

**FÁBIO AUGUSTO DA SILVA SALVADOR**

**CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS E MINERALÓGICAS  
DOS FOLHELHOS OLEÍGENOS PIROBETUMINOSOS  
DE SÃO MATEUS DO SUL, PR, QUE INTERFEREM  
NA GERAÇÃO DE FINOS DE MINERAÇÃO**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Doutor em Engenharia.**

**Área de Concentração: Engenharia Mineral**

**Orientador: Helmut Born**

**SÃO PAULO**

**2001**

**A Luiza (*in memorian*).**

**A Generoso (*in memorian*).**

**A Rubens (*in memorian*).**

**Gênese de meu caráter e de minha felicidade.**

## AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, que subsidiou todos os trabalhos desta pesquisa.

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Helmut Born que, paciente e seguro, me acompanhou em todos os momentos.

Aos profissionais da PETROBRAS/SIX de São Mateus do Sul, principalmente a Rubens Novicki, Superintendente, ao Engenheiro João Carlos Winck, ao Geólogo Henrique Porto Alegre, ao Desenhista Carlos Carvalho e a todo o pessoal do campo, das máquinas e dos laboratórios, sempre atenciosos e interessados.

À equipe de pesquisadores do Instituto de Saneamento Ambiental da PUC/PR, primeiramente ao Prof. Dr. Carlos Garcias e ao Prof. Ms. Harry Bollmann, que me abriram as portas desta pesquisa. Aos amigos de todo o ISAM.

Aos professores Dr. José Manoel dos Reis Neto, do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, Dr. Thomas Fairchild, do Instituto de Geociências da USP, Dr. Pedro Kiyohara, do Instituto de Física da USP, com ricas intervenções na pesquisa.

Aos professores e colegas do Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A amigos que posso aqui não citar.

À minha família.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	vi
<b>ABSTRACT</b> .....	vii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	x
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	3
<b>3 A IMPORTÂNCIA DOS BETUMES E PIROBETUMES</b> .....	4
<b>3.1 Aspectos históricos</b> .....	4
<b>3.2 Os usos e a importância atual dos folhelhos oleígenos</b> .....	6
<b>3.3 O aproveitamento de folhelhos oleígenos no mundo</b> .....	9
<b>3.4 O aproveitamento dos folhelhos de São Mateus do Sul</b> .....	13
<b>3.5 Meio ambiente</b> .....	16
<b>4 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS</b> .....	18
<b>4.1 Situação geográfica e vias de acesso</b> .....	18
<b>4.2 Clima, solos e vegetação</b> .....	20
<b>4.3 Geologia regional</b> .....	26
<b>5 A NATUREZA DOS FOLHELHOS OLEÍGENOS</b> .....	29
<b>5.1 Folhelho. Aspectos gerais</b> .....	29
<b>5.2 Folhelhos oleígenos</b> .....	32
<b>5.3 Folhelhos oleígenos brasileiros</b> .....	34
<b>5.3.1 Folhelhos do Vale do Paraíba, SP</b> .....	35
<b>5.4 Folhelhos oleígenos do Subgrupo Irati</b> .....	36
<b>5.5 Propriedades tecnológicas do folhelho oleígeno</b> .....	39
<b>5.6 Mineralogia dos folhelhos oleígenos de São Mateus do Sul</b> .....	43
<b>6 DISTINÇÕES DO DEPÓSITO DE SÃO MATEUS DO SUL</b> .....	48
<b>6.1 Trabalhos de pesquisa prévios</b> .....	51
<b>6.2 Análise estatística dos dados de pesquisa</b> .....	57
<b>6.3 Amostragem</b> .....	67
<b>7 O SISTEMA DE MINERAÇÃO DA PETROBRAS/SIX</b> .....	72

<b>7.1 Lavra do folhelho oleígeno de São Mateus do Sul.....</b>	<b>73</b>
<b>7.2 Desmonte por explosivos e carregamento .....</b>	<b>75</b>
<b>7.3 Recomposição das áreas de lavra .....</b>	<b>80</b>
<b>7.4 Produtos da pirólise.....</b>	<b>84</b>
<b>8 OS FINOS DE MINERAÇÃO DO FOLHELHO OLEÍGENO.....</b>	<b>85</b>
<b>8.1 Aspectos macroscópicos das unidades constituintes do Subgrupo     Irati em São Mateus do Sul .....</b>	<b>88</b>
<b>8.2 Caracterização organo-sedimentar dos folhelhos oleígenos.....</b>	<b>93</b>
<b>8.3 Fósseis macroscópicos no folhelho .....</b>	<b>98</b>
<b>8.4 As argilas .....</b>	<b>101</b>
<b>9 OS SULFETOS E SUA INFLUÊNCIA NA DECOMPOSIÇÃO     DA ROCHA OLEÍGENA.....</b>	<b>106</b>
<b>9.1 A pirita, a marcassita e as transformações nos sulfetos.....</b>	<b>106</b>
<b>9.2 Cimentação.....</b>	<b>118</b>
<b>9.3 Óxidos e hidróxidos de ferro .....</b>	<b>120</b>
<b>10 CONCLUSÕES .....</b>	<b>123</b>
<b>11 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>127</b>
<b>ANEXO 1 - MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ.....</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE 1 - POSICIONAMENTO DAS AMOSTRAGENS     DA PESQUISA - PLANTA DE SITUAÇÃO DA MINA     DO PAIOL GRANDE.....</b>	<b>136</b>

## RESUMO

Folhelho oleífero pirobetuminoso é uma rocha sedimentar de natureza síltico/argilosa, portadora de um hidrocarboneto complexo designado querogênio. Tem características próprias de fissilidade e desenvolve em sua estrutura processos peculiares de alteração físico-química quando exposto ao intemperismo. A mineração de folhelho oleífero pirobetuminoso pela PETROBRAS/SIX em São Mateus do Sul, Paraná, visa obter óleo combustível e outros produtos, através da pirólise da rocha. A lavra a céu aberto extrai duas camadas sub-horizontais de material organo-sedimentar do Subgrupo Irati, do Neopermiano da Bacia do Paraná. Essas rochas, que ocupam uma área de cerca de um milhão de quilômetros quadrados, nos estados da Região Sul, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Goiás, dão ao Brasil um dos maiores recursos mundiais de óleo possível de ser obtido de rochas oleíferas. Um dos problemas do empreendimento está relacionado à geração de grande quantidade de rocha fragmentada e particulada em todas as áreas da mina, com decorrente perda de material oleífero que poderia ser aproveitado no processo de mineração. Com o objetivo de determinar as características geológicas e mineralógicas que influenciam a formação desses finos de mineração do folhelho, foram realizadas investigações de campo e análises químicas laboratoriais, através de mapeamentos de detalhe, amostragens e análises através de diversos procedimentos semi-quantitativos e qualitativos. Definiram-se padrões de fragmentação nas duas camadas oleíferas do depósito e suas relações com processos intempéricos. Além disso, em escala microscópica, pode-se constatar o conjunto de modificações mineralógicas que estabelecem as principais formas de alteração progressiva na estrutura da rocha. Com base nas alterações mineralógicas observadas, principalmente nos sulfetos encontrados, por considerar-se primordial sua influência na fragmentação da rocha, foram sugeridos estudos mais aprofundados de mineralogia de sulfetos, sulfatos, carbonatos e óxidos de ferro, para se poder minimizar os problemas relacionados à geração de finos. Além disso, considera-se relevante o aprofundamento das investigações da geoquímica e micropaleontologia para a compreensão dos paleoambientes de sedimentação do Neopermiano e processos sedimentares associados à formação da rocha e do querogênio.

## ABSTRACT

Pyrobituminous oil shales from the Irati Subgroup of the Paraná Basin are being mined by PETROBRAS and processed by the PETROSIX technology in semi-industrial scale at São Mateus do Sul, Paraná State, Brazil, since 1972. Two sub-horizontal shale layers, 6 m and 2.5 m thick, separated by limestone and siltstone beds, are being mined in a 65 km<sup>2</sup> area by open pit methods. Oil, gas, sulfur and several other clay by-products are obtained. Immediately after soil and overburden are removed, the shales undergo a rapid degradation process, mainly splintering and fracturing, which result in significant amounts of fine particles during blasting, crushing, drying and handling stages. As particles under 11 mm can not be fed to the retorts, the elimination of the fine fraction which sometimes amounts to about 20% of the material, results in significant oil losses. This fraction, however, may be employed for energetic purposes in other facilities, and possibly for other uses, as ceramics. The causes of the physical decay of the shales have never been investigated in detail. This contribution presents the results of mineralogical, geological and terrain morphology studies in the mine to explain the causes and mechanisms involved in fine particles generation, which will be of practical use for mine planning purposes in new oil shale extraction areas.

## LISTA DE TABELAS

1	CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS DOS PRINCIPAIS FOLHELHOS OLEÍGENOS NO MUNDO (PORCENTAGENS EM PESO) (Hukai e Kumoto, 1981).....	11
2	RECURSOS MUNDIAIS DE ÓLEO DE FOLHELHO OLEÍGENO, EM MILHÕES DE BARRIS DE ÓLEO (MOREIRA, 1978) .....	34
3	ANÁLISE QUÍMICA DE AMOSTRAS DOS FOLHELHOS GREEN RIVER (EUA) E DO VALE DO PARAÍBA (SP) (CIOLA R. E ELIAS M. J., 1981).....	36
4	DADOS SOBRE AS RESERVAS DO SUBGRUPO IRATI (BRUNI, 1976).....	37
5	RESERVAS E RECURSOS NO FOLHELHO OLEÍGENO PIROBETUMINOSO DE SÃO MATEUS DO SUL (PETROBRAS, 1995), MOSTRANDO VARIAÇÕES EM RELAÇÃO À TABELA ANTERIOR.....	37
6	COMPOSIÇÃO MÉDIA DOS FOLHELHOS OLEÍGENOS DE SÃO MATEUS DO SUL.....	37
7	CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DOS ELEMENTOS TRAÇO NO FOLHELHO OLEÍGENO DE SÃO MATEUS DO SUL (GROSSI SAD, 1984) .....	38
8	ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS ÓLEOS COMBUSTÍVEIS E, W E L, PRODUZIDOS PELA PETROBRAS/SIX, EM SÃO MATEUS DO SUL, PARANÁ, A PARTIR DO FOLHELHO OLEÍGENO PIROBETUMINOSO .....	39
9	VALORES PERCENTUAIS ENCONTRADOS NA COMPOSIÇÃO DO FOLHELHO PIROBETUMINOSO DE SÃO MATEUS DO SUL (ABREU, 1973) .....	39
10	MINERALOGIA DO FOLHELHO OLEÍGENO PIROBETUMINOSO DE SÃO MATEUS DO SUL (WOLF; CORRÊA DA SILVA, 1974).....	43
11	MINERALOGIA DO FOLHELHO OLEÍGENO PIROBETUMINOSO (GROSSI SAD, 1984).....	43
12	COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA EM TRÊS NÍVEIS DAS DUAS CAMADAS DE ROCHA OLEÍGENA - PORCENTAGEM EM PESO. (GROSSI SAD, 1984) .....	44
13	MINERAIS ENCONTRADOS NESTA PESQUISA EM ANÁLISES POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X, EM AMOSTRAS DAS CAMADAS SUPERIOR E INFERIOR DE MINÉRIO.....	44
14	TEORES DE ÓLEO OBTIDOS POR ENSAIO FISCHER MODIFICADO, EM AMOSTRAS SUCESSIVAS DAS DUAS CAMADAS DE MINÉRIO.....	49
15	EXEMPLO DE ESCALA DE GRAU DE FRATURAMENTO ADOTADO PELA GEOSOL (GROSSI SAD, 1983).....	53
16	EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DA ESCALA DE GRAU DE FRATURAMENTO NO FURO 2050/1000 DE PROSPECÇÃO DO DEPÓSITO DE FOLHELHOS DE SÃO MATEUS DO SUL .....	53
17	COMPARAÇÃO ENTRE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DAS ROCHAS CLASSIFICADAS COMO DE GRAUS 2 E 3 .....	54
18	CARACTERIZAÇÃO DE NÍVEIS DE DECOMPOSIÇÃO OBSERVADOS NAS ROCHAS OLEÍGENAS DE SÃO MATEUS DO SUL (GROSSI SAD, 1983) .....	55

19 ANÁLISES QUÍMICAS DE AMOSTRAS CATEGORIZADAS DO FOLHELHO OLEÍGENO, EM FUNÇÃO DE SEU NÍVEL DE DECOMPOSIÇÃO .....	56
20 RESULTADOS DA ANÁLISE DE CORRELAÇÃO ENTRE TEORES DE ÓLEO E ENXOFRE E ESPESSURAS NAS DUAS CAMADAS DE FOLHELHO .....	58
21 ALGUNS FÓSSEIS DESCRITOS COMO TÍPICOS DO SUBGRUPO IRATI .....	99
22 PRINCIPAIS MESOSSAURÍDEOS DESCRITOS .....	100
23 PRINCIPAIS ARGILO-MINERAIS E SEUS PERCENTUAIS DE EXPANSIBILIDADE RELATIVA.....	104
24 TEORES E RELAÇÕES PERCENTUAIS ENTRE ENXOFRE PIRÍTICO E ENXOFRE TOTAL NO DEPÓSITO.....	117
25 ANÁLISE QUANTITATIVA DA COMPOSIÇÃO DE AMOSTRA DE CALCITA OBTIDA EM NÍVEL CONCORDANTE AO ACAMAMENTO .....	120
26 TEORES DE FERRO TOTAL (% EM PESO) E RELAÇÃO PERCENTUAL COM O ENXOFRE PIRÍTICO ENCONTRADO EM AMOSTRAS DE DIVERSOS PONTOS DO DEPÓSITO DE FOLHELHO .....	122

## LISTA DE FIGURAS

1	A OSCILAÇÃO DOS PREÇOS INTERNACIONAIS DO BARRIL DE PETRÓLEO NOS ÚLTIMOS TRINTA ANOS.....	8
2	VISTA AÉREA DA USINA DE BENEFICIAMENTO DE STUART, EM GLADSTONE, QUEENSLAND, AUSTRALIA, EM AGOSTO DE 1998.....	12
3	ESQUEMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO DE MINERAÇÃO DA PETROBRAS/SIX EM SÃO MATEUS DO SUL E O INCREMENTO DOS PNEUS REAPROVEITADOS NA RETORTA (PETROBRAS, 1999).....	15
3	DISTRIBUIÇÃO DOS FOLHELHOS DO SUBGRUPO IRATI NOS ESTADOS DE SÃO PAULO, PARANÁ, SANTA CATARINA E RIO GRANDE DO SUL, COM INDICAÇÃO DE ONDE FORAM ESTIMADAS RESERVAS (PADULA, 1979). ESCALA APROXIMADA 1: 10.000.000.....	18
5	PERSPECTIVA REGIONAL, MOSTRANDO AS VIAS DE ACESSO AO MUNICÍPIO DE SÃO MATEUS DO SUL (ESCALA APROXIMADA DE 1: 2500000).....	19
6	VISTA AÉREA DAS INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DA PETROBRAS/SIX EM SÃO MATEUS DO SUL.....	20
7	VARIAÇÃO MENSAL DA PRECIPITAÇÃO E DA TEMPERATURA EM SÃO MATEUS DO SUL, EM MEDIÇÕES FEITAS NA PETROBRAS/SIX DURANTE OS ANOS DE 1998, 1999 E 2000.....	21
8	VARIAÇÕES DAS MÉDIAS DE TEMPERATURAS MÁXIMA E MÍNIMA NOS ANOS DE 1998, 1999 E 2000 EM SÃO MATEUS DO SUL.....	21
9	VARIAÇÕES DAS MÉDIAS MENSAIS DA UMIDADE DO AR NOS ANOS DE 1998 E 1999 EM SÃO MATEUS DO SUL.....	22
10	DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA DE VENTOS, EM OBSERVAÇÕES REALIZADAS ENTRE OS ANOS DE 1961 A 1972 (FUJITA, 1978).....	23
11	PERFIL ESQUEMÁTICO DO SOLO DA REGIÃO DE SÃO MATEUS DO SUL, SOBRE ROCHAS DO SUBGRUPO IRATI. (KAVALERIDZ, 1978).....	24
12	ASPECTO DE REPRESENTANTES DA MATA NATIVA DA REGIÃO DE SÃO MATEUS DO SUL, COM O PINHEIRO-DO-PARANÁ (ARAUCÁRIA ANGUSTIFOLIA) INDICADO.....	25
13	VISTA GERAL DA REGIÃO ESTUDADA, MOSTRANDO ASPECTOS DA VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA ATUAL, ABUNDANTE EM BRACATINGAS.....	25
14	MAPA DA SITUAÇÃO DA MINA UPI (PORTO ALEGRE, 1995).....	26
15	QUADRO COM A SUBDIVISÃO ESTRATIGRÁFICA DA FORMAÇÃO IRATI (BIGARELLA, 1972).....	27

16 QUADRO COM A SUBDIVISÃO DO SUBGRUPO IRATI DE HACHIRO, 1996, SIMPLIFICADA .....	28
17 QUADRO COM A SEQÜÊNCIA DE TRANSFORMAÇÃO DE SEDIMENTOS, DE LAMA À ROCHA METAMÓRFICA XISTO, DISTINTA DA ROCHA SEDIMENTAR FOLHELHO .....	29
18 ESQUEMA DO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DE UM FOLHELHO .....	30
19 DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS DEPÓSITOS DE FOLHELHO OLEÍGENO NO BRASIL (PETROBRAS, 1995) .....	35
20 GRÁFICO COM AS TEMPERATURAS DE LIBERAÇÃO DO ÓLEO NA CAMADA SUPERIOR .....	40
21 GRÁFICO COM TEMPERATURAS DE LIBERAÇÃO DE ÓLEO NA CAMADA INFERIOR .....	41
22 GRÁFICO COM AS TEMPERATURAS DE LIBERAÇÃO DE ÓLEO EM PORÇÕES DA CAMADA SUPERIOR .....	42
23 NÓDULOS DE SÍLEX EVIDENTES EM ABUNDÂNCIA NO TOPO DA CAMADA INFERIOR DE FOLHELHO .....	45
24 CRISTAIS DE QUARTZO BIPIRAMIDAIIS HEXAGONAIS, OBSERVADOS EM MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA. AMOSTRA DO TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO .....	46
25 ASPECTOS OBSERVADOS EM NÍVEIS DE CALCITA CONCORDANTES AO ACAMAMENTO DO FOLHELHO DA CAMADA SUPERIOR DO DEPÓSITO DE SÃO MATEUS DO SUL, EM MICROSCOPIA ÓTICA .....	47
26 ASPECTO DO DESLOCAMENTO DAS CAMADAS DO CONTATO ENTRE OS SEDIMENTOS DA FORMAÇÃO SERRA ALTA E OS SEDIMENTOS OLEÍGENOS DO TOPO DA CAMADA SUPERIOR DO SUBGRUPO IRATI NO PLANO DE FALHA E - W, NO EXTREMO NORTE DA ÁREA DA MINA .....	50
27 VISTA DO NÍVEL DE CALCÁRIO CHARACTERSTICAMENTE DISPOSTO NO CONTATO ENTRE A CAMADA SUPERIOR DE FOLHELHO E O TOPO DA CAMADA INTERMEDIÁRIA, JUNTAMENTE COM INTERESTRATIFI- CAÇÕES DE FOLHELHO/MARGA DOLOMÍTICA .....	51
28 RESULTADOS ESTATÍSTICOS OBTIDOS A PARTIR DOS DADOS DE PESQUISA SOBRE TEORES DE ÓLEO NO MINÉRIO DE SÃO MATEUS DO SUL .....	59
29 RESULTADOS ESTATÍSTICOS OBTIDOS A PARTIR DOS DADOS DE PESQUISA SOBRE TEORES DE ENXOFRE NO MINÉRIO DE SÃO MATEUS DO SUL .....	60
30 ISOTEORES DE ÓLEO NA CAMADA SUPERIOR DO FOLHELHO .....	61

31 ISOTEORES DE ÓLEO NA CAMADA INFERIOR DE FOLHELHO.....	61
32 ISOTEORES DE ENXOFRE NA CAMADA SUPERIOR DE FOLHELHO .....	62
33 ISOTEORES DE ENXOFRE NA CAMADA INFERIOR DE FOLHELHO .....	62
34 EXPOSIÇÃO DE PERFIL COMPLETO DO DEPÓSITO SEDIMENTAR LAVRADO EM SÃO MATEUS DO SUL .....	64
35 PERFIL TÍPICO DE UM CORTE DO DEPÓSITO DE SÃO MATEUS DO SUL.....	66
36 CONFIGURAÇÃO ESPACIAL ORIGINAL DO TOPO DAS CAMADAS DE MINÉRIO .....	67
37 TESTEMUNHOS DE SONDAGEM ALTERADOS DE FORMA DIFERENCIADA PELO INTEMPERISMO .....	68
38 SEQÜÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO OS PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DE AMOSTRAS CONTÍNUAS NAS PAREDES DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO .....	70
39 CANAL DE AMOSTRAGEM ESCAVADO NA CAMADA INFERIOR DE MINÉRIO, COM DIMENSÕES DE 20CM DE LARGURA, 10CM DE PROFUNDIDADE E 3M DE COMPRIMENTO .....	71
40 ESQUEMA REPRESENTATIVO DO SISTEMA DE LAVRA DA PETROBRAS/SIX .....	72
41 PERSPECTIVA A DISTÂNCIA DA PERFURAÇÃO PREPARATÓRIA PARA A DETONAÇÃO NA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO .....	73
42 LAVRA DE FOLHELHO OLEÍGENO, MOSTRANDO AO FUNDO A ESCAVATRIZ MARION E O PROCEDIMENTO DE CARREGAMENTO DOS CAMINHÕES DE MINÉRIO.....	74
43 ASPECTO DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO, FRAGMENTADA APÓS DETONAÇÃO POR EXPLOSIVOS .....	75
44 CARREGAMENTO DO MINÉRIO DA CAMADA SUPERIOR DO DEPÓSITO.....	76
45 VISTA DO TRÁFEGO DE CAMINHÕES FORA DE ESTRADA QUE TRANSPORTAM MINÉRIO E RECOLOCAM O FOLHELHO PIROLISADO NAS ESCAVAÇÕES NA MINA DE SÃO MATEUS DO SUL.....	76
46 PILHA E MINÉRIO JÁ BRITADO, PRONTO PARA SER ENCAMINHADO POR ESTEIRAS A ALIMENTAÇÃO DA RETORTA .....	77
47 VISTA DO TRECHO ENCAPSULADO DO CIRCUITO DE BRITAGEM E TRANSPORTE POR CORREIAS, ATÉ PRÓXIMO AO CARREGAMENTO DA RETORTA.....	77
48 UNIDADE DE RETORTAGEM DO MÓDULO INDUSTRIAL DA PETROBRAS/SIX EM SÃO MATEUS DO SUL.....	78

49 ASPECTO DA PLANTA COMERCIAL (MÓDULO INDUSTRIAL) INSTALADO PELA PETROBRAS/SIX PARA A EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE FOLHELHO EM SÃO MATEUS DO SUL .....	79
50 PILHAS DE MATERIAL JÁ RETORTADO (RESÍDUOS DO PROCESSO DE PIRÓLISE), EMPREGADO PARA RECOMPOSIÇÃO DAS ESCAVAÇÕES DA LAVRA DE FOLHELHO OLEÍGENO .....	81
51 PRODUTOS E SUBPRODUTOS DO FOLHELHO OLEÍGENO .....	82
52 FLUXOGRAMA DA EXTRAÇÃO E DO PROCESSAMENTO DO FOLHELHO DE SÃO MATEUS DO SUL, PR .....	83
53 VISTA DO PÁTIO DE ESTOCAGEM DO ENXOFRE PRODUZIDO COMO SUBPRODUTO DA EXTRAÇÃO DE ÓLEO COMBUSTÍVEL DO FOLHELHO OLEÍGENO .....	84
54 AS FRENTES DE LAVRA ABANDONADAS CONTINUAM A SER FONTE DE MATERIAL PARTICULADO, RETIRADO DE PAREDÕES DE ROCHA POR AÇÃO DO INTEMPERISMO E DEPOSITADOS POR AÇÃO DA GRAVIDADE NO AMBIENTE .....	85
55 ASPECTO GERAL DE FRENTE DE LAVRA DA MINA DE FOLHELHO OLEÍGENO DE SÃO MATEUS DO SUL .....	86
56 VISTA DE UMA DAS FRENTES DE LAVRA DE FOLHELHO OLEÍGENO .....	87
57 INTERCRESCIMENTO ENTRE FRAÇÕES SILICÁTICAS E CARBONÁTICAS DO FOLHELHO, JUNTO A FAIXA DE CONTATO INFERIOR DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO .....	89
58 ASPECTO DO DESPLAQUEAMENTO TÍPICO DOS FOLHELHOS .....	89
59 ASPECTO DO FOLHELHO ALTERADO DA CAMADA INFERIOR, ADJACENTE AO SILTITO DA CAMADA INTERMEDIÁRIA, EM AMOSTRA EXPOSTA AO INTEMPERISMO POR MAIS DE TRINTA DIAS, MOSTRANDO A TÍPICA ALTERAÇÃO EM FORMA DE FLOCOS DO MINÉRIO DE MAIS ALTO TEOR NA JAZIDA .....	90
60 LASCAS CORTANTES PRODUZIDAS PELA FRAGMENTAÇÃO DE FOLHELHO OLEÍGENO DA PORÇÃO MÉDIA DA CAMADA INFERIOR OLEÍGENA, TÍPICAS DO FOLHELHO MAIS RESISTENTE E TENAZ DO DEPÓSITO .....	91
61 DOIS ASPECTOS DISTINTOS DOS RESULTADOS DOS PROCESSOS DE INTEMPERISMO SOBRE OS FOLHELHOS OLEÍGENOS DE SÃO MATEUS DO SUL (CAMADA SUPERIOR) .....	92
62 IMAGEM DE COLÔNIA DE ALGA AZUL BOTRYOCOCCUS BRAUNII (PALMER, 1962), EM AMPLIAÇÃO APROXIMADA DE 2000 VEZES, MOSTRANDO ESTRUTURAS SEM NÚCLEO E FLAGELOS .....	94

63	IMAGEM MICROSCÓPICA DE SECÇÃO ESTRATIGRÁFICA DO FOLHELHO OLEÍGENO DE S. MATEUS DO SUL, DE AMOSTRA RETIRADA DO TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO, EXIBINDO ESTRUTURA ORGANÓIDE COM QUEROGÊNIO .....	95
64	DETALHE DA IMAGEM MICROSCÓPICA ANTERIOR DE SECÇÃO ESTRATIGRÁFICA DO FOLHELHO OLEÍGENO DE S. MATEUS DO SUL, EXIBINDO O ENCLAUSURAMENTO DE MASSAS DE QUEROGÊNIO.....	95
65	OÓIDE ORGÂNICO PRESERVANDO ESTRUTURA NUCLEADA, OBSERVADA EM AMOSTRA RETIRADA DO TOPO DA CAMADA INFERIOR DE MINÉRIO.....	96
66	OUTRO ASPECTO DAS ESTRUTURAS ORGÂNICAS CIRCULARES AGRUPADAS, SEMELHANTES A COLÔNIAS DE BOTRYOCOCCUS, ENCONTRADAS EM AMOSTRA DA PORÇÃO INTERMEDIÁRIA DA CAMADA INFERIOR DO MINÉRIO .....	96
67	OÓIDES ORGÂNICOS EM AGRUPAMENTOS, COM ESTRUTURA NUCLEADAS, EM AMOSTRA RETIRADA DO TOPO DA CAMADA INFERIOR DE MINÉRIO, SEMELHANTES A COLÔNIAS DE BOTRYOCOCCUS.....	97
68	OUTRO ASPECTO DA ESTRUTURA DO QUEROGÊNIO, IMERSO COMO MASSA DISFORME NA MATRIZ DO FOLHELHO OLEÍGENO DA PORÇÃO INTERMEDIÁRIA DA CAMADA INFERIOR DO MINÉRIO .....	97
69	ASPECTO DE DOIS EXEMPLARES INCOMPLETOS DE FÓSSIL DE MESOSAURÍDEO ENCONTRADOS NA CAMADA SUPERIOR DE FOLHELHO OLEÍGENO, UM DELES (A) INCOMUM POR ESTAR NA REGIÃO DE CONTATO INFERIOR DO ESTRATO, ADJACENTE À ROCHA CARBONÁTICA .....	100
70	MESOSAURUS BRASILIENSIS (1908, J. H. MCGREGOR) .....	101
71	ESTRUTURA DO CRISTAL DE ILLITA .....	102
72	FOTOMICROGRAFIA E CORRESPONDENTE ANÁLISE POR MICROSSONDA DE RAIOS-X DE FRAGMENTO DE FOLHELHO OLEÍGENO PIROBETUMINOSO EXIBINDO ESTRUTURA ALVEOLIFORME DOS MINERAIS DE ARGILA .....	103
73	CRISTAIS DE CAOLINITA AMPLIADOS CERCA DE 1000X.....	103
74	INDICAÇÃO DE UM DOS NÍVEIS DE ARGILA BENTONÍTICA QUE OCORREM NA CAMADA SUPERIOR DE FOLHELHO OLEÍGENO QUE, NESTA SITUAÇÃO SE APRESENTAVA COM COLORAÇÃO INCOMUMENTE CLARA .....	104
75	FOTOMICROGRAFIA DE FRAGMENTO DE FOLHELHO OLEÍGENO E CORRESPONDENTE ANÁLISE POR MICROSSONDA DE MICROSSONDA DE RAIOS-X, EXIBINDO AGLOMERADO DE CRISTAIS DE PIRITA E INÍCIO DE PROCESSOS DE ALTERAÇÃO QUÍMICA.....	108

76 DETALHE DA FOTOMICROGRAFIA ANTERIOR, MOSTRANDO OS CRISTAIS DE PIRITA E OS PRIMEIROS SULFATOS DE CÁLCIO/GIPSITA .....	109
77 OS MINERAIS RESULTANTES DA ALTERAÇÃO DA PIRITA MOSTRAM VARIAÇÃO DE VOLUME EM RELAÇÃO AOS CRISTAIS PRIMÁRIOS.....	110
78 DETALHE DOS CRISTAIS DE SULFATO E CORRESPONDENTE ANÁLISE POR MICROSSONDA DE RAIOS-X.....	111
79 ASPECTO DE UM CRISTAL DE PIRITA PARCIALMENTE ALTERADO, COM ARESTA INICIANDO PROCESSO DE ALTERAÇÃO PARA FORMAÇÃO DE SULFATO SECUNDÁRIO .....	112
80 CRISTAIS AGLOMERADOS, EM ESTRUTURA FRAMBOIDAL TÍPICA DA MARCASSITA, (FES <sub>2</sub> ), OBSERVADA ATRAVÉS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA (COM CORRESPONDENTE ANÁLISE POR MICROSSONDA DE RAIOS-X) EM PLANOS DE FRATURA DISCORDANTES DO ACAMAMENTO DA ROCHA .....	113
81 IMAGEM OBTIDA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA, COM CORRESPONDENTE ANÁLISE POR MICROSSONDA DE RAIOS-X, MOSTRANDO AGRUPAMENTO DE CRISTAIS DE MARCASSITA E SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA BEM DISCRIMINADA .....	114
82 FACES CRISTALINAS DE MARCASSITA PRESENTE EM AMOSTRAS DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO, EM PLANOS DE ACAMAMENTO. INDICA-SE A PRESENÇA DE CALCITA .....	115
83 CRISTAIS DE GIPSITA SECUNDÁRIA FORMANDO-SE EM ARESTAS DE CRISTAIS DE SULFETO DE FERRO .....	116
84 TEXTURA E CRISTALIZAÇÃO DIFERENCIADA DAS CALCITAS DISCORDANTES EM PLANO DE FALHA (1) E CONCORDANTES AO ACAMAMENTO (2) .....	119
85 ÁGUAS DE LIXIVIAÇÃO NAS BASES DAS PILHAS DE MATERIAL RETORTADO RECOLOCADO NA ÁREA DE LAVRA (SUL DA MINA), MOSTRANDO, PELA COLORAÇÃO CARACTERÍSTICA, DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÓXIDOS DE FERRO EM SUSPENSÃO.....	121

## 1 INTRODUÇÃO

Folhelho oleífero pirobetuminoso é uma rocha sedimentar, de granulometria extremamente fina e caracterizada por sua pronunciada fissilidade em planos paralelos ao acamamento. Contém hidrocarbonetos fósseis sob a forma de um pirobetume denominado querogênio sendo usado em algumas partes do mundo como fonte de energia, pelo emprego do óleo que se forma a partir da pirólise da rocha.

A PETROBRAS/SIX, Superintendência da Industrialização do Xisto, recentemente nomeada Unidade de Negócio da Industrialização do Xisto<sup>1</sup>, extrai e beneficia folhelho em São Mateus do Sul, no estado do Paraná, aproveitando rochas de duas camadas oleíferas sub-horizontalizadas do Subgrupo Irati (HACHIRO, 1996) da Bacia do Paraná, com cerca de seis metros de espessura na camada superior e dois metros e meio na inferior.

Esse minério<sup>2</sup> brasileiro, usualmente chamado de "xisto", tem baixos teores, se comparado com os demais folhelhos explorados no mundo. Em São Mateus do Sul, rochas contendo em média 9% de óleo são enviadas por caminhões para processamento, após lavra a céu aberto em tiras. O material é submetido a redução granulométrica por britagem, sendo então transportado para alimentação de uma retorta, onde a pirólise a cerca de 400°C provoca gaseificação do querogênio. O processo leva à recuperação do óleo combustível e dos subprodutos, enquanto a parte sólida restante retorna para recomposição das áreas lavradas e a água de retortagem é contida ou reaproveitada.

O óleo combustível produzido pelo beneficiamento do folhelho de São Mateus do Sul tem qualidade muito próxima ao do obtido a partir do petróleo convencional, sendo uma real alternativa energética ao petróleo bruto. As dificuldades para produção em escala maior residem na equiparação de preços com o petróleo, controle ambiental e retomada de pesquisas básicas sobre a geologia dos depósitos, aprimorando conhecimentos e controles sobre os produtos e os rejeitos no sistema de mineração.

---

<sup>1</sup>Apesar do novo nome da empresa, a marca PETROBRAS/SIX continua sendo plenamente empregada.

<sup>2</sup>O termo minério será aqui utilizado no sentido amplo, para se referir a qualquer material mineral economicamente aproveitável, no caso as duas camadas de folhelho oleífero pirobetuminoso.

Da extração diária de sete mil e oitocentas toneladas de minério ao beneficiamento, o folhelho decompõe-se rapidamente, característica comum a esse tipo de rocha sedimentar, o que leva à geração de aproximadamente mil e quinhentas toneladas diárias de rocha fragmentada, sem aproveitamento em granulometria imprópria para a pirólise. Essa geração de finos de mineração implica em perdas de produtividade no processamento e acumulações de material particulado distribuídos pelas circunvizinhanças da mina, nos terrenos vizinhos e através das redes de drenagem.

## 2 OBJETIVOS

Esta pesquisa teve por objetivo identificar as características geológicas do minério oleífero de São Mateus do Sul que concorrem para as causas dos fenômenos relacionados com a rápida degradação do folhelho portador de querogênio e decorrente geração de finos de mineração.

Além da importância dos resultados da investigação para o aprimoramento das técnicas de lavra e tratamento da matéria prima, como fonte de óleo ou outros importantes subprodutos, a caracterização da rocha sob a perspectiva dos fenômenos causadores da formação dos finos ampliará o conhecimento sobre a natureza dos diversos materiais dispostos como resíduos de mineração. As novas informações obtidas sobre a geologia e paleontologia do depósito servirão também para análises sobre os paleoambientes e processos sedimentares do Permiano Superior.

### 3 A IMPORTÂNCIA DOS BETUMES E PIROBETUMES

Betume é uma mistura natural de substâncias resultantes da decomposição de matéria orgânica; contém principalmente hidrocarbonetos e produtos mais ou menos oxidados e é solúvel. Já folhelho pirobetuminoso é a designação dada a rochas sedimentares contendo substâncias ricas em hidrocarbonetos de grandes moléculas chamados querogênios, que são decompostas por ação de calor. Segundo ABREU (1962), querogênio, quando destilado e não pirolisado, fornece um petróleo escuro, pesado e de natureza asfáltica.

#### 3.1 Aspectos Históricos

Os humanos já usavam petróleo e betume nos primórdios da civilização. Caçadores pré-históricos usavam o betume em suas pontas de flechas e tochas e os antigos curandeiros administravam óleo como laxativo e pomada. Os primeiros navegantes usavam o betume como impermeabilizante de seus barcos e artistas primitivos empregavam esse material para impressões em madrepérola e lápis lázuli. Evidências recentes indicam que o betume foi comercializado através do Golfo Pérsico antes do fim do quinto século antes de Cristo, época em que locais que exibiam autocombustão e chamas perenes eram objeto de adoração supersticiosa. (BIKALDI, 1994).

Ainda segundo BIKALDI (1994), há na Bíblia referências sobre os Nebaioth, antigo povo árabe conhecido como Nabateanos e que eram referidos como os "homens de óleo do Mar Morto". Viviam há cerca de quatrocentos anos antes de Cristo onde hoje se situa a Jordânia, noroeste da Arábia Saudita e Síria. Fundamentaram as grandes riquezas de seu reino na indústria do betume, que só veio a declinar após a morte de Alexandre, o Grande. Exportavam seu betume para Petra e daí para a litorânea Gaza, onde era embarcado para Alexandria, costa do Mediterrâneo e Egito.

No quarto século antes de Cristo, as importações de betume do Egito eram muito grandes, pois a substância era o principal ingrediente do ritual da mumificação (OIL SHALE, 2001).

Sabe-se que a indústria do petróleo é um fenômeno do século XX, e certamente mais óleo é usado atualmente, em apenas um dia, do que todo aquele que fora usado na antigüidade, mas existiram verdadeiras indústrias de óleo no antigo Oriente Médio e áreas vizinhas, empregando um grande número de pessoas, fazendo produtos padronizados e que tiveram implicações econômicas e políticas determinantes na época. Os sumérios, assírios e babilônios usaram betume e fragmentos de rochas oleíferas, como fonte de luz e energia no desenvolvimento de importantes cidades, em uma escala muito ampla.

Plantas industriais de pequeno porte, desenvolvidas na Europa para extração de óleo de folhelho operavam no século dezenove na Europa, África, Ásia e Austrália. A China chegou a produzir cerca de quarenta mil barris de óleo por dia por alguns anos seguidos. O folhelho oleífero era aquecido diretamente em residências e pequenas indústrias (YOUNGQUIST, 1998).

A Suécia e a Escócia produziram de quinhentos a setecentos mil barris por ano cada um, até 1962 (DUNCAN AND SWANSON, 1965).

Roberto Oscar Angewitz foi o pioneiro brasileiro na extração e beneficiamento do folhelho oleífero. Segundo ele próprio (CONTI, 1991), "no início do ano de 1932, foi instalada uma pequena indústria extrativa do xisto betuminoso em São Mateus do Sul..." "No Brasil já houveram diversas empresas, entretanto, fracassaram por deficiência técnica ou por ordem financeira..." "Naquela época o óleo pesado não tinha valor... e para continuar a sobreviver era necessário extrair dele gasolina, querosene, diesel, solventes, benzina (o enxofre era eliminado), sulfato de amônia ou água moniacal fertilizante era distribuído gratuitamente; quanto ao óleo pesado era reduzido a pixe, mineral, betume sólido e no final carvão Gok."

