147				0,83	16,3	2599	0,77	15,5	2664
148				1,23	21,0	2259	0,75	17,3	3053
149				1,000	20,3	2687	0,56	12,0	2836
150				0,71	14,3	2665	0,56	12,1	2860
151				0,97	19,3	2633	0,75	14,0	2470
152				0,82	19,1	3083	1,19	20,7	2302
153				0,76	15,3	2664	0,73	14,9	2701
154				0,74	13,3	2379	0,79	14,6	2446
155				0,65	12,1	2464	0,01	21,0	2779
156				0,6	12,9	2845	1,09	21,2	2574
157				0,8	16,0	2647	0,68	11,9	2316
158				0,6	10,8	2382	0,86	16,1	2478
159				0,68	12,3	2394	0,53	11,2	2797

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
160				0,84	17,5	2757	0,77	14,2	2441
161				0,97	20,9	2851	0,75	14,2	2506
162				0,74	15,8	2826	0,7	10,8	2042
163				0,68	12,9	2511	0,65	12,9	2626
164				0,72	15,9	2923	1,12	21,1	2493
165				0,65	17,1	3482	0,46	10,3	2963
166				0,91	20,0	2909	0,57	12,9	2995
167				0,74	13,9	2486	0,59	12,1	2714
168				0,59	11,7	2624	0,73	12,8	2321
169				0,6	10,9	2404	1,07	21,0	2597
170				0,95	20,3	2828	0,53	10,5	2622
171				0,8	16,7	2763	0,76	13,4	2333
172				0,69	12,1	2321	0,01	20,0	2647
173							0,55	10,2	2454
174							0,72	16,5	3033
175							1,12	21,1	2493
176							0,65	15,1	3074
177							0,8	16,9	2796
178							0,69	13,7	2628
179							0,91	20,0	2909
180							0,65	14,4	2932

TABELA 23 - Valores de tensão de ruptura para a amostra 7.

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
1	0,86	15,7	2416	0,53	11,5	2872	0,87	19,5	2966
2	0,94	17,0	2393	1,2	21,1	2327	0,57	12,3	2856
3	0,64	12,9	2668	0,63	12,5	2626	0,81	15,3	2500
4	0,91	15,3	2225	0,8	16,6	2746	0,68	17,3	3367
5	0,53	10,1	2522	0,8	15,7	2597	0,82	16,6	2679
6	0,7	14,1	2666	0,79	15,4	2580	0,01	21,1	2792
7	0,9	16,9	2485	0,49	11,4	3079	1,1	20,9	2514
8	0,87	14,2	2160	0,95	19,0	2647	0,72	13,4	2463
9	0,66	10,7	2146	1,2	21,0	2316	0,75	16,1	2841
10	0,87	16,9	2571	0,83	18,0	2870	0,69	14,9	2858
11	0,75	12,5	2206	0,01	20,7	2739	0,8	16,0	2647
12	0,61	12,9	2799	0,87	18,5	2814	1,06	21,0	2622
13	0,62	11,6	2476	1,19	21,0	2335	0,75	15,9	2806
14	0,66	12,6	2527	0,8	16,3	2696	0,6	13,7	3022
15	1,11	20,9	2492	0,63	13,0	2731	0,95	18,3	2549
16	0,73	15,2	2756	1,1	20,9	2514	0,71	14,4	2684
17	0,66	12,9	2587	0,56	11,3	2670	0,85	16,2	2522
18	0,79	16,4	2747	0,71	13,7	2554	0,75	14,6	2576
19	0,7	13,6	2571	0,95	20,0	2786	0,71	16,3	3038
20	0,73	12,4	2248	0,77	17,7	3042	0,92	19,1	2748
21	0,71	16,3	3038	1,04	20,1	2558	0,75	12,5	2206
22	0,5	10,7	2832	0,8	15,3	2531	0,94	18,1	2548
23	0,49	11,9	3214	0,65	14,1	2871	0,75	16,7	2947
24	0,57	12,1	2809	0,62	13,8	2946	0,85	17,0	2647
25	0,4	10,4	3441	0,01	21,0	2779	0,57	12,4	2879
26	0,89	19,0	2825	0,01	20,5	2713	0,79	15,9	2664
27	0,51	13,0	3373	0,7	15,0	2836	1,15	21,0	2417
28	0,73	14,7	2665	0,79	18,6	3116	1,09	21,0	2550
29	0,56	10,1	2387	0,98	20,8	2809	0,89	17,6	2617
30	0,6	10,8	2382	0,77	15,5	2664	0,6	13,7	3022
31	0,69	13,6	2608	0,88	16,8	2527	0,52	11,0	2800
32	0,8	16,0	2647	0,65	14,1	2871	0,44	10,0	3008
33	0,75	16,9	2982	0,97	20,4	2783			
34	0,44	11,3	3399	1,09	20,9	2538			
35	0,49	10,3	2782	0,96	19,6	2702			
36	1,13	21,4	2506	0,79	15,5	2597			
37	0,54	12,9	3161	0,98	20,1	2714			
38	0,7	13,3	2514	0,71	14,1	2628			
39	0,82	15,4	2485	0,78	14,2	2409			

