

3

Programa Experimental - Coleta e Caracterização dos Materiais

O programa das atividades práticas experimentais teve como finalidade avaliar a viabilidade do processo de solidificação e estabilização como alternativa para remediação do cascalho de perfuração produzidos nas referidas regiões. Neste sentido, todo o programa experimental teve como objetivo principal, avaliar o uso do cascalho de perfuração como material de construção. Para isso, o cascalho foi incorporado a materiais terrosos com a finalidade de reutilizá-lo como: produção de cerâmica vermelha e como material para base de pavimentos.

No desenvolvimento do programa experimental, realizadas neste trabalho, foram utilizados solos e cascalhos de perfuração do Recôncavo Baiano e dos estados de Alagoas e Sergipe.

A primeira etapa dos testes para tratamento do cascalho de perfuração foi realizada com materiais proveniente dos campos de produção da Petrobras, no Recôncavo Baiano. Foram coletados em campo inicialmente quatro solos de diferentes regiões, e utilizado um único cascalho de perfuração para incorporação a massa de solo.

A segunda etapa foi realizada com materiais provenientes dos campos de produção da Petrobras, localizados nos Estados de Alagoas e Sergipe. Para essa etapa de avaliação foram utilizados dois tipos de solos argilosos aos quais foram incorporados quatro diferentes cascalhos de perfuração.

Na terceira etapa de experimentos foi escolhido um material do recôncavo Baiano para ser utilizado como padrão nos testes de durabilidade e degradação acelerada das peças cerâmicas produzidas.

Na realização do programa experimental foi avaliada a incorporação do cascalho de perfuração a solos da região onde o cascalho de perfuração é disponível e produzido. Tomou-se esse cuidado, devido à utilização dos solos da região ser uma alternativa mais econômica.

O início da realização dos experimentos se deu com o trabalho de campo para a coleta de materiais, após essa etapa os materiais coletados foram submetidos a ensaios de caracterização física, química e mineralógica, e por último foi avaliada a incorporação do cascalho de perfuração na produção de materiais de construção. A seguir serão descritas as etapas do programa experimental.

3.1. Trabalho de campo – coleta de materiais

3.1.1. Primeira Etapa - Materiais provenientes do Recôncavo Baiano para produção de peças cerâmicas

Os quatro tipos de materiais utilizados nesta etapa experimental foram coletados nos campos de produção sul do Recôncavo Baiano, onde foram coletados cascalho de perfuração e solos da região.

O cascalho de perfuração coletado é produto da perfuração do poço de petróleo denominado de FGA 2. Este resíduo havia sido disposto recentemente e apresentava-se com elevada umidade, conforme pode ser observado na Figura 3.1, onde o cascalho de perfuração estava disposto em um dique a céu aberto com precária impermeabilização de fundo.



Figura 3-1 – Dique de disposição do cascalho de perfuração do poço FGA 2.

Neste local foi coletado aproximadamente 100kg do resíduo de perfuração, que foi acondicionado em dois tonéis plásticos e enviado para o Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Este resíduo foi denominado de CP-01, cascalho de perfuração 01.

Os solos coletados tinham a finalidade de servirem como matriz terrosa para incorporação do cascalho de perfuração, ou seja, o encapsulante do resíduo. Desta forma, foram coletados materiais adequados para serem utilizados na produção de cerâmica vermelha e para construção de pavimentos.

Com o intuito de avaliar a produção de cerâmica vermelha, foram coletados três diferentes tipos de solos. O primeiro foi um solo proveniente da Indústria de Cerâmicas FEDERBA, que se encontra a aproximadamente dez quilômetros da região de exploração da Petrobras, Campo de Miranga, localizada no município de Pojuca-Ba. Essa indústria produz telhas e blocos vazados para alvenaria a partir deste material.

A matéria prima utilizada por essa indústria é retirada da encosta imediatamente adjacente a planta da indústria, conforme a Figura 3.2.



Figura 3-2 - Detalhe da exploração na Cerâmica FEDERBA.

Pelas características tácteis visuais o material pode ser caracterizado como um solo argiloso heterogêneo; uma parte é altamente plástica e de cor verde; e a

outra parte é de cor vermelha e menos plástica, conforme pode ser visto na Figura 3.3.



Figura 3-3 - Matéria-prima da cerâmica FEDERBA.

Diante da elevada plasticidade das fácies de cor verde, indicativa da presença de argilominerais expansivos e de alta capacidade de troca catiônica, decidiu-se pela amostragem de 50kg dessa camada argilosa com vistas a avaliar a sua adequação para funcionar como inertizante do resíduo. Tal material foi colocado em tonéis plásticos e identificado com o nome FEDERBA.

No município de Santo Amaro da Purificação foram coletados dois materiais: um solo de um talude de corte de 3 a 5 metros de altura com um folhelho capeado por uma camada de solo massapé. Esse folhelho se apresentava verde, ceroso, muito laminado, muito fraturado, com elevada umidade e quebradiço; e um solo massapé que se trata de um horizonte de solo residual, pouco espesso, de cor vermelha a marrom, com presença marcante de matéria orgânica, de altíssima plasticidade. Nos dois solos foi observada a elevada plasticidade, e a cor verde dos materiais é um indicativo da presença de argilominerais expansivos e de alta capacidade de troca catiônica.

A Figura 3.4 apresenta o talude de corte onde foram coletadas as amostras dos referidos solos argilosos.

