

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 Resultados dos ensaios de caracterização

Neste item são apresentados os resultados dos ensaios de caracterização realizados nas cinco amostras de argila, designadas AM e numeradas de 01 a 05. As amostras 01 a 03 constituem de rejeitos do processo de beneficiamento, As amostras 04 e 05 constituem o estéril separado mecanicamente no processo de extração seletiva realizada com retroescavadeira.

##### 4.1.1 Análise química por fluorescência de raios-X

Os resultados das análises químicas quantitativas realizadas pelo método de espectrometria de fluorescência de raios-X, estão apresentados, em % de óxidos, na Tabela 4.1.

A composição química das amostras reflete a natureza essencialmente argilosa dos minerais, com predominância de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Nota-se ainda uma semelhança muito grande quanto à composição química das amostras de rejeito, indicando a homogeneidade deste material ao longo do processo.

Outra característica é o baixo teor de carbonato observado nas amostras, refletindo nos valores baixos de perda ao fogo (PF).

A presença acentuada de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  em todas as amostras restringe a aplicação destes materiais à cerâmica vermelha, pelo fato de provocar a coloração avermelhada no produto cerâmico após queima.

Teores acima de 1% em  $\text{MgO}$ , como o encontrado na amostra AM05, pode

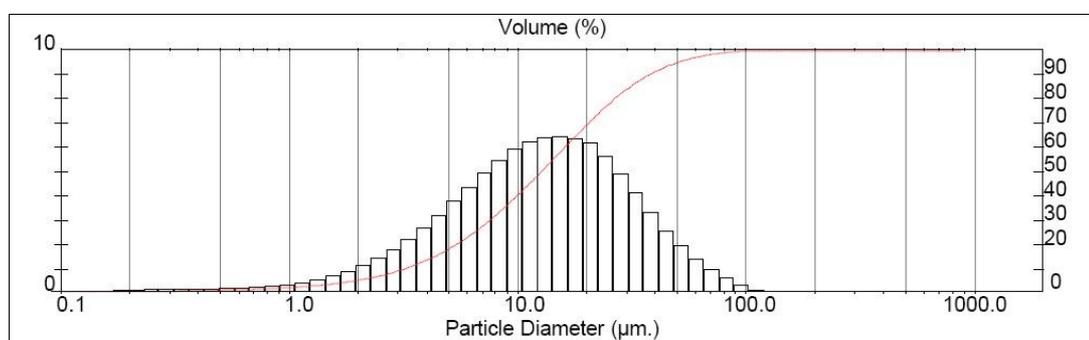
estar associado a traços de cloritas e vermiculitas (MACEDO, 2007).

**Tabela 4.1 – Análises químicas por espectrometria de raios-X das amostras, em % de óxidos.**

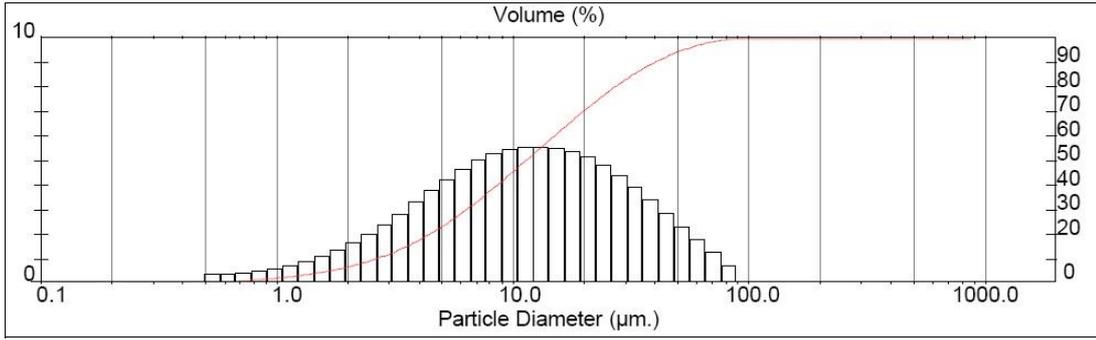
Óxidos	AMOSTRAS				
	AM01	AM02	AM03	AM04	AM05
<b>SiO<sub>2</sub></b>	55,4	51,3	56,5	62,2	68,1
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	23,6	22,1	22,5	20,6	14,4
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	8,05	12,8	7,47	6,63	6,36
<b>MnO</b>	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,29
<b>MgO</b>	0,56	0,81	0,63	0,51	1,38
<b>CaO</b>	0,13	0,26	0,15	<0,10	0,2
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,16	0,15	0,14	0,11	0,12
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2,74	2,28	2,57	1,86	1,95
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,77	0,75	0,81	1,14	0,86
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
<b>PF</b>	8,83	9,26	9,06	7,48	6,44