Ainda segundo seus relatos: "Por volta de 1941, em plena guerra, com a dificuldade em adquirir chapas de ferro material de solda, etc., o processo ficou encostado..."

"A indústria era modesta, sofrendo incompreensões, porém tinha base sólida e vida própria. Por volta de 1943, foi encampada pelo governo federal e nossas pretensões foram por terra. Um engenheiro foi nomeado para aperfeiçoar e dar continuidade, mas nada realizou, e como contavam, que assim que a guerra terminasse, seria um caso desinteressado."

"... posso afirmar, não há razões para desprezar a indústria extrativa, na época presente tudo é mais fácil e de elevado valor."

Desde a década de setenta, quando dos embargos da produção promovidos por países do Oriente Médio, teve-se consciência de quanto a humanidade tornou-se dependente da produção de petróleo. Crises energéticas mundiais, provocadas por monopólios produtivos em uma época com poucas preocupações sobre como e quanto gastar, semearam a idéia da escassez de matéria prima e o iminente esgotamento de reservas petrolíferas. Após períodos de turbulência e de domínio exclusivo do mercado pelos países produtores e exportadores, grandes descobertas no Alasca, Mar do Norte e Mar Cáspio foram apenas alguns dos fatos importantes que influíram no redirecionamento geopolítico ocorrido nas últimas décadas e no processo de depressão dos preços internacionais do barril de petróleo, que se estendia até o início do ano 2000.

### **3.2 Os usos e a importância atual dos folhelhos oleígenos**

Muita coisa mudou desde a primeira tentativa de ajuste da economia mundial às *crises do petróleo* dos anos setenta, no que diz respeito à substituição efetiva dos seus derivados na matriz energética de quase todos os países. Durante mais de vinte anos as regras de oferta e demanda se expressaram plenamente, pela abundância de óleo bruto e com a nova orientação da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEC) e dos demais exportadores que mantiveram preços estáveis para seus produtos. Estes tiveram que se adaptar dali para frente a uma realidade econômica mais complexa e uma sociedade mais atenta e defensiva. O século XXI começa com muitas incertezas sobre a energia que o homem irá dispor e o preço que terá que pagar por ela.

O fato da maioria das atividades de exploração dos folhelhos oleígenos estar restrita a poucos países quase sempre se considerou ser função da falta de competitividade econômica com os preços de petróleo. Apenas a Estônia, o Brasil e a China possuem atualmente minerações com operação significativa.

O que hoje se verifica é a influência de outros fatores determinantes nos preços do petróleo, além das contínuas ameaças à paz no Oriente Médio, que não eram notados até então. A renovação política nos quadros da OPEC, com a influência maior

da Venezuela, os novos papéis da Rússia e da China no comércio mundial de petróleo, a pressão pela suspensão ao embargo do petróleo iraquiano, os mega depósitos encontrados no Irã, são alguns exemplos dos fatores que provocam a crescente volatilidade de seus preços.

E o que é mais crítico: muitos analistas, mesmo ponderando sobre a imprecisão e falta de confiabilidade dos dados oferecidos pelas empresas petrolíferas e nações produtoras, como quantidades existentes, alcançáveis e aproveitáveis de petróleo no planeta, estimam em dez anos o prazo limite para o início de nova época de escassez de oferta, considerando a produção mundial atual de 23.6Gbo (bilhões de barris de óleo) em 1997 (CAMPBELL, J. C.; LAHERRÈRE, J., 1998).

O Presidente da OPEC, Chakib Khelil, declarou recentemente na imprensa acreditar que a demanda global de óleo deverá crescer 44% durante os próximos vinte anos, ou 2,1% anualmente, e a demanda deve crescer 83% nos países em desenvolvimento. Uma questão importante é: de onde virão os suprimentos?

Ainda segundo Khelil, 78% das reservas mundiais provadas de petróleo e 40% da produção são das nações da OPEC. Não há dúvidas sobre a necessidade crescente da viabilização prática de fontes energéticas substitutivas do petróleo em outras partes do mundo.

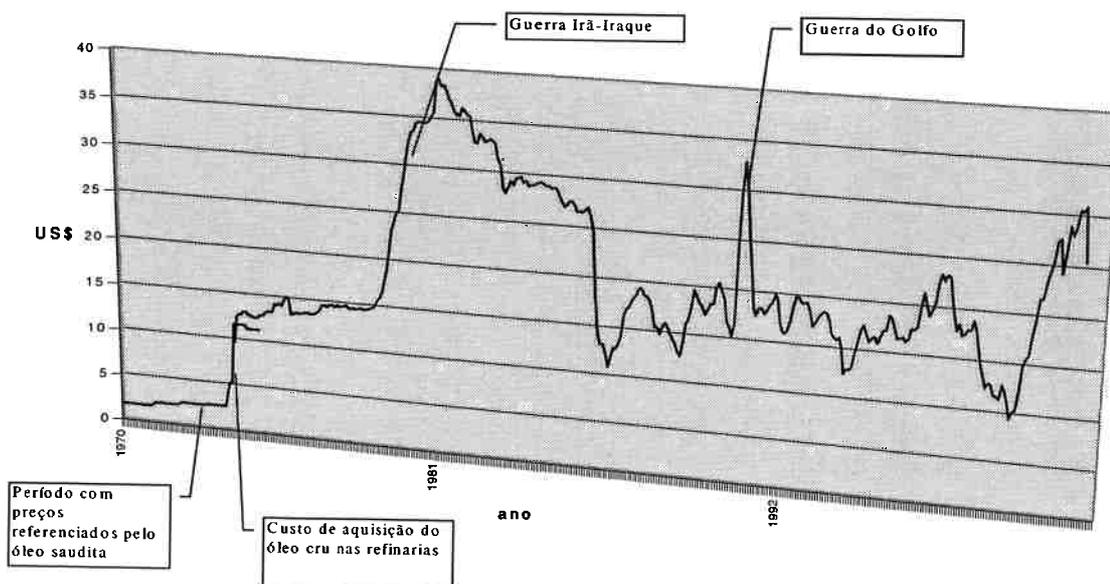
Em um futuro próximo, carente de outras opções tecnológicas para grandes escalas de consumo e numa situação de pouco petróleo e carvão de distribuição concentrada, tem-se como certo o crescimento da importância para a humanidade do aproveitamento de grandes depósitos não convencionais de óleo, como lodos com óleos de alta viscosidade na Venezuela, areias oleígenas no Canadá e Austrália e folhelhos oleígenos na Austrália, Estônia, Estados Unidos da América (EUA) e Brasil. Espera-se que isso ocorra logo que os preços relativos do produto final da mineração se tornem atrativos e empecilhos, como o aproveitamento incompleto dos constituintes dos materiais oleígenos, controle ambiental ou dificuldades de recomposição de áreas degradadas de grandes minas a céu aberto, forem superadas.

Ressalte-se que, em 2000, durante sua campanha à presidência dos EUA, George W. Bush prometeu aumentar as fontes de óleo dos EUA, abrindo a possibilidade de pesquisar partes do território nacional ártico, além de priorizar o desenvolvimento de

fontes alternativas e de continuar persuadindo outras nações a fornecer fontes constantes. A crise energética da costa oeste americana, exacerbada no início do milênio principalmente nos estados de Nevada e Califórnia, pode vir a desencadear modificações nos ritmos de pesquisas e ações práticas em energias alternativas.

A Figura 1 mostra as oscilações sofridas pelos preços internacionais do petróleo durante os últimos trinta anos. Há altas evidentes nos preços (maiores que US\$50/barril) decorrentes das ações dos países árabes e da OPEC entre 1973 e 1987. A partir de 2000 e adentrando o novo milênio, observa-se a firme elevação de preços (acima de US\$20/barril), acima, inclusive, dos preços alcançados durante a Guerra do Golfo, em 1990.

FIGURA 1 - A OSCILAÇÃO DOS PREÇOS INTERNACIONAIS DO BARRIL DE PETRÓLEO NOS ÚLTIMOS TRINTA ANOS. VALORES EM DÓLAR BASE ANO 2000 (1970 - 2000) (WRTG Economics, 2000)



Estando a humanidade tão fortemente suportada por uma fonte de energia esgotável e problemática como o petróleo, tem que ser dada importância à busca contínua de conhecimentos básicos sobre os materiais energéticos e direcionar o desenvolvimento dos processos de exploração de carvão, gás, energia solar, energia atômica, biomassa e outras origens, que continuam pouco eficientes para grandes escalas.

Talvez o folhelho oleífero possa vir também a se integrar definitivamente na economia mundial, mas os custos associados às etapas de lavra, detonação, transporte,

britagem, aquecimento, disposição de rejeitos e recuperação de áreas degradadas são muito grandes, o que ressalta a importância de pesquisas geológicas pormenorizadas para a busca de soluções ou mitigação de problemas existentes.

A partir do mês de junho de 2001, concretizaram-se as sombrias expectativas sobre a necessidade de racionamentos de energia elétrica no Brasil, por problemas entre a demanda solicitada de energia e a capacidade de geração do sistema elétrico nacional.

As perspectivas para a etapa posterior ao racionamento são de aumentos crescentes nos preços da energia de origem hidrelétrica, apesar de nos últimos anos o governo ter incentivado a instalação de usinas termoelétricas no país, principalmente para aproveitamento do gás natural boliviano. Mostra-se nítida, portanto, a urgência de desenvolvimento de formas alternativas de energia que se integrem à matriz energética nacional.

### **3.3 O aproveitamento de folhelhos oleígenos no mundo**

Os argumentos favoráveis à complementação dos derivados de petróleo pelos folhelhos oleígenos são questionáveis, se observados sob um contexto mais amplo. Eles tornam-se menos válidos confrontando-se com problemas globais, como destruição da camada de ozônio, aquecimento global e deposição de rejeitos tóxicos. Preços são só um dos componentes que podem impulsionar o aumento da produção nacional, mais relevante a curto e talvez médio prazo, mas apenas dentro de uma situação política internacional estática e de viés simplesmente econômico, mas não para um programa efetivo de desenvolvimento de novas fontes de energia.

Como já dito, atualmente somente Brasil, Estônia e China possuem minas com operação significativa, principalmente pela distribuição escassa de rochas com teores aceitáveis e pela abundância de oferta de petróleo barato. No hemisfério sul, onde o emprego de carvão e do gás natural ainda pode ser muito ampliado, Brasil e Austrália investem em pesquisa e desenvolvimento de depósitos de folhelho oleígeno, sendo que está em New South Wales, próximo a Sydney, o minério de mais alto teor (torbanita) australiano. Em Queensland, estima-se que folhelhos oleígenos de depósitos do Terciário contêm recursos *in situ* da ordem de vinte e sete bilhões de barris de óleo (SALAMEH, 1998).

Nos Estados Unidos, já foram realizados esforços, a partir da segunda guerra mundial, para desenvolvimento de tecnologias de processamento para folhelhos oleígenos lavrados a céu aberto e em minas subterrâneas, além da experimental retortagem "in situ". Atualmente, empresas de mineração procuram fortalecer a idéia da necessidade de iniciar a utilização dos folhelhos da Formação Green River, do Eoceno de Colorado, Utah e Wyoming e dos folhelhos devonianos do Kentucky. Tratam-se de rochas e de depósitos bastante diferentes dos brasileiros, com teores de óleo geralmente mais elevados, mas que também não se impõem ainda nem como alternativa energética interna.

A Estônia produz grande parcela de sua energia a partir do aproveitamento de um rico folhelho oleígeno (kukersita) em seis minas subterrâneas e quatro minas a céu aberto, com teores em querogênio entre 30-60 % e sempre produzindo grandes quantidades de rejeitos de mineração (PUURA, 1998). Nas minas, cerca de um terço da rocha escavada (7-8Mt por ano) é disposta em pilhas de rejeito. A maior parte da investigação científica contínua sobre folhelhos e divulgação de pesquisas de todo o mundo é feita por lá, com as principais referências na pesquisa do estado da arte se referindo aos depósitos adjacentes ao Mar Báltico, relevando o fato da Estônia ser o terceiro maior produtor mundial de energia elétrica *per capita* (SALAMEH, 1998).

Na China, há produção registrada de energia oriunda de folhelhos oleígenos, não havendo muitas informações a respeito, mas com receio internacional relativo às agressões dessa mineração ao meio ambiente. A indústria do folhelho oleígeno em Fushum teve início em 1928 e vem operando por sessenta anos, em rochas sobrepostas a depósitos de carvão, o que viabiliza baixos teores na lavra (PORTO ALEGRE, 1995).

Existem informações sobre um novo projeto para aproveitamento de folhelho oleígeno na Jordânia (SALAMEH, 1998), que prossegue evoluindo para a extração de óleo, através de tratamento de minério em faixas granulométricas mais finas do que as empregadas no Processo PETROSIX. Trata-se de desenvolvimento tecnológico adaptado de pesquisas em areias oleígenas, pelo processo *AOSTRA-Taciuk Processor Technology (ATP)*. Consiste na tecnologia de um forno rotativo e compartimentos verticais também rotativos, onde se processam quatro etapas: pré-aquecimento do folhelho seco; pirólise; combustão do folhelho retornado e recuperação do calor da combustão do folhelho. Os custos de extração e beneficiamento desse folhelho através

do ATP deverão oscilar entre US\$7 e US\$ 10 o barril de óleo. O teor médio (em peso) de óleo no folhelho oleífero jordaniano é de 10,5% e de enxofre (SO<sub>3</sub>) é de 3,88%.

Em São Mateus do Sul, em mais de vinte anos foram gastos cerca de US\$ 550,000,000 para desenvolver a operação da retorta PETROSIX como um dos processos mais econômicos do mundo (PETROBRAS, 1995). É necessário, entretanto, reconhecer as diferenças entre as metodologias empregadas em outros empreendimentos de mineração de folhelho oleífero para podermos estabelecer parâmetros comparativos, no que dizem respeito aos problemas abordados neste estudo.

Outra tecnologia experimental muito distinta do Processo PETROSIX é a extração *in situ* do óleo dissolvido da rocha, alternativa proposta em anos passados para o aproveitamento dos depósitos dos Estados Unidos da América, que apresentou muitos problemas gerados pela formação de material ultra-fino na retortagem (SALAMEH, 1998). Apesar da precariedade de informações atuais a respeito de novos aproveitamentos, a investigação mais aprofundada dos aspectos geológicos e mineralógicos pode contribuir para aperfeiçoamentos técnicos nos procedimentos adotados em São Mateus do Sul.

Na Tabela 1, comparam-se características de diferentes folhelhos oleíferos que podem ser aproveitados economicamente. Há qualidade destacada nos minérios da Austrália e da Estônia, no que diz respeito a teores importantes e poder calorífico.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS DOS PRINCIPAIS FOLHELHOS OLEÍGENOS NO MUNDO (PORCENTAGENS EM PESO)

CARACTERÍSTICAS	AUSTRÁLIA	BRASIL		ESTÔNIA	EUA	MANDCHURIA	SUÉCIA
	Torbenita	Vale do Parafba	Irati	Kukersita	Colorado	Fushun	Kyaratorp
Densidade a 60°F (g/cm <sup>3</sup> )	1,5	1,14	1,18	-	2,16	2,29	2,09
Umidade %	-	33	55	-	-	-	-
Enxofre total %	-	0,7	4,2	-	-	-	-
Poder calorífico (kcal/kg)	4.500	1.500	1.940	3.200	1.450	830	2.170
<b>Ensaio Fischer (base seca)</b>							
Óleo %	30,9	8,3	8,5	22,0	10,6	3,0	5,7
Rendimento gal/t	83	15	20	54	28	5	14
Gases e perdas %	4,3	3,2	3,9	5,6	2,1	1,8	5,1
Folhelho retortado %	64,1	87,7	78,4	70,5	86,6	90,3	87
Água de retortagem %	0,7	6,2	1,7	1,9	0,7	4,9	2,0

FONTE: HUKAI; KUMOTO, 1981

Sinais promissores de aproveitamento em grande escala de reservas de folhelho oleífero vieram na década passada da Austrália, onde a Suncor Energy Inc. procurava extrair comercialmente óleo de vastos depósitos em Queensland (SUNCOR, 1999). O projeto baseado no depósito de Stuart, baseava-se em uma estimativa de três bilhões de barris de óleo contido apenas em um dos depósitos pesquisados.

A partir de 1996, com os resultados dos ganhos tecnológicos na mineração e no processamento, a Suncor iniciou os trabalhos para alcançar objetivos de produção de 15.000 barris por dia em 2003 e 65.000 barris por dia em 2007, com estimativa de investimentos da ordem de US\$ 2,5 bilhões. A Suncor planejava gastar entre US\$ 13 milhões e US\$ 20 milhões em 2000 como custos adicionais para atividades voltadas ao meio ambiente.

Em abril de 2001, a Suncor vendeu sua participação no depósito de Stuart para as empresas associadas australianas Southern Pacific Petroleum e Central Pacific Minerals, que começaram a exportar óleo de folhelho para o mercado de óleo do sudeste asiático em maio de 2001 (OGJ Online, 2001), ainda confrontando-se com problemas relacionados ao meio ambiente, principalmente por agravar o efeito estufa.

FIGURA 2 - VISTA AÉREA DA USINA DE BENEFICIAMENTO DE STUART, EM GLADSTONE, QUEENSLAND, AUSTRÁLIA, EM AGOSTO DE 1998  
© GREENPEACE/STEWIE



FONTE: Disponível em: (<http://www.suncore.org/>)

### 3.4 O aproveitamento dos folhelhos de São Mateus do Sul

A PETROBRAS/SIX foi criada em 1954 (BRASIL, 1954), inicialmente para o aproveitamento do folhelho como fonte de óleo combustível, enxofre e gás e, a partir de 1991, iniciou ações em outros projetos na área de refino e meio ambiente, trabalhando em conjunto com o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da PETROBRAS - CENPES.

A importância da mineração do folhelho oleífero, tanto local como regionalmente, tem como perspectiva o completo aproveitamento de seus produtos e surgimento de novas aplicações, inicialmente com a tentativa de emprego de cinzas de folhelho por empresas cimenteiras paranaenses, o aproveitamento da pozolanocidade (FONSECA, 1983) do folhelho pirolisado e o uso das argilas do depósito, em desenvolvimento de recentes parcerias da PETROBRAS/SIX.

Com disponibilização de infra-estrutura, a PETROBRAS/SIX oferece apoio a novas empresas interessadas no aproveitamento de seus produtos e subprodutos. Uma das primeiras empresas a aproveitar essas facilidades foi a Indústria Cerâmica do Paraná (INCEPA), que montou no município uma moderna fábrica de cerâmica, utilizando gás liquefeito e gás combustível produzidos a partir do folhelho oleífero. Peças de cerâmica com diversas sofisticações são produzidas pela INCEPA, que consome diariamente cerca de 12 toneladas de gás combustível de folhelho.

Em todos os empreendimentos fundamentados no aproveitamento do folhelho, a diminuição da geração de finos deletérios ou, ainda, o melhor aproveitamento desses finos certamente irá contribuir para a melhoria no processo produtivo.

Além de fornecer uma fonte energética alternativa ao Brasil, a atividade de industrialização do folhelho oleífero gera outros benefícios para a região de São Mateus do Sul, como aumentos constantes de arrecadação de ICMS (em torno de 60% da arrecadação se devem a indústria local) e geração de mais de setecentos empregos diretos, entre o quadro funcional e o das empresas prestadoras de serviços. O município deve boa parte de sua infra-estrutura atual às ações desencadeadas pela instalação da PETROBRAS/SIX.

A primeira Incubadora Tecnológica do País foi instalada no final de 1992 no Município de São Mateus do Sul, com objetivo de incentivar a criação de novas empresas que utilizem tecnologias inovadoras para o processamento do folhelho

oleífero. A iniciativa nasceu de uma parceria da PETROBRAS com o Centro de Integração Tecnológica do Paraná (CITPAR) e conta com o apoio do Banco Regional de Desenvolvimento do Extremo Sul (BRDE), Federação das Indústrias do Estado do Paraná (FIEP), Serviço de Apoio à Pequena Empresa (SEBRAE), Universidade Federal do Paraná (UFPR) e prefeitura local.

A incubadora oferece espaço físico e infra-estrutura técnica e administrativa, que inclui serviços de consultoria especializada, assessoramento técnico, laboratorial e informações tecnológicas, às empresas interessadas em desenvolver novas tecnologias para fabricação de produtos a partir do folhelho. Além disso, contam ainda com orientação empresarial (administrativa, contábil e fiscal) e fornecimento de energia elétrica, vapor, água e ar comprimido, tudo a baixo custo.

A primeira empresa a instalar-se na Incubadora Tecnológica foi a Mulching Six do Brasil, que comercializa o fertilizante Agrosix. Outra empresa incubada é a Complemix, fabricante do cimento Pozosix, feito com cinzas resultantes do processamento do folhelho. A terceira empresa, a Wastec, está desenvolvendo tecnologia para o aproveitamento do folhelho na produção de cerâmica.

A Terra Nossa, Indústria, Comércio, Importação e Exportação de Fertilizantes, desenvolveu o MicroFolhelho, um fertilizante de rápida absorção pela planta produzido a partir da água de retortagem.

A Gimarô Indústria Química Ltda. desenvolveu o suplemento alimentar animal de altíssima pureza Enxofre – Allium Sativum, a partir do enxofre produzido pela PETROBRAS/SIX.

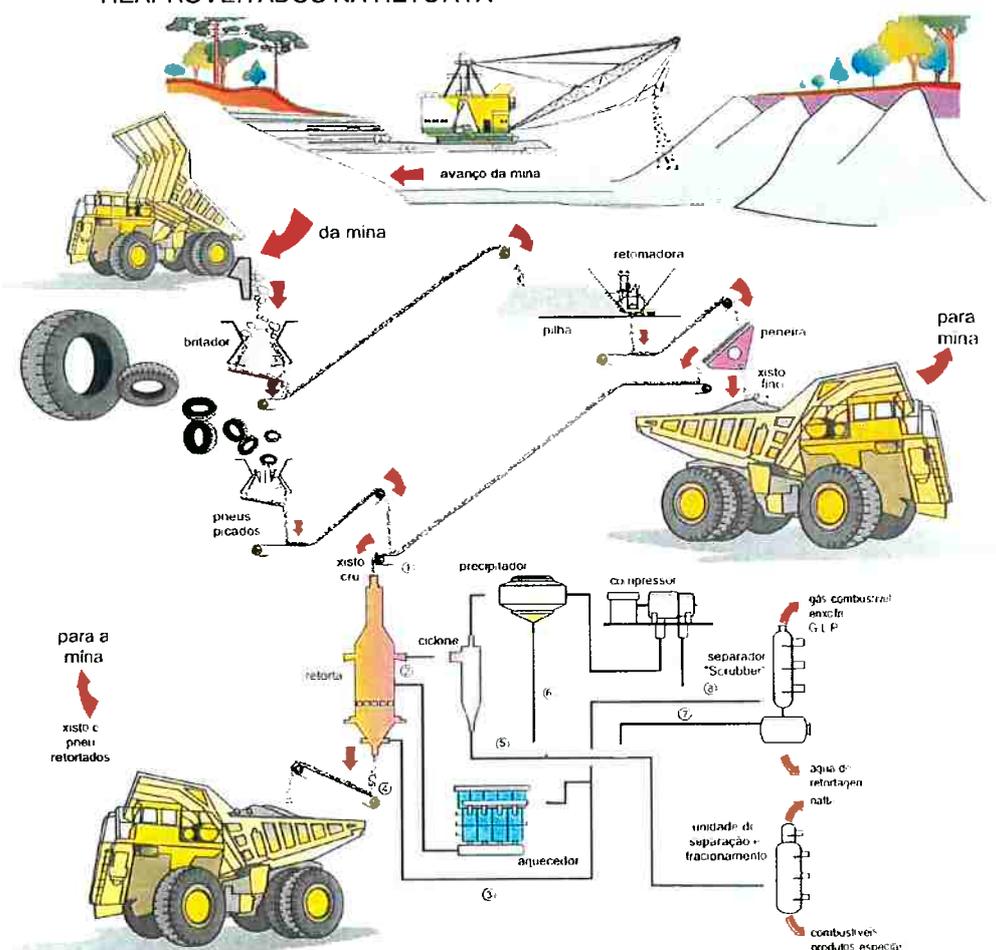
Outros produtos já empregados em manutenção e recuperação de vias públicas são o Agente Antipó, o Agente Rejuvenescedor, a Emulsão Rejuvenescedora e o Sela Trincas.

Um projeto muito promissor, que se desenvolve com o aproveitamento da energia calorífica da produção dos produtos do folhelho é a reciclagem de pneus para produzir óleo. A PETROBRAS/SIX está colocando em testes um projeto que trará benefícios na área ambiental: extração de combustíveis de pneus usados. O projeto está sendo realizado em parceria com a Associação Brasileira de Importadores de Pneus (ABIP). O projeto é inédito e os primeiros testes realizados indicam que, com a adição

de pneus a produtividade de óleo aumentará de 8,7% para 10% para cada tonelada processada da mistura - que será de 950 quilos de folhelho e 50 de pneus. Cada tonelada de pneu produz 50% de óleo, 8% de gás, 30% de *carbon black* e 12% de aço. A estimativa da Superintendência da SIX é de que o processo irá alavancar novos projetos para recolhimento e processamento de três milhões de pneus anuais, após a viabilização em escala industrial. Nesta fase inicial, poderão ser processados 3 milhões de pneus e 500 mil toneladas/ano de folhelho, no mínimo.

Na figura abaixo, está exposto o fluxo do Processo PETROSIX, integrado às etapas de lavra e beneficiamento do folhelho e ao aproveitamento econômico dos pneus.

FIGURA 3 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO DE MINERAÇÃO DA PETROBRAS/SIX EM SÃO MATEUS DO SUL E O INCREMENTO DOS PNEUS REAPROVEITADOS NA RETORTA



FONTE: PETROBRAS, 1999

Além de promover o desenvolvimento tecnológico e oferecer mais uma alternativa energética ao país, a industrialização da rocha pirobetuminosa contribui para o crescimento econômico da região de São Mateus do Sul. Empresas de maior porte estão sendo atraídas para utilizar produtos, subprodutos e rejeitos do minério na fabricação de insumos, criando um novo pólo industrial no Paraná.

### **3.5 Meio ambiente**

A PETROBRAS/SIX tem ações para proteção atmosférica, como recuperações de gases de enxofre e controle de outras emissões gasosas, mantendo-as em níveis permitidos pela legislação. A poeira é controlada pela aspersão de água nas estradas e pátios de carregamento, há monitoramento dos processos de corrosão e dos teores de dióxido de enxofre, gás sulfídrico e óxidos de nitrogênio, além de acompanhamento das outras condições atmosféricas, através de uma estação meteorológica interna (BOLLMANN, 1997).

Na proteção dos recursos hídricos, a atenção maior é dada para a água de retortagem, que constitui cerca de 7% do peso da carga de folhelho processado na retorta. Ela é lançada numa represa para sofrer oxidação natural e com aeração, com posterior lançamento no Rio Iguaçu. A água de lixiviação, proveniente da percolação de águas de chuva nas pilhas de rejeito, mostrou-se não poluente, sem metais pesados ou qualquer outra substância que poluísse os corpos receptores (Porto Alegre, 1995).

Atualmente, a PETROBRAS/SIX conta com mais de 280 hectares de áreas reabilitadas, desde o início da operação de lavra em 1972. Foi feito o plantio de plantas exóticas e nativas da região e alguns experimentos agro-pastoris (mel, leite, ovelhas) já vem sendo testados (NOVICKI, Porto Alegre, 1998).

O repovoamento da flora e fauna nativas é feito pela empresa em convênio com a Sociedade de Pesquisa em Vida Selvagem (SPVS), de Curitiba. Espécies animais estão sendo selecionadas para criação e manutenção em áreas específicas. Aves e outros animais são atraídos para o repovoamento e, integrado a isso, espécies frutíferas são as preferidas para o plantio nas áreas reabilitadas. O Projeto Arca de Noé, implantado pela PETROBRAS/SIX em 1987, visa preservar animais e aves silvestres.

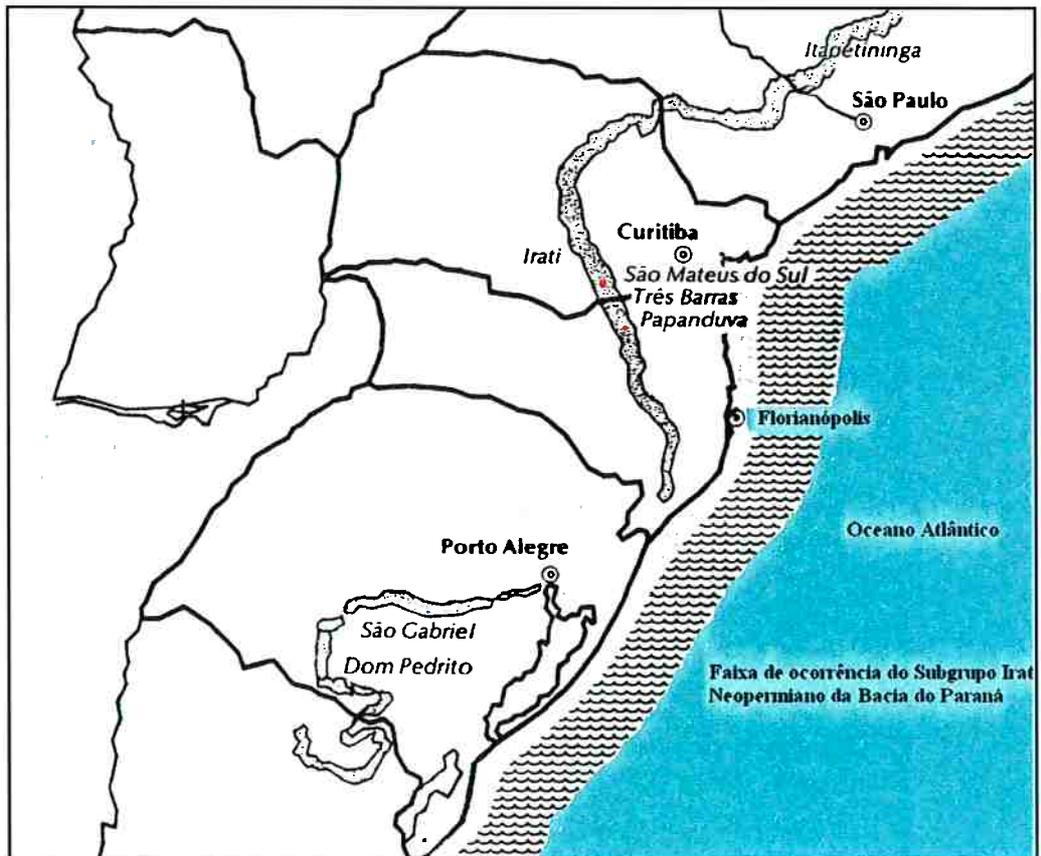
Hoje, quando os elevados preços do petróleo tornam a produção do óleo de folhelho economicamente viável, não se concebe a interrupção de iniciativas para aproveitamento integral da rocha, com seu combustível e outros produtos. Deve-se também ampliar o conhecimento científico básico sobre as rochas do Subgrupo Irati, havendo para tanto a necessidade de desenvolvimento de pesquisas continuadas em geologia, paleontologia, geologia de mineração, ecologia e em outras áreas do conhecimento, que podem aproveitar da condição de lavra e desenvolvimento, com imensas movimentações de solo e rocha e exposição contínua de bancadas de folhelho.

## 4 LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS AMBIENTAIS

### 4.1 Situação geográfica e vias de acesso

Os depósitos de folhelhos oleígenos pirotetuminosos estudados nesta pesquisa são aqueles da área em mineração (mina Paiol Grande) da jazida de 64,5km<sup>2</sup> da PETROBRAS/SIX no município de São Mateus do Sul, município paranaense com cerca de 35.000 habitantes, distante 140 km de Curitiba. A figura a seguir mostra a distribuição regional das rochas do Subgrupo Irati.

FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS FOLHELHOS DO SUBGRUPO IRATI NOS ESTADOS DE SÃO PAULO, PARANÁ, SANTA CATARINA E RIO GRANDE DO SUL, COM INDICAÇÃO DE ONDE FORAM ESTIMADAS RESERVAS (PADULA, 1979). ESCALA APROXIMADA 1: 20.000.000



São dois os principais acessos rodoviários até São Mateus do Sul: a BR 478, de menor extensão, chamada Rodovia do Xisto, normalmente com asfalto em piores condições, pelo grande tráfego de caminhões e outros veículos atraídos pela ausência de pedágios; a BR 277, pedagiada, seguida da PR 151, passando por Campo Largo, Palmeira e São João do Triunfo, trajeto sempre em boas condições de tráfego, sinuosa e com belas paisagens.

FIGURA 5 - PERSPECTIVA REGIONAL, MOSTRANDO AS VIAS DE ACESSO AO MUNICÍPIO DE SÃO MATEUS DO SUL (ESCALA APROXIMADA DE 1: 2500000)

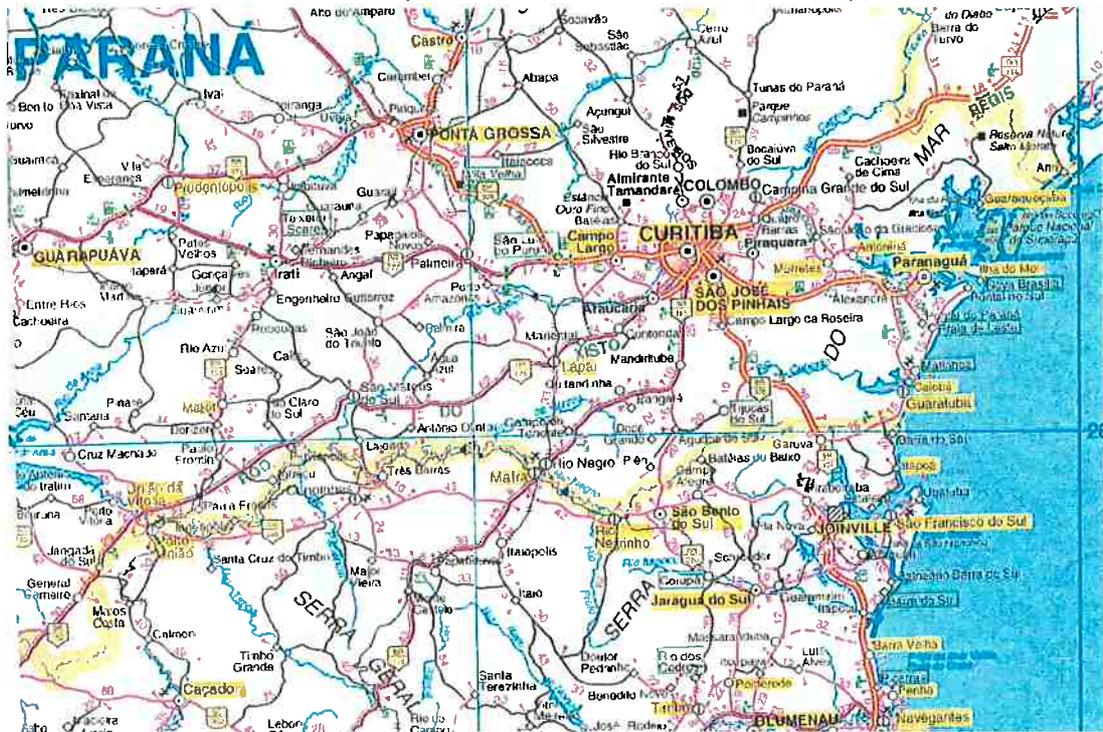


FIGURA 6 -VISTA AÉREA DAS INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS DA PETROBRAS/SIX EM SÃO MATEUS DO SUL



#### 4.2 Clima, solos e vegetação

O clima local é do tipo pluvial temperado (Cfb de Koeppen), superúmido, mesotérmico, com verões suaves e invernos com geadas severas e freqüentes. Durante o inverno, nos meses de maio a agosto, ocorrem as maiores secas, conforme pode ser observado na Figura 7.

A temperatura média mensal mínima nos anos de 1998, 1999 e 2000 foi de 5,3°C e a temperatura média mensal máxima foi de 32°C. As variações de amplitude entre as temperaturas máxima e mínima durante os meses do ano são muito pequenas, conforme pode ser observado na figura 8.