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
40	0,88	19,8	2978	0,49	10,3	2782			
41	0,85	17,7	2756	0,53	10,0	2497			
42	0,55	11,5	2767	0,79	16,1	2697			
43	0,92	18,1	2604	0,63	13,3	2794			
44	0,92	18,6	2676	0,58	11,1	2533			
45	0,57	12,4	2879	0,59	12,6	2826			
46	0,79	14,0	2345	0,53	10,9	2722			
47	0,79	15,3	2563	0,53	11,0	2747			
48	0,52	12,7	3232	0,97	19,5	2660			
49	0,51	13,4	3477						
50	0,01	19,2	2541						
51	0,91	18,7	2720						
52	0,78	14,3	2426						
53	0,96	17,2	2371						
54	0,01	19,7	2607						
55	0,9	17,8	2617						
56	0,77	15,5	2664						
57	0,61	11,1	2408						
58	0,77	15,0	2578						
59	0,75	12,2	2153						
60	0,58	10,8	2464						
61	0,6	12,7	2801						
62	0,73	13,0	2357						
63	0,98	18,3	2471						
64	0,59	11,2	2512						
65	0,86	16,0	2462						
66	0,7	15,5	2930						
67	0,85	15,5	2413						
68	0,77	16,2	2784						
69	0,7	13,4	2533						
70	0,88	17,1	2572						
71	0,59	12,8	2871						
72	0,48	10,4	2867						
73	0,77	12,6	2166						
74	0,86	17,6	2708						
75	0,99	19,6	2620						
76	0,71	13,8	2572						
77	0,51	11,4	2958						
78	0,64	11,7	2419						
79	0,59	11,3	2535						

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
80	0,95	18,3	2549						
81	0,61	11,1	2408						
82	0,55	10,2	2454						
83	0,58	12,4	2829						
84	0,69	13,2	2532						
85	1,12	20,9	2470						
86	0,54	11,5	2818						
87	0,86	15,2	2339						
88	0,53	12,4	3096						
89	0,54	10,4	2549						
90	0,83	16,0	2551						
91	0,61	13,7	2972						
92	0,88	18,2	2737						
93	0,82	15,1	2437						
94	0,71	12,3	2293						
95	0,65	12,6	2565						
96	0,51	11,1	2880						
97	0,6	13,1	2889						
98	0,58	13,0	2966						
99	0,73	14,2	2574						
100	0,42	10,3	3246						
101	0,7	14,5	2741						
102	0,01	21,2	2806						
103	0,7	15,1	2855						
104	0,74	14,0	2504						
105	0,65	13,3	2708						
106	0,65	13,9	2830						
107	0,9	19,5	2867						
108	0,54	11,6	2843						
109	0,79	17,3	2898						
110	0,93	21,4	3045						
111	0,52	12,9	3283						
112	0,01	20,6	2726						
113	0,58	11,4	2601						
114	0,59	13,8	3095						
115	0,56	10,2	2411						
116	0,59	14,9	3342						
117	0,99	21,3	2847						
118	0,45	11,4	3353						
119	0,69	16,7	3203						

continua

continuação

Corpo de Prova nº	Temperatura Ambiente			300°C			500°C		
	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)	Peso (mg)	Leitura (lb)	TR (MPa)
120	0,99	21,3	2847						
121	0,78	16,6	2816						
122	0,81	16,3	2663						
123	0,56	11,2	2647						
124	0,89	17,8	2647						
125	0,69	14,9	2858						
126	0,94	18,2	2562						
127	0,92	18,5	2661						
128	0,7	14,2	2685						
129	0,65	10,2	2077						
130	0,98	18,3	2471						
131	1,06	21,4	2672						
132	0,98	18,5	2498						
133	0,73	15,7	2846						
134	0,79	12,1	2027						
135	0,5	10,0	2647						
136	0,82	18,9	3050						
137	0,53	11,5	2872						
138	0,65	15,0	3054						
139	1,15	21,1	2428						
140	0,85	16,0	2491						
141	0,74	15,9	2844						
142	0,79	17,7	2965						
143	0,7	13,7	2590						
144	0,92	19,5	2805						
145	1,01	20,1	2634						
146	0,66	11,6	2326						
147	0,85	17,0	2647						
148	0,86	17,7	2724						
149	0,52	12,1	3079						
150	1,1	21,7	2611						
151	0,42	10,4	3277						
152	0,53	11,7	2922						