#### 4.1.2 Análise granulométrica por difração a laser

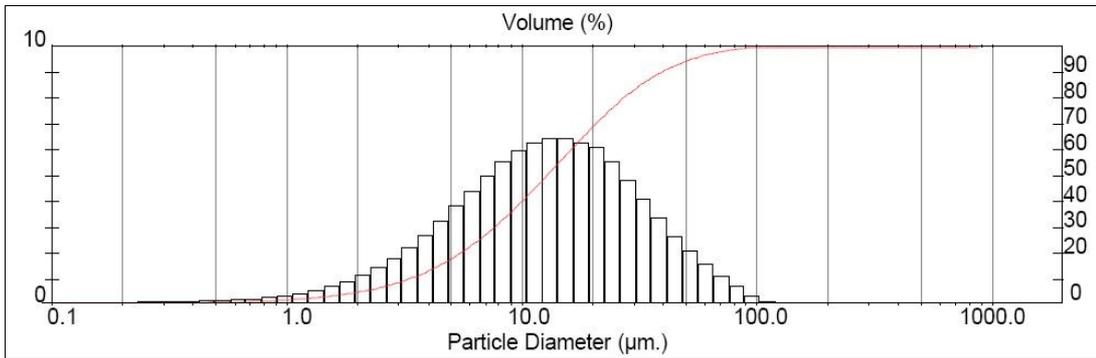
Os gráficos relativos à distribuição granulométrica das amostras estão apresentados nas Figuras 4.1 a 4.5.



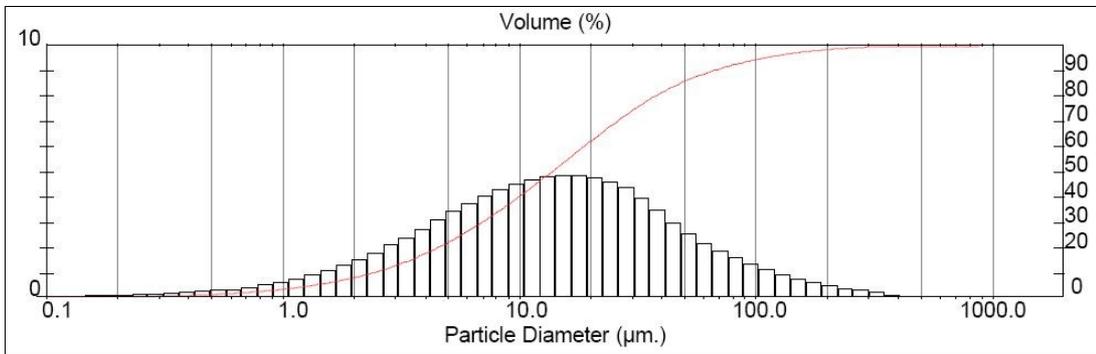
**Figura 4.1 – Distribuição granulométrica da amostra 01.**



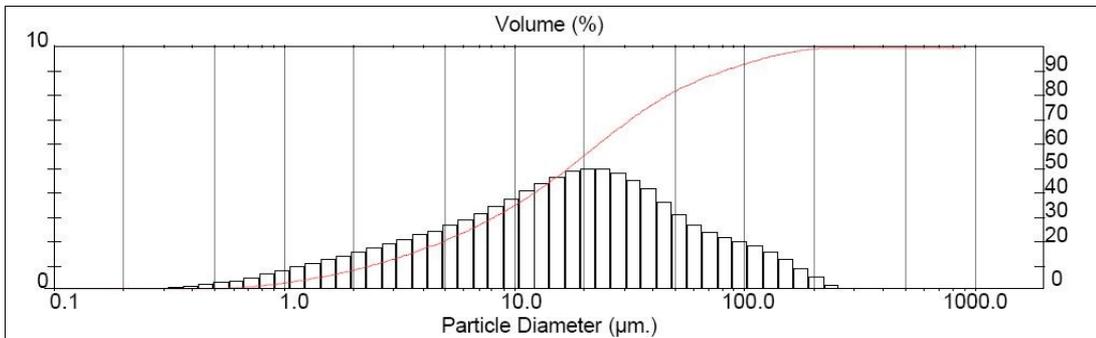
**Figura 4.2 – Distribuição granulométrica da amostra 02.**



**Figura 4.3 – Distribuição granulométrica da amostra 03.**



**Figura 4.4 – Distribuição granulométrica da amostra 04.**



**Figura 4.5 – Distribuição granulométrica da amostra 05.**

Na Tabela 4.2 estão apresentados os dados estatísticos referentes às distribuições granulométricas das amostras.

**Tabela 4.2 – Distribuição estatística da granulometria.**

AMOSTRA	Diâmetros Médios ( $\mu\text{m}$ )				Uniformidade ( $\times 10^{-1}$ )
	D[4,3]	D[v,0.1]	D[3,2]	D[V,0.5]	
AM01	17,49	3,19	5,16	12,67	8,684
AM02	16,89	2,63	5,86	11,32	9,996
AM03	17,75	3,31	5,72	12,73	8,772
AM04	27,72	2,36	4,39	13,62	0,159
AM05	30,69	2,35	5,91	16,99	0,139

Para produção de cerâmica vermelha a distribuição granulométrica é de fundamental importância para a composição das massas plásticas que passarão pelos processos de extrusão e queima. Para este tipo de aplicação considera-se que as argilas são compostas por material argiloso (plástico) e material não plástico. As argilas plásticas, denominadas na indústria cerâmica de “argilas gordas”, apresentam granulometria menor que  $2 \mu\text{m}$ . A predominância destas argilas nas massas cerâmicas torna o processamento bastante complicado. Apresentam alta plasticidade, porém precisam de uma quantidade maior de água para desenvolvê-la completamente. Com isso ocorre um aumento de umidade no interior do produto, que provoca fortes retrações e deformações (PRACIDELLI; MELCHIADES, 1997).

