

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE SUB-PRODUTOS DE MINERAÇÃO DE
AGREGADOS PARA APLICAÇÃO INDUSTRIAL

Adriana Ferreira de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. Lindolfo Soares

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
TF – (2006/01)**

SÃO PAULO
2006

TF
C331
AF.c

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Caracterização tecnológica de sub-produtos de
mineração de agregados para aplicação industrial**

Adriana Ferreira de Carvalho

Monografia de Trabalho de Formatura



Banca Examinadora

Prof. Dr. Lindolfo Soares

Prof. Dr. Cláudio Sbrighi

Prof. Dr. Lilia Mascarenhas Sant'Agostino

São Paulo

2006

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE SUB-PRODUTOS DE MINERAÇÃO DE
AGREGADOS PARA APLICAÇÃO INDUSTRIAL**

Adriana Ferreira de Carvalho



Orientador: Prof. Dr. Lindolfo Soares

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
TF – (2006/01)**

**SÃO PAULO
2006**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024178

"(...)O INFINITO DE PÉ DOIS PLANETAS COLADOS (...)
(..)O INFINITO DEITADO OLHOS DE CORUJA
(..)É A LINDA CAUDA DA BALEIA AFUNDADANDO
(..)O INFINITO TÁ DE PÉ O INFINITO TÁ
(..)É O SÍMBOLO DA PAZ PASSARINHO NA MINHA MÃO
(..)É O BEIJO NA SUA BOCA PARA O AMOR ALIMENTAR
(..)INFINITO É O AMOR QUE EU SINTO POR VOCÊ
DOIS MIL E UM SEM O DOIS E SEM O UM
O INFINITO É UMA DUPLA DE SUSHI DE ATUM
É O REFLEXO DO SOL NO MAR
É A SINUCA DO BILHAR
(..)O INFINITO É JESUS CRISTO REPARTINDO O PÃO
PARA OS APÓSTOLOS NA SANTA CEIA
NEM TODO INFINITO TEM FORMA PRA MIM
EINSTEIN RODCHENKO PICASSO E TOM JOBIM
O INFINITO É INFINITO
O INFINITO É O AMOR
O INFINITO NUNCA ACABA
PORQUE NUNCA COMEÇOU"

André Abujamra

Aos meus pais, Juarez e Maristela.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo e à sua Biblioteca e aos seus funcionários, a Escola Politécnica - Departamento de Minas e Petróleo e os laboratórios LCT - Laboratório de Caracterização Tecnológica, LTM – Laboratório de Tratamento de Minério e todos os seus profissionais destacadamente Antônio, Alfredo, Edvaldo, Juscelino, André, Liz, Mariana e Freud, pelo apoio e ensinamentos; ao SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial pela disponibilização de seus laboratório para realização de ensaios; à Viterbo pelo fornecimento do material de estudo, à geóloga Fernanda Nishiyama pela inspiração e auxílio na elaboração do tema do projeto. Agradecimentos especiais ao meu orientador Lindolfo Soares e ao meu co-orientador Luiz Fernando D'Agostino pela orientação, apoio e ensinamentos, aos amigos Nilton Marília e a sua família, pelo apoio inestimável, e por fim e mais importante aos meus pais, obrigada pelo apoio, incentivo, paciência e amor incondicionais. E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	3
IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO.....	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
1-INTRODUÇÃO.....	8
2-LOCALIZAÇÃO.....	9
4-LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	10
5-DESENVOLVIMENTO.....	11
6-METODOLOGIA E RESULTADOS.....	12
6.1-MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS	12
6.1.2- AMOSTRAGEM.....	12
6.2-PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	15
6.3-ANÁLISES DO REJEITO <i>IN NATURA</i>	18
6.3.1-DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	18
6.3.2-FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X	25
6.3.3-PENEIRAMENTO A ÚMIDO.....	27
6.3.4-ANÁLISE GRANULOMÉTRICA.....	28
6.3.5-ÁGUA DE AMASSAMENTO	33
6.3.6-ÁGUA DE ESFARELAMENTO (OU LIMITE MÍNIMO DE PLASTICIDADE)	34
6.3.7-LIMITE DE LIQUIDEZ.....	35
7-ANÁLISES APÓS AS QUEIMAS	39
7.1-PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	39
7.2-RETRAÇÃO LINEAR	46
7.3-ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	46
7.4-TRF (TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO)	48
7.5-DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	52
8-CONCLUSÕES.....	58
9-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Nº do Projeto: TF- 06 / 01

Título: Caracterização Tecnológica de Sub-Produtos de Mineração de Agregados para Aplicação Industrial

Aluna: Adriana Ferreira de Carvalho

Nº USP: 499341

Orientador: Prof. Dr. Lindolfo Soares – Escola Politécnica da USP – Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

Co-Orientador: Prof. MSc. Geólogo Luiz Fernando D'Agostino

RESUMO

A caracterização de substâncias minerais é necessária para que seja possível conhecer suas aplicações e assim destiná-las ao uso mais adequado. Quando o objeto desta caracterização trata de rejeitos de mineração, especificamente neste caso de areia, isso implica não só em se encontrar destino para algo que antes era visto como inútil como também em se encontrar novas fontes de matéria-prima para a indústria.

Este trabalho se propõe exatamente a dirigir a busca para um mercado onde este material possa ser incorporado através de sua caracterização química, física e tecnológica. Desde o primeiro momento imaginou-se sua aplicação no mercado cerâmico, o de cerâmica vermelha, sobretudo, onde as exigências para a sua aceitação são menos restritivas. Porém através de ensaios realizados, tornou-se possível sugerir outras aplicações interessantes, dado ao seu conteúdo de alumina e a alta temperatura necessária para sinterização do material. Essa possibilidade aumentaria seu valor agregado, ou ao menos melhoraria suas chances de ser colocado no mercado.

ABSTRACT

The mineral substances characterization is necessary to make their applications known and due to this, find them the more appropriated use. When the mineral extraction waste become the object of this characterization, specifically on this case, sand exploitation, this implies not only on finding a destination for something seen as useless before, but on finding new material resources for the industry as well. And when the deposits are found inside a metropolitan environment the situation reveals itself even rarer.

This work intends exactly to guide the search for a market where this material could be integrated by means of its chemical, physical and technological characterizations. Since the first moment, we imagined its application on mainly red ceramics, where the requirements to be accepted are less restrictive. However, through the analysis carried through, it became possible to suggest another interesting applications, due to its alumina content and the high temperature needed for the material sintering. This possibility would raise its aggregate value, or at least would enhance its chances of being placed on the market.

1-INTRODUÇÃO

Atualmente, uma das grandes questões a serem enfrentadas pelas minerações, sobretudo aquelas localizadas em regiões urbanas, é a destinação de seus rejeitos. Assim, a transformação de simples rejeitos em produtos economicamente viáveis e sua consequente colocação no mercado, é um objetivo que deve ser buscado.

Além desse aspecto a rigidez vocacional de alguns minérios como é o caso da argila, torna-se cada vez mais difícil que se encontre depósitos desses minérios. Outro aspecto relevante associado a isso é a questão destes depósitos estarem perto dos grandes centros comerciais como a Grande São Paulo. Atualmente é praticamente impossível se abrir novas lavras na metrópole, não só pela questão das restrições ambientais, mas como também da competitividade com o mercado imobiliário. Este mercado e o consequente crescimento demográfico são muitas vezes mais deletérios ao meio ambiente que uma mineração de bem mineral industrial, como areia, argila ou brita, que em boa parte dos casos não carecem de quaisquer substâncias químicas para o seu beneficiamento.

O caso do depósito estudado em particular, localizado na empresa Viterbo Machado Luz Mineração LTDA, em Parelheiros, na zona Sul da cidade de São Paulo, é formado pelo bota-fora (material argiloso) da extração de areia de alteração intempérica de granito. Algo que ainda chama atenção é o fato de haver projetos de exploração de granito localizado hoje sob a barragem de rejeitos, isto é, seria realmente interessante que ao invés de apenas termos que mudar o material de lugar o que em si já geraria despesas, conseguíssemos que a retirada do mesmo ocorresse não só com o objetivo de se reiniciar a lavra de granito para a produção de brita, mas também de se destinar esse rejeito a uma aplicação industrial.

O sucesso de um empreendimento assim geraria a possibilidade de a longo prazo se aumentar a vida útil da mina e estabelecer um reservatório de água ou então um depósito de inertes de construção civil. Neste último caso, além da necessidade de depósitos deste tipo na Grande São Paulo, haveria a possibilidade de usar estes inertes como recicláveis em *blends* com a argila extraída de depósitos de rejeitos como aqueles estudados neste trabalho.

2-LOCALIZAÇÃO

A área estudada trata-se do depósito antigo de rejeitos da mineração de areia Viterbo Machado Luz, localizada na avenida Paulo Guilguer Reimberg s/nº, no bairro de Parelheiros na cidade de São Paulo (figura 1). O material estudado é rejeito de mineração de areia oriunda do intemperismo de granito, tratando-se, portanto, do bota-fora da mina após o processo de beneficiamento por hidrociclonagem.

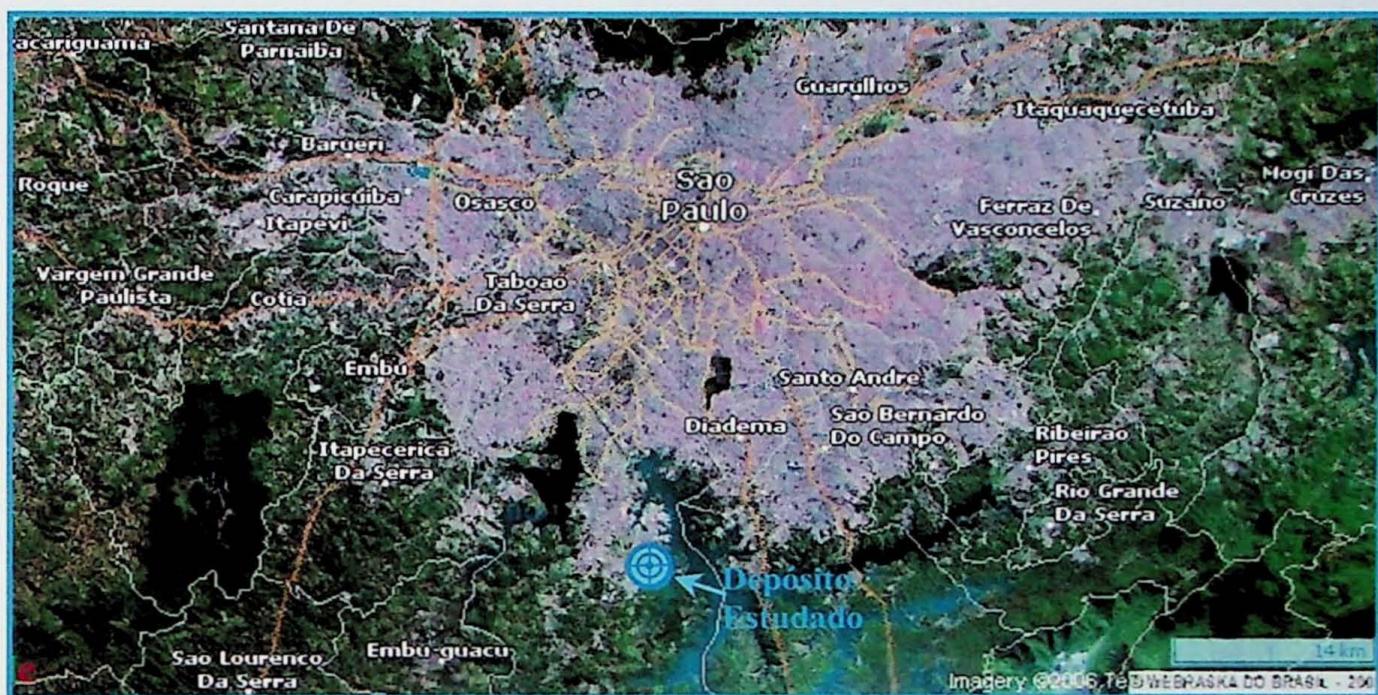


Figura 1: Localização do depósito estudado. Fonte: Guia Mais on Line (Webraska do Brasil 2006).

3-OBJETIVOS

Um dos objetivos deste trabalho é a descrição dos subprodutos de mineração de areia na Região Metropolitana de São Paulo, através da sua caracterização química, física, mineralógica e tecnológica, para sua aplicação em cerâmica vermelha. O fato de *a priori* se considerar a aplicação em cerâmica vermelha deve-se ao seu caráter menos restritivo, no que diz respeito às características intrínsecas das argilas. Porém com a evolução dos estudos, foi possível indicar outra linha de pesquisa para aplicação do material estudado, o que será discutido mais adiante.

4-LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

Para o levantamento bibliográfico recorreu-se às bibliotecas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, da Escola Politécnica - Departamento de Minas e de Petróleo, do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas e do SENAI – Mário Amato - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial de São Bernardo do Campo.

O levantamento feito através de apostilas, teses e livros, forneceu as informações para definir a linha que se deveria seguir para realização de análises além de como se deveria proceder para a composição das interpretações dos resultados obtidos. Os parâmetros, assim como sua relação com os resultados será apresentada e discutida no decorrer do trabalho, sobretudo no capítulo dirigido à conclusão. Nas referências bibliográficas estarão detalhadas as fontes de informação.

Durante o levantamento foram consultadas normas como a NBR 7217 NM 248 (Determinação da Composição Granulométrica, 2003) para que se orientasse a realização do ensaio de peneiramento. Porém dado à faixa granulométrica na qual se encontra o material foi necessário recorrer à NBR NM 46 (Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 μm por lavagem, 2001). As consultas às normas técnicas foram realizadas na biblioteca do IPT.

Outros trabalhos foram ainda consultados, como o de William Whitaker (2001). Contudo o trabalho tem um enfoque bastante diferente deste, tratando mais especificamente de areias para construção civil e seus processos de beneficiamento. Gláucia Cuchierato (2000) realizou um trabalho que apesar de dirigido mais especificamente à caracterização de resíduos de mineração de agregados na região metropolitana de São Paulo, também não possuía o foco direcionado exatamente à mesma aplicação deste trabalho.

Prentice et. al, 1990, apresenta características de agregados finos assim como algumas análises pertinentes a caracterização de agregados finos e suas fontes. Apresenta também alguns detalhes de fabricação de cerâmicas estruturais. Insley et al, 1955, apresenta algumas análises passíveis de aplicação em materiais como o estudado neste trabalho, assim como o comportamento térmico de alguns minerais dando atenção aos refratários. Ribeiro, et. al., 2002, mostra ensaios, alguns dos quais realizados, pautados inclusive nas normas citadas acima. Trata da classificação de alguns produtos cerâmicos e das propriedades exigidas por estes, como regularidade de formas e dimensões, características de superfície, absorção de água máxima de 20 %, resistência à flexão e grande impermeabilidade para telhas. Para produtos de revestimentos, a necessidade de resistência ao desgaste, resistência química, a manchas, absorção de água. Para produtos de porcelanato, resistência química e mecânica, além de temperatura de queima de 1250° C. Apresenta também alguns outros índices de qualidade cerâmicos.

Santos, 1989, apresenta características de argilas brasileiras, assim como suas aplicações e ensaios para caracterização química, física, mineralógica e tecnológica de argilas. A seqüência de ensaios realizada neste trabalho foi em grande parte pautada na obra deste autor. Os procedimentos de amostragem se basearam na obra de Luz, et. al., 2004, desde a fase de amostragem primária, passando pela composição das amostras secundárias, até o encaminhamento final para realização dos ensaios.

5-DESENVOLVIMENTO

A seqüência de ensaios planejada conseguiu fornecer condições satisfatórias para prever, adaptar ou sugerir aplicações para o material que compõe o rejeito da mineração de areia; organizar um banco de dados que permita correlacionar a granulometria, composição mineralógica e propriedades intrínsecas a usos industriais específicos; sugerir estudos científicos que possam levar o material a ser aplicado em fins ainda mais nobres que o de cerâmica vermelha.

As etapas que fizeram parte da produção deste trabalho, como o levantamento bibliográfico, a amostragem e as primeiras análises químicas ocorreram dentro do previsto, assim como o início da compilação dos dados. Um aspecto a ser considerado é a interação entre resultados analíticos e os caminhos na pesquisa, levando em conta o tempo do qual se dispunha.

Os primeiros ensaios físico-químicos como a análise granulométrica do material, assim como os ensaios tecnológicos fugiram um pouco do cronograma, entre outras razões, devido à sua dependência das ocorrências de outros ensaios que os norteariam. Os primeiros valores apresentados para fluorescência de Raios-X apresentaram discrepância para a amostra C3 quando comparada com as demais, evento através do qual optou-se pela repetição do ensaio para a amostra citada. Verificou-se então que realmente havia ocorrido uma inversão de valores (TiO_2 e K_2O) causada por motivos que não se conseguiu apurar.

6-METODOLOGIA E RESULTADOS

6.1-MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS

Nesta seção optamos para uma melhor clareza, apresentar as análises seguidas de seus resultados, principalmente pelo fato dos ensaios de caracterização terem sido realizados em duas fases distintas.

6.1.2- AMOSTRAGEM

Como citado anteriormente, o depósito estudado é formado pelo bota-fora de extração de areia para construção civil. É um depósito que teve sua capacidade exaurida há mais de dez anos e que atualmente se mostra com material solto e saturado em água apesar de não apresentar lâmina d'água. A maneira como ocorreu a deposição dos rejeitos acabou por provocar uma estratificação sutil, mas ainda assim perceptível, natural em bacias de deposição dessa natureza.



Figura 2: Localização dos furos no depósito. Fonte: Google Earth (2006 Europe Technologies / Image 2006 Digital Globe).

Nesse depósito em específico, é possível perceber algumas diferenças que se revelam visualmente: a região mais próxima ao ponto de lançamento de rejeitos (figura 2) apresenta uma granulação mais grossa, revelando aí também questões relacionadas à eficiência do processo de beneficiamento utilizado na época da deposição do rejeito. Esse comportamento é perfeitamente natural, uma vez que os grãos mais grossos, portanto mais pesados, se distanciam menos do ponto de lançamento. Há também uma diferenciação na cor do material; ora a argila é mais amarelada, ora é mais rosada, refletindo certamente diferenças compostoriais do material extraído.