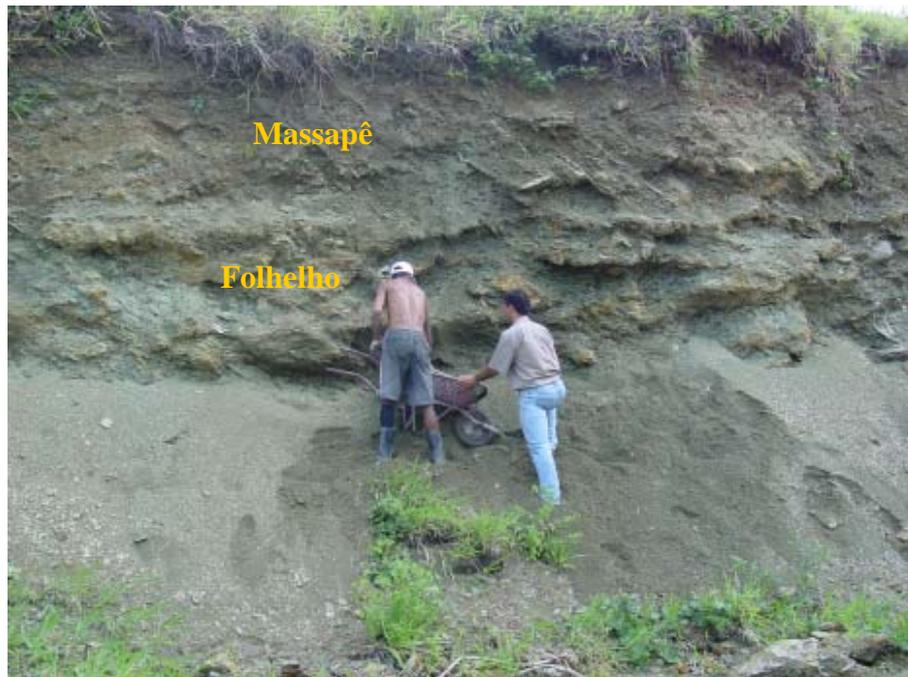


Figura 3-4 - Talude de corte onde foram coletadas as amostras de solos argilosos.

Nesse talude foram coletados 50kg de cada material denominados de Santo Amaro Verde e Santo Amaro Vermelho. Nesses solos se buscava incorporar cascalhos de perfuração com vista à produção de materiais cerâmicos.

3.1.2.

Segunda Etapa - Materiais provenientes de Alagoas e Sergipe para produção de peças cerâmicas

A segunda fase do programa experimental foi realizada com materiais provenientes de campos produtores da Unidade Sergipe-Alagoas da Petrobrás. Em Sergipe, foram visitados os campos de Carmópolis e Siriri. Em Alagoas, as visitas foram realizadas nos campos de Anambé e Pilar.

Nos materiais provenientes desta região, pretendia-se incorporar o cascalho de perfuração na produção de cerâmica vermelha. Para isso, foram realizadas visitas nas proximidades dos campos de petróleo para observar as indústrias cerâmicas locais. Essas visitas tiveram o objetivo de avaliar a matéria-prima empregada na confecção de peças cerâmicas.

No Estado de Sergipe, no campo de produção de Carmópolis, se visitou a central de Resíduos de Jericó, localizada no Alto Jericó. A Central conta com uma série de diques nos quais são dispostos os resíduos oleosos. Os resíduos estocados

na Central de Jericó são previamente centrifugados e dispostos nos diques, estes dispõem de uma impermeabilização de fundo, composta por uma camada de material argiloso compactado. Apesar de o dique conter um sistema de impermeabilização, o mesmo não possui cobertura. A água da chuva ao infiltrar nas pilhas promove a solubilização de uma série de compostos contidos no cascalho e cria uma imensa quantidade de lixiviado, conforme a Figura 3.5.



Figura 3-5 - Dique de armazenamento de cascalho de perfuração no Campo de Carmópolis - SE.

Na Central de Resíduos foi visitada a área de estocagem de cascalho CP-129. Nesta área os cascalhos provenientes dos poços são estocados em forma de pilhas em um dique, Figura 3.5.

Na ocasião da visita a Central de Resíduos foram coletadas duas amostras de cascalho, com cerca de 40kg cada, ambas denominadas de CP-1549 e CP-129. A primeira amostra é referente ao cascalho extraído do poço CP-1549 e a segunda, do poço CP-129. As amostras foram acondicionadas em quatro sacos plásticos e encaminhadas para análises.

Com a finalidade de encontrar um possível encapsulante para os resíduos coletados na Central de Jericó, foi visitada a Indústria de Cerâmica INCELT no município de Siriri, em Sergipe. A Cerâmica INCELT utiliza dois tipos de material argiloso na confecção de tijolos. O primeiro material, que foi denominado de argila Tauá, de coloração avermelhada é proveniente de encostas.

Já o segundo, denominado argila Siriri, de coloração marrom escura é proveniente de várzeas, Figura 3.6.



Figura 3-6 - Depósito de matéria prima na Cerâmica INCELT.

A Cerâmica INCELT emprega uma mistura de três partes da argila Siriri para uma parte da argila Tauá na fabricação de suas peças. A maior presença da argila Siriri deve-se a sua maior plasticidade. A argila Tauá é empregada para minimizar os efeitos de variação de volume durante os processos de secagem e queima.

Durante a visita foram coletados cerca de 50kg da mistura empregada na extrusão das peças. A amostra foi coletada na esteira rolante que recebe o material proveniente do laminador e o leva para a extrusora, conforme pode ser visto na Figura 3.7. A amostra foi acondicionada em dois sacos plásticos e levada para realização das análises.



Figura 3-7 - Coleta de amostra na Cerâmica INCELT.

No Estado de Alagoas foram visitados os campos de Anambé e de Pilar. Em Anambé se visitou a perfuração do Poço ANB-03, no município de São Miguel dos Campos. Nesse poço (Figura 3.8) emprega-se tanto fluido à base água, quanto fluido à base óleo para perfuração.



Figura 3-8 - Vista do Poço ANB-03.

Neste poço foram extraídas duas amostras de cascalho, uma onde foi empregada um fluido á base água e em outra um fluido á base óleo. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, e denominadas de CP-ANB 03 Base água e CP-ANB 03 Base óleo.

No município de Pilar, Alagoas, se visitou o Poço PIR 223D. Neste poço foi coletada uma amostra de cascalho, denominada de CP-223D, cujo fluido de perfuração utilizado na perfuração foi à base água. Ainda em Alagoas foi visitada a Cerâmica Bandeira, no município de Cajueiro. A cerâmica Bandeira emprega uma mistura de um material argiloso de várzea com um material argiloso de encosta. A Figura 3.9 apresenta o depósito das matérias-primas da Cerâmica Bandeira.



Figura 3-9 - Depósito de material argiloso.

A proporção da mistura para fabricação de tijolos da Cerâmica INCELT, semelhante à Cerâmica Bandeira, é de duas partes do material de várzea para uma parte do material de encosta. Durante a visita foram coletados cerca de 70kg da mistura empregada na extrusão.

3.1.3.

Terceira Etapa – Material do Recôncavo Baiano para teste de degradação acelerada

A terceira fase da campanha experimental foi realizada com a finalidade de realizar o ensaio de degradação acelerada para avaliar a durabilidade das peças cerâmicas produzidas. Para isso, foi necessário a escolha de um material anteriormente avaliado, para servir como padrão ao teste de degradação. O material escolhido foi o mesmo solo coletado no Recôncavo Baiano, o qual foi coletado na Industrial Cerâmica FEDERBA. Este foi escolhido devido à facilidade de acesso e pelas características dos materiais cerâmicos produzidos com esse material.

3.1.4.

Quarta Etapa – Material do Recôncavo Baiano para incorporação em pavimentos.

Para a incorporação do cascalho de perfuração na construção de pavimentos foi realizada apenas a incorporação deste resíduo em materiais já utilizados nas obras de pavimentação realizadas pela Petrobras no Recôncavo Baiano. Com essa finalidade foram avaliados sete diferentes tipos de solo e três diferentes cascalhos de perfuração.

O material areno-argiloso, apresentado na Figura 3.10 exemplifica um dos materiais mais utilizados na obras de pavimentação locais, é original da Formação Barreiras característica da região, sendo este extraído de uma jazida localizada no município de Candeias-Ba.



Figura 3-10 – Jazida no Município de Candeias – Formação Barreiras.

Nas obras de pavimentação realizadas pela Petrobrás, dada a escassez de material adequado, é também adicionado ao material terroso escória de aciaria.

A escória de aciaria, mostrada na Figura 3.11 é o resíduo da produção de aço da companhia siderúrgica FERBASA, localizada no município de Pojuca-Ba, Recôncavo Baiano. A escória de aciaria também é um resíduo industrial, sendo este inerte, o qual pode ser adquirido facilmente na região a preços acessíveis. A

escória tem características semelhantes à pedra britada. Porém a escória de aciaria, devido à expansão volumétrica causada pelos teores de CaO e MgO livres que, em contato com a água sofrem reações de hidratação, podem apresentar restrições para algumas aplicações.



Figura 3-11 – Escória de Aciaria (CST,2009).

3.1.5. Resumo dos materiais estudados

A

Tabela 3-1 apresenta todos os solos e cascalhos de perfuração que foram estudados, nela é mostrada a região procedente dos materiais, bem como as finalidades para as quais esses materiais foram avaliados. Na Tabela 3.1 a sigla AG e MG referem-se ao campo de produção de petróleo no qual foi coletado o material. MG é o campo de produção de Miranga e AG é o campo de produção de Santiago, ambos no Recôncavo Baiano.

Tabela 3-1 – Materiais coletados no Recôncavo Baiano e nos estados de Alagoas e Sergipe

Procedência	Solo	Cascalho de Perfuração	Finalidade
Recôncavo	FEDERBA	CP-01	Produção de

Baiano	Santo Amaro Vermelho	Cascalho - MG	peças cerâmicas
	Santo Amaro Verde		
	Avermelhado MG		Pavimentação - Construção de bases e acessos à poços de petróleo
	Rosa MG		
	Cinza Escuro MG		
	Cinza Claro AG		
	MG 782 + Escória de aciaria		
Alagoas / Sergipe	INCELT	CP-129	Produção de peças cerâmicas
		CP-1549	
	Bandeira	CP-223D	
		CP-ANB Base Água	

3.2.

Caracterização dos materiais destinados a produção de peças cerâmicas

Os materiais coletados na área de produção Sul do Recôncavo Baiano, bem como os materiais coletados nos Estados de Alagoas e Sergipe, foram submetidos a uma série de testes, a fim de determinar suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas. Os ensaios foram realizados em laboratórios da PUC-Rio, da Universidade Federal da Bahia-UFBA, no Centro Nacional de Pesquisas de Solos da EMBRAPA e no Laboratório Analytical Solutions.

A Figura 3-12 apresenta um organograma das fases de caracterização dos materiais avaliados a produção de peças cerâmicas.

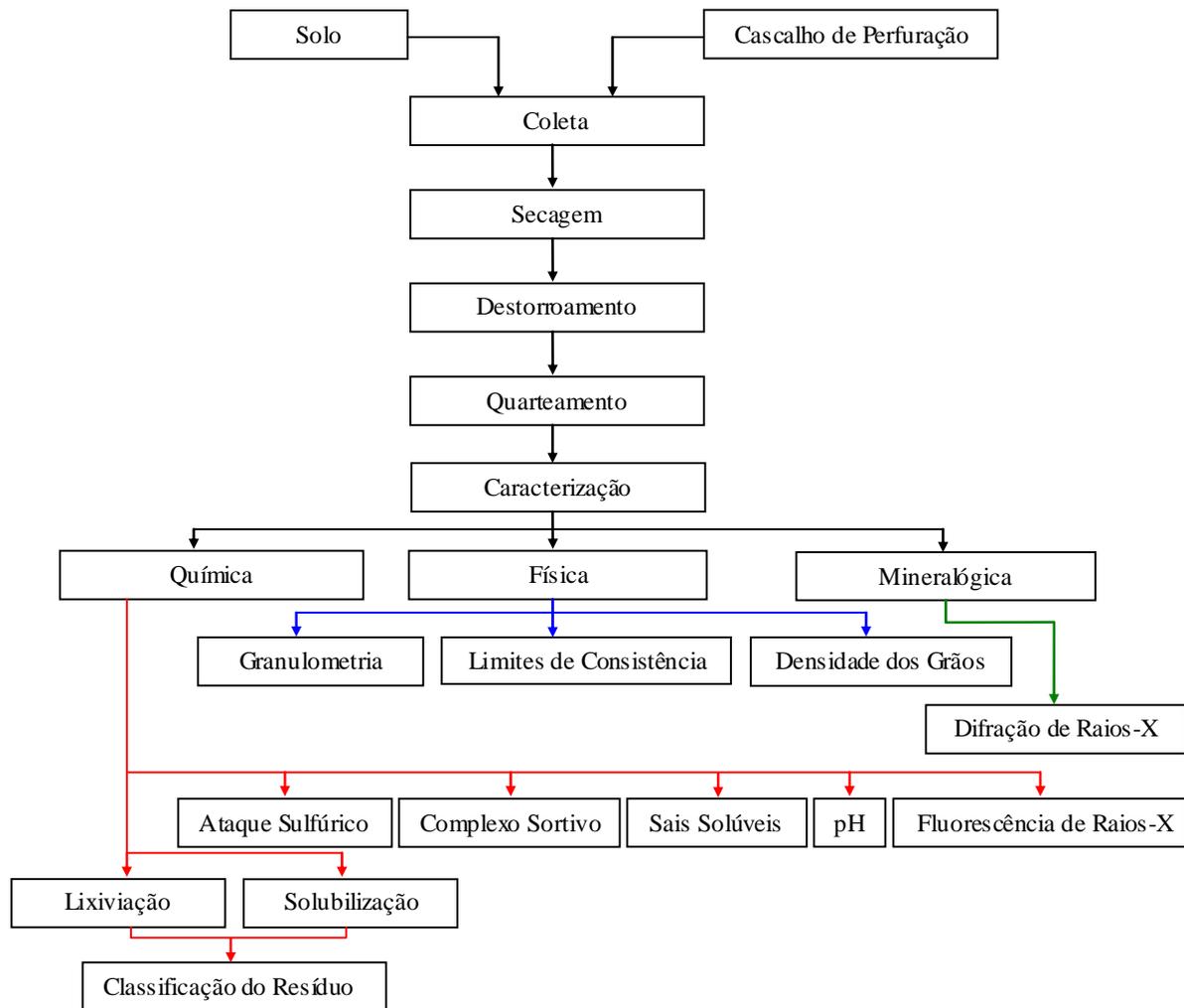


Figura 3-12 - Organograma das fases de caracterização dos materiais

3.2.1. Caracterização física

A caracterização física compreendeu a determinação da densidade das partículas da curva de distribuição granulométrica dos materiais e na determinação dos limites de consistência (limites de Atterberg).

A densidade dos grãos foi obtida segundo a *NBR-06457 Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização* e *NBR-06508 Grãos dos Solos que Passam na Peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica*. A Tabela 3-2 apresenta os resultados.

De acordo com Alexandre (2000) a densidade relativa dos grãos para as argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha no Município de Campos dos Goytacazes-RJ está compreendida na faixa de valores de 2,55 a 2,77. Conforme

apresentado na Tabela 3-2 o cascalho de perfuração apenas CP-1549 está fora desta faixa.

Tabela 3-2– Densidade dos Grãos dos Materiais Estudados

Procedência	Material	Densidade relativa dos Grãos
Recôncavo Baiano	CP-01	2,78
	FEDERBA	2,69
	Santo Amaro Vermelho	2,71
	Santo Amaro Verde	2,77
Alagoas / Sergipe	Bandeira	2,65
	INCELT	2,76
	CP-129	2,70
	CP-1549	2,83
	CP-223D	2,63
	CP-ANB Base Água	2,73

As curvas de distribuição granulométrica para os materiais estudados foram determinadas de acordo com as normas *NBR-06457 Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização* e *NBR-07181 Solo-Análise Granulométrica*. As Figura 3-13 e 3-14 apresentam as curvas de distribuição granulométrica para os materiais do Recôncavo Baiano e as dos materiais coletados nos Estados de Alagoas e Sergipe respectivamente.

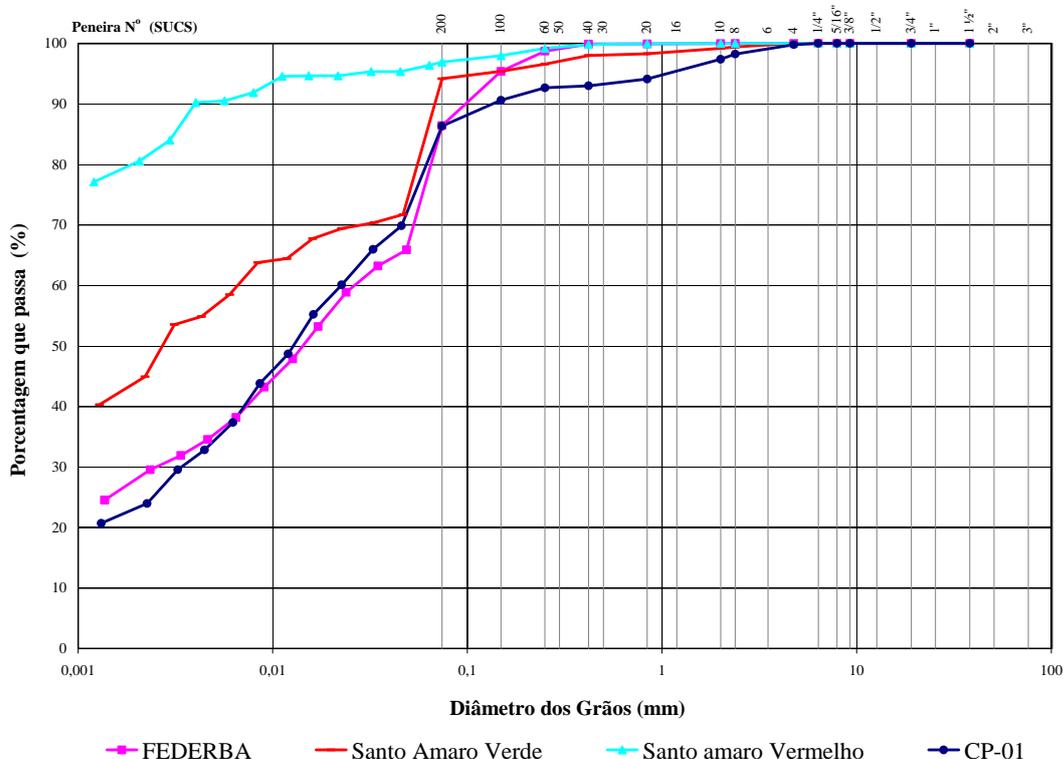


Figura 3-13 – Curvas de distribuição granulométrica dos materiais provenientes do Recôncavo Baiano.

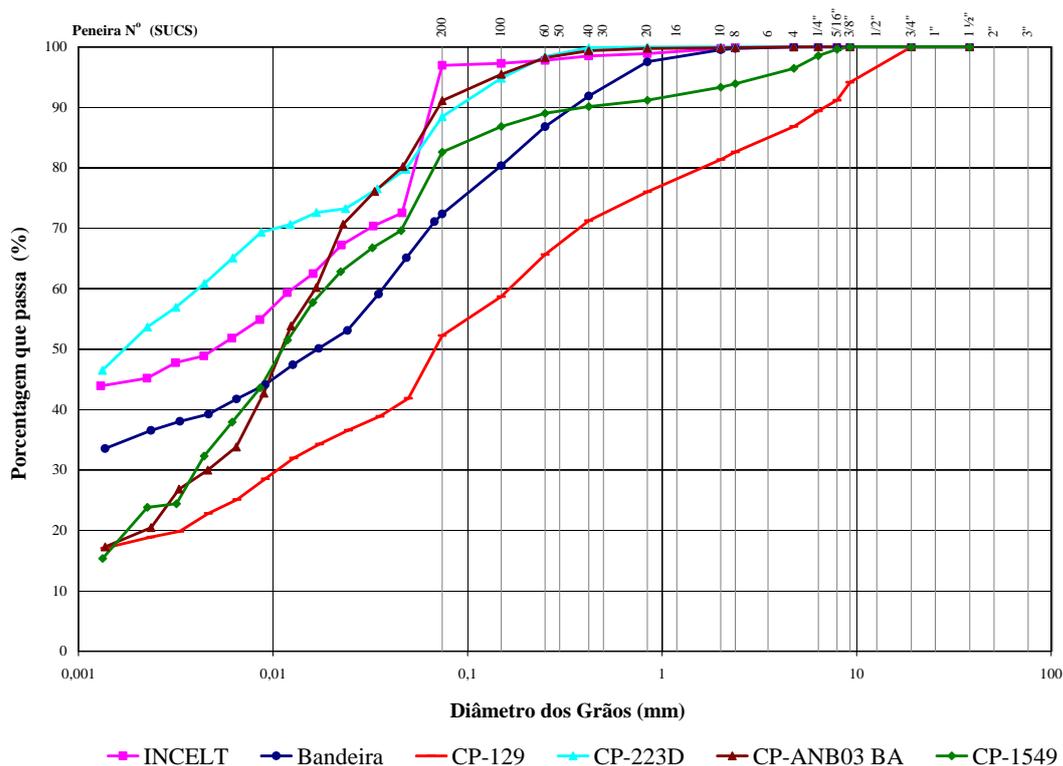


Figura 3-14 – Curvas de distribuição granulométrica dos materiais provenientes de Alagoas e Sergipe.

A Tabela 3-3 apresenta a porcentagem de cada faixa granulométrica dos materiais estudados.

Tabela 3-3 - Quadro de distribuição granulométrica dos materiais estudados.

Procedência	Material	Pedregulho (%)			Areia (%)			Silte (%)	Argila (%)
		Grosso	Médio	Fino	Grossa	Média	Fina		
Recôncavo Baiano	CP-01	-	-	2,2	6,9	2,7	17,6	45,2	25,5
	Santo Amaro Vermelho	-	-	-	0,1	1,3	2,4	15,9	80,3
	Santo Amaro Verde	-	-	0,8	1,0	2,1	22,4	29,7	43,9
	FEDERBA	-	-	-	0,1	2,8	16,8	39,9	40,3
Alagoas / Sergipe	Bandeira	-	-	0,5	5,2	10,7	14,9	33,3	35,5
	INCELT	-	-	0,3	1,1	1,1	23,1	29,6	44,9
	CP-129	-	11,2	7,5	8,1	11,1	19,9	24,1	18,2
	CP-1549	-	1,9	4,8	2,7	2,7	16,6	49,9	21,5
	CP-223D	-	-	-	0,1	3,3	16,5	28,5	51,7
	CP-ANB Base Água	-	-	0,2	0,3	2,7	15,1	62,5	19,3

Observa-se, a partir das Figura 3-13 e Figura 3-14 e da Tabela 3-3, que os materiais apresentam um elevado teor de finos, um indicativo de uma boa capacidade de troca catiônica para a imobilização dos íons presentes nos Cascalhos de Perfuração quando misturado com um destes materiais.

De acordo com Souza Santos (1992), a faixa granulométrica recomendada para a produção deve está compreendida entre 30% e 70% de argila. De acordo com as resultados obtidos na Tabela 3-3, o solo Santo Amaro Verde, e os cascalhos de perfuração CP-01, CP-129, CP-1549 e CP-ANB não têm sua fração argila compreendida dentro dos limites citados por Souza Santos.

Os limites de consistência dos materiais argilosos foram determinados seguindo as prescrições da NBR-06457 Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização, da NBR-06459 Solo- Determinação do Limite de Liquidez e da NBR-07180 Solo- Determinação do Limite de Plasticidade. Os resultados estão apresentados na Tabela 3-4.

Tabela 3-4 - Limites de Consistência

Procedência	Material	Limite de Plasticidade (%)	Limite de Liquidez (%)	Índice de Plasticidade (%)
Recôncavo Baiano	FEDERBA	27,7	44	16,3
	Sto. Amaro Vermelho	50,1	96,5	46,4
	Sto. Amaro Verde	35,8	63,7	27,9
Alagoas / Sergipe	Bandeira	16,9	45,4	28,5
	INCELT	18,2	50,1	31,8

Observa-se na Tabela 3.4 que não são apresentados os limites para os cascalhos de perfuração, dada a impossibilidade de realização dos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade. A parafina presente no fluido de perfuração inviabiliza a realização deste ensaio.

Os resultados revelaram que os solos apresentam uma elevada plasticidade, um indicativo da presença de argilo-minerais do grupo 2:1.

A partir da curva de distribuição granulométrica e de seus limites de consistência foi possível classificar os materiais argilosos de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos. A classificação, ilustrada na Tabela 3-5, foi realizada de acordo com o preconizado na norma americana ASTM D-2487.

Tabela 3-5 – Classificação dos solos estudados

Procedência	Material	SUCS	
Recôncavo Baiano	FEDERBA	Silte elástico	MH
	Sto. Amaro Vermelho	Silte elástico	MH
	Sto. Amaro Verde	Silte elástico	MH
Alagoas / Sergipe	Bandeira	Argila arenosa de baixa plasticidade	CL
	INCELT	Argila arenosa de alta plasticidade	CH

3.2.2.

Caracterização Química

As amostras dos solos argilosos e dos cascalhos de perfuração foram submetidas a uma série de ensaios no intuito de se determinar:

- pH,
- composição química através de ensaios de fluorescência induzida por raios-X,
- estágio de intemperização através de ataque sulfúrico
- complexo sortivo,
- soma dos cátions trocáveis,
- quantidade de sais solúveis,
- capacidade de troca catiônica,
- percentagem de saturação das bases,
- percentagem de saturação com alumínio,
- ensaio de lixiviação, de acordo com a NBR 10.005,
- ensaio de solubilização, de acordo com a NBR 10.006,
- classificação de acordo com a NBR 10.004, Classificação de Resíduos Sólidos.