Os materiais não plásticos, representados essencialmente por areias, micas, óxidos de ferro e outros, atuam como agentes desplastificantes nas composições, reduzindo o grau de compactação da massa, com diminuição da plasticidade das argilas. Sua presença reduz as contrações tanto no processo de secagem como de queima. Para que possam agir com eficácia sobre as características das argilas devem apresentar granulometria acima de  $60 \mu\text{m}$  e ser usadas em quantidades moderadas.

O diagrama de *Winkler*, como o mostrado na Figura 2.2 (Capítulo 2) é utilizado nos estudos de granulometria para cerâmica, pois define a distribuição dos materiais plásticos e desplastificantes, definindo zonas de granulometria mais adequadas para os produtos de cerâmica vermelha. Neste diagrama os limites de faixas granulométricas utilizados são:  $2 \mu\text{m}$  e  $20 \mu\text{m}$ .

Com base no diagrama de *Winkler*, Pracidelli e Melchiades (op. cit.)

apresentam uma distribuição das granulometrias em função dos principais produtos de cerâmica vermelha, expressa na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Composição granulométrica ideal para os produtos de cerâmica vermelha, segundo Pracidelli e Melchiades (1997)**

Tipo de produto	Composição granulométrica (%)		
	Até 2 $\mu\text{m}$	2 a 20 $\mu\text{m}$	> 20 $\mu\text{m}$
A Materiais de qualidade com dificuldade de produção	40 a 50	20 a 40	20 a 30
B Telhas, capas	30 a 40	20 a 50	20 a 40
C Tijolos furados	20 a 30	20 a 55	20 a 50
D Tijolos maciços	15 a 20	20 a 55	25 a 55

Para utilização do diagrama de *Winkler*, as distribuições granulométricas das amostras estão apresentadas na Tabela 4.4 segundo as faixas de 2, 2 a 20 e acima de 20 $\mu\text{m}$ .

**Tabela 4.4 – Distribuição das faixas granulométricas das amostras para estudo de formulações em cerâmica vermelha.**

Amostras	Composição granulométrica (%)		
	< 2 $\mu\text{m}$	2 a 20 $\mu\text{m}$	> 20 $\mu\text{m}$
AM01	6,33	67,59	26,08
AM02	8,14	66,2	25,66
AM03	5,83	67,74	26,43
AM04	9,57	56,35	34,08
AM05	9,66	49,47	40,87

Observando-se os resultados apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.4, observa-se uma semelhança muito grande entre as distribuições granulométricas das amostras 01 a 03, correspondentes ao rejeito do processo de beneficiamento da areia, confirmando a homogeneidade do processo, que se observa macroscopicamente nas amostras coletadas. A distribuição modal e a concentração das partículas na faixa entre 2 a 20  $\mu\text{m}$  mostra ainda uma eficiência e seletividade no processo de beneficiamento utilizado na mineração.

Quanto as argilas naturais, que constituem o estéril do processo de extração, a amostra 4, que apresenta coloração roxa, assemelha-se bastante ao material de

rejeito, com uma concentração um pouco maior de minerais na faixa acima de 20  $\mu\text{m}$ . Já a argila cinza esverdeada apresenta uma concentração maior na faixa acima de 20  $\mu\text{m}$ .

Com relação a aplicação como material cerâmico, baseado nos dados diagrama de *Winkler* (Figura 4.6) todas as amostras apresentam concentrações na faixa acima de 20  $\mu\text{m}$  compatíveis para todos os usos. Apresentam porém pouca quantidade de argilas plásticas (abaixo de 2  $\mu\text{m}$ ) e concentrações acima do ideal para a faixa entre 2 e 20  $\mu\text{m}$ .

Estes resultados indicam que as distribuições granulométricas dos materiais estudados não estão dentro das faixas consideradas ótimas do diagrama de *Winkler*. Dessa forma, para a utilização em cerâmica vermelha estes materiais deveriam ser misturados com argilas plásticas para obtenção de uma massa com granulometria mais adequada. Este resultados contudo não são determinantes, uma vez que este método é questionável (MOTTA et al., 2001). A confirmação das propriedades cerâmicas das amostras estudadas deverá ser dada por meio dos ensaios cerâmicos.

