



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CAROLINA MARINHO SANTANA

**AVALIAÇÃO DE ZONAS DE EXTRUSÃO EM MASSAS CERÂMICAS COM
REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE E REJEITO DE GRANITO**

MARABÁ-PA

2017

CAROLINA MARINHO SANTANA

**AVALIAÇÃO DE ZONAS DE EXTRUSÃO EM MASSAS CERÂMICAS COM
REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE E REJEITO DE GRANITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal do Sul e Sudeste do
Pará em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
de Materiais

Orientador:

Prof. Dr. Elias Fagury Neto.

MARABÁ-PA
2017

CAROLINA MARINHO SANTANA

**AVALIAÇÃO DE ZONAS DE EXTRUSÃO EM MASSAS CERÂMICAS DE ARGILA
COM REJEITO DE MINÉRIO SULFETADO DE COBRE E REJEITO DE GRANITO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Materiais da
Universidade Federal Do Sul e Sudeste do
Pará em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia
de Materiais

DATA DA AVALIAÇÃO: 22 de Março de 2017

CONCEITO: EXCELENTE

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Elias Kagury Neto
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Orientador)



Prof. Dr. Adriano Alves Rábêlo
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)



Prof. Jailes Santana de Moura
(FEMAT – IGE – UNIFESSPA – Membro)

Dedico este trabalho a meus pais Melice e José Carlos, que sempre estiveram ao meu lado, dando todo apoio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde, por ser meu alicerce em todos os momentos da minha vida, pela fé inabalável, e por permitir mais uma etapa de realização tão importante na minha vida.

A meus pais, Melice Marinho Santana e José Carlos Santana, por todos os ensinamentos de princípios, pelo amor incondicional, por sempre estarem do meu lado incentivando e lutando para junto comigo realizar esse grande sonho.

A minha irmã Camila Marinho Santos, por todo apoio durante a graduação, me auxiliando e dando forças.

A todos os meus familiares que sempre estiveram incentivando.

A José Ângelo Barbosa Júnior, pelo amor, carinho, compreensão, e por sempre acreditar juntamente comigo na realização desse sonho.

A grande amiga Edna Fernandes Feitosa que o curso me proporcionou conhecer, pela grande parceria que tivemos durante todo desenvolvimento experimental desse trabalho, sempre trabalhando juntas para que tivéssemos ótimos resultados.

A Diana da Silva Luna outra grande amiga que tive a oportunidade de conhecer e levar para o resto da vida, pelos momentos bons e desesperadores que passamos.

A Kaline Dantas e ao centro “Mulheres de Barro”, por ajudarem no fornecimento das argilas utilizadas nesse trabalho.

A toda turma de Engenharia de Materiais 2012, por todos os momentos que passamos juntos, durante todos esses cinco anos, todos sempre em busca do sucesso.

A todos os professores, que ao longo do curso passaram todos os seus conhecimentos para formar os melhores engenheiros com todo profissionalismo. Em especial ao meu orientador, Profº. Dr. Elias Fagury Neto, por aceitar me orientar neste trabalho, sempre auxiliando e ajudando para o sucesso do trabalho de conclusão do curso.

*É preciso força pra sonhar e perceber que a estrada vai
além do que se vê.*

Los Hermanos

RESUMO

A incorporação de resíduos industriais em cerâmica vermelha vem sendo muito estudada nos últimos anos, buscando sempre minimizar impactos ambientais. O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento de extrusão das massas cerâmicas com rejeito do minério sulfetado de cobre e pó de granito. As matérias-primas utilizadas foram dois tipos de argilas, denominadas APA e Vila Rural 13, provenientes da cidade de Parauapebas-PA, além do rejeito do minério sulfetado de cobre e rejeito de pó de granito. As matérias-primas foram caracterizadas por difratometria de raios X para avaliação das fases cristalinas presentes. Os rejeitos foram adicionados em massas de argilas nas proporções de 6%, 12% e 15% em peso. Foram analisados o índice de plasticidade e as zonas de extrusão. As formulações 1, 2 e 3 contendo 6%, 12% e 15% em peso de rejeito do minério sulfetado de cobre na argila APA apresentaram resultados de zonas de extrusão dentro do determinado para utilização em massas de cerâmica vermelha. Enquanto que para a incorporação do rejeito do minério sulfetado de cobre na argila Vila rural 13, apenas a formulação 3 contendo 15% em peso do rejeito ficou dentro da zona de extrusão aceitável. Não foi possível determinar os limites de Atterberg para o rejeito de pó de granito, sendo classificado como não plástico.

Palavras-chave: Cerâmica, Argila, Rejeitos industriais, Limites de Atterberg, Plasticidade.

ABSTRACT

The incorporation of industrial waste in red ceramics has been studied in recent years, always seeking to minimize environmental impacts. The objective of this work was to evaluate the extrusion behavior of the ceramic masses with the reject of the sulfite copper ore and granite powder. The raw materials used were two types of clays, called APA and Vila Rural 13, from the city of Parauapebas-PA, besides the refuse of copper sulphide ore and granite powder tailings. The raw materials were characterized by X-ray diffractometry to evaluate the crystalline phases present. The tailings were added in clay masses in the proportions of 6%, 12% and 15% by weight. The plasticity index and the extrusion zones were analyzed. Formulations 1, 2 and 3 containing 6%, 12% and 15% by weight of copper sulphite ore tailings in APA clay showed results of extrusion zones within that determined for use in red ceramic masses. While for the incorporation of copper sulphite ore tailings in rural village clay 13, only formulation 3 containing 15 wt% of the waste was within the acceptable extrusion zone. It was not possible to determine the Atterberg limits for the granite dust tailings, being classified as non-plastic.

Keywords: Ceramics, Clay, Industrial waste, Atterberg boundaries, Plasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cerâmica vermelha na classificação do setor cerâmico.	16
Figura 2: Produção de produtos por regiões.....	17
Figura 3: Histórico da produção de cerâmica vermelha no Brasil a partir de 2001(em bilhões de peças)	17
Figura 4: Representação do processo de extrusão.....	22
Figura 5: Variação da pressão de extrusão e da potência exercida pelo motor em função do teor de umidade, para uma massa mais plástica e para outra menos plástica.....	24
Figura 6: Representação do processo de secagem dos produtos cerâmicos.....	25
Figura 7: Representação esquemática do beneficiamento do cobre da mina do Sossego.....	28
Figura 8: Representação de uma pilha de rejeito de pó de granito	30
Figura 9: a) Argila APA e b) Argila Vila rural 13	32
Figura 10: RMSC utilizado nas formulações	32
Figura 11: Rejeito de pó de granito utilizado nas formulações.....	33
Figura 12: Fluxograma da metodologia apresentada no trabalho	33
Figura 13: Aparelho Casagrande utilizado para determinar o LL.....	36
Figura 14: Massa plástica sobre a placa de vidro.....	36
Figura 15: Massa plástica em forma de cilindro	37
Figura 16: Difratograma de raios X da argila APA, vila rural 13, pó de granito e RMSC.....	38
Figura 17: Índice de plasticidade para F1, F2 e F3, contendo 100% em peso para cada tipo de argila.....	39
Figura 18: Índice de plasticidade para as formulações com adições de RMSC nas proporções de 6%, 12% e 15% em peso na argila APA.....	40
Figura 19: Índice de plasticidade para as formulações com adições de RMSC, nas proporções de 6%, 12% e 15% em peso na argila Vila rural 13	41
Figura 20: Zonas de extrusão para F1, F2 e F3 contendo 100% em peso para cada argila	42
Figura 21: Zonas de extrusão para F1, F2 e F3, contendo 6%, 12% e 15% em peso de RMSC na argila APA	43
Figura 22: Zonas de extrusão para F1, F2 e F3 contendo 6%, 12% e 15% em peso de RMSC na argila Vila rural 13.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química em porcentagem de argilas brasileiras (argilas 1 e 2).....	19
Tabela 2: Características e propriedades de corpos cerâmicos à base de argila, com resíduos redutores de plasticidade	27
Tabela 3: Análise química do RMSC.....	29
Tabela 4: Composição química de rejeito de granito, proveninete do município de Goytacazes- RJ	31
Tabela 5: Formulações propostas apenas para as argilas em peso (%)	34
Tabela 6: Formulações com incorporação do RMSC nas proporções de 6%, 12% e 15% em peso na argila APA e Vila rural 13.....	34
Tabela 7: Formulações propostas com incorporação de rejeito de granito, nas proporções de 6%, 12% e 15 % em peso na argila APA e Vila rural 13	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DRX	Difração de raios X
LP	Limite de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
IP	Índice de Plasticidade
ZE	Zonas de Extrusão
SAG	Moinho semi-autógeno
RMSC	Rejeito do minério sulfetado de cobre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	MATERIAIS CERÂMICOS	15
3.2	CERÂMICA VERMELHA	15
3.3	ARGILA	17
3.3.1	Composição Química das Argilas	18
3.3.2	Argilas para Cerâmica Vermelha	19
3.3.3	Plasticidade de Massas Cerâmicas	20
3.4	ETAPAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA	21
3.4.1	Extração e Recebimento da Matéria-Prima	21
3.4.2	Preparação da Massa Cerâmica	21
3.4.3	Processo de Conformação	22
3.4.3.1	Fundamentos da Extrusão	23
3.4.4	Secagem	24
3.4.5	Queima	25
3.5	INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS EM CERÂMICA VERMELHA	26
3.5.1	Rejeito do Minério Sulfetado de Cobre (RMSC)	27
3.5.2	Rejeito de Granito	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	MATERIAIS	31
4.1.1	Argilas	31
4.1.2	Rejeito do Minério Sulfetado de Cobre	32
4.1.3	Rejeito do Pó de Granito	32
4.2	METODOLOGIA	33
4.2.1	Caracterização Mineralógica por Difratomia de raios-X	34
4.2.2	Formulações das massas	34
4.2.3	Ensaio Tecnológico	35
4.2.3.1	Limite de liquidez (LP)	35
4.2.3.2	Limite de Plasticidade (LP)	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA	37

5.1.1	Difratometria de raios X	37
5.2	ENSAIOS TECNOLÓGICOS	39
5.2.1	Índice de Plasticidade (IP)	39
5.2.2	Zonas de Extrusão (ZE)	42
6	CONCLUSÃO	45
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

A adição de rejeitos industriais em cerâmica vermelha ou em processos na construção civil vem sendo estudada há alguns anos. A preocupação com a preservação do meio ambiente, combinada com a falta de algumas matérias-primas, está impulsionando as pesquisas para reutilização ou adição dos rejeitos em processos industriais (MEIRELLES, 2011). Estudos como estes envolvem aprimoramento da tecnologia de materiais e muita dedicação para que se obtenha resultados positivos, como a descoberta de novos materiais de melhor qualidade e de custos mais baixos, tendo como maior beneficiária a natureza. (RAUPP BITENCOURT, 2004)

A grande produção nacional de telhas e tijolos consome um volume enorme de matérias-primas retiradas do meio ambiente. Essa retirada constante causa sérios danos ao meio ambiente e indiretamente ao ser humano. Atualmente existem vários processos alternativos que visam a substituição destas matérias-primas naturais por sub-produtos industriais que diminuam o impacto. (FERNANDES, 2003)