FIGURA 7 - VARIAÇÃO MENSAL DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA EM SÃO MATEUS DO SUL, EM MEDIÇÕES FEITAS NA PETROBRAS/SIX DURANTE OS ANOS DE 1998, 1999 E 2000

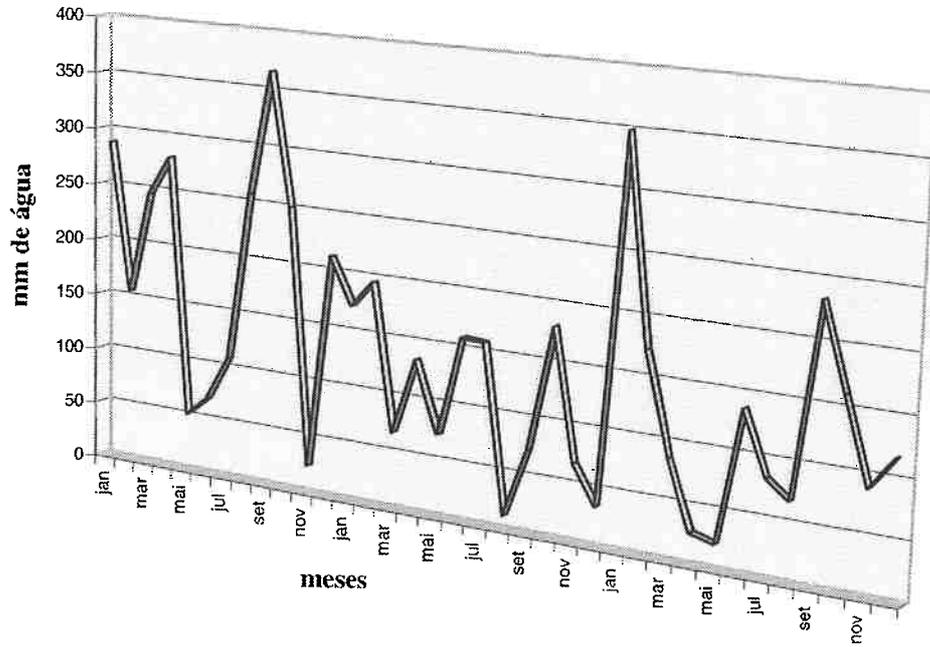
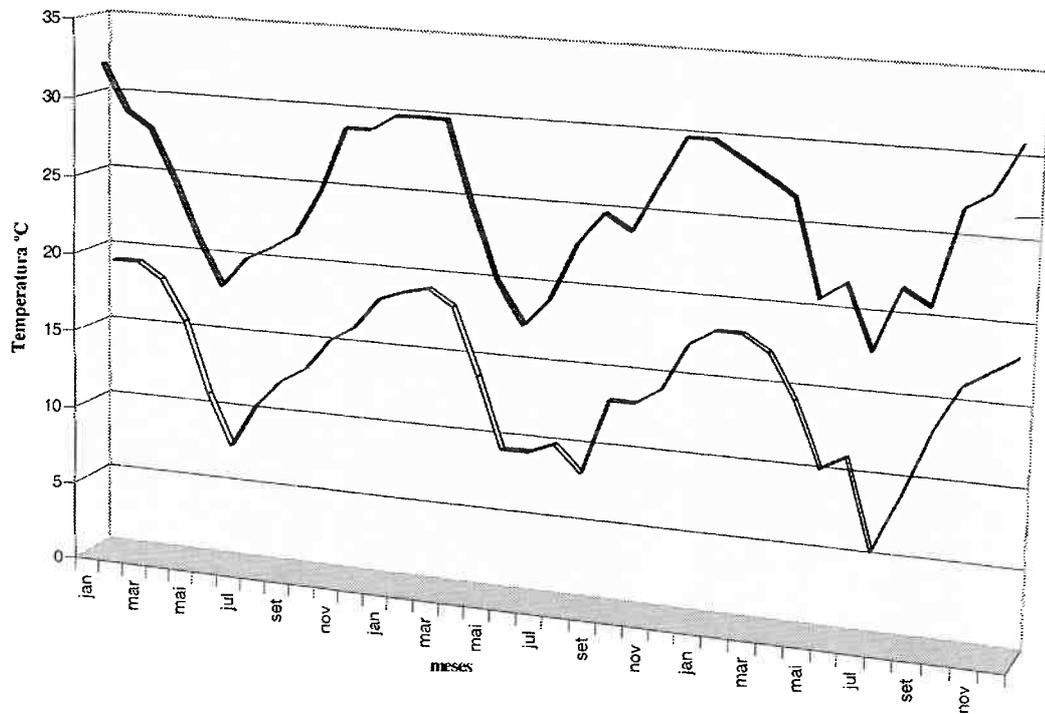


FIGURA 8 - VARIAÇÕES DAS MÉDIAS MENSAIS DE TEMPERATURAS MÁXIMA E MÍNIMA NOS ANOS DE 1998, 1999 E 2000 EM SÃO MATEUS DO SUL

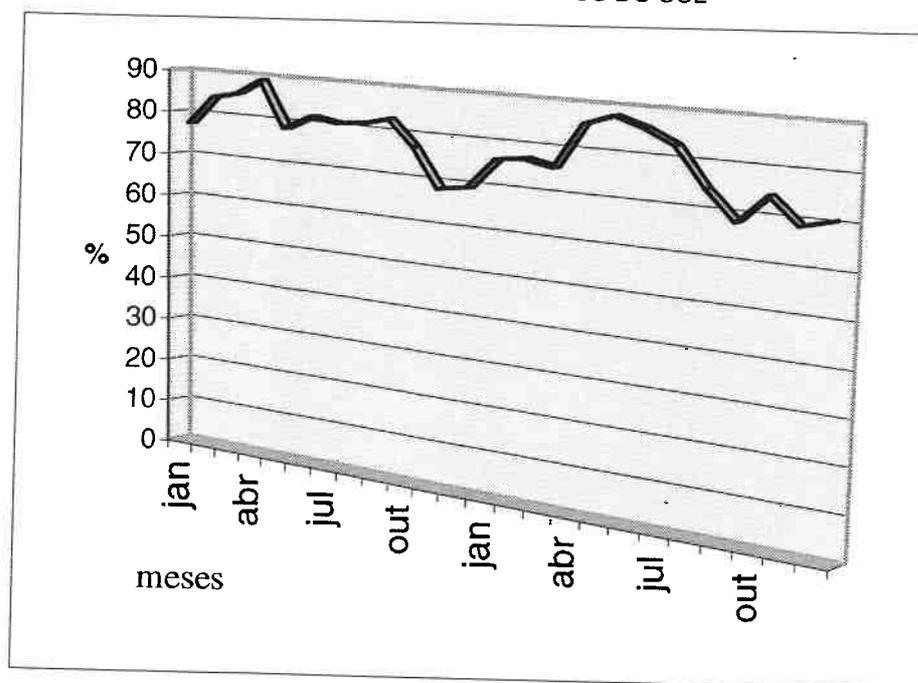


A alteração mineralógica acelerada pela ação do intemperismo contribui para o processo de desintegração do folhelho, como se observa em muitas exposições na mina, onde as modificações na composição química e na estrutura cristalina dos componentes do folhelho são induzidas por fenômenos de lixiviação e percolação no depósito.

É importante a análise detalhada da ação do clima sobre os processos formadores dos finos de mineração em São Mateus do Sul. No ano 2000, condições anormalmente extremas de estiagem e frio puderam mostrar a influência, por exemplo, das trocas hídricas no ambiente e a estabilidade da rocha. Durante a estiagem do primeiro trimestre desse ano, foi observado um aumento relativo da resistência da rocha fornecida da jazida para a retorta, com diminuição observada na geração de finos<sup>3</sup>.

De acordo com FUJITA (1978), a umidade relativa do ar apresenta perfil inverso ao das temperaturas, com os valores mínimos em novembro (65,8%) e máximos em junho (88,6%) e média de 80,7% ao ano. Dados da PETROBRAS/SIX sobre os anos de 1998 e 1999, expostos no gráfico da Figura 8, mostram valores mínimos em setembro (68,0%) e máximos em abril (89,0%), com média de 78,3% para os dois anos.

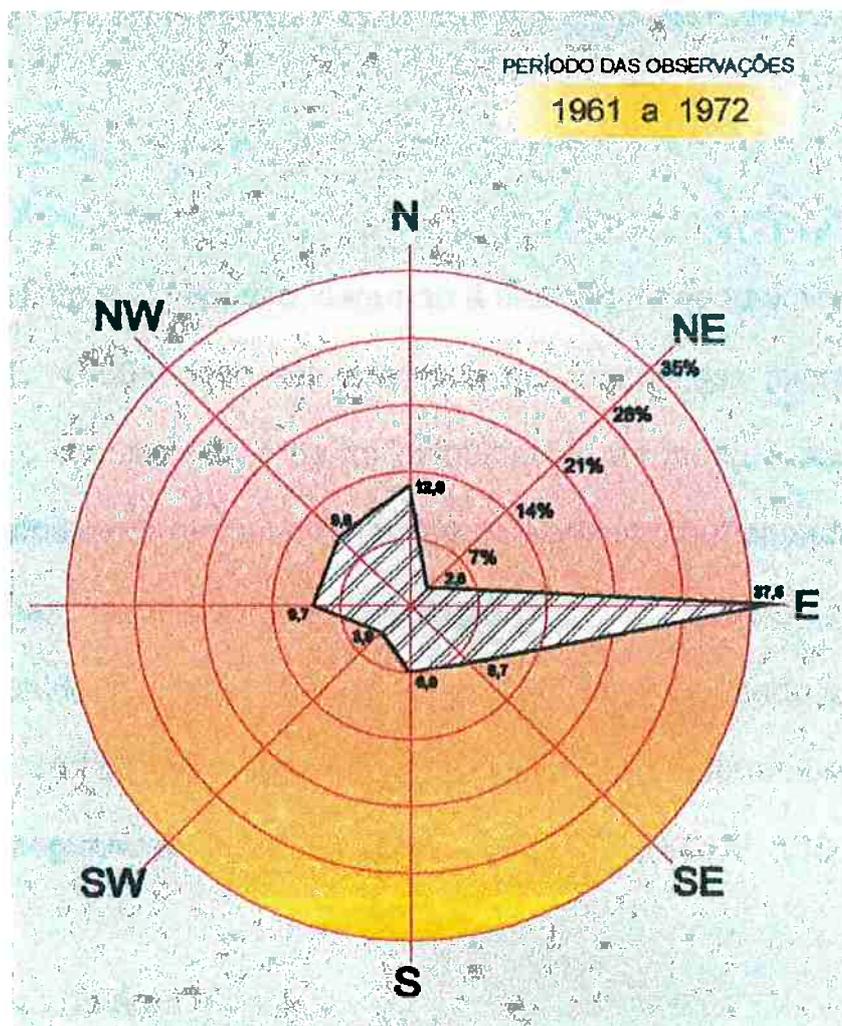
FIGURA 9 - VARIÇÕES DAS MÉDIAS MENSAIS DA UMIDADE DO AR NOS ANOS DE 1998 E 1999 EM SÃO MATEUS DO SUL



<sup>3</sup>Luiz Fernando P. Gregório, Engenheiro de Minas, INAT Eng<sup>a</sup> LTDA, comunicação pessoal.

Os ventos predominantes são de leste, o que leva os gases gerados na unidade industrial para o interior da área da PETROBRAS/SIX. A Figura 10 mostra a orientação média das direções predominantes dos ventos em São Mateus do Sul.

FIGURA 10 - DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA DE VENTOS, EM OBSERVAÇÕES REALIZADAS ENTRE OS ANOS DE 1961 A 1972

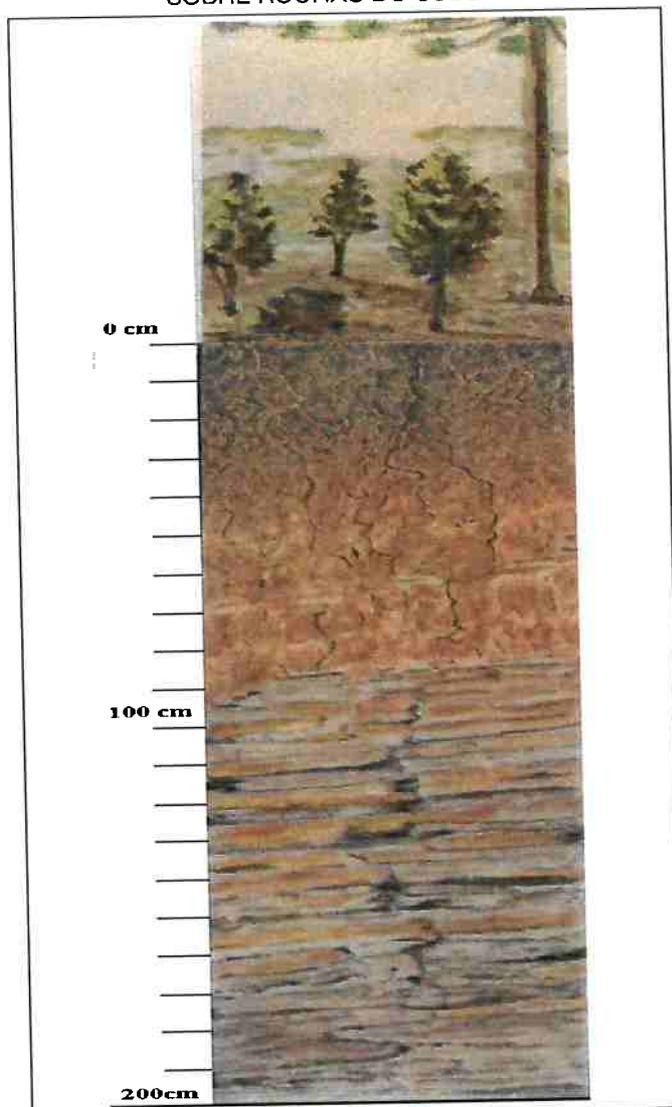


FONTE: FUJITA, 1978

A letra indica a origem do vento. Calmaria corresponde a 8,3% do tempo.

O sistema de mineração da PETROBRAS/SIX permite a devolução do folhelho, após a retortagem, às cavas de mineração, onde é recoberto com uma camada de cerca de dois metros de solo original (Figura 11). O solo recomposto se presta ao plantio de plantas exóticas e nativas.

FIGURA 11 - PERFIL ESQUEMÁTICO DO SOLO DA REGIÃO DE SÃO MATEUS DO SUL, SOBRE ROCHAS DO SUBGRUPO IRATI



FONTE: KAVALERIDZ, 1978

Segundo esse autor, as condições de acumulação de material laterítico no local não são favoráveis, pois os processos de formação do regolito foram intensos e continuamente levaram facilmente as finas parcelas de argila laterítica. VIANI; MARTINAZZO (1966) *apud* KAVALERIDZ (1978) classificam o solo da região de São Mateus do Sul como de alto teor em cálcio trocável.

A vegetação original da região da mina é composta por floresta sub-tropical, com a presença do pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) nas regiões mais elevadas, com erva-mate (*Illex paraguariensis*) predominando no sub-bosque. Guabirobeira (*Campomanesia xanthocarpa*), pitangueira (*Eugenia uniflora*) e cedro (*Cedrella fissilis*) são outras espécies comuns (BRITZ et al., 1992).

FIGURA 12 - ASPECTO DE REPRESENTANTES DA MATA NATIVA DA REGIÃO DE SÃO MATEUS DO SUL, COM O PINHEIRO-DO-PARANÁ (*ARAUCÁRIA ANGUSTIFOLIA*) INDICADO



FIGURA 13 - VISTA GERAL DA REGIÃO ESTUDADA, MOSTRANDO ASPECTOS DA VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA ATUAL, ABUNDANTE EM BRACATINGAS



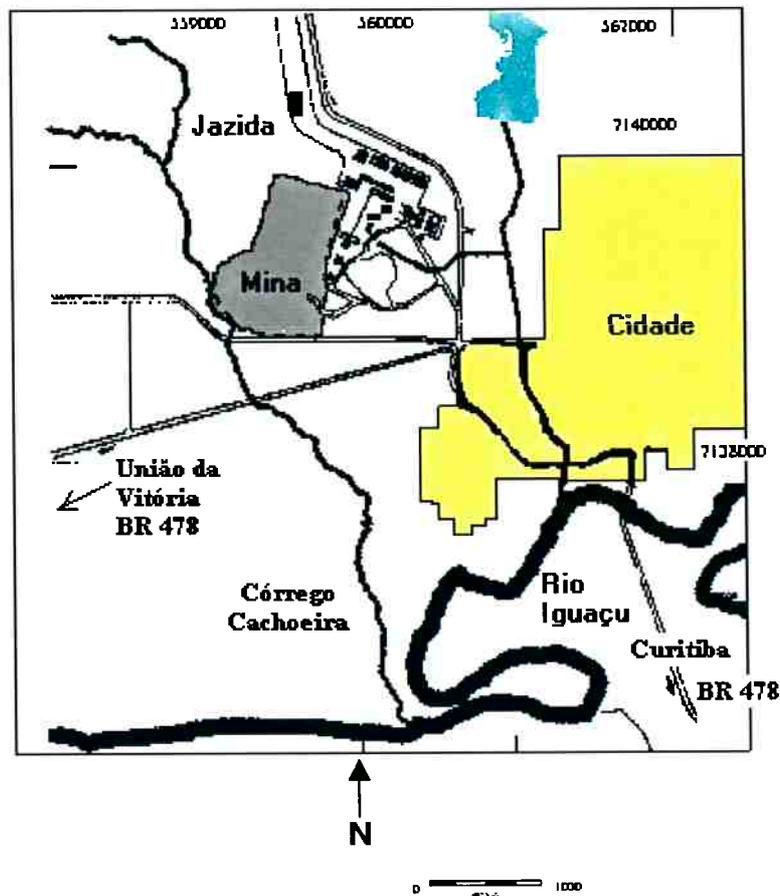
Hoje predomina a mata secundária, com samambaias na zona de araucárias, em áreas com muitas roças de batata, feijão e milho, principalmente (MAACK, 1981) e com pouca rotação de culturas.

Segundo NOVICKI e Porto Alegre (1997), algumas árvores, como a bracatinga (*Mimosa scabrella*), são próprias para o início da revegetação e restauração da fertilidade do

solo da área minerada, que sustentará espécies como o pinheiro-do-paraná (*Araucária angustifolia*). Nos campos de inundação predominam herbáceas e espécies sub-arbustivas e nas matas ciliares ocorre o branquilha (*Sebastiania klotzchiana*).

A rede hidrográfica local é formada pelo rio Iguaçu e seus afluentes, com o córrego Cachoeira recebendo os efluentes da área de influência da mineração de folhelho.

FIGURA 14 - MAPA DA SITUAÇÃO DA MINA UPI (PORTO ALEGRE, 1995)



A mina experimental UPI, em São Mateus do Sul, localiza-se próxima às coordenadas geográficas 26° sul e 50° oeste.

### 4.3 Geologia regional

A designação *Irati*, adotada por WHITE (1908), teve caracterização litológica inicial ampla, associada principalmente aos folhelhos negros, por vezes acompanhados

de calcários (em maior proporção no estado de São Paulo). Existem controvérsias quanto à origem dos estratos do Irati, com evidências paleontológicas - elasmobrânquios exclusivos de águas doces - levando à hipótese de ambiente de lagos ou lagoas (MENDES, 1971), contrária àquela dominante de ambientes de mares internos rasos (HACHIRO, 1996).

A caracterização estratigráfica e ambiental das rochas da Formação Irati, proposta por BIGARELLA em 1972, subdivide-a nos estados de São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul, com diferenças nos processos rítmicos de deposição originando fácies carbonático-silicosas de diversas espessuras.

FIGURA 15 - QUADRO COM A SUBDIVISÃO ESTRATIGRÁFICA PROPOSTA DA FORMAÇÃO IRATI

RIO GRANDE DO SUL	SUL DO PARANÁ	NORTE DO PARANÁ E SÃO PAULO
Membro Serra Alta	Membro Serra Alta	Membro Serra Alta
Membro Tiaraju	Membro São Mateus do Sul	Membro Assistência
		Membro Taquaral

FONTE: BIGARELLA, 1972

HACHIRO (1996) define assim o Subgrupo Irati, da base para o topo:

- folhelhos síltico-argilosos, cinza escuros e não betuminosos, que localmente podem apresentar em sua base arenitos conglomeráticos, arenitos finos e lamitos (Formação Taquaral);
- folhelhos argilosos pretos betuminosos, por vezes intercalados (na base) por rochas carbonáticas (calcilitos dolomitizados e silicificados) e delgadas lentes centimétricas de sílex nodular e ocasionais evaporitos, recobertos por folhelhos síltico-argilosos e lamitos (Membro Morro do Alto);
- carbonatos (calcilitos dolomitizados e doloarenitos na base) e folhelhos argilosos e betuminosos, com ou sem intercalações carbonáticas (calcilitos dolomitizados e silicificados) em direção ao topo (Membro Ipeúna).

O pacote está sobreposto no Paraná à Formação Palermo e é subjacente às formações Serra Alta e Corumbataí (borda nordeste da Bacia do Paraná).

O folhelho pirobetuminoso de São Mateus do Sul ocorre em duas camadas

distintas, dentro do Subgrupo Irati, Formação Assistência (HACHIRO, 1996), separadas por nível de rocha siltosa com baixo teor de óleo.

FIGURA 16 - QUADRO COM A SUBDIVISÃO DO SUBGRUPO IRATI DE Hachiro, 1996, SIMPLIFICADA

Subgrupo Irati	Formação Serra Alta	Membro Ipeuna
	Formação Assistência	Membro Morro do Alto
	Formação Taquaral	

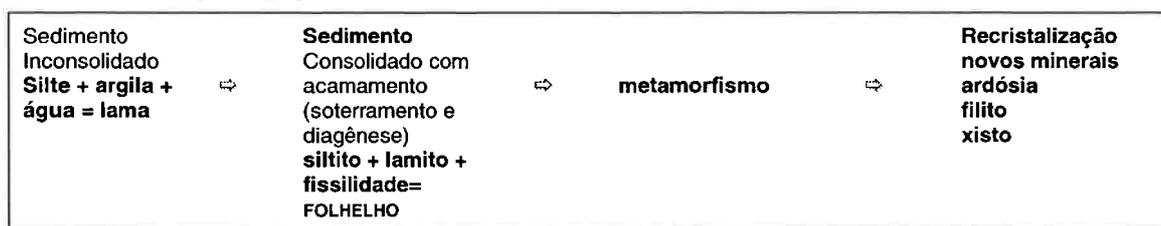
No Anexo 1, é apresentado o mapa geológico do Paraná, para discriminação das unidades estratigráficas da Bacia do Paraná no estado.

## 5 A NATUREZA DOS FOLHELHOS OLEÍGENOS

### 5.1 Folhelho. Aspectos gerais

As rochas oleígenas lavradas pela PETROBRAS/SIX são historicamente conhecidas por "xistos". Mesmo sendo uma discrepância sob o ponto de vista de classificação petrológica, o termo foi adotado e arraigado em denominações de rodovias, epítetos públicos e mesmo terminologia técnica interna da SIX/PETROBRAS. Este assunto é alvo de discussões vãs muito antigas, possivelmente originadas pela associação com o termo francês "schiste", correspondente a *folhelho* (CELINSKI-LESZEK, 1968). ANDRADE; SILVA; ANDRADA (1827) descreveram os folhelhos como "schistograuváquicos".

FIGURA 17 - QUADRO COM A SEQÜÊNCIA DE TRANSFORMAÇÕES BÁSICAS DE SEDIMENTOS, DE LAMA À ROCHA METAMÓRFICA XISTO, DISTINTA DA ROCHA SEDIMENTAR FOLHELHO

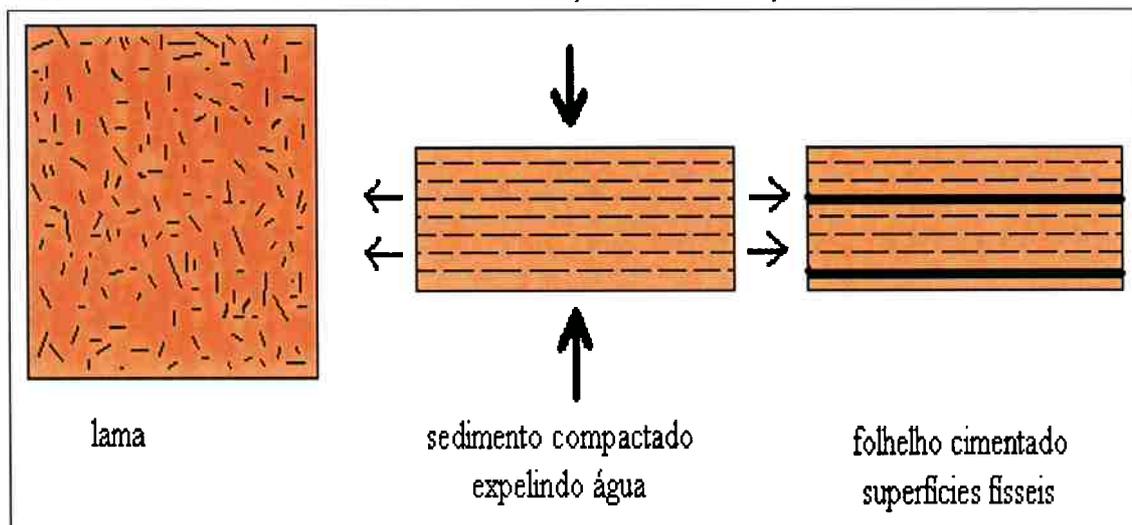


Folhelhos são rochas sedimentares de granulometria fina, formadas pela consolidação de lamelas e argilas. A grande maioria dos folhelhos exibe finas laminações que são paralelas ao plano de acumamento e tem fissilidade irregular. Todas as graduações de consistência existem entre os folhelhos e os argilitos, com os verdadeiros folhelhos diferindo de argilitos pela ausência de plasticidade após serem molhados (UNDERWOOD, 1967).

A litificação dos folhelhos ocorre como resultado da compactação e cimentação de lamelas. Partículas de argila estabilizadas aleatoriamente no sedimento depositado são reorientadas, conforme a água é expelida durante a compactação. Esta, no caso dos folhelhos, ocorre por contínuo aumento de pressão dos novos sedimentos. Conforme o conteúdo em água vai sendo reduzido, os poros tornam-se mais

concentrados e o cimento se deposita em soluções nas superfícies de partição normais à pressão de sedimentação e paralelas à orientação dos argilo-minerais.

FIGURA 18 - ESQUEMA DO PROCESSO DE COMPACTAÇÃO E ESTRUTURAÇÃO DE UM FOLHELHO



O processo de redução de volume e expulsão da água é chamado consolidação. Se o fluido não é expelido, o sedimento continua inconsolidado. A velocidade de consolidação é controlada pela permeabilidade do sedimento. Tanto porosidade (volume de vazios) quanto permeabilidade (velocidade de transmissão do fluido) são reduzidas drasticamente pela compactação e pela cimentação (REEVES, 1998).

Os folhelhos são as rochas sedimentares mais comuns no planeta e apenas em alguns casos acumulam matéria organo-mineral apropriada para fins energéticos. No caso específico desta pesquisa, são produto de deposições de partículas minerais ultrafinas pouco perturbadas, em um ambiente de baixa energia cinética e de tectônica relativamente estável, associadas a grandes populações de algas cianofíceas em ambientes anóxicos.

A capacidade de retenção de minerais radioativos fazem dos depósitos de folhelhos potenciais sítios apropriados para deposição de lixo nuclear. Suas propriedades relacionadas com radioatividade são também bastante investigadas pela indústria do petróleo, através de perfilagens geofísicas em análise de bacias sedimentares.

Na engenharia civil, são direcionadas muitas pesquisas para o desenvolvimento de práticas e mecanismos que possibilitem a construção e manutenção de obras em cimento

armado sobre esses terrenos instáveis. Em países com pequenas superfícies territoriais essas rochas são mesmo indesejadas, pelos elevados investimentos em estabilização de grandes massas rochosas.

Em depósitos onde tanto folhelhos marinhos como lacustres estão presentes, uma sutil mudança na mineralogia das argilas (particularmente o conteúdo de illita na série illita-smectita) aparece na transição desses ambientes (CANE, 1976). Diagênese (idade, profundidade e temperatura) não pode explicar isoladamente essas mudanças. Tectonismo, composição original dos folhelhos, condições paleoclimáticas e condições de soterramento devem ser avaliados quando se procuram explicações para as características dos folhelhos.

Existem algumas diferenças mineralógicas e de diagênese identificadas entre folhelhos formados em ambientes marinhos e aqueles de ambientes lacustres (CANE, 1976). Ambos os tipos são formados predominantemente por argilo-minerais, quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, calcita e pirita, com siderita e dolomita como constituintes menores. Analcita -  $\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  -, uma zeólita rica em sódio, foi apenas detectada em folhelhos de origem lacustre e parece refletir variações no nível das lagoas. Ainda segundo o mesmo autor, na mineralogia das argilas estão as principais diferenças entre os dois tipos de folhelho: os de origem marinha são formados principalmente por caolinitas e illitas estratificadas aleatoriamente, enquanto folhelhos de origem lacustre apresentam estratificação ordenada, com cerca de 80% dos estratos com illitas ou illitas-cloritas e mais raramente cloritas-smectitas.

AMARAL (1971) atribui origem marinha para os sedimentos oleígenos de São Mateus do Sul, mas a hipótese alternativa de lagoas salinas fechadas também é levantada por outros pesquisadores (MAYNARD *et al.*, 1996). Certamente, um estudo aprofundado das populações de algas formadoras do querogênio poderá levar a maiores conclusões sobre alguns aspectos que podem sugerir ou lembrar grandes mangues sempre perturbados por *marés vermelhas*<sup>1</sup>.

UNDERWOOD (1967) relaciona parâmetros importantes para estudos de folhelhos, com relação aos aspectos necessários para sua classificação e identificação,

---

<sup>1</sup>Super populações de cianobactérias de grande importância nos ciclos do carbono e do nitrogênio na natureza.

próprios também para aplicação em um contexto de engenharia mineral: cimentação e consolidação, granulometria, classificação química e mineralógica, fissilidade, rigidez, módulo de elasticidade, umidade, densidade, proporção de vazios, permeabilidade, potencial de expansão (no caso, associação com argilas).

Com testes laboratoriais e avaliações *in situ*, pode-se obter os parâmetros associáveis a situações reais, como nível de *stress* da rocha, deformações de superfícies escavadas e deterioração das superfícies dos folhelhos, todos contribuintes para geração de material particulado.

## 5.2 Folhelhos oleígenos

Folhelho oleígeno é uma rocha sedimentar que contém matéria orgânica sólida e combustível em sua matriz mineral. A matéria orgânica é chamada querogênio, que por pirólise em temperaturas próximas de 500°C libera óleo, gases, água e resíduos (DURAND *et al.*, 1980).

Folhelhos oleígenos existem na coluna geológica desde depósitos do Cambriano, formados há mais de quinhentos milhões de anos, ao Terciário em depósitos formados nos últimos setenta milhões de anos. Podem ter sido formados em mares fechados, lagos, charcos, pântanos ou mangues (PETROBRAS, 1984). Os teores em óleo desses depósitos podem chegar até 60% em conteúdo de óleo, embora de forma excepcional (minério da Estônia), mas na maioria não ultrapassa os 20% em peso de óleo na rocha (BRUNI, 1976).

A composição da matéria orgânica dos folhelhos, que é um composto orgânico de grande peso molecular, varia de depósito para depósito, conforme as condições históricas de deposição e de sua natureza. Nos processos de extração do óleo, um dos parâmetros mais importantes a ser considerado é o conteúdo de hidrogênio em relação ao carbono no querogênio. Quanto maior a concentração de hidrogênio em relação ao carbono, maior é a capacidade de produção de óleo.

Em quase todos os folhelhos oleígenos do mundo existem, quartzo, feldspato, pirita, illita e outros argilo-minerais, além de comumente encontrarem-se calcita e dolomita. Já a matéria orgânica associada no folhelho pode ser *inerente* ou *neoformada*

(DURAND, 1980) o que torna mais complexa sua análise, seja por meios óticos como por meios químicos.

O ferro das piritas forma, por alteração, sulfatos e óxidos. A presença da pirita e da marcassita requer investigações através de análises de ferro, pois há uma distinção entre o enxofre presente no  $\text{FeS}_2$  e o enxofre existente na matéria orgânica (DURAND, 1980).

A matéria orgânica presente nos folhelhos oleígenos aumenta a tendência de arranjo paralelo da partículas de argilo-minerais (UNDERWOOD, 1967). Esse autor admite que o tipo de fissilidade não pode ser correlacionado com o tipo de argila presente na composição do folhelho e que intemperismo moderado aumenta a fissilidade dos folhelhos pela remoção de parte dos agentes cimentadores depositados ao longo dos planos paralelos ou pela expansão causada pela hidratação das argilas. Intemperismo intenso produz solos argilosos e com matéria orgânica residual.

Essas características acarretam incertezas nas análises elementares dos folhelhos oleígenos, que podem ser mascaradas pela presença de elementos tanto de origem orgânica quanto mineral, daí a necessidade da discriminação dos minerais constituintes em menor proporção da rocha, o que foi alcançado nesta pesquisa.

Foram encontrados nos folhelhos oleígenos de São Mateus do Sul alguns minerais não descritos anteriormente, como a analcita (mineral estável), a marcassita e a gipsita (minerais neoformados). É evidente que essas constatações têm que ser melhor investigadas, para se determinar até que ponto a influência de um sulfeto que não a pirita, com outras propriedades físico-químicas e um sulfato altamente solúvel, podem ter influência nos processos de deterioração da rocha.

### 5.3 Folhelhos oleígenos brasileiros

O Brasil é o segundo país do mundo em recursos<sup>1</sup> mundiais de óleo obtido de rochas oleígenas pirobetuminosas (BRASIL, 1988).

TABELA 2 - RECURSOS MUNDIAIS DE ÓLEO DE FOLHELHO OLEÍGENO

(Em milhões de barris de óleo)

PAÍS	SEG. US GEOLOGICAL SERVICE	SEG. NAÇÕES UNIDAS
EUA	2.200.000	1.158.000
Brasil	800.000	842.000
Antiga URSS (Estônia, principalmente)	115.000	104.300
R. D. Congo (ex-Zaire)	100.000	14.000
Canadá	50.000	35.000
Itália	35.000	38.500
China	28.100	27.300
Outros	11.645	15.462

FONTE: MOREIRA, 1978

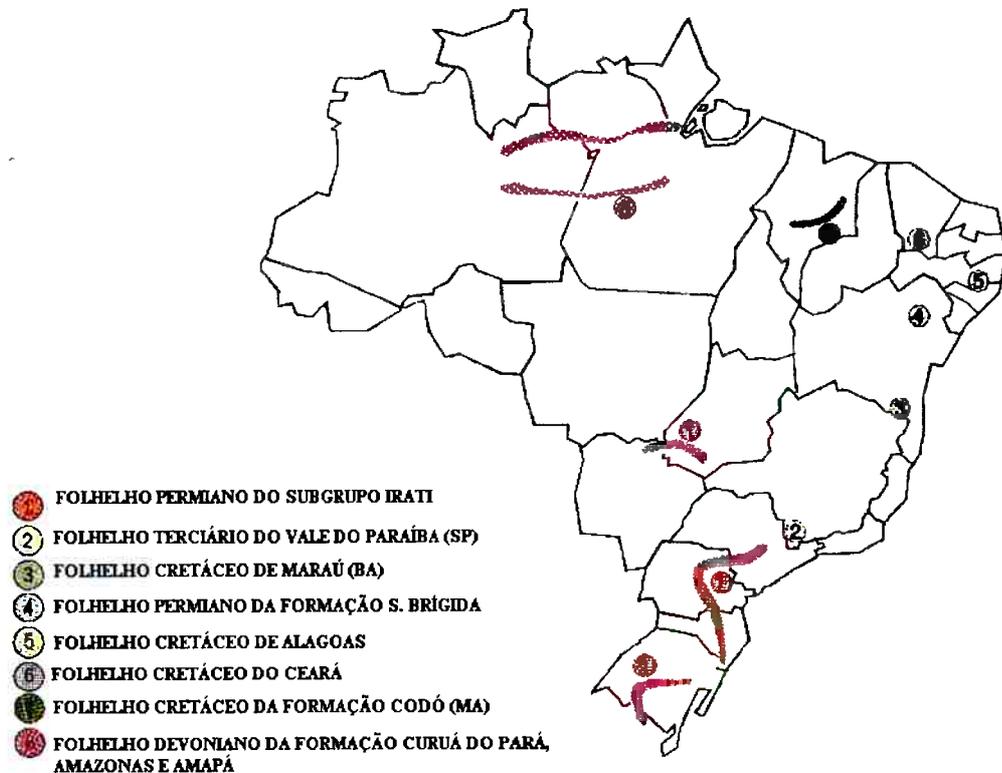
Tratando-se ainda de recursos, as principais regiões brasileiras com disponibilidade dessas rochas são:

- depósitos do Permiano da Bacia do Paraná (Subgrupo Irati), em pelo menos quatro estados (São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul);
- depósitos do Terciário do Vale do Paraíba (Formação Tremembé), São Paulo;
- depósitos do Permiano no Maranhão (Formação Codó), Ceará, Alagoas e Bahia (Formação Santa Brígida);
- depósitos do Devoniano do Pará e Amazonas (Formação Curuá).

Na Figura 19 estão representadas a configuração e a posição aproximadas dos principais depósitos de folhelhos oleígenos brasileiros.

<sup>1</sup>Essa classificação de recursos é bem menos precisa do que aquela que considera recursos *in situ*, a estimativa feita partir das fases de avaliação mineral, como amostragens e sondagens, preparação e análise de amostras, modelagem geológica, formação de base de dados, análise estatística e geoestatística e seleção de parâmetros econômicos (ANNELS, 1996).

FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DOS PRINCIPAIS DEPÓSITOS DE FOLHELHO OLEÍGENO NO BRASIL



FONTE: Petrobras, 1995

Até hoje, no Brasil, foram realizados estudos sistemáticos de aproveitamento somente nos folhelhos oleígenos do Terciário do Vale do Paraíba, Estado de São Paulo (Formação Tremembé) e nos folhelhos do Permiano do Subgrupo Irati.

### 5.3.1 Folhelhos do Vale do Paraíba, SP

Os folhelhos oleígenos brasileiros do Grupo Taubaté, no Vale do Paraíba, SP, têm problemas que não os torna promissores para extração, como: alto teor de umidade, baixo teor relativo de óleo ( $\pm 4\%$ ), complexas condições litoestratigráficas, localização dos depósitos em região extremamente crítica do ponto de vista socio-econômico, com intensa industrialização e terrenos valorizados.

A área de distribuição dos depósitos é grande (HASUY *et al.*, 1978) e se estende entre Quiririm e Roseira, em uma distância de 32km e com uma largura de 4 a 10km. Sua profundidade é variável, chegando até 300m. De fácies de água doce, os depósitos formaram-se em bacias e lagos tranquilos.

Estima-se a potencial de óleo nesses folhelhos em cerca de 2 bilhões de barris, em uma área de cerca de 200km<sup>2</sup>.

A Tabela a seguir mostra dados comparativos entre os folhelhos do Vale do Paraíba e outro depósito oleífero do Terciário, da Formação Green River, nos Estados Unidos. Esta síntese comparativa deveu-se a ensaios para interpretação das respostas de dois tipos de folhelho a testes de hidrogaseificação:

TABELA 3 - ANÁLISE QUÍMICA DE AMOSTRAS DOS FOLHELHOS GREEN RIVER (EUA) E DO VALE DO PARAÍBA (SP)

CARACTERÍSTICAS	(% em massa)	
	GREEN RIVER	VALE DO PARAÍBA
Umidade do material original	0,29	34,6
Cinza	53,1	68,0
Enxofre total	1,16	1,42
Carbono	29,8	17,3
Hidrogênio	3,44	2,82
Nitrogênio	0,5	-
Poder calorífico superior (kcal/kg)	2863	1923

FONTE: CIOLA R.; ELIAS M. J., 1981

Há uma notável diferença entre os teores de umidade na tabela, o que impede maiores comparações, principalmente de caráter tecnológico, entre os dois depósitos.

Green River é um importante depósito de folhelho oleífero, pesquisado principalmente no estado do Colorado (EUA), minerado subterraneamente na década de setenta, com cerca de 10% de finos totais rejeitados, mesmo com minério pirolisado *in situ*.

Os fósseis da Formação Green River – particularmente as plantas – indicam que o clima do Eoceno do Colorado, Wyoming e Utah já foi tropical ou subtropical.

#### 5.4 Folhelhos oleíferos do Subgrupo Irati

A escolha da região de São Mateus do Sul, como fonte de óleo em processos extrativos pioneiros, deveu-se principalmente pela composição de fatores como espessura de capeamento, espessura útil e teor médio em óleo. A Tabela 4 mostra dados comparativos entre diferentes regiões com rochas oleíferas do Subgrupo Irati pesquisadas pela PETROBRAS:

TABELA 4 - DADOS SOBRE AS RESERVAS DO SUBGRUPO IRATI

DADOS	PARANÁ (SÃO MATEUS DO SUL)	PARANÁ (RIO NEGRO/RIO IGUAÇU)	S. CATARINA (PAPANDUVA/TRÊS BARRAS)	R. G. DO SUL (S. GABRIEL/D. PEDRITO)
Área cubada (km <sup>2</sup> )	64,5	60,0	110,0	275,0
Capeamento médio (m)	17,5	30,0	25,0	17,5
Espessura útil (m)	9,6	3,1	10,1	2,9
Relação Folhelho/Estéril	1 : 2,7	1 : 4,6	-	1 : 6,1
Teor médio de óleo (%)	7,3	7,2	6,8	6,9
Óleo (10 <sup>6</sup> bbl)	560,0	173,0	580,0	705,0
GLP (10 <sup>6</sup> t)	3,9	1,2	4,0	5,0
Gás combustível (10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	19,0	5,9	19,7	24,3
Enxofre (10 <sup>6</sup> t)	8,7	2,7	9,0	11,0

FONTE: BRUNI, 1976

Com o progresso das pesquisa no depósito, esses valores foram sendo atualizados (Tabela 5), consolidando a situação da potencialidade brasileira em óleo e derivados de folhelho oleífero.