O pH das amostras foi determinado seguindo o procedimento estabelecido pela EMBRAPA (1997) no Laboratório do Centro Nacional de Pesquisa de Solos da EMBRAPA. A Tabela 3-6 mostra os resultados obtidos.

De acordo com a EMBRAPA (1997), os resultados, descritos na Tabela 3-6, mostram que o Cascalho de Perfuração CP-01 e o solo Santo Amaro Verde são fortemente alcalinos, o solo Santo Amaro Vermelho é fortemente ácido e o solo FEDERBA é moderadamente ácido. Para os materiais procedentes de Alagoas e Sergipe, os resultados mostram que o Cascalho de Perfuração CP-1549 e o Cascalho de perfuração CP-ANB Base Água são fortemente alcalinos. O Cascalho de perfuração CP-223D e o Cascalho de perfuração CP-223D mostraram-se

levemente alcalinos. Já os solos Bandeira e Siriri INCELT possuem pH que podem ser classificados como neutro.

Tabela 3-6 - Valores de pH

Procedência	Material	pH (solo/H ₂ O)	pH (solo/KCl)
Recôncavo Baiano	CP-01	10,4	9,7
	FEDERBA	5,6	4,5
	Santo Amaro Vermelho	5,1	3,7
	Santo Amaro Verde	9,0	7,2
Alagoas / Sergipe	Bandeira	7,3	5,5
	INCELT	7,8	7,1
	CP-129	8,0	7,9
	CP-1549	10,3	10,3
	CP-223D	8,9	8,3
	CP-ANB Base Água	10,0	10,0

Observa-se na Tabela 3-6 uma diferença negativa entre o pH (solo/H₂O) e o pH (solo/KCl) tanto para o solo Bandeira (i.e., -1,8) quanto para o solo INCELT (i.e., -0,7). Dada à variação negativa do pH nas diferentes soluções os materiais argilosos, em questão, apresentam um potencial de reter cátions. Na prática, os dois materiais podem, eventualmente, reter o sódio presente nos sais empregados nas lamias de perfuração e que se encontram adsorvidos pelos cascalhos de perfuração.

A composição química total dos materiais foi determinada a partir de análises de fluorescência de raios-X realizadas no Departamento de Química da PUC-Rio. As Tabelas 3-7 e 3-8 apresentam as composições químicas dos materiais provenientes do Recôncavo Baiano e dos materiais coletados em Alagoas e Sergipe, respectivamente.

Tabela 3-7 – Composição química dos materiais provenientes do Recôncavo Baiano.

Composto	CP-01	FEDERBA	Sto. Amaro Vermelho	Sto. Amaro Verde
Dióxido de Silício – SiO ₂	49,0	61,0	54,7	52,0
Óxido de Alumínio – Al ₂ O ₃	24,3	29,7	30,8	27,9
Óxido de Bário – BaO	7,7	-	-	-
Óxido de Cálcio – CaO	6,3	0,1	0,8	5,9
Óxido de Ferro – Fe ₂ O ₃	6,1	5,1	9,3	7,8
Óxido de Potássio – K ₂ O	3,0	3,2	3,2	5,1
Óxido de Estrôncio - SrO	0,2	-	-	-
Óxido de Titânio – TiO ₂	-	0,8	1,1	0,9
Óxido de Manganês - MnO	-	0,1	0,1	0,1
Anidrido Sulfúrico - SO ₃ ⁻	0,2	-	-	-
Cloretos – Cl ⁻	0,4	-	-	-

Tabela 3-8 - Composição química dos materiais provenientes de Alagoas e Sergipe.

Composto	Bandeira	INCELT	CP-129	CP-1549	CP-223D	CP-ANB Base Água
Dióxido de Silício - SiO ₂	51,44	58,50	46,57	39,67	47,63	43,96
Óxido de Alumínio - Al ₂ O ₃	38,97	33,61	22,43	22,12	30,82	21,48
Óxido de Cálcio - CaO	0,90	0,60	18,38	24,77	5,58	18,12
Óxido de Ferro - Fe ₂ O ₃	4,32	4,56	5,31	4,61	4,59	5,40
Óxido de Potássio - K ₂ O	3,11	1,66	3,28	3,61	4,09	4,51
Óxido de Titânio - TiO ₂	0,87	0,90	-	-	0,54	-
Óxido de Bário - BaO	-	-	2,92	2,38	1,09	2,38
Enxofre - S ⁻	-	-	0,99	1,45	0,29	2,01
Cloretos - Cl ⁻	-	-	-	1,14	0,21	1,86
Óxido de Magnésio - MgO	-	-	-	-	5,00	-

As determinações realizadas mostraram um predomínio de SiO₂ e Al₂O₃ que são os principais constituintes de quartzo e de argilo-minerais. Observa-se ainda a presença de bário e do cloreto para os cascalhos de perfuração. Presume-se que este valor é fruto da ação do fluido de perfuração na formação.

O valor total da soma do dióxido de silício e do óxido de alumínio (SiO₂ + Al₂O₃) para solos maior que 90% e para os cascalhos de perfuração maior que 70% é um indicativo do comportamento refratário da matéria prima de acordo com Souza Santos (1992).

Os óxidos de cálcio presente em concentrações elevadas nos cascalhos de perfuração, segundo Xavier (2006) reduzem a capacidade de refratariedade do material, uma vez que esse óxido funde na queima formando fase líquida, reduzindo a porosidade do material.

A alta quantidade de óxido de ferro Fe₂O₃, superior a 4,3% nos solos e cascalhos, caracteriza-se como agente fundente e indica a coloração avermelhada após o processo de queima.

O estágio de intemperização dos materiais foi avaliado através do método do ataque sulfúrico. Neste ensaio as amostras de solo são solubilizadas com H₂SO₄ 1:1 para determinar os teores de sílica, alumínio, ferro, titânio, fósforo e manganês e calcular os valores das relações moleculares Ki e Kr. O valor de Ki é calculado em função dos valores expressos em % de SiO₂ e Al₂O₃, divididos pelos seus respectivos pesos moleculares. Já o valor de Kr é calculado em função dos valores expressos em % de SiO₂ e Al₂O₃+Fe₂O₃, divididos pelos seus respectivos pesos moleculares.

A Tabela 3-9 apresenta os resultados do ensaio por ataque sulfúrico realizado nos Laboratórios do Centro Nacional de Pesquisa de Solos da EMBRAPA. Os ensaios seguiram as recomendações contidas em EMBRAPA (1997).

Tabela 3-9 – Compostos extraídos no Extrato Sulfúrico (g/kg)

Amostra	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Ki	Kr	AlO ₃ / Fe ₂ O ₃	Equi. de CaCO ₃
CP-01	137	77	49	3,5	1,3	0,42	3,02	2,15	2,47	
FEDERBA	156	110	60	4,5	0,8	0,37	2,41	1,79	2,88	
Sto. Amaro Vermelho	250	147	89	6,3	0,7	0,69	2,89	2,08	2,59	
Sto. Amaro Verde	300	139	71	5,0	1,6	0,65	3,67	2,77	3,07	
Bandeira	144	113	47	9,5	0,6	0,2	2,17	1,71	3,77	ND
INCELT	166	121	58	7,7	0,2	0,2	2,33	1,78	3,27	ND
CP-129	77	48	31	4,2	1,3	0,4	2,73	1,93	2,43	223
CP-1549	69	44	31	2,9	1,5	0,6	2,66	1,83	2,23	312
CP-223D	158	94	48	5,7	1,6	0,5	2,86	2,15	3,07	86
CP-ANB Base Água	91	47	34	3,0	1,4	0,8	3,29	2,25	2,17	221

Os valores de SiO₂ e Al₂O₃ obtidos no extrato sulfúrico para todos os materiais dão uma indicação da existência de argilomineirais em sua constituição.

A atividade da fração argila foi avaliada através da capacidade de troca catiônica (CTC) determinada através do ensaio de complexo sortivo. Este ensaio foi realizado nos Laboratórios do Centro Nacional de Pesquisa de Solos da EMBRAPA seguindo as recomendações contidas em EMBRAPA (1997). Os resultados estão apresentados na Tabela 3-10.

Os resultados revelaram que o Cascalho de Perfuração, CP-01, e os solos Santo Amaro Verde e Vermelho, e os cascalhos de perfuração CP-1549 e CP-ANB Base Água apresentam uma alta atividade, posto que os valores de T (*i.e.* CTC) ultrapassam 27cmolc/kg, valor limite segundo EMBRAPA (1999) é 24cmolc/kg, valor limite estabelecido em IBGE (1995).

Entre os cátions trocáveis, destaca-se o Ca²⁺ para os solos Santo Amaro Verde e Vermelho, CP-1549, CP-223D e CP-ANB Base Água. Para Na⁺ se destacam os Cascalhos de Perfuração CP-01 e CP-ANB Base Água. Estes últimos podem ser devido ao efeito do fluido de perfuração sobre a formação.

Tabela 3-10 - Resultado dos ensaios de complexo sortivo.

Procedência	Amostra	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S	Al ³⁺	H ⁺	Valor T
Recôncavo Baiano	CP-01	4,7	0,4	1,00	21,60	27,7	0	0	27,7
	FEDERBA	5,6	0	0,31	0,81	6,7	5,7	2,5	14,9
	Sto. Amaro Vermelho	14,9	4,8	0,57	0,48	20,8	5,0	7,7	33,5
	Sto. Amaro Verde	32,1	4,8	0,27	2,80	40,0	0	0	40,0
Alagoas / Sergipe	Bandeira	3,7	5,3	0,19	1,31	10,5	0	0	10,5
	INCELT	9,8	3,2	0,11	0,65	13,8	0	0	13,8
	CP-129	17,8	1,5	0,31	0,55	20,2	0	0	20,2
	CP-1549	39,9	8,0	0,65	2,64	51,2	0	0	51,2
	CP-223D	7,5	2,0	6,95	4,12	20,6	0	0	20,6
	CP-ANB Base Água	38,9	7,1	0,25	25,95	72,2	0	0	72,2

Os solos FEDERBA, Bandeira e INCELT apresentaram uma baixa atividade, sendo que apresentaram o Ca²⁺ como o cátion com a maior disponibilidade de troca, com exceção do Solo Bandeira que apresenta maior disponibilidade de Mg²⁺ como cátion trocável.

Alguns solos apresentaram acidez real, o que contribuiu para aumentar o valor da CTC, conforme pode ser visto pela soma dos valores de Al³⁺ e H⁺. Esses solos, Santo Amaro Vermelho, FEDERBA, também apresentaram valores de pH na faixa de 5 como pode ser observado na Tabela 3-6. Os materiais básicos apresentaram valores nulos de Al³⁺ e H⁺.

A Tabela 3-11 apresenta os valores de percentagem de saturação de bases e percentagem de saturação com alumínio.

Tabela 3-11 - Dados de percentagem de saturação de bases e percentagem de saturação com alumínio para os materiais estudados

Procedência	Materiais	Valor V Percentagem de Saturação de Bases	$\frac{100Al^{3+}}{S + Al^{3+}}$
Recôncavo Baiano	CP-01	100	0
	FEDERBA	45	46
	Sto. Amaro Vermelho	62	19
	Sto. Amaro Verde	100	0
Alagoas / Sergipe	Bandeira	100	0
	INCELT	100	0
	CP-129	100	0
	CP-1549	100	0
	CP-223D	100	0
	CP-ANB Base Água	100	0

A percentagem de saturação de bases se refere à proporção de cátions básicos trocáveis em relação à capacidade de troca (valor *S* na Tabela 3-10) determinada a pH 7 (EMBRAPA, 1999). Os resultados indicam que a capacidade de troca catiônica de todos os materiais coletados em Alagoas e Sergipe, e os materiais CP-01 e Santo Amaro Verde, não é função do alumínio de sua constituição.

Embora seja fortemente ácido, o solo Santo Amaro Vermelho apresenta uma alta saturação específica, segundo o critério estabelecido pela EMBRAPA (1999), *i.e.* Valor *V* superior a 50%. Já pelo critério estabelecido pelo IBGE (1995), este solo é considerado como média saturação, posto que o valor *V* se encontra entre 35% e 65%. Nesta mesma categoria encaixa-se o FEDERBA.