A atividade mineradora pode-se atribuir a origem de elevadas parcelas de impactos ambientais, com destaque para a produção de rejeitos de minérios. O beneficiamento de minérios metálicos origina anualmente toneladas de rejeito. Neste sentido, torna-se necessária a elaboração de projetos que visem a redução do volume de resíduos oriundos do setor de extração mineral. Uma solução viável é a incorporação desses rejeitos em materiais cerâmicos que é uma prática ambientalmente correta e que resulta, em alguns casos, na melhoria do processamento e na qualidade da cerâmica, além de minimizar custos com matérias-primas. (LEITE PINHEIRO, 2013; COSTA CALDAS, 2010)

Neste trabalho, foi avaliada a incorporação do rejeito do minério sulfetado de cobre e pó de granito em massas de cerâmica vermelha, do ponto de vista da extrudabilidade, determinando-se o nível de plasticidade alcançado com a adição dos rejeitos em determinadas proporções.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar as zonas de extrusão de massas de argila para cerâmica vermelha, com a adição de proporções de rejeito de minério sulfetado de cobre e pó de granito.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Incorporação dos rejeitos de cobre e granito em duas diferentes argilas regionais;
- Caracterizar as matérias-primas por meio de difratometria de raios X, para identificar as fases presentes;
- Determinar os limites de Atterberg das massas argilosas com adição dos rejeitos ;
- Determinar as zonas de extrusão para as formulações propostas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos são considerados compostos formados entre elementos metálicos e não-metálicos, na maioria das vezes, são óxidos, nitretos e carbetos, para quais as ligações interatômicas ou são totalmente iônicas ou predominantemente iônicas. O termo *cerâmica* vem da palavra grega *Keramikos*, que significa “matéria queimada”, indicando que as propriedades desejáveis desses materiais são obtidas normalmente por meio de um processo de tratamento térmico a altas temperaturas chamado cozimento. (CALLISTER, 2013)

Esses materiais suportam temperaturas superiores a 1000°C, possuem boa resistência química e resistência mecânica e ao desgaste. São geralmente duros, isolantes térmicos e com ponto de fusão muitas vezes superior a outras classes de materiais. Ao se tratar, especificamente de cerâmica vermelha, soma-se às boas características já citadas, o fato de que existe uma grande quantidade disponível de matéria-prima no meio ambiente, o que faz com que o custo de produção destas peças cerâmicas seja baixo. (POTRICH REIS, 2007)

3.2 CERÂMICA VERMELHA

Cerâmica Vermelha é uma expressão com significado amplo, compreendendo aqueles materiais empregados na construção civil (argila expandida, tijolos, blocos, elementos vazados, lajes, telhas e tubos cerâmicos) e alguns de uso doméstico e afins. Nos dois casos os produtos têm coloração predominantemente avermelhada. Possui a nomenclatura “vermelha” devido à presença de compostos ferrosos. (ABCERAM, 2016)

O setor cerâmico é amplo e heterogêneo, o que induz a dividi-lo em sub-setores ou segmentos em razão de diversos fatores, como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização. Dessa forma, em geral, é adotada a classificação apresentada na Figura 1. Como podemos observar na figura a seguir, um dos segmentos do setor cerâmico é o de cerâmica vermelha. (ABDi, 2010)

Figura 1: Cerâmica vermelha na classificação do setor cerâmico.

Fonte: ABDi, (2010).

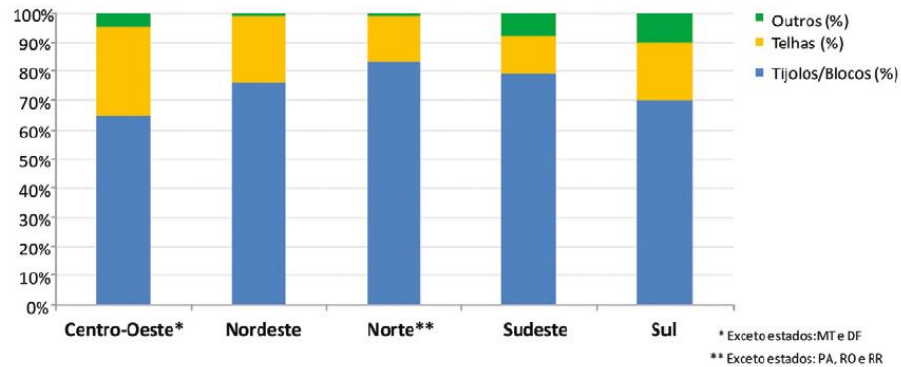
Estudos arqueológicos indicam a ocorrência de utensílios cerâmicos desde o período Pré-neolítico (25000 a.C.) e de materiais de construção, como tijolos, telhas e blocos, por volta de 5000 a 6000 a.C. Os primeiros tijolos fabricados a partir da queima foram identificados em meados de 3000 a.C., cuja aplicação estava voltada aos revestimentos externos e muros de proteção, apesar da técnica ter se desenvolvido séculos antes, especialmente na queima de utensílios domésticos. (SEBRAE, 2008)

A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais, fizeram com que as indústrias cerâmicas brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada. (ABCERAM, 2016)

A indústria de cerâmica vermelha brasileira é composta por 6.903 empresas, que geram faturamento de R\$ 18 bilhões ao ano. O segmento tem como missão oferecer produtos qualificados e sustentáveis que possam apoiar o desenvolvimento crescente e contínuo do país em todas as frentes: da construção de habitações de interesse social até as obras de infraestrutura. O setor de blocos, telhas e tubos cerâmicos é o principal fornecedor de materiais para edificações, coberturas e saneamentos em todas as partes do Brasil. O segmento representa 4,8% da indústria da construção civil e gera mais de 400 mil postos de trabalho diretos e 1,25 milhões indiretos. Mensalmente, apenas as fábricas de blocos produzem mais de 4 bilhões de unidades. Já a fabricação de telhas ultrapassa 1 bilhão de itens por mês. (ANICER, 2014)

O gráfico apresentado na Figura 2 representa a distribuição dos tipos de produtos por região. Apesar de todas as regiões apresentarem produção mais expressiva de tijolos e blocos, regiões como o Centro-Oeste tem se destacado pela produção de telhas.

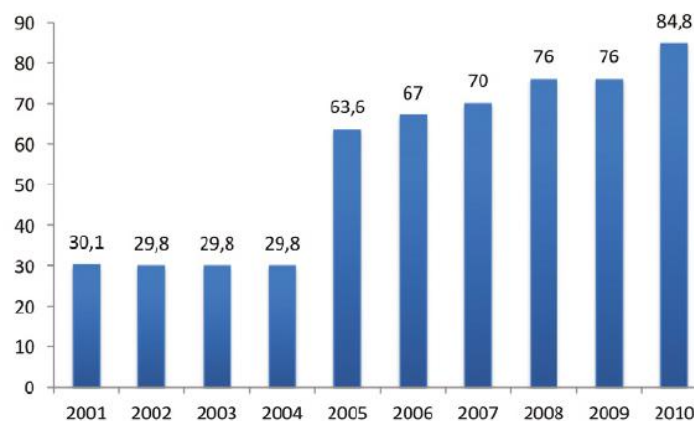
Figura 2: Produção de produtos por regiões



Fonte: ABDi (2010).

No gráfico da Figura 3, podemos observar que no intervalo entre 2001 e 2005, houve uma elevação muito grande na produção de cerâmica vermelha. Esse crescimento está relacionado com o aquecimento do setor de construção civil no período. Nos anos após 2005, o mercado continua a se expandir, porém a uma taxa menor. (ABDi, 2010)

Figura 3: Histórico da produção de cerâmica vermelha no Brasil a partir de 2001 (em bilhões de peças)



Fonte: ABDi (2010).

3.3 ARGILA

Os solos são materiais provenientes da decomposição das rochas ou sedimentação não consolidada de seus grãos, podendo haver ou não a presença de material orgânico. São

identificados pela textura, granulometria, plasticidade, consistência, compacidade, estrutura, forma dos grãos, cor, cheiro e presença de outros materiais (conchas, matéria vegetal, mica, etc.). Os solos diferem grandemente de área para área, não só em quantidade (espessura de camada), mas também qualitativamente. (GURGEL, 2013)

Segundo (SOUZA SANTOS, 1989), argila pode ser definida como material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade. É constituído principalmente por pequenas partículas cristalinas e alguns tipos de argilominerais. Quimicamente os argilominerais possuem em sua estrutura silicatos hidratados de alumínio, ferro e elementos alcalinos e alcalinos terrosos. Em termo de granulometria são classificadas como argilas as partículas que possuem diâmetros menores que 2 μm .

A argila é formada a partir da desagregação de rochas feldspáticas próxima de rios, muitas vezes formando barrancos nas margens. Os agentes de intemperismo estão continuamente em atividade, alterando os solos e transformando as partículas em outras cada vez menores.

Sendo as argilas, na natureza, de dimensões coloidais, diferenças apreciáveis existem nas propriedades físico-químicas, tais como na capacidade de cátions, natureza, distribuição granulométrica das partículas, plasticidade e etc. Essas diferenças levam propriedades tecnológicas diversas para as indústrias de cerâmica, metalúrgica, química e engenharia civil.

3.3.1 Composição Química das Argilas

A composição química das argilas varia de acordo com a jazida de onde é retirada, ou seja, do local, da formação geológica do terreno, da era de formação e da influência hidrotérmica exercida sobre o material. (RAUPP BITENCOURT, 2004)

O mineral básico das argilas é a caulinita, que é um silicato de alumínio hidratado, composto por alumina (óxido de alumínio), sílica (óxido de silício) e água. A estrutura da argila é formada por uma molécula de alumina, que contém dois átomos de alumínio e três de oxigênio; duas moléculas de sílica, que contém um átomo de silício e dois de oxigênio e duas moléculas de água, com dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio, podendo ser representado por $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$. (PORTO ROSSI, 2003)

Além da alumina e da sílica, é normalmente encontrado nas rochas ígneas o óxido de ferro (Fe_2O_3), que dá cor vermelha ou amarelada na maioria das argilas, reduz a plasticidade, mas também diminui a retração e facilita a secagem. Ele também diminui a resistência

mecânica, mas o pouco que funde na sinterização proporciona dureza ao vidrado. Os álcalis baixam o ponto de fusão e provocam porosidade, facilitando a secagem e a sinterização, mas também reduzem a plasticidade. A matéria orgânica, embora aumente a plasticidade, torna a argila mais porosa. (PIZATTO, 2001)

As argilas constituídas essencialmente pela caulinita são as mais refratárias, pois são constituídas essencialmente de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), enquanto que as outras, devido à presença de potássio, ferro e outros elementos, têm a refratariedade sensivelmente reduzida. A presença de outros minerais, muitas vezes considerados como impurezas, pode afetar substancialmente as características de uma argila para uma dada aplicação; daí a razão, para muitas aplicações, de se eliminar por processos físicos os minerais indesejáveis. A estes processos denominamos beneficiamento (LEGGERINI, 2008).

Os resultados da análise química de duas argilas vermelhas naturais brasileiras (utilizadas como recebidas do fornecedor, pré-moídas e sem nenhum tratamento de enriquecimento prévio) estão apresentados na tabela 1. Verifica-se que ambas as argilas apresentam teores de ferro em torno de 10%. A diferença mais significativa está na predominância de óxido de cálcio em uma e de óxido de potássio na outra (VILLEGAS et al., 2003).

Tabela 1: Composição química em porcentagem de argilas brasileiras (argilas 1 e 2)

Argila	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Não	K_2O	CaO	TiO_2
1	59,57	22,28	11,31	2,25	0,01	2,83	0,72	1,03
2	66,19	17,00	10,11	3,21	0,42	0,45	1,42	1,10

Fonte: VILLEGAS *et al.*, 2003

3.3.2 Argilas para Cerâmica Vermelha

As argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha ou, como também conhecidas na literatura técnica, argilas comuns (common clays) abrangem uma grande variedade de substâncias minerais de natureza argilosa. Compreendem, basicamente, sedimentos pelíticos consolidados e inconsolidados, como argilas aluvionares quaternárias, argilitos, siltitos, folhelhos e ritmitos, que queimam em cores avermelhadas, a temperaturas variáveis entre 800 e 1.250°C. Essas argilas possuem geralmente granulometria muito fina, característica que lhes conferem com a matéria orgânica incorporada, diferente graus de plasticidade, quando

adicionada de determinadas porcentagens de água; além da trabalhabilidade e resistência a verde, a seco e após o processo de queima, aspectos importantes para fabricação de uma grande variedade de produtos cerâmicos. (CABRAL JUNIOR, *et al.*, 2005)

Para determinar os usos potenciais de uma argila plástica para cerâmica vermelha (tijolos de alvenaria, telhas, ladrilhos de piso e manilhas), essa deve ser submetida a uma caracterização tecnológica, que consiste, basicamente, na realização de ensaios de laboratório: análise granulométrica, umidade, limite de plasticidade e ensaios cerâmicos em corpos de prova moldados manualmente. (SOUZA SANTOS, 1989)

3.3.3 Plasticidade de Massas Cerâmicas

Uma das principais propriedades das argilas é a plasticidade, está associada à formação de filmes de água, de certa espessura, à volta das partículas argilosas, que atua como filme lubrificante. Estes filmes de água absorvida parecem ter uma estrutura induzida pela superfície com a qual estão em contato, gerando uma continuidade estrutural entre todas as partículas, que confere ao sistema simultaneamente, certo grau de rigidez e certa facilidade de formação. (RIBEIRO, 2004)

Segundo a ABNT/NBR 7250/82, a plasticidade é a propriedade de solos finos, entre largos limites de umidade, de se submeterem a grandes deformações permanentes, sem sofrer ruptura, fissuramento ou variação de volume apreciável.

Segundo (LOPES SOUZA, 2007) a plasticidade em argilas é essencialmente resultante das forças de atração entre partículas de argilominerais e da ação lubrificante da água entre as partículas; sua influência é determinante na conformação de peças e na resistência mecânica dos corpos verdes, necessária para o manuseio até o secador.

Os índices de Attenberg são conhecidos como a quantidade de água necessária para o início do fenômeno denominado limite de plasticidade, e para o fim do estado é caracterizado como limite de liquidez. A diferença entre os limites de plasticidade e liquidez denomina-se *índice de plasticidade*, o qual define as zonas que determinam características das argilas para a aplicação requerida. (LOPES SOUZA, 2007)

Alguns fatores influem na plasticidade, são eles: granulometria e distribuição do tamanho das partículas, forma das partículas, anisotropia das partículas (comprimento, largura e espessura), presença de maior ou menor quantidade de água, que é lubrificante natural; presença ou não de matéria orgânica que, sendo substância coloidal, aumenta a plasticidade; presença de sais solúveis, dentre outros. Normalmente, numa argila, a água de plasticidade é

levemente superior ao índice de plasticidade de argilas que serão trabalhadas na forma plástica. Está água de plasticidade, que é necessária para a formação de peças por extrusão, fica em torno de 20% do índice de plasticidade (SOUZA SANTOS, 1986).

3.4 ETAPAS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA

3.4.1 Extração e Recebimento da Matéria-Prima

O processo de fabricação de cerâmicas vermelhas inicia-se com a extração da matéria-prima argila, essa extração ocorre a céu aberto, podendo ser realizada manualmente ou mecanizada por meio de escavadeiras, tratores, pás carregadeiras, etc.

Depois da retirada da argila é feita a estocagem por meio de sazonalidade ou descanso, como também é conhecido. Normalmente o material fica exposto ao tempo em áreas abertas sujeitos ao sol e a chuva, isso contribui para o alívio das tensões e auxilia na plasticidade do material, na homogeneização, e distribuição da umidade da massa (MOTTA, *et al.*, 2001).

O sazonalidade é uma técnica que visa elevar a qualidade nos seus aspectos tecnológicos, diferente do material extraído da jazida, e consiste estocar as argilas em um sistema de pilhas e então ficam descansando por um período de tempo. (GAIDZINSKI, 2005).

Outras operações podem incluir estágios de cominuição, associados à classificação granulométrica, secagem ao ar livre, formação de pilhas de estocagem para composição de massa cerâmica. A cominuição pode exigir operações de britagem e moagem, como é o caso do aproveitamento de rochas mais compactadas. Britadores em um ou dois estágios (primário e secundário) de mandíbulas, giratórios, rotativos e de rolos são utilizados, e podem ainda estar associados a moinhos de martelo ou de impacto em vários estágios para obtenção das frações finas. Tais operações são intercaladas com sistemas de peneiramento para classificação das frações de argila obtidas no processo. (CABRAL JUNIOR; *et al.*, 2005)

3.4.2 Preparação da Massa Cerâmica

Nesta etapa o objetivo é chegar a uma massa homogênea, e a redução de sua granulometria, pois com esse aspecto fica garantido o desenvolvimento de superfície específica adequada aos processos de secagem e queima. (SANTOS FILIPI, 2016)

Os diferentes tipos de massas são preparadas de acordo com a técnica a ser empregada para dar forma às peças. De modo geral, as massas podem ser classificadas em:

- Suspensão, também chamada de barbotina, para obtenção de peças em moldes de gesso ou resinas porosas;
- Massas secas ou semi-secas, na forma granulada, para obtenção de peças por prensagem;
- Massas plásticas, para obtenção de peças por extrusão, seguida ou não de torneamento ou prensagem.

3.4.3 Processo de Conformação

A conformação é o processo no qual o objetivo consiste em dar a forma definitiva ao material, ou seja, à massa cerâmica. Existem vários tipos de conformação, a sua forma possui relação direta com o nível de plasticidade e quantidade de água utilizada. A consistência da pasta é que vai ser determinante para escolher o processo de conformação adequado. Cada um destes processos está ligado a produção de um determinado produto cerâmico. (SANTOS, 2016)

A indústria cerâmica utiliza vários processos de moldagem, tais como a: moldagem plástica, a moldagem manual ou por extrusão. A Figura 5 ilustra o processo de conformação por extrusão que é utilizado para moldagem de tijolos de alvenaria, blocos cerâmicos, tijolos furados e telhas.

Figura 4: Representação do processo de extrusão



Fonte: SANTOS, (2014).

3.4.3.1 Fundamentos da Extrusão

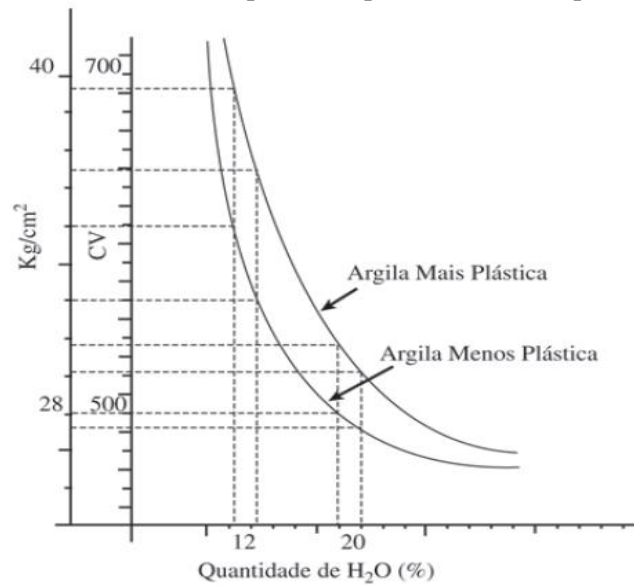
A extrusão é usada para o processamento de produtos cerâmicos há mais de 150 anos, tendo a tecnologia sofrido pequenas alterações a partir da década de 50 do século passado. No entanto este processo de conformação industrial tem se revelado essencial nas indústrias cerâmicas de barro vermelho (telhas e tijolos). É uma técnica de produção associada a uma elevada produtividade, principalmente para produtos de seção transversal constante (tijolo) e muito importante em termos de homogeneização e retirada do ar da massa. (REDD, *et al.*, 1996; BLACKBURN, *et al.*, 1992)

O fator de plasticidade da massa possui relação direta com a qualidade final dos produtos extrudados. Portanto, sugere-se que sempre que for possível extrudar a massa na zona de máxima plasticidade, isso evita problemas nesta etapa. As massas com nível alto de umidade, perto do limite líquido, tende ao deslizamento de partículas, isso acarreta a possibilidade da massa agarrar-se às hélices da extrusora e seguir pelo centro da fieira com maior velocidade. Esse contato com a parede aumenta o atrito com a extrusora, e como isso a massa também tenderá a seguir com maior velocidade no centro, enquanto as forças de compressão e o desgaste dos diversos componentes metálicos aumentam (CORDEIRO, 1993).

Quanto menos plástica for a massa argilosa, maior sensibilidade terá a possíveis variações de umidade. Uma variação de 1, 2 ou 3% de umidade numa massa plástica poderá não se notar em termos de extrusão, mas numa massa magra provocará uma alteração total da plasticidade a das condições de fluxo através da boquilha, devido à menor força de coesão entre as partículas. (FACICANI, 1993)

Dado que as condições de fluxo do material argiloso através da extrusora dependem basicamente da sua plasticidade, compreende-se facilmente a necessidade de manter o mais constante possível as características da massa (composição, grau de moagem, teor de umidade, etc.) para que o valor da plasticidade se mantenha. Nesse sentido pode-se observar na Figura 5 como diferem as pressões de extrusão e conseqüentemente os gastos com energia elétrica no motor, quando se extruda duas massas com plasticidades muito diferentes. (RIBEIRO, *et al.*, 2003)

Figura 5: Variação da pressão de extrusão e da potência exercida pelo motor em função do teor de umidade, para uma massa mais plástica e para outra menos plástica



Fonte: RIBEIRO, *et al.*, 2003

De um modo geral, pode-se afirmar que argilas gordas com elevada plasticidade, deslizam melhor sobre a superfície da hélice, traduzindo-se numa maior pressão e, conseqüentemente, numa melhor homogeneização e compactação da massa argilosa na zona de saída (boquilha). Por outro lado, argilas magras, de baixa plasticidade, grão áspero e elevado atrito, devem ser utilizadas na fabricação de peças com grande seção de saída, o que pressupõe menor travamento no molde e menor pressão de extrusão. (RIBEIRO, *et al.*, 2003)

3.4.4 Secagem

Após a etapa de moagem e de conformação, as peças em geral continuam a conter água, proveniente da etapa de cominuição e preparação da massa (se no caso forem a úmido). Para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminar essa água, de forma lenta e gradual, em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas variáveis entre 50 °C e 150 °C. (ABCERAM, 2015). A Figura 6 representa o método utilizado pelas cerâmicas para a secagem dos produtos.

Figura 6: Representação do processo de secagem dos produtos cerâmicos



Fonte: BELAVISTATIJOLOS (2014).

Conforme um corpo cerâmico à base de argila seca, ele também apresenta alguma contração. Nos estágios iniciais da secagem, as partículas de argilas estão virtualmente envolvidas e separadas umas das outras por uma película fina de água. Na medida em que a secagem progride e a água é removida, a separação entre as partículas diminui o que manifesta como contração. Outros fatores também influenciam a contração. Um desses fatores é a espessura do corpo, a contração não uniforme e a formação de defeitos são mais pronunciados em peças grossas em que peças finas. Quanto maior o teor de água, maior será a contração. Conseqüentemente, normalmente o teor de água é mantido tão baixo possível. O tamanho das partículas também influencia, a contração aumenta conforme o tamanho da partícula diminui. Para minimizar a contração, o tamanho das partículas pode ser aumentado, ou materiais não plastificáveis com partículas relativamente grandes podem ser adicionados à argila. (CALLISTER, 2013)

3.4.5 Queima

A queima dos materiais cerâmicos é uma etapa do processo onde se manifestam todas as operações realizadas durante a fabricação, aparecendo frequentemente defeitos nas peças acabadas ocasionados em etapas anteriores, mas que até então não haviam sido detectados. Pode-se definir como sinterização o processo de tratamento térmico a temperaturas elevadas, onde um sistema de partículas individuais ou um corpo poroso sofrem modificações em algumas de suas propriedades no sentido de chegar num estado de máxima densificação possível, reduzindo conseqüentemente, a porosidade do material. Devido à densificação, o material sofre uma retração (que se pode chamar de retração de queima do material), influenciando na estabilidade dimensional e na resistência mecânica final do produto cerâmico (VAN VLACK, 1973).

Quando materiais à base de argila são aquecidos até temperaturas elevadas, ocorrem algumas reações consideravelmente complexas e intrincadas. Uma dessas reações é a vitrificação, que consiste na formação gradual de um vidro líquido que flui para o interior e preenche parte do volume dos poros. A temperatura de cozimento determina a extensão em que a vitrificação ocorre. Os tijolos de construção são cozidos normalmente em torno de 900°C e são relativamente porosos. (CALLISTER, 2013)

3.5 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS EM CERÂMICA VERMELHA

A indústria de cerâmica vermelha é uma das áreas que mais se utiliza resíduos industriais, pois possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos, levando em consideração as características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas, podendo apresentar vantagens ao processo produtivo. Vários tipos de resíduos provenientes de diversos setores industriais são utilizados pela indústria cerâmica. Estes resíduos podem ser oriundos da mineração, indústria de papel, construção civil, indústria vidreira, indústria siderúrgica, dentre outros.

Os resíduos provenientes das indústrias de extração de minérios como cobre e alumínio, da indústria de cimento e de centrais termo-elétricas podem produzir um efeito de redução de plasticidade durante o processo de preparação da matéria-prima argilosa. Torna-se, no entanto, difícil de fazer uma distinção clara, dado que os diferentes efeitos se relacionam frequentemente com a distribuição granulométrica dos resíduos e com as características da argila com que são misturados. Estes resíduos apresentam, geralmente, composições químicas bastante variáveis, dependendo da origem dos materiais [DONDI *et al.*, 1998].

A Tabela 2 apresenta características e propriedades de corpos cerâmicos à base de argila, com resíduos redutores de plasticidade. Observa-se que os valores das características cerâmicas são bastante variáveis e intimamente relacionados com o tipo de conformação e temperatura de queima. De forma geral, verifica-se que os teores de resíduo podem atingir níveis extremamente elevados, maiores até que 50% e, mesmo assim, o corpo cerâmico pode ainda apresentar características mecânicas adequadas para sua aplicação como tijolos, com resistência superior a 5MPa (MENEZES, *et al.*, 2002).

Tabela 2: Características e propriedades de corpos cerâmicos à base de argila, com resíduos redutores de plasticidade

Características cerâmicas	Tipo de Resíduo				
	Pó de Basalto	Pó de Granito	Lama de Chamota	Pó de Cimento	Pó de Rocha
Teor de resíduo (%)	10-20	20-50	20-60	10-30	10-100
Técnica de moldagem	Extrusão	Prensagem	Extrusão	Extrusão	Prensagem
Temperatura de queima (°C)	900-1000	800-1000	900-1000	900-1050	1100-1200
Absorção de água	10-15	7-22	6-11	17-25	0-4
Retração linear de queima (%)	1-2	0-2	3-6	1-2	-
Resistência à flexão após a queima em (MPa)	-	2-14	-	-	30-90

Fonte:(DONDI,*et al.*, 1997).

3.5.1 Rejeito do Minério Sulfetado de Cobre (RMSC)

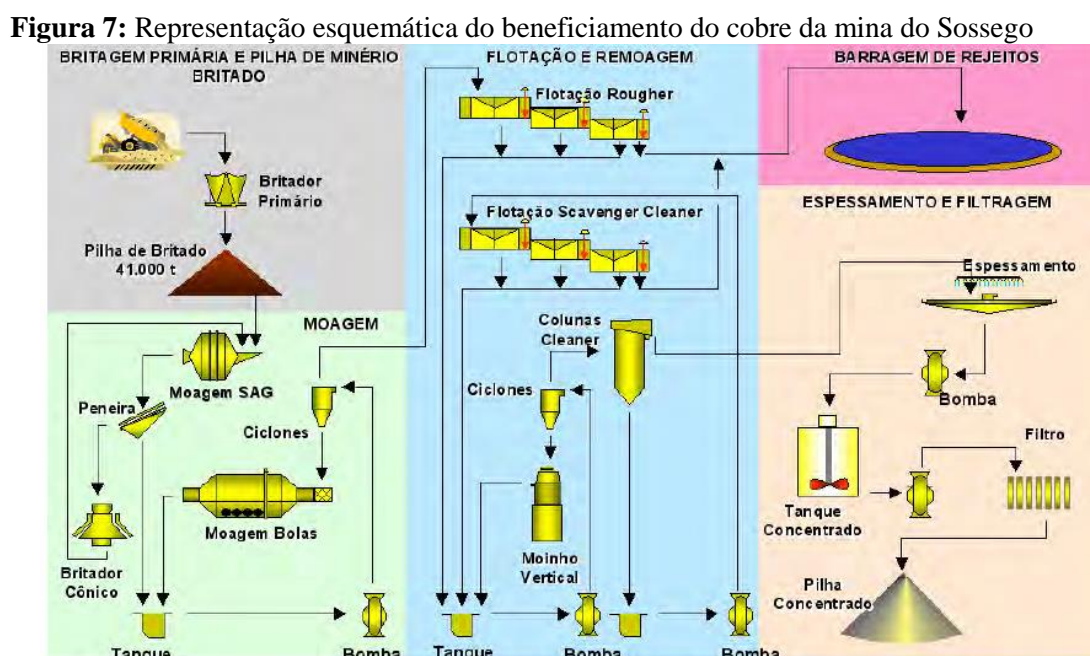
As empresas mineradoras produzem anualmente toneladas de rejeito de minério, e poucos são os casos em que parte deste resíduo é empregada com finalidade econômica. O rejeito gerado no beneficiamento do minério é lançado em barragens e em pilhas, com milhares de toneladas em volume e de rochas trituradas, respectivamente. (LEITE PINHEIRO, 2013)

Os rejeitos do processo industrial de beneficiamento de minerais sulfetados caracterizam-se pelas concentrações de metais óxidos. A remoção e recuperação de metais pesados são importantes na proteção do meio ambiente e para saúde dos seres vivos. A concentração máxima de cobre dissolvido segundo as normas para padrões de lançamento de efluentes é de 1 mg/L de Cu, por ser um dos metais pesados mais nocivos à saúde humana. O tratamento desses rejeitos é de grande relevância, pois evitam uma série de problemas ambientais. (ARRUDA MAGALHÃES, 2016)

O beneficiamento da usina de cobre da mina do Sossego está descrito na Figura 7, após a lavra do minério e a britagem primária realizada nas proximidades do corpo mineralizado, o minério segue para a usina, onde passa por processos de moagem e concentração.

Na usina de beneficiamento, a etapa de moagem inicia-se no moinho SAG (semi-autógeno), no qual a redução do material é realizada pela ação do próprio minério combinada com esferas de aço. A classificação da descarga do SAG é realizada por duas peneiras

vibratórias. O material retido nas peneiras (acima de 13 mm) é conduzido ao circuito de rebitagem em britadores cônicos, retomando ao moinho SAG; o material passante é bombeado para o circuito de classificação- cicloneagem. (BERGERMAN, 2009)



Fonte: (SHIMIZU, 2012)

A fração grossa do ciclone (*underflow*) alimenta o moinho de bolas. A descarga do moinho de bolas retorna para a cicloneagem (circuito reverso), cujo *overflow* (produto com P80 de 0,21 mm e 35% de sólidos) alimenta o circuito de flotação. (SHIMIZU, 2012)

A flotação é composta por três etapas: *rougher*, *cleaner* e *scavenger-cleaner*. A primeira etapa de flotação é a flotação *rougher*. Neste processo, o rejeito é descartado por gravidade para barragem de rejeitos e o concentrado, coletado pela espuma, é bombeado para alimentar nova etapa de cicloneagem. (SHIMIZU, 2012)

O *underflow* dos ciclones alimenta dois moinhos verticais, que operam com bolas de aço, em circuito fechado com a cicloneagem. O *overflow* (material com P80 da ordem de 44 μ m) é submetido à flotação *cleaner*. (BERGERMAN, 2009)

O material flotado das colunas de flotação *cleaner* é o concentrado final. O rejeito das colunas permanece no circuito e alimenta a flotação *scavenger-cleaner*, cujo concentrado se mistura ao concentrado *rougher*.

Segundo BERGERMAN (2009), o circuito de flotação possui recuperação de cobre em torno de 93% podendo atingir picos de 98% em situações ótimas; o concentrado *rougher*

apresenta teor de cobre variando entre 13 e 17 % com recuperação metalúrgica entre 94 a 96%.

Segundo (PINHEIRO, *et al.*, 2014). A análise química por fluorescência de raios-X do RMSC oriundo da mina do Sossego, possui os seguintes elementos, como está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Análise química do RMSC

Óxidos Presentes	Amostra RMSC
SiO ₂	44,49
Al ₂ O ₃	11,19
Fe ₂ O ₃	23,05
K ₂ O	0,87
TiO ₂	-
CaO	9,46
MgO	5,34
P ₂ O ₅	3,52
SO ₃	1,70
V ₂ O ₅	0,15
MnO	0,007

Fonte: PINHEIRO (*et al.*, 2014)

O RMSC apresenta um teor de Fe₂O₃ bastante expressivo (23,05%). O SiO₂ apresenta-se em valores substancialmente elevados, contribuindo para o aumento da resistência mecânica da massa, pois combinado com o CaO pode formar silicatos de cálcio, além de diminuir a retração da massa (ARAÚJO, 2009). O RMSC apresenta baixo teor de cobre residual, equivalente a 0,04%, porquanto que o processo de beneficiamento deste é eficaz na recuperação do metal. (RIBEIRO, 2012)

3.5.2 Rejeito de Granito

O rejeito de pó de granito é proveniente do processo de exploração mineral; verifica-se a utilização da técnica de lavra à céu aberto na exploração da mina. Inicialmente, são realizados processos de limpeza e decapeamento da camada vegetal e do solo, que cobre a superfície da rocha. O desmonte do maciço rochoso é feito através do processo de detonação, ocorrendo quase que diariamente. Após a detonação, as rochas são conduzidas em caminhões

fora de estrada para o complexo de britagem, passando posteriormente por um britador primário e depois por um secundário. Os agregados graúdos e miúdos produzidos são submetidos a um processo de lavagem onde inicia-se a separação dos rejeitos finos destes agregados. Os finos são levados a um hidrociclone onde ocorre a separação final dos finos de pedreira, sendo os mesmos conduzidos por processo hidráulico até a barragem. O rejeito depositado na barragem sofre por um processo de secagem natural, pela exposição direta ao ar, sendo depois conduzidos às pilhas de estocagem. ((BATALIONE, 2007)

A Figura 8 ilustra o equipamento hidrociclone utilizado para separação dos finos de pedreira e uma pilha de rejeito.

Figura 8: Representação de uma pilha de rejeito de pó de granito



Fonte: BATALIONE, 2007

Os finos de brita têm como característica ser não plástico e agir como fundente, já que sua constituição mineralógica é geralmente composta de quartzo, mineral micáceo e feldspatos. Nas etapas que antecedem a queima, esses minerais atuam como desplastificante, diminuindo a quantidade de água necessária para conformação e facilitando a secagem. Na queima da cerâmica, o quartzo atua como inerte, podendo ainda apresentar uma parte dissolvida na fase líquida formada. Já os feldspatos favorecem a formação de fase líquida e contribuem para a diminuição da porosidade. A ação da mica vai depender do seu tamanho de partícula e da temperatura de queima. Como é constituído de óxidos alcalinos, o mineral micáceo eventualmente pode também atuar como fundente. (MONTEIRO, 2010)

A tabela apresenta a composição química, obtida por Fluorescência de raios X do rejeito de granito, proveniente de indústrias localizadas no município de Goytacazes, norte do Estado do Rio de Janeiro.

Tabela 4: Composição química de rejeito de granito, proveniente do município de Goytacazes- RJ

Componentes	Rejeito de granito
SiO ₂	63,51
Al ₂ O ₃	18,81
Fe ₂ O ₃	4,44
TiO ₂	0,59
CaO	3,48
MgO	1,24
Na ₂ O	3,14
K ₂ O	3,78

Fonte: MONTEIRO, 2010

O rejeito de granito apresenta um teor significativo de óxidos alcalinos e alcalino-terrosos indicando um potencial fundente.

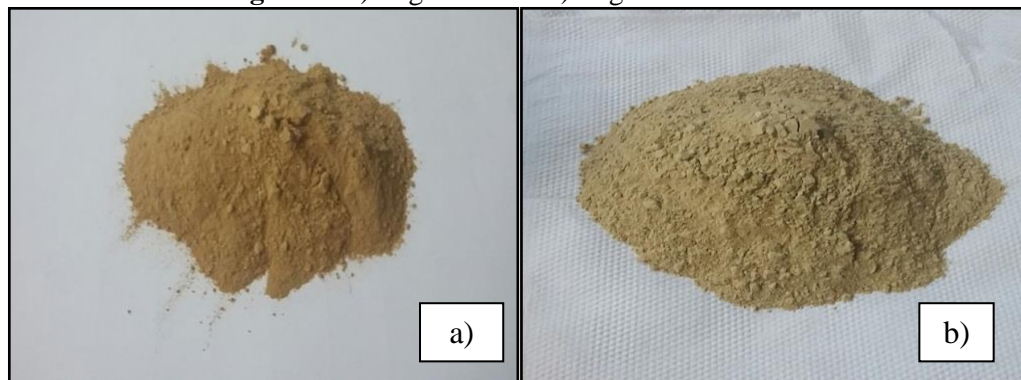
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Argilas

Para o desenvolvimento deste trabalho utilizou-se dois tipos de argilas nas formulações: argila APA e argila Vila Rural 13. Ambas foram fornecidas pelo “Centro Mulheres de Barro de Exposição e Educação Patrimonial da Serra dos Carajás”, uma cooperativa de artesãos, localizada na cidade de Parauapebas-PA. As argilas foram secas, e posteriormente destorroadas com almofariz e pistilo, e logo depois peneiradas à granulometria de 100 mesh Tyler. Foram retiradas amostras de cada tipo de argila para a caracterização através de difratometria de raios-X. Na Figura 9.a e 9.b estão ilustradas as argilas utilizadas no trabalho.

Figura 9: a) Argila APA e b) Argila Vila rural 13



Fonte: Autor, (2017)

4.1.2 Rejeito do Minério Sulfetado de Cobre

O rejeito do minério sulfetado de cobre (RMSC) incorporado nas formulações foi proveniente da mina do Sossego, localizada na cidade de Canaã dos Carajás-PA. O rejeito foi seco e logo depois peneirado à granulometria de 100 mesh Tyler. Foi retirada amostra para realização da caracterização através de difratometria de raios-X. Na Figura 10 representa o RMSC utilizado no trabalho.

Figura 10: RMSC utilizado nas formulações



Fonte: Autor, (2017)

4.1.3 Rejeito do Pó de Granito

A Figura 11 representa o rejeito utilizado nas formulações. O rejeito de pó de granito foi levado em estufa e peneirado à granulometria de 100 mesh Tyler.

Figura 11: Rejeito de pó de granito utilizado nas formulações

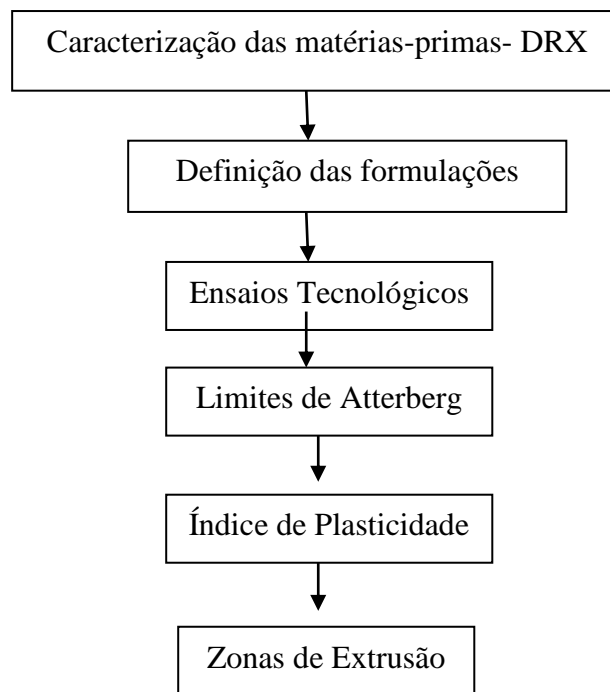


Fonte: Autor, 2017

4.2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho está apresentada e descrita no fluxograma da Figura 12.

Figura 12: Fluxograma da metodologia apresentada no trabalho



Fonte: Autor, 2017

4.2.1 Caracterização Mineralógica por Difratomia de raios-X

Antes da definição das formulações, foi realizada a semi-quantificação mineralógica das matérias-primas por um difratômetro de raios-X Rigaku Miniflex 600, utilizando radiação $K\alpha$ -Cu, com velocidade de varredura $10^\circ/\text{min}$. Esta técnica permite identificar as diferentes fases cristalinas presentes nas amostras em quantidade significativa.

4.2.2 Formulações das massas

Para a definição das formulações, primeiramente foi realizado o ensaio tecnológico para determinação dos limites de Atterberg apenas para as argilas denominadas argila APA, argila Vila rural 13 e argila Loteamento VS10. O índice de plasticidade (IP) e as zonas de extrusão (ZE) foram determinados. A Tabela representa as formulações propostas apenas para as argilas.

Tabela 5: Formulações propostas apenas para as argilas em peso (%)

Formulações	Argila APA (%)	Argila Vila rural (%)	Argila loteamento VS10 (%)
F1	-	-	100
F2	100	-	-
F3	-	100	-

Fonte: Autor, (2017)

A partir dos resultados de limites de Atterberg e zonas de extrusão, apenas duas argilas (APA e Vila rural 13) foram utilizadas para a incorporação dos rejeitos. A Tabela 5 está apresentando as formulações contendo RMSC que foi incorporado em cada tipo de argila separadamente, nas proporções de 6%, 12% e 15% em peso. O mesmo foi realizado para a incorporação do rejeito de granito nas proporções 6%, 12% e 15% em peso nas argilas APA e Vila rural 13 individualmente.

Tabela 6: Formulações com incorporação do RMSC nas proporções de 6%, 12% e 15% em peso na argila APA e Vila rural 13

Formulações	Argila APA (%)	Argila Vila rural 13 (%)	RMSC (%)
F1	94	94	6
F2	88	88	12
F3	85	85	15

Fonte: Autor, (2017)

Tabela 7: Formulações propostas com incorporação de rejeito de granito, nas proporções de 6%, 12% e 15 % em peso na argila APA e Vila rural 13

Formulações	Argila APA (%)	Argila Vila rural 13(%)	Rejeito de granito (%)
F1	94	94	6
F2	88	88	12
F3	85	85	15

Fonte: Autor, (2017)

4.2.3 Ensaios Tecnológicos

4.2.3.1 Limite de liquidez (LP)

Para determinar o LL de cada formulação utilizou-se o aparelho de Casagrande ilustrado na Figura 13. Primeiramente, pesou-se cerca de 100g da amostra composta de argila APA e RMSC e argila Vila rural 13 e RMSC; o mesmo foi feito para o rejeito de pó de granito. Foi realizada a homogeneização da massa cerâmica com água destilada até a formação da massa plástica e depois transferida para a concha metálica do aparelho. Foi moldado de maneira que a parte central atingisse espessura de aproximadamente 1 cm, e com auxílio de um cinzel, abriu-se uma canelura no centro da concha e registrou-se o número de golpes até a união da canelura.

Foram utilizadas cinco cápsulas de alumínio de aproximadamente 12 cm de diâmetro para cada formulação, para as quais transferiu-se uma pequena quantidade do material que estava junto a borda que se uniu para as cápsulas de alumínio para a determinação da umidade. Pesaram-se as cápsulas com o material em uma balança analítica e foram colocadas em uma estufa durante 12 horas, depois foram retiradas da estufa e pesadas. Este processo foi realizado até obter os números de golpes 10, 20, 30 40 e 50 para cada formulação.

Figura 13: Aparelho Casagrande utilizado para determinar o LL



Fonte: Autor, 2017

4.2.3.2 Limite de Plasticidade (LP)

Para determinar o LP pesou 50g da amostra de cada formulação depois de destorroada e peneirada a 100 mesh Tyler. Cada amostra foi homogeneizada com água destilada, após obter a massa plástica utilizou-se uma placa de vidro que está demonstrada na Figura 14, onde foi rodada sobre a placa para obter a forma de um cilindro com a perda de umidade, até uma espessura de aproximadamente 3 mm com presença de pequenas fissuras. Após obter a forma desejada, quebrou-se o cilindro em 3 partes iguais e transferiu-se o material para cápsula de alumínio como mostra a Figura 15, onde posteriormente foi pesada e levada à estufa por um período de 12 horas. Após ser retirado da estufa levou-se novamente a balança para obter peso do solo seco.

Figura 14: Massa plástica sobre a placa de vidro



Fonte: Autor, 2017

Figura 15: Massa plástica em forma de cilindro



Fonte: Autor, 2017

Os ensaios para determinação dos limites de Atterberg foram realizados de acordo com as normas da ABNT- NBR 6459-84 para o Limite de Liquidez e NBR 7180-84 para Limite de Plasticidade.

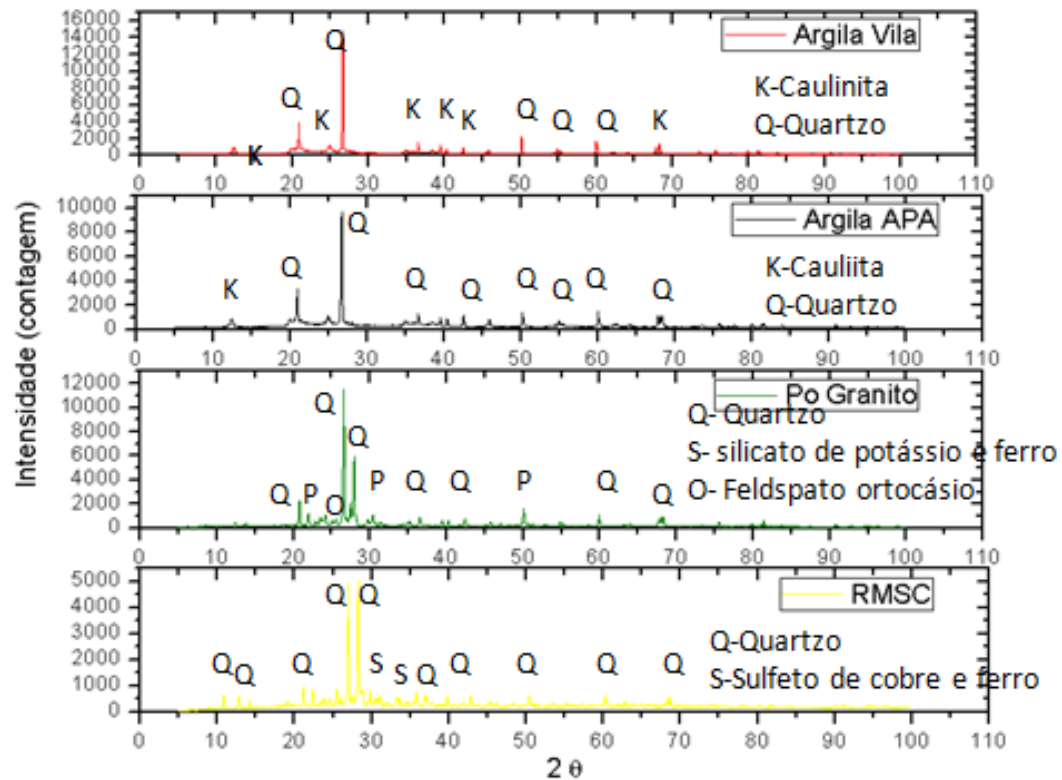
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

5.1.1 Difratomia de raios X

A caracterização mineralógica das argilas APA e vila rural 13, pó de granito e RMSC foram determinados por difratometria de raios X. A Figura 16 representa o difratograma das matérias-primas utilizadas. Observou-se, a partir dos picos, que as fases encontradas para ambas as argilas foram Caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5[\text{OH}]_4$), e Quartzo (SiO_2).

Figura 16: Difratoograma de raios X da argila APA, vila rural 13, pó de granito e RMSC



Fonte: Autor, 2017

A caulinita é um silicato de alumínio hidratado e confere plasticidade a massa cerâmica. O quartzo é uma das formas cristalinas da sílica (SiO_2), possui estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica, pode influenciar de maneira significativa no comportamento de plasticidade da massa cerâmica, pois age como redutor de plasticidade.

Para o pó de granito os elementos presentes foram quartzo (SiO_2), feldspato ortoclásio (KAISi_3O_3) e silicato de potássio e ferro, esses minerais são provenientes de rocha granítica. O difratograma de raios-X do RMSC, apresentando como minerais principais a calcopirita (CuFeS_2), característica do rejeito proveniente da mina do Sossego- PA e o quartzo (SiO_2).

Segundo (PINHEIRO, *et al.*, 2014) a análise química realizada para o RMSC, mostrou que o teor de ferro no rejeito é superior à 23%, o que possibilita a presença de alguns minerais de ferro, como: Cummingtonita ($(\text{Mg,Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), Lizardita ($(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$), Clintonita ($\text{Ca}(\text{Mg,Al})_3(\text{Al}_3\text{SiO}_{10})(\text{OH})_2$).

5.2 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

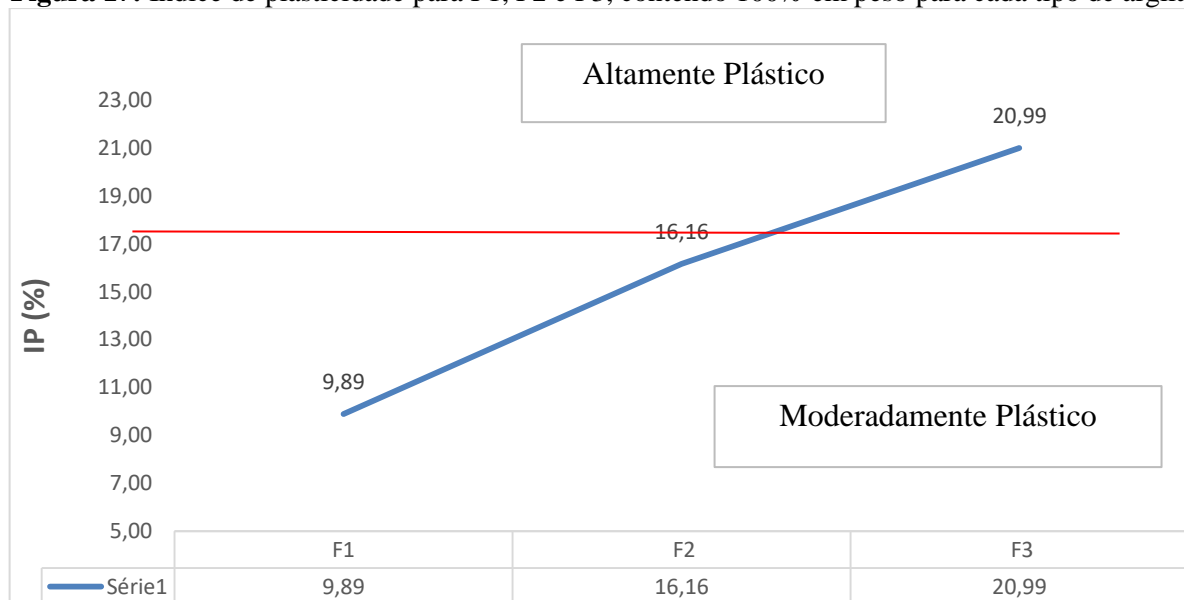
5.2.1 Índice de Plasticidade (IP)

A Figura 17 representa a curva de IP apenas para as argilas APA e vila rural 13 e Loteamento VS10. Pode-se observar que a F1 contendo apenas argila Loteamento VS10 foi a que possuiu menor IP, sendo considerada moderadamente plástica, devido o valor de IP ter sido baixo essa argila não foi utilizada para a incorporação dos rejeitos, apenas foram utilizadas F2 compreendendo a argila APA e F3 denominada Vila rural 13.

O gráfico da Figura 18 representa os resultados da incorporação do RMSC em proporções de 6%, 12% e 15% em peso na argila APA. Enquanto que a figura 19 representa os resultados de IP para a incorporação do RMSC nas mesmas proporções citadas anteriormente, mas incorporado na argila Vila rural 13.

Não foi possível obter o LP e LL para o pó de granito, conseqüentemente não se pode determinar o IP, considerando-se assim o rejeito como não plástico.

Figura 17: Índice de plasticidade para F1, F2 e F3, contendo 100% em peso para cada tipo de argila

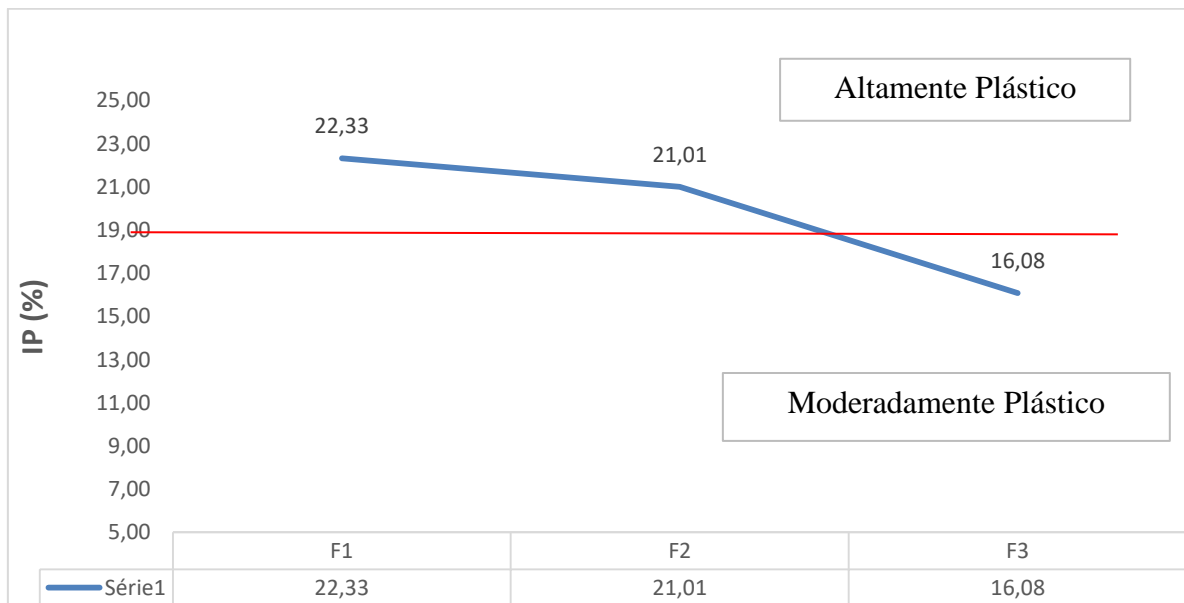


Fonte: Autor, 2017

Segundo Papini (2013), as argilas são classificadas em fracamente plásticas ($IP < 7\%$), medianamente plásticas (IP entre 7 e 15%) e altamente plásticas ($IP > 15\%$). Os resultados da determinação do índice de plasticidade para as argilas estudadas mostram que o IP da argila Vila rural 13 foi de 20,99%, enquanto que para APA esse valor foi de 16,16%, confirmando assim que são altamente plásticas.

Para Souza Santos (1989), as condições para uma argila apresentar plasticidade são: a presença de filmes estáveis de água na superfície das partículas; minerais com clivagens definidas, pois as superfícies clivadas facilitam a orientação das moléculas de água, sendo os minerais de morfologia lamelar mais plásticos do que os que têm clivagem perfeita em outro hábito cristalino; os argilominerais são os mais plásticos dos minerais de morfologia lamelar.