TABELA 5 - RESERVAS E RECURSOS NO FOLHELHO OLEÍGENO PIROBETUMINOSO DE SÃO MATEUS DO SUL, MOSTRANDO VARIAÇÕES EM RELAÇÃO À TABELA ANTERIOR

PRODUTO	SUBGRUPO IRATI		
	Reserva Medida	Recursos Prováveis	Reserva em São Mateus do Sul
Óleo de xisto (barris)	2,0 bilhões	50,0 bilhões	700 milhões
GLP (t)	25 milhões	600 milhões	9,0 milhões
Gás de xisto (m <sup>3</sup> )	68 bilhões	1.800 bilhões	25 bilhões
Enxofre (t)	48 milhões	1.200 milhões	18 milhões

FONTE: PETROBRAS, 1995

Na tabela a seguir, três autores expõem as seguintes composições médias para os folhelhos oleíferos do Subgrupo Irati em São Mateus do Sul:

TABELA 6 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DOS FOLHELHOS OLEÍGENOS DE SÃO MATEUS DO SUL

COMPONENTE	AMARAL (1981)	GROSSI SAD <i>et al.</i> (1984)	(Em %)	
			ESTA PESQUISA	
			Superior	Inferior
SiO <sub>2</sub>	43 a 55	63,4	45,22	50,01
TiO <sub>2</sub>	0,5 a 1,2	0,59	0,43	0,47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 a 6	14,3	10,09	11,21
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8 a 9	2,1	5,85	6,369
FeO	2 a 3	1,86		
MnO		0,02	0,14	0,02
MgO	1 a 9	2,3	1,76	1,74
CaO	2 a 13	0,88	7,93	1,05
Na <sub>2</sub> O	2 a 4	1,40	0,83	0,83
K <sub>2</sub> O	2 a 5	2,8	2,08	2,19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		0,13	0,48	0,41
SO <sub>3</sub>			5,37	5,93
F				
P. F.	13 a 30	0,120	19,67	19,65
		9,73		

Os folhelhos do Irati são pobres em alumina e ricos em sílica, e têm baixa porcentagem de argilo-minerais (AMARAL, 1981). Há uma nítida diminuição do cálcio da camada superior para a camada inferior de minério, enquanto os teores de enxofre, constantes na maior parte do depósito, decaem abruptamente nos últimos metros da camada inferior (GROSSI SAD *et al.*, 1984), com teores menores inclusive daqueles médios da camada superior. Teores de ferro e enxofre foram analisados mais esmiuçadamente no decorrer desta pesquisa, pelas características das piritas no depósito, que passaram a chamar a atenção por sua influência no processo de desestruturação da rocha.

Quanto a elementos traços, o chumbo, o molibdênio e o lítio são os de mais altos teores relativos, conforme mostra a Tabela 7:

TABELA 7 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS DOS ELEMENTOS TRAÇO NO FOLHELHO OLEÍGENO DE SÃO MATEUS DO SUL

ELEMENTO	TEOR (ppm)	ELEMENTO	TEOR (ppm)
Sb	6 - 11	V (136)	99 - 150
Se	< 5	Cr (122)	31 - 74
As (1,8)	55 - 71	Co (29)	11 - 22
Rb (78)	74 - 110	Ni (99)	21 - 50
Cs	10 - 22	Cu (70)	34 - 86
Br (2,5)	< 5	Ga (19)	10 - 17
Te	< 10	Y (31)	21 - 46
U (2,3)	< 20	Zr (162)	150 - 360
Bi	< 1	Mo [2,3]	10 - 26
Ge	< 1	Pb (13)	17 - 34
Zn (76)	53 - 95	Ba (390)	290 - 730
Cd [0,2]	< 1 - 1	Li (18)	31 - 70
Ag	< 2	Sr (384)	98 - 540
B (9,0)	14 - 48	Cl (126)	< 20 - 340
Sc (25)	5 - 8		

FONTE: GROSSI SAD, 1984

( ) abundância na litosfera superior (FORTESCUE, 1980)

[ ] conteúdo na litosfera (LINDSAY, 1979)

Folhelhos oleígenos, assim como outros sedimentos ricos em matéria orgânica, têm uma variedade muito grande de elementos traços, que têm potencial para causar problemas ambientais significativos (GLIKSON *et al.*, 1987). Nesse aspecto, os elementos mais importantes são os metais pesados, por não serem biodegradáveis e terem propriedades biocumulativas.

## 5.5 Propriedades tecnológicas do folhelho oleígeno

O principal produto extraído do folhelho oleígeno de São Mateus do Sul é o óleo combustível, por sua qualidade semelhante ao daquele obtido do petróleo convencional

TABELA 8 - ALGUMAS CARACTERÍSTICAS DOS ÓLEOS COMBUSTÍVEIS E, W E L, PRODUZIDOS PELA PETROBRAS/SIX, EM SÃO MATEUS DO SUL, PARANÁ, A PARTIR DO FOLHELHO OLEÍGENO PIROBETUMINOSO

CARACTERÍSTICAS	E	W	L
Ponto de fluidez, °C	+3	-12	-9
Viscosidade @37,8°C, cst <sup>2</sup>	210	24	6
Teor de enxofre,	1,0	1,0	1,0
Poder calorífico inferior, kcal/kg	9700	9800	9850
Ponto de fulgor, °C	100	70	66
Densidade relativa, 20°C/4°C	0,970	0,955	0,910

Um aspecto do minério de São Mateus do Sul, de fundamental importância para seu processamento é sua umidade. A Tabela 9 mostra dados de umidade, com valores de liberação de voláteis muito superiores aos desta pesquisa.

TABELA 9 - VALORES PERCENTUAIS OBTIDOS NA COMPOSIÇÃO DO FOLHELHO PIROBETUMINOSO DE SÃO MATEUS DO SUL

PROPRIEDADE	AMOSTRAS E TEORES (%)		
	1	2	3
Umidade (material seco ao ar)	2,6	1,8	2,9
Voláteis	24,4	25,0	26,4
Carbono fixo	10,6	11,2	8,1
Cinzas	62,4	62,0	62,6

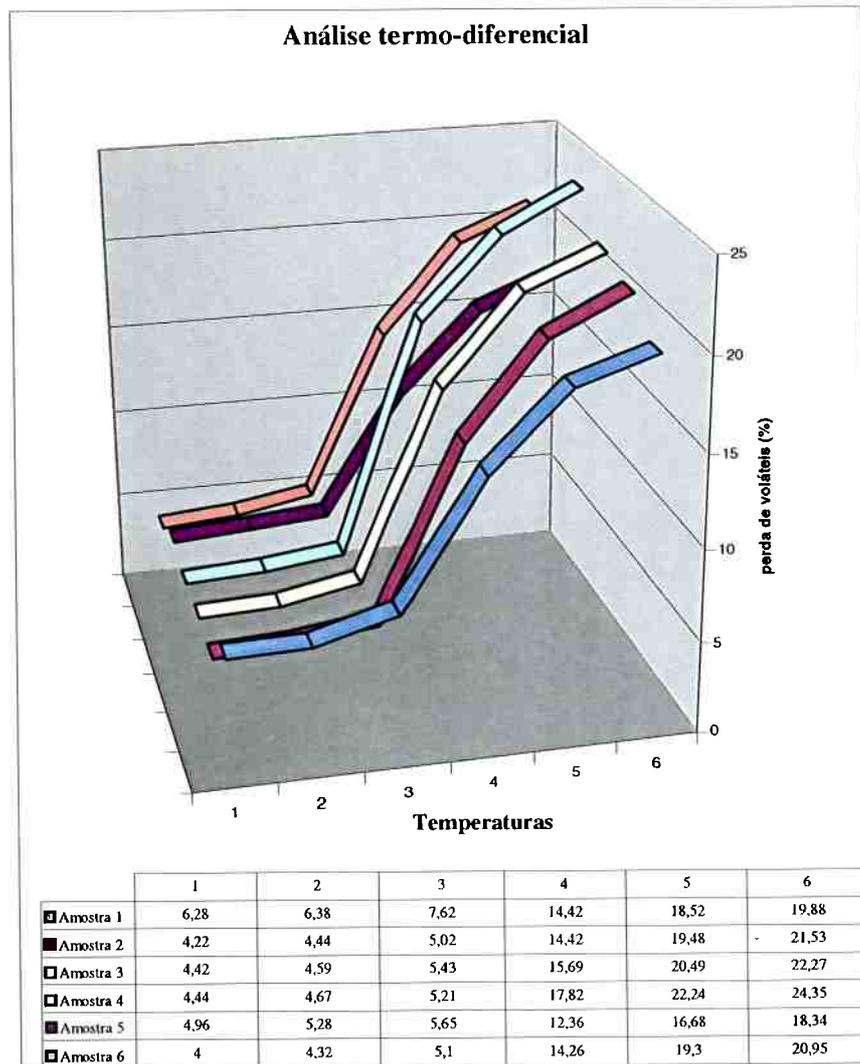
FONTE: ABREU, 1973

Para reconhecer o comportamento de liberação de água e voláteis dos dois tipos distintos de minério, da camada superior e da inferior, foram realizados ensaios de aquecimento controlado, onde foram tomadas medidas de perdas percentuais de massa em amostras aquecidas a temperaturas de 105°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C e 800°C, respectivamente, por períodos de 24 horas.

<sup>2</sup>Centistoke (cst) – uma unidade de viscosidade cinemática. 1 centistoke = 0.01 stoke

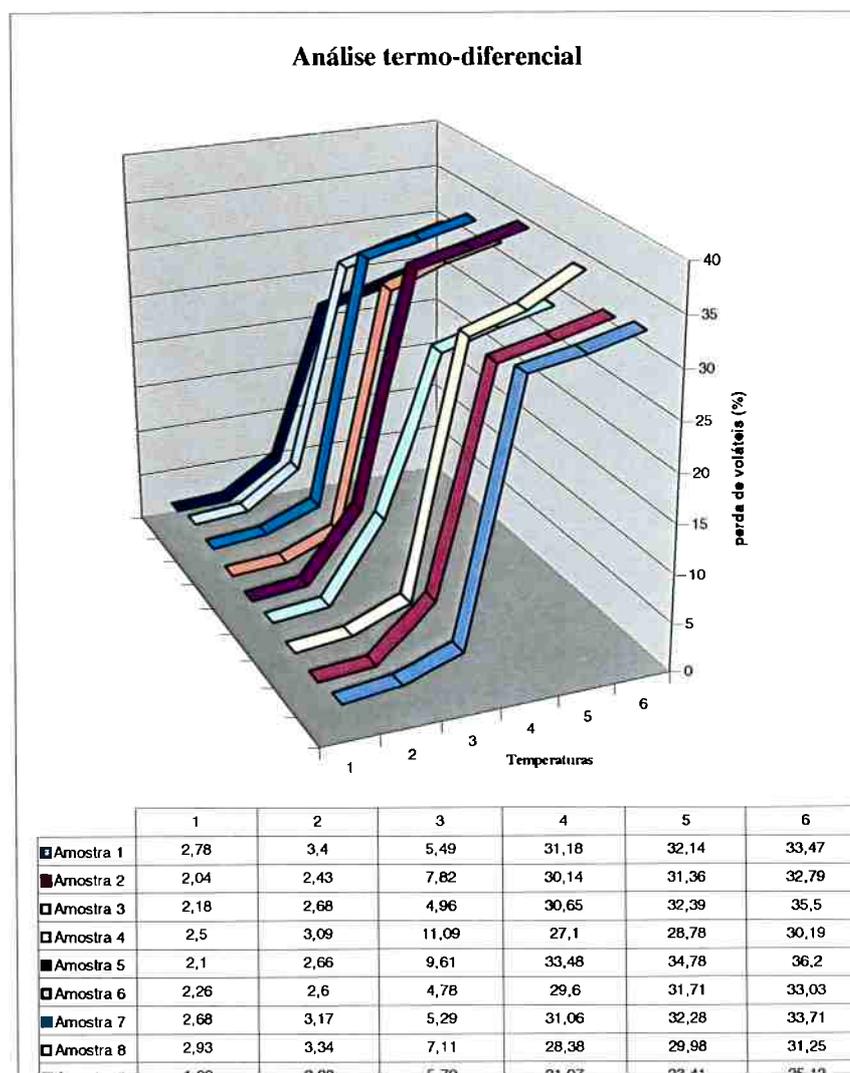
Nos gráficos a seguir, estão expostos resultados obtidos nesta pesquisa em análises de liberação de voláteis em temperaturas progressivas, em amostras sucessivas das duas camadas de minério (6 da superior e 9 da inferior), submetidas a queima durante períodos de 24 horas:

FIGURA 20 - GRÁFICO COM AS TEMPERATURAS DE LIBERAÇÃO DO ÓLEO NA CAMADA SUPERIOR



1 (105°C); 2 (200°C); 3 (300°C); 4 (400°C); 5 (500°C); 6 (800°C)

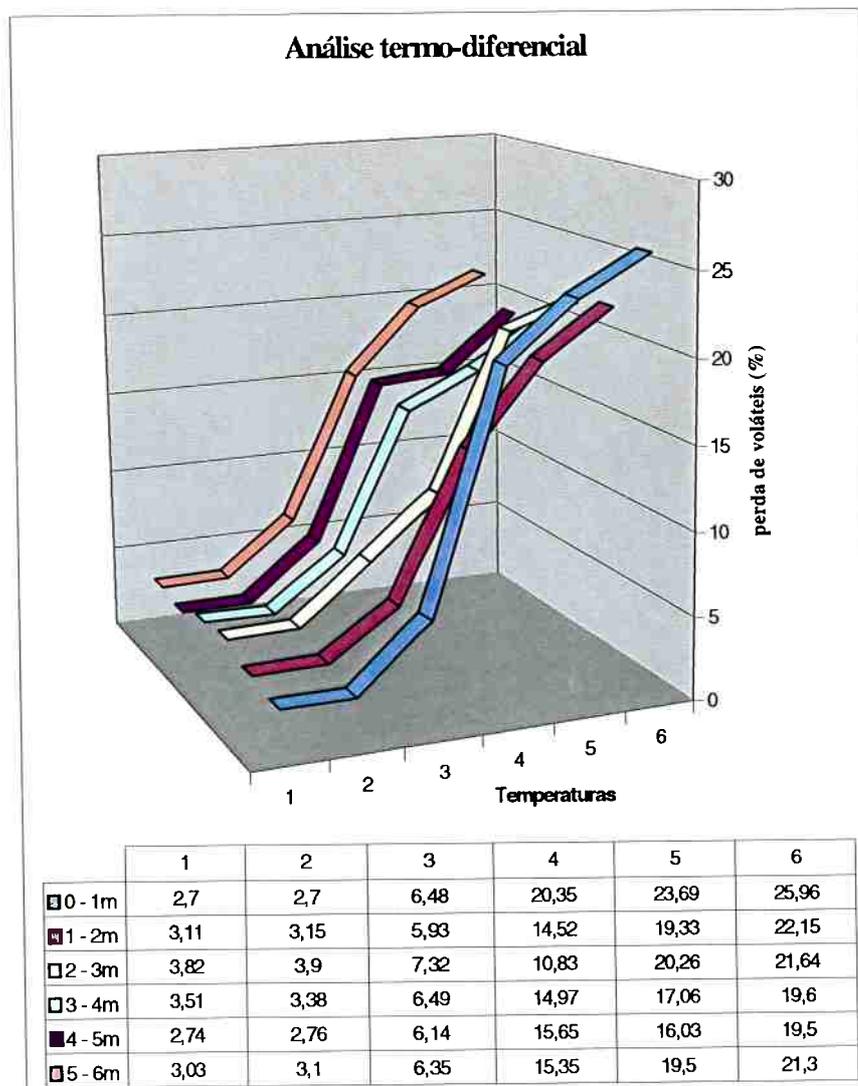
FIGURA 21 - GRÁFICO COM TEMPERATURAS DE LIBERAÇÃO DE ÓLEO NA CAMADA INFERIOR



1 (105°C); 2 (200°C); 3 (300°C); 4 (400°C); 5 (500°C); 6 (800°C)

Os resultados mostraram padrões diferenciados nas evoluções de liberação das amostras das duas camadas, pois enquanto a liberação dos voláteis na camada superior ocorre de forma mais homogênea entre 105°C e 800°C, na camada inferior a liberação de voláteis ocorre quase que totalmente entre 300°C e 400°C. Existe a possibilidade desses comportamentos estarem relacionados aos espaços vazios diferenciados em cada tipo de minério.

FIGURA 22 - GRÁFICO COM AS TEMPERATURAS DE LIBERAÇÃO DE ÓLEO EM PORÇÕES SUCESSIVAS DA CAMADA SUPERIOR



1 (105°C); 2 (200°C); 3 (300°C); 4 (400°C); 5 (500°C); 6 (800°C)

Na camada superior, as análises de liberação de voláteis em amostras tomadas em intervalos regulares de 1m, do topo para a base da camada, mostram que a liberação não ocorre de forma homogênea, ainda que a maior parte dos voláteis seja liberada entre 300°C e 500°C, confirmando, na média, os valores encontrados para as amostras globais da Figura 22.

## 5.6 Mineralogia dos folhelhos oleígenos de São Mateus do Sul.

Folhelhos são compostos normalmente por micas e argilo-minerais, mas a granulometria extremamente fina e a homogeneidade da rocha torna difícil a identificação de minerais individuais.

TABELA 10 - MINERALOGIA DO FOLHELHO OLEÍGENO PIROBETUMINOSO DE SÃO MATEUS DO SUL

MINERAL	(% em massa)	
	CAMADA SUPERIOR	CAMADA INFERIOR
Quartzo	50-60	40-50
Feldspato	10-15	5-10
Illita	10-15	10-15
Caolinita	3-5	± 3
Pirita	3-5	± 10

FONTE: WOLF; Corrêa da Silva, 1974

TABELA 11 - MINERALOGIA DO FOLHELHO OLEÍGENO PIROBETUMINOSO

MINERAL	PORCENTAGEM EM VOLUME
Albita	12,5-13,5
Pirita	2-3
Calcita	1-3
Hidromoscovita	17-21
Quartzo	28-38
Hematita	3,5-5,5
Matéria orgânica	17-35

FONTE: GROSSI SAD, 1984

Análises feitas pela GEOSOL (GROSSI SAD, 1984) em amostras de seis subdivisões das camadas inferior e superior do folhelho oleígeno mostraram as seguintes proporções mineralógicas nas duas camadas:

TABELA 12 - COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA EM TRÊS NÍVEIS DAS DUAS CAMADAS DE ROCHA OLEÍGENA

MINERALOGIA	(% em peso)					
	CAMADA SUPERIOR			CAMADA INFERIOR		
	Topo	Meio	Base	Topo	Meio	Base
Quartzo	38	30	35	30	32	35
Plagioclásio	18	29	21	20	19	20
Filossilicatos	23	18	20	4	3	3
Pirita	4	3	3	4	3	3
Calcita	0,5	1,5	1,5	0,5	0,5	1
Matéria orgânica	14	9	9	23	24	18

Nitidamente, há uma maior concentração de argilo-minerais na camada superior de minério, bem como muito mais matéria orgânica na camada inferior, mas as outras informações da tabela parecem pouco conclusivas.

Os minerais identificados nesta pesquisa, em análises por difratometria de raios-X estão apresentados na tabela a seguir. Não foram feitas quantificações precisas, nem análises detalhadas dos óxidos presentes, pois a revisão dos dados quantitativos obtidos pela GEOSOL, durante a pesquisa da área, mostrou que, apesar da variabilidade do depósito, nenhuma correlação foi comprovada entre composições químicas, e portanto refletindo mineralogia, com os teores de óleo e enxofre ou a tendência da formação de finos.

A análise foi efetuada através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios-X, marca Philips, modelo MPD 1880.

TABELA 13 - MINERAIS ENCONTRADOS NESTA PESQUISA EM ANÁLISES POR DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X, EM AMOSTRAS DAS CAMADAS SUPERIOR E INFERIOR DE MINÉRIO

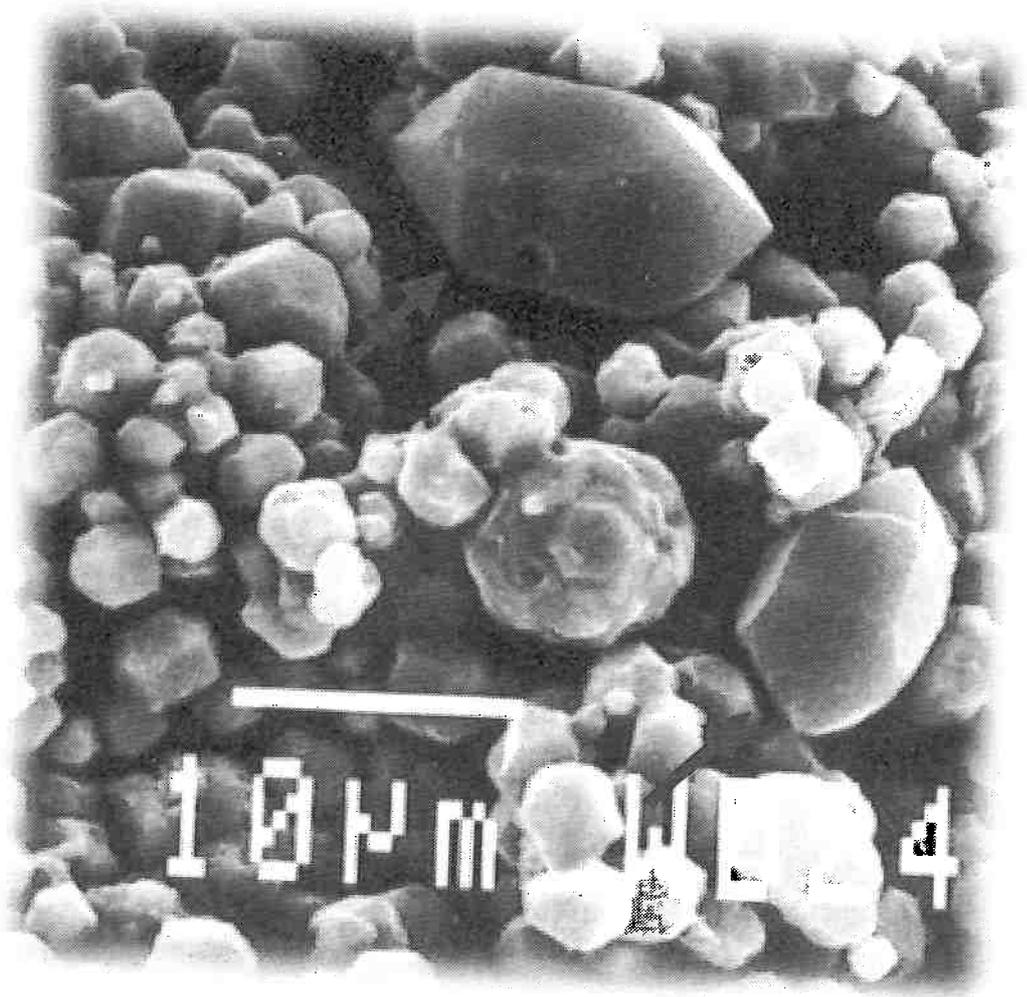
Predominantes	Quartzo Plagioclásio Dolomita Calcita Pirita Mica/Ililita	$\text{SiO}_2$ $(\text{Na, Ca}) \text{Al} (\text{Si, Al})_3 \text{O}_8$ $\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$ $\text{CaCO}_3$ $\text{FeS}_2$ $\text{H}_2\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Subordinados	Mica-Biotita? Mica-Muscovita Caolinita	$\text{H}_4 \text{K}_2 \text{Mg}_6 \text{Al}_2 \text{Si}_6 \text{O}_{24}$ $\text{H}_2 \text{K Al}_3 \text{Si}_3 \text{O}_{12}$ $\text{Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_5 (\text{OH})_4$
Ocasionais	Apatita Montmorillonita? Analcita Marcassita	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3 \text{F}$ $\text{CaO} \cdot 2(\text{Al, Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})$ $\text{Na} (\text{Si}_2\text{Al}) \text{O}_6 \text{H}_2\text{O}$ $\text{FeS}_2$

Muitas vezes aparecem na rocha lâminas submilimétricas irregularmente espaçadas, de coloração mais clara, constituídas por grãos de quartzo na fração silte médio a grosso.

Os folhelhos contém grande parte do quartzo existente nas rochas sedimentares. Esses grãos, que são química e fisicamente resistentes e sua origem pode ser tanto atribuída a deposições detríticas como por precipitações *in situ*, relacionadas a diagênese atuando em esqueletos de organismos plantônicos (SCHIEBER, *et al*, 2000).

Através de microscopia eletrônica de varredura, foi observada nesta pesquisa a presença de cristais de quartzo micrométricos em amostras da primeira camada, preservando sua cristalização hexagonal com terminação em pirâmides romboédricas, caracterizando sua origem não-detrítica. (Figura 24).

FIGURA 24 - CRISTAIS DE QUARTZO BIPIRAMIDAIIS HEXAGONAIS, OBSERVADOS EM MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA. AMOSTRA DO TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO



Na Figura 26, observam-se as evidências de pequena movimentação tectônica na base da Formação Serra Alta afetando os folhelhos da camada superior. Constatou-se aumento da friabilidade do material adjacente ao plano de falha, com conseqüente perda de qualidade mecânica do minério. Esse fato é relevante, pois, como pode ser observado nas frentes de lavra, opta-se por desprezar essas faixas cizalhadas com recristalização calcítica típica.

Na Figura 27 exibe-se o nível de calcário disposto no contato entre a camada superior de minério e o topo da camada estéril intermediária. Como uma barreira, essa lente carbonática interpõe-se ao fluxo de percolação ácida descendente, inibindo as alterações químicas aceleradas pelas lixívias. Esse calcário também é empregado como um subproduto da lavra de folhelho pirobetuminoso.

FIGURA 26 - ASPECTO DO DESLOCAMENTO DAS CAMADAS DO CONTATO ENTRE OS SEDIMENTOS DA FORMAÇÃO SERRA ALTA E OS SEDIMENTOS OLEÍGENOS DO TOPO DA CAMADA SUPERIOR DO SUBGRUPO IRATI NO PLANO DE FALHA E - W, NO EXTREMO NORTE DA ÁREA DA MINA



FIGURA 27 - VISTA DO NÍVEL DE CALCÁRIO CARACTERÍSTICAMENTE DISPOSTO NO CONTATO ENTRE A CAMADA SUPERIOR DE FOLHELHO E O TOPO DA CAMADA INTERMEDIÁRIA, JUNTAMENTE COM INTERESTRATIFICAÇÕES DE FOLHELHO/MARGA DOLOMÍTICA



## 6.1 Trabalhos de pesquisa prévios

Para fins de estudos comparativos das rochas oleígenas na área do módulo industrial de São Mateus do Sul, foram analisados os dados gerados para o Relatório Final de Pesquisa da PETROBRAS/SIX, feito pela GEOSOL Geologia e Sondagens Ltda., em 1983. São informações detalhadas, apesar de antigas, da mais completa pesquisa geológica feita no depósito.

Durante o período desta pesquisa, foram compiladas e analisadas informações de 301 de furos de sondagem, com metragem total perfurada de 8142,75m. Nessas sondagens foi alcançada uma profundidade máxima de 41,89m e profundidade mínima de 7,50m, com profundidade média de 27,05m e recuperação média de 97,50%.

Na campanha da GEOSOL, a amostragem dos testemunhos foi em intervalos de 0,40m nas camadas do Subgrupo Irati, gerando um total de 8039 amostras, assim distribuídas:

- Camada superior: 2605 amostras
- Camada intermediária, com carbonatos e siltitos: 1091 amostras
- Camada inferior: 2077 amostras
- Camada basal: 2266 amostras

Atualmente, amostragem de acompanhamento é feita através de captação de pó de rocha produzido pelas perfuratrizes durante a preparação de detonação. Esse procedimento é adotado continuamente pelo setor de engenharia de minas da PETROBRAS/SIX. Alguns atributos observados nos folhelhos oleígenos:

- **Designação da qualidade da rocha (RQD)**

Foi determinado no local do furo, antes da partição dos testemunhos e suas colocações nas caixas, e baseia-se na porcentagem de "fraturas naturais" e provocadas pelo processo de perfuração que originam fragmentação dos testemunhos, por metro.

- **Grau de fraturamento**

Para determinação do grau de fraturamento, deve-se levar em conta as seguintes considerações:

- a) a Formação Serra Alta pode ser considerada praticamente homogênea;
- b) a Formação Irati pode ser subdividida em cinco unidades: camada superior, camada de marga, camada de siltito, camada inferior e camada basal.

A PETROBRAS/SIX define como fratura qualquer plano de partição não cimentado secundariamente por calcita, pirita, etc., vertical ou inclinado, que não corresponda a um plano de estratificação ou fissilidade. No caso de planos de fraturas semi-horizontais, contam-se apenas os que exibem espelhos de movimentação. Para a determinação do grau de fraturamento contam-se todas as fraturas de um intervalo de interesse e divide-se seu número pela metragem.

O grau de fraturamento foi estabelecido de acordo com as seguintes escalas de fraturamentos por metro :

TABELA 15: ESCALA DE GRAU DE FRATURAMENTO

	N.º FRATURA
não fraturada	< 1
pouco fraturada	1 a 5
Medianamente fraturada	6 a 10
muito fraturada	11 a 20
Extremamente fraturada	> 20

FONTE: GROSSI SAD, 1979

TABELA 16 - EXEMPLO DA ESCALA DE GRAU DE FRATURAMENTO DE MATRIÇAS DE PROSPECÇÃO DO DEPARTAMENTO DE MINAS

UNIDADE LITOLÓGICA (m)	até (m)
Solo e argilitos da Formação Serra Alta	0,0 a 0,70
Camada superior	0,70 a 4,21
Marga	4,21 a 6,35
	6,35 a 7,71
	7,71 a 8,68
	8,68 a 10,69
	10,69 a 11,60
Siltito	11,60 a 12,84
	12,84 a 13,26
	13,26 a 15,23
Camada inferior	15,23 a 16,03
	16,03 a 18,58
Camada basal	18,58 a 21,81
	21,81 a 21,90

FONTE: GROSSI SAD, 1979

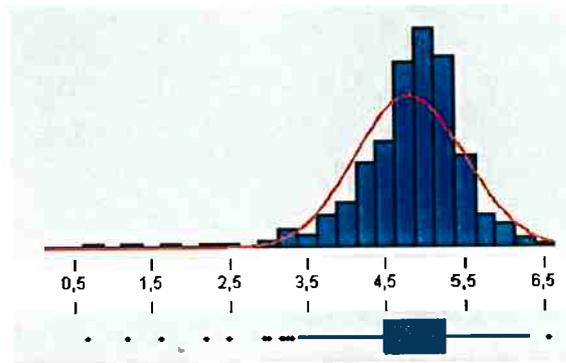
A PETROLOGIA apresenta uma classificação de alteração da ação da água sobre os folhelhos olivinosos.

- Grau 1
- Grau 2
- Grau 3
- Grau 4

Na classificação de alteração, enquanto era grau 1 e 4, as diferenças de alteração 2 e 3 apresentam as seguintes diferenças (GROSSI SAD, 1979):

FIGURA 29 -RESULTADOS ESTADÍSTICOS OBTIDOS A PARTIR DOS DADOS DE PESQUISA SOBRE TEORES DE ENXOFRE NO MINÉRIO DE SÃO MATEUS DO SUL

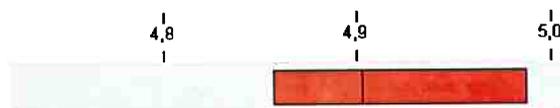
Enxofre da camada inferior



Média: 4,81977  
 Desvio padrão: 0,69563  
 Variância: 0,483908  
 Curtose: 6,50549  
 N: 365  
 Mínimo: 0,67929  
 Máximo: 6,54204

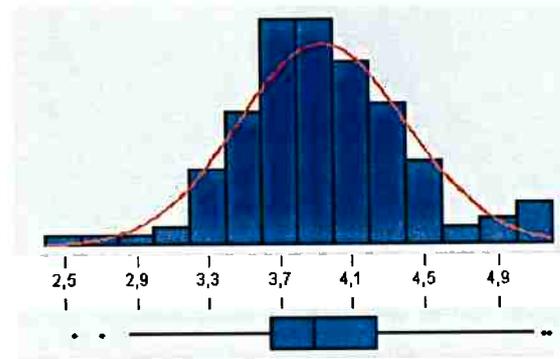
Intervalo de confiança (95%) para desvio padrão: 0,64857 0,75013

Intervalo de confiança (95%) para média: 4,85678 4,98659



Intervalo de confiança (95%) para média

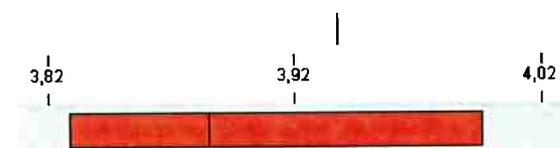
Enxofre da camada superior



Média: 3,93812  
 Desvio padrão: 0,46819  
 Variância: 2,52819  
 Curtose: 0,688306  
 N: 143  
 Mínimo: 1,8984  
 Máximo: 5,17262

Intervalo de confiança (95%) para desvio padrão 0,41949 0,52977

Intervalo de confiança (95%) para média 3,82885 3,99577



Intervalo de confiança (95%) para média

FIGURA 30 - ISOTEORES DE ÓLEO NA CAMADA SUPERIOR DO FOLHELHO. NO EIXO Z ESTÁ MARCADA A ESCALA DE TEORES DE ÓLEO. DEPRESSÕES INDICAM TEORES MENORES.

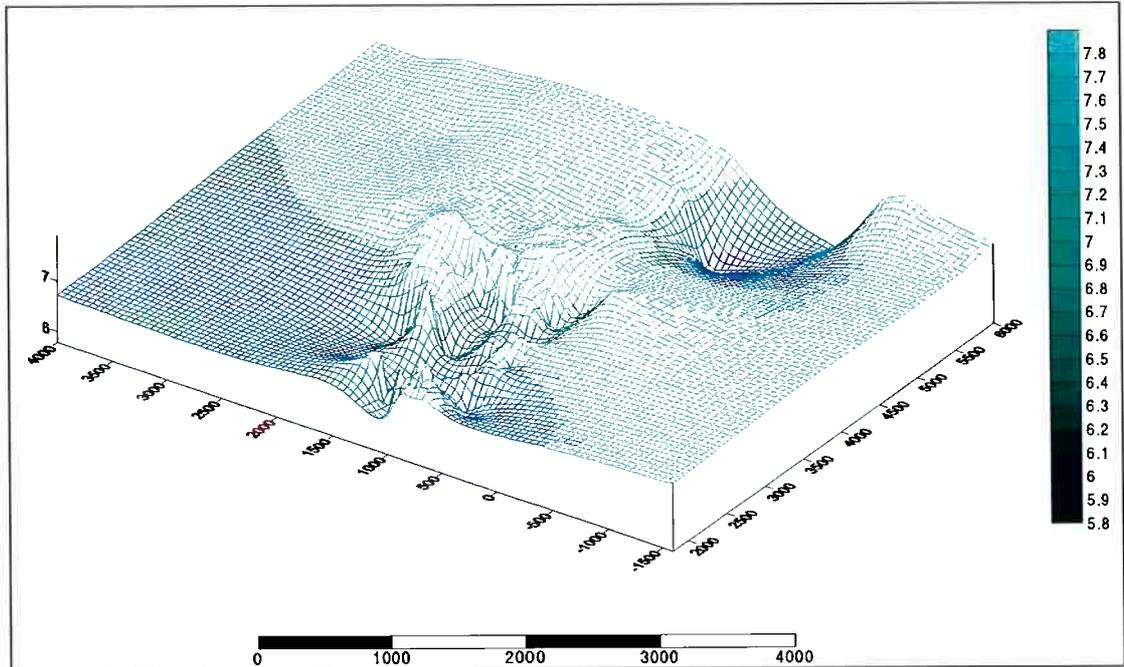


FIGURA 31 - ISOTEORES DE ÓLEO NA CAMADA INFERIOR DE FOLHELHO. NO EIXO Z ESTÁ MARCADA A ESCALA DE TEORES DE ÓLEO. DEPRESSÕES INDICAM TEORES MENORES

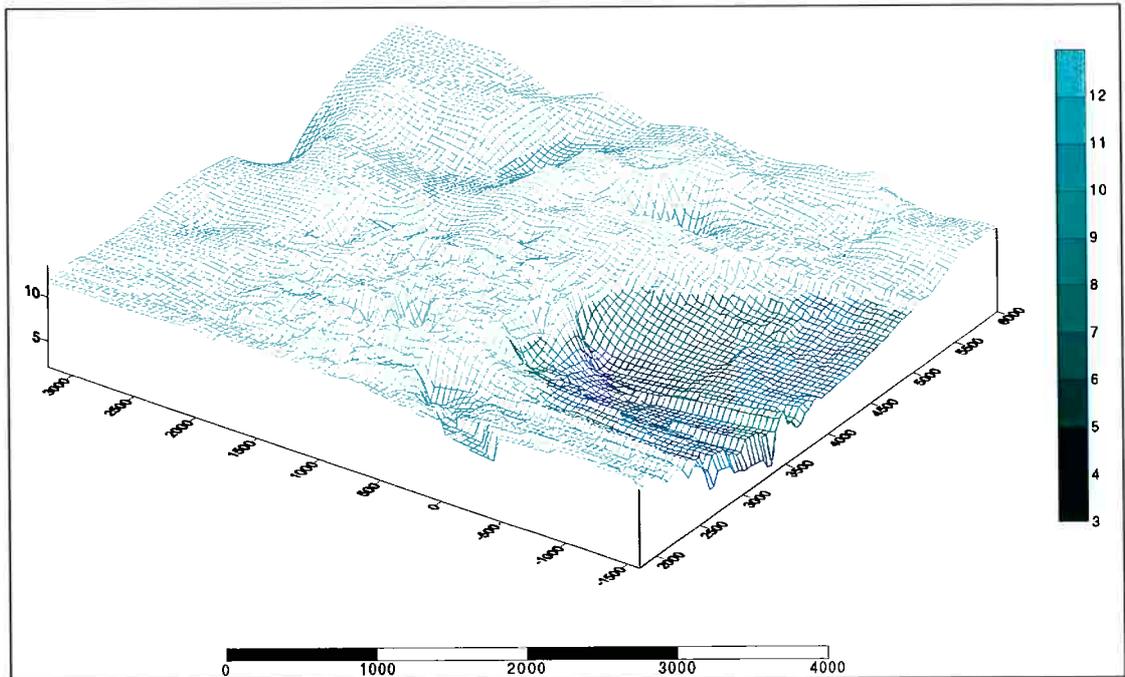


FIGURA 32 - ISOTEROS DE ENXOFRE NA CAMADA SUPERIOR DE FOLHELHO. NO EIXO Z ESTÁ MARCADA A ESCALA DE TEORES DE ENXOFRE. DEPRESSÕES INDICAM TEORES MENORES

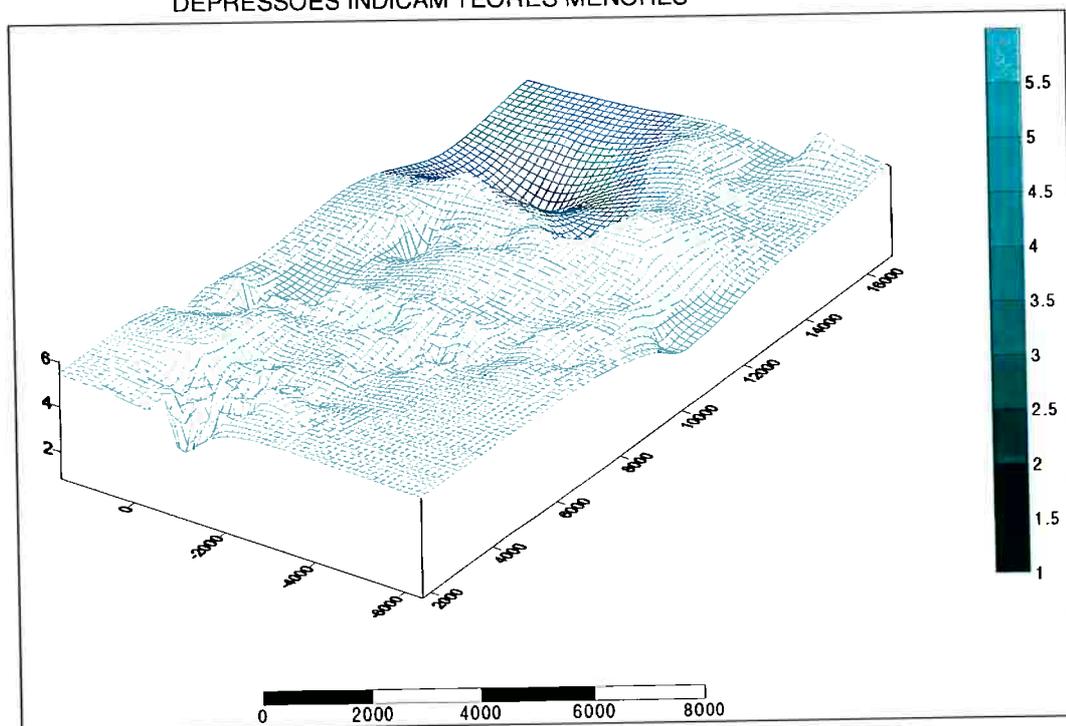
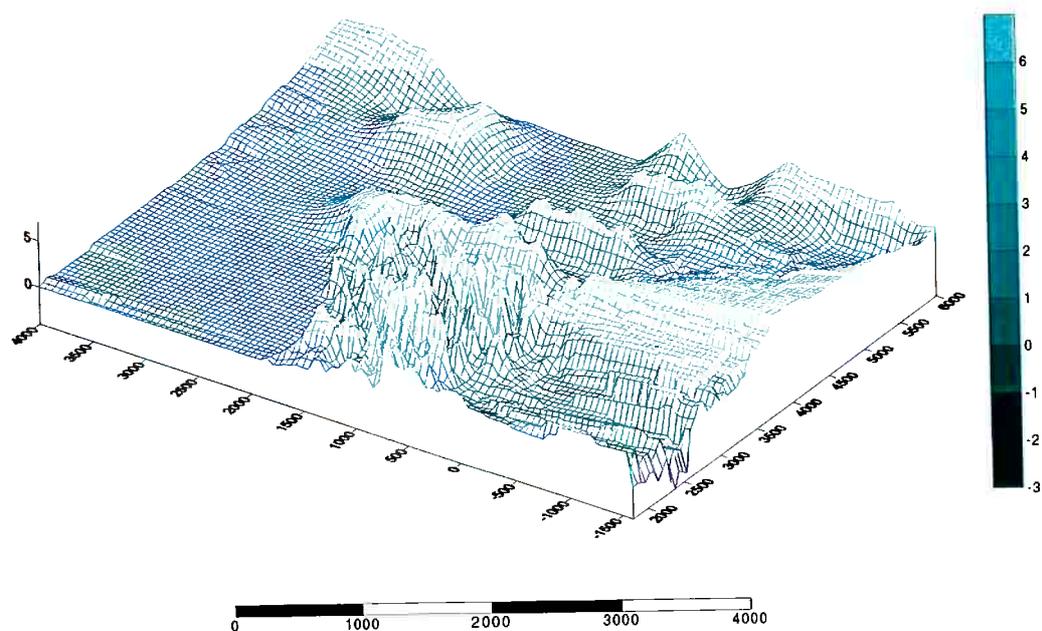


FIGURA 33 - ISOTEROS DE ENXOFRE NA CAMADA INFERIOR DE FOLHELHO. NO EIXO Z ESTÁ MARCADA A ESCALA DE TEORES DE ENXOFRE. DEPRESSÕES INDICAM TEORES MENORES



Considerando que a reconstituição do ambiente de sedimentação dos folhelhos oleígenos é uma etapa importante para compreensão das propriedades estruturais da rocha e para as interpretações sobre as relações físico-químicas entre seus componentes, iniciou-se, com essas informações sobre instigante correlação detectada, o direcionamento definitivo para este trabalho, enfocando mais precisamente as características de alteração dos sulfetos na rocha.