Outra diferença observável é que as camadas mais profundas possuem granulometria mais fina se comparadas às superiores, denotando de uma maneira geral um decréscimo na eficiência do processo de beneficiamento no decorrer do tempo no qual a barragem foi utilizada.

Neste cenário e considerando as dificuldades para realização de sondagens em barragens de rejeitos, especificamente quando o material em questão é argila, optou-se por realizar duas sondagens a trado na barragem. Os furos estão localizados nas figuras 2 e 3.

As coordenadas para os furos são as seguintes:

- Furo I: 0327280 / 7367836;
- Furo II: 0326963 / 7367649.
-

Todo material recuperado nas sondagens foi considerado como amostra primária, isto é, nada foi descartado. As amostras foram recolhidas e identificadas metro a metro, para uma melhor caracterização do depósito. Dado as dificuldades que serão mencionadas em seguida, para a realização de sondagens em reservatórios dessa natureza, a profundidade máxima atingida foi de 7 metros para o primeiro furo, e de 6 metros para o segundo.



Figura 3: Mosaico fotográfico mostrando a área de onde foi retirado o material estudado.

Ocorreram algumas dificuldades durante a sondagem devido à natureza do material do reservatório. Em ambos os furos a velocidade de avanço foi baixíssima levando-se em torno de cinco dias para finalização dos furos. Os furos foram realizados com revestimento de tubos de PVC (figura 4). Até aproximadamente três metros as sondagens correram bem, sendo muito mais difícil avançar até os próximos três ou quatro metros restantes. No caso do primeiro furo, por exemplo, a primeira opção foi a utilização de um tubo de seis polegadas, e uma sonda de cinco polegadas e meia. Porém o furo colapsou, fazendo com que ao retomar a perfuração utilizássemos tubos de PVC de quatro polegadas e trado de três e meia polegadas. O trado utilizado possuía válvula para facilitar a recuperação do material (figura 5), já que era esperado se atingir a saturação de água a partir de aproximadamente três metros o que de fato aconteceu.

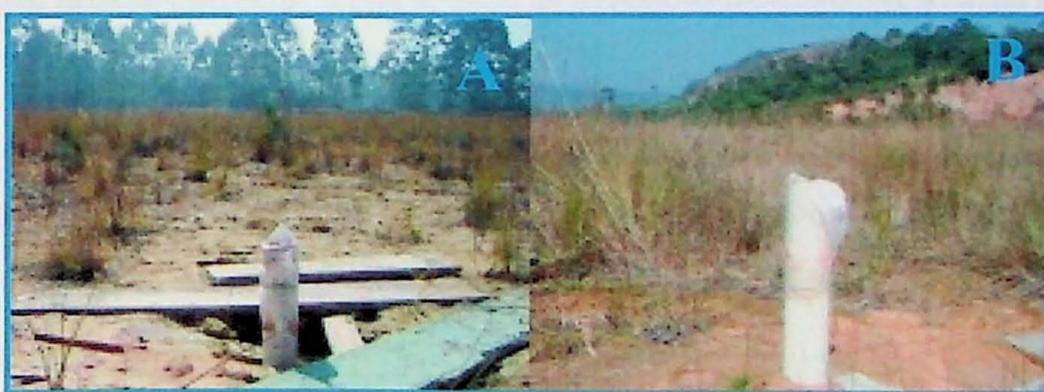


Figura 4: Furo I (A) e Furo II (B).



Figura 5: Trado utilizado na realização das sondagens (A); trado (B); detalhe da válvula do trado (C).

6.2-PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Amostras Primárias

O primeiro tratamento ao qual as amostras primárias foram submetidas foi a secagem em estufas (FANEM –330 e Marconi – MA 035) acondicionadas em bandejas de alumínio. O tempo de secagem das amostras variou de 15 a 20 dias, aproximadamente, com a temperatura variando entre 40° e 60° C. Durante a secagem das amostras do segundo furo, houve problema com uma das estufas utilizadas, o que atrasou as atividades relacionadas a essas amostras em mais de um mês.

Após a secagem e resfriamento das amostras (este último feito à temperatura ambiente), foi necessário que se desagregasse o material. Para tal foi utilizado um britador de mandíbulas (figura 6).



Figura 6: Britador de mandíbulas utilizado na primeira desagregação das amostras (A); detalhe: mandíbulas (B).

Depois da desagregação foi possível montar pilhas para que se realizassem os quarteamentos necessários para a composição das amostras secundárias. As amostras foram assim identificadas:

Furo I:

- 0-1 m: 11;
- 1-2 m: 12;
- 2-3 m: 13;
- 3-4 m: 14;
- 4-5 m: 15;
- 5-6 m: 16;
- 6-7 m: 17.

Furo II:

- 0-1 m: 21;
- 1-2 m: 22;
- 2-3 m: 23;
- 3-4 m: 24;
- 4-5 m: 25;
- 5-6 m: 26.

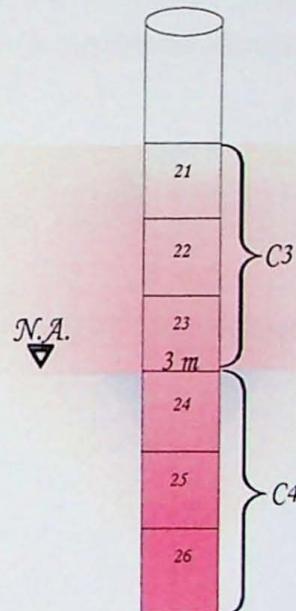


Figura 7: Esquema do Furo II, e procedimento de composição das amostras secundárias C3 e C4.

Para cada uma das amostras (11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 25 e 26), foi montada uma pilha a partir da qual foram tomadas três alíquotas (como indicado na figura 6). As três alíquotas foram então reunidas.

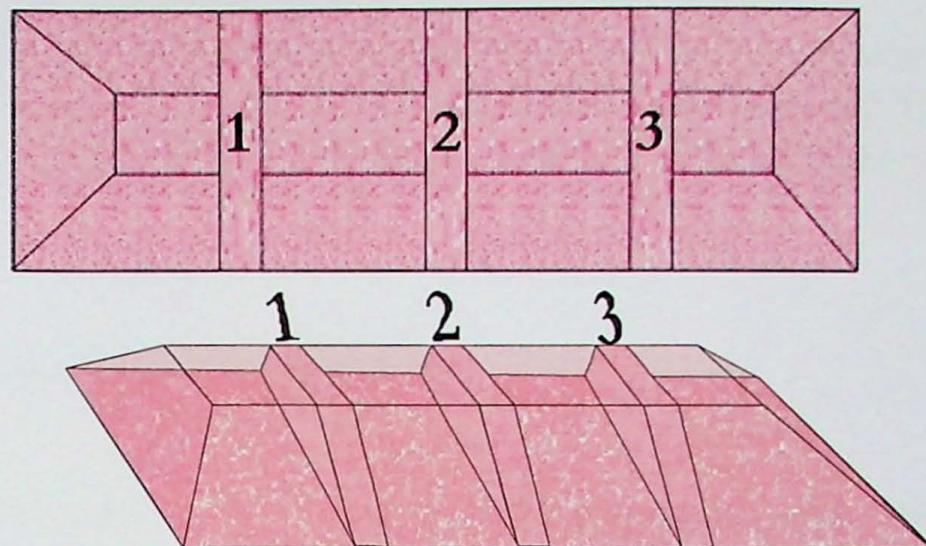


Figura 8: Esquemas da pilha de quarteamento para tomada das primeiras alíquotas para composição das amostras secundárias.

A seguir uma nova desagregação foi realizada com a utilização de uma peneira ABNT 20. As amostras foram então pesadas e quarteadas até que ficassem com a mesma massa (em torno de 360 g). A partir daqui inicia-se a composição das amostras secundárias.

Amostras Secundárias

Após o quarteamento as amostras foram assim compostas (figura 7) e homogeneizadas:

- **C1:** 11+12+13+14;
- **C2:** 15+16+17;
- **C3:** 21+22+23;
- **C4:** 24+25+26.

A decisão por compor as amostras dessa forma deu-se através de uma avaliação tátil-visual, onde se observou que o material dos primeiros 3 m de perfuração era claramente mais arenoso do que aqueles de profundidades maiores, assim como aquele mais próximo do ponto de lançamento de rejeitos.

Foi então realizado mais um quarteamento para que se captasse duas alíquotas (de aproximadamente 30 g cada) representativas das amostras (C1, C2, C3 e C4). Uma para realização do ensaio de difração de raios-X e a outra para a fluorescência de raios-X.

6.3-ANÁLISES DO REJEITO *IN NATURA*

As análises serão aqui discutidas em dois grupos distintos: aquelas realizadas no material *in natura*, tratando-se, portanto dos ensaios dirigidos às caracterizações física, química e mineralógica; e aquelas realizadas no material após duas queimas realizadas em duas temperaturas diferentes, essas últimas dirigidas especificamente à caracterização tecnológica.

6.3.1-DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

O ensaio de difração de raios-X (figura 9) foi feito através do método do pó, com a utilização de pastilhas prensadas. As medidas foram realizadas com valores de 2θ de 2,5 a 70 com temperatura de 25 graus Celsius.

Seguem os resultados da difração de raios-X, para as quatro amostras (figuras 10 a17):



Figura 9: Equipamento de Raios-X.

C1:

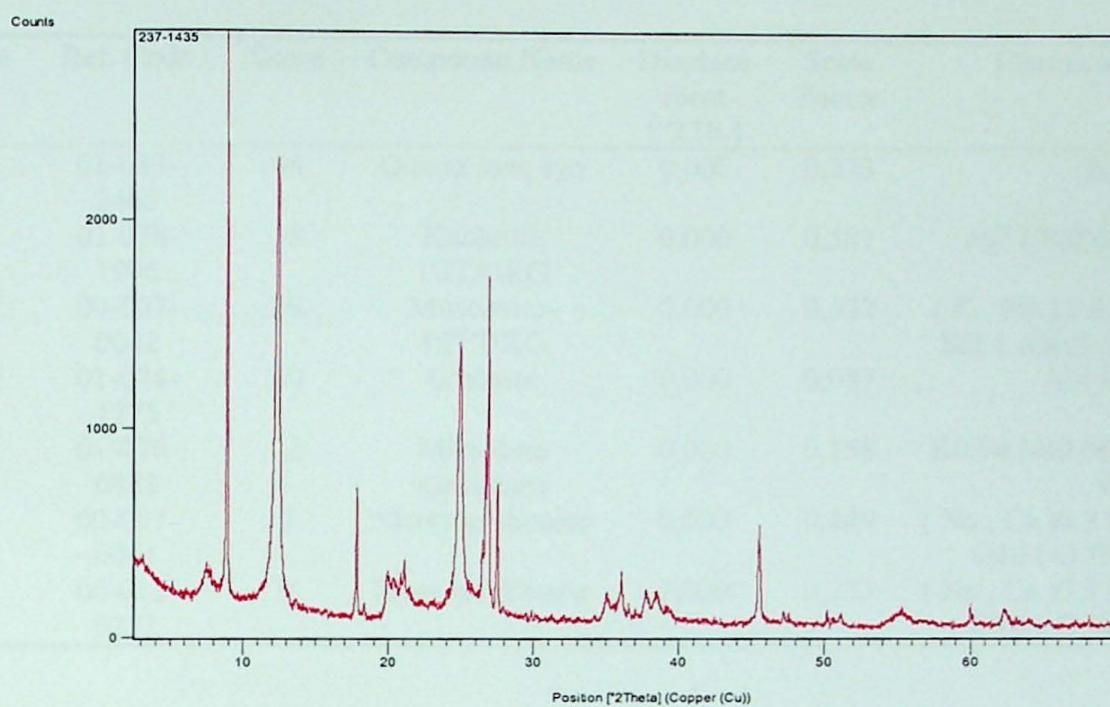


Figura 10: Difratograma C1.

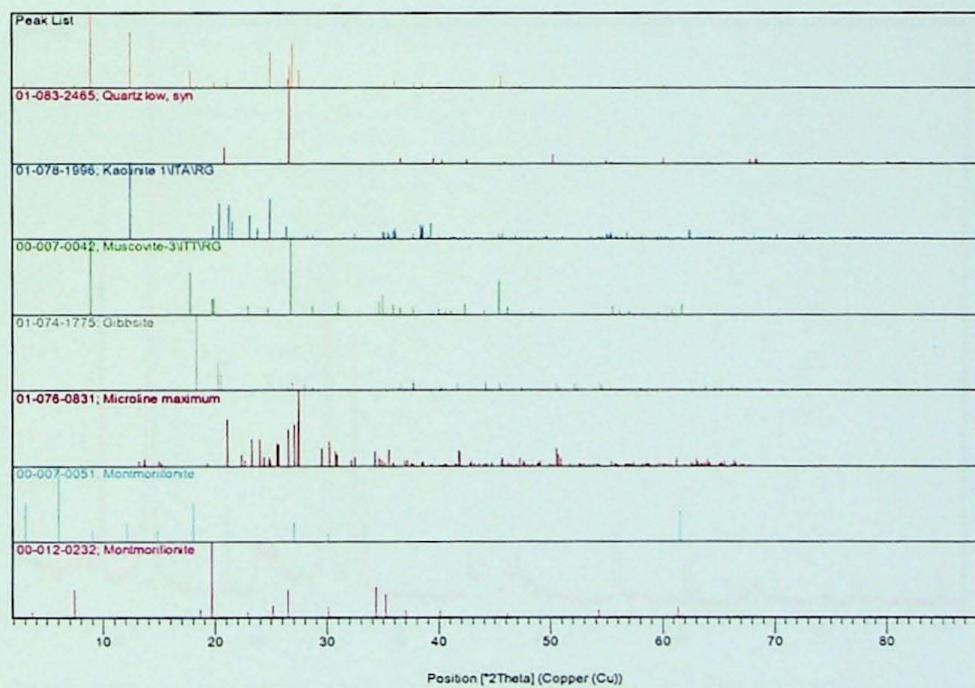


Figura 11: Identificação individual dos picos segundo o mineral ao qual pertence.

Tabela 1: Mineralogia e fichas ICDD para C1.

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-083-2465	44	Quartz low, syn	0,000	0,273	Si O ₂
*	01-078-1996	38	Kaolinite 1\ITA\RG	0,000	0,581	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (O H) ₄
*	00-007-0042	39	Muscovite-3\ITT\RG	0,000	0,322	(K , Na) (Al , Mg , Fe) ₂ (Si _{3.1} Al _{0.9}) O ₁₀ (O H) ₂
*	01-074-1775	10	Gibbsite	0,000	0,087	Al (O H) ₃
*	01-076-0831	22	Microline maximum	0,000	0,158	K0.94 Na0.06 Al1.01 Si _{2.99} O ₈
*	00-007-0051	7	Montmorillonite	0,000	0,249	(Na , Ca) _{0.3} (Al , Mg) ₂ Si ₂ O ₁₀ (O H) ₂ !n H ₂ O
*	00-012-0232	9	Montmorillonite	0,000	0,233	(Na , Ca) _{0.3} (Al , Mg) ₂ Si ₄ O ₁₆ (O H) ₂ !x H ₂ O

C2:

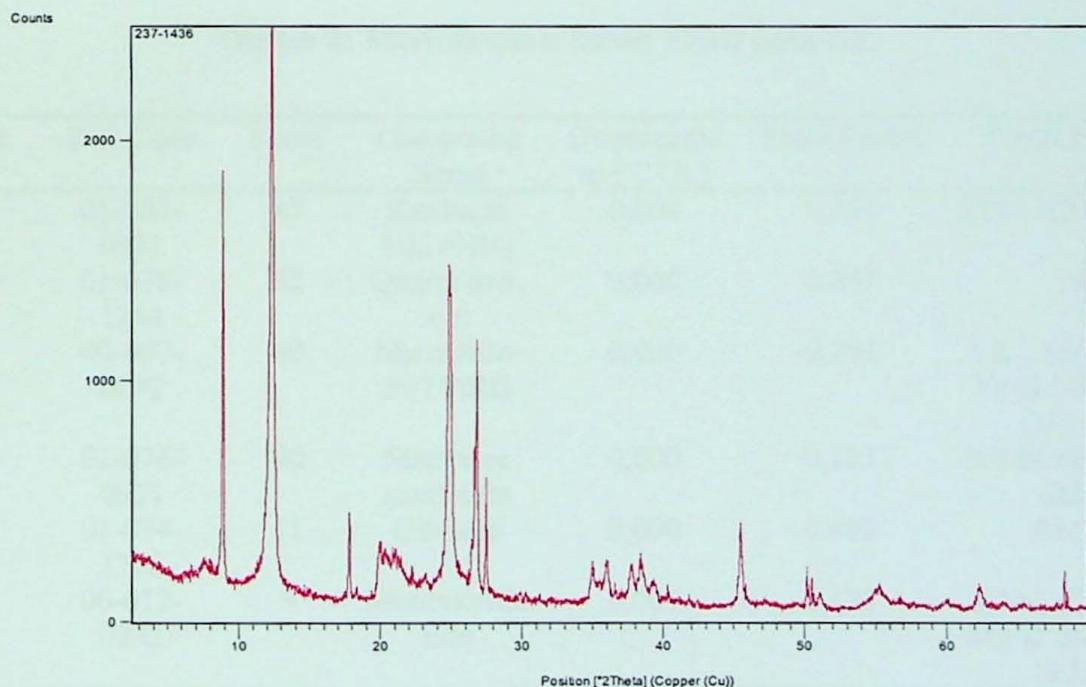


Figura 12: Difratograma C2.



Figura 13: Identificação individual dos picos segundo o mineral ao qual pertence.

Tabela 2: Mineralogia e fichas ICDD para C2.