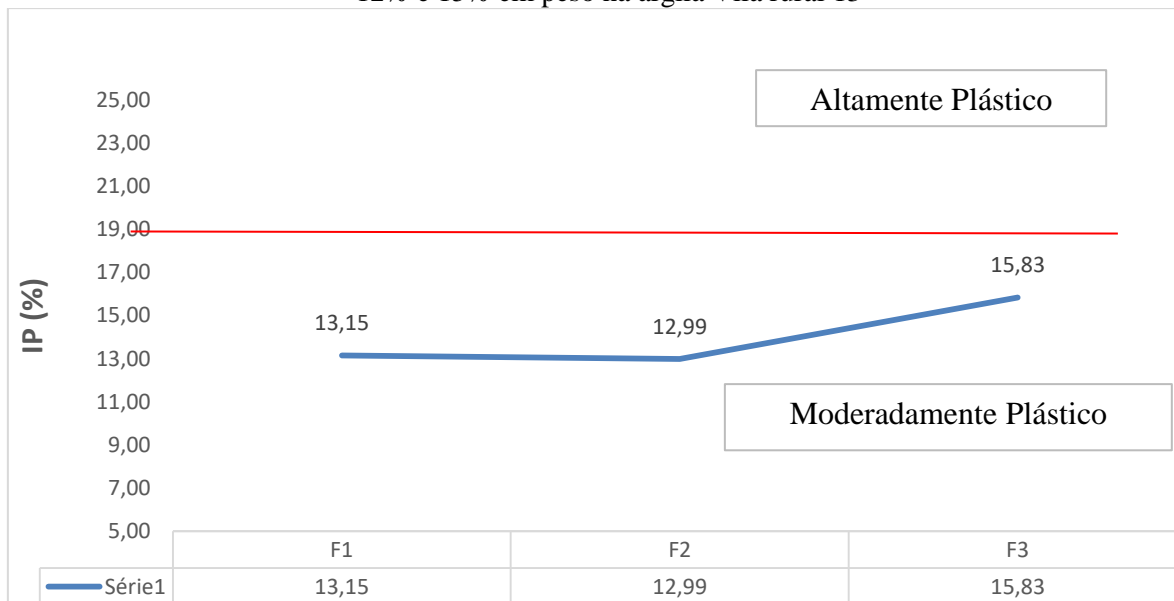
Figura 18: Índice de plasticidade para as formulações com adições de RMSC nas proporções de 6%, 12% e 15% em peso na argila APA



Fonte: Autor, (2017)

Como mostra o gráfico da Figura 18, a formulação F1 contendo 6% em peso de RMSC, possui um IP de 22,33% considerado altamente plástico, a partir do aumento do teor de rejeito para 12% na F2 e 15% na F3 o IP passa a diminuir. Porém, todas as formulações possuem valores significativamente altos em relação a esta propriedade.

Figura 19: Índice de plasticidade para as formulações com adições de RMSC, nas proporções de 6%, 12% e 15% em peso na argila Vila rural 13



Fonte: Autor, (2017)

Os resultados de IP representados na Figura 19, mostrou que as formulações F1 e F2 contendo 6% e 12% de RMSC em peso na argila Vila rural apresentou valores de IP quase constantes, à medida em que o teor de RMSC aumenta para 15% na F3, o IP também aumentou. Apesar da argila Vila Rural 13 ter apresentado IP maior dentre todas quando analisada apenas as argilas, com a incorporação do rejeito passou a comportar-se de forma contrária, obtendo um IP menor. Esta diferença de plasticidade pode estar associada ao argilomineral que deu origem à argila, pois cada espécie de mineral dará à argila uma plasticidade diferente. A fase líquida permite a deformação, ou seja, o deslocamento das partículas, umas sobre as outras, e o que mantém o sistema coeso são as forças de capilaridade. Quando a argila tem sua umidade retirada, a água que ela possuía da fase líquida evapora e a nova umidade acrescentada na argila seca, apesar de bem misturada, não consegue tornar a massa homogênea como antes, isso faz com que o índice de plasticidade da argila diminua. (TORETTI, *et al*, 2012)

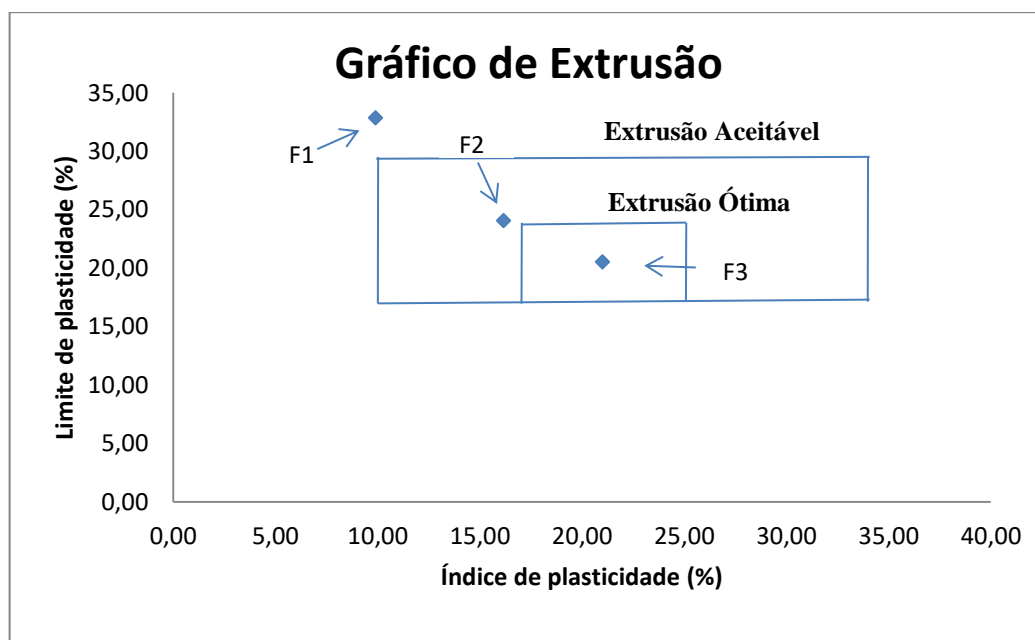
A influência da presença de materiais não plásticos como RMSC que possui quartzo na sua estrutura e foi comprovado pela difratometria de raios X, pode também ter influenciado na redução do IP. Isto se deve ao fato de que o quartzo não desenvolve misturas plásticas, mesmo com tamanho de partícula muito pequeno, menor que 0,002 mm. Portanto, é considerado um material não plástico. Sua presença irá facilitar a remoção da umidade

durante a secagem e, como já foi mencionado anteriormente, tende a diminuir a plasticidade das massas cerâmicas. (TORETTI, *et al*, 2012)

5.2.2 Zonas de Extrusão (ZE)

A Figura 20 apresenta as zonas de extrusão para as formulações contendo apenas argila APA, Vila Rural 13 e Loteamento VS10. A Figura 21 representa os resultados de zonas de extrusão para a incorporação de RMSC nas proporções de 6%, 12% e 15 % em peso na argila APA. Enquanto que o gráfico da Figura 22 está exposto os resultados da incorporação do RMSC nas mesmas proporções citadas acima, mas para a argila Vila rural 13. Não foi incorporado o RMSC na argila Loteamento VS10, pois a partir do resultado de IP, verificou-se que a mesma possui pequenos valores de plasticidade, não sendo conveniente o seu uso em massas de cerâmicas vermelhas. Para uma extrusão aceitável a amostra deve apresentar IP entre 10 e 34% e LP entre 18 e 31%. No entanto, para uma extrusão ótima os valores para IP devem estar entre 15 e 25% e os de LP entre 18 e 25%.

Figura 20: Zonas de extrusão para F1, F2 e F3 contendo 100% em peso para cada argila

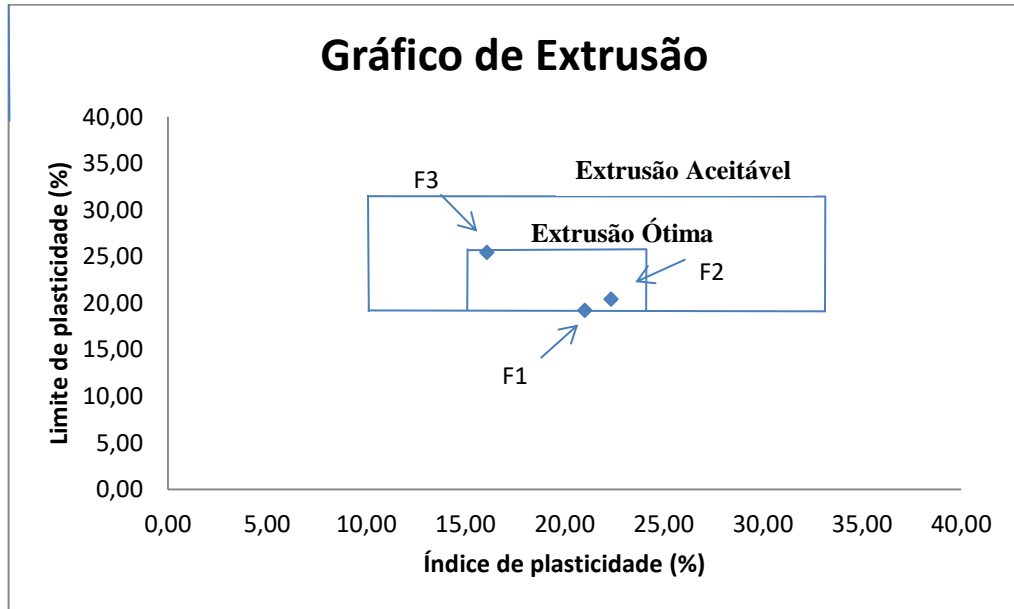


Fonte: Autor, 2017

Os resultados de extrusão para as argilas mostraram que a F1 contendo apenas argila Loteamento VS10 ficou fora dos limites determinados para a utilização em massas de

cerâmica vermelha, a F2 sendo constituída de argila APA encontra-se dentro da extrusão aceitável, enquanto que a argila F3 denominada vila rural 13 está dentro da extrusão ótima.

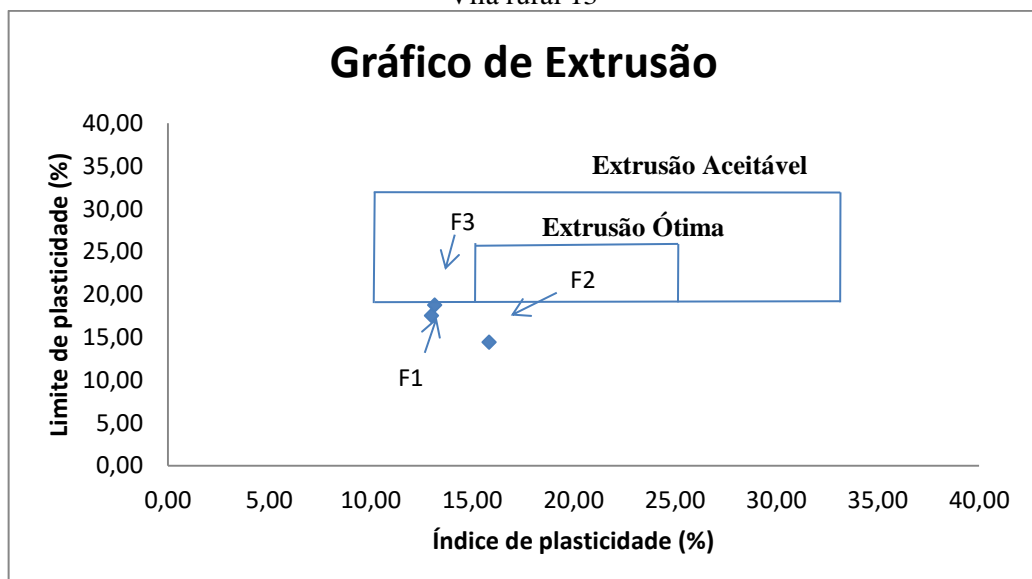
Figura 21: Zonas de extrusão para F1, F2 e F3, contendo 6%, 12% e 15% em peso de RMSC na argila APA



Fonte: Autor, 2017

O gráfico da Figura 21 mostrou que as formulações F1 e F2, contendo 6% e 12% em peso de RMSC na argila APA, apresentaram os resultados dentro da zona ótima de extrusão. Enquanto que a F3 contendo 15% RMSC ficou na zona aceitável de extrusão.