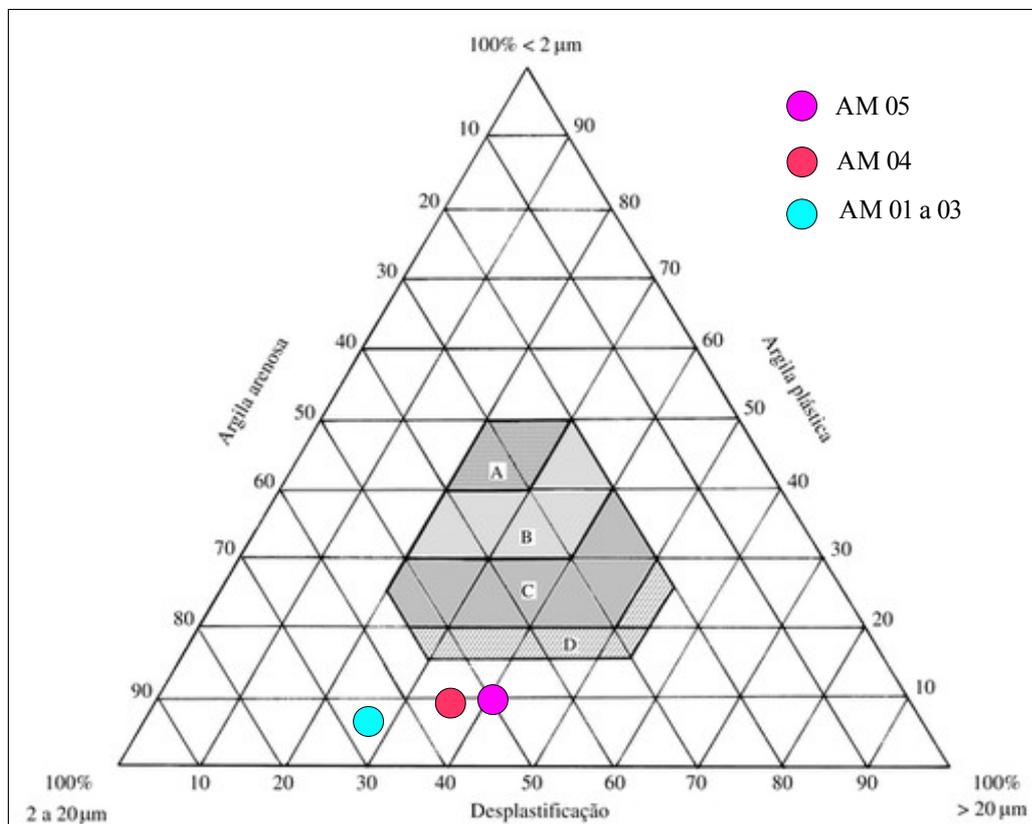


Figura 4.6 – Localização das amostras no Diagrama de Winkler.

Além do mais, os resultados dos ensaios de granulometria contrastam com os resultados dos ensaios cerâmicos, apresentados no item 4.2. Um fato para explicar as distribuições granulométricas muito próximas da zona de desplastificação do diagrama de *Winkler* seria o método de ensaio realizado, que poderia fornecer valores incorretos. Para confirmação dos resultados, sugere-se a realização de análises granulométricas por sedimentação e peneiramento.

#### 4.1.3 Difração de raios-X

Os resultados das análises mineralógicas por difração dos raios-X foram interpretados através do *software PCPDFWIN*, disponível no LCT da Escola Politécnica da USP. Com este programa, pode-se comparar os difratogramas obtidos com um banco de dados de fases cristalinas. Os resultados estão apresentados nas Figuras 4.7 a 4.11, e na Tabela 4.5.