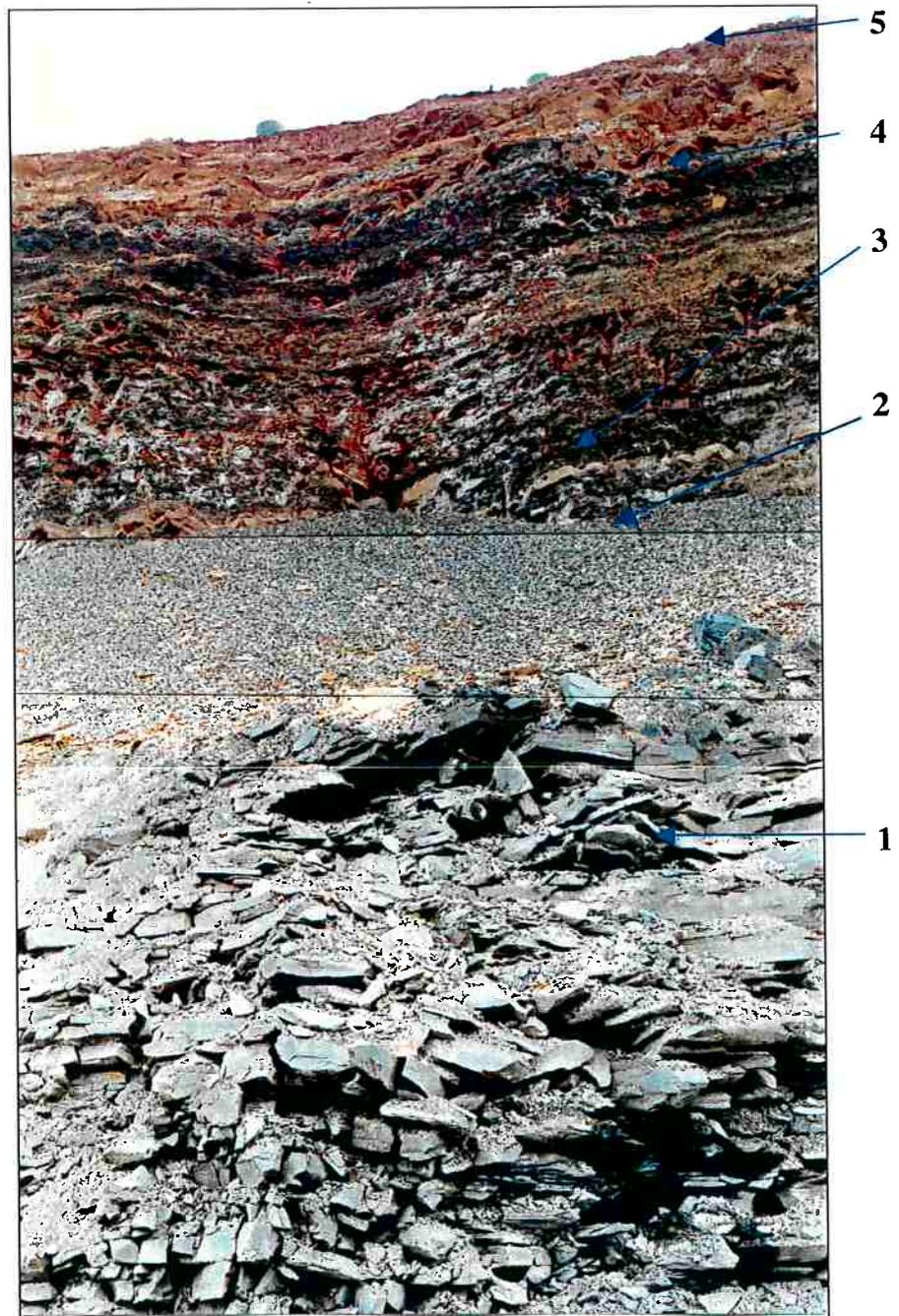
O teor de óleo no minério apresenta variações que são controladas para a formação da carga de retortagem, através de misturas do minério da camada inferior com o da superior.

Dois problemas se apresentam: como a espessura da camada superior é quase três vezes maior que a da camada inferior, que apresenta maiores teores, a mistura de "minério rico" e "minério pobre" tem que ser muito bem programada, principalmente pelo fato da qualidade mecânica do minério cair abruptamente a partir de um certo período de tempo de exposição ao intemperismo (Figura 34). Esse fato, certamente ligado a características de permeabilização do minério e modificação das argilas, impõe restrições ao andamento da lavra.

Considerando que a mina Paiol Grande encerra suas atividades em 2001, os novos depósitos de folhelho oleígeno em São Mateus do Sul deverão ser lavrados em um contexto de menor número de informações geológicas obtidas através de furos de sondagem. É coerente o emprego de grande parte das informações anteriores, obtidas a cerca de vinte anos, visto que a homogeneidade lateral dos folhelhos do Subgrupo Irati, no que diz respeito a teores da maior parte de seus componentes, é bem estabelecida. A operação contínua e adequada da PETROBRAS/SIX durante todo esse tempo reflete-se hoje em excelente produtividade.

Para a contenção e impedimento de formação de finos de mineração, deve-se partir agora para o detalhamento das investigações sobre os minerais do depósito, suas distribuições e correlações com zonas de rochas mais físseis. Associado a isto, a interpretação paleoambiental dos estágios de sedimentação da matéria organo-mineral deve ser a orientação dos estudos sobre a variabilidade vertical dos atributos do depósito.

FIGURA 34 - EXPOSIÇÃO DE PERFIL COMPLETO DO DEPÓSITO SEDIMENTAR LAVRADO EM SÃO MATEUS DO SUL, COM SEDIMENTOS AMARELOS DA FORMAÇÃO SERRA ALTA (5); FOLHELHOS OLEÍGENOS SUPERIORES (4); CAMADA INTERMEDIÁRIA SEM ÓLEO (3); FINOS DECORRENTES DA DECOMPOSIÇÃO DAS CAMADAS SUPERIORES (2); CAMADA INFERIOR DE FOLHELHO OLÉÍGENO (1)



Aparentemente semelhantes em uma primeira observação, as camadas oleígenas de folhelho de São Mateus do Sul exibem diferenças marcantes que influenciam todos os procedimentos de lavra. Os teores em óleo da camada superior são sempre inferiores, sua resistência física, exceto em algumas estreitas faixas próximas à base, é menor e totalmente dependente das espessuras do capeamento das rochas da Formação Serra Alta.

A pequena pressão de sobrecarga, a facilidade de percolação de água do ambiente e de soluções ácidas levam a grande aceleração dos processos de desintegração da rocha nos níveis mais altos da camada superior. É fácil notar, em blocos fendidos principalmente, a ação de cimentos calcíticos na preservação de rochas maiores e a variedade de alterações mineralógicas em faces expostas da foliação.

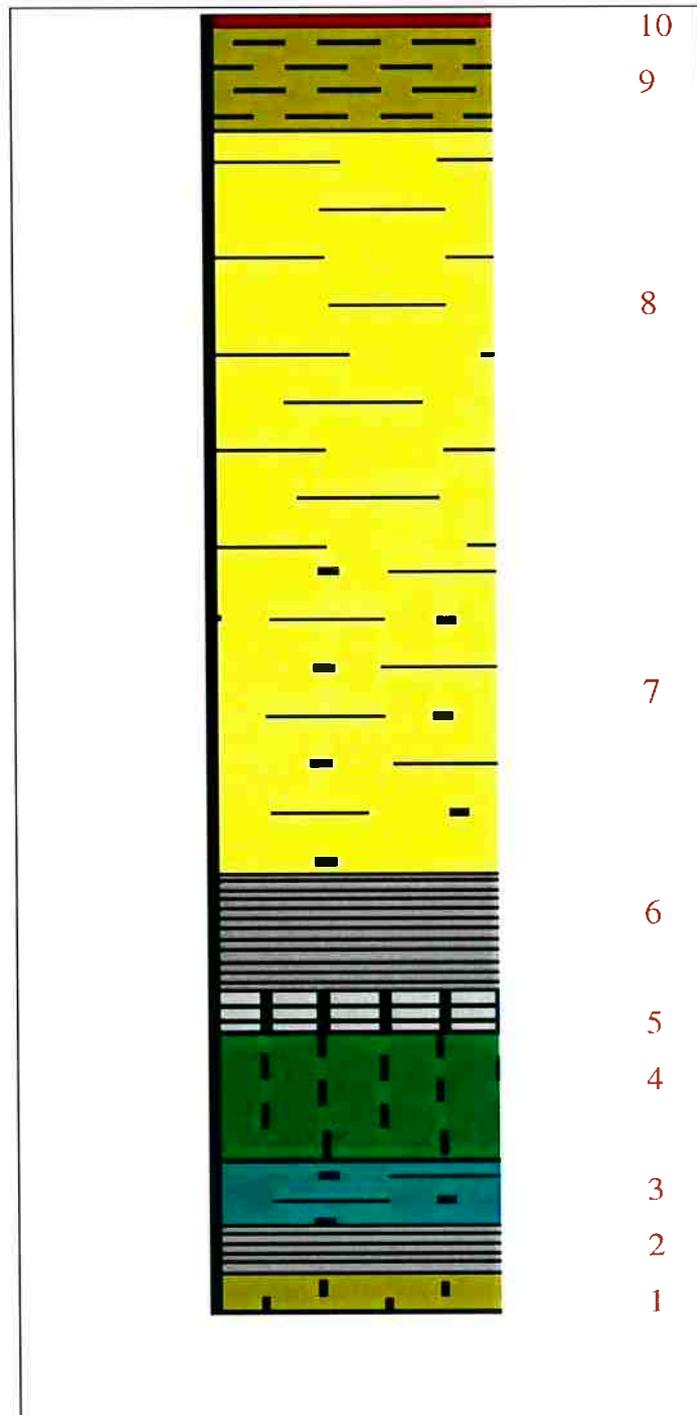
Outra distinção está no conteúdo fóssilífero: exemplares de *Mesosaurus brasiliensis* (MAC GREGOR, 1908) aparecem em muito maior quantidade na camada superior, principalmente no topo da camada, na faixa de contato com a cobertura síltico-argilosa. Na camada inferior, além da ausência de fósseis desses descendentes dos répteis, é abundante a presença de escamas de peixes de dimensões centimétricas.

Como descrito em perfis, os estratos oleígenos são distintos também na quantidade de variações milimétricas de tonalidade e textura, presentes em maior número na camada superior e associadas a faixas de baixa resistência mecânica da rocha.

Na figura a seguir está exposto um perfil típico de um corte do depósito de São Mateus do Sul, mostrando suas litologias principais (furo 5200/400, área da Usina Industrial).

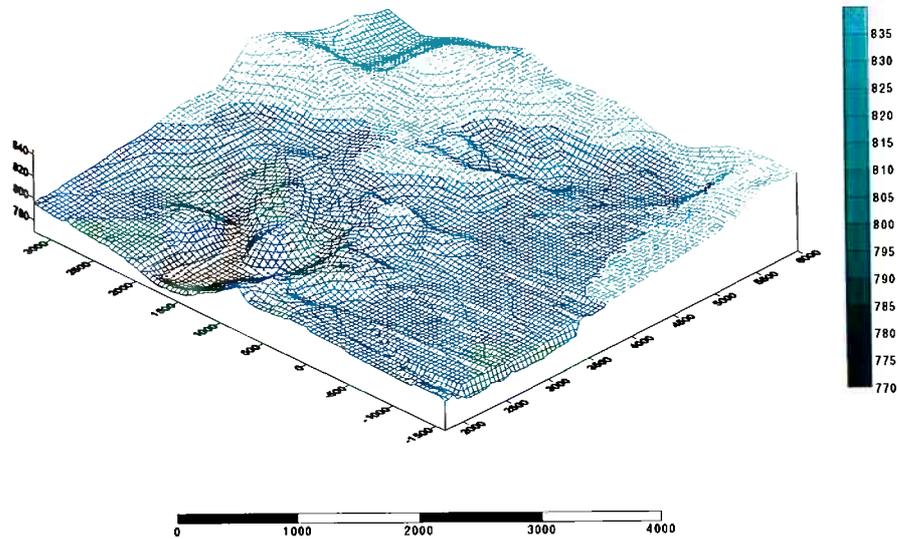
Na Figura 36, está exposta a configuração espacial original da topografia de superfície das camadas de minério oleígeno. Pode-se observar que a camada inferior reflete em seu topo os efeitos da pressão das litologias de cobertura, praticamente não exibindo desníveis. Na representação da camada superior, além dos pontos onde a erosão já retirara o folhelho, pode-se observar como os pontos de alívio de carga em determinados trechos da mina facilitou a deformação da camada, normalmente ao acamamento.

FIGURA 35 - PERFIL TÍPICO DE UM CORTE DO DEPÓSITO DE SÃO MATEUS DO SUL

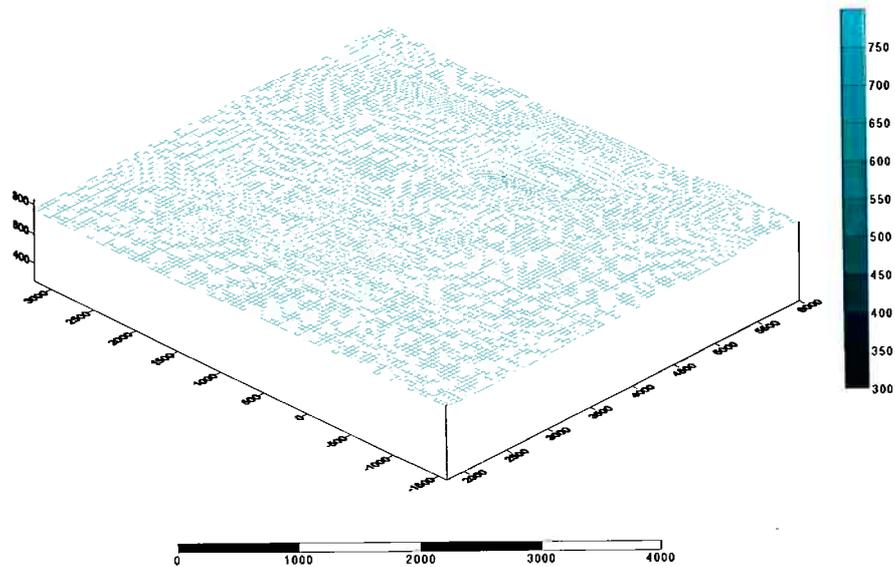


1 Formação Palermo; 2 camada inferior de folhelho oleígeno pirobotuminoso do Subgrupo Irati; 3 siltitos da camada intermediária estéril; 4 marga dolomítica da camada intermediária estéril; 5 lente de calcário; 6 camada superior de folhelho oleígeno; 7 siltitos argilosos da Formação Serra Alta; 8 argilitos da Formação Serra Alta, 9 solo, 10 solo orgânico

FIGURA 36 - CONFIGURAÇÃO ESPACIAL ORIGINAL DO TOPO DAS CAMADAS DE MINÉRIO



Topografia original da camada superior de minério



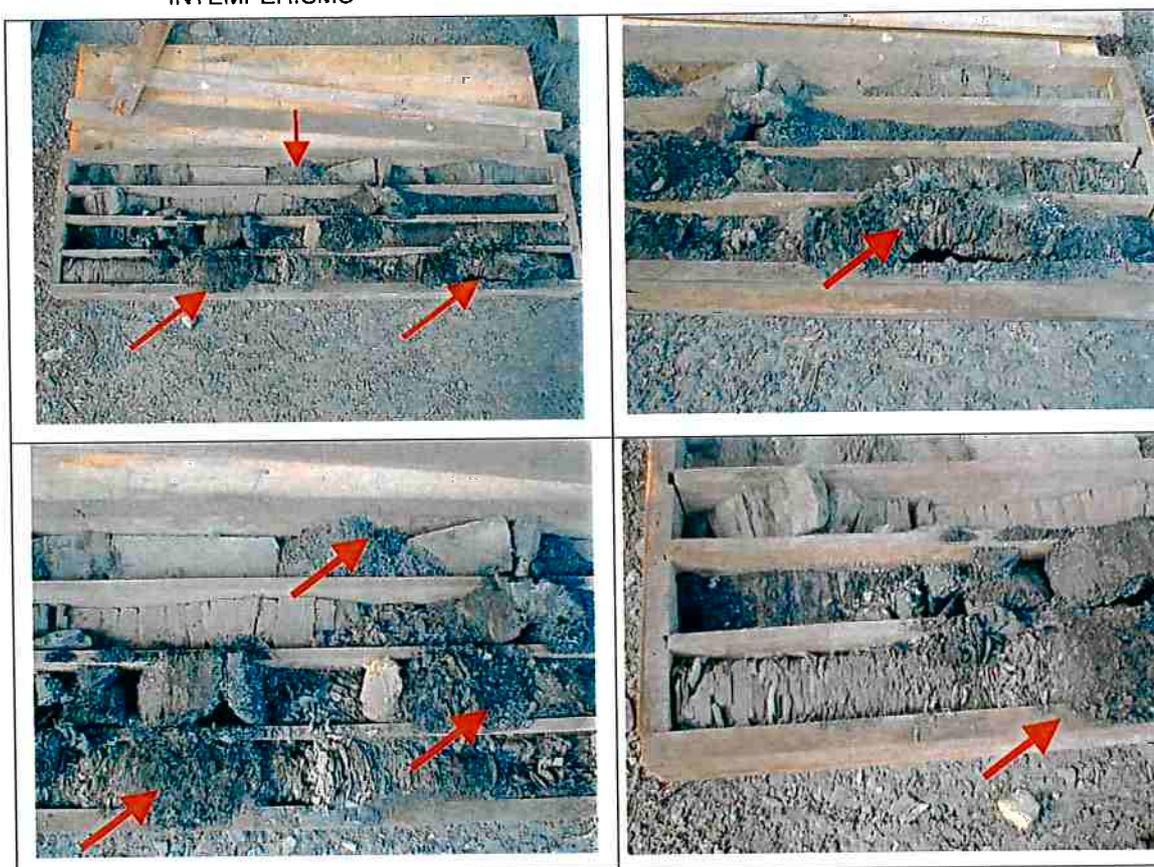
Topografia original da camada inferior de minério

### 6.3 Amostragem

As amostras da prospecção e da pesquisa mineral originais feitas pela GEOSOL na década de 80, gerou a base de dados empregada para a cubagem de reservas e desenvolvimento de lavra em São Mateus do Sul. A retomada dos testemunhos de sondagem não foi possível devido ao estado de alteração em que se encontravam, após alguns anos de acondicionamento em caixas de madeira.

Esses testemunhos, apesar de não se prestarem a análises quantitativas, indicaram muito nitidamente algumas respostas do folhelho oleífero ao intemperismo (Figura 37), que produz diferentes alterações nas rochas do Subgrupo Irati. A dilatação e fragmentação exibidas nas porções contendo sulfetos e, principalmente, sulfatos secundários, mostram a influência dos processos físicos e químicos na degradação da estrutura do minério.

FIGURA 37 - TESTEMUNHOS DE SONDAGEM ALTERADOS DE FORMA DIFERENCIADA PELO INTEMPERISMO



NOTA: As setas indicam porções pulverizadas ricas em compostos de enxofre

Na Figura 38 pode-se observar a dificuldade de se obterem amostras em canal contínuo, nas paredes expostas da camada superior durante a lavra. A rocha físsil predominante na maior parte da camada, intercalada com faixas centimétricas de maior tenacidade, formam seqüências extremamente irregulares e instáveis, não havendo praticamente faces verticais a serem escavadas.

Obteve-se sucesso na amostragem com o emprego de escavações em degraus, acompanhando a própria fragmentação que sucedeu à exposição do minério.

Amostragem de acompanhamento, feita através da captação de pó de rocha das perfuratrizes usadas na preparação da detonação, é empregada constantemente pelo setor de engenharia de minas da PETROBRAS/SIX, principalmente para controle dos teores de óleo da rocha lavrada.

No caso da catação, empregada para análises qualitativas, foram eleitas amostras representativas de determinadas populações típicas no depósito: amostras dos dois níveis de minério (superior e inferior), em topo, meio ou base; amostras de faixas de contato litológico; amostras com fósseis; amostras com calcita concordante, discordante e em planos de falha; amostras de finos e de material ultrafino. Esse procedimento de direcionamento de catação se mostrou necessário logo no início das investigações, visto que muitas feições geológicas e mineralógicas mascaradas nas frentes expostas transversalmente, em paredes, apareciam em faces expostas de fragmentos das rochas esfoliadas.

Já na camada inferior, muito mais tenaz e consistente, foram escavados canais de amostragem com regularidade e controle sobre os avanços. Muito menos sujeitas a contaminações, as amostras dessa camadas puderam ser retiradas com as dimensões inicialmente previstas (Figura 39).

As amostras obtidas eram, na maior parte das vezes, moídas no próprio campo abaixo de 20 mesh. Exemplares maiores, característicos (fósseis, agregados cristalinos na matriz escura, faixas de contato), lascas, fragmentos finos e lamas, serviram para averiguações macroscópicas e em microscopia eletrônica de varredura.

Para fins quantitativos, os canais de amostragem com intervalos e dimensões regulares geraram amostras correlacionáveis entre as duas camadas de folhelho, sendo empregadas para análise por absorção atômica de Fe e S, ensaio Fischer modificado e queima termo-diferencial.

FIGURA 38 - SEQUÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO OS PROCEDIMENTOS PARA OBTENÇÃO DE AMOSTRAS CONTÍNUAS NAS PAREDES DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO

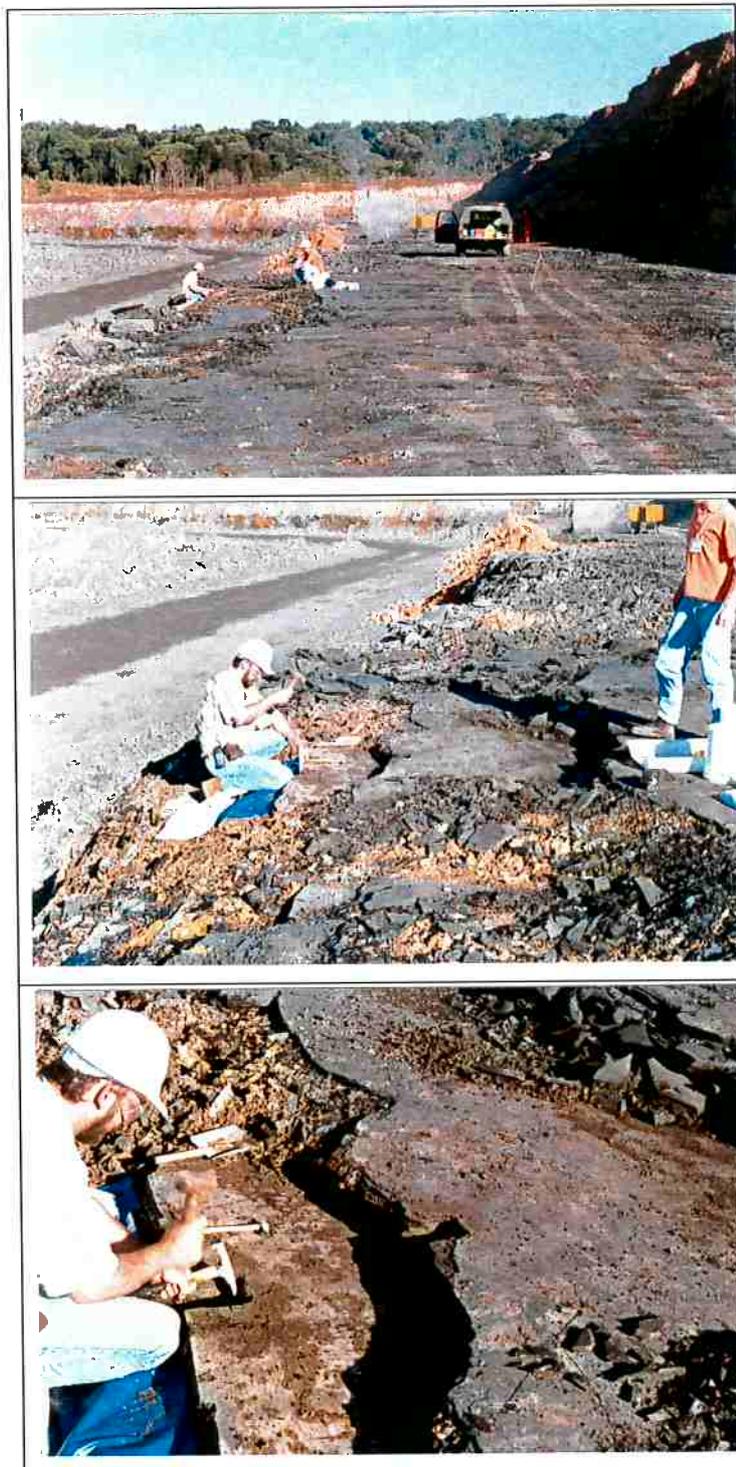


FIGURA 39 - CANAL DE AMOSTRAGEM ESCAVADO NA CAMADA INFERIOR DE MINÉRIO, COM DIMENSÕES DE 20CM DE LARGURA, 10CM DE PROFUNDIDADE E 3M DE EXTENSÃO

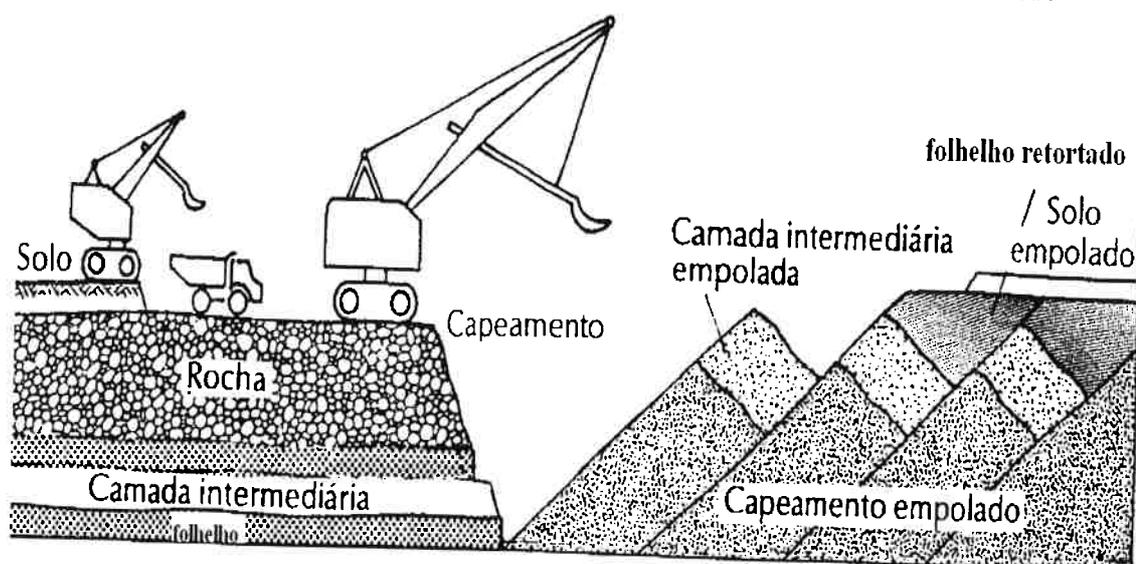


Diferentemente de depósitos com altas anisotropias e com efeito pepita significativo, as camadas subparalelas do folhelho oleígeno em São Mateus do Sul apresentam-se adequadas para amostragens estratificadas, quando a população é repartida em subpopulações disjuntas, desejavelmente homogêneas internamente e heterogêneas entre elas. Colhe-se uma subamostra de cada estrato e a reunião de tais subamostras pode ser feita sobre qualquer das formas citadas: aleatória, sistemática, etc.

## 7 O SISTEMA DE MINERAÇÃO DA PETROBRAS/SIX

Como já citado e agora exposto na Figura 40, a lavra do folhelho oleífero pirobetuminoso em São Mateus do Sul é a céu aberto, pelo método de tiras e teve início em 1972.

FIGURA 40 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO SISTEMA DE LAVRA DA PETROBRAS/SIX



A aceleração dos fenômenos geradores de finos tem início imediatamente após o decapeamento inicial e retirada de solo e vegetação, com o início do processo de fragmentação da rocha, induzido inicialmente pelo alívio da pressão superior. Constatase que a degradação física da rocha próxima da superfície é função de sua mineralogia e da ação do intemperismo (umidade, insolação e frio extremo).

O uso de explosivos para desmonte das rochas já foi muito problemático para o surgimento de material particulado. Atualmente, aproveitando a situação geológica existente, a colocação dos explosivos é feita no estrato inferior da primeira camada de folhelho pirobetuminoso, diminuindo a ação das ondas de choque diretamente na litologia menos competente mineralizada, o que minimiza a geração de finos.

Na Figura 41 são expostos os equipamentos de perfuração (*rock drill*) empregados para a instalação das cargas explosivas na camada superior de folhelho oleífero.

FIGURA 41 - PERSPECTIVA A DISTÂNCIA DA PERFURAÇÃO PREPARATÓRIA PARA A DETONAÇÃO NA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO



### 7.1 Lavra do folhelho oleígeno de São Mateus do Sul

Um grande volume de minério é desperdiçado após o desmonte do material, tanto pelo aparecimento de grandes blocos de rocha incompatíveis com o transporte e o beneficiamento, como pela rápida formação de quantidades não mensuradas de finos, que formam com as águas percolantes uma polpa negra de composição não avaliada. Além da evidente perda de conteúdo energético, esses finos são transportados pela rede de drenagem até rios e lagoas circundantes da mina, provocando o assoreamento progressivo de seus leitos e conseqüente dificuldade para estabilização de seus ecossistemas.

O capeamento e a camada intermediária são removidos por escavadeira “dragline” Marion (1512 toneladas), em blocos de 20X50m (Figura 42).

FIGURA 42 - LAVRA DE FOLHELHO OLEÍGENO, MOSTRANDO AO FUNDO A ESCAVATRIZ MARION E O PROCEDIMENTO DE CARREGAMENTO DOS CAMINHÕES DE MINÉRIO



Levando em conta que da mina de São Mateus extraem-se 3,5 milhões de toneladas/ano de minério, isso equivale, no caso de 20% de perdas totais, a 700 mil toneladas de material particulado a ser reaproveitado.

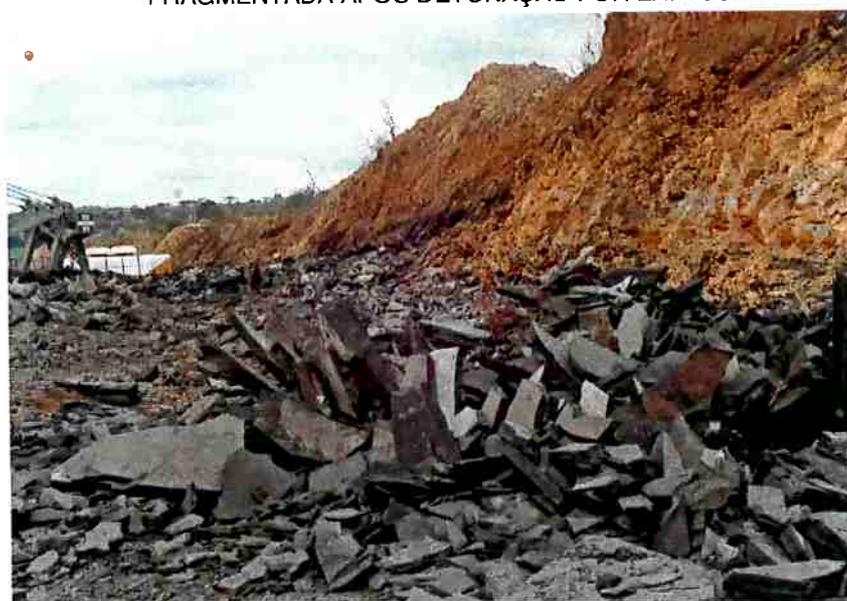
No total são movimentados, por ano, seis milhões de metros cúbicos de rocha, solo, material argiloso, calcário e minério. A lavra avança cerca de vinte metros por mês, com a recomposição seguindo posteriormente.

Além da topografia do depósito, fator determinante para as operações de lavra a céu aberto empregadas pela PETROBRAS/SIX, as características mineralógicas e tecnológicas das camadas oleíferas também determinam a viabilidade do empreendimento. Uma análise geoestatística dos dados da pesquisa (teores de óleo), através da krigagem categorizada (ZINGANO; KOPPE e COSTA, 1996), sugere ser possível aumentar a seletividade na lavra da camada inferior de minério e aumentar a recuperação de óleo da jazida, com um aumento controlado de 40cm na espessura média lavrada da segunda camada (hoje, são lavrados apenas os dois metros superiores, pela queda abrupta de teores de óleo a partir dali até a base do folhelho).

## 7.2 Desmonte por explosivos e carregamento

A camada superior de folhelho é fragmentada em pontos de detonação de explosivos tornando o material menos consistente para sua retirada pelas escavadeiras. A Figura 43 expõe o aspecto que adquire a camada superior de folhelho após a fragmentação exigida para a retirada do minério.

FIGURA 43 - ASPECTO DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO, FRAGMENTADA APÓS DETONAÇÃO POR EXPLOSIVOS



As operações de desmonte empregam a característica configuração em camadas sub-horizontais do depósito de folhelhos pirobotuminosos para fragmentar a rocha desejada, com a menor geração de finos. Para tanto, após a retirada da camada superior de minério, as perfuratrizes alcançam o topo da camada inferior de minério atravessando a camada intermediária exposta. As cargas explosivas então são inseridas na espessa cobertura de sedimentos, que atenuam o impacto explosivo evitando a formação de vazios e faces de rocha exposta no minério inferior.

No que se segue, o tráfego intenso de caminhões e máquinas carregadeiras provoca vibrações constantes no depósito, além de compactação de sedimentos e formação de lamas por toda a área da mina. Inicia-se a distribuição de diferentes resíduos e rejeitos das camadas expostas do Subgrupo Irati, com siltitos predominantes, rocha carbonática, argilo-minerais e restos de folhelho oleígeno.

FIGURA 44 - CARREGAMENTO DO MINÉRIO DA CAMADA SUPERIOR DO DEPÓSITO



O minério é levado por caminhões (Figura 44) para um sistema de britadores e peneiras a fim de adequar a granulometria para a faixa ótima estipulada, sendo então enviado à retorta por um sistema de correias transportadoras (Figuras 45 e 46). Para eliminar a maior quantidade possível de partículas finas o minério é lavado antes de entrar na processo. O material resultante desta lavagem (água e finos) é então levado à área da mina e depositado em locais pré-determinados.