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-083-0971	47	Kaolinite 1\ITA\RG	0,000	0,737	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$
*	01-078-1254	32	Quartz low, syn	0,000	0,387	SiO_2
*	00-007-0042	40	Muscovite-3\ITT\RG	0,000	0,296	$(\text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_{3.1}\text{Al}_{0.9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
*	01-076-0831	20	Microline maximum	0,000	0,123	$\text{K}_{0.94}\text{Na}_{0.06}\text{Al}_{1.01}\text{Si}_{2.99}\text{O}_8$
*	01-074-1775	11	Gibbsite	0,000	0,402	$\text{Al}(\text{OH})_3$
*	00-012-0232	5	Montmorillonite	0,000	0,177	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{16}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$

C3:

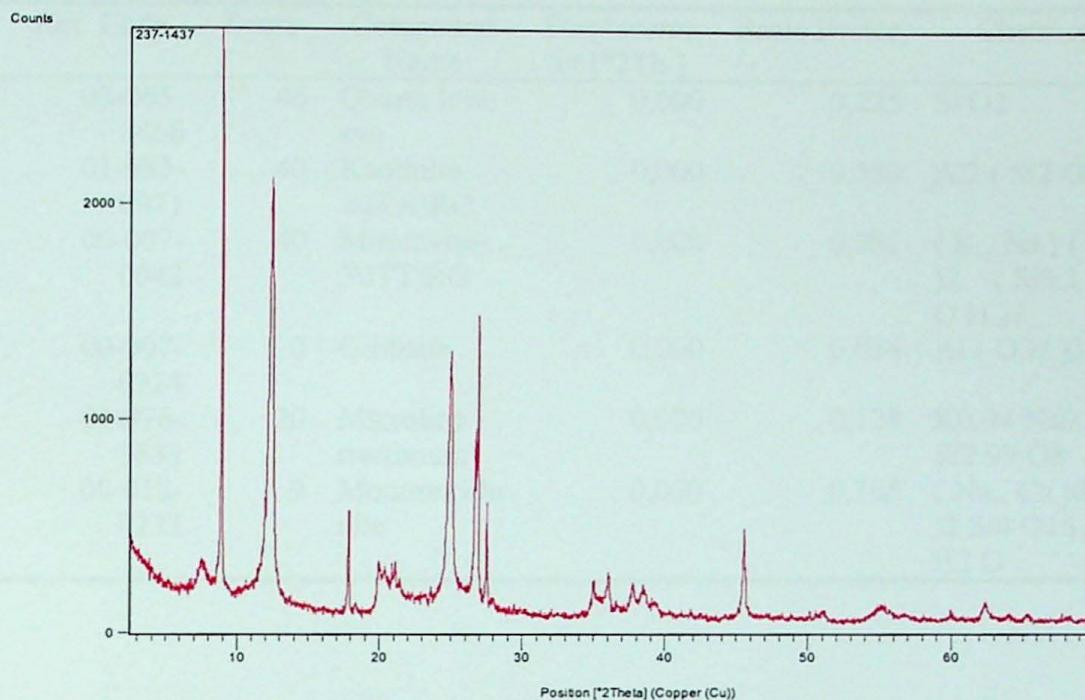


Figura 14: Difratograma C3.

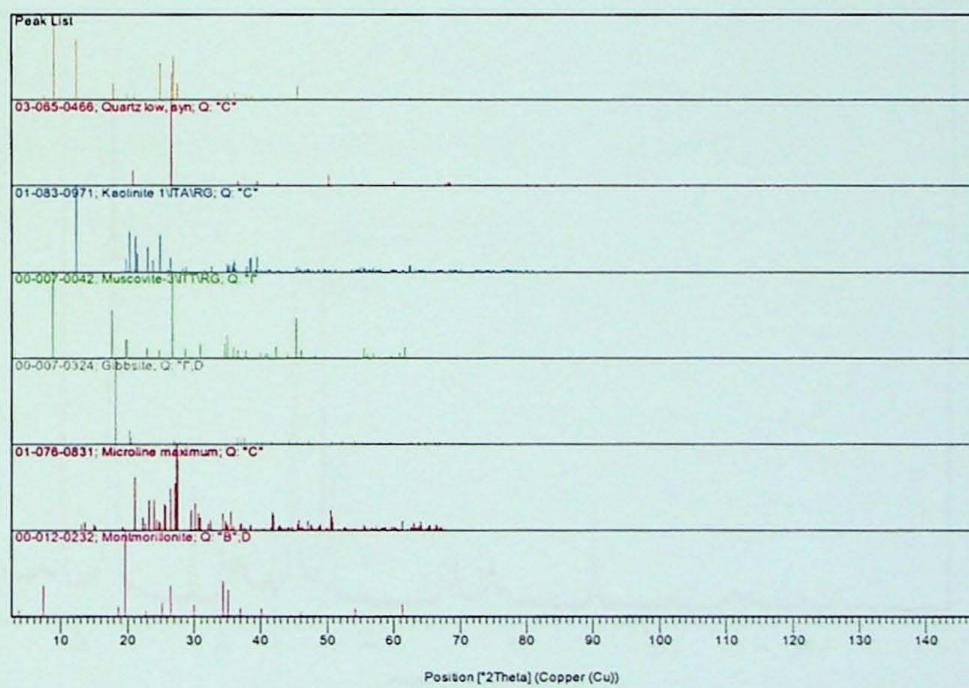


Figura 15: Identificação individual dos picos segundo o mineral ao qual pertence.

Tabela 3: Mineralogia e fichas ICDD para C3.

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	03-065-0466	46	Quartz low, syn	0,000	0,225	Si O ₂
*	01-083-0971	40	Kaolinite 1\ITA\RG	0,000	0,580	Al ₂ (Si ₂ O ₅) (OH) ₄
*	00-007-0042	40	Muscovite-3\ITT\RG	0,000	0,281	(K , Na) (Al , Mg , Fe) ₂ (Si _{3.1} Al _{0.9}) O ₁₀ (OH) ₂
*	00-007-0324	0	Gibbsite	0,000	0,034	Al (OH) ₃
*	01-076-0831	20	Microline maximum	0,000	0,128	K0.94 Na0.06 Al1.01 Si _{2.99} O ₈
*	00-012-0232	9	Montmorillonite	0,000	0,165	(Na , Ca) _{0.3} (Al , Mg) ₂ Si ₄ O ₁₆ (OH) ₂ !x H ₂ O

C 4:

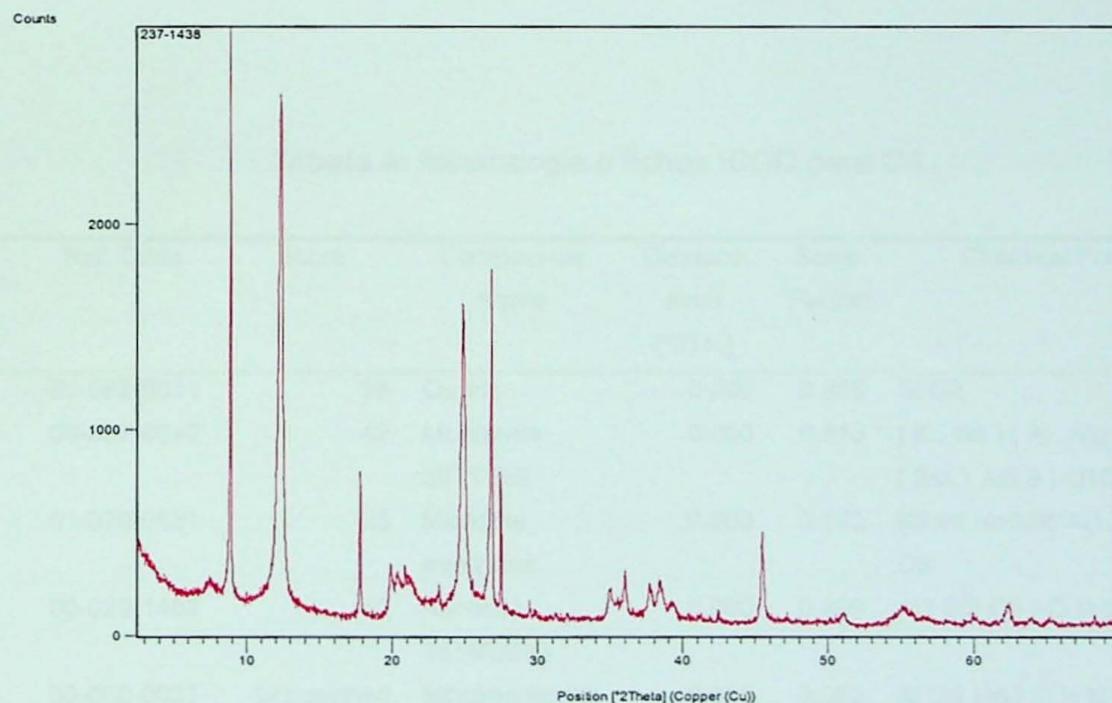


Figura 16: Difratograma C4.

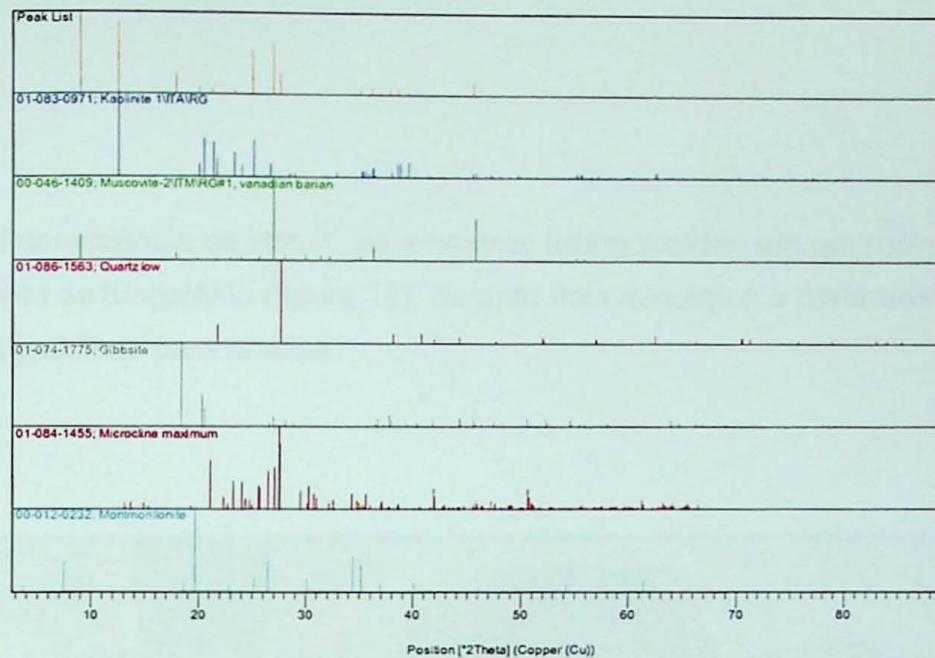


Figura 17: Identificação individual dos picos segundo o mineral ao qual pertence.

Tabela 4: Mineralogia e fichas ICDD para C4.

Visible	Ref. Code	Score	Compounds	Displace	Scale	Chemical Formula
				Name	ment	
					[°2Th.]	
*	01-082-0511	35	Quartz	0.000	0.205	Si O ₂
*	00-007-0042	42	Muscovite- 3\IT\RG	0.000	0.313	(K , Na) (Al , Mg , Fe) ₂ (Si ₃ Al _{0.9}) O ₁₀ (O H) ₂
*	01-076-0831	25	Microline maximum	0.000	0.125	K _{0.94} Na _{0.06} Al _{1.01} Si _{2.99} O ₈
*	00-029-1488	42	Kaolinite- 1\ITMd\RG	0.000	0.399	Al ₂ Si ₂ O ₅ (O H) ₄
*	00-002-0037	Unmatched Strong	Montmorillonite	0.000	0.052	Al Si ₂ O ₆ (O H) ₂

6.3.2-FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

Para a fluorescência de raio-X, as amostras foram moídas em um moinho de anéis com panela de carbeto de tungstênio (figura 18), durante dois minutos e a partir deste material foram constituídas as pastilhas para análise.



Figura 18: Moinho de anéis (A e B); panela de carbeto de tungstênio utilizada para a moagem das amostras destinadas à Fluorescência de Raios-X (C).

As pastilhas foram confeccionadas misturando-se 1 g de amostra com 7 g de fundente (neste caso, tetraborato de lítio) e duas gotas de água de boro, para auxiliar na liberação da pastilha do molde, já dentro do cadinho de platina onde ocorreria o aquecimento (figura 19 A, B e C.)

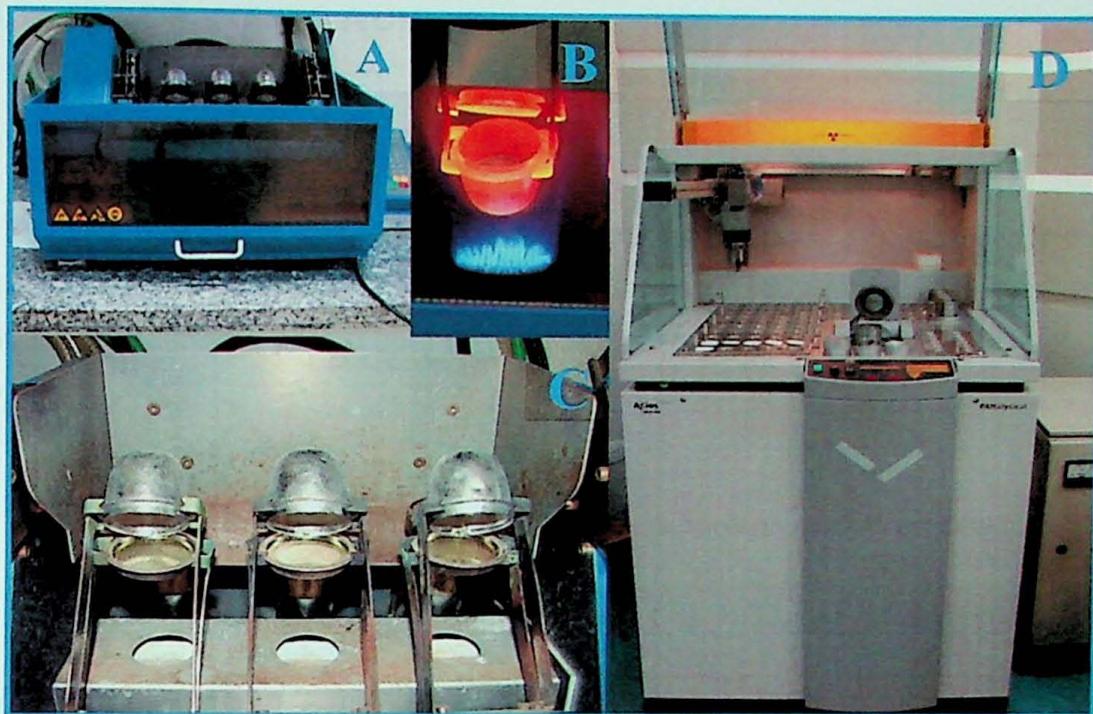


Figura 19: Equipamento onde foi feito o aquecimento para constituição das pastilhas (A); detalhe do processo de aquecimento com chama de 1000 graus Celsius (B); pastilhas prontas (C); equipamento onde foram realizadas as análises (D).

A seguir é apresentada a tabela em porcentagem de óxidos com os resultados obtidos na fluorescência de raios-X.

Tabela 5: Composição em porcentagem de óxidos e perda ao fogo para as quatro amostras.

Amostra	C1	C2	C3	C4
SiO_2	48,9	47,3	47,9	46,8
Al_2O_3	34,0	34,8	33,5	34,0
Fe_2O_3	3,01	2,92	2,89	3,24
MnO	0,10	0,10	0,07	0,10
MgO	0,24	0,21	0,23	0,34
CaO	0,10	0,10	0,10	0,10
Na_2O	0,10	0,10	0,10	0,19
K_2O	2,46	1,98	2,41	2,03
TiO_2	0,26	0,24	0,25	0,47
P_2O_5	0,10	0,10	0,10	0,10
PF	11,8	12,8	13,0	13,0

6.3.3-PENEIRAMENTO A ÚMIDO

Para a descrição das características granulométricas do material em um primeiro momento optou-se pela realização do peneiramento a úmido, segundo indicações da NBR NM 46 - 2001. Procedimento para o qual se obteve os seguintes resultados.

Tabela 6: Composição granulométrica para as quatro amostras.

Nº da Amostra	C1 (%)	C2 (%)	C3 (%)	C4 (%)
Peneira (Mesh/#)/mm				
#16 / 1,200	0,00	0,00	0,00	0,00
#30 / 0,600	0,04	0,02	0,02	0,04
#50 / 0,300	1,74	3,18	0,22	0,17
#100 / 0,150	8,45	3,59	2,70	2,45
#140 / 0,106	4,70	3,91	2,98	3,12
#200 / 0,075	10,42	7,57	7,48	7,48
#325 / 0,045	16,98	14,83	15,67	14,01
#400 / 0,037	4,11	14,33	4,11	4,82
Passante	53,55	52,57	66,82	67,90

O que se observa é que em média 53% do material do furo I é constituído por material na fração argila (amostras C1 e C2). Além disso, nota-se também que as amostras referentes ao furo II, apresentam um conteúdo dessa fração acima de 67%. Essa diferença já era esperada dado ao fato que o furo I encontra-se bem próximo de onde se localizava a frente de lançamento de rejeitos na barragem, quando esta ainda estava em operação. Foi observado que toda a matéria orgânica visível a olho nu ficou retida na malha 50 #. A massa total em gramas para as amostras C1, C2, C3 e C4 eram respectivamente de 476,90; 634,40; 459,60 e 240,50.