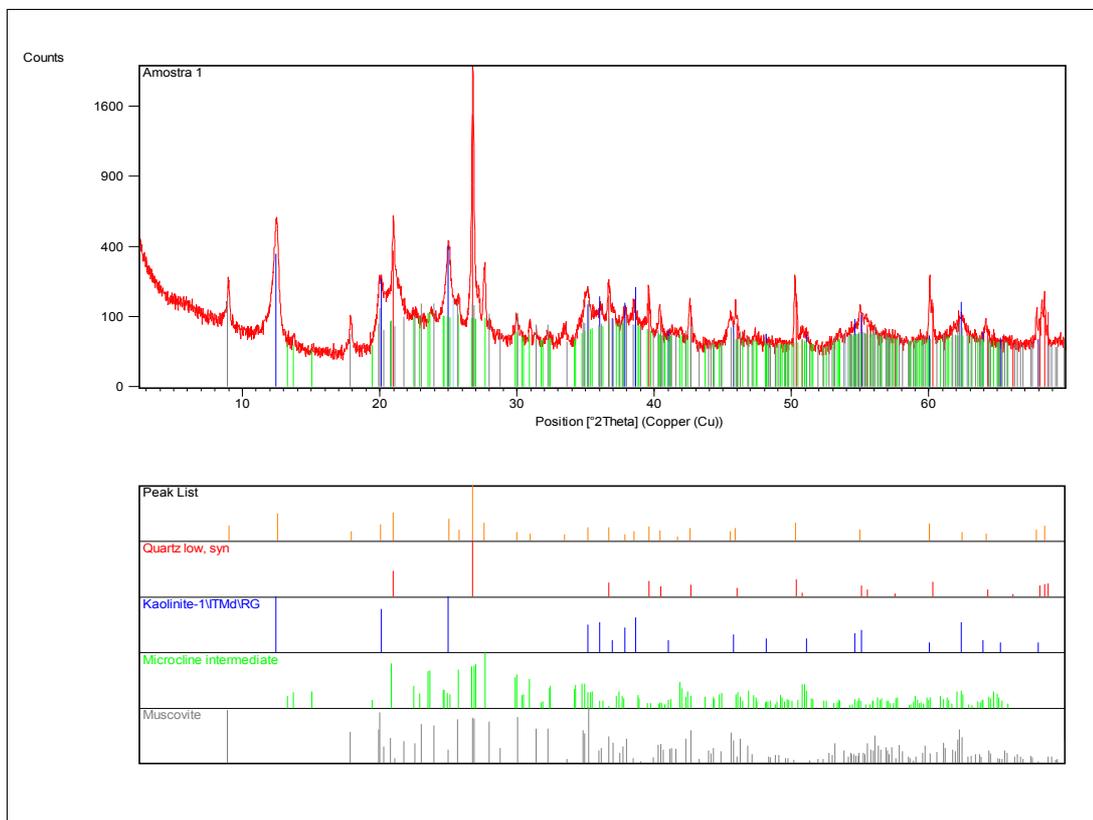


Figura 4.7 – Difratograma da amostra 01.

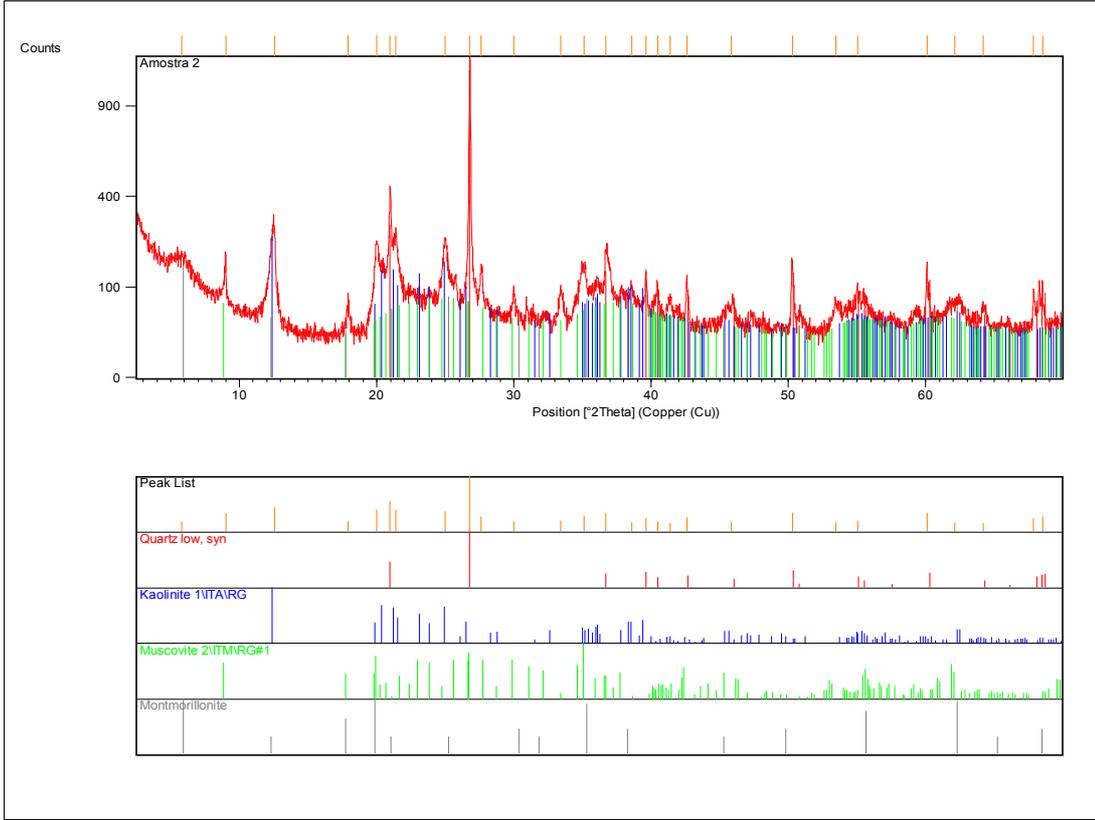


Figura 4.8 – Difratoograma da amostra 02.

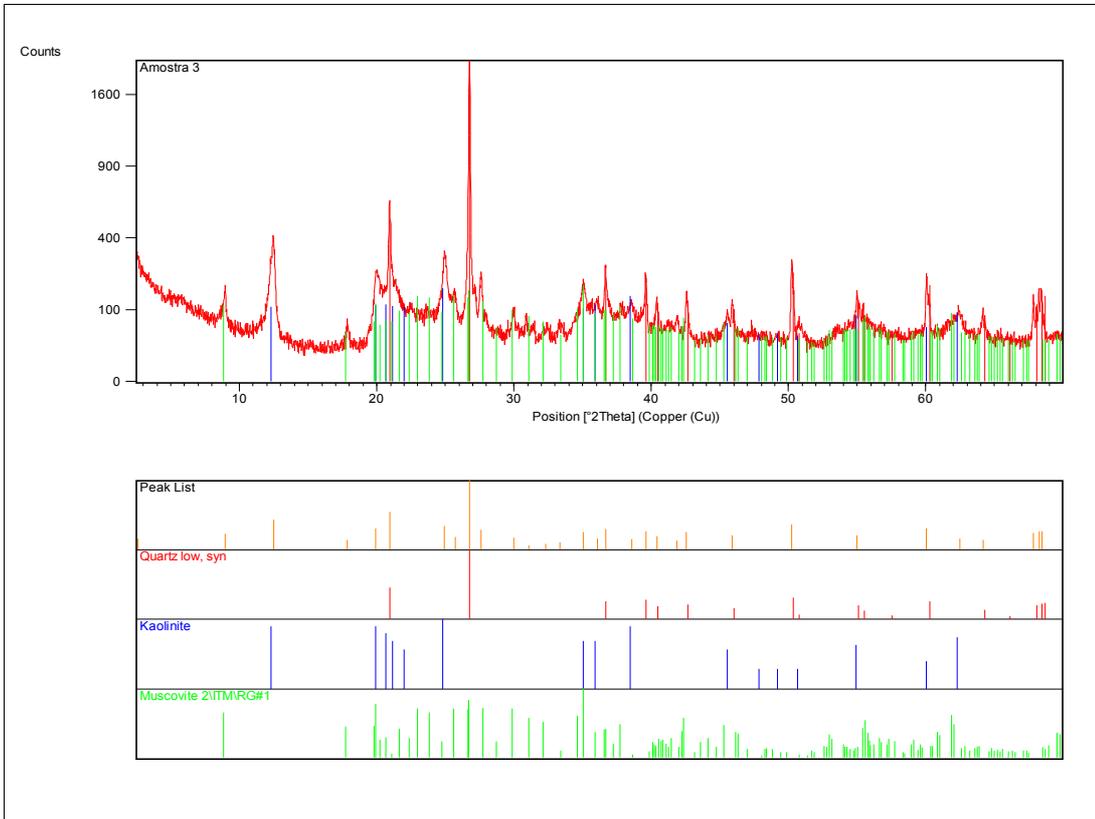


Figura 4.9 – Difratoograma da amostra 03.

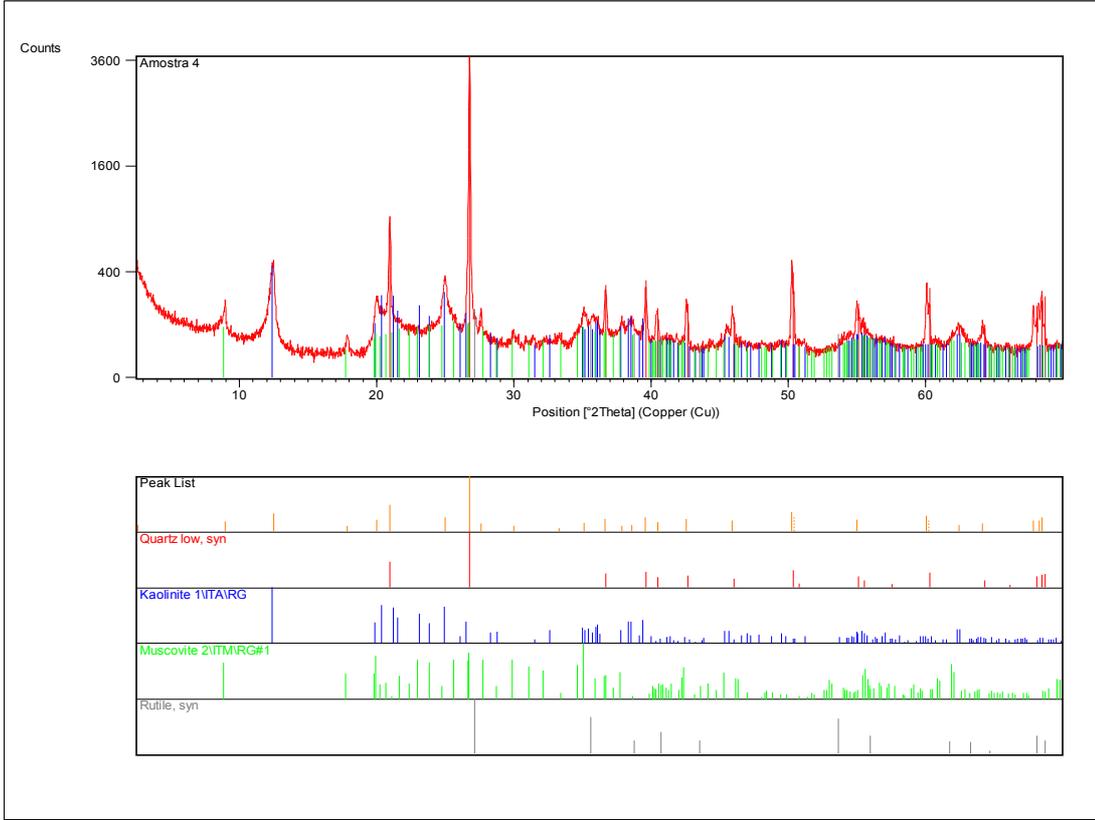


Figura 4.10 – Difratoograma da amostra 04.

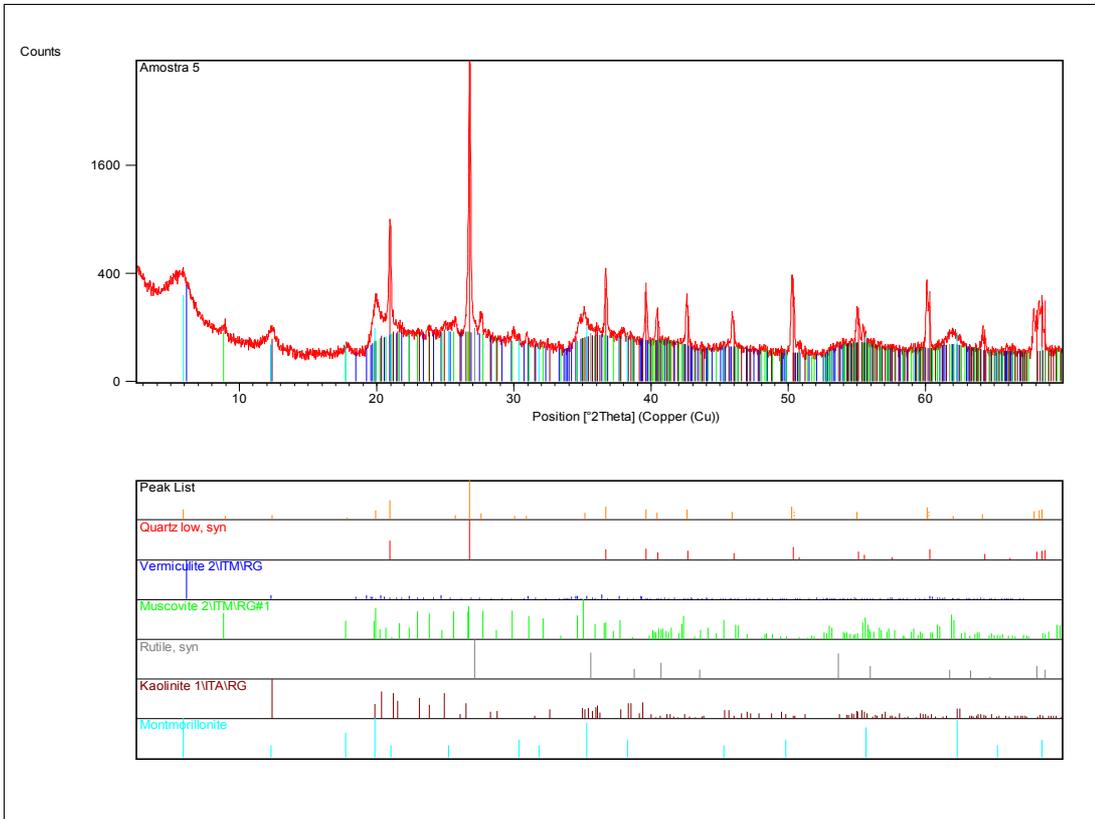


Figura 4.11 – Difratoograma da amostra 05.

**Tabela 4.5 – Composição mineralógica das amostras com base nos resultados da difração de raios – X.**

AMOSTRA	MINERAIS PRESENTES
01	Quartzo, caulinita, feldspato potássico, muscovita.
02	Quartzo, caulinita, muscovita, montmorilonita.
03	Quartzo, caulinita, muscovita.
04	Quartzo, caulinita, muscovita, rutilo.
05	Quartzo, caulinita, vermiculita, muscovita, montmorilonita, rutilo.

A presença de quartzo e da mica muscovita ( $2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) é comum em todas as amostras, explicando os teores de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{K}_2\text{O}$  obtidos na análise química (Tabela 4.1). O argilomineral predominante em todas as amostras foi a caulinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ]. A montmorilonita [ $\text{Na}_{0,3}(\text{Al},\text{Mg})_2\text{SiO}_4 \cdot \text{O}_{10}(\text{OH})_{2,4} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ] aparece apenas nas amostras 02 e 05.

A presença de feldspato potássico (microclíneo –  $\text{KAlSi}_2\text{O}_8$ ) foi constatado na amostra 01.

Rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) foi detectado apenas na amostra 04, que apresentou o maior concentração deste óxido na análise química.

A presença de vermiculita na amostra 05, confirma o teor acima de 1% em  $\text{MgO}$ , obtido na análise química.

## 4.2 Resultados dos ensaios cerâmicos

O resultado da análise dos resíduos das amostras estão apresentados na Tabela 4.6. Na amostra 01, correspondente ao rejeito do processo de beneficiamento, foram observados os seguinte minerais: mica, matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro, quartzo e ferro magnético. Na amostra 02, correspondente ao estéril (argila roxa), foram observados: carbonatos, mica, matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro, quartzo e ferro magnético. Na amostra 03, correspondente à outra camada de estéril (argila cinza esverdeada), foram observados: mica, óxidos e hidróxidos de ferro, quartzo e ferro magnético.