FIGURA 45 - VISTA DO TRÁFEGO DE CAMINHÕES FORA DE ESTRADA QUE TRANSPORTAM MINÉRIO E RECOLOCAM O FOLHELHO PIROLISADO NAS ESCAVAÇÕES NA MINA DE SÃO MATEUS DO SUL



NOTA: A direita da foto, pilhas de material empregado na reconstituição das áreas lavradas

Do britador primário o folhelho é levado por correias transportadoras às instalações de britagem e peneiramento secundário e terciário. Reduzido e classificado na faixa granulométrica de  $\frac{1}{4}$ " a  $2\frac{3}{4}$ ", é armazenado em pilhas e, na vazão solicitada pela retorta, é encaminhado à pirólise pôr meio de transportadores de correia.

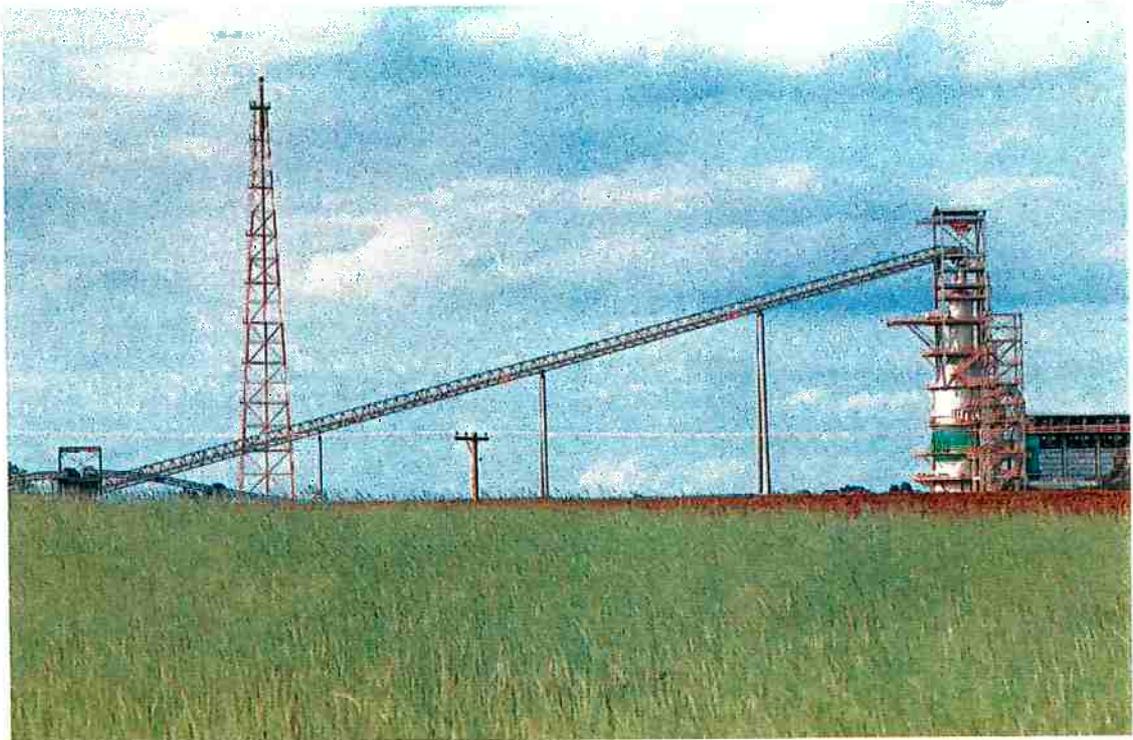
FIGURA 46 - PILHA E MINÉRIO JÁ BRITADO, PRONTO PARA SER ENCAMINHADO POR ESTEIRAS A ALIMENTAÇÃO DA RETORTA



FIGURA 47 - VISTA DO TRECHO ENCAPSULADO DO CIRCUITO DE BRITAGEM E TRANSPORTE POR CORREIAS, ATÉ PRÓXIMO AO CARREGAMENTO DA RETORTA



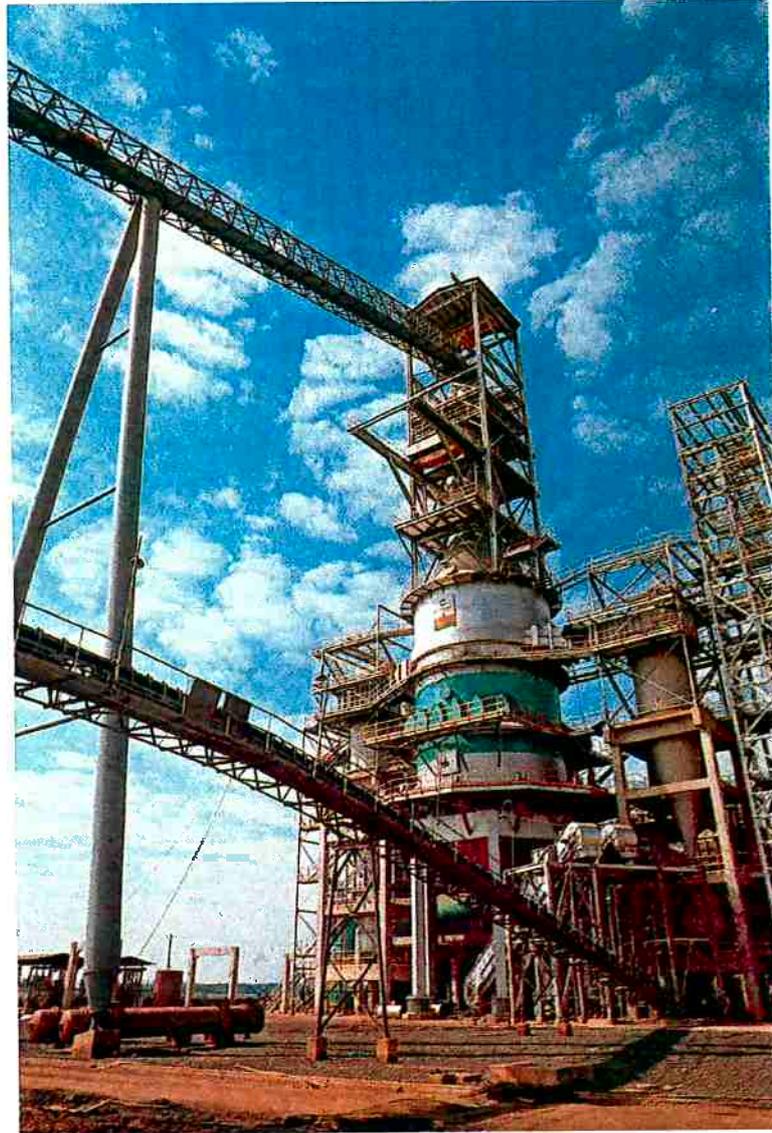
FIGURA 48 - UNIDADE DE RETORTAGEM DO MÓDULO INDUSTRIAL DA PETROBRAS/SIX EM SÃO MATEUS DO SUL



Estão instaladas em São Mateus do Sul uma planta semicomercial (Usina Protótipo do Irati), com uma retorta de 5,5m de diâmetro interno e a Planta Comercial (Módulo Industrial), com uma retorta de 11m de diâmetro interno (Figura 49).

O minério britado, na granulometria entre 11 e 70mm, é alimentado continuamente na parte superior da retorta, escoando por gravidade para seu interior. De maneira uniforme e controlada, atravessa as zonas de secagem, aquecimento, retortagem e resfriamento. Na zona de retortagem, a uma temperatura de aproximadamente 500°C, o folhelho sofre uma decomposição térmica, liberando a matéria orgânica nele contido sob a forma de óleo e gás. O calor é suprido por uma corrente gasosa de elevada temperatura, que entra na zona de retortagem, misturando-se com uma segunda corrente, que é injetada pela base da retorta, com a finalidade de recuperar o calor do xisto retortado.

FIGURA 49 - ASPECTO DA PLANTA COMERCIAL (MÓDULO INDUSTRIAL) INSTALADO PELA PETROBRAS/SIX PARA A EXTRAÇÃO DO ÓLEO DE FOLHELHO EM SÃO MATEUS DO SUL



Nas zonas de aquecimento e secagem, a massa gasosa cede calor para o folhelho. O seu resfriamento resulta na condensação dos vapores de óleo sob a forma de gotículas, que são transportadas para fora da retorta pelos gases. Essa corrente gasosa é então direcionada para os ciclones e o precipitador eletrostático, onde é coletado o óleo pesado e as partículas sólidas arrastadas.

O gás, isento da neblina de óleo passa pelo compressor, dividindo-se em três correntes: uma volta para o fundo da retorta; a outra também volta à retorta após ter sido aquecida no forno; e a última, gás produto, vai ao condensador onde é encaminhada à

unidade de **tratas**, para a produ  
recuperação do **Gfre**. O folhelho re  
selagem hidráulica, pois de resfriado,

Retortaustão interna são  
balanços energéticos, mas com por  
processo PETROcirculação de gás  
satisfatório e o gás de alto potencial

Além de **rosix**, existem vá  
Bureau of Mines, **OSCO II**, a retort  
Ruhrgas, o processombustão a gás e a r

A prod de óleo do fo  
PETROBRÁS é de 0 barris/dia. Após  
alimentação da retor de 9,3% de ó  
ideal do processo.

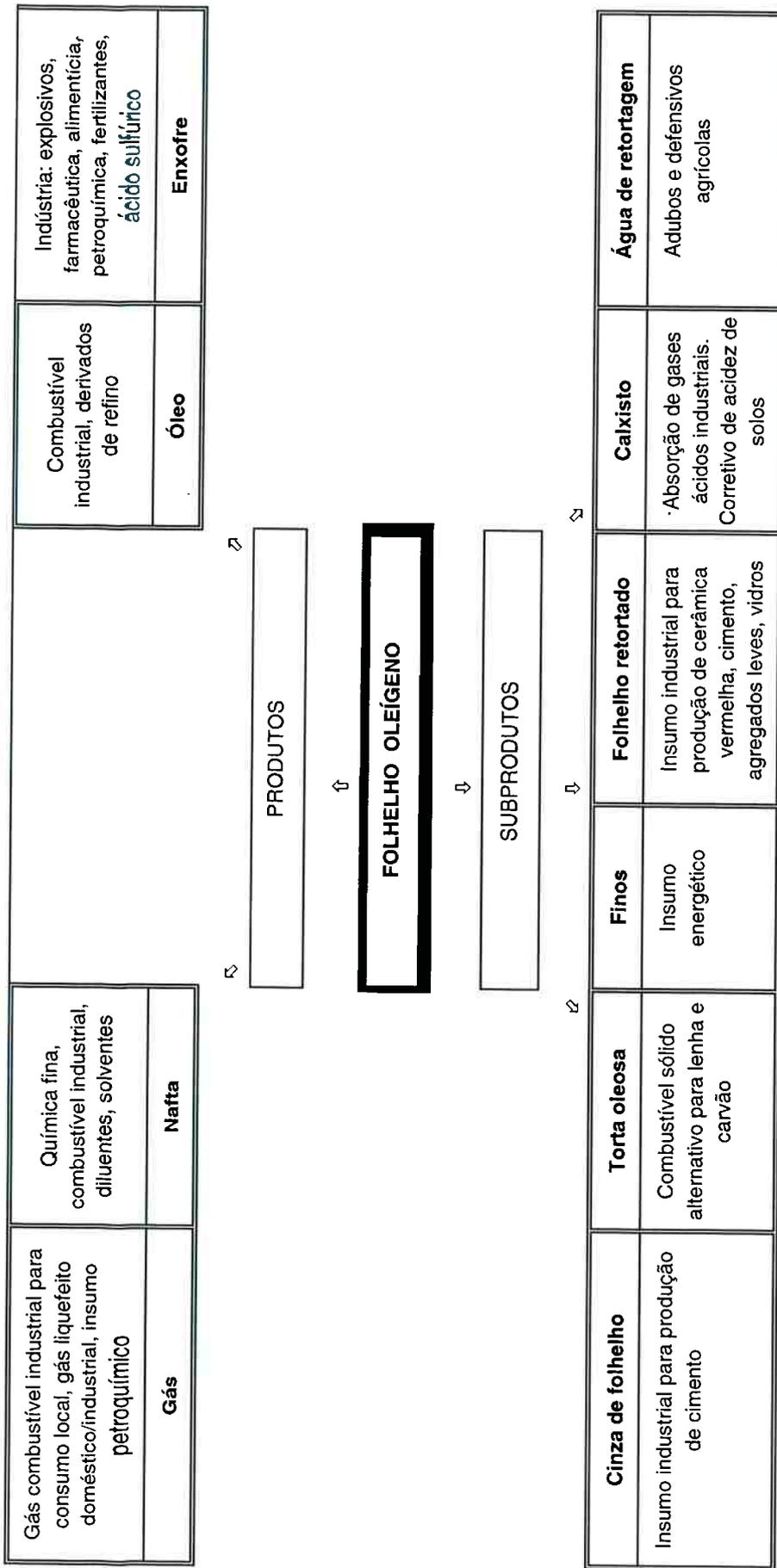
### 7.3 **Recomposiçs de lavra.**

Após **pt** minério retortac  
material inerte antemovido (camada  
topografia do **terre** ficando na parte  
etapa é a da recomgráfica do **terrenc**  
configuração **origindo** os taludes, de  
que o limite para a **ila**, ensaiada em la

O **substrserá** então **recobe**  
com espessura **varia** 1,0 metro de acc  
enraizamento **das esores** alocadas.

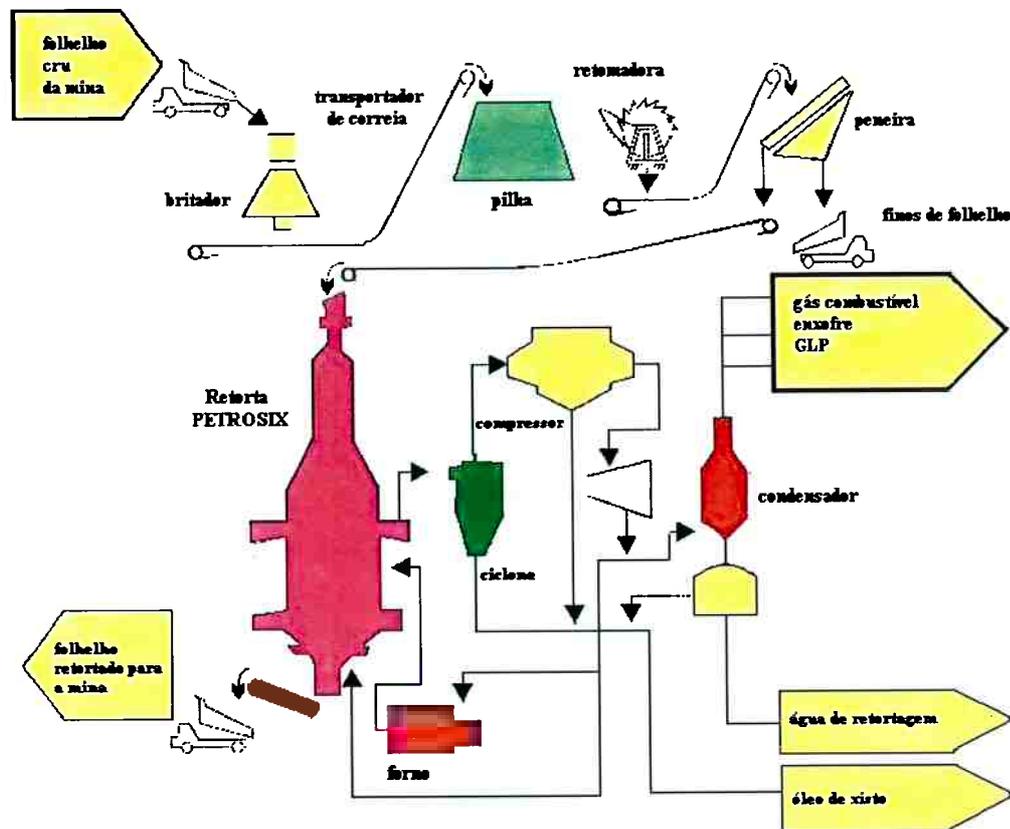
Em **seguio** processo de rev  
e respeitando a **ológica**. Este p  
principalmente **devcterísticas** da es  
vegetação **rasteira**, aece por **decomj**  
conferindo-lhe **condéber** uma **maior** v  
exigentes com **relaçade** do solo. Isso  
porte minimize o **caè** partículas sólidas  
regiões **circunvizinh**:

FIGURA 51 - PRODUTOS E SUBPRODUTOS DO FOLHELHO OLEÍGENO



FONTE: PETROBRAS, 1995

FIGURA 52 - FLUXOGRAMA DA EXTRAÇÃO E DO PROCESSAMENTO DO FOLHELHO DE SÃO MATEUS DO SUL, PR



FONTE: PETROBRAS, 1995

A continuidade do problema de geração de finos é evidenciada nas frações não passantes no peneiramento, que são transportadas por correias encapsuladas até a boca da retorta e despejadas por ação da gravidade. Uma nova quantidade de finos é gerada nesse curto intervalo, por vezes ainda complicadora para a pirólise. Ressalta-se que cerca de 20% de todo o material manuseado entre a lavra e a retorta é inutilizado por formar fração muito fina. Estima-se que os teores de óleo desses resíduos seja ao menos compatível com os teores dos estoques de minério da alimentação, pois a fração mineral da rocha altera-se de forma mais rápida do que os estáveis hidrocarbonetos pesados, concentrando-se ao longo do tempo em bacias de deposição nas áreas da mina.

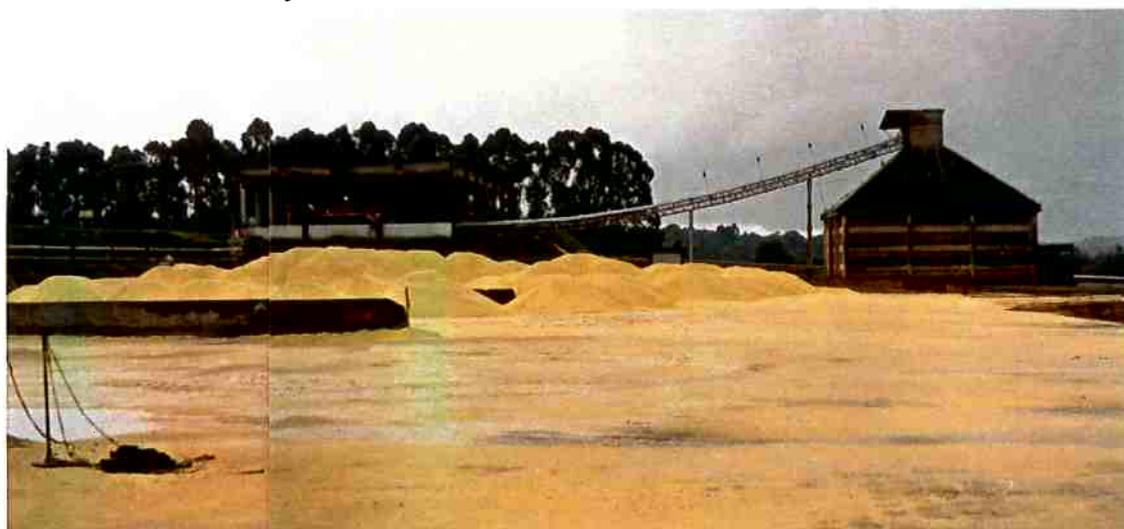
#### 7.4 Produtos da pirólise

Os folhelhos oleígenos pirobetuminosos de São Mateus do Sul geram, além de seus produtos úteis (Figura 53), grandes quantidades de resíduos em sua etapa de pirólise, que são em sua maior parte reconduzidos às áreas de lavra. Das características dos minerais neo-formados depende a composição das lixívias nas áreas recuperadas e nas regiões de estocagem de pilhas de rejeito de mineração (PUURA, 1996)

Para compreender todos os impactos dessa mobilização de rocha no ambiente, é necessária uma etapa de estudo da mineralogia organo-sedimentar do folhelho, voltada para os objetivos práticos relativos ao problema da geração de finos na mineração. As mudanças na composição e principalmente na estrutura da rocha, no intervalo de tempo em que a rocha é extraída na mina e posta na retorta, determinam a qualidade do minério, além de influenciarem diretamente a qualidade e poluição das águas e do solo.

O resíduo de pirólise é constituído de fração inorgânica sólida (sulfetos e sílica, principalmente), policíclicos aromáticos e água de retortagem (que contém fenóis, sulfetos e amônia).

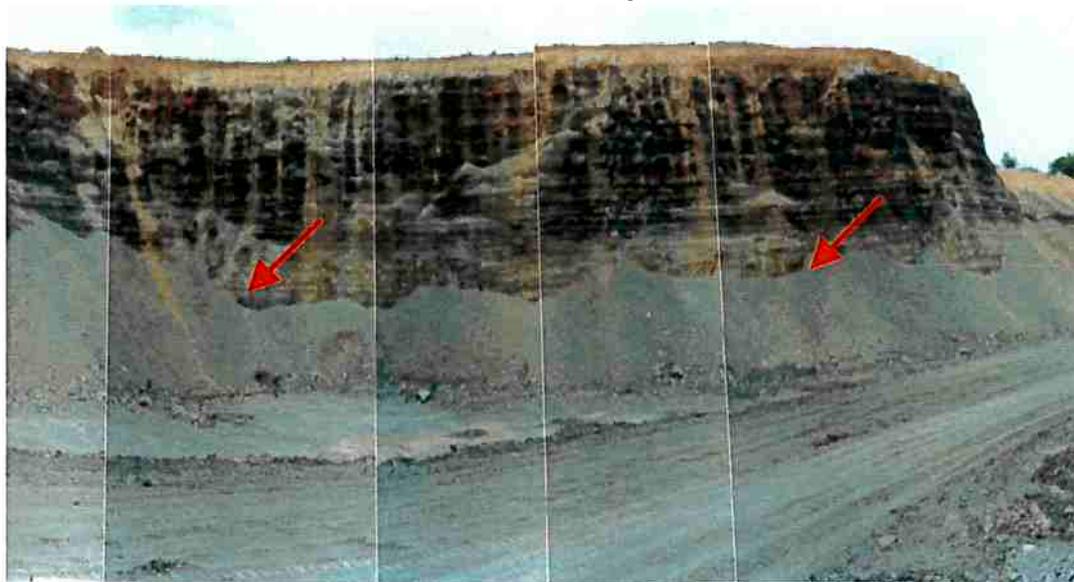
FIGURA 53 - VISTA DO PÁTIO DE ESTOCAGEM DO ENXOFRE PRODUZIDO COMO SUBPRODUTO DA EXTRAÇÃO DE ÓLEO COMBUSTÍVEL DO FOLHELHO OLEÍGENO



## 8 OS FINOS DE MINERAÇÃO DO FOLHELHO OLEÍGENO

A composição mineralógica dos folhelhos e a estrutura sedimentar característica torna a rocha oleígena extremamente físsil e fragmentável, quando exposta ao intemperismo, após o alívio de pressões decorrente da retirada das camadas superiores. Frisa-se que, em todas as áreas da mina de São Mateus do Sul, há uma quantidade muito grande de finos depositados (Figura 54), além daquele controlado nas área de tratamento, com procedimentos de retenção de material particulado no ambiente (aspersões, encapsulamento parcial).

FIGURA 54 - AS FRENTES DE LAVRA ABANDONADAS CONTINUAM A SER FONTE DE MATERIAL PARTICULADO, RETIRADO DE PAREDÕES DE ROCHA POR AÇÃO DO INTEMPERISMO E DEPOSITADOS POR AÇÃO DA GRAVIDADE NO AMBIENTE



Fragments em granulação adequada pelos procedimentos de tratamento mineral imediatamente passam a formar novas parcelas de finos, de fração argila a fragmentos menores que 11mm, liberados pelo efeito do atrito contínuo e das respostas da rocha às variações na umidade do ar. Contribui também a vibração em caminhões e em correias transportadoras.

Ajustes muito importantes foram feitos pelo setor de engenharia de minas da PETROBRAS/SIX durante o desenvolvimento das operações de lavra, reorganizando o sistema de queda e recepção dos fragmentos de minério na retorta. A diminuição da

intensidade de impactos em anteparos no interior da estrutura metálica levou a ganhos de produtividade no processo, com redução da geração de finos diretamente no ambiente de pirólise.

Na mina (Figura 55), toma-se o cuidado de não expor o minério ao intemperismo por tempo excessivo, desde sua exposição até a alimentação da retorta.

FIGURA 55 - ASPECTO GERAL DE FRENTE DE LAVRA DA MINA DE FOLHELHO OLEÍGENO DE SÃO MATEUS DO SUL, ONDE ESTÃO EXPOSTAS TRÊS CAMADAS SEDIMENTARES DO SUBGRUPO IRATI



NOTA: folhelho superior (2), camada intermediária (3) e folhelho inferior (4), sob a cobertura das rochas da Formação Serra Alta (1). Observa-se a grande quantidade de finos de mineração gerados pela degradação das rochas expostas

Em detalhe, grande parte dos arranjos de fragmentação das rochas se mostra complexo e diferenciado, o que não foi suficientemente bem investigado nas etapas iniciais de pesquisa mineral do depósito. O processo de mineração empregado se utiliza da perspicácia de profissionais experientes para promover classificação *in loco* de materiais, separando aqueles impróprios ao processamento, retirando na lavra apenas aquela fração de rocha com resistência mecânica suficiente para o encaminhamento para a pirólise.

As rochas sem conteúdo oleífero (siltitos e argilitos da Formação Serra Alta, siltes e margas dolomíticas da camada intermediária aos minérios) constituem um outro problema para as atividades de mineração da PETROBRAS/SIX. Sem aproveitamento

para fins de geração de combustíveis, os siltitos têm aproveitamento restrito na recomposição topográfica das áreas lavradas. Grandes volumes desse material estéril são movimentados na mina (Figura 56), ainda a espera de usos mais nobres.

FIGURA 56 - VISTA DE UMA DAS FRENTES DE LAVRA DE FOLHELHO OLEÍGENO, MOSTRANDO QUE A FRAGMENTAÇÃO ACELERADA DAS ROCHAS NO DEPÓSITO NÃO É EXCLUSIVIDADE DOS FOLHELHOS



NOTA: Indicam-se blocos métricos de silito, produzidos nas detonações, muito incômodos à lavra, adjacentes a rejeitos de folhelho da camada superior de minério

### **8.1 Aspectos macroscópicos das unidades constituintes do Subgrupo Irati em São Mateus do Sul**

Os folhelhos exibem fina laminação, paralela aos planos de acamamento, ao longo de onde a rocha se fragmenta em fraturas curvas e irregulares. Sua granulometria fina confere-lhe, normalmente, aspecto homogêneo e é uma rocha macia (riscada pelo canivete). Ao tato, por vezes é untuosa, lisa ou aveludada.

Fragmentos de folhelho oleígeno da camada superior apresentam diferenças em seus padrões de fragmentação, quando comparados aos da camada inferior, quase sempre mais tenaz. O principal controle que se observa na mina, no que diz respeito aos processos formadores de finos de mineração, é a topografia do depósito. Menores capeamentos da Formação Serra Alta implicam em folhelhos mais alterados na camada superior e, por conseguinte, fragmentáveis.

O alívio de tensões, normal aos planos de acamamento é o componente principal do processo de fissilidade, intrínseco aos folhelhos de maneira geral. As dilatações paralelas aos planos de acamamento dependem, no caso dos folhelhos oleígenos investigados, da composição mineralógica local e do grau de alteração devido aos efeitos do intemperismo sobre a rocha.

Em faixas próximas aos contatos inferior da camada superior de folhelho, intercrescimentos entre as fases silicáticas e as carbonáticas da rocha contrastam com a ritmicidade dos sedimentos consolidados (Figuras 57 e 58).

FIGURA 57 - INTERCRESCIMENTO ENTRE FRAÇÕES SILICÁTICAS E CARBONÁTICAS DO FOLHELHO, JUNTO A FAIXA DE CONTATO INFERIOR DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO



FIGURA 58 - ASPECTO DO DESPLAQUEAMENTO TÍPICO DOS FOLHELHOS (1), DESTACADO NESSA IMAGEM PELA INTERCALAÇÃO DE NÍVEIS SÍLTICO-ARGILOSOS (2), MAIS COESOS. PORÇÃO INFERIOR DA CAMADA SUPERIOR DO FOLHELHO OLEÍGENO



Em outra escala e observação, fica muito evidente a diferença da velocidade de fragmentação das diferentes litologias intercaladas em alguns níveis do depósito. O manejo das diferentes fases dos rejeitos, em praticamente todas as granulações, torna-se muito difícil com o passar dos dias de exposição ao intemperismo. Os fragmentos semelhantes a flocos (Figura 59) que se encontram em abundância principalmente nas áreas mais úmidas da mina (nos locais mais secos a separação desses fragmentos forma lascas muito pouco resistentes e geradoras de poeira).

FIGURA 59 - ASPECTO DO FOLHELHO ALTERADO DA CAMADA INFERIOR, ADJACENTE AO SILTITO DA CAMADA INTERMEDIÁRIA, EM AMOSTRA EXPOSTA AO INTEMPERISMO POR MAIS DE TRINTA DIAS, MOSTRANDO A TÍPICA ALTERAÇÃO EM FORMA DE FLOCOS DO MINÉRIO DE MAIS ALTO TEOR NA JAZIDA



Outra das formas características de fragmentação do folhelho é aquela que ocorre em rocha extremamente tenaz da camada inferior, que chama a atenção por não se encontrar nos níveis mais profundos da camada. Antes, são encontradas faixas rígidas que, ao se estilhaçarem por força de explosivos ou serem escavados, geram fragmentos em forma de lascas cortantes (Figura 59).

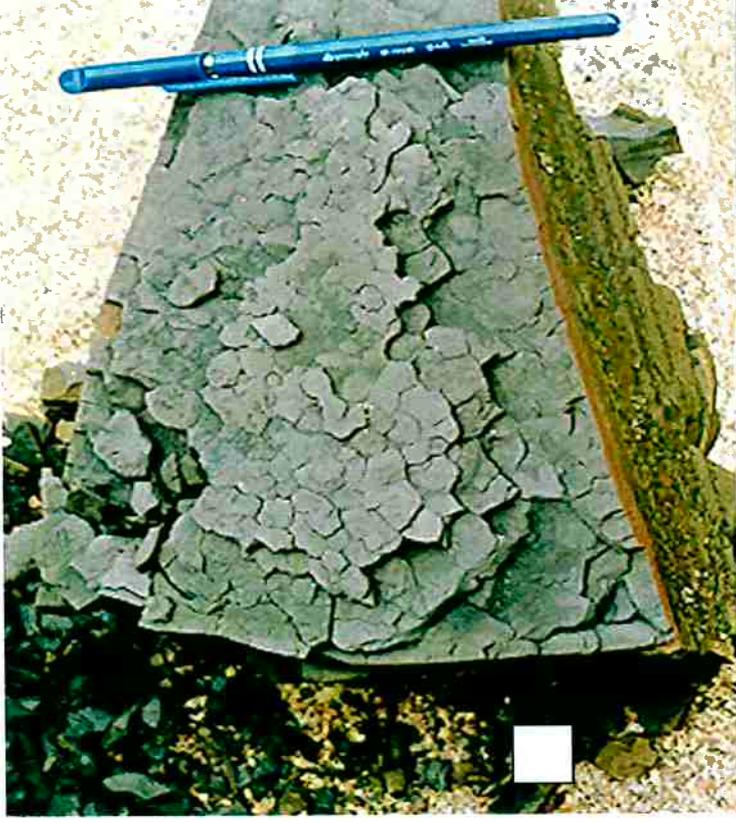
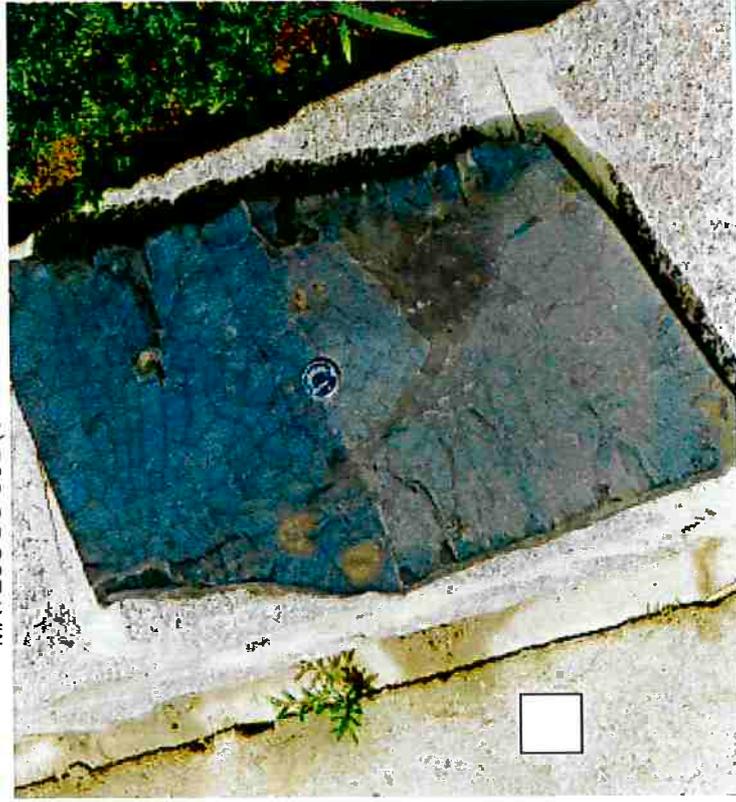
FIGURA 60- LASCAS CORTANTES PRODUZIDAS PELA FRAGMENTAÇÃO DE FOLHELHO OLEÍGENO DA PORÇÃO MÉDIA DA CAMADA INFERIOR OLEÍGENA, TÍPICAS DO FOLHELHO MAIS RESISTENTE E TENAZ DO DEPÓSITO



A resistência desses "chips" deve-se aparentemente pela compactação por pressão da camada inferior e a cimentação associada ao maior conteúdo oleígeno e aos cimentos calcíticos e ferruginosos pouco alterados, além da menor lixiviação pelas soluções ácidas formadas na camada superior de minério.

Dois observações, em épocas distintas, foram realizadas com o intuito de expor mais claramente o comportamento de degradação estrutural da rocha oleígena. Nesta pesquisa, amostras semelhantes de fragmentos de folhelhos oleígenos foram colocados em diferentes ambientes, um deles isolado diretamente do intemperismo, em recinto fechado, e outro colocado exposto às variações climáticas. A diferença de respostas de alteração foram muito nítidas (Figura 61).

FIGURA 61 - DOIS ASPECTOS DISTINTOS DOS RESULTADOS DOS PROCESSOS DE INTEMPERISMO SOBRE OS FOLHELHOS OLEÍGENOS DE SÃO MATEUS DO SUL (CAMADA SUPERIOR)



NOTA: A primeira amostra (1) ficou quinze dias isolada do ambiente externo enquanto, durante o mesmo período, a segunda amostra (2) ficou exposta ao intemperismo. A fragmentação imposta a primeira amostra criou fissuras poliédricas em sua superfície, que evoluíram mais rapidamente a fragmentos regulares na segunda amostra.

## 8.2 Caracterização organo-sedimentar dos folhelhos oleígenos

O folhelho pirobetuminoso tem em sua estrutura uma porcentagem de matéria de origem orgânica peculiar, compondo uma massa organo-mineral, o querogênio, que é um material insolúvel sólido gerado pela decomposição de microorganismos em ambiente anóxico.

O querogênio não é óleo. É chamado de *matéria organo-sedimentar*, que pode ser classificada em amorfa ou reconhecível (tratando de processos óticos), assim como os macerais estudados no carvão, para análises de gênese e processos evolutivos desse energético. O material orgânico reconhecível é a soma dos fragmentos de origem biológica identificável, como tecidos vegetais, cutículas, resinas e fibras (DURAND *et al.*, 1980) que sofreram suficiente soterramento. Pode ser transparente, com coloração variando de amarela a marrom, por ser um *gel* derivado de matéria orgânica putrefada em condições anaeróbias.

As algas podem, em certos casos, formar matéria organo-sedimentar intensamente colorida, de verde a amarelo ou alaranjado. Já a matéria amorfa é predominantemente constituída de esporos, pólenes e mesmo algas em estágio de decomposição apenas parcial.

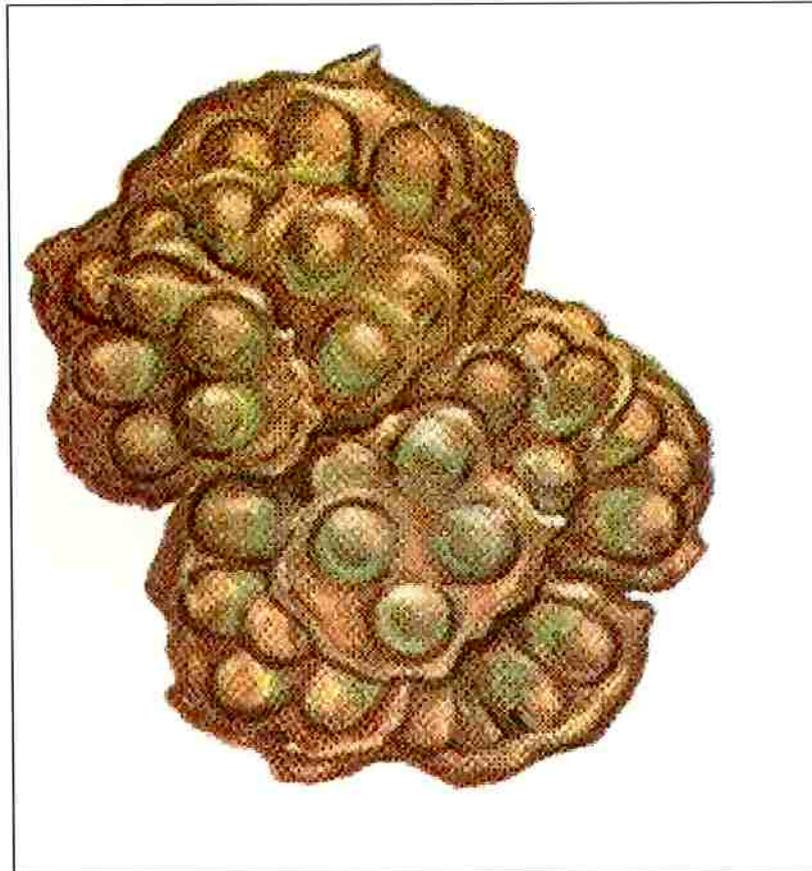
As populações de organismos formadoras do querogênio de São Mateus do Sul parecem ser de uma categoria classificada no Reino Monera como cianobactérias.

Identificadas em outros depósitos de folhelho oleígeno do mundo como *algas verdeazules*, *blue-green algae* ou *alginite* (DERENNE *et al.*, 2000), têm como características principais sua coloração de verde azulado a pardo, pigmentada por toda a célula, com parede celular inseparável de sua cobertura viscosa, sem núcleos e manchas oculares e, por não ter flagelos ou filamentos, imóveis (PALMER, 1962). Exemplos desses microorganismos são considerados os fósseis mais antigos conhecidos, com cerca de 3,5 bilhões de anos (WATANABE *et al.*, 2000).

As algas formadoras do querogênio nos folhelhos oleígenos de São Mateus do Sul estão pouco preservadas, sob a forma de detritos ou como lâminas ou massas discretas.

Na figura a seguir está exposta reprodução de imagem microscópica de colônias de algas do tipo *Botryococcus*.