6.3.4-ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Como o peneiramento foi capaz apenas de revelar intervalos granulométricos (além da porcentagem de material contida em cada um destes intervalos) optou-se também por realizar uma análise granulométrica mais detalhada. Essa análise foi realizada no equipamento Mastersizer (Malvern; figura 20). Para a realização deste ensaio tomaram-se as amostras depois da secagem e preparou-se uma suspensão com água deionizada, à qual foi adicionada 20 mL uma solução de Calgon a 10% (hexametafosfato de sódio). Durante a circulação no aparelho para auxiliar na dispersão do material utilizou-se ultra-som. Os resultados são os que se seguem e estão identificados de acordo com as amostras (C1, C2, C3 E C4):

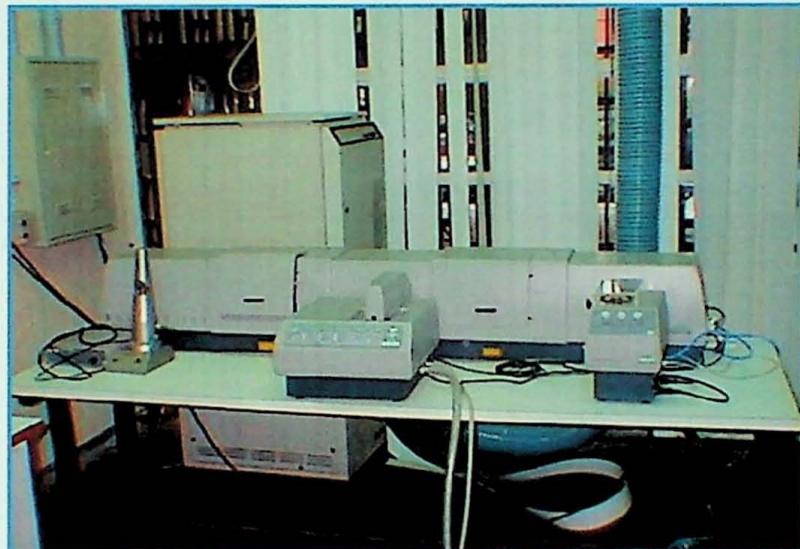


Figura 20: Equipamento no qual foi realizada a análise granulométrica.

C1:

Resultados Estatísticos							
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração = 0.0277 %Vol	Densidade = 1.000 g / cm3	Área Superf.Espec. = 0.8350 m2 / g				
Diâmetros Médios:	D (v, 0.1) = 3.70 um	D (v, 0.5) = 31.99 um	D (v, 0.9) = 129.18 um				
D [4, 3] = 50.85 um	D [3, 2] = 7.19 um	Span = 3.923E+00	Uniformidade = 1.191E+00				
Diam.Inferior (um)	No Intervalo %	Diam.Superior (um)	Acum. Abaixo%	Diam.Inferior (um)	No Intervalo %	Diam.Superior (um)	Acum. Abaixo%
0.05	0.00	0.06	0.00	5.69	2.09	6.63	16.97
0.06	0.00	0.07	0.01	6.63	2.27	7.72	19.24
0.07	0.01	0.08	0.01	7.72	2.44	9.00	21.68
0.08	0.01	0.09	0.03	9.00	2.60	10.48	24.27
0.09	0.02	0.11	0.04	10.48	2.76	12.21	27.04
0.11	0.02	0.13	0.07	12.21	2.95	14.22	29.98
0.13	0.03	0.15	0.10	14.22	3.16	16.57	33.14
0.15	0.04	0.17	0.14	16.57	3.41	19.31	36.55
0.17	0.05	0.20	0.19	19.31	3.69	22.49	40.24
0.20	0.06	0.23	0.26	22.49	4.02	26.20	44.26
0.23	0.08	0.27	0.34	26.20	4.35	30.53	48.60
0.27	0.10	0.31	0.44	30.53	4.65	35.56	53.26
0.31	0.12	0.36	0.55	35.56	4.89	41.43	58.15
0.36	0.14	0.42	0.70	41.43	5.03	48.27	63.18
0.42	0.17	0.49	0.87	48.27	5.06	56.23	68.24
0.49	0.22	0.58	1.09	56.23	5.03	65.51	73.27
0.58	0.27	0.67	1.36	65.51	4.61	76.32	77.87
0.67	0.33	0.78	1.69	76.32	4.09	88.91	81.96
0.78	0.41	0.91	2.10	88.91	3.58	103.58	85.55
0.91	0.48	1.06	2.58	103.58	3.16	120.67	88.70
1.06	0.56	1.24	3.15	120.67	2.82	140.58	91.53
1.24	0.64	1.44	3.78	140.58	2.55	163.77	94.07
1.44	0.72	1.68	4.50	163.77	2.24	190.80	96.32
1.68	0.80	1.95	5.30	190.80	1.82	222.28	98.14
1.95	0.91	2.28	6.21	222.28	1.23	258.95	99.37
2.28	1.03	2.65	7.24	258.95	0.63	301.68	99.99
2.65	1.17	3.09	8.41	301.68	0.01	351.46	100.00
3.09	1.34	3.60	9.74	351.46	0.00	409.45	100.00
3.60	1.52	4.19	11.26	409.45	0.00	477.01	100.00
4.19	1.71	4.88	12.98	477.01	0.00	555.71	100.00
4.88	1.91	5.69	14.88				

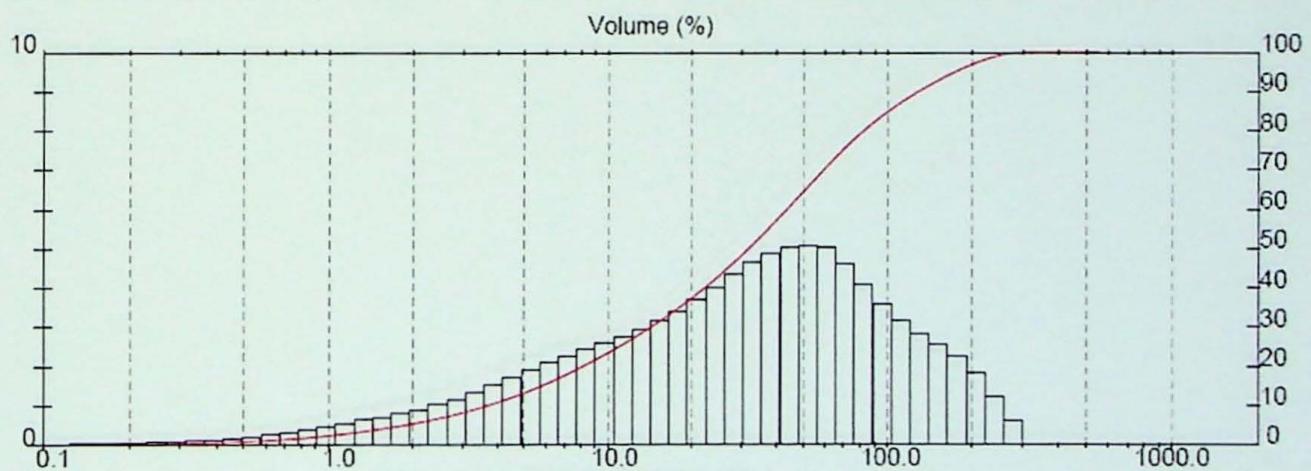


Figura 21: Análise granulométrica para amostra C1.

C2:

Resultados Estatísticos			
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração = 0.0283 %Vol	Densidade = 1.000 g / cm3	Área Superf.Espec. = 1.0449 m2 / g
Dâmetros Médios:			
D [4, 3] = 45.27 um	D (v, 0.1) = 2.95 um	D (v, 0.5) = 28.31 um	D (v, 0.9) = 114.41 um
	D [3, 2] = 5.74 um	Span = 3.937E+00	Uniformidade = 1.214E+00
Diam.Inferior (μm)	No Intervalo %	Diam.Superior (μm)	Acum. Abaixo%
0.05	0.00	0.06	0.00
0.06	0.01	0.07	0.01
0.07	0.01	0.08	0.02
0.08	0.02	0.09	0.05
0.09	0.03	0.11	0.08
0.11	0.04	0.13	0.12
0.13	0.06	0.15	0.18
0.15	0.07	0.17	0.25
0.17	0.09	0.20	0.34
0.20	0.10	0.23	0.44
0.23	0.12	0.27	0.56
0.27	0.14	0.31	0.71
0.31	0.16	0.36	0.87
0.36	0.19	0.42	1.06
0.42	0.23	0.49	1.29
0.49	0.27	0.58	1.56
0.58	0.33	0.67	1.89
0.67	0.41	0.78	2.30
0.78	0.50	0.91	2.79
0.91	0.59	1.06	3.39
1.06	0.69	1.24	4.08
1.24	0.78	1.44	4.86
1.44	0.88	1.68	5.74
1.68	0.98	1.95	6.72
1.95	1.10	2.28	7.82
2.28	1.24	2.65	9.05
2.65	1.39	3.09	10.45
3.09	1.57	3.60	12.02
3.60	1.76	4.19	13.78
4.19	1.95	4.88	15.72
4.88	2.12	5.69	17.85
Diam.Inferior (μm)	No Intervalo %	Diam.Superior (μm)	Acum. Abaixo%
5.69	2.27	6.63	20.12
6.63	2.41	7.72	22.53
7.72	2.52	9.00	25.05
9.00	2.64	10.48	27.69
10.48	2.77	12.21	30.46
12.21	2.93	14.22	33.39
14.22	3.15	16.57	36.54
16.57	3.42	19.31	39.96
19.31	3.74	22.49	43.70
22.49	4.09	26.20	47.79
26.20	4.43	30.53	52.23
30.53	4.73	35.56	56.95
35.56	4.93	41.43	61.88
41.43	5.02	48.27	66.90
48.27	4.99	56.23	71.89
56.23	4.83	65.51	76.72
65.51	4.34	76.32	81.07
76.32	3.79	88.91	84.85
88.91	3.26	103.58	88.11
103.58	2.83	120.67	90.95
120.67	2.49	140.58	93.44
140.58	2.20	163.77	95.64
163.77	1.87	190.80	97.51
190.80	1.42	222.28	98.93
222.28	0.84	258.95	99.77
258.95	0.23	301.68	100.00
301.68	0.00	351.46	100.00
351.46	0.00	409.45	100.00
409.45	0.00	477.01	100.00
477.01	0.00	555.71	100.00

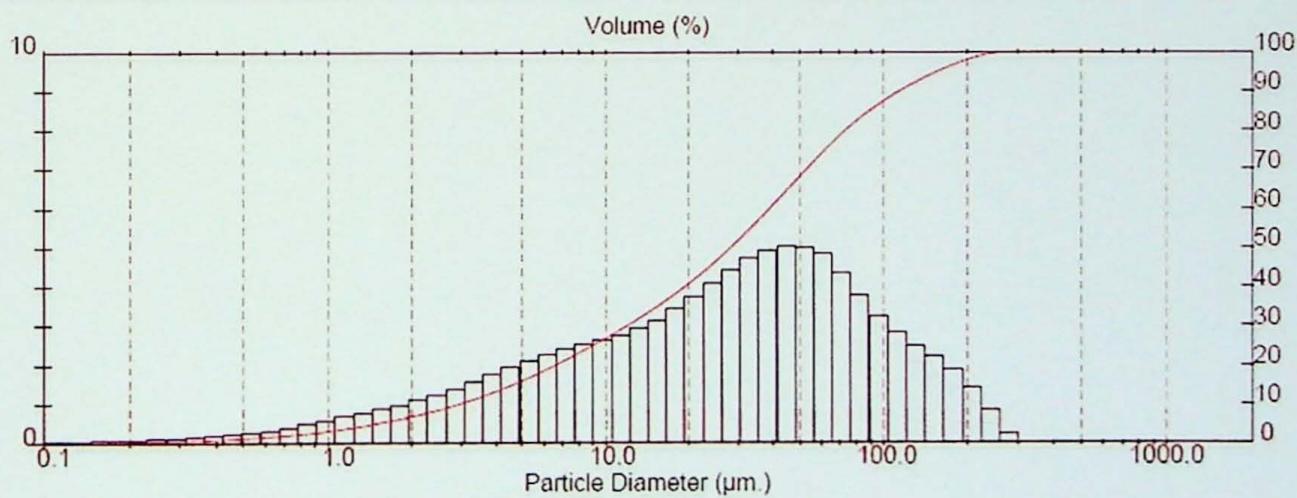


Figura 22: Análise granulométrica para amostra C2.

C3:

Resultados Estatísticos							
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração = 0.0257 %Vol	Densidade = 1.000 g / cm3	Área Superf.Espec. = 0.9901 m2 / g				
Diâmetros Médios:							
D [4, 3] = 42.71 um	D (v, 0.1) = 2.92 um	D (v, 0.5) = 26.95 um	D (v, 0.9) = 105.42 um				
	D [3, 2] = 6.06 um	Span = 3.803E+00	Uniformidade = 1.204E+00				
Diam.Inferior (um)	No Intervalo %	Diam.Superior (um)	Acum. Abaixo%	Diam.Inferior (um)	No Intervalo %	Diam.Superior (um)	Acum. Abaixo%
0.05	0.00	0.06	0.00	5.69	2.44	6.63	20.85
0.06	0.00	0.07	0.01	6.63	2.58	7.72	23.43
0.07	0.01	0.08	0.02	7.72	2.70	9.00	26.13
0.08	0.01	0.09	0.03	9.00	2.80	10.48	28.93
0.09	0.02	0.11	0.05	10.48	2.90	12.21	31.83
0.11	0.03	0.13	0.08	12.21	3.02	14.22	34.85
0.13	0.04	0.15	0.12	14.22	3.19	16.57	38.04
0.15	0.05	0.17	0.16	16.57	3.42	19.31	41.46
0.17	0.06	0.20	0.22	19.31	3.71	22.49	45.17
0.20	0.08	0.23	0.30	22.49	4.04	26.20	49.22
0.23	0.10	0.27	0.40	26.20	4.39	30.53	53.61
0.27	0.12	0.31	0.52	30.53	4.71	35.56	58.31
0.31	0.14	0.36	0.66	35.56	4.95	41.43	63.26
0.36	0.18	0.42	0.84	41.43	5.12	48.27	68.38
0.42	0.22	0.49	1.06	48.27	5.22	56.23	73.60
0.49	0.27	0.58	1.33	56.23	4.88	65.51	78.47
0.58	0.34	0.67	1.67	65.51	4.35	76.32	82.82
0.67	0.42	0.78	2.09	76.32	3.73	88.91	86.55
0.78	0.52	0.91	2.60	88.91	3.13	103.58	89.68
0.91	0.62	1.06	3.22	103.58	2.62	120.67	92.29
1.06	0.71	1.24	3.93	120.67	2.22	140.58	94.51
1.24	0.81	1.44	4.75	140.58	1.89	163.77	96.40
1.44	0.91	1.68	5.65	163.77	1.58	190.80	97.98
1.68	1.01	1.95	6.67	190.80	1.18	222.28	99.17
1.95	1.14	2.28	7.81	222.28	0.67	258.95	99.84
2.28	1.29	2.65	9.10	258.95	0.16	301.68	100.00
2.65	1.46	3.09	10.55	301.68	0.00	351.46	100.00
3.09	1.65	3.60	12.21	351.46	0.00	409.45	100.00
3.60	1.86	4.19	14.07	409.45	0.00	477.01	100.00
4.19	2.07	4.88	16.14	477.01	0.00	555.71	100.00
4.88	2.27	5.69	18.41				

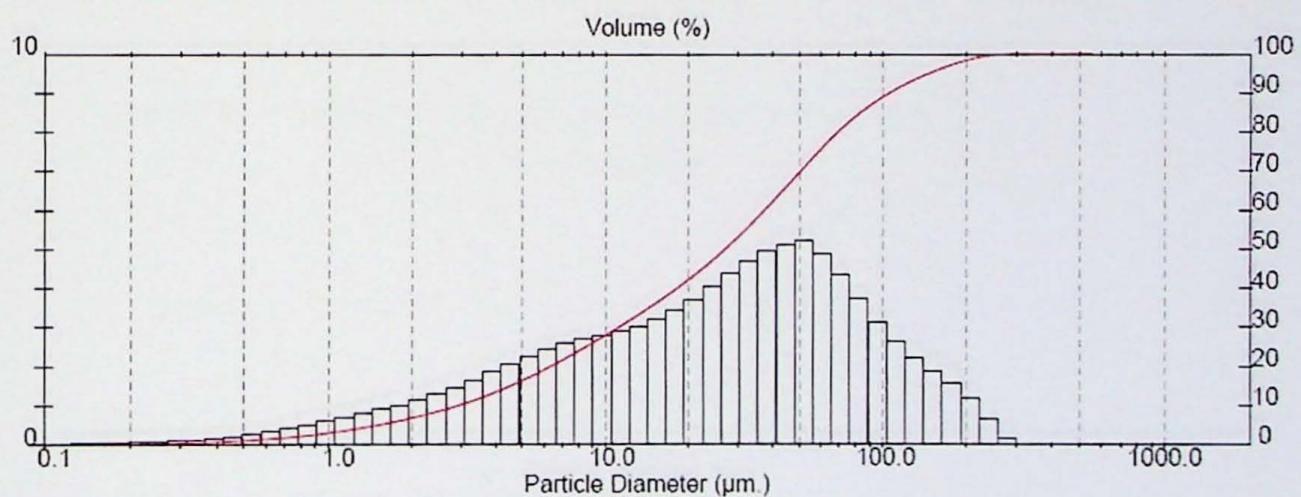


Figura 23: Análise granulométrica para amostra C3.

C4:

Resultados Estatísticos							
Tipo de Distribuição: Volume	Concentração = 0.0232 %Vol	Densidade = 1.000 g / cm3	Área Superf.Espec. = 0.9832 m2 / g				
Diâmetros Médios:	D (v, 0.1) = 2.82 um	D (v, 0.5) = 27.58 um	D (v, 0.9) = 110.44 um				
D [4, 3] = 44.14 um	D [3, 2] = 6.10 um	Span = 3.902E+00	Uniformidade = 1.225E+00				
Diam.Inferior (μm)	No Intervalo %	Diam.Superior (μm)	Acum. Abaixo%	Diam.Inferior (μm)	No Intervalo %	Diam.Superior (μm)	Acum. Abaixo%
0.05	0.00	0.06	0.00	5.69	2.39	6.63	21.22
0.06	0.00	0.07	0.01	6.63	2.51	7.72	23.72
0.07	0.01	0.08	0.01	7.72	2.60	9.00	26.33
0.08	0.01	0.09	0.03	9.00	2.69	10.48	29.01
0.09	0.02	0.11	0.05	10.48	2.78	12.21	31.79
0.11	0.03	0.13	0.07	12.21	2.90	14.22	34.69
0.13	0.03	0.15	0.11	14.22	3.07	16.57	37.76
0.15	0.04	0.17	0.15	16.57	3.30	19.31	41.06
0.17	0.06	0.20	0.21	19.31	3.60	22.49	44.66
0.20	0.07	0.23	0.28	22.49	3.94	26.20	48.60
0.23	0.09	0.27	0.37	26.20	4.30	30.53	52.89
0.27	0.11	0.31	0.48	30.53	4.63	35.56	57.52
0.31	0.13	0.36	0.62	35.56	4.89	41.43	62.41
0.36	0.17	0.42	0.78	41.43	5.06	48.27	67.47
0.42	0.21	0.49	0.99	48.27	5.17	56.23	72.64
0.49	0.26	0.58	1.25	56.23	4.85	65.51	77.49
0.58	0.33	0.67	1.59	65.51	4.35	76.32	81.84
0.67	0.42	0.78	2.01	76.32	3.76	88.91	85.61
0.78	0.53	0.91	2.54	88.91	3.20	103.58	88.81
0.91	0.64	1.06	3.18	103.58	2.72	120.67	91.53
1.06	0.75	1.24	3.93	120.67	2.34	140.58	93.87
1.24	0.86	1.44	4.78	140.58	2.03	163.77	95.90
1.44	0.97	1.68	5.75	163.77	1.71	190.80	97.61
1.68	1.08	1.95	6.83	190.80	1.32	222.28	98.93
1.95	1.21	2.28	8.04	222.28	0.80	258.95	99.72
2.28	1.36	2.65	9.39	258.95	0.28	301.68	100.00
2.65	1.52	3.09	10.91	301.68	0.00	351.46	100.00
3.09	1.70	3.60	12.62	351.46	0.00	409.45	100.00
3.60	1.89	4.19	14.51	409.45	0.00	477.01	100.00
4.19	2.08	4.88	16.58	477.01	0.00	555.71	100.00
4.88	2.25	5.69	18.83				

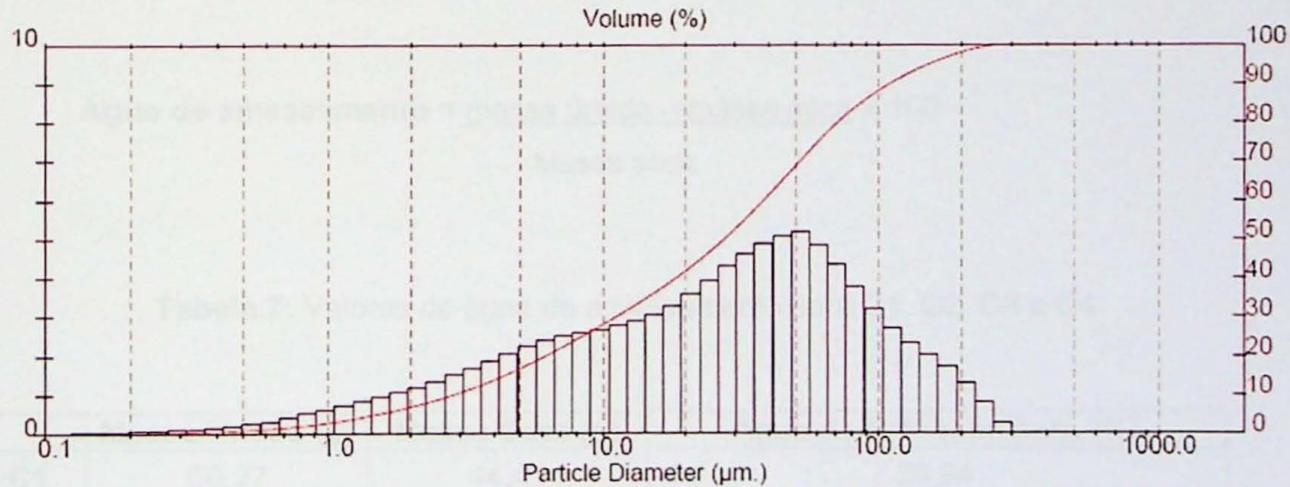


Figura 24: Análise granulométrica para amostra C4.

6.3.5-ÁGUA DE AMASSAMENTO

Água de amassamento por definição é a quantidade de água necessária para desenvolver plasticidade da argila, com boa trabalhabilidade (Gava, M., et al, 2004).

O procedimento para realização do ensaio é o seguinte:

- Adiciona-se água aleatoriamente, o suficiente para formar uma massa plástica com boa trabalhabilidade;
- Acondicionar a mostra em saco plástico retirando todo o ar e deixar em descanso por pelo menos 24 horas;
- Pesar aproximadamente 60 gramas do material;
- Amassar com as mãos até homogeneizar e deixar de ser pegajosa (deixar de grudar nas mãos);
- Pesar o material (massa úmida);
- Secar em estufa por 24 horas a 70° C por 24 horas;
- Pesar o material novamente (massa seca).

O valor da água de amassamento é obtido através da fórmula:

$$\text{Água de amassamento} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{Massa seca}} \times 100$$

Tabela 7: Valores de água de amassamento para C1, C2, C3 e C4.

	Massa Úmida (g)	Massa Seca (g)	Água de Amassamento (%)
C1	60,37	44,41	35,94
C2	60,23	43,27	39,20
C3	61,22	44,36	38,01
C4	60,91	41,66	46,21

6.3.6-ÁGUA DE ESFARELAMENTO (OU LIMITE MÍNIMO DE PLASTICIDADE)

Define-se pela quantidade mínima de água onde a massa plástica perde a plasticidade, tornando-se quebradiça (Gava, M. et al, 2004).

O procedimento para realização do ensaio é o seguinte:

- Tomar cerca de 10 gramas do material, rolar sobre uma placa de vidro, de superfície esmerilhada, com pressão suficiente na palma da mão, para lhe dar forma cilíndrica, com aproximadamente 3 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento;.
- Quando o rolete atingir as proporções descritas no item anterior, sem se fragmentar, amassar o material com os dedos;
- Repetir os procedimentos dois pontos anteriores até não conseguir mais rolar o material sobre aplaca de vidro (o material se tornará quebradiço);
- Pesar o material (massa úmida);
- Secar em estufa por 24 horas a 70º C;
- Pesar o material (massa seca).

O valor da água de esfarelamento é obtido através da fórmula:

$$\text{Água de esfarelamento} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{Massa seca}} \times 100$$

Tabela 8: Valores de água de esfarelamento para C1, C2, C3 e C4.

	Massa úmida (g)	Massa Seca (g)	Água de Esfarelamento (%)
C1	3,92	3,06	28,10
C2	2,60	2,01	29,35
C3	3,60	2,77	29,96
C4	3,30	2,51	31,47

6.3.7-LIMITE DE LIQUIDEZ

O limite de liquidez é a quantidade de água máxima que uma argila admite, mantendo o estado plástico. Acima deste valor o material se liquefaz (Gava, M., et al 2004).

O procedimento para realização do ensaio é o seguinte:

1. Pesar aproximadamente 250 gramas do material;
2. Para determinação do limite de liquidez utiliza-se o aparelho Casagrande (Solotest; figura 24);
3. Com a concha do aparelho na mão, transferir parte do material para a concha, moldado-a de forma que na parte central a espessura esteja na ordem de 10 mm (realizar esta operação de maneira que não fique ar no interior da massa);
4. Todo o excesso de material deve ser retirado;
5. Dividir o material em duas partes, passando o cinzel através do mesmo, de maneira a abrir uma ranhura em sua parte central. O cinzel deve ser deslocado perpendicularmente à superfície da concha, por passagens sucessivas e cuidadosas;
6. Recolocar a concha cuidadosamente no aparelho novamente;
7. Ligar o aparelho para que ele comece a golpear a concha contra a base;
8. A quantidade de golpes deve ser anotada até que as bordas inferiores da ranhura se unam ao longo de 13 mm de comprimento aproximadamente;
9. Registrar o número de golpes;
10. Transferir a pequena quantidade das bordas do material da junta das bordas que se uniram para a cápsula de alumínio previamente tarada;
11. Pesar cápsula + material;
12. Secar o material em estufa por 24 horas a 70° C;
13. Adicionar água aleatoriamente ao material e homogeneizar durante pelo menos 2 minutos;
14. Repetir os passos de 3 até 11 até se conseguir pelo menos três pontos de ensaio, cobrindo o intervalo entre 50 e 10 golpes.

O limite de liquidez é dado pela porcentagem de umidade correspondente a 25 golpes. Para encontrar esse valor foi construído um gráfico com os eixos das ordenadas em escala logarítmica, correspondente ao número de golpes, e na abscissa foram colocados os valores das porcentagens de umidade.



Figura 25: Aparelho Casagrande utilizado para a determinação do limite de liquidez das amostras.

Tabela 9: Valores para determinação do limite de liquidez para a amostra C1.

C1			
Massa Cadinho	Borda antes da secagem	Borda após secagem	Nº de Golpes C1
11,5	7,38	4,89	6
27,66	5,21	3,81	73
31,89	4,44	3,22	36
32,54	4,56	3,25	28
32,61	4,4	3,18	18

Tabela 10: Valores para determinação do limite de liquidez para a amostra C2.

C2			
Massa Cadinho	Borda antes da secagem	Borda após secagem	Nº de Golpes C2
10,01	5,77	4,4	9
32,09	4,94	3,51	45
27,32	4,22	2,97	29

Tabela 11: Valores para determinação do limite de liquidez para a amostra C3.

C3			
Massa Cadinho	Borda antes da secagem	Borda após secagem	Nº de Golpes C3
33,64	4,89	3,26	13
32,31	4,55	3,25	42
35,25	4,6	0,57	32

Tabela 12: Valores para determinação do limite de liquidez para a amostra C4.

C4			
Massa Cadinho	Borda antes da secagem	Borda após secagem	Nº de Golpes C4
31,95	5,24	3,45	18
25,82	4,96	3,51	47
32,14	3,96	2,71	29

Tabela 13: Valores de número de golpes e porcentagem de absorção de água para determinação do limite de liquidez das amostras (Os valores são mostrados na seqüência em que foram obtidos).

Nº de Golpes C1	% de Absorção de Água
6	50,92
73	36,75
36	37,89
28	40,31
18	38,36
Nº de Golpes C2	
9	31,14
45	40,74
29	42,09
Nº de Golpes C3	
13	50,00
42	40,00
Nº de Golpes C4	
18	51,88
47	41,31
29	46,13

Os ensaios para cada amostra não aparecem em um mesmo número, pois em alguns foi necessário repetir mais de uma vez o ensaio para ficar na margem entre 10 e 50 golpes ou por ter havido a necessidade de eliminar valores por erros ocorridos durante a captação dos mesmos. Os valores de limite de liquidez encontrados para as amostras C1, C2, C3 e C4 foram respectivamente 41,42,44 e 47.

O valor da porcentagem de umidade é calculado através da fórmula:

$$\% \text{ de umidade} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{Massa seca}} \times 100$$

O índice de plasticidade é definido como o intervalo de umidade para o qual o material apresenta plasticidade, sendo calculado através da fórmula:

$$\text{Índice de Plasticidade} = \% \text{ de umidade a 25 golpes} - \% \text{ de umidade a esfarelamento}$$

Os valores encontrados para as amostras foram: 13 para C1; 13 para C2; 14 para C3 e 15 para C4. A classificação da argila quanto ao índice de plasticidade é o seguinte:

Tabela 14: Valores de Índice de Plasticidade e classificação de argilas segundo o mesmo.

Argilas	Índice de Plasticidade
Excessivamente plástica	19 a 25
Excelente	17 a 18
Boa	15 a 16
Regular	13 a 14
Fraca	11 a 12
Material de capa	5 a 10

Portanto as amostras C1, C2 e C3 têm plasticidade regular enquanto a C4 tem boa plasticidade.

7-ANÁLISES APÓS AS QUEIMAS

As queimas foram realizadas em duas temperaturas 900°C e 1100°C. Para cada uma dessas temperaturas foram realizados ensaios de caracterização. Em virtude de alguns dos resultados obtidos, algumas das análises subseqüentes a esses ensaios foram feitas apenas para os corpos de prova queimados a 1100°C, como será discutido mais adiante.

7.1-PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após a realização dos ensaios com o material *in natura*, partiu-se para a preparação dos corpos de prova (CPs) para a realização dos ensaios tecnológicos. Esta preparação é descrita a seguir:

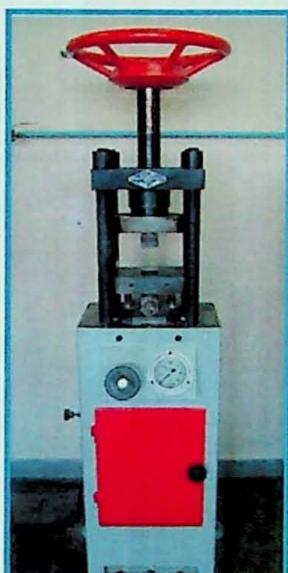


Figura 26: Prensa onde foram preparados os corpos de prova.

O material ainda *in natura* foi passado por uma peneira ABNT 50, para promover sua desagregação. Depois disso foi homogeneizado e umidificado. Com um spray foi aspergida água correspondente a 6% em peso da amostra. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, e após aproximadamente duas semanas realizou-se a prensagem do material para constituição dos corpos de prova (figura 26). Os corpos de prova foram então pesados e medidos com a ajuda de um paquímetro, nos três eixos (espessura, largura e comprimento) secados a 110°C e separados em dois grupos diferentes, segundo a temperatura na qual seriam queimados (900°C e 1100°C) durante 8 horas.

O próximo passo foi encaminhar as amostras para as queimas nas temperaturas de 900°C e 1100°C. Os corpos de prova foram identificados segundo a amostra que lhes deu origem (C1, C2, C3, C4) e com um número próprio. A partir dessas queimas foi possível descrever as propriedades do material que se seguem.

A seguir são apresentadas as tabelas 15, 16, 17, 18 e 19 com os valores dos eixos medidos dos corpos de prova, suas massas e as respectivas variações das mesmas segundo a temperatura de queima.

Tabela 15: Massas dos CPs crus e depois das queimadas.

Pessagem (g)	Cru	900°C		1100°C		Diferença 900°C		Diferença 1100°C		Cru	900°C		1100°C		Diferença 900°C		Diferença 1100°C	
		C1	C1	C1	C1	%	C1	%	C2	C2	%	C2	%	C2	%	C2	%	
Nº do Corpo de Prova																		
19	48,83	48,83	48,83	48,83	48,83	1	1	1	1	46,11	46,11	46,11	46,11	46,11	46,11	46,11	46,11	46,11
20	48,67	40,96	40,96	40,96	40,96	7,71	15,84	15,84	15,84	44,53	44,53	44,53	44,53	44,53	44,53	44,53	44,53	44,53
21	49,10	41,35	41,35	41,35	41,35	7,75	15,78	15,78	15,78	44,10	44,10	44,10	44,10	44,10	44,10	44,10	44,10	44,10
22	49,66	41,73	41,73	41,73	41,73	7,93	15,97	15,97	15,97	45,90	38,15	38,15	38,15	38,15	38,15	38,15	38,15	38,15
23	50,50	42,39	42,39	42,39	42,39	8,11	16,06	16,06	16,06	47,90	39,71	39,71	39,71	39,71	39,71	39,71	39,71	39,71
24	46,16	38,72	38,72	38,72	38,72	7,44	16,12	16,12	16,12	47,31	39,11	39,11	39,11	39,11	39,11	39,11	39,11	39,11
25	51,93	43,60	43,60	43,60	43,60	8,33	16,04	16,04	16,04	47,69	39,41	39,41	39,41	39,41	39,41	39,41	39,41	39,41
26	50,00	41,95	41,95	41,95	41,95	8,05	16,10	16,10	16,10	45,12	37,30	37,30	37,30	37,30	37,30	37,30	37,30	37,30
27	50,08	42,14	42,14	42,14	42,14	7,94	15,85	15,85	15,85	48,62	40,30	40,30	40,30	40,30	40,30	40,30	40,30	40,30
28	50,13	42,17	42,17	42,17	42,17	7,96	15,88	15,88	15,88	46,33	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48	38,48
29	50,52	42,46	42,46	42,46	42,46	8,06	15,95	15,95	15,95	51,64	42,61	42,61	42,61	42,61	42,61	42,61	42,61	42,61
30	49,95	42,05	42,05	42,05	42,05	7,90	15,82	15,82	15,82	48,80	40,42	40,42	40,42	40,42	40,42	40,42	40,42	40,42
31	48,64	40,96	40,96	40,96	40,96	7,68	15,79	15,79	15,79	49,49	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02	41,02
32	51,75	43,55	43,55	43,55	43,55	8,20	15,85	15,85	15,85	48,20	39,94	39,94	39,94	39,94	39,94	39,94	39,94	39,94
33	51,49	43,26	43,26	43,26	43,26	8,23	15,98	15,98	15,98	47,54	39,26	39,26	39,26	39,26	39,26	39,26	39,26	39,26
34	51,31	43,07	43,07	43,07	43,07	8,24	16,06	16,06	16,06	49,85	41,34	41,34	41,34	41,34	41,34	41,34	41,34	41,34
35	51,65	43,37	43,37	43,37	43,37	8,28	16,03	16,03	16,03	48,75	40,45	40,45	40,45	40,45	40,45	40,45	40,45	40,45
36	46,25	38,75	38,75	38,75	38,75	7,50	16,22	16,22	16,22	48,08	39,88	39,88	39,88	39,88	39,88	39,88	39,88	39,88
37	51,04	42,78	42,78	42,78	42,78	8,26	16,18	16,18	16,18	47,73	39,64	39,64	39,64	39,64	39,64	39,64	39,64	39,64
38	47,58	40,01	40,01	40,01	40,01	7,57	15,91	15,91	15,91	46,85	38,75	38,75	38,75	38,75	38,75	38,75	38,75	38,75
39	45,92	38,61	38,61	38,61	38,61	7,31	15,92	15,92	15,92	46,67	38,93	38,93	38,93	38,93	38,93	38,93	38,93	38,93
40	47,47	39,95	39,95	39,95	39,95	7,52	15,84	15,84	15,84	47,58	39,40	39,40	39,40	39,40	39,40	39,40	39,40	39,40
41	48,01	40,49	40,49	40,49	40,49	7,52	15,66	15,66	15,66	38,41	32,10	32,10	32,10	32,10	32,10	32,10	32,10	32,10
Médias	49,42					7,98	15,90	15,90	15,90	47,10	32,10	32,10	32,10	32,10	32,10	32,10	32,10	32,10
Desvio Padrão						0,20	0,10	0,10	0,10	0,40	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17

Tabela 15: Massas dos CPs crus e depois das queimas (continuação)

Pesagem Nº do Corpo de Prova	Cru	900°C		1100°C		Diferença 900°C		Cru		900°C		1100°C		Diferença 900°C		Diferença 1100°C	
		C3 III	C3 III	C3 III	%	C3 III	%	C4 IV	%	C4 IV	%	C4 IV	%	C4 IV	%	C4 IV	%
19	43,24	35,70	35,70	7,54	17,44	48,58										8,21	16,87
20	42,20	34,93	34,93	7,27	17,23	48,67										8,55	17,07
21	44,30	36,70	36,70	7,60	17,16	50,10										8,28	17,40
22	42,15	34,88	34,88	7,27	17,25	47,59										8,41	17,56
23	44,93	37,17	37,17	7,76	17,27	47,89										8,68	17,64
24	44,35	36,70	36,70	7,65	17,25	49,21										8,45	17,58
25	44,86	37,07	37,07	7,79	17,37	48,06										7,62	16,58
26	41,22	34,22	34,22	7,00	16,98	45,96										7,95	16,90
27	43,30	35,84	35,84	7,46	17,23	47,04										8,71	17,13
28	44,24	37,22	37,22	7,02	15,87	50,86										8,84	17,11
29	42,40	35,27	35,27	7,13	16,82	51,68										8,13	16,96
30	43,96	36,49	36,49	7,47	16,99	47,93										8,00	16,91
31	44,23	36,73	36,73	7,50	16,96	47,31											
32	42,73	35,48	35,48	7,25	16,97	48,55											
33	-	-	-	-	-	49,37										8,41	17,03
34	45,20	37,53	37,53	7,67	16,97	48,62										8,31	17,09
35	41,69	34,61	34,61	7,08	16,98	49,65										8,38	16,88
36	43,35	35,95	35,95	7,40	17,07	48,65										8,28	17,02
37	42,31	36,10	36,10	7,21	17,04	49,33										8,28	16,78
38	41,17	34,21	34,21	6,96	16,91	51,60										8,76	17,01
39	42,18	34,96	34,96	7,22	17,12	52,16										8,77	16,81
40						51,43										8,61	16,74
41						48,91										8,09	16,54
Médias	43,20			7,27	16,97	7,46										8,40	16,86
Desvio Padrão				0,24	0,07	0,25										0,24	0,18
						0,45										0,36	0,33

Tabela 16: Dimensões C1.

Nº do Corpo de Prova	Antes da Queima (Cru)			Queima a 900°C			Queima a 1100°C			Nº do Corpo de Prova	Diferença a 900°C		Diferença a 1100°C	
	Essepsura	Largura	Comprimento	Essepsura	Largura	Comprimento	Essepsura	Largura	Comprimento	Comprimento	%	Comprimento	%	
20	5,20	50,60	101,20	5,15	50,45	100,50				20	0,70	0,69		
21	5,60	50,80	101,10	5,45	50,45	100,50				21	0,60	0,59		
22	5,90	50,70	101,00	5,70	50,40	100,45				22	0,55	0,54		
23	5,70	50,50	100,90	5,50	50,35	100,50				23	0,40	0,40		
24	4,90	50,80	101,20				5,10	49,85	99,05	24		2,15	2,12	
25	5,90	50,60	101,20				5,50	49,85	99,10	25		2,10	2,08	
26	5,70	50,90	101,30	5,40	50,35	100,50	5,40	49,85	99,20	26		2,10	2,07	
27	5,70	50,70	100,90							27		0,40		
28	5,60	50,90	101,00	5,55	50,40	100,50				28	0,59	0,59		
29	5,60	50,70	100,90	5,70	50,60	100,50				29	0,40	0,40		
30	5,70	50,10	100,90	5,55	50,35	100,50				30	0,40	0,40		
31	5,70	50,60	100,90	5,30	50,40	100,55				31	0,35	0,35		
32	5,80	50,90	101,20	5,90	50,30	100,55				32	0,65	0,64		
33	5,90	50,70	100,90	6,00	50,45	100,50				33	0,40	0,40		
34	5,90	50,70	100,90	5,55	50,50	100,50	5,75	50,00	99,05	34	0,40	0,40		
35	5,80	50,80	100,90							35		1,25		
36	5,30	50,60	100,90				5,10	50,00	99,00	36		1,30		
37	5,70	50,70	100,90				5,50	50,00	99,45	37		1,45		
38	5,50	50,50	100,90				5,15	50,00	99,45	38		1,45		
39	5,10	50,60	100,90				4,90	49,80	99,45	39		1,45		
40	5,20	50,90	100,90				4,25	49,75	99,30	40		1,60		
41	5,50	50,90	101,20				5,20	49,75	99,30	41		1,90		
									Médias		0,48	0,47	1,68	
									Desvio Padrão		0,12	0,12	0,35	
													0,35	

Tabela 17: Dimensões C2.

Nº do Corpo de Prova	Antes da Queima (Cru)				Queima a 900°C				Queima a 1100°C				Nº do Corpo de Prova	Diferença a 900°C	Diferença a 1100°C			
	C2 mm		II		C2		II		C2		II							
	Espessura	Largura	Comprimento	Espessura	Largura	Comprimento	Espessura	Largura	Comprimento	Espessura	Largura	Comprimento						
21	5,00	50,50	100,70	5,30	50,40	100,25	5,05	49,65	98,95	5,50	50,50	98,95	21	1,75	1,74			
22	5,25	50,50	100,75	5,30	50,40	100,25	5,50	49,70	99,25	5,20	50,50	99,30	22	0,50	1,49			
23	5,30	50,70	100,75				5,20	49,70	99,30	5,20	50,50	99,05	23	1,20	1,19			
24	5,10	50,55	100,50				5,20	49,75	99,05	5,20	50,50	99,05	24	1,75	1,74			
25	5,10	50,50	100,80				5,00	49,70	99,00	5,00	50,50	99,00	25	1,90	1,88			
26	4,85	50,55	100,90	5,85	50,30	100,25	5,00	49,70	99,00	5,00	50,50	99,00	26	0,50	0,50			
27	5,30	50,50	100,75	5,60	50,25	100,55	5,70	49,65	98,85	5,70	50,50	98,85	27	0,25	0,25			
28	5,35	50,50	100,80	5,60	50,25	100,55							28	2,10	2,08			
29	5,95	50,60	100,95										29	0,50	0,50			
30	5,45	50,55	100,90	5,70	50,25	100,40							30	0,35	0,35			
31	5,40	50,30	100,65	5,55	50,25	100,30							31	0,35	0,35			
32	5,25	50,70	100,90	5,60	50,30	100,35							32	0,55	0,55			
33	5,85	50,50	100,95				5,30	49,75	99,15				33	1,80	1,78			
34	5,65	50,60	100,85	5,60	50,35	100,55							34	0,30	0,30			
35	5,45	50,60	100,90	5,60	50,30	100,30							35	0,60	0,59			
36	5,50	50,60	100,80	5,60	50,30	100,30							36	0,50	0,50			
37	5,15	50,10	100,50	5,50	50,25	100,30							37	0,20	0,20			
38	5,25	50,25	100,70				5,25	49,70	98,90				38	1,80	1,79			
39	5,35	50,60	100,95	5,50	50,30	100,35							39	0,60	0,59			
40	5,35	50,40	100,80				5,60	49,70	99,35				40	1,45	1,44			
41	4,10	50,50	100,70				4,55	49,70	99,35				41	1,55	1,54			
												Média	0,44	0,44	1,66			
												Desvio Padrão	0,14	0,14	0,28			
													0,27					

Tabela 18: Dimensões C3

Nº do Corpo da Prova	Antes da Queima (C3u)			Queima a 900°C			Queima a 1100°C			Nº do Corpo de Prova	Diferença a 900°C	Diferença a 1100°C
	C3 mm			C3 mm			C3 mm					
	III	III	III	III	III	III	Largura	Comprimento	Espessura	Largura	Comprimento	Comprimento
19	5,00	50,60	100,75	4,85	49,90	99,45	19	1,30	1,29			
20	4,60	50,55	100,80	4,65	49,90	99,50	20	1,30	1,29			
21	5,00	50,50	100,85	4,90	49,80	99,25	21	1,60	1,59			
22	4,70	50,50	100,70	4,60	49,45	99,10	22	1,60	1,59			
23	5,00	50,50	100,70	4,90	49,90	99,30	23	1,40	1,39			
24	5,00	50,50	100,75	4,90	49,40	99,05	24	1,70	1,69			
25	5,10	50,50	100,75	4,85	49,45	98,10	25	1,65	1,64			
26	4,70	50,60	100,80	4,60	50,25	100,25	26	0,55	0,55			
27	4,60	50,50	100,80	5,05	49,50	99,05	27	1,75	1,74			
28	4,90	50,50	100,75	5,00	49,55	99,15	28	1,60	1,59			
29	4,80	50,55	100,90	4,90	50,30	100,20	29	0,70	0,69			
30	5,10	50,50	100,80	5,05	50,20	100,05	30	0,75	0,74			
31	5,00	50,45	100,75	5,05	50,25	100,25	31	0,50	0,50			
32	4,80	50,50	100,75	4,95	50,25	100,25	32	0,50	0,50			
33							33					
34	5,15	50,50	100,75	5,20	50,25	100,20	34	0,55	0,55			
35	4,70	50,60	100,75	4,75	50,25	100,20	35	0,55	0,55			
36	5,00	50,50	100,75	4,70	50,25	100,20	36	0,55	0,55			
37	4,90	50,50	100,85	4,90	50,25	100,15	37	0,70	0,69			
38	4,80	50,55	100,85	4,70	50,20	100,30	38	0,55	0,55			
39	4,30	50,50	100,65				39	0,13	0,13			
									</			

Tabela 19: Dimensões C4.

Antes da Queima (Cm)		Queima a 800°C				Queima a 900°C				Queima a 1100°C				Diferença a 1100°C	
Nº do Corpo de Prova	C4 mm	IV	Largura	Comprimento	IV	Espessura	Largura	Comprimento	IV	Espessura	Largura	Comprimento	IV	Comprimento	Comprimento
20	5,80	50,80	101,00						5,35	49,75	99,10			1,90	1,88
21	6,20	50,60	100,90						5,55	49,70	99,10			1,80	1,78
22	5,50	50,60	101,00						5,25	49,85	99,10			1,90	1,88
23	5,50	50,50	101,10						5,35	49,70	99,15			1,95	1,93
24	5,50	50,70	100,90						5,25	49,70	99,20			1,70	1,68
25	5,30	50,70	100,80						5,25	49,70	99,30			1,50	1,49
26	5,50	50,70	100,90						5,25	49,70	99,30			1,75	1,73
27	5,70	50,70	101,00						5,15	49,85	99,05			1,95	1,93
28	6,00	50,65	100,90						5,70	49,85	99,30			1,60	1,59
29	5,10	50,50	100,90						5,80	49,70	99,05			1,45	1,83
30	5,20	50,60	101,00						5,40	49,70	99,10			1,90	1,88
31	5,50	50,50	100,80						5,30	49,75	99,00			1,80	1,79
32	5,30	50,60	101,00						5,20	50,25	100,25			0,75	0,74
33	5,50	50,70	100,90						50,35	100,35				33	0,55
34	5,30	50,60	100,90						5,30	50,30	100,40			34	0,50
35	5,40	50,60	100,90						5,40	50,35	100,35			35	0,55
36	5,55	50,55	100,80						5,55	50,30	100,40			36	0,40
37	5,40	50,60	100,90						5,55	50,30	100,30			37	0,60
38	5,75	50,60	100,90						5,80	50,35	100,50			38	0,40
39	5,90	50,65	100,90						5,95	50,35	100,50			39	0,40
40	5,80	50,90	100,80						5,80	50,35	100,45			40	0,35
41	5,80	50,70	101,00						5,75	50,40	100,45			41	0,55

A cor de queima é um critério importante a se considerar para indicar a aplicação industrial de uma argila. As amostras queimadas a 900° C ficaram com um tom rosa claro e as queimadas a 1100° C ficaram com um tom de rosa ainda mais claro (rosa esbranquiçado).

7.2-RETRAÇÃO LINEAR

A retração linear, outro critério de classificação das argilas, é calculada através da fórmula (Santos, P. S.):

$$\text{Retração linear} = \frac{\text{Comprimento inicial} - \text{comprimento após a queima}}{\text{comprimento inicial}} \times 100$$

Tabela 20: Médias de retração linear para as quatro amostras e duas temperaturas de queima.

Amostras	Média da Retração a 900°C	Média da Retração a 1100°C
C1	0,47	1,66
C2	0,44	1,65
C3	0,59	1,39
C4	0,50	1,78

7.3-ABSORÇÃO DE ÁGUA

O procedimento para realização deste ensaio foi o seguinte (Gava, M.; Nunes, J. J.; Chiusano):

- Pesaram-se os corpos de prova secos com precisão de 0,01 g (massa seca);
- Imergiram-se os corpos de prova em água em um recipiente de alumínio ou vidro;
- Aqueceu-se em bico de Mecker e ferveu-se por 2 horas;
- Foram resfriados até a temperatura ambiente;
- Retirou-se o excesso de água com um pano úmido e então os corpos de prova foram pesados novamente (massa úmida).

O cálculo foi realizado através da fórmula:

$$\% \text{ de Absorção de água} = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{Massa seca}} \times 100$$

Os dados obtidos são os que se seguem:

Tabela 21: Valores para a massa seca para as quatro amostras e duas temperaturas de queima.

Massa Seca (g)								
C1		C2		C3		C4		
Nº CP 900°C	Massa	Nº CP 900°C	Massa	Nº CP 900°C	Massa	Nº CP 900°C	Massa	
20	20,020	21	20,860	32	16,920	34	18,930	
21	18,350	22	16,860	34	18,430	35	16,960	
28	19,330	32	19,300	35	15,950	36	18,240	
31	21,080	34	20,510	37	14,980	37	19,440	
Nº CP 1100°C		Nº CP 1100°C		Nº CP 1100°C		Nº CP 1100°C		
25	22,850	29	22,250	25	17,250	22	21,010	
26	21,090	33	18,920	27	18,230	23	19,660	
35	21,280	38	18,830	28	19,990	24	21,130	
36	18,740	40	20,300	39	17,040	29	23,690	

Tabela 22: Valores para a massa úmida para as quatro amostras e duas temperaturas de queima.

Massa Úmida (g)								
C1		C2		C3		C4		
Nº CP 900°C	Massa	Nº CP 900°C	Massa	Nº CP 900°C	Massa	Nº CP 900°C	Massa	
20	24,500	21	26,790	32	21,920	34	23,650	
21	22,550	22	26,790	34	23,040	35	21,940	
28	24,200	32	25,000	35	20,330	36	22,820	
31	26,060	34	25,960	37	19,020	37	24,760	
Nº CP 1100°C		Nº CP 1100°C		Nº CP 1100°C		Nº CP 1100°C		
25	27,760	29	27,500	25	21,200	22	25,840	
26	25,290	33	23,420	27	22,410	23	24,420	
35	26,080	38	23,590	28	24,670	24	26,070	
36	23,300	40	25,920	39	20,930	29	29,090	

Tabela 23: Valores para a porcentagem de absorção de água para as quatro amostras e duas temperaturas de queima.

900°C							
C1	%	C2	%	C3	%	C4	%
20	22,38	21	28,43	32	29,55	34	24,93
21	22,89	22	58,90	34	25,01	35	29,36
28	25,19	32	29,53	35	27,46	36	25,11
31	23,62	34	26,57	37	26,97	37	27,37
Média	23,52		35,86		27,25		26,69
1100°C							
C1		C2		C3		C4	
25	21,49	29	23,60	25	22,90	22	22,99
26	19,91	33	23,78	27	22,93	23	24,21
35	22,56	38	25,28	28	23,41	24	23,38
36	24,33	40	27,68	39	22,83	29	22,79
Média	22,07		25,09		23,02		23,34

7.4-TRF (TENSÃO DE RUPTURA À FLEXÃO)

O ensaio realizado para determinar a resistência dos corpos de prova foi o TRF (Tensão de Ruptura à Flexão) e o equipamento utilizado foi um deflectômetro (Máquina Universal de Ensaios, marca Emic, figura 27), com distância de cutelos de 35 mm. O ensaio foi realizado para os corpos de prova queimados nas duas temperaturas (Gava, M.; Nunes, J. J.; Santos, R.S.).

O cálculo do TRF é feito a partir da fórmula:

$$\text{TRF} = \frac{3 \times \text{carga de ruptura} \times \text{distância de cutelos}}{2 \times \text{espessura}^2 \times \text{largura}} = \text{Kgf/cm}^2$$

Com as medidas de espessura, largura e distância de cutelos em centímetros e a de carga de ruptura em Kgf. A seguir é apresentada a tabela 23 com os valores medidos para o cálculo da TRF:

Tabela 24: Resultados TRF.

Nº do Corpo de Prova	TRF	900°C		1100°C		TRF (Kg/cm²)		TRF (MPa)		900°C		1100°C		TRF (Kg/cm²)		TRF (MPa)		900°C		1100°C	
		C1 (Kgf)		C1 (Kgf)		900°C		1100°C		C2 (Kgf)		C2 (Kgf)		900°C		1100°C		TRF (Kg/cm²)		TRF (MPa)	
		I	II	I	II	900°C	1100°C	900°C	1100°C	II	II	II	II	900°C	1100°C	900°C	1100°C	900°C	1100°C	900°C	1100°C
19																					
20	3,00			11,77	1,15																
21	3,00			10,51	1,03																
22	3,30			10,58	1,04																
23	2,90			10,00	0,98																
24		5,10				20,65		2,02													
25		6,60				22,98		2,25													
26		5,30				19,14		1,88													
27		3,70				13,23		1,30													
28		2,50				8,45		0,83													
29		2,70				8,62		0,84													
30		3,00				10,16		1,00													
31		2,90				10,75		1,05													
32		3,70				11,09		1,09													
33		3,40				9,83		0,96													
34		3,00				10,13		0,99													
35		4,10					13,02		1,28												
36		3,90					15,74		1,54												
37		5,30					18,40		1,80												
38		4,80					19,00		1,86												
39		4,10					17,97		1,76												
40		4,70					27,46		2,69												
41		4,20					16,39		1,61												
Medias		3,09				10,43		1,02		19,08		1,87		2,90		4,16		9,70		0,95	
Desvio Padrão		0,37				0,82		1,28		0,13		4,01		0,39		0,35		0,91		1,02	
																			2,53		0,25

Tabela 24: Resultados TRF (continuação).

Nº do Corpo de Prova	TRF 900°C C3 (Kgf)	1100°C C3 (Kgf)	TRF (Kg/cm ²) 900°C	TRF (MPa) 900°C	TRF (Kg/cm ²) 1100°C	TRF (MPa) 1100°C	900°C		1100°C		TRF (Kg/cm ²) 900°C	TRF (MPa) 900°C	TRF (Kg/cm ²) 1100°C	TRF (MPa) 1100°C
							C4 (Kgf)	IV	C4 (Kgf)	IV				
19	3.60	III			16.10	1.58								
20	3.40				16.54	1.62								
21	3.00				13.17	1.29								
22	3.60				19.07	1.87								
23	3.60				16.65	1.63								
24	5.20				23.02	2.26								
25	5.30				23.92	2.34								
26	2.50				12.34	1.21								
27	4.60				19.13	1.87								
28	4.10				17.38	1.70								
29	3.20				13.91	1.36								
30	2.80				11.48	1.13								
31	2.20				9.01	0.88								
32	2.50				10.66	1.04								
33	2.90													
34	2.50				9.66	0.95								
35	2.50				11.58	1.13								
36	2.30				10.88	1.07								
37	2.40				10.44	1.02								
38														
39														
40														
41														
Médias	2.58				11.11	1.09	18.09	1.77	3.95	6.22	2.23	2.23	2.23	2.23
Desvio Padrão	0.30				0.80	1.45	0.14	3.30	0.32	0.39	1.63	0.16	3.50	0.34

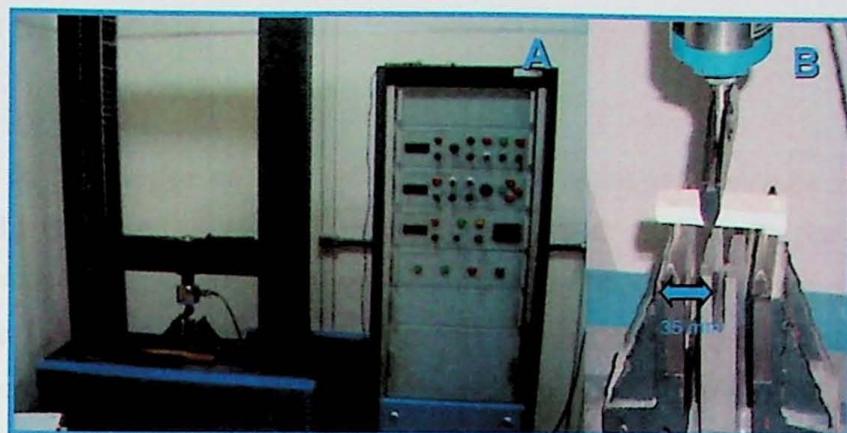


Figura 27: Máquina Universal de Ensaios (A), detalhe da realização do ensaio TRF (B).

Assim de acordo com a tabela 24, os valores médios para resistência dos corpos de prova das amostras C1, C2, C3 e C4, queimados a 900° C, são respectivamente 10,43 Kgf/cm² (1,02 MPa), 9,70 Kgf/cm² (0,95 MPa), 11,11 Kgf/cm² (1,09 MPa) e 14,41 Kgf/cm² (1,41 MPa).

Para os corpos queimados a 1100° C os valores médios para C1, C2, C3 e C4 são respectivamente 19,08 Kgf/cm² (1,87 MPa), 15,85 Kgf/cm² (1,55 MPa), 18,09 Kgf/cm² (1,77 MPa), 22,76 Kgf/cm² (2,23 MPa).

Em ambas as temperaturas de queima é possível observar que os valores de resistência para os corpos de prova oriundos da amostra C4 ficaram consideravelmente acima daqueles oriundos das outras amostras. A causa disso está possivelmente relacionada não só às próprias características intrínsecas às amostras, mas também como a diferenças durante a confecção dos corpos de prova, resultando em diferença representativa de massa ou de pressão utilizadas.

7.5-DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A seguir os resultados das difrações de raios-X realizadas para as amostras C1, C2, C3, e C4 (figuras 28 a 35) queimadas na temperatura de 1100° C. A opção por realizar as difrações novamente apenas para os corpos prova queimados a 1100° C se deve ao fato de que esses corpos de prova foram os que apresentaram maior resistência como observado na tabela 24, ainda que mesmo esses valores estejam bem aquém dos esperados. As amostras foram moídas em moinho de bolas por 10 minutos na velocidade 7 e então foram preparadas as pastilhas para análise por prensagem natural.

C1:

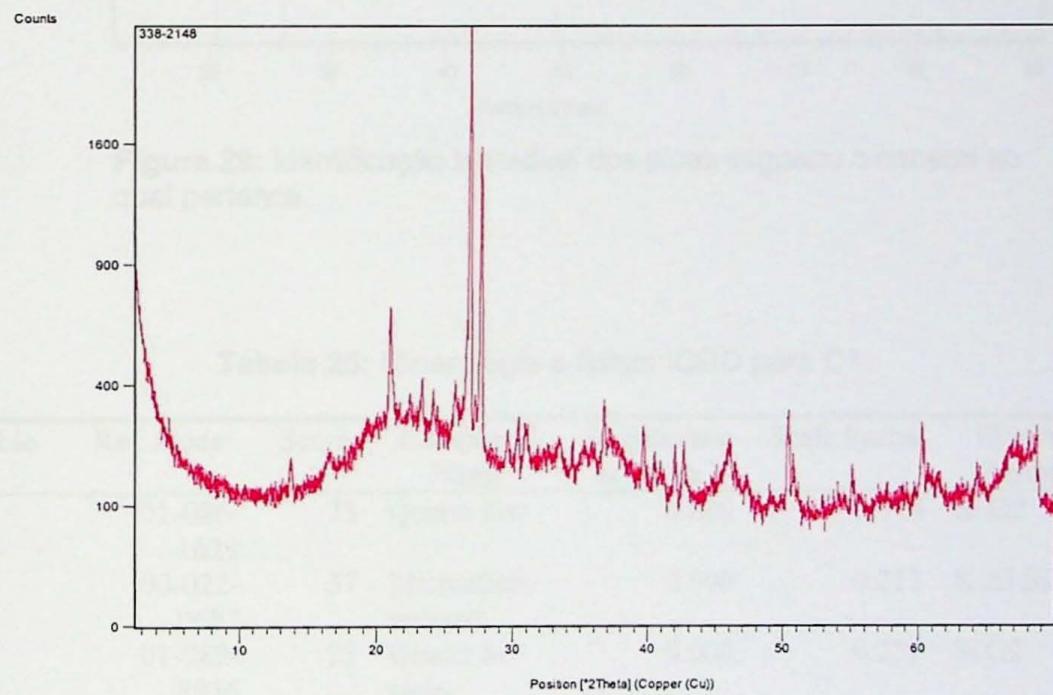


Figura 28: Difratograma C1.

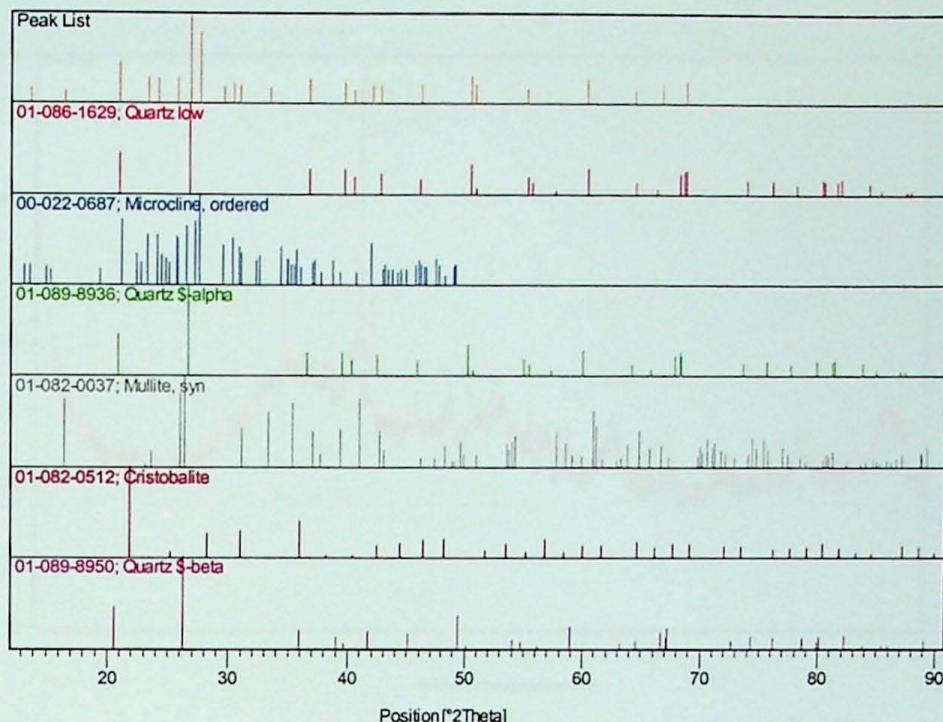


Figura 29: Identificação individual dos picos segundo o mineral ao qual pertence.

Tabela 25: Mineralogia e fichas ICDD para C1.

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
	01-086-1629	73	Quartz low	0.000	0.914	Si O ₂
	00-022-0687	37	Microcline, ordered	0.000	0.213	K Al Si ₃ O ₈
	01-089-8936	25	Quartz \$-alpha	0.000	0.231	Si O ₂
	01-082-0037	13	Mullite, syn	0.000	0.054	Al ₂ (Al _{2.5} Si _{1.5}) O _{9.75}
	01-082-0512	6	Cristobalite	0.000	0.023	Si O ₂
	01-089-8950	10	Quartz \$-beta	0.000	0.058	Si O ₂

C2:

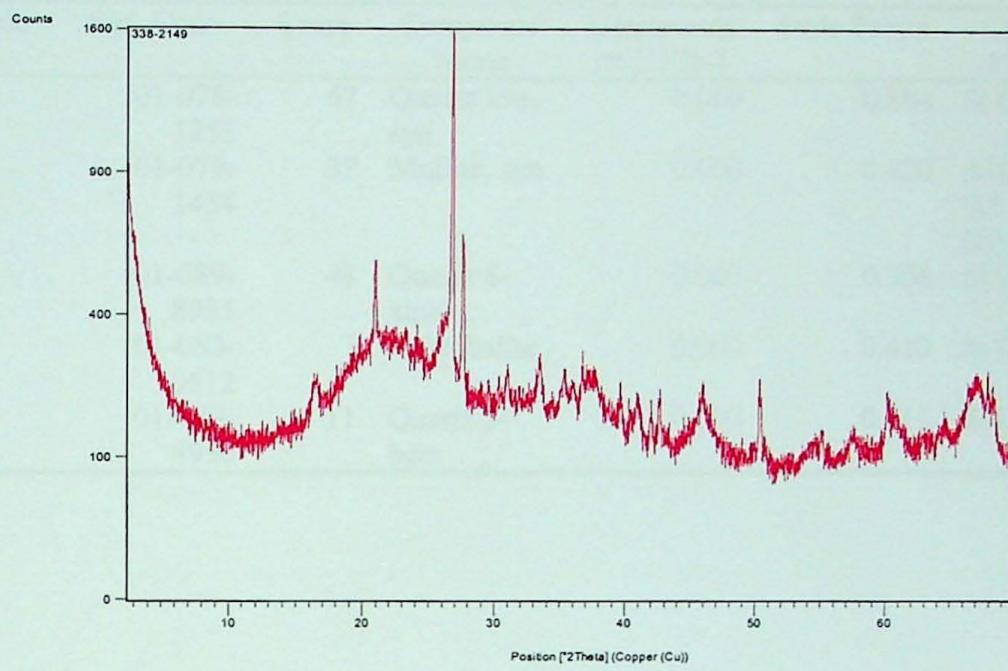


Figura 30: Difratograma C2.

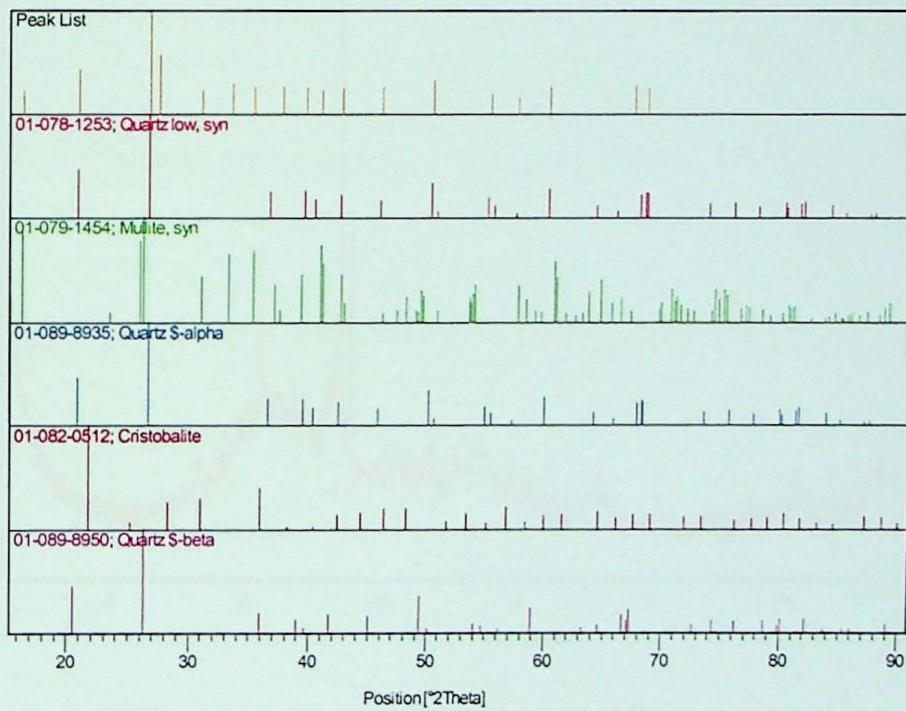


Figura 31: Identificação individual dos picos segundo o mineral ao qual pertence.

Tabela 26: Mineralogia e fichas ICDD para C2.

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-078-1253	67	Quartz low, syn	0.000	0.684	Si O ₂
*	01-079-1454	37	Mullite, syn	0.000	0.120	Al _{4.75} Si _{1.25} O _{9.63}
*	01-089-8935	48	Quartz \$-alpha	0.000	0.306	Si O ₂
*	01-082-0512	7	Cristobalite	0.000	0.410	Si O ₂
*	01-089-8950	11	Quartz \$-beta	0.000	0.111	Si O ₂

C3:

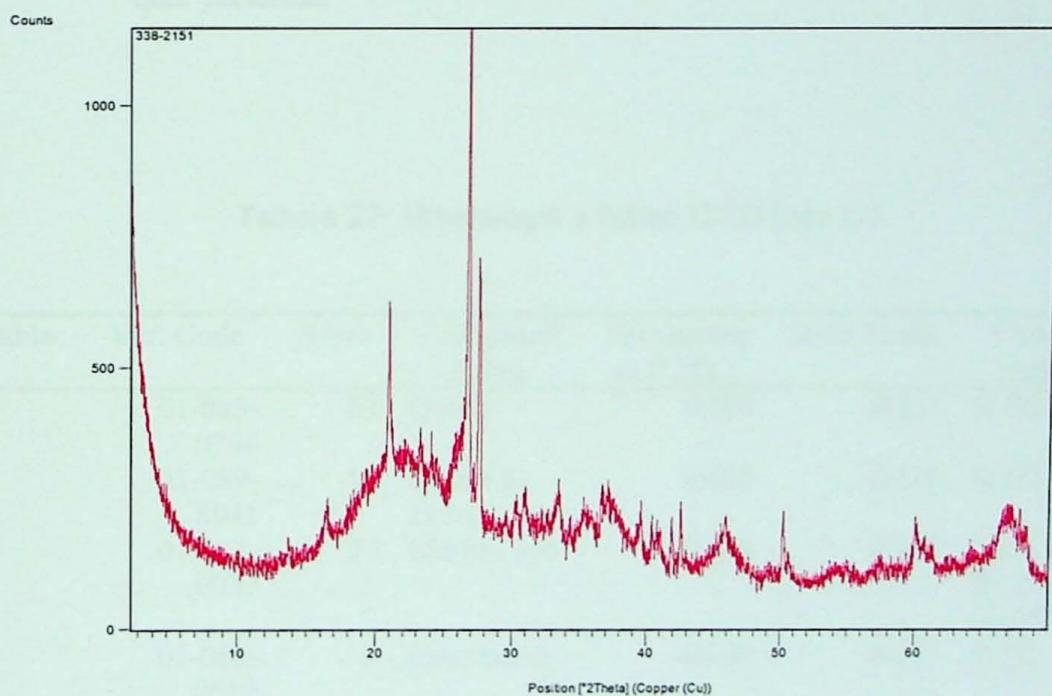


Figura 32: Difratograma C3.

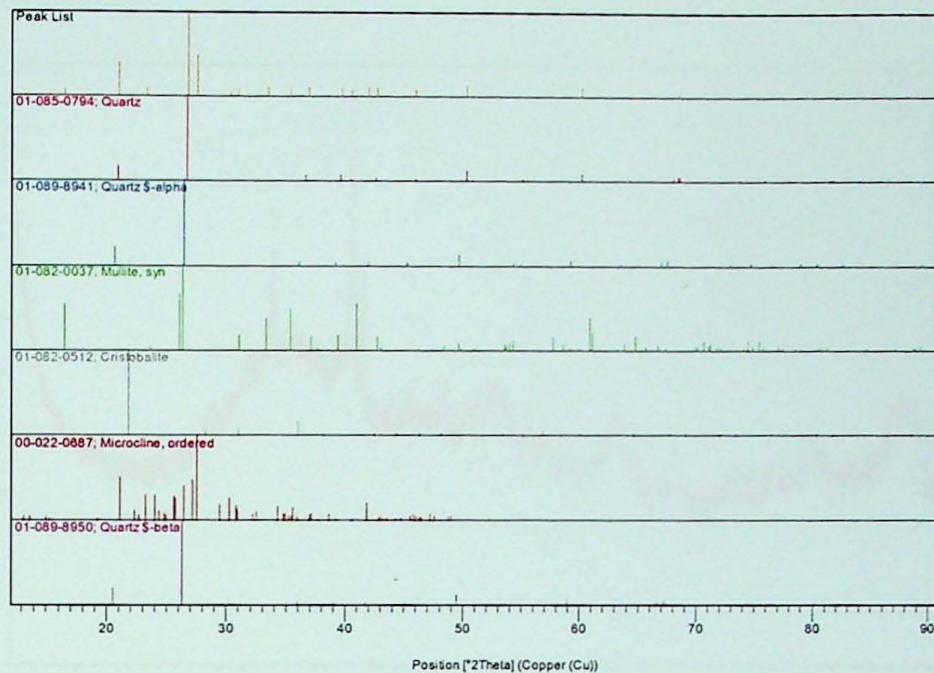


Figura 33: Identificação individual dos picos segundo o mineral ao qual pertence.

Tabela 27: Mineralogia e fichas ICCD para C3.

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-085-0794	63	Quartz	0.000	0.737	Si O ₂
*	01-089-8941	11	Quartz \$-alpha	0.000	0.116	Si O ₂
*	01-082-0037	27	Mullite, syn	0.000	0.163	Al ₂ (Al _{2.5} Si _{1.5}) O _{9.75}
*	01-082-0512	9	Cristobalite	0.000	0.095	Si O ₂
*	00-022-0687	30	Microcline, ordered	0.000	0.295	K Al Si ₃ O ₈
*	01-089-8950	10	Quartz \$-beta	0.000	0.171	Si O ₂

C4:

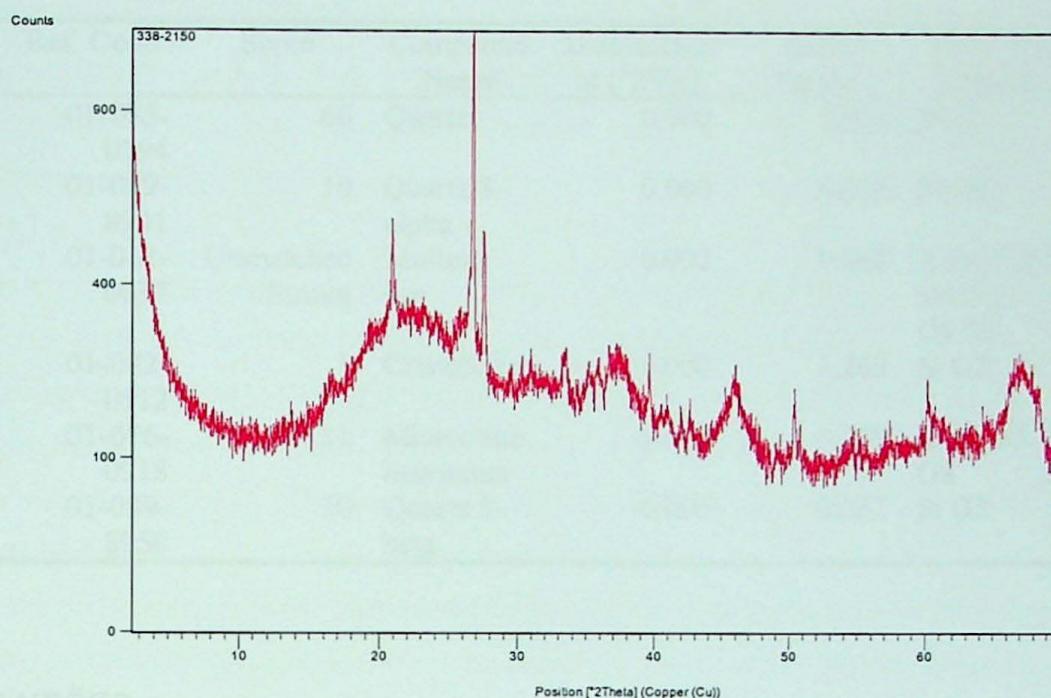


Figura 34: Difratograma C4.

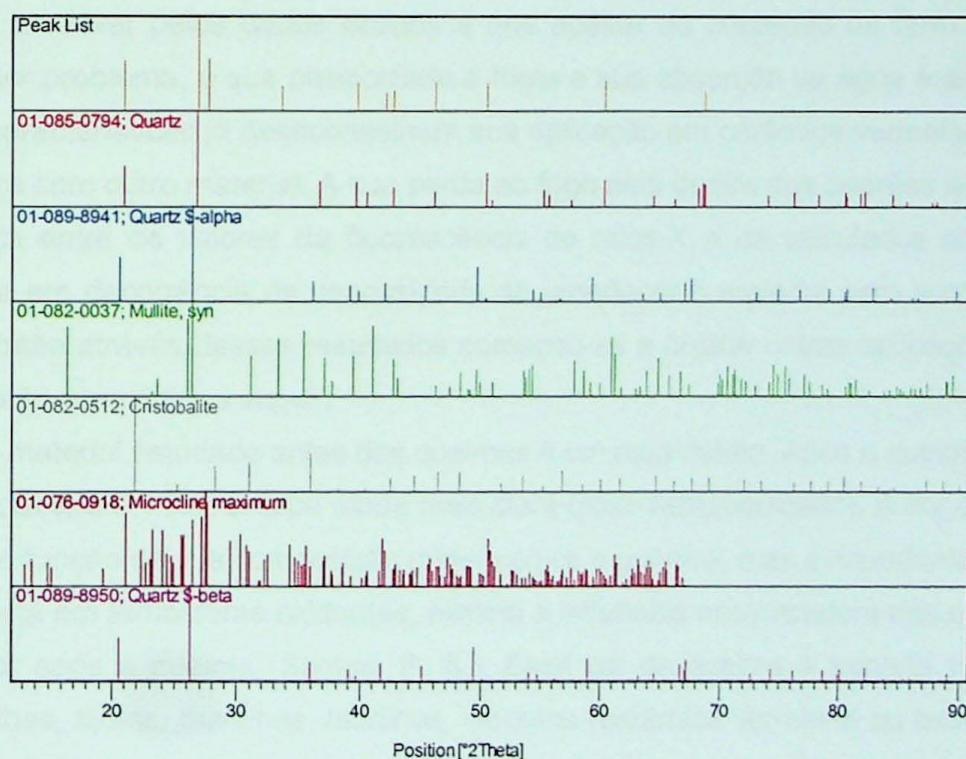


Figura 35: Identificação individual dos picos segundo o mineral ao qual pertence.

Tabela 28: Mineralogia e fichas ICDD para C4.

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [°2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	01-085-0794	66	Quartz	0.000	0.601	Si O ₂
*	01-089-8941	10	Quartz \$-alpha	0.000	0.075	Si O ₂
*	01-082-0037	Unmatched Strong	Mullite, syn	0.000	0.082	Al ₂ (Al _{2.5} Si _{1.5}) O _{9.75}
*	01-082-0512	1	Cristobalite	0.000	1.263	Si O ₂
*	01-076-0918	11	Microcline maximum	0.000	0.239	K Al Si ₃ O ₈
*	01-089-8950	10	Quartz \$-beta	0.000	0.087	Si O ₂

8-CONCLUSÕES

A priori os estudos da argila foram dirigidos a sua aplicação em cerâmica vermelha, mas o que se pode observar pelos dados obtidos é que apesar do conteúdo de ferro para essa aplicação não ser problema, a sua plasticidade é fraca e sua absorção de água é alta demais. Essas últimas características já desaconselham sua aplicação em cerâmica vermelha sem que haja uma mistura com outro material. A sua perda ao fogo está dentro dos padrões aceitáveis e mostra diferença entre os valores da fluorescência de raios-X e os calculados através dos corpos de prova em decorrência da necessidade de umedecer o material para a composição dos mesmos. Então através desses resultados começou-se a cogitar outras aplicações para o material, que serão discutidas a seguir.

A cor do material estudado antes das queimas é um rosa médio. Após a queima a 900°C tornou-se rosa claro, e a 1100°C ficou ainda mais clara (rosa esbranquiçado). A cor de queima de um material é função de sua composição mineralógica e química, mas é importante observar que a queima feita em atmosferas oxidantes, elimina a influência escurecedora das atmosferas redutoras na cor após a queima (Santos, P. S.). Essa cor de queima a tornaria viável para produção de telhas, tijolos, manilhas, ladrilhos, vidrados (cerâmica vermelha ou estrutural) ou refratários (ou refratários sílico-aluminosos (Santos, P. S)). Os corpos de prova na queima à temperatura mais baixa tiveram retração linear média de 0,5 %, e aqueles queimados à temperatura mais alta, a retração linear foi de 1,62 % em média.

De acordo com os dados apresentados na tabela 23, os valores obtidos para argila estudada, as encaixam na descrição de argilas plástico-refratárias, caulins e cerâmica vermelha (Santos, P. S) para valores de absorção de água para corpos de prova queimados a 900° C.

Na tabela 24 podem-se observar os valores médios de resistência encontrados a 900° C, que encaixam as amostras nas classificações de argilas plástico-refratárias ou caulins. Já para a queima a 1100° C, os valores as encaixam na classificação de argilas plástico-refratárias (Santos, P. S).

Os dados de análise química nos revelam que o conteúdo de ferro nas amostras gira em torno de 3%, o que é um valor alto demais para cerâmicas brancas, onde o conteúdo de ferro não deve ultrapassar 1%. O conteúdo de óxido de ferro também pode causar redução na refratariidade da argila. Porém para aplicação em cerâmica vermelha ou estrutural este conteúdo não é problema. Para essa aplicação os demais conteúdos de óxidos também não são problemáticos.

Para outras aplicações como refratários, poder-se-ia pensar em beneficiamento com a atuação de hidrociclones para baixar o conteúdo de sílica das amostras, atualmente em torno de 47%, e não apenas por essa razão, retirar sílica, mas também com o objetivo de aumentar proporcionalmente o conteúdo de alumina na amostra, atualmente em torno de 34%.

Quanto ao conteúdo de óxido de titânio, seu valor para as quatro amostras não chega a 0,5%, conteúdo este que não chega a alterar as propriedades tecnológicas do material.

Quanto aos conteúdos de MgO e CaO, que são fundentes e poderiam também reduzir a refratariidade do material, estes são respectivamente de 0,26% e 0,10% em média, estão dentro dos limites aceitáveis para utilização em refratários, assim como o conteúdo de CaO (0,1% apenas). Porém o conteúdo de K₂O (2,22% em média), ultrapassa o desejável para aplicação da argila em refratários, pois também trata-se de um fundente. A diferença tão grande entre os conteúdos de álcalis provavelmente devê-se ao fato de que os minerais micáceos (onde o óxido de potássio tem origem) são mais resistentes ao intemperismo. Após o peneiramento a úmido realizado era possível observar que os minerais micáceos seriam facilmente eliminados com a fração areia ainda existente na amostra, caso se pensasse realmente em se utilizar alguma forma de beneficiamento para o rejeito estudado.

Mesmo não sendo o foco do trabalho é possível concluir que apesar de o conteúdo de cobre não ser conhecido, onde MnO, já elimina a utilização do material na indústria das borrachas, pois ambos os óxidos têm ação deteriorante.

Os difratogramas realizados antes das queimas mostraram que as amostras são constituídas basicamente por quartzo, muscovita, caulinita, microclínio, gibbsita e montmorilonita. Após a queima a 1100° C, foi realizada novamente a difração de raios-X para as quatro amostras, pelo fato de os corpos de prova terem apresentado uma melhor resposta ao ensaio TRF nesta temperatura. Os minerais detectados foram: quartzo alfa e beta, microclínio, mulita e cristobalita. A presença de quartzo beta, mulita e cristobalita, indicam que de fato ocorreu sinterização nos corpos de prova, apesar de a temperatura de queima não ter sido suficiente para que essa sinterização ocorresse em uma proporção para formação de rede cristalina a ponto de aumentar os valores médios de resistência. Abaixo é apresentado um gráfico comparando os resultados obtidos (figura 36).

O que é possível afirmar é que a argila estudada merece estudos mais aprofundados a temperaturas mais altas, considerando ainda formas de beneficiamento e possíveis *blends*, que possam ser feitos aumentando ainda mais as suas chances de aplicação na indústria cerâmica.

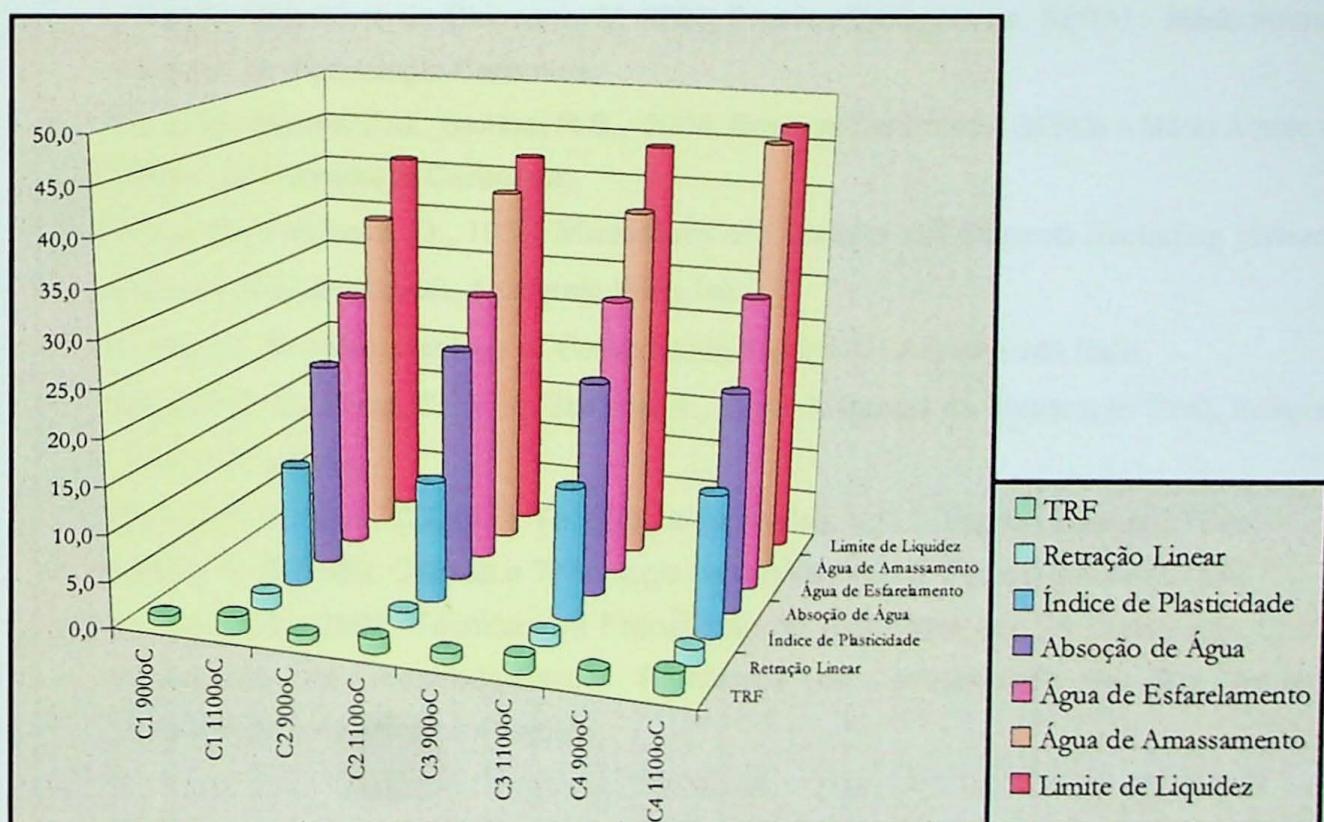


Figura 36: Gráfico de comparação entre os resultados obtidos, as amostras de origem e legenda.

9-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, S. L. M.; Luz, A. B.; Sampaio, J. A.; 2004. Tratamento de Minérios, CETEM – MCT, 4^a. edição revisada e ampliada;
- Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR-7217: Determinação da Composição Granulométrica, 2003;
- Associação Brasileira de Normas Técnicas; NBR:46: Determinação do material fino que passa através da peneira 75 µm, por lavagem, 2001;
- Cuchierato, G., 2000. Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo;
- Gava, M.; Nunes, J. J.; Chiusano, M. 2004. Ensaios Preliminares, SENAI – Mário Amato – Núcleo de Tecnologia Cerâmica.
- Gava, M.; Nunes, J. J.; Santos, R.S., 2004. Ensaios Cerâmicos, SENAI – Mário Amato – Núcleo de Tecnologia Cerâmica;
- Insley, H.; Fréchette, D., 1955. Microscopy of Ceramics and Cements (including glasses, slags and foundry sands), Academic Press Inc.;
- Prentice, J. E. 1990. Geology of Construction Materials, Chapman and Hall;
- Ribeiro, C. C.; Pinto, J. D. S.; Starling, T., 2002. Materiais de Construção Civil, Editora UFMG, 2^a. edição.
- Santos, P. S. 1989. Ciência e Tecnologia de Argilas, Vol. 1, Edgard Blücher LTDA;
- Santos, P. S. 1989. Ciência e Tecnologia de Argilas, Vol. 2, Edgard Blücher LTDA;
- Whitaker, W., 2001. Técnicas de Preparação de Areia para uso na Construção Civil. Dissertação de mestrado-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Minas e Petróleo.