Em relação à percentagem de saturação com alumínio, todos os materiais se encontram fortemente dessaturados, *i.e.* valor $100Al^{3+}/S+Al^{3+}$ inferior a 50%, conforme estabelece o IBGE (1995).

Para os materiais coletados em Alagoas e Sergipe foi realizada a análise de sais solúveis. As amostras coletadas nessa região são, em sua maioria, cascalhos de perfuração, esses cascalhos poderão conter elevados valores de sais solúveis, visto que, o fluido de perfuração pode conter altas concentrações de sais e cloretos.

A análise dos sais solúveis também foi realizada nas dependências do Centro Nacional de Pesquisa de Solos da EMBRAPA, seguindo as recomendações contidas em EMBRAPA (1997). Os resultados estão apresentados na Tabela 3-12.

Tabela 3-12 - Resultado do ensaio de Sais solúveis.

Materiais	100Na ⁺ T %	Pasta Saturada		Sais solúveis (extrato 1:5) Cmol/kg de TF	
		C.E. do extrato (25°C) mS/cm	Água %	K ⁺	Na ⁺
Bandeira	12	1,79	73	0,01	1,09
INCELT	5	2,26	82	0,01	1,25
CP-129	3	4,10	52	0,10	1,25
CP-1549	5	20,24	69	2,76	30,36
CP-223D	20	7,03	82	2,05	7,38
CP-ANB Base Água	36	21,17	55	4,95	28,05

Conforme o previsto, a Tabela 3-10 mostra que o cascalho CP-1549, o cascalho CP-223D, e o cascalho CP-ANB possuem um elevado teor de sódio dissolvido e uma condutividade elétrica elevada. Esses valores muito provavelmente estão associados ao tipo de fluido de perfuração empregado. Observa-se que o cascalho de perfuração CP-129 apresenta valores inferiores aos demais, o que pode ter sido fruto da sua forma de disposição que ora se encontra, pois a disposição prolongada em diques pode ocasionar a lixiviação dos sais solúveis.

Com a finalidade de fazer a devida classificação química dos resíduos, todos os cascalhos foram submetidos a ensaios de solubilização e lixiviação, segundo as normas NBR 10.006 e 10.005, no intuito de classificá-lo perante a norma brasileira de classificação de resíduos sólidos -NBR 10.004. Foram também classificados os solos FEDERBA, Bandeira e INCELT, visto que esses apresentavam o maior potencial de serem utilizados como possíveis encapsulantes. As análises de classificação de resíduo foram realizadas no Laboratório Analytical Solutions.

A Tabela 3-13 e Tabela 3-14 apresentam um resumo dos parâmetros que apresentam valores superiores ao valor máximo permitido - VMP. A Tabela 3-13 apresenta os resultados do extrato solubilizado referente aos cascalhos de perfuração, já a tabela 3-14 apresenta os dados referentes aos solos utilizados no encapsulamento. O anexo I deste trabalho apresenta os resultados na íntegra das análises realizadas.

Tabela 3-13 – Resumos dos parâmetros com valores acima do valor máximo permitido.

Parâmetros	Unidade	L.D.	L.Q.	VMP	Solubilizado				
					CP-01	CP-129	CP-1549	CP-223D	CP-ANB
Alumínio	mg/L	0,010	0,050	0,20	0,56	0,15	0,48	-	-
Arsênio	mg/L	0,002	0,005	0,01	-	0,01	0,02	-	-
Cloreto	mg/L	0,04	0,50	250	1327,0	-	1816,11	287,77	2698,83
Fluoreto	mg/L	0,004	0,020	1,5	-	-	2,53	6,96	5,89
Sódio	mg/L	0,250	0,500	200,0	471,6	-	1268,32	262,91	1904,90
Sulfato	mg/L	0,030	0,500	250,0	-	262,01	823,21	-	885,73
Fenol	mg/L	0,40	0,0002	1,0	2,27	-	-	-	-
Ferro	µg/L	0,012	0,05	0,3	0,71	-	-	-	-
Tensoativos e Sufactntes	mg./L	0,01	0,045	0,2	0,43	-	-	-	-

Tabela 3-14 – Resumos dos parâmetros com valores acima do valor máximo permitido.

Parâmetros	Unidade	L.D.	L.Q.	VMP	Solubilizado		
					Bandeira	INCELT	FEDERBA
Alumínio	mg/L	0,010	0,050	0,20	-	-	
Arsênio	mg/L	0,002	0,005	0,010	0,034	-	-
Fluoreto	mg/L	0,004	0,020	1,5	-	-	5,2
Nitrato	mg.N/L	0,05	0,05	10			295,22
Cromo Total	mg/L	0,05	0,05	0,05			0,197
Ferro	(µg/L)	0,012	0,05	0,3			0,715
Fenol	mg/L	0,40	0,0002	1,00			2,27
Tensoativos e Surfactntes	mg./L	0,01	0,045	0,2			0,43

3.2.3.

Caracterização mineralógica

A classificação mineralógica dos materiais foi realizada através da Difracometria de Raios X. Para isso, foram preparadas lâminas orientadas dos materiais de acordo com o método de Confeção de Lâminas Delgadas de Solo (EMBRAPA, 1997). As análises foram realizadas no Laboratório de Difracometria da PUC-Rio, em um Difractômetro Siemens modelo D5000, com anodo de cobre 1.5406Å, 40KV, 30mA.

A Tabela 3-15 apresenta os resultados das análises com os minerais detectados na varredura.

Tabela 3-15 - Caracterização mineralógica

Procedência	Material	Minerais Presentes
Recôncavo Baiano	CP-01	Quartzo, óxido de bário, ilita e caulinita
	FEDERBA	Quartzo, ilita e caulinita
	Santo Amaro Vermelho	Quartzo e ilita
	Santo Amaro Verde	Quartzo, ilita e muscovita
Alagoas / Sergipe	Bandeira	Quartzo e Caulinita.
	INCELT	Quartzo, Ilita, lepidomelana (micas), Caulinita
	CP-129	Quartzo, oxido de bário, ilita, mica
	CP-1549	Quartzo, calcita, lepidomelana (mica), ilita
	CP-223D	Quartzo, calcita, lepidomelana (mica)
	CP-ANB Base Água	Quartzo, lepidomelana (mica), biotita.

Os difractogramas estão apresentados no Anexo II deste trabalho.