FIGURA 62 - IMAGEM DE COLÔNIA DE ALGA AZUL *BOTRYOCOCCUS BRAUNII* (Palmer, 1962), EM AMPLIAÇÃO APROXIMADA DE 2000 VEZES, MOSTRANDO ESTRUTURAS SEM NÚCLEO E FLAGELOS



A figura anterior é um exemplo ilustrativo das características comuns observadas em muitas imagens coloridas disponibilizadas na Internet (SALMON *et al*, 2000; STASIUK, 2000), que permitem comparações nítidas entre diferentes tipos de exemplares observados de *Botryococcus*, encontrados em folhelhos oleígenos.

Retomando as análises de lâminas petrográficas da PETROBRAS/SIX, feitas nas primeiras etapas da pesquisa mineral do folhelho de S. Mateus do Sul, novas observações foram realizadas nos equipamentos de microscopia ótica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná. As imagens a seguir mostram aspectos inéditos da matéria orgânica formadora do querogênio

FIGURA 63 - IMAGEM MICROSCÓPICA DE SECÇÃO ESTRATIGRÁFICA DO FOLHELHO OLEÍGENO DE S. MATEUS DO SUL, DE AMOSTRA RETIRADA DO TOPO DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO, EXIBINDO ESTRUTURA ORGANÓIDE COM QUEROGÊNIO.

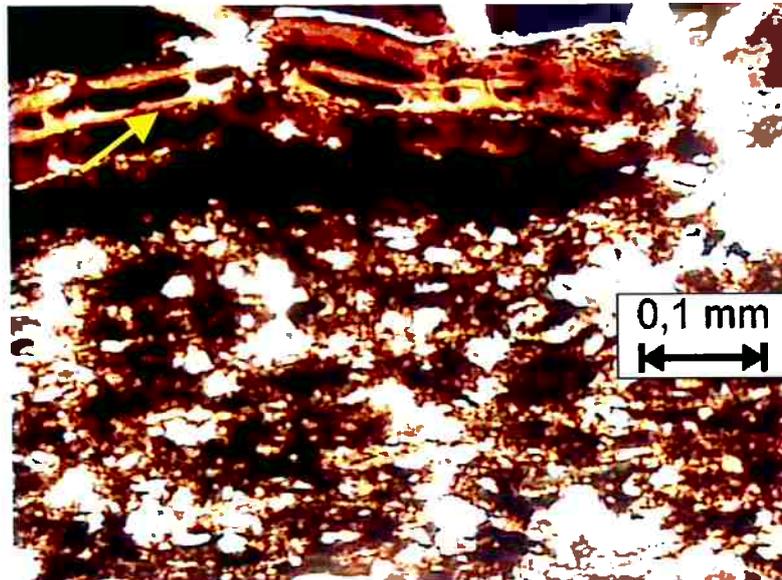


FIGURA 64 - DETALHE DA IMAGEM MICROSCÓPICA ANTERIOR DE SECÇÃO ESTRATIGRÁFICA DO FOLHELHO OLEÍGENO DE S. MATEUS DO SUL, EXIBINDO O ENCLAUSURAMENTO DE MASSAS DE QUEROGÊNIO

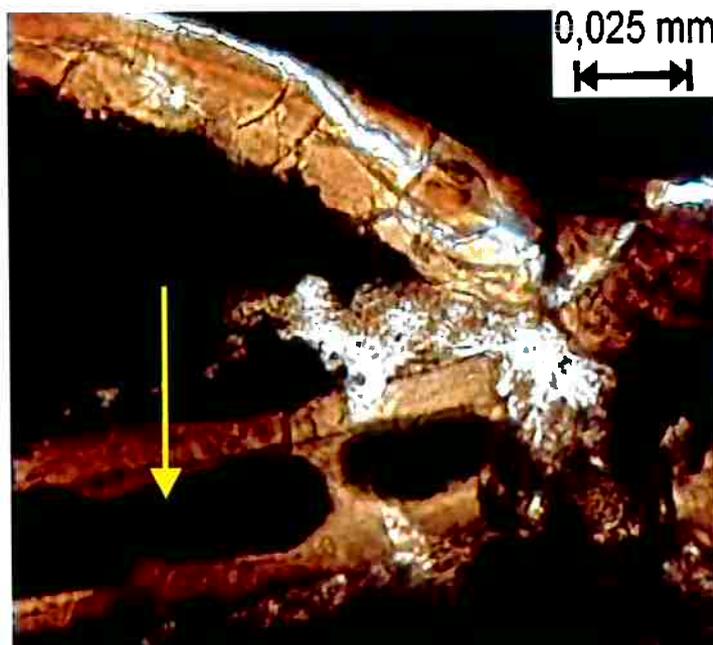


FIGURA 65 - OÓIDE ORGÂNICO PRESERVANDO ESTRUTURA NUCLEADA, OBSERVADA EM AMOSTRA RETIRADA DO TOPO DA CAMADA INFERIOR DE MINÉRIO

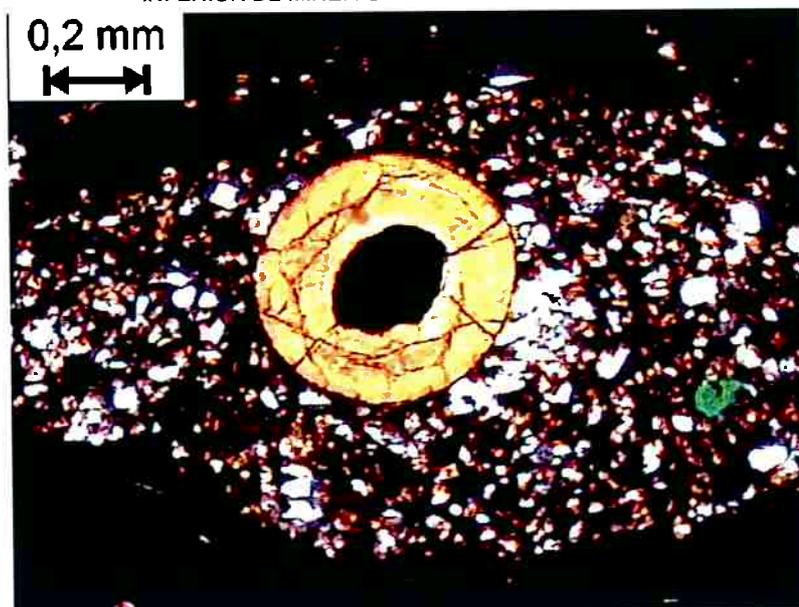
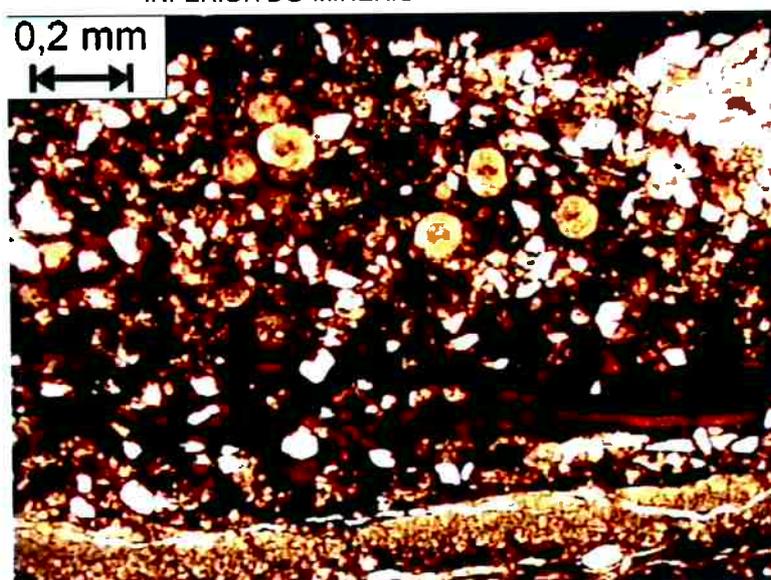


FIGURA 66 - OUTRO ASPECTO DAS ESTRUTURAS ORGÂNICAS CIRCULARES AGRUPADAS, SEMELHANTES A COLÔNIAS DE *BOTRYOCOCCUS*, ENCONTRADAS EM AMOSTRA DA PORÇÃO INTERMEDIÁRIA DA CAMADA INFERIOR DO MINÉRIO



A matéria orgânica originalmente depositada com os sedimentos inconsolidados é convertida a querogênio durante a diagênese.

FIGURA 67 - OÓIDES ORGÂNICO EM AGRUPAMENTO, COM ESTRUTURA NUCLEADAS, EM AMOSTRA RETIRADA DO TOPO DA CAMADA INFERIOR DE MINÉRIO, SEMELHANTES A COLÔNIAS DE *BOTRYOCOCCUS*

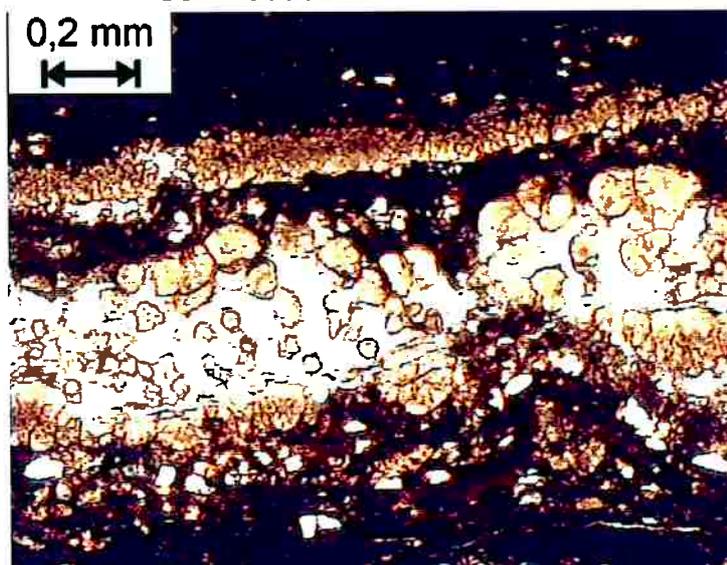
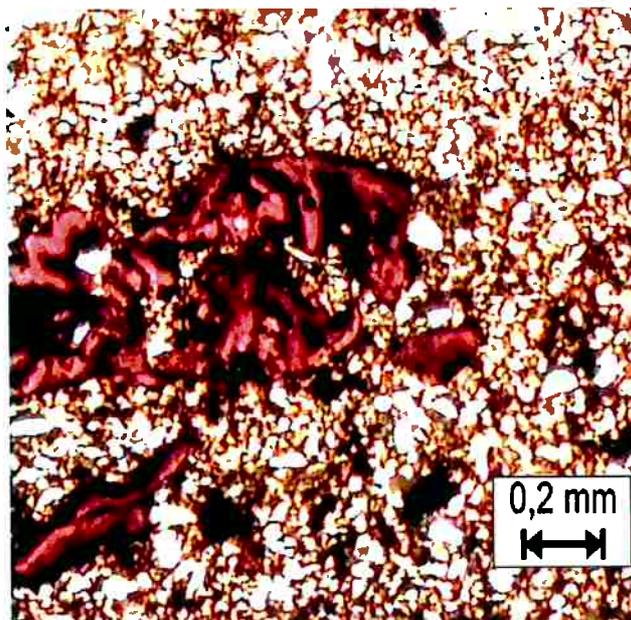


FIGURA 68 - OUTRO ASPECTO DA ESTRUTURA DO QUEROGÊNIO, IMERSO COMO MASSA DISFORME NA MATRIZ DO FOLHELHO OLEÍGENO DA PORÇÃO INTERMEDIÁRIA DA CAMADA INFERIOR DO MINÉRIO



Parece haver semelhanças entre estas imagens e colônias de *Botryococcus*, organismo muito comum em "algal blooms"<sup>7</sup>, fenômeno hoje identificado em situações de "marés vermelhas". Conclusões sobre as condições paleoambientais formadoras do depósito de folhelhos podem ser obtidas através da classificação e interpretação dos constituintes macerais do querogênio. Muitos trabalhos de identificação dos constituintes orgânicos de folhelhos oleígenos repetem a descrição da presença de *Botryococcus* fósseis (BORREGO et al, 1996; FOLLOWS, 1998; BRUKNER-WEIN, 2000), que é considerada uma alga de águas doces até salobras.

Essa alga secreta quantidades copiosas de lipídeos que mantém a colônia unida e possivelmente ajudavam na flotação da colônia. O microorganismo é tão abundante em folhelhos pirobetuminosos da Escócia que chega a compor 11% do volume da rocha<sup>8</sup>. Modernamente, pode se acumular em camadas de 5 a 10m de espessura nos fundos de lagos, que tendem a formar "boghead coals" (substância mineral intermediária entre os folhelhos oleígenos e o carvão) enriquecidos em lipídeos e compostos parecidos com parafinas.

### 8.3 Fósseis macroscópicos no folhelho

O Subgrupo Irati, da Bacia Sedimentar do Paraná, hospeda em seus sedimentos permianos, depositados a cerca de 250 milhões de anos, vestígios de seus paleoambientes de formação. O querogênio, matéria prima de composição complexa geradora do óleo extraído dos folhelhos oleígenos pirobetuminosos, foi formado por antigas populações de algas ou cianofíceas, soterradas em ambientes de mares fechados ou de grandes lagos.

Segundo VELBEL (1984), as relações entre ambientes biológicos remotos e processos que ocorreram ao longo do tempo geológico podem ser descritos a partir da determinação da natureza da secção estratigráfica (no caso estudado, continuidade e conteúdo em matéria orgânica desde as rochas da Formação Serra Alta e atravessando o

---

<sup>7</sup>Professor THOMAS FAIRCHILD, Instituto de Geociências da USP, comunicação pessoal.

<sup>8</sup>Idem.

Subgrupo Irati) e da interpretação dos dados paleoecológicos obtidos. Nesse sentido, as investigações sobre a mineralogia e geologia das duas camadas de minério do depósito de folhelhos de São Mateus do Sul leva a informações relevantes para a reconstituição dos paleoambientes do Permiano paranaense.

Há a disponibilidade de acesso à importantes sítios desses fósseis, transitórios em função do avanço da lavra da PETROBRAS, já que da mina de São Mateus extraem-se 3,5 milhões de toneladas/ano de minério. Seria muito interessante para a interpretação dos ambientes sedimentares formadores do querogênio que novos projetos de estudo da paleontologia do Subgrupo Irati fossem feitos nos depósitos lavrados pela PETROBRAS/SIX, durante as movimentações de rocha na lavra.

Artrópodes, como o malacostráceo *Pygaspis* (PINTO, 1934; MEZZALIRA, 1954), têm representantes indicados nos folhelhos pirobotuminosos, de um grupo com pobre documentação paleontológica no mundo todo. Fósseis típicos da flora de *Glossopteris* são encontrados em determinadas fácies do Subgrupo Irati.

TABELA 21 - ALGUNS FÓSSEIS DESCRITOS COMO TÍPICOS DO SUBGRUPO IRATI

Carapaças de crustáceos	<i>Liocaris huenei</i>
Madeiras fósseis	<i>Solenopitys, Parataxopitys, Polysolenoxylum</i>
Répteis	<i>Mesosaurus brasiliensis</i> Mc Gregor
Crustáceo	<i>Pygaspis brasiliensis</i>

FONTE: MENDES, 1977

Espetaculares répteis fósseis brasileiros, o *Mesosaurus brasiliensis* (MAC GREGOR, 1908) encontrou nos tranquilos ambientes do Permiano seu mais rico habitat (RÖSLER, 1983) e acham-se preservados tanto em sedimentos de fácies carbonática como de fácies siliciclástica;

Um dos aspectos mais importantes relacionados com os fósseis de *Mesosaurus brasiliensis* é o fato de se tratarem de uma das provas mais conclusivas sobre a deriva continental e a separação da América do Sul da África após o Paleozóico.

TABELA 22 - PRINCIPAIS MESOSSAURÍDEOS DESCRITOS

MESOSSAURÍDEOS CORRELACIONADOS	REGIÃO
<i>Mesosaurus pleurogaster</i> (1878, G. H. Lee)	Kimberley (África do Sul)
<i>Mesosaurus tenuidens</i> (1892, Gervais)	Bacia do Karroo (África do Sul)
<i>Stereosternum tumidum</i> (1885, E. D. Cope)	Bacia do Paraná (São Paulo)
<i>Mesosaurus brasiliensis</i> (1908, J. H. McGregor)	Bacia do Paraná (Paraná)

A cabeça do *Stereosternum tumidum* era mais curta e tinha dentes também mais curtos; apresentava maior número de vértebras entre a cintura pélvica e a escapular. *Mesosaurus brasiliensis* alcançou maiores comprimentos e era provida de dentes longos e finos (MENDES, 1977).

Segundo esse autor, os répteis realizaram, no caso dos mesossaurídeos, um retorno ao ambiente aquático, na metade do período geológico seguinte. Os mesossaurídeos não apresentavam mais de um metro de comprimento e aparentemente podiam se locomover sobre terra firme. São raros os espécimes em que se conservaram os delicados crânios.

A enorme quantidade de fósseis de mesossaurídeos, expostos diariamente nas operações de lavra da mina de São Mateus do Sul, incentiva o surgimento de pesquisas sobre as distribuições estatísticas de atributos dos fósseis, como já fora tentado em condições menos favoráveis (LANDIM, PERINOTTO, 1977).

FIGURA 69 -ASPECTO DE DOIS EXEMPLARES INCOMPLETOS DE FÓSSEIS DE MESOSSAURÍDEOS ENCONTRADOS NA CAMADA SUPERIOR DE FOLHELHO OLEÍGENO, UM DELES (A) INCOMUM POR ESTAR NA REGIÃO DE CONTATO INFERIOR DO ESTRATO, ADJACENTE À ROCHA CARBONÁTICA



FIGURA 70 - MESOSAURUS BRASILIENSIS



FONTE: J. H. McGregor, 1908

#### 8.4 As argilas

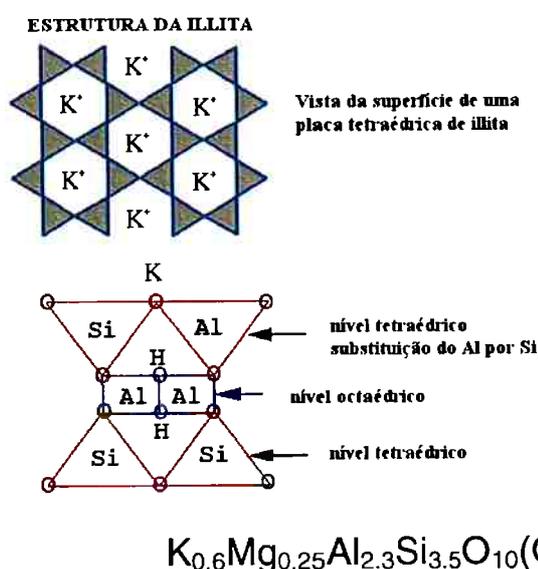
Nos folhelhos oleígenos do Subgrupo Irati, a natureza e as propriedades dos argilo-minerais são particularmente importantes na definição da qualidade do minério, sendo eles suscetíveis de dilatação, contração, solubilização e transporte durante a ação dos processos de intemperismo na mina. Além disso, existem variações decorrentes de outras espécies mineralógicas associadas às argilas, em diferentes locais do depósito de folhelho, bem como a topografia, a vegetação e o intervalo de tempo que o folhelho fica exposto às variações climáticas e também às estiagens prolongadas em S. Mateus do Sul.

Grande parte da instabilidade dos folhelhos pode ser atribuída aos fenômenos de hidratação a que estão sujeitos os argilo-minerais (BLATT, 1980). O tipo de cátion interlamelar é importante para determinar a quantidade de água que pode ser absorvida: sódio atrai mais moléculas de água que o cálcio e o potássio.

Folhelhos tendem a sofrer hidratação superficial assim que ocorre o contato com água e continuam a absorvê-la por osmose e hidratação intercrystalina (VELDE, 1995). Como resultado, os argilo-minerais sofrem dilatação, favorecendo a desintegração da rocha.

O argilo-mineral predominante no folhelho de S. Mateus do Sul é a illita (WOLF *et al* 1976), que tem sua estrutura representada na Figura 71.

FIGURA 71 - ESTRUTURA DO CRISTAL DE ILLITA



As illitas no folhelho de S. Mateus do Sul, quando observadas em microscopia eletrônica de varredura, mostram estruturas em forma de lascas com pouca definição geométrica em agregados irregulares ou alveoliformes. Diferem morfológicamente das caolinitas, que se apresentam empacotadas, e das esmectitas que tem ondulações em suas superfícies.

Na figura a seguir, observa-se uma das imagens dos argilo-minerais obtidas em microscopia eletrônica de varredura, com sua correspondente análise através de EDS.

FIGURA 72 - FOTOMICROGRAFIA E CORRESPONDENTE ANÁLISE POR EDS DE FRAGMENTO DE FOLHELHO PIROBETUMINOSO, EXIBINDO ESTRUTURA ALVEOLIFORME DOS MINERAIS DE ARGILA

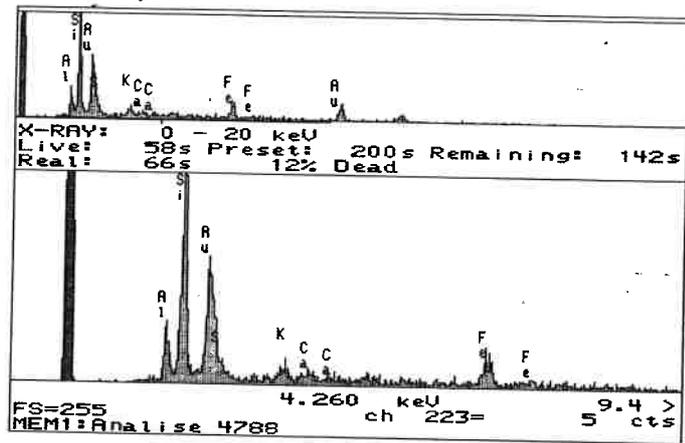
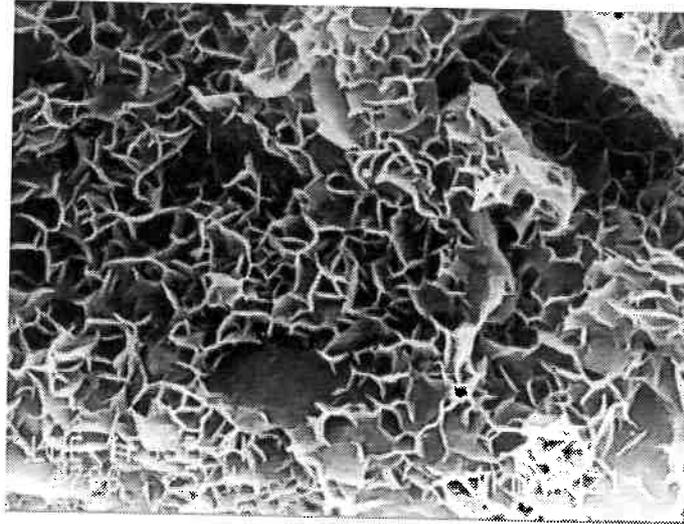
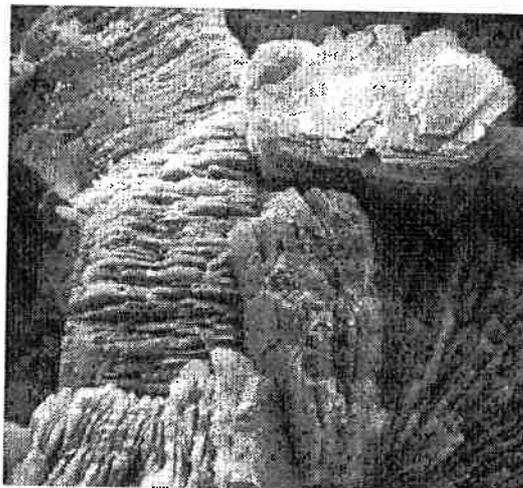


FIGURA 73 - CRISTAIS DE CAOLINITA AMPLIADOS CERCA DE 1000X (clay minerals, 2000)



Importantes para o comportamento mecânico da rocha são os vários níveis de argila bentonítica contínuos em toda a extensão do depósito de São Mateus do Sul e que ocorrem nas camadas superior e inferior do folhelho oleífero como indícios que motivam teorias sobre eventos vulcânicos durante o Permiano (MAYNARD et al, 1996; SUCHA, 1993).

FIGURA 74 - INDICAÇÃO DE UM DOS NÍVEIS DE ARGILA BENTONÍTICA QUE OCORREM NA CAMADA SUPERIOR DE FOLHELHO OLEÍGENO QUE, NESTA SITUAÇÃO SE APRESENTAVA COM COLORAÇÃO INCOMUMENTE CLARA



Na tabela a seguir estão expostas algumas características de expansibilidade das principais argilas.

TABELA 23 - PRINCIPAIS ARGILO-MINERAIS E SEUS PERCENTUAIS DE EXPANSIBILIDADE RELATIVA

caolinita	Não expansiva (5-60%)
Illita	Pouco expansiva (5-120%)
Ca-montmorillonita	Moderadamente expansiva (45-145%)
Na-montmorillonita	Muito Expansiva (1400-1600%)

As esmectitas tendem a formar as illitas, mesmo em ambientes com processos diagenéticos de baixa energia. Ambas as espécies apresentam afinidades de fixação de compostos orgânicos e inorgânicos em suas superfícies.

Tendo como intrínseco o efeito contínuo das transformações químicas de argilo-minerais no folhelho e atestando-se a predominância da illita, pode-se considerar

que outros fatores mineralógicos devem contribuir substancialmente para a degradação da rocha, por expansão, desde que essas transformações tenham tempo suficiente para se realizar, a partir da exposição da rocha sã.

Materiais argilosos podem ser estabilizados pela adição de pequenas porcentagens de soluções cálcicas, método empregado em construção de estradas sobre terrenos pouco firmes (BELL, 1996). Como a estabilidade da rocha depende de suas propriedades internas de relacionamento mineral, soluções percolantes e que envolvam as partículas e as mantenham juntas podem aumentar a densidade e a compactação do folhelho. O cloreto de cálcio, por exemplo, é vendido comercialmente para minimização de geração de finos em diversas circunstâncias.

A troca iônica induzida por aspergimento de soluções cálcicas sobre afloramentos, com íons em solução sendo apanhados pelos grãos minerais, principalmente pelo oferecimento do cálcio para substituição do sódio e potássio nos argilo-minerais, costuma ser empregada para estabilização de folhelhos pela engenharia civil, tratando-se de uma hipótese ainda não levantada no processo da PETROBRAS/SIX, apesar da abundância de minerais de cálcio no depósito.

## 9 OS SULFETOS E SUA INFLUÊNCIA NA DECOMPOSIÇÃO DA ROCHA OLEÍGENA

Os minerais de enxofre neoformados, originados por modificações na composição química das piritas do depósito, com o passar do tempo contribuem para grande parte da fragilidade da rocha oleígena. Como ressaltado no Capítulo 8, isso é perfeitamente observado em fragmentos de folhelho, tanto da camada superior como da inferior, após ficarem expostos por alguns poucos dias ao intemperismo.

Sulfetos de ferro são comuns em rochas sedimentares. Tanto a pirita, como a marcassita podem trazer informações sobre o ambiente deposicional e colaborar na determinação da diagênese de suas rochas hospedeiras (DILL *et al*, 1997). Sob o ponto de vista da formação de finos de mineração, é mais importante o conhecimento do potencial destrutivo da alteração das piritas, pelos vazios criados e pelo aumento de pressões internas, além dos produtos de oxidação reagirem com os demais minerais da rocha (PENNER, 1999).

Nos folhelhos de São Mateus do Sul, os processos de alteração mineral provocados pelo intemperismo nas piritas e marcassitas têm ação, inicialmente, na superfície do terreno exposto, progredindo para o interior do depósito, participando da desintegração da rocha.

Nas caixas de testemunhos, de sondagens realizadas há cerca de vinte e cinco anos na pesquisa inicial para a avaliação geológica e cubagem de reservas da PETROBRAS/SIX, chama a atenção verdadeira pulverização de determinadas porções da rocha. Esse aspecto pulverulento, comum também em vários ambientes da mina, é o resultado de um processo que se inicia no momento da exposição da rocha fresca à superfície, com surgimento de espículas esbranquiçadas destacando-se da matriz negra, podendo até mesmo formar destacadas massas agrupadas maiores.

### 9.1 A pirita, a marcassita e as transformações nos sulfetos

As rochas do Subgrupo Irati são reconhecidas como fontes de anomalias geoquímicas regionais em sulfatos (LICHT *et al*, 1997), pela alteração de seus sulfetos nos níveis pirobetuminosos.

É notório que, após longos períodos de exposição, ocorrem efeitos extremos da degradação física da rocha de São Mateus do Sul. À vista desarmada, o início do fissuramento e fragmentação torna-se visível após alguns dias. São notáveis os aspectos de gretas de ressecamento e os filmes e “penugens” brancas que iniciam a se formar sobre a rocha predominantemente escura.

No minério da camada superior de folhelho, é muito nítida a presença de minerais metálicos alterados recobrando as superfícies das rochas, onde massas agregadas de pirita em maior concentração, bem como cristais maiores exibem zoneamento de alteração concêntrica progressiva. A comprovação de diferentes estágios de alteração, pelos quais passam os sulfetos no folhelho, foi possível através do emprego de microscopia eletrônica de varredura, com análises por microsonda de difratometria de espectroscopia de raios-X por energia dispersiva (EDS) associadas, para determinação correta das espécies químicas observadas.

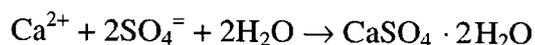
As modificações químicas decorrentes da alteração das piritas podem ser assim resumidas:

- 1) Oxidação da pirita e precipitação de hidróxido de ferro:



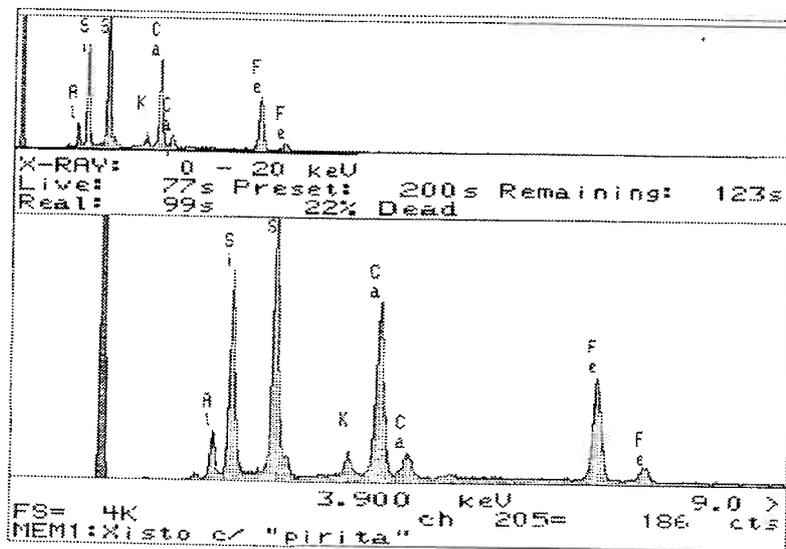
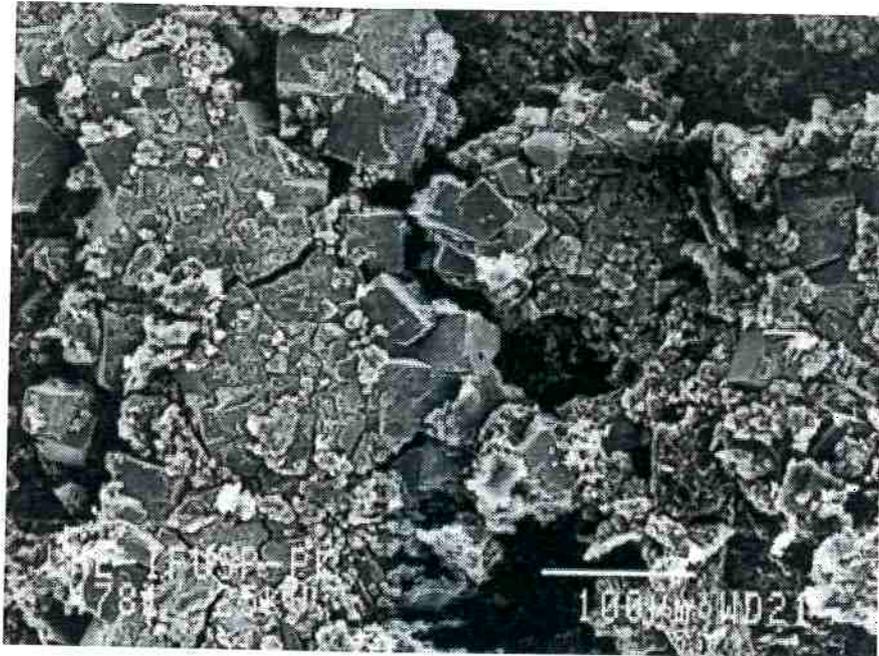
Com a existência de cálcio livre no ambiente:

- 2) Formação da gipsita:



Gipsita é um sulfato hidratado de cálcio com característicos hábitos cristalinos. Os cristais de gipsita observados no folhelho oleífero do Subgrupo Irati apresentam hábito de agregados placóides ou aciculares.

FIGURA 75 - IMAGEM: FOTOMICROGRAFIA DE FRAGMENTO DE FOLHELHO OLEÍGENO E CORRESPONDENTE ANÁLISE POR EDS, EXIBINDO AGLOMERADO DE CRISTAIS DE PIRITA E INÍCIO DE PROCESSOS DE ALTERAÇÃO QUÍMICA



Existe um amplo registro de danos em concreto de obras de engenharia civil e de esfoliações em esculturas de rocha contendo pirita, devido à sua passagem para sulfato (OYAMA E CHIGIRA, 1999). É nítida a variação do volume da estrutura cristalina resultante e, por conseguinte, a redistribuição gradativa de tensões internas da rocha (Figuras 76 a 77).

FIGURA 80 - CRISTAIS AGLOMERADOS, EM ESTRUTURA FRAMBOIDAL TÍPICA DA MARCASSITA, ( $FeS_2$ ), OBSERVADA ATRAVÉS DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA (COM CORRESPONDENTE ANÁLISE POR EDS) EM PLANOS DE FRATURA DISCORDANTES DO ACAMAMENTO DA ROCHA

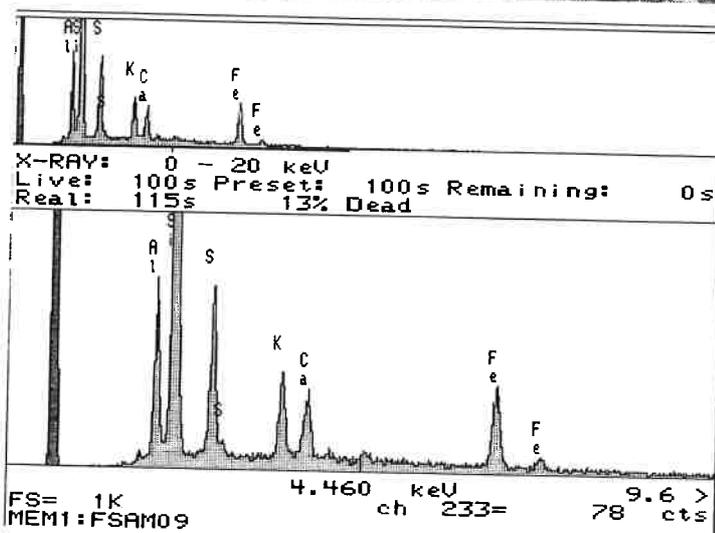
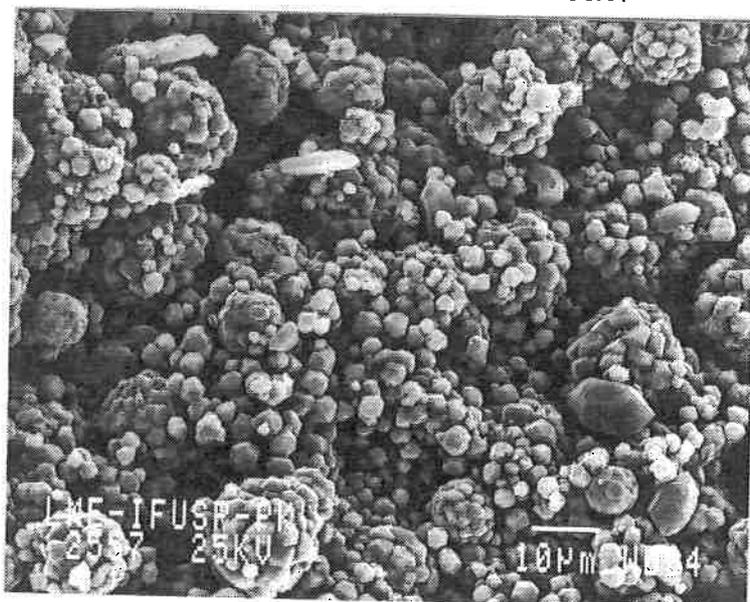
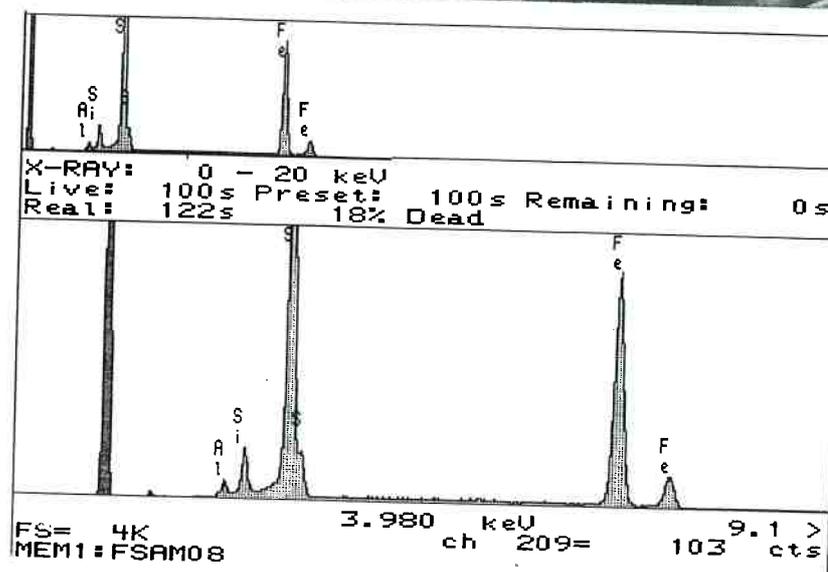
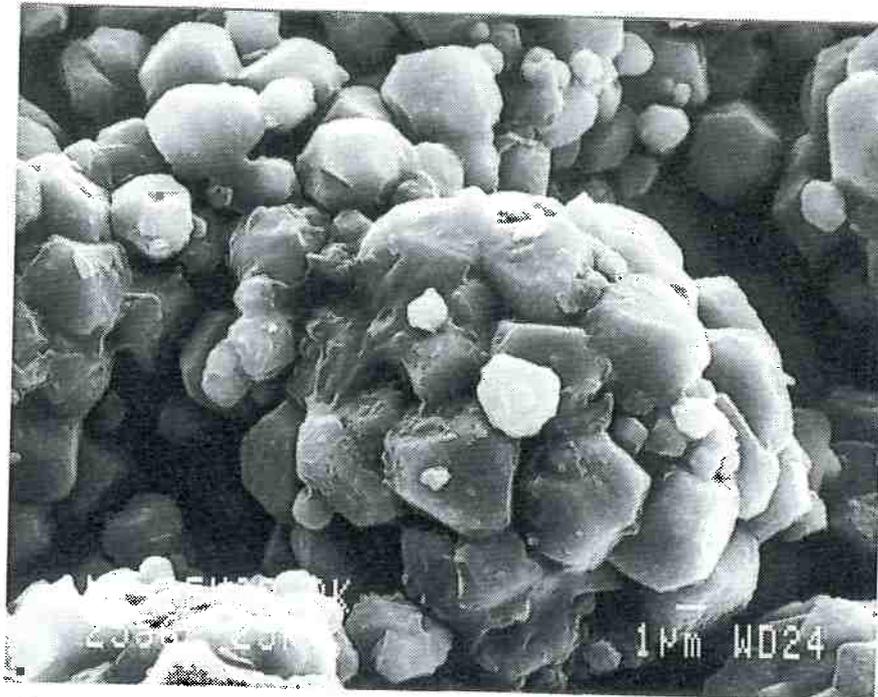
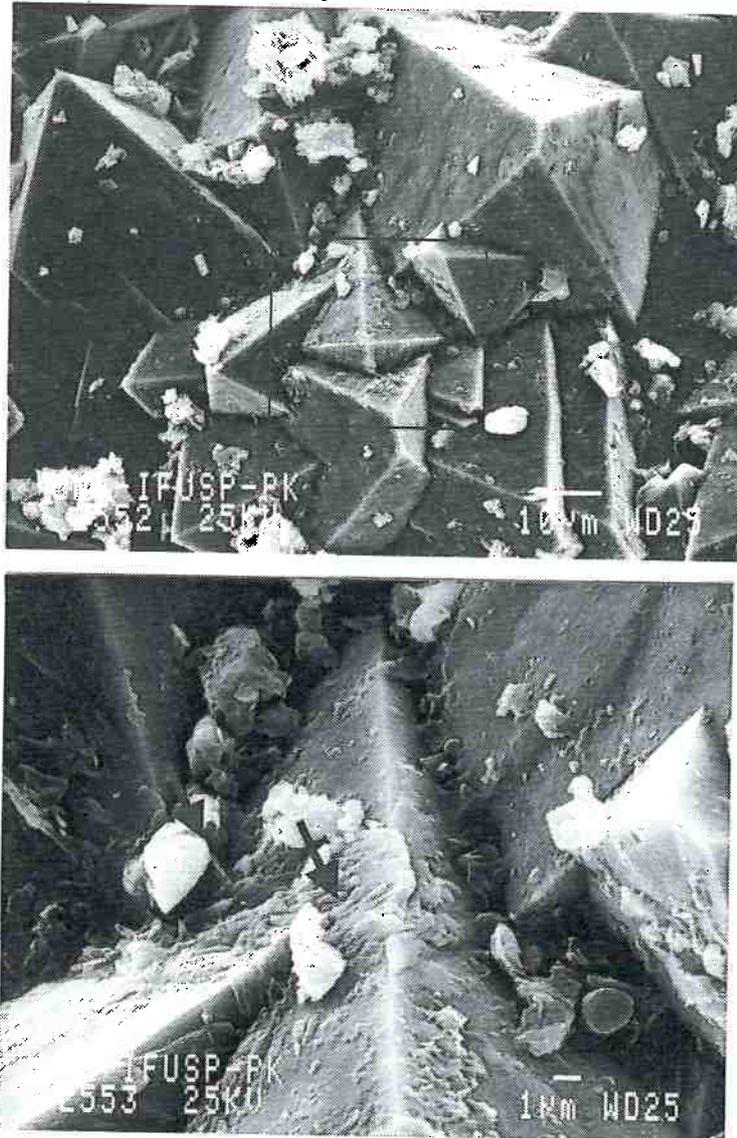


FIGURA 81 - IMAGEM OBTIDA POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA, COM CORRESPONDENTE ANÁLISE POR EDS, MOSTRANDO AGRUPAMENTO DE CRISTAIS DE MARCASSITA E SUA COMPOSIÇÃO QUÍMICA BEM DISCRIMINADA



A marcassita tem estrutura cristalina característica e é formada pela alteração das pirritas em ambientes de percolação, como fraturas e foliações na rocha. Macroscopicamente, os filmes de sulfeto alterado exibem coloração metálica variando do amarelo ao azulado e são visíveis principalmente na camada superior de folhelho oleífero. Etapas de modificação química da marcassita para sulfato de cálcio foram observadas em microscopia eletrônica (Figura 82).