Tabela 4.6 – Análise do resíduo

Tyler/Mesh	Abertura (mm)	% (peso inicial: 100g)		
		Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03
100	0,149	0,78	5,74	3,27
150	0,105	1,45	5,85	1,99
200	0,074	1,99	7,12	3,28
325	0,044	6,79	9,36	4,9
<b>TOTAL</b>		<b>11,01</b>	<b>28,07</b>	<b>13,44</b>

Foram determinados os seguintes limites de plasticidade:

- Amostra 01 – 16,6%
- amostra 02 – 15,1 %
- amostra 03 – 21,1 %

As características dos corpos de prova secos à 110°C estão apresentadas na Tabela 4.7, enquanto que as características dos corpos de prova após queima estão apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.7 – Características dos corpos de prova secos à 110°C.

Amostra	Umidade de extrusão (%)	Retração Linear (%)	Tensão de ruptura à flexão (kgf/cm <sup>2</sup> )	COR
AM 01	52,5	15,2	25,49	Amarela
AM 02	23,0	6,9	23,45	Marrom
AM 03	24,0	6,6	175,39	Marrom

Tabela 4.8 – Características dos corpos de prova após queima.

Amostra	Temperatura de queima (°C)	Retração Linear (%)	Tensão de ruptura à flexão (kgf/cm <sup>2</sup> )	Absorção de água (%)	Porosidade aparente (%)	Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Cor de queima
AM 01	850	0,0	74	22,8	37,1	1,6	Vermelha
	950	1,1	110	21,7	36,2	1,7	Vermelha
AM 02	850	-0,5	50	16,1	30,1	1,9	Vermelha
	950	0,0	71	16,3	30,7	1,9	Vermelha
AM 03	850	0,3	287	8,7	17,9	2,1	Vermelha
	950	1,8	231	5,9	12,6	2,1	Vermelha

Para classificação das matérias primas para uso nos diferentes produtos de cerâmica vermelha, compara-se os valores obtidos com os valores-limite recomendados. O laboratório do SENAI utiliza os parâmetros apresentados na Tabela 4.9. Estes valores são os mesmos adotados pelo IPT, segundo Souza Santos (1975).

**Tabela 4.9 – Valores recomendados para cerâmica vermelha adotados pelo SENAI. Adaptada de Souza Santos (1975).**

Características obtidas dos ensaios cerâmicos	Usos			
	Bloco de vedação ou tijolos	Bloco estrutural	Telhas	Ladrilhos de piso vermelhos
Tensão de ruptura mínima seca a 110°C (kgf/cm <sup>2</sup> )	15	25	30	-
Tensão de ruptura mínima após queima (kgf/cm <sup>2</sup> )	20	55	65	-
Absorção máxima de água após queima (%)	-	25	20	< 1,0
Cor após queima	Vermelha	Vermelha	Vermelha	Vermelha sem manchas pretas

Comparando-se os resultados apresentados na Tabela 4.7 e 4.8, com os parâmetros recomendados na Tabela 4.9, pode-se concluir o seguinte, em relação à possibilidades de uso dos materiais testados:

1. A amostra 01, representativa do rejeito do processo de beneficiamento, apresenta as características mínimas que permitem a sua utilização para fabricação de blocos de vedação ou bloco estrutural. Não pode ser utilizado para fabricação de telhas devido aos baixos valores da resistência a cru e da absorção de água.
2. A amostra 02, que constitui a argila roxa representativa de um dos tipos de argila do material estéril separado no processo de extração, pode ser utilizada como bloco de vedação ou bloco estrutural. Apesar de apresentar valores de absorção de água abaixo do máximo para utilização como telhas, apresentou valores de tensão a ruptura mínimos à seco e após queima abaixo dos valores recomendados.
3. Amostra 03, representativa da amostra de argila de rejeito de coloração cinza

esverdeada, apresentou resistência muito alta, característica que permitem a sua utilização como bloco de vedação, bloco estrutural ou telhas.

Observa-se que na amostra 02 a retração linear após queima à temperatura de 850°C, apresentou um valor negativo, indicativo de expansão. A expansão provoca diminuição na resistência, o que explica o baixo valor da resistência à flexão nesta temperatura, motivo pelo qual este material não é indicado para a fabricação de telhas. Esta expansão pode ser motivada pela presença de carbonatos, verificados no teste de resíduo, ou ainda pela presença de matéria orgânica. Pode-se realizar uma análise termo diferencial para um estudo mais aprofundado quanto aos motivos da retração, podendo-se verificar possibilidades para diminuição desta característica e talvez utiliza-lo também para a fabricação de telhas.

A amostra 01 foi a que apresentou a menor quantidade de resíduo não argiloso (11,01%), enquanto a amostra 03 apresentou um teor elevado de resíduo (28,07%). O resíduo não argiloso representa o material não plástico (desplastificante), que também atua como fundente nas massas cerâmicas. Embora a amostra 01 apresente boas condições para utilização como blocos, suas características cerâmicas podem ser melhoradas por meio de misturas, otimizando a distribuição granulométrica. Da mesma forma a amostra 02, mais plástica, pode ter suas características melhoradas por meio de misturas com os materiais mais granulares.

A amostra 03 apresentou um valor de resistência à flexão muito elevado (175,39 Kgf/cm<sup>2</sup>). Este fato pode permitir a utilização desta argila na formulação com materiais de características menos favoráveis para produção de produtos mais nobres, como telhas, por exemplo.