Figura 22: Zonas de extrusão para F1, F2 e F3 contendo 6%, 12% e 15% em peso de RMSC na argila Vila rural 13



Fonte: Autor, 2017

No gráfico da Figura 22, os resultados mostraram que a incorporação de RMSC na argila Vila rural 13, apenas a F3 contendo 15% de rejeito ficou dentro da zona de extrusão aceitável, as formulações F2 e F3 contendo 12% e 15% em peso de RMSC ficaram fora dos limites. Como a argila Vila rural 13 apresentou valor ótimo para o índice de plasticidade e ficou dentro da zona de extrusão ótima quando analisada só as argilas, com a incorporação do RMSC a tendência foi a diminuição da plasticidade da massa cerâmica, pois o rejeito tem característica de não ser plástico.

6 CONCLUSÃO

A incorporação de rejeitos na fabricação de cerâmica vermelha é uma alternativa viável e ambientalmente correta. Os resultados deste trabalho mostraram a viabilidade da incorporação de RMSC em massas cerâmica, a partir do estudo das propriedades de caracterização mineralógica das matérias-primas, ensaios tecnológicos de limites de Atterberg, índice de plasticidade e zonas de extrusão. Enquanto que para o rejeito de pó de granito não foi possível determinar os limites de Atterberg, sendo classificado como não plástico.

As formulações contendo argila APA e adição de RMSC nas proporções de 6%, 12% e 15% em peso, apresentaram limites de Atterberg e zonas de extrusão dentro do intervalo indicado para utilização em cerâmica vermelha, mostrando a viabilidade da incorporação do rejeito até um teor de 15%. Para as formulações contendo argila Vila rural 13 adição de RMSC nas mesmas proporções os valores de limites de Atterberg foram menores, apenas a F3 contendo 15% de rejeito em peso apresentou resultado dentro da zona de extrusão aceitável, enquanto que a F1 e F2 contendo 6% e 15% em peso ficou fora das zonas de extrusão, devido a argila Vila rural 13 já possuir índice de plasticidade elevado e já está adequada para utilização em massas de cerâmica vermelha sem adição de rejeitos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Realizar outras técnicas de caracterização para obter maior conhecimento sobre as fases presentes.
- b) Realizar ensaios tecnológicos, tais como: densidade aparente, retração linear de queima, absorção de água, porosidade aparente, e resistência mecânica.

REFERÊNCIAS

ABDI- Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Estudo Técnico Setorial da Cerâmica Vermelha.** Disponível em <http://www.abdi.com.br/Estudo/05prova_p%C3%A1gina%20C3%BAnica%2020Cer%C3%A2mica%20Vermelha.pdf>. Acesso em 10 de Março de 2017.

ABCERAM- Associação Brasileira de Cerâmica. **Cerâmica Vermelha- Considerações Gerais.** Disponível em <<http://abceram.org.br/ceramica-vermelha/>>. Acesso em 14 de Fevereiro de 2017.

ANICER. Associação Nacional da Indústria Cerâmica. **Relatório Anual- Perfil.** Disponível em <http://portal.anicer.com.br/wp-content/uploads/2015/09/relatorio_2014.pdf>. Acesso em 16 de Fevereiro de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6459.** Solo-Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7180.** Solo- Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7250.** Identificação e Descrição de Amostras de Solos Obtidas em Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos. Rio de Janeiro, 1982. 3 p

ARAÚJO, N. C. *et al.* **Propriedades Mecânicas de Tijolos Fabricados com Solo e Água Residuária de Mandioca.** Revista Verde (Pombal - PB - Brasil) v. 10, n.2, p. 213 – 217, abr-jun, 2015.

ARRUDA MAGALHÃES, M.V. **Remoção de Carbonatos para Otimizar a Biolixiviação de Rejeito Calcopirítico Empregando Consórcio de Microrganismos.** 2016. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

BERGAMAN, M.G. **Modelagem e Simulação de Circuito de Moagem do Sossego**. 2009. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

Belavistatijolos. (2014). Disponível em: <<http://www.belavistatijolos.com.br/processo.html>>. Acesso em: 10 de Março de 2017.

BATALIONE, G. **Estabilização de Solos Tropicais com a Utilização de Rejeitos Finos de Pedreira de uma Rocha Granítica**. 2007. 190 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica). Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil, 2007.

BLACKBURN, S.; LAWSON, T.A. “**Mullite-Alumina Composites by Extrusion**”, *J. Am. Ceram. Soc.*, n. 75, v. 4, p. 953-57, 1992

CABRAL JUNIOR, M. **Argilas para Cerâmica Vermelha**. Rochas e Minerais Industriais. Centro de Tecnologia Mineral, 2005.

CALLISTER, WILLIAM D.; RETHWISH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. Tradução: Sergio Murilo Stamile Soares. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CORDEIRO, P. (1993). **Moldes de Fieira, Fatores de Funcionamento Acerto e [13] Afinação**. Parte I, *Cerâmicas*, n. 17, p. 81- 84.

COSTA CALDAS, C. T. **Utilização de Escória de Alto Forno e Rejeito de Cobre em Massa Cerâmica Vermelha**. Universidade Federal do Pará. (Trabalho de Conclusão de Curso). Faculdade de Engenharia de Materiais. Marabá, 2010.

DONDI, M. *et al.* **Resenha das Experiências e Reciclagem de Resíduos Industriais e Urbanos na Produção de Tijolos**. *Cerâmica Informação*, p.17-29, 1998.

FACINCANI, E. “**Tecnología Cerámica - Los Ladrillos**”, Faenza Editrice Iberica S.L., Castellón, 1993.

FERNANDES, P. F. *et al.* **Reciclagem do lodo da Estação de Tratamento de Efluentes de uma Indústria de Revestimentos Cerâmicos.** Parte 1: Ensaios laboratoriais. Revista Cerâmica Industrial, v. 8, n. 2, p. 26-27, 2003.

GAIDZINSKI, R. *et al.*, 2005). **Sazoneamento e Homogeneização de Argilas em Pilhas.** Cerâmica Industrial, v. 10, n. 5/6, p. 19-22.

GURGEL, J. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia- IFPA/RN- **Apostila Solos.** Disponível em <<https://docente.ifrn.edu.br/johngurgel/disciplinas/2.2051.1v-mecanica-dos-solos-1/apostila%20de%20solos.pdf>>. Acesso em 16 de Fevereiro de 2017.

LEGGERINI, M. R. C. **Materiais Cerâmicos.** Disponível em: <http://www.feng.pucrs.br/professores/mregina/ARQUITETURA_Materiais_Tecnicas_e_Estruturas_I/estruturas_i_capitulo_II_materiais_ceramicos.pdf>. Acesso em 10/03/2017.

LEITE PINHEIRO, C. L. **Processamento e Avaliação das Propriedades Tecnológicas de Porcelanato Obtido com Adição de Rejeito de Minério Sulfetado de Cobre.** (Trabalho de Conclusão do Curso). Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Faculdade de Engenharia de Materiais. Marabá, 2013.

LOPES SOUZA, L. **Aproveitamento de Resíduos de Caulim em Cerâmica Branca.** 2007. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.

MEIRELLES, N. D. **Aproveitamento de Rejeitos Oriundos da Extração de Minério de Ferro na Fabricação de Cerâmicas Vermelhas.** 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais). Universidade Estadual Paulista, 2011.

MENEZES, R. *et al.*, 2002. **O Estado da Arte sobre o Uso de Resíduos como Matérias-Primas Cerâmicas Alternativas.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 6: 303-313.

MOTTA, J. F. M. *et al.*, 2001. **As Matérias-Primas Cerâmicas.** Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e seus Produtos. Cerâmica Industrial, v. 6, n. 2, p. 28-39.

PINHEIRO, C. L; RABELO, A.A; ACHCAAR, W; OLIVEIRA, R.M.P.B. **Incorporação de Rejeito de Minério Sulfetado de Cobre nas Propriedades Tecnológicas de Revestimentos Cerâmicos**. Anais do 12º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2014.

PIZATTO, R., **Utilização de Resíduos Industriais como matéria-prima para a elaboração de Tijolos**. Relatório de Iniciação Científica. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, 2001.

PORTO ROSSI, M. A., **AS ARGILAS**. Disponível em: <www.portorossi.art.br/as_argilas.htm>. Acessado em 10/03/2017.

POTRICH REIS, J. **Incorporação de Resíduos Industriais em Massas Cerâmicas Usada na Fabricação de Tijolos**. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de Santa Catarina, 2007.

RAUPP BITENCOURT, E. **Utilização de Matéria-Prima Alternativa na Fabricação de Tijolos de Argila Vermelha e Branca**. 2004. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de Santa Catarina, 2004.

RIBEIRO, C.G *et al.* **Estudo sobre a Influência da Matéria Orgânica na Plasticidade e no Comportamento Técnico de uma Argila**. Cerâmica Industrial, v.9, p.1-4, 2004.

RIBEIRO, M.J; FERREIRA, A.A.L; LABRINCHA, J.A. **Aspectos Fundamentais sobre a Extrusão de Massas Cerâmicas Vermelhas**. Cerâmica Industrial, v8, p.1-6, 2003

SANTOS, F. **Influência do Resíduo de Cinza de Serragem de Madeira nas Propriedades Técnicas de Cerâmica Vermelha**. 2016. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2016.

SEBRAE- Serviço Brasileiro de Apoios às Micro e Pequenas Empresas. **Cerâmica Vermelha- Estudo de Mercado**. Disponível em: <<http://www.sebraemercados.com.br/wp-content/uploads/2015/09/ESTUDO-CERAMICA-VERMELHA.pdf>>. Acesso em 13 de Fevereiro de 2017.

SHIMIZU, K. V. **Classificação e Caracterização de Tipos de Minério de Cobre da Mina do Sossego-Região de Carajás**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas**, Ed. Edgard Blucher; 2ª edição, São Paulo, 1989, volume1.

TORETTI, I. **Estudo da Determinação da Plasticidade de Matérias-Primas Cerâmicas Utilizando o Método de PFEFFERKORN**. 1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense, 2012

VAN VLACK, L. H. **Princípios de ciência dos materiais**. Tradução: Luiz Paulo Camargo Ferrão. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

VILLEGAS, R *et al.* **Caracterização de Argilas Naturais Brasileiras e Sua Utilização em Reações de Cooidação de Alquenos**. Anais do 12º Congresso Brasileiro de Catálise, Angra dos Reis/RJ, p. 296-299, 2003.

REED, J.S.; MARTIN, T.J.; CARLSON, W.G. “**Mechanics of Extrusion**”, Science of Whitewares, Published by the American Ceramic Society, p. 157-168, USA, 1996.