FIGURA 82 - FACES CRISTALINAS DE MARCASSITA PRESENTE EM AMOSTRAS DA CAMADA SUPERIOR DE MINÉRIO, EM PLANOS DE ACAMAMENTO. INDICA-SE A PRESENÇA DE CALCITA



Na Figura 83 está exposta uma feição da alteração da marcassita, a partir de uma de suas arestas cristalinas, com a formação de sulfatos de cálcio (gipsita).

FIGURA 83 - CRISTAIS DE GIPSITA SECUNDÁRIA FORMANDO-SE EM  
ARESTAS DE CRISTAIS DE SULFETO DE FERRO

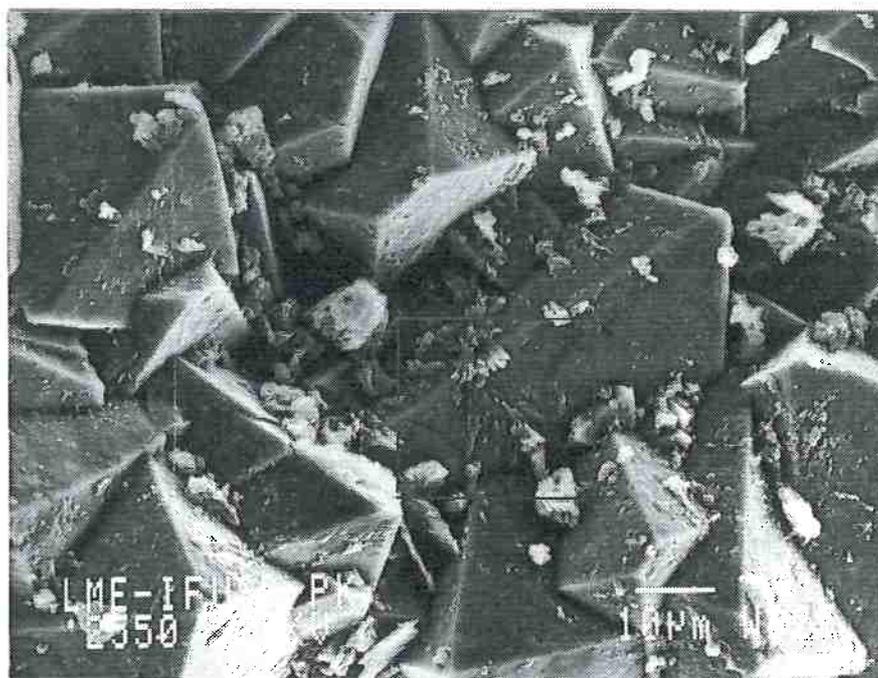


TABELA 24 - TEORES E RELAÇÕES PERCENTUAIS ENTRE ENXOFRE PIRÍTICO E ENXOFRE TOTAL NO DEPÓSITO, SEGUINDO MÉTODO ASTM D2492

N.º DA AMOSTRA	TEOR (%) DE ENXOFRE TOTAL (St)	TEOR (%) DE ENXOFRE PIRÍTICO (Sp)	Sp/St
1	1,96	1,52	0,77
2	2,45	1,82	0,74
3	2,05	1,07	0,52
4	1,94	2,91	-----
5	3,41	1,01	0,30
6	2,26	1,79	0,79
7	1,97	1,34	0,68
8	3,98	3,58	0,90
9	4,73	3,91	0,83
10	0,81	0,45	0,55
11	2,40	1,78	0,74
12	2,62	1,93	0,74
13	4,17	3,43	0,82
14	1,12	0,71	0,63

A maior parte do enxofre que não compõe os sulfetos (pirita e marcassita) está sob a forma de sulfatos de cálcio (gipsita), o que evidenciam os teores elevados da mineralização secundária. Em análises anteriores, feitas pela PETROBRAS/SIX, não haviam sido detectados teores de enxofre que não fosse pirítico na composição das amostras.

Análises feitas para determinação do enxofre na estrutura da pirita permitiram o reconhecimento da presença das duas, respectivamente, mais abundantes formas do enxofre no folhelho. A isso se associaram as investigações sobre a natureza dos sulfatos de cálcio determinados pela análise por microsonda de raios X e expostos pela microscopia eletrônica.

É comum a presença de elementos traços nos sulfetos e nos compostos orgânicos, ocorrendo normalmente sua concentração durante a retortagem. PATERSON *et al* (1986) explicam que a oxidação total dos sulfetos de ferro, pirita e marcassita ("pirita framboidal")<sup>7</sup> é função da existência de zonas mais ricas em ferro na rocha sedimentar e pela alta reatividade das marcassitas. Outro aspecto importante que surge

<sup>7</sup>"Pirita framboidal" é encontrada em livros muito antigos, cujas tintas continham tanino e sulfatos de ferro. O ambiente anóxico favoreceu a redução do sulfato da tinta em agregados esféricos micrométricos \_ framboidais (Garcia-Guinea *et al.*, 1997).

da análise das reações sofridas pelos sulfetos no processo é que, enquanto na pirólise as piritas em sua maior parte se oxidam, formando diferentes óxidos de ferro (PUURA, 1999), as marcassitas resistem mais às temperaturas em torno de 500°C, gerando mais resíduos inalterados (GLIKSON, 1987).

Altas temperaturas na pirólise podem oxidar totalmente os sulfetos, mas isso também depende das relações entre o tipo de retorta, o tempo e a temperatura de pirólise e a presença de finos de folhelho na carga adicionada. LEWAN, 1998, considera importante o conhecimento das relações atuais entre o enxofre mineral e o carbono nas rochas oleígenas para compreensão dos mecanismos de formação do querogênio.

As investigações sobre processos integrados de utilização de resíduos de gipsita e pirita de depósitos minerais lavrados têm despertado interesse (TAO *et al.*, 2000) tanto pela necessidade de redução de impactos ambientais, como pelas possibilidades de novas utilizações das matérias primas ainda desconsideradas.

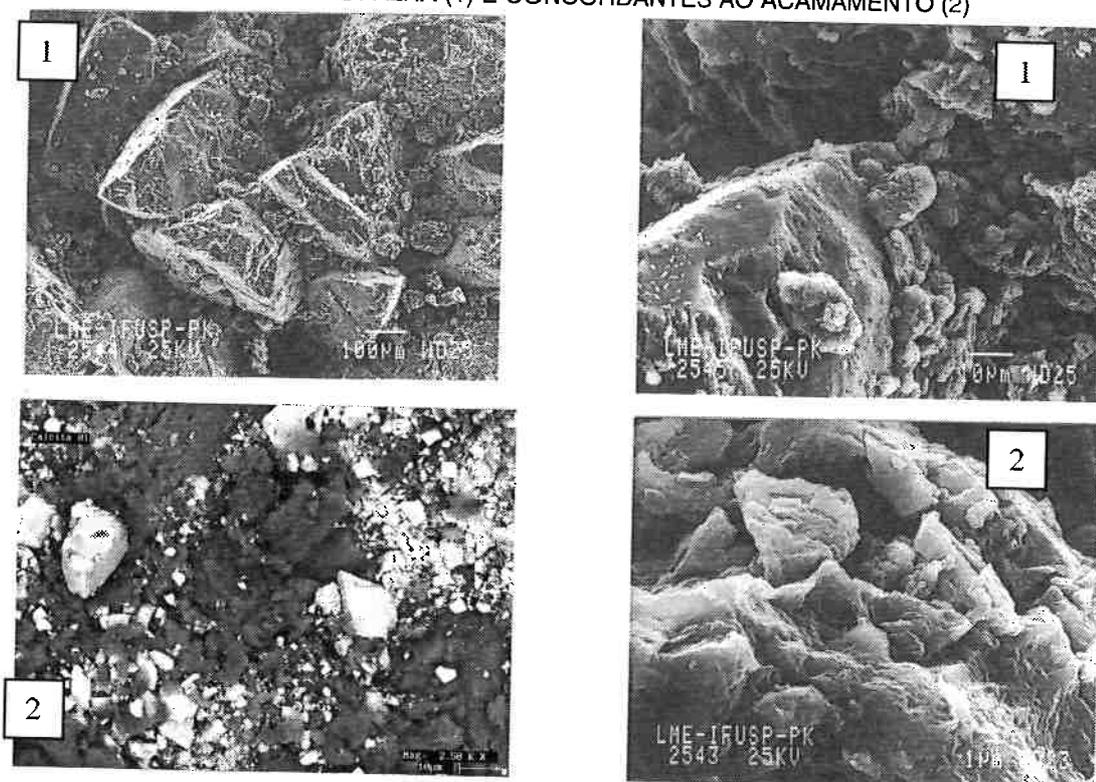
## 9.2 Cimentação

O intemperismo químico causado pela percolação de águas ricas em enxofre, gradativamente avança em profundidade. A ação do ácido sulfúrico, resultante da oxidação da pirita e da marcassita, dissolve minerais (os próprios sulfetos e os carbonatos) no depósito e degrada a estrutura da rocha.

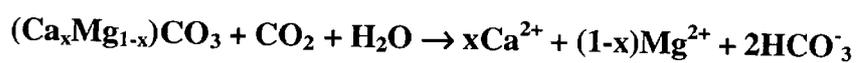
No depósito de folhelho de São Mateus do Sul a extensa lente carbonática existente entre as duas camadas de minério contribui para a retenção e neutralização das soluções descendentes. As camadas concordantes de calcita são pouco tenazes mas constituem as estruturas mais coesas entre os diferentes materiais sedimentares, silicáticos ou carbonosos, internos do folhelho oleígeno.

Em superfícies de falha, a calcita recristalizada adquire outro arranjo estrutural, mas também age como cimento nessas regiões cizalhadas.

FIGURA 84 - TEXTURA E CRISTALIZAÇÃO DIFERENCIADA DAS CALCITAS DISCORDANTES EM PLANO DE FALHA (1) E CONCORDANTES AO ACAMAMENTO (2)



A dissolução dos carbonatos por  $\text{CO}_2$  leva às condições necessárias para a percolação de soluções ricas em cálcio:



Sendo  $x > 0.75$  para calcita e  $x \sim 0.5$  para dolomita (PUURA, 1999)

As concentrações químicas encontradas na forma de óxidos nas calcitas concordantes, através de análises por absorção atômica, são expostas na tabela a seguir:

TABELA 25 - ANÁLISE QUANTITATIVA DA COMPOSIÇÃO DE AMOSTRA DE CALCITA OBTIDA EM NÍVEL CONCORDANTE AO ACAMAMENTO

COMPOSTO	CONCENTRAÇÃO EM PESO (%)
CO <sub>2</sub>	42,47 (PF)
MgO	0,758
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,268
SiO <sub>2</sub>	0,754
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,008
SO <sub>3</sub>	0,039
K <sub>2</sub> O	0,028
CaO	53,846
TiO <sub>2</sub>	0,015
MnO	1,207
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,566
SrO	0,021
BaO	0,02

A primeira modificação diagenética no folhelho é a compactação, que causa diminuição do volume dos poros da rocha, com expulsão da água intersticial, precipitando o CaCO<sub>3</sub> que age como cimento entre os grãos.

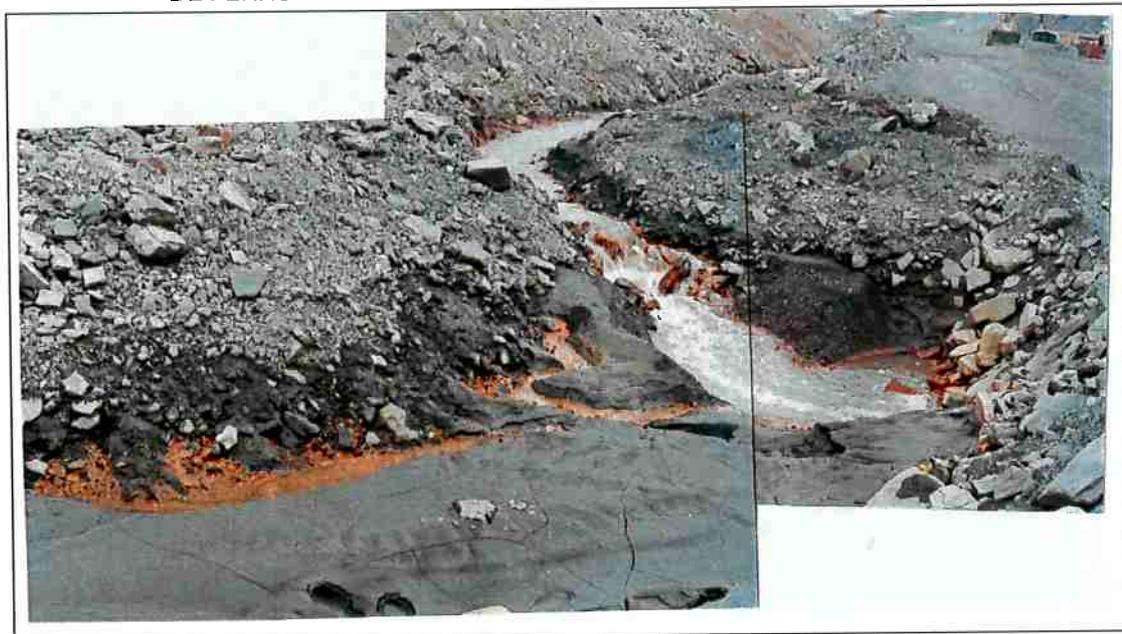
A detecção de fósforo nas análises sugere a possibilidade de presença de matéria orgânica fossilizada (nanofósseis) na camada sedimentar de calcita, aspecto ainda não investigado no depósito de São Mateus do Sul. Os demais óxidos podem constituir apenas impurezas, face à relação praticamente estequiométrica encontrada entre o CaO e o CO<sub>2</sub> nas análises.

### 9.3 Óxidos e hidróxidos de ferro

O comportamento e a mobilidade do ferro no depósito é função da concentração de seus minerais na rocha e do tempo de exposição necessário a oxidação e solubilização de seus compostos. Filmes ferruginosos e crostas lateríticas são cimentos importantes em certas rochas geradoras de lixiviações ácidas, o que não ocorre nos folhelhos oleígenos de São Mateus do Sul.

Não há sinais de crostas lateríticas na área e, apenas como sinais da presença de óxidos de ferro, são encontradas películas ferruginosas de recobrimento em fraturas na rocha. Além disso, águas percolantes avermelhadas indicam a presença do ferro solubilizado no ambiente (Figura 85)

FIGURA 85 - ÁGUAS DE LIXIVIAÇÃO NAS BASES DAS PILHAS DE MATERIAL RETORTADO RECOLOCADO NA ÁREA DE LAVRA (SUL DA MINA), MOSTRANDO, PELA COLORAÇÃO CARACTERÍSTICA, DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÓXIDOS DE FERRO EM SUSPENSÃO



A avaliação do papel do ferro na cimentação das rochas, em diferentes estágios de alteração, passa pela interpretação de sua mobilidade no depósito e de sua relação com os sulfetos detectados.

Pode-se trabalhar com duas formas predominantes do ferro na rocha: o pirítico e aquele nos óxidos. Não foram identificados sulfatos, nem ao menos óxidos, nas várias análises por (EDS) feitas em amostras das duas camadas de folhelho do depósito de São Mateus do Sul.

A composição química teórica das piritas e das marcassitas ( $\text{FeS}_2$ ) é de 46,55% de peso em ferro e 53,45% em enxofre. Análises feitas para quantificação do ferro total em amostras de rocha, em fragmentos e em lamas dentro da mina, quando comparadas com os teores de enxofre da mesma amostra mostraram variações muito grandes nessa relação, o que pode ser explicado pela presença de ferro em outros compostos, como óxidos e hidróxidos ou pela solubilização incompleta do ferro, pois o enxofre identificado na forma pirítica é aquele ainda estabilizado na estrutura cristalina do mineral.

Através dos dados da Tabela 26, podemos tentar correlacionar as influências do ferro e do enxofre na composição da rocha.

TABELA 26 - TEORES DE FERRO TOTAL (% EM PESO) E RELAÇÃO PERCENTUAL COM O ENXOFRE PIRÍTICO (ASTM 2492, 1998), ENCONTRADO EM AMOSTRAS DE DIVERSOS PONTOS DO DEPÓSITO DE FOLHELHO

Nº DA AMOSTRA	TEOR DE FERRO TOTAL	TEOR DE ENXOFRE PIRÍTICO (SP)	FE/SP
1	1,80	1,52	1,18
2	1,71	1,82	0,94
3	2,66	1,07	2,48
4	0,65	2,91	0,22
5	1,30	1,01	1,29
6	1,50	1,79	0,84
7	1,31	1,34	0,98
8	1,09	3,58	0,30
9	1,20	3,91	0,31
10	2,27	0,45	5,04
11	1,44	1,78	0,81
12	1,25	1,93	0,65
13	1,68	3,43	0,49
14	2,45	0,71	3,45

$$\frac{Fe}{S_2} = \frac{46,55}{53,45} = 0,87$$

## 10 CONCLUSÕES

De uma maneira geral, os principais problemas para aproveitamento comercial competitivo dos folhelhos oleígenos de São Mateus do Sul, referentes aos procedimentos de lavra e tratamento são:

- aprimoramento de tecnologias de mineração a céu aberto
- desenvolvimento de equipamentos adequados às minas de folhelho;
- adaptações em processos de perfuração e detonação das camadas de minério;
- qualidade do minério e características de seu transporte e beneficiamento (reduções granulométricas e tecnologias de concentração);
- mineralogia do folhelho e caracterização mineralógica associados à extração do óleo;
- geologia e hidrogeologia dos depósitos de folhelho;
- recuperação de áreas degradadas na mineração.

Esta pesquisa foi direcionada para a investigação e análise das características geológicas e mineralógicas e dos processos geradores de finos de mineração de rochas oleígenas de São Mateus do Sul, devido à importância de seu aproveitamento e da necessidade de manejo dos resíduos. Por finos compreende-se aqueles fragmentos da rocha com granulometria abaixo de 11mm, gerada por processos físicos e químicos a logo após o início dos primeiros procedimentos da lavra dos folhelhos do Subgrupo Irati, que não chegam até a pirólise e que distribuem-se em todas as áreas da mina e cercanias.

A mineração desenvolvida pela PETROBRAS/SIX nos folhelhos pirobetuminosos objetiva a extração de óleo combustível e outros produtos nas melhores condições, com máximo rendimento e menores agressões ao meio ambiente. Em todas as minas a céu aberto de folhelhos oleígenos, assim como nas de carvão, há uma imediata associação entre viabilidade da lavra e os impactos ambientais associados.

Após décadas de produção em São Mateus do Sul, período em que os baixos preços dos combustíveis derivados de petróleo não incentivaram grandes investimentos em pesquisas geológicas básicas de substâncias energéticas alternativas,

desenvolveram-se de forma bem sucedida tecnologias próprias e aplicaram-se medidas para otimização de processos extrativos, a baixos custos e com ganhos sensíveis de produtividade. Reduziram-se as gerações de finos, principalmente com progressos nas etapas de detonação, britagem, transporte e descarga de minério na retorta PETROSIX, mesmo assim, perdas significativas ainda são registradas.

Apesar do depósito de São Mateus do Sul mostrar padrão de comportamento relativamente homogêneo na distribuição de algumas características, como pouca variação lateral dos teores de óleo e de enxofre, uniformidade das espessuras de minério e da relação estéril/minério, as relações que provocam a variabilidade de fragmentação da rocha não são bem compreendidas. As distinções de caráter mineralógico e geológico que influenciam a geração dos finos de mineração puderam ser identificadas durante esta pesquisa, o que leva a hipóteses e sugestões de mitigação do problema, discutidas a seguir.

O querogênio, composto complexo portador dos hidrocarbonetos se integra com os minerais sedimentares, constituindo uma mistura de natureza organo-sedimentar, peculiar, mas não modificando propriedades típicas de dilatação e contração higroscópica, fissilidade e pulverabilidade.

A mais importante influência sobre a qualidade física do folhelho vem da espessura de recobrimento das rochas da Formação Serra Alta sobre a primeira camada de minério. Quanto maior a ação do intemperismo sobre as rochas oleígenas, maior fragmentação se observa e, no caso de capeamentos delgados, há a influência conjunta do alívio de carga em um pacote sub-horizontalizado, potencializando a intrínseca fissilidade.

A camada inferior de minério é bem mais coesa e resistente, pois a maior espessura de sedimentos de cobertura e um anteparo natural, representado por contínua lente calcárea impede o fluxo de soluções ácidas. Nela, a influência relativa da hidratação e solubilização de argilas como processos destrutivos é bem menor.

As propriedades expansivas das argilas do depósito geram os incipientes rompimentos das texturas minerais, assim que a alta umidade do ar de São Mateus do Sul passa a agir no empacotamento da illita predominante. Da mesma forma, é de se esperar que essa desestruturação dos empacotamentos dos argilo-minerais cause liberação, ao menos parcial, do querogênio associado.

Ressalte-se que, de uma maneira geral, a proporção de illitas, smectitas e caolinitas no depósito não é predominante, havendo portanto uma influência grande de outras modificações minerais na degradação da rocha.

A principal forma de cimentação da estrutura do folhelho é a carbonática. Em leitões concordantes no depósito, no preenchimento de fraturas e em algumas faixas tectonizadas, o carbonato de cálcio abundante migra por solubilização, enrijecendo a rocha quando recristaliza em texturas variadas.

Os constituintes orgânicos do depósito, querogênio e demais fósseis, influenciam de forma diferenciada a integridade da rocha: enquanto o primeiro tem distribuição homogênea na extensão subhorizontal das rochas do Subgrupo Irati, os microfósseis podem ser encontrados em agrupamentos populacionais com controles pouco nítidos que, em certos casos, não podem ser desprezados nas avaliações de comportamentos estruturais e nas influências na geração de finos. Tão importante quanto isto, a investigação dos organismos formadores do querogênio (cianofíceas *Botryococcus*, principalmente) serve para conclusões sobre a gênese do depósito e sobre os paleoambientes de sedimentação.

Dentre os fatores de natureza mineralógica identificados como controladores da resistência do folhelho, as propriedades de recristalização dos sulfetos, com suas transformações volumétricas e alteração química progressiva, foi a observação mais notável nesta pesquisa. As evidências de uma forte colaboração na fragmentação da rocha através da transformação da pirita em gipsita, com conseqüente aumento da porosidade interna da rocha, levaram ao detalhamento das observações microscópicas e na caracterização de como se processa, em termos morfológicos e químicos, a passagem do  $\text{FeS}_2$  progressivamente para  $\text{CaSO}_4$ .

Foram encontradas evidências de existência da marcassita, além da pirita, no depósito, o que modifica as interpretações sobre o comportamento dos sulfetos no processamento do minério e mesmo na obtenção do enxofre.

Análises sobre as relações entre enxofre pirítico e enxofre sulfático permitem concluir que as proporções entre eles são muito mais relevantes do que considerado anteriormente, com fortes e importantes reflexos no que concerne extração e processamento. É certo que, em regiões do depósito onde os teores em enxofre forem

maiores, haverá uma tendência para o desenvolvimento de fenômenos de ruptura estrutural mais intenso na rocha.

Sugestões sobre procedimentos para minimizar a desestruturação de folhelhos, através de práticas de aspersão e infiltração com soluções ricas em cálcio por exemplo, surgiram do aprofundamento de conhecimento sobre a natureza mineralógica da rocha.

Como fruto desta pesquisa, que partiu de uma necessidade prática da PETROBRAS/SIX, pode ser atestada e exposta a existência de feições ainda pouco investigadas na geologia, mineralogia, e paleontologia do folhelho oleífero pirobetuminoso de São Mateus do Sul, merecedoras de aprofundamento científico.

Afirma-se que as relações organo-minerais observadas influenciam a geração de finos no empreendimento da PETROBRAS/SIX e que, perseguindo a redução na sua formação através de estudos voltados para a geologia e mineralogia do depósito, surgirão novas alternativas de aperfeiçoamento de sua mineração, através de procedimentos resultantes desta investigação que deverão permitir antever a distribuição de áreas mais problemáticas no depósito, contribuindo, assim, para implantar procedimentos mais aprimorados de planejamento e execução de lavra.

## 11 BIBLIOG

- ABREU, S. F. **Re do Brasil**. Rio de Janeiro: Ministério da Indústria e Comércio, 1962. **Os fósseis e minérios metálicos**.
- ABREU, S. F. **Re do Brasil**. São Paulo: Edgar Blucher, 1973. Cap. 13, p. 444-450: Combust
- AMARAL, S. E. **ogia da Formação Irati (Permiano) no Estado de São Paulo**. **Boletim Inst. Geopaulo**, n. 2, p. 3-82, 1971.
- AMARAL, S. E. **áficos e mineralógicos do xisto betuminoso da Formação Irati**. In: SIMPÓSIO **TAMENTO DO XISTO, São Paulo**, 1981. **Anais. São Paulo: SICTE/ACI** 7-41. (Publicação ACIESP, 29)
- ANDERSON, R. **N<sub>1</sub> in the 21<sup>st</sup> century**. **Scientific American**, New York, v.278, n. 3, p. 68-73 **pecial issue**.
- ANDRADE e SILVA, M. F. R. **Voyage mineralogique dans la province de Saint Paul au Brésil**. **oyages**, Paris, v. 36. Traduzido e publicado na **Rev. Inst. Hist. Geogr.**; **reprognário das Minas do Brasil, de Francisco Inácio Pereira, de 1885.**
- AUSTRALIAN oil **le first shipment from Stuart project**. **Oil and Gas Journal**, Tulsa, May 2001. **D**<http://ogj.pennnet.com/search/search.cfm.....> Acesso em: 10 **Mai**o 2001
- BELL, F. G. **Lime st<sub>1</sub>ay minerals and soils**. **Engineering Geology**, London, v. 42, n. 4, p. 223-237, 1
- BIGARELLA, J. J. **Grmação Irati**. In: SIMPÓSIO **IO SOBRE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO** **ba**, 1971. **Conferências**. 2.ed. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências 9.
- BILKADI, Z. **Bulls francient oil industries**. **Aramco World**, Washington, p. 1-8, 1994. Disponível em: [users.erols.com/zenithco/index.html/index.html/](http://users.erols.com/zenithco/index.html/index.html/) > Acessado em: 15 **maio** 2001.
- BLATT, H.; MIDDLEURRAY, R. **Origin of sedimentary rocks** 2. ed Englewood Cliffs: Pre 80. 766 p.
- BOLLMANN, H. A. **nto ambiental da SIX/PETROBRAS - Relatório Anual: nov. 1995 a dez. 1996**. Instituto de Saneamento **Ambiental** da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 199
- BRASIL. Conselho Naetróleo. **Relatório do Conselho Nacional do Petróleo**. S.l., 1954-1955. p. 249-251 **lização do xisto betuminoso**.
- BRASIL. Ministério dasnergia. Departamento **Nacional** da Produção Mineral. **Principais depósitos mBrasil**. Brasília: DNPM, 1988. v.1, p. 33-5.
- BRITTEZ, R. M. et al. **Detacional de serrapilheira e macronutrientes em uma floresta de araucária, São Mateus**. In: CONGRESSO **NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS**, 2., São Paulo **uais**. São Paulo, 1992.

- NOVICKI, R. E. M.; PORTO ALEGRE, H. K. PETROBRAS/SIX – Uma experiência de gestão de recursos naturais e recuperação de áreas degradadas. Superintendência de Industrialização do Xisto, São Mateus do Sul, **artigo interno**, 1998.
- AUSTRALIAN oil shale firms make first shipment from Stuart Project by an Correspondent. **Oil and Gas Journal**, Tulsa, Melbourne, May 2001. Disponível em: < <http://www>> Acesso em: 10 Maio 2001.
- OIL SHALE - discovery and early application. In: ENCYCLOPAEDIA Britannica. London, 1999 – 2001. <Disponível em: [www.britannica.com](http://www.britannica.com).> Acesso em 08 março 1999.
- ORGANIZAÇÃO PANAMERICANA DE SAÚDE. **Crerios de salud ambiental 8 - Oxidos de azufre y partículas en suspensión**. Washington: OPS/OMS, 1982. 113 p.
- PADULA, V.T. Estudos geológicos da Formação Irati, sul do Brasil. **Boletim Técnico da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 3, p. 407-430, 1968.
- PALMER, C. M. **Algas en abastecimientos de água**. México: Editorial Interamericana, 1962. p. 12,34. / Do original PALMER; C.M. *Algae in water supplies*. 1959, by U. S. Department of Health, Education and Welfare Public Health Service).
- PARK, W. C.; LINDEMANIS, E.; RAB, G. A. et al. Mineral changes during oil shale. In: SYMPOSIUM ON PROCESS MINERALOGY, Chicago, 1981. **Process mineralogy: proceedings**. New York: Metallurgical Society of AIME, 1981. p.517-538.
- PATTERSON, J. H. et al. Characterisation of trace elements in Rundle and Condor oil shales. In: AUSTRALIAN WORKSHOP ON OIL SHALE, 3., 1986. **Proceedings**, Sydney, 1986. p.73-78.
- PENNER, E.; EDEN, W. J.; GRATAN-BELLEW, P. E. Expansion of pyritic shales. In: CANADIAN BUILDING DIGEST. **IRC Publications**. 1999. Disponível em: <http://fox.cisti.nrc.ca/irc/cbd152e.html> > Acesso em 30 de novembro 2000.
- PETERSON, E. J.; O'ROURKE, J. A.; WAGNER, P. Correlation of mineralogy and trace element leaching behavior in modified *in situ* spent shales from Logan Wash, Colorado. In: SYMPOSIUM ON PROCESS MINERALOGY, Chicago, 1981. **Process mineralogy: proceedings**. New York: Metallurgical Society of Aime, 1981. p.539-554.
- PETRÓLEO BRASILEIRO S. A. **Industrialização do xisto de São Mateus do Sul**. S.l.: Superintendência da Industrialização do Xisto, 1995.
- PETROBRAS. **A industrialização do xisto no Brasil**. S.l., 1982. 80 p. (Cadernos PETROBRAS, n. 6)
- PINTO, I. D. Reconstituição de *Pygaspis beurlen*, 1934 (Crustacea-Pygocephalomorpha); sua posição sistemática, seu significado e de outros fósseis para o Gondwana. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 43, p. 387-401, 1971. Suplemento. /Apresentado ao Simpósio Brasileiro de Paleontologia, Rio de Janeiro, 1970/
- PINTO, I. D. Permian insects from the Paraná basin, South Brazil, *I Mecoptera*. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 2, p. 105-116, 1972.
- PORTO ALEGRE, H. K. **Aspectos hidrogeoquímicos em área reabilitada na mineração do xisto em São Mateus do Sul, Paraná, Brasil**. 1995. 191p. Dissertação ( Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- PUURA, E. Technogenic minerals in the waste rock heaps of Estonian oil shale mines and their use to predict the environmental impact of the waste. **Oil Shale**, v. 16, n. 2, p. 99-107, 1999.
- REVISTA DA PETROBRAS Uma pedra também preciosa. Rio de Janeiro, v.1, n.7, p.1-11 jun.1994. Edição especial.
- RÖSLER, O; TATIZANA, C. As membranas natatórias em *Stereosternum tumidum*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 8., Rio de Janeiro, 1983. **Resumo das comunicações**. Rio de Janeiro: SBP, 1983. p.26.
- SALAMEH, M. G. **Jordan's energy prospects e needs to the year 2010: the economic viability of extracting oil from shale**. London: Manara, 1998.
- SALMON, V. et al. **Organic Geochemistry**, London, v. 31, p. 463-474, 2000.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. **Caracterização geotecnológica de quatro amostras dos folhelhos ("xistos") pirobetuminosos de São Mateus do Sul, Estado do Paraná**. São Paulo, 1986. (Relatório contratado pela PETROBRAS, n. 24.015)
- SCHIEBER, J. *et al.* Diagenetic origin of quartz silt in mudstones and implications for silica cycling. **Nature**, London, n. 406, p. 981-985, 2000.
- SOUSA, J. J. F.; VUGMAN, N. V.; MANGRICH, A.S. An ESR study on the Irati oil shale kerogen. **Chemical Geology**, London, v. 63, n. 1-2, p. 17-20, 1987.
- SOUSA, J. J. F.; VUGMAN, N. M.; COSTA NETO, C. Free radical transformations in the Irati oil shale due to diabase intrusion. **Organic Geochemistry**, London, v.26, n. 3-4, p. 183-189, 1997.
- STASIUK, L. D. Erratum to "Confocal laser scanning fluorescence microscopy of *Botryococcus* alginite from boghead oil shale, Boltysk, Ukraine: selective preservation of various micro-algal. **Organic Geochemistry**, London, v. 30, p. 1021-1026, 1999.
- SUCHA, V. et al. Smectite to illite conversion in bentonites and shales of the East Slovak Basin. **Clay Minerals**, London, v. 28, p. 243-254, 1993.
- SUNCOR Energy the Stuart oil shale project. Disponível em: <<http://www.suncor.com/stuart.htm>> Acesso em 01 junho 2001.
- SYVITSKI, J. P. M. **The changing microfabric of suspended particulate matter; the fluvial to marine transition; flocculation, agglomeration, and pelletization**. New York: Springer, 1991. p. 131-137. (Frontiers in Sedimentary Geology)
- TAO, D. et al. An integrated process for utilization of gypsum and pyrite wastes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND MANAGEMENT OF WASTE IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 6., Calgary, Canada, 2000. **Environmental issues and management of waste in energy and mineral production: proceedings**. Rotterdam: Balkema, 2000. p. 347-353.
- VELASQUEZ, J. B. Monitoria de material particulado en operaciones mineras a cielo abierto. In: CONFERENCIA COLOMBIANA DE GEOLOGIA AMBIENTAL, 2., Pereira-Colômbia,
- VELBEL, D. B. On defining limits to paleoecological interpretation in the fossil record. **Geobios**, Lyon, n. 8, p. 415-418, 1984. Mémoire spécial
- VELDE, B. Composition and mineralogy of clay minerals. In: Velde, B., ed. **Origin and mineralogy of clays**. New York: Springer-Verlag, 1995. p. 8-42.

WHITE, I. C. Relatório sobre as Coal Measures e rochas associadas no sul do Brasil. In: Comissão dos Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Sul do Brasil. **Relatório final**. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1908. p. 202-7.

WATANABE, Y. *et al.* Geochemical evidence for terrestrial ecosystems 2.6 billion years ago. **Nature**, London, n. 408, p. 574-578, 2000.

WOLF, M.; CORRÊA DA SILVA, Z.C. Petrographic description and facies analysis of some samples from the oil shale of the Irati Formation (Permian). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1976. **Anais**. Porto Alegre: DNPM, 1976. v. 1, p. 159-70.

YOUNGQUIST, W. Shale oil—the elusive energy. **Hubbert Center Newsletters**, Golden, n. 4, 1998. /M. King Hubbert Center for Petroleum Supply Studies/ Disponível em: <[http://hubbert.mines.edu/news/Youngquist\\_98-4.pdf](http://hubbert.mines.edu/news/Youngquist_98-4.pdf)> Acesso em 12 jan 2000.

ZINGANO, A. C. Estimativa e simulação geoestatística do teor de óleo na jazida de folhelho pirobetuminoso, Mina Paiol Grande, São Mateus do Sul, PR. 1996. 114 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

**ANEXO 1 - MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ**

**APÊNDICE 1 - MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ**