



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS



DISSERTAÇÃO DO MESTRADO

Marcos Emmanuel Araujo Carreiro

ESTUDO DA VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE QUARTZITO
NA MASSA DE CERÂMICA VERMELHA

Campina Grande - PB

2016

Marcos Emmanuel Araujo Carreiro

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE QUARTZITO
NA MASSA DE CERÂMICA VERMELHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito à obtenção do título de **Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Lisiane Navarro de Lima Santana

Co-orientador: Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Agência Financiadora: CAPES

Campina Grande – PB

2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

C314e Carreiro, Marcos Emmanuel Araujo.
Estudo da viabilidade da incorporação de resíduo de quartzito na massa de cerâmica vermelha / Marcos Emmanuel Araujo Carreiro. – Campina Grande, 2016.
69f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
"Orientação: Profa. Dra. Lisiane Navarro de Lima Santana, Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves".

1. Resíduos Sólidos. 2. Rochas Ornamentais. 3. Resíduo de Quartzito. 4. Cerâmica Vermelha. I. Santana, Lisiane Navarro de Lima. II. Neves, Gelmires de Araújo. III. Título.

CDU 628.312.1(043)

VITAE DO CANDIDATO

- Engenheiro de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG (2013)

MARCOS EMMANUEL ARAÚJO CARREIRO

ESTUDO VIABILIDADE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE QUARTZITO
NA MASSA DE CERÂMICA VERMELHA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial à obtenção do título de **Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais**.

Aprovado em: 17/02/2016



Dr.^a Lisiane Navarro de Lima Santana
Orientadora
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG



Dr. Gelmires de Araújo Neves
Orientador
PPG-CEMat/UAEMa/UFCG



Dr. Reginaldo Severo de Macedo
Examinador Externo
UAEMa/UFCG



Dr.^a Ester Pires de Almeida
Examinadora Externa
PNPD/UFCG

AGRADECIMENTOS

A vida é feita de desafios, e se torna mais fácil passar por eles quando temos em nossas vidas pessoas que nos dão força, apoio, carinho e amor. Hoje, ultrapasso mais um desafio colocado em meu caminho, por isso, quero deixar aqui os meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma maneira contribuíram para que eu vencesse mais uma batalha em minha vida.

Quero agradecer:

A DEUS, primeiramente, pois sem Ele não somos nada, por ter iluminado meu caminho e me guiado até mais esta conquista.

Aos meus pais, Arnaldina Muniz e Hamilton Brito, por tudo que são para mim, pelo amor, carinho e dedicação que me deram e dão até hoje. Vocês são meu exemplo, são tudo em minha vida.

A minha irmã, Jéssyca Renalle, pelo amor e apoio dado a mim durante todos esses anos. Apesar de ser mais nova, é um exemplo de mulher guerreira e persistente naquilo que busca.

A minha tia-irmã, Adriana Muniz, que muitas vezes cuidou de mim como uma mãe.

A minha noiva, Kellyane Freitas, companheira, amiga de todas as horas e futura esposa, que esteve ao meu lado durante todos esses anos. Agradeço-te pelo total apoio e pela força que me destes até aqui. És um presente de Deus em minha vida.

A Prof.^a Dr.^a Lisiane e ao Prof. Dr. Gelmires, pelo conhecimento compartilhado e também pela orientação que me deram durante a execução desse trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, pelos conhecimentos que foram divididos durante o período do mestrado.

A CAPES, pelo apoio financeiro.

E por fim, mas não menos importante, aos colegas do Laboratório de Tecnologia de Materiais, pelo apoio e suporte dado durante a realização dos trabalhos em laboratório.

RESUMO

Nos últimos anos vem aumentando a preocupação com os impactos ambientais gerados pelos resíduos, principalmente os provenientes do beneficiamento de rochas ornamentais. Estes resíduos podem apresentar conteúdos apreciáveis de óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O). Além disso, podem conter quantidades significativas de óxido de ferro (Fe_2O_3). Do ponto de vista mineralógico, dependendo do tipo de rocha ornamental, podem ser constituídos de quartzo, feldspato, mica e calcita. Tais características tornam os resíduos de rochas ornamentais atrativos como uma matéria-prima alternativa para fabricação de materiais da cerâmica tradicional, enfatizando também os aspectos relacionados à questão ambiental, preservação de recursos minerais não renováveis e do meio ambiente. Dentro deste contexto, este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade da incorporação do resíduo de quartzito em uma massa empregada na fabricação de produtos da cerâmica vermelha. As matérias-primas foram submetidas às análises química, granulométrica, térmica, mineralógica e determinação da plasticidade. Foi feito também a classificação do resíduo. Foram formuladas massas com 5, 10, 15 e 20% em peso de resíduo de quartzito, posteriormente conformadas, por meio do processo de prensagem, e queimadas a 800, 900 e 1000°C. Após queima dos corpos de prova, foram determinadas as propriedades físico-mecânicas: absorção de água, retração linear, porosidade aparente, massa específica aparente e resistência à flexão. Foi avaliada também a cor e fases mineralógicas formadas, além de análise da superfície de fratura por meio de microscopia eletrônica de varredura. O resíduo e as massas foram analisados quanto às características de toxicidade. Os resultados evidenciaram que, para a massa estudada, pode ser adicionado até 20% do resíduo de quartzito.

Palavras-chave: quartzito, resíduos sólidos, cerâmica vermelha.

ABSTRACT

In recent years has been increasing concern about the environmental impacts caused by waste, mainly from the ornamental stone processing. These residues may have appreciable content of silicon oxide (SiO_2), aluminum oxide (Al_2O_3), calcium oxide (CaO), and alkali oxides (Na_2O and K_2O). Furthermore, it may contain significant amounts of iron oxide (Fe_2O_3). From the mineralogical standpoint, depending on the type of ornamental rock, may be constituted of quartz, feldspar, mica and calcite. These characteristics make the waste attractive natural stone as an alternative raw material for the production of traditional ceramic materials, also emphasizing the aspects related to environmental issues, preservation of non-renewable mineral resources and the environment. Within this context, this work aimed to study the feasibility of incorporating quartzite residue in a mass employed in the manufacture of red ceramic products. The raw materials were subjected to chemical analysis, particle size, thermal, mineralogical and determination of plasticity. It was also made the classification of waste. Masses were formulated with 5, 10, 15 and 20% by weight of quartzite residue subsequently shaped by means of pressing process, and fired at 800, 900 and 1000 ° C. After burning of the specimens were determined the physical and mechanical properties: water absorption, linear shrinkage, apparent porosity, bulk density and bending strength. Also it evaluated the color and formed mineralogical phases, and fracture surface analysis using scanning electron microscopy. The residue and the masses were analyzed for toxicity characteristics. The results showed that, for the studied mass, can be added up to 20% of quartzite residue.

Keywords: quartzite, solid waste, red ceramic.

S. Paulo, 19 de Dezembro de 2015

Referência: 1990

Título: Resíduo de quartzito – matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural

(Residue of quartzite – alternative raw material for use in structural ceramics)

Autores: M. E. A. Carreiro, R. C. Santos, V. J. Silva, H. L. Lira, G. A. Neves, R. R. Menezes, L. N. L. Santana

Recebido..01/10/2015..Revisado..19/11/2015..02/12/2015..Aceito..19/12/2015..

Este artigo foi **aceito** para publicação. Após edição do texto, será programado para um dos próximos números da revista **Cerâmica**.

Agradecemos a colaboração

Atenciosamente

R. Muccillo
Editor
Cerâmica

EDITORES ASSOCIADOS

Dr. J. A. Rodrigues Depto. de Engenharia de Materiais - DEMa Universidade Federal de S. Carlos - UFSCar, C. P. 676 S. Carlos, SP 13565-905 josear@power.ufscar.br	Dr. J. A. Varela Instituto de Química - IQ Universidade Estadual Paulista - UNESP C. P. 355 Araraquara, SP 14.800-900 varela@iq.unesp.br	Dr. A. E. Martinelli Departamento de Química - DQ Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Campus Lagoa Nova s/n Natal, RN 59072-970 aemart@uol.com.br
---	--	---

Conselho de Editores (Editorial Board)

E. A. T. Berg - UEPG - PR	J. N. F. Holanda - UENF - RJ	D. P. F. de Souza - UFSCar - SP
C. P. Bergmann - UFRGS - RS	R. H. G. A. Kiminami - UFSCar - SP	W. L. Vasconcelos - UFMG - MG
C. E. Borsa - U. Tuiuti - PR	D. M. A. Melo - UFRN - RN	C. M. F. Vieira - UENF - RJ
A. H. A. Bressiani - IPEN - SP	E. N. S. Muccillo - IPEN - SP	E. D. Zanotto - DEMa - UFSCar - SP
J. C. Bressiani - IPEN - SP	R. M. Nascimento - UFRN - RN	
J. A. Eiras - UFSCar - SP	M. C. S. Nóbrega - UFRJ - RJ	J. L. Baptista - Univ. de Aveiro - Portugal
D. Gouvêa - USP - SP	V. C. Pandolfelli - UFSCar - SP	R. C. Bradt - U. Alabama - USA
J. N. F. Holanda - UENF - RJ	J. O. A. Paschoal - IPEN - SP	J. B. Carda - U. Castellón - Spain
D. Hotza - UFSC - SC	S. A. Pianaro - UEPG - PR	M. S. Castro - U. Mar del Plata - Argentina
R. G. H. A. Kiminami - UFSCar - SP	S. H. Pulcinelli - UNESP - SP	J. F. Fernandez - ICV-CSIC - Spain
P. Kiyohara - USP - SP	W. de Souza Resende - IBAR - SP	P. Greil - F-Alexander-U. Erlangen - Germany
F. A. Lameiras - CDTN - MG	H. G. Riella - UFSC - SC	A. M. Segadães - Univ. de Aveiro - Portugal
E. R. Leite - UFSCar - SP	C. V. Santilli - UNESP - SP	A. Sin - Pirelli Labs - Italy
L. H. Leme Louro - IME - RJ	M. Sekler - IPT - SP	M. C. Steil - U. Lille - France
E. Longo - UFSCar - SP	C. R. M. Silva - CTA - SP	E. Traversa - NIMS, Tsukuba - Japan M. Velez - U. Missouri-Rolla - USA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resíduos de quartzito (a) grosso e (b) fino.....	17
Figura 2 - Prensa utilizada para conformação dos corpos de prova.	30
Figura 3 - Espectros de difração de raios X das massas A, B C, D e E (a) e do quartzito (b). M= mica; C= Caulinita; F= Feldspato; Q= Quartzo; E= Esmectita; Ca= Calcita.	36
Figura 4 - Análise térmica do resíduo de quartzito (a) e das massas A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f).....	38
Figura 5 - Análise granulométrica do resíduo de quartzito (a) e das massas A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f).....	40
Figura 6 - Classificação granulométrica das massas de acordo com o Diagrama de Winkler.....	41
Figura 7 - Retração linear das amostras estudadas.....	43
Figura 8 - Porosidade aparente das amostras estudadas após a queima.	44
Figura 9 - Absorção de água das amostras estudadas após a queima.....	45
Figura 10 - Massa específica aparente das amostras estudadas após queima.	46
Figura 11 - Módulo de ruptura a flexão das amostras estudadas após queima.	46
Figura 12 - Módulo de Ruptura a Flexão x Porosidade após queima a 800 (a), 900 (b) e 1000 °C (c).	48
Figura 13 - Corpos de prova após a queima a 800, 900 e 1000 °C das massas A (a), B (b), C (c), D (d) e E (e).....	49
Figura 14 - Espectros de difração de raio X após queima das massas A (a), B (b), C (c), D (d) e E (e). Mi= mica; S= Espinélio; Q= Quartzo; F= Feldspato; H= Hematita; M= Mulita.....	51
Figura 15 - Curvas Dilatométricas das massas A, B, C, D e E.....	56
Figura 16 - Micrografias obtidas através de MEV: (a) Massa A - 900°C); (b) Massa A - 1000°C; (c) Massa B - 900°C e (d) Massa B - 1000°C.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Formulações das massas que foram utilizadas.	29
Tabela 2 - Composição química das amostras estudadas.....	37
Tabela 3 - Frações da composição granulométrica das amostras estudadas.....	41
Tabela 4 - Limites de Atterberg das massas cerâmicas.....	42
Tabela 5 - Percentuais das fases cristalinas da massa A após a queima a 800, 900 e 1000°C.....	52
Tabela 6 - Percentuais das fases cristalinas da massa B após a queima a 800, 900 e 1000°C.....	53
Tabela 7 - Percentuais das fases cristalinas da massa C após a queima a 800, 900 e 1000°C.....	53
Tabela 8 - Percentuais das fases cristalinas da massa D após a queima a 800, 900 e 1000°C.....	54
Tabela 9 - Percentuais das fases cristalinas da massa E após a queima a 800, 900 e 1000°C.....	55
Tabela 10 - Resultado ensaio de lixiviação.	58
Tabela 11 - Resultado ensaio de solubilização.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
	2.1 Objetivo Geral	16
	2.2 Objetivos Específicos	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
	3.1 Quartzito	17
	3.2 Cerâmica tradicional	18
	3.2.1 Indústria da cerâmica vermelha	19
	3.3 Resíduos Sólidos e sua Utilização na Cerâmica Vermelha	21
	3.3.1 Rochas ornamentais	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	28
	4.1 Materiais	28
	4.2 Métodos	28
	4.2.1 Caracterização das matérias-primas	28
	4.2.1.1 Caracterização mineralógica	28
	4.2.1.2 Caracterização química	28
	4.2.1.3 Caracterização térmica gravimétrica e diferencial	29
	4.2.1.4 Caracterização granulométrica por difração a laser	29
	4.2.1.5 Plasticidade	29
	4.2.2 Formulação e processo de conformação das massas cerâmicas	29
	4.2.2.1 Formulação.....	29
	4.2.2.2 Processo de conformação.....	30
	4.2.3 Etapa de queima.....	30
	4.2.4 Caracterização dos corpos de prova	31
	4.2.4.1 Retração linear de secagem.....	31
	4.2.4.2 Retração linear após a etapa de queima	31
	4.2.4.3 Porosidade aparente (PA)	32
	4.2.4.4 Absorção de água (AA)	32
	4.2.4.5 Massa específica aparente (MEA).....	33
	4.2.4.6 Tensão de ruptura a flexão (TRF)	33
	4.2.6.7 Análise dilatométrica	33
	4.2.6.8 Microscopia eletrônica de varredura.....	33

4.2.6.9	Classificação do resíduo e das massas contendo o resíduo	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1	Caracterização das Matérias-Primas	35
5.1.1	Caracterização mineralógica	35
5.1.2	Caracterização química	36
5.1.3	Caracterização térmica gravimétrica e diferencial	37
5.1.4	Caracterização granulométrica por difração a laser	39
5.1.5	Plasticidade	42
5.2	Caracterização dos Corpos de Prova	43
5.2.1	Retração linear	43
5.2.2	Porosidade aparente (PA)	44
5.2.3	Absorção de água (AA).....	45
5.2.4	Massa específica aparente (MEA).....	45
5.2.5	Módulo de ruptura a flexão (MRF)	46
5.2.6	Avaliação da mudança da coloração dos corpos de prova após a queima.....	48
5.2.7	DRX das amostras após a queima e percentuais de fases cristalinas	49
5.2.8	Análise Dilatométrica	55
5.2.9	Microscopia Eletrônica de Varredura	56
5.2.10	Classificação do resíduo e das massas contendo o resíduo	58
6	CONCLUSÃO.....	60
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
	ANEXO.....	70
I.	Tabela com as propriedades físico-mecânicas das massas estudadas.....	70

1 INTRODUÇÃO

Ao longo do tempo, os recursos naturais têm sido utilizados de forma indiscriminada, gerando quantidades significativas de resíduos (Nandi *et al.*, 2015), o que tem causado sérios danos ao meio ambiente, havendo uma necessidade global de gerenciamento e reaproveitamento dos mesmos. As técnicas de gestão dos resíduos têm evoluído, e devido à quantidade gerada e sua complexidade, o destino desses tornou-se uma das principais preocupações da sociedade (Brunner & Rechberger, 2015).

Os processos de reciclagem de resíduos sólidos buscam reduzir o consumo de matérias-primas, minimizar os problemas de poluição e os custos de tratamento (Vsévolod *et al.*, 2015), estimulando pequenas e grandes empresas a procurar soluções alternativas, considerando a legislação ambiental (Nirmala & Viruthagiri, 2015).

Em vários países, milhões de toneladas de resíduos inorgânicos são gerados a cada ano, muitos são oriundos das atividades de empresas mineradoras, esses são descartados em aterros sem nenhum tratamento prévio, causando problemas à saúde da população e sérios impactos ambientais (Menezes *et al.*, 2007).

A indústria de rochas ornamentais apresentou notável crescimento nos últimos anos, impulsionado pelo setor de construção civil, monumentos e esculturas. O segmento de rochas ornamentais somou exportações de US\$ 421,15 milhões no período de Janeiro a Maio de 2012. Registrou-se nesse período uma variação positiva de 12,29% no faturamento e 7,34% no volume físico de exportações do país frente ao mesmo período do ano de 2011 (Taguchi *et al.*, 2014). O Brasil detém forte atividade de extração e beneficiamento de granito, mármore, ardósia, diorito, gnaisse, quartzito, etc. Os principais produtores são os estados do Espírito Santo, Paraíba, Rio Grande do Norte, Bahia, Ceará, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, São Paulo e Rio de Janeiro (Manhães *et al.*, 2009).

Durante os processos de beneficiamento das rochas de quartzito, há perdas significativas de material e geração de resíduos, os quais têm sido dispostos de forma inadequada na natureza, sem previsão de utilização (Babisk *et al.*, 2012). O quartzito é classificado geologicamente como uma rocha metamórfica, composta quase que inteiramente de grãos de quartzo. Sua origem tem relação com a ação de

processos metamórficos desenvolvidos principalmente sobre rochas sedimentares ricas em quartzo, tais como arenitos e cherts (Babisk *et al.*, 2012).

Produtos da cerâmica tradicional como telhas, blocos e revestimentos cerâmicos geralmente apresentam grande variação de composição devido ao largo intervalo de composições das argilas e minerais utilizados como matérias-primas para sua fabricação, o que torna possível a incorporação de resíduos nas suas formulações, aliado as elevadas quantidades de recursos naturais consumidos a cada dia por esse segmento industrial, ressalta a importância da reutilização de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas, racionalizando o uso dos recursos naturais (Menezes *et al.*, 2007).

Dentro deste contexto, os fatores acima mencionados associados à preocupação com a extração de componentes não renováveis, assim como, a semelhança entre a composição de alguns resíduos e componentes das massas da cerâmica tradicional, instigaram o desenvolvimento de pesquisas buscando incorporar resíduos em massas destinadas principalmente à indústria da cerâmica vermelha, sendo esse também o objetivo maior deste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho teve como objetivo estudar a viabilidade da incorporação do resíduo de quartzito em uma massa da cerâmica vermelha, a qual vem sendo utilizada na produção de blocos cerâmicos.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar física, química e mineralogicamente a massa cerâmica e o resíduo de quartzito;
- Desenvolver formulações com 5, 10, 15 e 20% em peso de resíduo de quartzito na massa cerâmica;
- Determinar os limites de liquidez e de plasticidade das formulações;
- Conformer corpos de prova utilizando o processo de prensagem, realizar a queima em diferentes temperaturas (800, 900 e 1000 °C), e determinar a retração linear, porosidade aparente, absorção de água e resistência à flexão em três pontos.
- Comparar os resultados obtidos com os constantes nas normas do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica).
- Avaliar a cor e as fases mineralógicas formadas após a queima, analisar a superfície de fratura por meio de microscopia eletrônica de varredura, e classificar o resíduo e as massas quanto às características de toxidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Quartzito

O quartzito é uma rocha classificada geologicamente como metamórfica, composta, em sua maioria, por grãos de quartzo. Sua origem é relacionada com a ação de processos metamórficos desenvolvidos principalmente sobre rochas sedimentares ricas em quartzo, tais como arenitos e cherts (Babisk *et al.*, 2012).

Segundo Vieira *et al.* (2013) o quartzito é uma rocha metamórfica constituída por mais de 80% de quartzo. A interpenetração dos grãos de quartzo confere à rocha uma grande tenacidade. É uma rocha dura e compacta, e possui brilho semelhante ao do quartzo. Os quartzitos contêm, além do quartzo, proporções variáveis de outros minerais, entre eles, feldspato, moscovita e biotita. Os quartzitos em geral são brancos, cinza claro, amarelo ou castanho. Podem, no entanto, ter outras cores devido a grãos microscópicos de minerais acessórios e, assim, serem esverdeados devido à presença de epidoto, azulados devido à cianita, purpúreos devido à hematita, ou clorita, e pretos devido ao grafite, à magnetita, ou a biotita.

A recristalização dessas rochas, imposta pelo metamorfismo, conduz a formação de rochas maciças ou foliadas, nas quais o quartzo se apresenta na forma de grânulos de aparência poligonal, serrilhados, unidos uns aos outros firmemente.

Durante o beneficiamento do quartzito é gerado um resíduo mais grosseiro, proveniente do corte das placas, e outro mais fino, que é gerado durante o polimento e acabamento final (ver Figura 1). É importante ressaltar que no presente trabalho será utilizado o resíduo fino do quartzito.



(a)

(b)

Figura 1 - Resíduos de quartzito (a) grosso e (b) fino.

3.2 Cerâmica tradicional

O termo cerâmica vem do grego “kerameicos” que significa “feito de terra”. Os materiais cerâmicos compreendem todos os materiais de emprego em engenharia ou produtos químicos inorgânicos, exceto os metais e suas ligas, que ficam utilizáveis geralmente pelo tratamento em temperaturas elevadas.

O setor da cerâmica tradicional é amplo e heterogêneo o que induz a dividi-lo em subsetores ou segmentos em função de diversos fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização.

- Vidros: é um grupo familiar de materiais cerâmicos; recipientes, janelas, lentes e a fibra de vidro representam aplicações desse grupo. Os vidros consistem em silicatos não cristalinos que também contem outros óxidos, notavelmente CaO, Na₂O, K₂O e Al₂O₃, os quais influenciam nas suas propriedades. Suas principais características são: transparência ótica e relativa facilidade com que podem ser fabricados (Callister, 2002).
- Cerâmica Branca: podem ser classificados em porcelana, grés e faiança. As porcelanas possuem absorção de água próxima a zero, e uma maior resistência mecânica em relação aos outros produtos. Grés são produtos com baixíssima absorção, entre 0,5 e 3%, com considerável resistência mecânica. As faianças são corpos mais porosos, com absorção de água superior a 3% e uma menor resistência mecânica, quando comparada com as demais (Guerino *et al.*, 2010).
- Refratários: estes materiais tem como propriedades a capacidade de resistir a temperaturas elevadas sem fundir ou decompor, e a capacidade de permanecer não-reativo e inerte quando são expostos a ambientes severos (Callister, 2002).
- Abrasivos: usados para desgastar por abrasão, esmerilhar ou cortar outros materiais que sejam mais moles. Sua exigência principal é a dureza ou resistência ao desgaste e, além disso, um elevado grau de tenacidade é muito importante para assegurar que as partículas abrasivas não sejam fraturadas com facilidade (Callister, 2002).
- Cerâmica Vermelha: caracteriza-se pela cor vermelha de seus produtos, que são: tijolos, blocos, telhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais,

agregados leve de argila expandida e outros. Utiliza basicamente argila comum, em que a massa é tipo monocomponente (só argila) e pode ser denominada de simples ou natural. Essa formulação de massa busca uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, para propiciar trabalhabilidade e resistência mecânica na queima. A preparação da massa é feita geralmente através da mistura de uma argila “gorda“, que é caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina, e composição essencialmente de argilominerais; com uma argila “magra“, esta rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade (Motta *et al.*, 2001). A indústria da cerâmica vermelha pode ser encontrada em praticamente todas as regiões do nosso país, pois há uma grande disponibilidade de sua matéria-prima principal, a argila, devido à formação geológica do Brasil (Paz *et al.*, 2013).

- Cimentos, gessos e cal: esses materiais têm uma grande variedade de composições, porém apresenta em comum a propriedade de pega, ou endurecimento sem calor. Eles são usados para muitos fins, variando desde a produção de uma estrutura maciça empregada para represa de um rio, ao enchimento de uma cavidade de dentes.

3.2.1 Indústria da cerâmica vermelha

A indústria da cerâmica vermelha (ou estrutural) é uma subdivisão da grande área cerâmica. Este segmento que absorve com grande facilidade a incorporação de materiais alternativos, e produz, principalmente, tijolos furados, tijolos maciços, componentes de lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos, é muito importante na geração de renda do setor industrial brasileiro (Pérez *et al.*, 2010). As empresas que compõem esse setor se distribuem pelo país, em micro e pequenas empresas, e são, em sua maioria, de organização simples e familiar (Zaccaron *et al.*, 2015).

As matérias-primas que compõem a massa, sobretudo a massa composta, podem ser agrupadas em plásticas e não plásticas. As consideradas plásticas conferem importantes características durante a etapa de conformação das peças cerâmicas, tais como trabalhabilidade e resistência mecânica a cru, e no processamento térmico, como estrutura e cor. As matérias-primas não plásticas

também atuam nas fases de conformação e secagem, diminuindo a retração das peças e favorecendo a secagem, e na fase do processamento térmico, quando desempenham o papel mais relevante, controlando as transformações, deformações e a sinterização. Devido principalmente ao seu papel na fase de queima, os materiais não plásticos são ainda qualificados de inertes, vitrificantes e fundentes (Motta *et al.*, 2002).

A argila é utilizada como matéria-prima na indústria cerâmica, pois proporciona plasticidade e resistência mecânica após queima adequada. Geralmente, são utilizadas argilas sedimentares recentes de margens de rios, lagos ou várzeas que contém matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (Souza Santos, 1989).

As argilas são materiais terrosos naturais, de granulação fina, as quais adquirem alta plasticidade quando adicionadas certa quantidade de água. Quimicamente as argilas são formadas por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio. São constituídas por partículas cristalinas de pequenas dimensões, formadas por argilominerais (silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio) (Souza Santos, 1989).

Os principais argilominerais presentes nas argilas são: caulinita, montmorilonita, illita, clorita e paligorskita.

O processo de produção pelo qual passa as peças da cerâmica tradicional até que se obtenha o produto em sua forma final é composto pelas seguintes etapas, extração da argila nas jazidas, preparação da massa, conformação das peças, secagem e queima para que, posteriormente, ocorra a estocagem e/ou transporte para o consumidor (Medeiros *et al.*, 2014).

A etapa de conformação é de fundamental importância para o processo cerâmico, uma vez que é nesta etapa que o material adquire a forma e as características estruturais que se deseja alcançar. Dependendo do tipo de produto que se deseja fabricar, um tipo de processo de conformação é escolhido para tal objetivo. Como o processo de conformação apresenta grande influência nas características do produto acabado, este deve ser devidamente controlado, pois as variáveis do equipamento e as matérias-primas podem contribuir nas características do produto final. Os processos mais comuns de conformação existentes são por colagem, prensagem a seco e extrusão (Custódio *et al.*, 2012).

A extrusão é atualmente concentrada na fabricação de cerâmicas vermelhas como tijolos e telhas. Está associada a uma alta produtividade, principalmente para produtos de seção transversal constante, onde a homogeneização e a retirada do ar da massa dentro da extrusora tem grande importância para as características finais do produto acabado. A extrusão consiste na passagem forçada de uma massa cerâmica plástica por uma boquilha ou saída com determinado formato (Custódio *et al.*, 2012).

A prensagem é a operação de conformação baseada na compactação de um pó granulado ou massa contida no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, através da aplicação de pressão (Pedroti *et al.*, 2011). A matriz utilizada tem a forma da peça pretendida, ficando esta com um aspecto praticamente definitivo após a compactação, e uma resistência mecânica tal, que permite aguentar os tratamentos seguintes. Este processo é de elevada produtividade, de fácil automatização e bastante versátil, uma vez que é possível a produção de peças de vários tamanhos e formas, que não apresentam retração significativa durante a secagem e por isso, a variação dimensional nessa operação é baixa (Freitas *et al.*, 2009).

3.3 Resíduos Sólidos e sua Utilização na Cerâmica Vermelha

O desenvolvimento econômico, o crescimento populacional, a urbanização e a revolução tecnológica vêm sendo acompanhados por alterações no estilo de vida e nos modos de produção e consumo da população. Como decorrência direta desses processos, vem ocorrendo um aumento na produção de resíduos sólidos, tanto em quantidade como em diversidade, principalmente nos grandes centros urbanos. Além do acréscimo na quantidade, os resíduos produzidos atualmente passaram a abrigar em sua composição elementos sintéticos e perigosos aos ecossistemas e a saúde humana, em virtude das novas tecnologias incorporadas ao cotidiano (Gouveia, 2012).

Os resíduos sólidos comumente são chamados de lixo, devido à associação que se faz ao que não tem valor e ao que não se quer por perto. Esse é um conceito trabalhado erroneamente, pois muitos resíduos podem ser reutilizados ou reciclados, tendo um novo uso e muitas vezes contribuindo para a geração de receitas ou redução de custos (Paz *et al.*, 2013).

De acordo com a ABNT NBR 10.004 (2004) os resíduos sólidos são aqueles no estado sólido e semi-sólido, que resulta de atividades da comunidade de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Esta norma classifica os resíduos sólidos da seguinte forma:

- Resíduos Classe I
 - Perigosos – resíduos classe I – são aqueles que apresentam periculosidade ou uma das seguintes características: toxicidade, flamabilidade, corrosividade, reatividade, patogenicidade e radioatividade.

- Resíduos Classe II
 - Não inertes – resíduos classe II A – são aqueles resíduos que podem ter propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água;
 - Inertes – resíduos classe II B – quaisquer resíduos que, quando amostrados de forma representativa, (segundo a ABNT NBR 10007, 2004), e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada, a temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, acentuando-se os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor. Como exemplo destes materiais tem-se rochas, tijolos, vidros e certos plásticos e borrachas que não são decompostos prontamente.

O despertar da questão ambiental levantou uma grande preocupação com o destino dos resíduos sólidos, para os quais o simples destino para aterros não é mais aceita como solução definitiva (Zanin *et al.*, 2013).

A utilização de resíduos como matéria-prima, tem sido investigada em todo o mundo, com a finalidade de substituir materiais virgens, com custos mais acessíveis e a redução desses resíduos no meio ambiente (Souza *et al.*, 2008).

A variabilidade natural das características das argilas e o emprego de técnicas de processamento relativamente simples para fabricação de cerâmicas vermelhas, tais como tijolos e telhas, facilitam a incorporação de outros tipos de

materiais. Alguns tipos de resíduos até facilitam o processamento e melhoram a qualidade do produto final (Souza *et al.*, 2008).

Em razão da legislação, as indústrias são responsáveis pelos resíduos que geram. Nesse contexto, um grande número de estudos tem sido desenvolvido ao longo do tempo, para o reaproveitamento dos resíduos em outras atividades industriais, ou para a recolocação do resíduo na mesma linha de produção que o gerou. Uma parte desses estudos analisa a mistura do resíduo industrial em argilas destinadas a fabricação de cerâmica vermelha, incorporando o material ao produto, o que de certa forma dá uma destinação correta ao resíduo (Martins *et al.*, 2005).

Devant *et al.* (2011) fizeram um estudo para investigar a formulação ideal em misturas de cerâmica ternária, para medir as propriedades físicas, e analisar suas características ambientais. Estes observaram que o uso do lodo de esgotos e de resíduos florestais para produção de produtos da cerâmica vermelha apresentaram três vantagens principais: a valorização de resíduos perigosos que são gerados em grandes quantidades; imobilização de metais pesados, e redução de custos de matérias-primas, incluindo argila e água.

Hojamberdiev *et al.* (2011) investigaram a adição do resíduo de granito em uma massa de cerâmica vermelha, para produção de telha cerâmica, os pesquisadores observaram que as telhas preparadas com o resíduo de quartzo satisfaz os requisitos, possibilitando o uso do resíduo na indústria de telhas cerâmicas como uma matéria-prima de baixo custo.

Bilgin *et al.* (2012) desenvolveram um estudo com o objetivo de adicionar o resíduo do pó de mármore como aditivo na indústria para a fabricação de tijolos. Com este estudo, chegaram à conclusão de que é possível adicionar 10% em peso do resíduo na massa utilizada para obtenção dos tijolos sem que haja alteração nas propriedades finais dos mesmos.

Izidio *et al.* (2013) realizaram um estudo visando utilizar resíduos sólidos da indústria de celulose e papel para a fabricação de tijolos. Estes concluíram que é possível incorporar resíduos do tipo dregs e lama de cal, provenientes da fabricação de celulose, em argilas utilizadas na indústria da cerâmica vermelha para fabricação de blocos, telhas e tijolos.

Mymrine *et al.* (2013) estudaram a possibilidade da adição da diatomita oleosa e de resíduos galvânicos como matéria-prima para fabricação de cerâmica vermelha, e chegaram à conclusão de que é possível a adição dos resíduos em

combinação com argila natural e resíduos do corte de vidro como matéria-prima para produção de materiais da cerâmica vermelha.

Vieira *et al.* (2013) sentindo a necessidade de encontrar uma alternativa ambientalmente correta para reciclar o pó dos fornos elétricos de arco, incorporaram o resíduo na cerâmica vermelha e investigam as vantagens técnicas. A partir do estudo, concluíram que os resíduos, devido sua composição química e mineralógica, interferiram na resistência física e mecânica do material após a queima. Observaram também que em uma argila fundente, o resíduo promoveu um melhor efeito sobre a diminuição da porosidade.

Hassan *et al.* (2014) desenvolveram uma pesquisa com o intuito de misturar a borra de ferro-arsênio com argila para fabricação de tijolos e estudar as propriedades físicas e as características de lixiviação destes tijolos desenvolvidos para seu uso potencial em obras de construção. Os autores concluíram que a quantidade ideal de borra que pode ser misturada com argila para a fabricação de tijolos é de 6% em peso.

Velasco *et al.* (2014) adicionaram resíduo da compostagem de cogumelos com o intuito de produzir tijolos com melhor isolamento. Foi constatado que a adição do resíduo gera uma redução da transmissão térmica, o que significa um melhor isolamento das construções e uma economia de energia.

Velasco *et al.* (2014) elaboraram um estudo em que fornece uma revisão de pesquisas de diferentes tipos de resíduos como material de construção sustentável para a produção de tijolos. Como conclusão, o reaproveitamento de resíduos na produção de tijolos pode ser uma forma amiga do ambiente para gerenciá-los. Em alguns casos, implica uma melhora das propriedades dos tijolos, bem como uma vantagem para seus produtores.

Muñoz *et al.* (2014) utilizaram o resíduo do bagaço proveniente da indústria do vinho como um aditivo na produção de tijolos, e a partir disso, avaliaram as propriedades do tijolo. Foi observado que a quantidade de resíduo que pode ser adicionado para que os tijolos mantenham suas características é de no máximo 5%, os requisitos estruturais de alvenaria são preservados e há um aumento no isolamento.

Silva *et al.* (2015) estudaram a viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos. Os resultados deste trabalho mostraram que é viável a utilização do lodo de

ETE até a adição de 25% em massa para a temperatura de sinterização de 1100 °C, pois até essa quantidade de lodo, o valor de resistência mecânica alcançado foi praticamente igual ao da massa cerâmica sem adição de lodo e a absorção de água ficou dentro dos parâmetros exigidos pelas normas técnicas.

Torres *et al.* (2015) investigaram as propriedades das cerâmicas produzidas a partir da mistura de argila caulinita com resíduo de esteatita da região de Ouro Preto e Mariana, em Minas Gerais. As caracterizações física, química, mineralógica e morfológica das amostras de caulinita/esteatita demonstraram que os corpos contendo 85% de esteatita apresentaram propriedades adequadas para aplicações tecnológicas.

Zaccaron *et al.* (2015) realizaram estudo sobre a utilização do resíduo proveniente do beneficiamento do carvão mineral como matéria-prima alternativa na fabricação de blocos de vedação. Estes concluíram que, o resíduo atuou como fundente na massa, aumentou a plasticidade, favorecendo a etapa de conformação e os corpos de prova obtidos com as massas contendo resíduo apresentaram propriedades físicas e mecânicas dentro da norma técnica, viabilizando o uso deste resíduo como matéria-prima na fabricação de cerâmica vermelha.

Penteado *et al.* (2016) estudaram a utilização do resíduo do polimentos de telha cerâmica como substituto parcial do cimento e da areia na fabricação de blocos de concreto para pavimentação. Os resultados evidenciaram que os resíduos podem ser utilizados como materiais alternativos, proporcionando benefícios técnicos e econômicos para a indústria de construção civil.

3.3.1 Rochas ornamentais

Rochas ornamentais e de revestimento são tipos de rochas que são extraídas em blocos ou chapas, e que podem ser cortadas em formas diversas e beneficiadas através de esquadrejamento, polimento e lustro (Costa *et al.*, 2000). Do ponto de vista químico, podem apresentar óxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e óxidos alcalinos (K_2O e Na_2O). Além destes, podem conter quantidades significativas de óxido de ferro (Fe_2O_3), devido ao processo de serragem dos blocos. Dependendo do tipo de rocha, podem ser constituídos de quartzo, feldspato, mica e calcita, e, apresentam comportamento não plástico, quando submetidos a ensaios de plasticidade (Manhães *et al.*, 2009).

A geração de resíduos é inerente a qualquer processo de transformação de materiais ou produção. O processo de beneficiamento de rocha ornamental não é diferente, seus resíduos geram impactos sobre o meio ambiente em várias etapas do processo produtivo, como as lamas do processo de desdobramento e polimento, os casqueiros e cacos e outros resíduos como lâminas e granalhas desgastadas, restos de pastilhas abrasivas, entre outros (Braga *et al.*, 2010).

O beneficiamento de rochas ornamentais envolve diversas etapas. A extração das rochas em céu aberto para a transformação em blocos é a primeira dessas etapas. A segunda etapa é onde ocorre o desdobramento dos blocos, ou seja, ocorre a transformação dos blocos em chapas que podem ter várias espessuras. Esta etapa também é conhecida por beneficiamento primário. A última etapa do beneficiamento é a transformação das placas em produto final onde são usados equipamentos denominados de politrizes. É nesta etapa que é realizado o polimento, lustração, corte e acabamento final das chapas. Um dado importante é que a exploração de rochas ornamentais, desde a extração até o acabamento, gera uma quantidade média de 40 a 50% de resíduo.

A produção brasileira atingiu 10,5 Mt em 2013 e foi motivada pela combinação do crescimento do mercado interno e externo. A participação dos granitos e similares correspondeu a cerca de 49,5% da produção nacional, tendo as ardósias e quartzitos foliados produção ainda em declínio, devido à queda nas exportações. A região Sudeste foi responsável por 64,5% da produção nacional e a região Nordeste 24,7% desta produção. As importações totais de rochas ornamentais atingiram US\$ 69,4 milhões em 2013, sendo US\$ 45,3 milhões referentes a mármore beneficiado. O total das exportações brasileiras de rochas somou 2,725 Mt em 2013, correspondendo a US\$ 1,3 bilhão, valor este 21,8% superior a 2012, enquadrando o Brasil no 7º lugar como exportador mundial (Heider & Maia, 2014).

Diante da grande produção brasileira de rochas ornamentais, há também a presença de um número que se apresenta de forma negativa, que é o da geração de resíduos provenientes do beneficiamento das rochas ornamentais, e trás consigo a preocupação com os problemas que podem ser causados ao meio ambiente e a sociedade. Entretanto, tem aumentado o número de pesquisas acerca da reciclagem desses resíduos, diminuindo assim a sua incidência na natureza. A indústria cerâmica aparece como uma grande aliada para o uso dos resíduos, já que possui

elevado volume de produção, o que possibilita o consumo de grandes quantidades desses, além de obter vantagens no seu processo produtivo causado pela economia de matérias-primas, redução do consumo de energia e, conseqüentemente, redução dos custos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Para o desenvolvimento da pesquisa utilizou-se uma massa cerâmica e um resíduo de quartzito oriundo da serragem dos blocos. A massa cerâmica foi fornecida por uma olaria e o resíduo de quartzito por uma empresa de beneficiamento de quartzito, as mesmas estão localizadas no Estado da Paraíba.

4.2 Métodos

4.2.1 Caracterização das matérias-primas

Inicialmente, as amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 110°C e, posteriormente, foram submetidas às seguintes etapas de beneficiamento: britagem, moagem e peneiramento em peneiras ABNT N° 200 (0,074mm), para realização dos ensaios de caracterização, e ABNT N° 80 (0,018mm) para conformação e obtenção das propriedades físicas. Todas as caracterizações foram realizadas em laboratórios pertencentes à Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais (UAEMa) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

4.2.1.1 Caracterização mineralógica

A análise mineralógica das amostras foi realizada através da difração de raios X utilizando o método do pó, em um difratômetro XRD-6000 da Shimadzu, operando com radiação Cu-K α , tensão de 40 KV, corrente de 30 mA, passo de 0,02° com tempo de contagem de 1,0s por passo. Foi utilizado uma varredura de 5° a 80° para o resíduo de quartzito, e de 5 a 60° para a amostra de argila.

4.2.1.2 Caracterização química

A análise química foi realizada em Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X, marca Shimadzu, modelo EDX 720, sob atmosfera de nitrogênio.

4.2.1.3 Caracterização térmica gravimétrica e diferencial

As amostras de massa cerâmica e resíduo foram submetidas à análise térmica gravimétrica (TG) e diferencial (ATD) utilizando o equipamento da Shimadzu, modelo TA 60H. Foi utilizada uma taxa de 12,5 °C/min até 1000 °C, sob atmosfera de ar, e o padrão utilizado na ATD foi óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.

4.2.1.4 Caracterização granulométrica por difração a laser

O tamanho das partículas das amostras foi determinado utilizando um equipamento da marca Cilas, modelo 1064. Foi utilizado o hexametáfosfato de sódio (HMFNa) como agente dispersante para ambas as amostras.

4.2.1.5 Plasticidade

Para a determinação dos limites de liquidez e de plasticidade foram utilizadas as massas com 0, 5, 10, 15 e 20% de resíduo de quartzito, as quais foram denominadas de A, B, C, D e E, respectivamente. Para esta finalidade, adotou-se o método de Casagrande.

4.2.2 Formulação e processo de conformação das massas cerâmicas

4.2.2.1 Formulação

A Tabela 1 apresenta as formulações que foram utilizadas ao longo da pesquisa.

Tabela 1 - Formulações das massas que foram utilizadas.

Formulações	Componentes (%)	
	Massa	Quartzito
A	100	0
B	95	5
C	90	10
D	85	15
E	80	20

4.2.2.2 Processo de conformação

As massas com 7,0% de umidade foram submetidas a um processo de mistura, em moinho de bolas por 24h e, posteriormente, permaneceram em repouso por mais 24h, com o objetivo de obter uma boa homogeneização.

Então foram submetidas ao processo de prensagem uniaxial, em uma prensa hidráulica, modelo CT-335 da Servitech (ver Figura 2). Para conformação foi utilizado uma pré-prensagem com pressão de 1 ton por 10 segundos, seguida de uma pressão de 1,5 ton por 20 segundos.

Os corpos de prova foram medidos, pesados e colocados em estufa a 110 °C por 24h. Após a secagem, foram novamente medidos e pesados, posteriormente, realizado o processo de queima.



Figura 2 - Prensa utilizada para conformação dos corpos de prova.

4.2.3 Etapa de queima

Após serem conformados e secos em estufa, os corpos de prova foram queimados em forno elétrico, modelo FE50RP da Flyever Equipamentos, pertencente ao Laboratório de Transformação de Materiais (LTM) da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, UFCG.

A queima foi realizada em diferentes temperaturas (800, 900 e 1000 °C).

Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 2 °C/min, com um tempo de permanência na temperatura máxima de 180 min.

4.2.4 Caracterização dos corpos de prova

4.2.4.1 Retração linear de secagem

Para o cálculo de retração de secagem, os corpos de prova foram medidos logo após a conformação e também após a etapa de secagem a 110 °C, seguindo a norma ABNT/ NBR 15097-1 (2011). Utilizou-se a Equação 1 para realização dos cálculos.

$$RS (\%) = \frac{(C_m - C_s)}{C_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde,

RS: Retração de secagem (%)

C_m: Comprimento do molde da peça (mm)

C_s: Comprimento da peça após secagem (mm)

4.2.4.2 Retração linear após a etapa de queima

Após a etapa de queima, os corpos de prova foram novamente medidos, e utilizando a Equação 2, determinou-se a retração após a queima, seguindo a norma ABNT/ NBR 15097-1 (2011).

$$RQ (\%) = \frac{(C_s - C_q)}{C_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde,

RQ: Retração após queima

C_s: Comprimento da peça após secagem (mm)

C_q: Comprimento da peça após queima (mm)

4.2.4.3 Porosidade aparente (PA)

Para a determinação da porosidade aparente, os corpos de prova foram imersos em água por 24 horas. Após este período, os corpos de prova permaneceram imersos em água e foram pesados em balança hidrostática obtendo-se assim o peso imerso. Com um pano úmido retirou-se o excesso de água da superfície dos corpos de prova, sendo os mesmos pesados novamente em balança analítica obtendo-se assim o peso úmido saturado de água. O peso seco é o determinado após a secagem a 110 °C. Com esses valores, pôde-se calcular a porosidade aparente utilizando a Equação 3.

$$PA (\%) = \frac{P_u - P_s}{P_u - P_i} \times 100 \quad (3)$$

Onde,

PA: Porosidade Aparente (%)

Pu: Peso úmido (g)

Ps: Peso seco (g)

Pi: Peso imerso (g)

4.2.4.4 Absorção de água (AA)

O cálculo de absorção de água foi feito a partir da Equação 4, e o ensaio realizado de acordo com a norma ABNT/NBR 15097-1 (2011). Pesou-se o corpo de prova após a queima, depois foi realizada a imersão em um recipiente com água, e deixado por 24 horas e novamente foi feita a pesagem.

$$AA (\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

AA: Absorção de água (%)

Pu: Massa do corpo de prova úmido (g)

Ps: Massa do corpo de prova seco (g)

4.2.4.5 Massa específica aparente (MEA)

Para obtenção da massa específica aparente, ou densidade aparente, fez-se uso da Equação 5, após a obtenção dos valores de absorção de água e porosidade aparente.

$$MEA (g/cm^3) = \frac{PA}{AA} \quad (5)$$

Onde,

PA: Porosidade Aparente

AA: Absorção de água

4.2.4.6 Tensão de ruptura a flexão (TRF)

Para obtenção da tensão de ruptura a flexão foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos, modelo EMIC - DL-10.000. Aplicou-se uma força de 200 kgf, com taxa de carregamento de 0,5 mm/min com uma distância entre os pontos de apoio de 30 milímetros.

4.2.6.7 Análise dilatométrica

A análise dilatométrica foi realizada em corpos de prova com dimensões (7x7x50 mm) que foram submetidos a aquecimento até 1100°C a uma taxa de 2,5°C/min. Os ensaios foram realizados em um dilatômetro da BP ENGENHARIA, modelo RB 3000.

4.2.6.8 Microscopia eletrônica de varredura

Foi realizada a análise da superfície de fratura dos corpos de prova obtidos com as massas A e B, submetidos a queima a 900 e 1000°C. Esta caracterização foi realizada no Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO), em um equipamento Phenom, modelo Pro X, com um aumento de 500x.

4.2.6.9 Classificação do resíduo e das massas contendo o resíduo

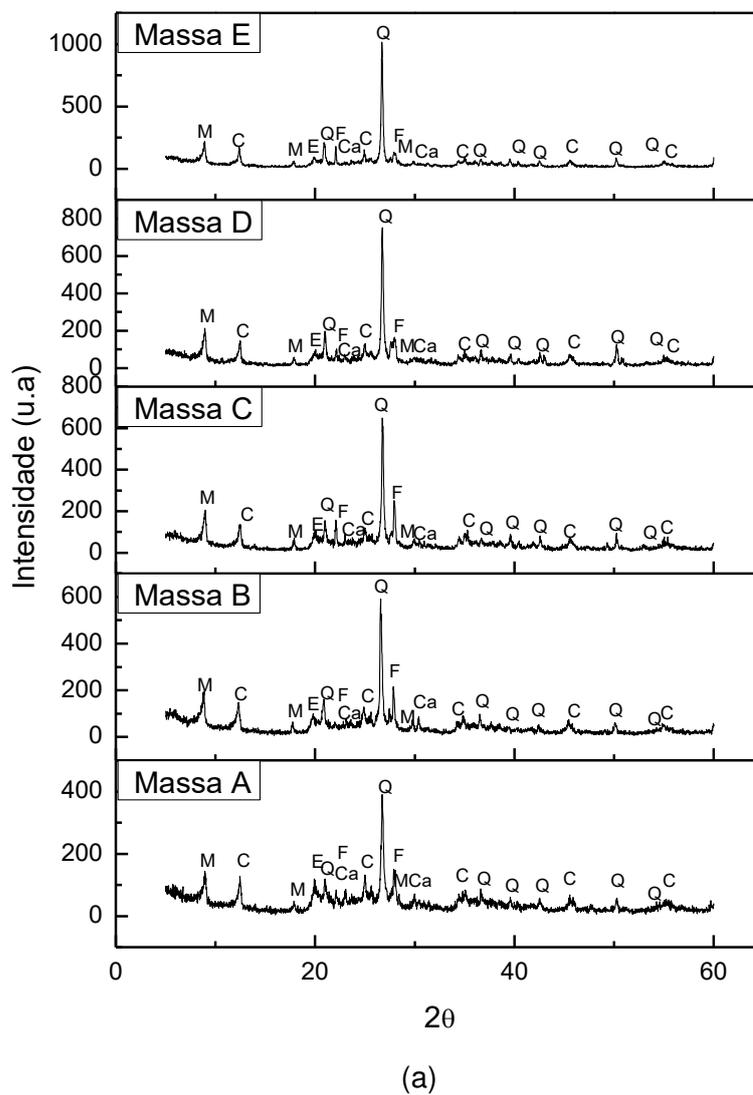
A classificação do resíduo e das massas contendo o resíduo foi realizada pelo LABGER/DEQ/UFCG (Laboratório de Gestão Ambiental e Tratamento de Resíduos) e pela FUNMINERAL (Fundo de Apoio à Mineração), utilizando-se da metodologia apresentada nas normas ABNT NBR 10005:2004 – Ensaio de Lixiviação e ABNT NBR 10006:2004 – Ensaio de Solubilização.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização das Matérias-Primas

5.1.1 Caracterização mineralógica

Na Figura 3 constam os espectros de difração de raios X das massas (a) e do resíduo de quartzito (b).



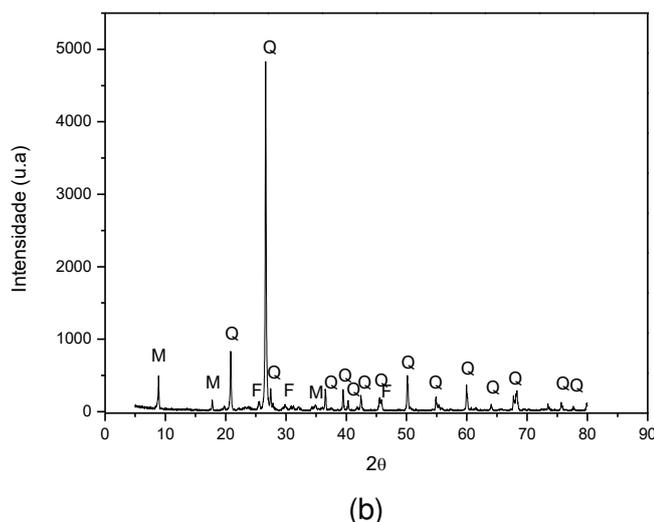


Figura 3 - Espectros de difração de raios X das massas A, B, C, D e E (a) e do quartzito (b).
M= mica; C= Caulinita; F= Feldspato; Q= Quartzo; E= Esmectita; Ca= Calcita.

Analisando os difratogramas das massas (Figura 3a) observa-se que, estes apresentam as seguintes fases mineralógicas: mica (JCPDS 83-1808), caulinita (JCPDS 79-1570), feldspato (JCPDS 84-0710), quartzo (JCPDS 46-1045), esmectita (JCPDS 13-0135) e calcita (JCPDS 72-1937). O argilomineral caulinita encontra-se em grande quantidade e é o responsável por conferir plasticidade ao material. O feldspato atua como fundente, contribuindo para a formação da fase vítrea. No resíduo de quartzito (Figura 3b) observam-se as seguintes fases mineralógicas: quartzo (JCPDS 46-1045), feldspato (JCPDS 84-0710) e a mica (JCPDS 83-1808). Todos os minerais detectados no resíduo estão geralmente presentes nas massas utilizadas para o fabrico dos produtos da cerâmica tradicional, o que favorece a incorporação deste em massas deste setor. As fases encontradas no resíduo utilizado neste trabalho são bem similares aos encontrados por outros pesquisadores que trabalharam com resíduo de quartzito de Portugal (Torres *et al.*, 2007).

5.1.2 Caracterização química

Estão contidas, na Tabela 2, as análises químicas das amostras estudadas.

Tabela 2 - Composição química das amostras estudadas.

Amostra	PF*(%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Outros (%)
Quartzito	1,53	78,15	11,39	1,42	5,11	0,13	0,90	0,86	0,51
Massa A	13,02	44,32	24,50	8,29	3,75	1,16	1,51	2,52	0,93
Massa B	12,80	45,89	23,53	7,72	3,79	1,27	1,66	2,63	0,71
Massa C	13,05	46,88	22,82	7,93	3,71	1,24	1,37	2,36	0,64
Massa D	11,73	48,89	22,57	7,60	3,75	1,18	1,37	2,28	0,63
Massa E	12,64	51,37	22,41	5,70	2,89	0,75	0,89	2,06	1,29

*PF – Perda ao Fogo.

O resíduo de quartzito apresentou a sílica (SiO₂) e a alumina (Al₂O₃) como seus principais constituintes. Observa-se uma quantidade considerável de óxidos fundentes (Fe₂O₃ + K₂O) na ordem de 6,53%. Moreira *et al.* (2008), Souza *et al.* (2010) e Taguchi *et al.* (2014) estudaram a incorporação de diferentes tipos de resíduos de rochas ornamentais em massas cerâmicas e foi detectado na análise química dos resíduos teores de sílica e alumina similares aos encontrados neste trabalho.

As massas possuem como principais constituintes SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e K₂O. A sílica é comumente encontrada em diversas fases mineralógicas (argilosas e não argilosas), dentre elas, destaca-se: caulinita, mica, feldspato e quartzo, que é sua forma natural mais pura. A alumina também tem associação com as fases mineralógicas supracitadas. Destaca-se o elevado teor de Fe₂O₃ presente nas massas, este componente é responsável por dar a coloração avermelhada da peça após a queima (Torres *et al.*, 2009).

5.1.3 Caracterização térmica gravimétrica e diferencial

Na Figura 4 estão as análises térmicas diferenciais e gravimétricas das massas e do resíduo de quartzito.

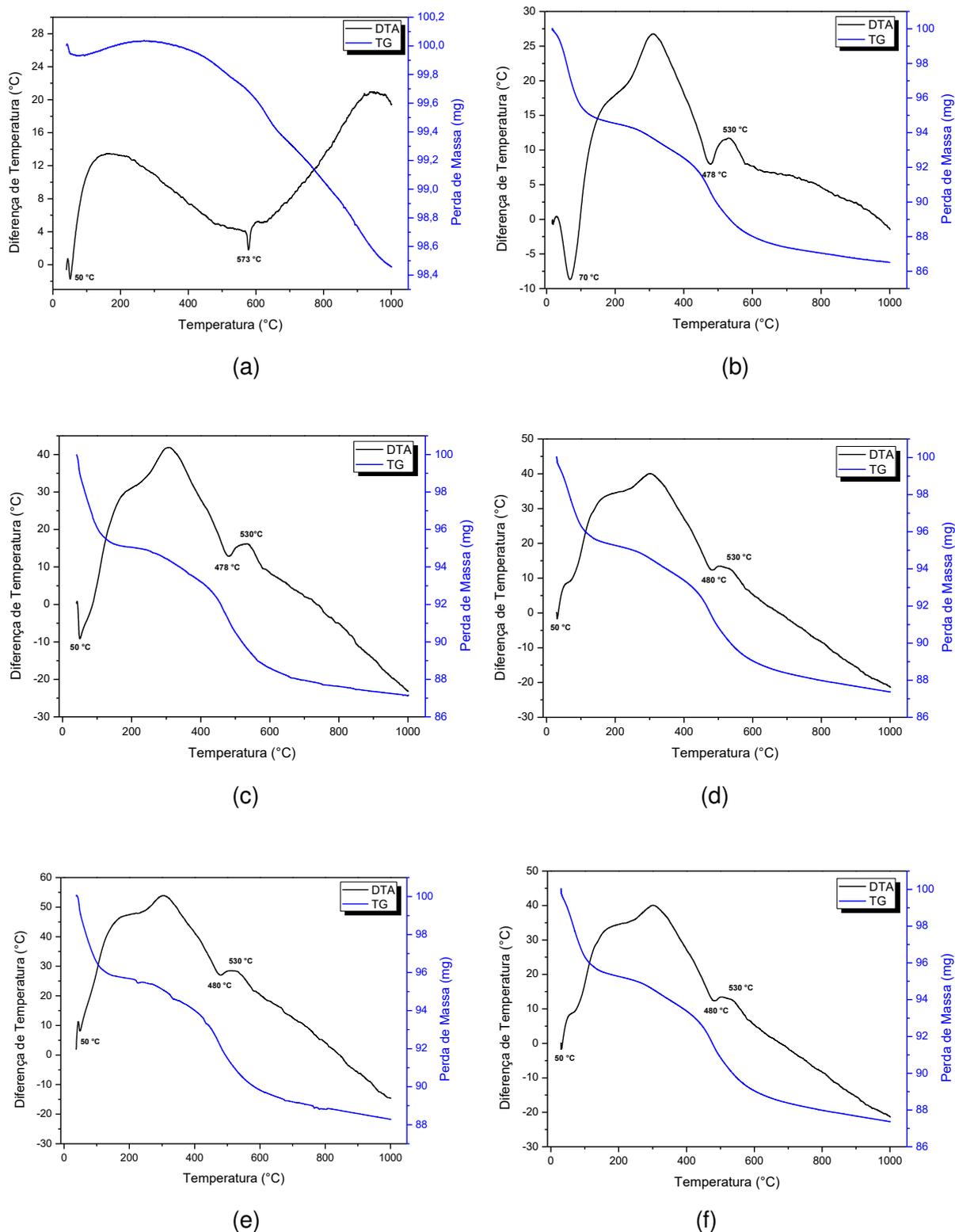


Figura 4 - Análise térmica do resíduo de quartzito (a) e das massas A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f).

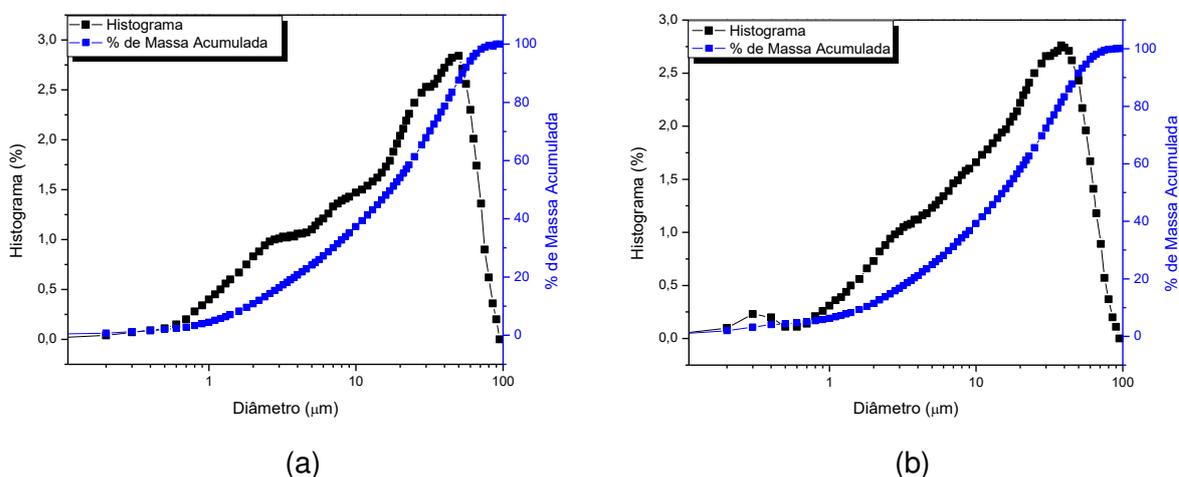
Analisando a curva do resíduo de quartzito (Figura 4a) têm-se um pico endotérmico, a aproximadamente 50 °C, referente à perda de água livre e adsorvida,

com 0,1 mg de perda de massa. Em seguida, tem-se um pico endotérmico, por volta de 573 °C, referente à transformação do quartzo, onde há uma perda de massa de 1,2 mg. Entre 900 e 1000 °C há uma banda exotérmica, provavelmente referente à nucleação da mulita. A perda de massa total do resíduo de quartzito é de, aproximadamente, 1,6 mg. Essas transformações do resíduo quando submetido a aquecimento, corroboram com os aspectos observados por Torres *et al.* (2007) que também investigaram a adição de um resíduo de quartzito, oriundo de uma região de Portugal, em massas da cerâmica vermelha.

Observando as curvas das análises térmica das massas (Figura 4b – 4f), percebeu-se comportamento semelhante entre elas, com a presença de um pico endotérmico, no intervalo de 50 - 80 °C, referente à perda de água livre e adsorvida, com perda de massa variando entre 2 e 4 mg. Entre 164 e 414 °C há um pico exotérmico que se refere à decomposição da matéria orgânica, onde há aproximadamente 2 mg de perda de massa. Este é então seguido de um pico endotérmico, centrado por volta de 480 °C, atribuído a desidroxilação da caulinita e um pico exotérmico, entre 500 e 600 °C, referente à decomposição da calcita com perda de massa variando entre 4 e 6 mg. A perda de massa total varia entre 12 e 14 mg.

5.1.4 Caracterização granulométrica por difração a laser

Na Figura 5 encontram-se os resultados referentes às análises granulométricas das massas e do resíduo de quartzito, respectivamente, e na Tabela 3 as frações da composição granulométrica das amostras estudadas.



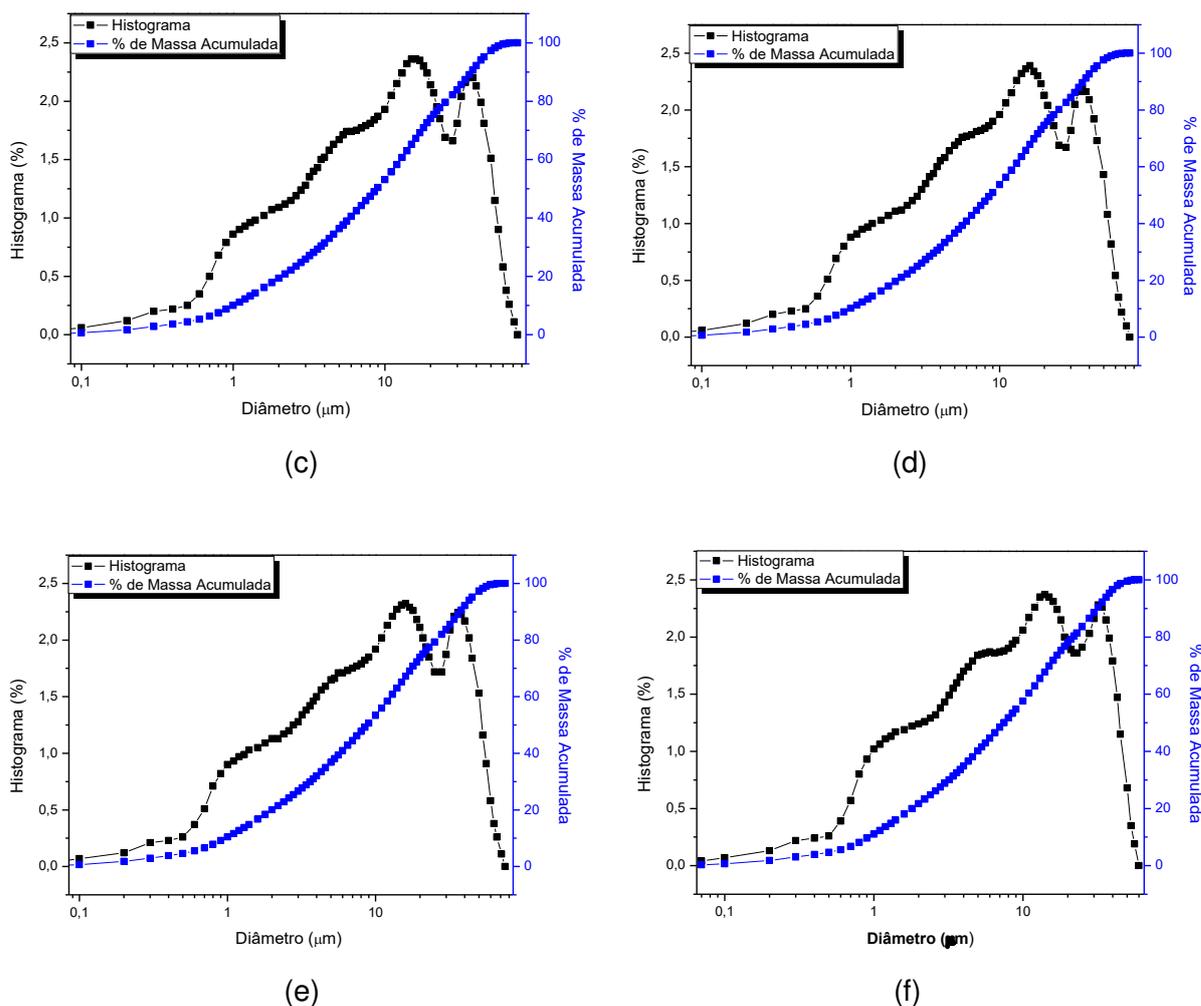


Figura 5 - Análise granulométrica do resíduo de quartzito (a) e das massas A (b), B (c), C (d), D (e) e E (f).

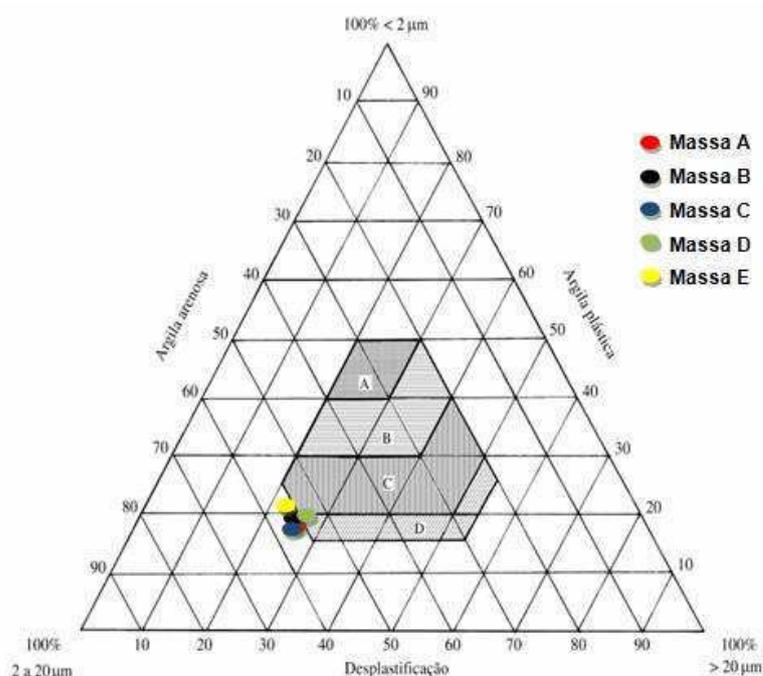
Observando a Figura 5 foi possível notar que o resíduo de quartzito (a) e a massa A (b) possuem uma concentração de partículas entre 20 e 60 μm , tendo um diâmetro médio de partículas de 20,54 μm para a argila e de 22,77 μm para o resíduo. Outro comportamento que pôde ser observado, é que ambas as amostras apresentaram uma curva de distribuição de partículas multimodal. Com o acréscimo do quartzito à massa cerâmica, percebeu-se que houve uma variação nas curvas das massas C (d) até E (f) quando comparadas a massa A (b), apresentando concentrações de partículas entre 7 e 20 μm , e entre 30 e 60 μm , com diâmetros médios variando entre 11,97 e 14,11 μm , e exibindo comportamento multimodal nas curvas de distribuição de partículas.

Tabela 3 - Frações da composição granulométrica das amostras estudadas.

Amostras	Composição Granulométrica (%)						
	< 2 μm	2 – 20 μm	> 20 μm	Diâmetro Médio (μm)	D 10% (μm)	D 50% (μm)	D 90% (μm)
Quartzito	22,45	57,77	19,78	22,77	1,87	17,26	53,07
Massa A	19,31	55,30	25,39	20,54	1,72	15,19	48,01
Massa B	19,36	54,70	25,94	14,11	1,00	8,86	37,11
Massa C	19,56	55,05	25,39	13,87	0,99	8,69	36,49
Massa D	20,02	53,77	26,21	14,11	0,96	8,78	37,21
Massa E	21,68	56,32	22,00	11,97	0,93	7,47	31,48

Analisando a Tabela 3, foi possível observar que as massas apresentaram um baixo percentual para a fração argila (tamanho de partícula menor que 2 μm), variando entre 19,31 e 21,68%, para a fração silte (tamanho de partícula entre 2 e 20 μm) o percentual acumulado variou de 53,77 e 56,32% e para a fração areia (tamanho de partícula maior que 20 μm) de 22,00 e 26,21%. Enquanto que o resíduo apresentou 22,45% de fração argila, 57,77% de fração silte e 19,78% de fração areia. Analisando os resultados, ficou evidenciado que, mesmo com a adição do resíduo de quartzito, a distribuição do tamanho de partícula se mantém bem próxima.

A Figura 6 ilustra a representação das formulações no Diagrama de Winkler.

**Figura 6** - Classificação granulométrica das massas de acordo com o Diagrama de Winkler.

O Diagrama de Winkler é baseado do tamanho das partículas das massas, onde os vértices representam diferentes tamanhos de partículas presentes nas massas. Através do diagrama é possível avaliar a distribuição granulométrica de massas utilizadas na fabricação de produtos da cerâmica vermelha, que são: A – adequado para produtos de alta qualidade; B – telhas; C – tijolos furados e; D – tijolos maciços.

De acordo com o apresentado na Figura 6, as massas A e C são classificadas para uso na fabricação de tijolos maciços, e as massas B, D e E para tijolos furados. Moreira *et al.* (2008) estudaram a incorporação de um resíduo de pó de rocha ornamental em uma massa da cerâmica vermelha, a qual apresentou teor de argila superior ao da massa utilizada neste trabalho, de acordo com o Diagrama de Winkler as composições se enquadraram nos campos A, B e C.

5.1.5 Plasticidade

Na Tabela 4 estão presentes os índices de plasticidade das composições estudadas.

Tabela 4 - Limites de Atterberg das massas cerâmicas.

Amostra	Limites de Atterberg (%)		
	L.L.*	L.P.*	I.P.*
Massa A	31,20	15,08	16,12
Massa B	33,37	17,18	16,18
Massa C	34,06	20,09	13,98
Massa D	30,31	16,42	13,90
Massa E	31,89	18,63	13,26

* L.L. – limite de liquidez; L.P. – limite de plasticidade; I.P. – índice de plasticidade.

De acordo com a Tabela 4, observou-se um decréscimo do índice de plasticidade com o acréscimo da adição de resíduo na composição, isso pode ser justificado se considerarmos o resíduo de quartzito como material não plástico. Os limites de liquidez variaram entre 30,31 e 34,06, que concorda com o definido na literatura (30-60%) para as massas utilizadas na produção de blocos. Os valores do limite de plasticidade apresentaram uma variação entre 15,08 e 20,09, estando de acordo com os valores indicados (15-30%) para produção de blocos por extrusão.

Os resultados de índice de plasticidade entre 7 e 15% classificam a massa como mediamente plástica, e valores acima de 15%, como altamente plástica (Junior *et al.*, 2012). De acordo com dados da literatura, ambos são viáveis para a produção de peças da cerâmica vermelha, já que as massas A e B são classificadas como altamente plásticas, e, as massas C, D e E como mediamente plástica.

5.2 Caracterização dos Corpos de Prova

5.2.1 Retração linear

A Figura 7 contém os valores referentes à retração linear após a queima do material.

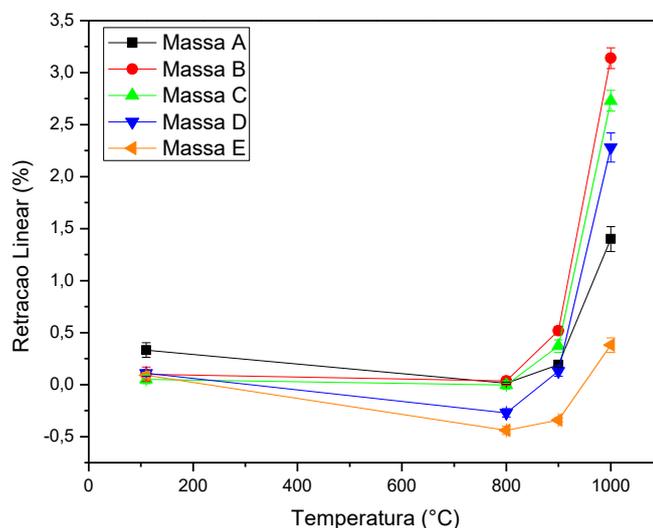


Figura 7 - Retração linear das amostras estudadas.

A retração linear é uma propriedade que indica o grau de densificação da peça durante a queima e é importante para o controle dimensional do produto final (Moreira *et al.*, 2008; Taguchi *et al.*, 2014). Para a cerâmica vermelha é aceitável uma retração linear entre 1,5-3,0%, no entanto, valores abaixo de 1,5% são tidos como ideal (Dondi, 2006). Pode-se observar na Figura 7 que com o aumento da temperatura ocorreu um aumento na retração linear, sendo mais significativo acima de 900 °C, o que pode estar relacionado com a sinterabilidade das peças. Na temperatura de 800 °C observou-se uma expansão para as peças obtidas com as massas C, D e E. Com a adição do resíduo, houve um aumento na porcentagem de mica e, segundo alguns pesquisadores, massas contendo teores de mica em torno

de 30% e submetidas a temperaturas entre 600 e 900°C apresentam expansão associada à desidroxilação da mica, com aumentos nos parâmetros de rede 'b' e 'c' (Guggenheim *et al.*, 1987; Menezes *et al.*, 2006). Para a temperatura de 1000 °C, as peças obtidas com as massas contendo resíduo apresentaram elevada retração linear, provavelmente devido ao feldspato, que com o aumento da temperatura forma fase líquida. Os resultados obtidos para as peças produzidas com a massa B corroboram com os obtidos por Moreira *et al.* (2008), que estudaram a incorporação de resíduos de rochas ornamentais em massas da cerâmica vermelha.

5.2.2 Porosidade aparente (PA)

Na Figura 8 são apresentados os dados da influência da temperatura e da composição em relação à porosidade aparente.

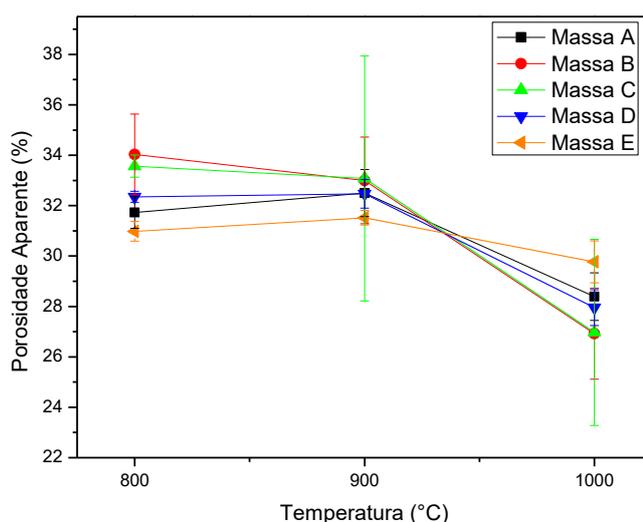


Figura 8 - Porosidade aparente das amostras estudadas após a queima.

Verificou-se que os corpos de prova obtidos com a massa E apresentaram menor porosidade para as temperaturas de 800 e 900°C, o que pode estar relacionado ao melhor empacotamento das partículas, maior área de contato. No entanto, para 1000°C, as composições contendo resíduo (exceto Massa E) apresentaram menor porosidade, provavelmente, nesta faixa de temperatura houve a formação da fase líquida, que se difunde para preencher a porosidade aberta. Comportamento semelhante foi observado por Manhães *et al.* (2009), que estudaram a variação microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com

resíduo de rocha ornamental. Os valores apresentados para a porosidade aparente estão dentro do especificado, que segundo Souza Santos (1989) tem que ser menor ou igual a 35%.

5.2.3 Absorção de água (AA)

Os dados de absorção de água estão contidos na Figura 9.

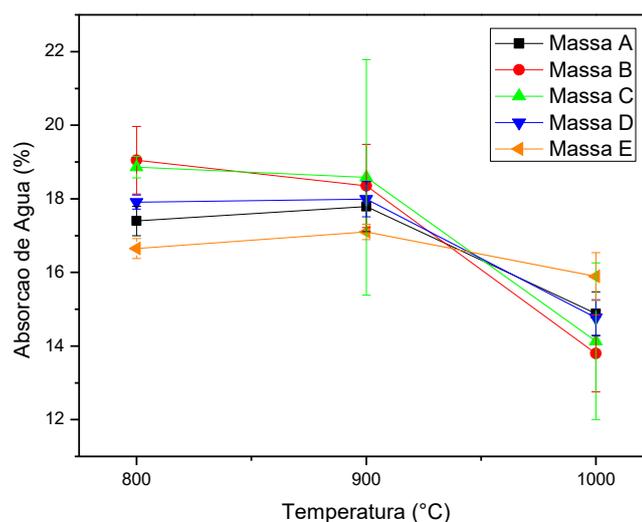


Figura 9 - Absorção de água das amostras estudadas após a queima.

Com o aumento da temperatura para 1000°C, todas as composições apresentaram redução da absorção de água, o que corrobora com os dados apresentados nas Figuras 7 e 8. Esse comportamento pode ser explicado pela presença de óxidos fundentes (Fe_2O_3 e K_2O), pois durante o aquecimento a altas temperaturas esses fundem e preenchem os poros (Vieira *et al.*, 2004; Babisk *et al.*, 2012). De acordo com Souza Santos (1989), o valor máximo de absorção para telhas é de 20% e para tijolos a faixa é de 8-22%, sendo assim, os resultados encontrados para a absorção de água estão dentro dos estabelecidos para produtos da cerâmica vermelha.

5.2.4 Massa específica aparente (MEA)

Na Figura 10 constam os resultados referentes à massa específica aparente das massas.

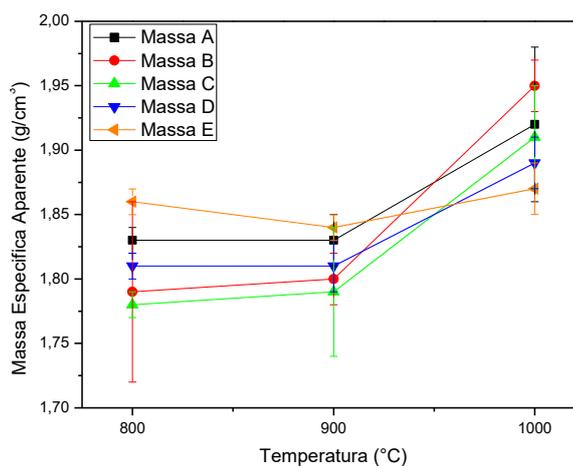


Figura 10 - Massa específica aparente das amostras estudadas após queima.

Percebe-se um aumento desta propriedade com o aumento da temperatura de queima, sendo o maior valor atingido pela composição com 5% de resíduo a 1000°C, o que corrobora com o apresentado na Figura 9.

Embora seja observada essa variação, todos os valores estão dentro da norma, onde os resultados tem que ser maiores ou iguais a 1,7 g/cm³ (Souza Santos, 1989).

5.2.5 Módulo de ruptura a flexão (MRF)

A Figura 11 contém os resultados para a tensão de ruptura a flexão.

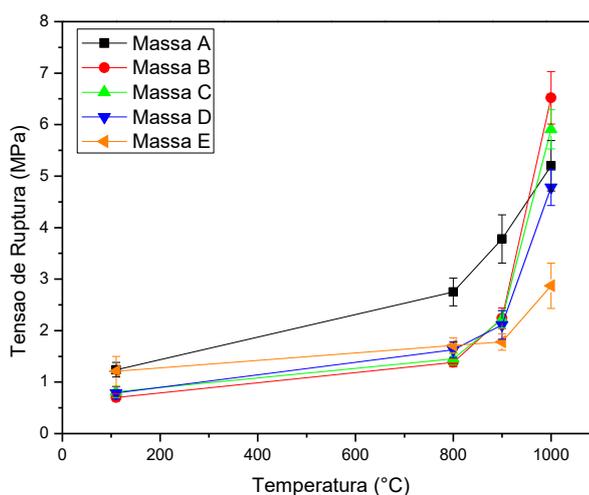
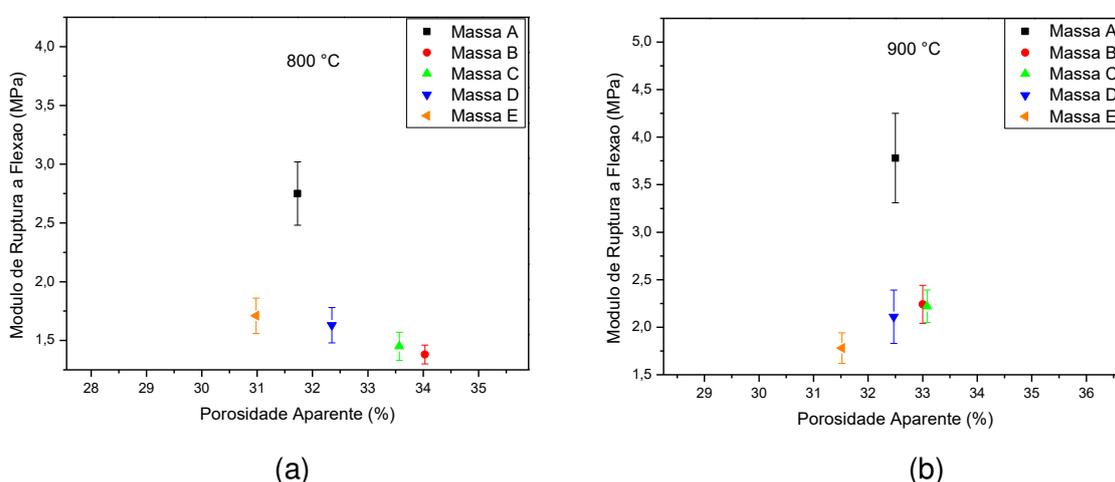


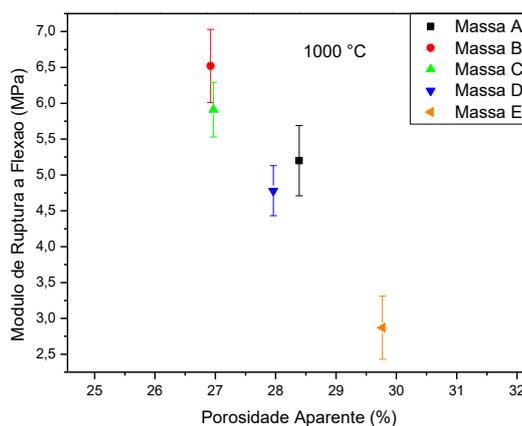
Figura 11 - Módulo de ruptura a flexão das amostras estudadas após queima.

Com relação ao módulo de ruptura, para todas as massas, observou-se um aumento do módulo à medida que se elevou a temperatura. Isto se deve ao melhor empacotamento das partículas, maior força de ligação e densificação, tornando a peça mais resistente. Para as temperaturas de 800 e 900°C, as peças obtidas com as massas contendo resíduo apresentaram menor resistência, conforme observado na Tabela 2 essas apresentaram maior quantidade de quartzo, o qual apresenta transformação alotrópica durante o tratamento térmico, sendo mais significativo na etapa de resfriamento, podendo originar trincas, que atuam como concentradores de tensão.

Quando massas contendo argilas e acessórios (mica, quartzo e feldspato) são submetidas a temperaturas de aproximadamente 1000°C, normalmente a microestrutura final contém cristais de mullita e grãos de quartzo dispersos na matriz vítrea. Analisando a temperatura de 1000°C, observou-se um aumento significativo da resistência para todos os corpos de prova, destacando-se os obtidos com as massas contendo resíduo. Este fator pode estar relacionado também ao surgimento de novas fases cristalinas. Para essa mesma temperatura, viu-se que a massa E apresentou uma queda notável no módulo de ruptura, quando comparada às outras massas contendo o resíduo. Segundo Souza Santos (1989), os valores mínimos da tensão de ruptura a flexão recomendados para análise de argilas da cerâmica vermelha são: 2,0 (MPa) para tijolos maciços, 5,5 (MPa) para blocos vazados e 6,5 (MPa) para telhas. Assim, todas as massas podem ser empregadas na fabricação de tijolos maciços, enquanto que as massas A, B e C são adequadas à fabricação de blocos, e a massa B pode ser utilizada também na obtenção de telhas.

Na Figura 12 são apresentadas as relações entre o módulo de ruptura a flexão e a porosidade das massas nas diferentes temperaturas trabalhadas.





(c)

Figura 12 - Módulo de Ruptura a Flexão x Porosidade após queima a 800 (a), 900 (b) e 1000 °C (c).

Analisando a Figura 12, fica evidenciada a relação inversamente proporcional entre porosidade e resistência mecânica, as peças contendo maior porosidade apresentaram menor resistência. Com relação à porosidade, pode-se verificar que não houve variação significativa com a adição do resíduo, no entanto, para a resistência mecânica, na faixa de 1000°C, as composições contendo resíduo apresentaram os melhores valores, o que pode estar relacionado com a presença do K_2O , maior quantidade de SiO_2 e menor quantidade de Al_2O_3 , fatores que podem ter contribuído para a formação do eutético, a fluidez da fase líquida e a menor viscosidade, acelerando a cinética das reações (Vieira *et al.*, 2013).

5.2.6 Avaliação da mudança da coloração dos corpos de prova após a queima

A Figura 13 evidencia a mudança da coloração dos corpos de prova em função do aumento da temperatura de queima.

A coloração de queima das peças depende fundamentalmente do conteúdo de minerais de ferro. Para matérias-primas empregadas para fabricação de produtos da cerâmica vermelha, o teor de óxido de ferro (Fe_2O_3) aceitável é de aproximadamente 8% (Barba *et al.*, 1997; Baccour *et al.*, 2009).

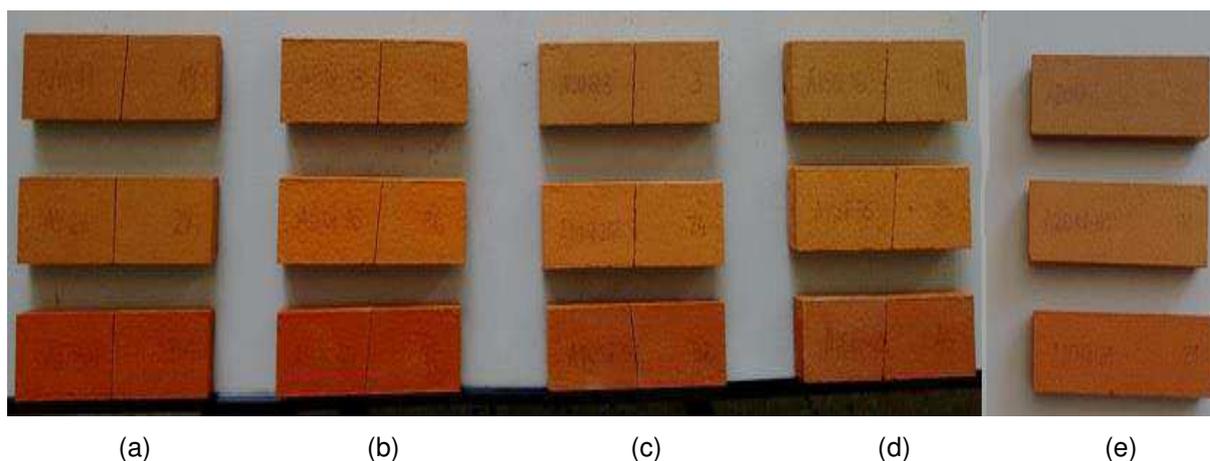
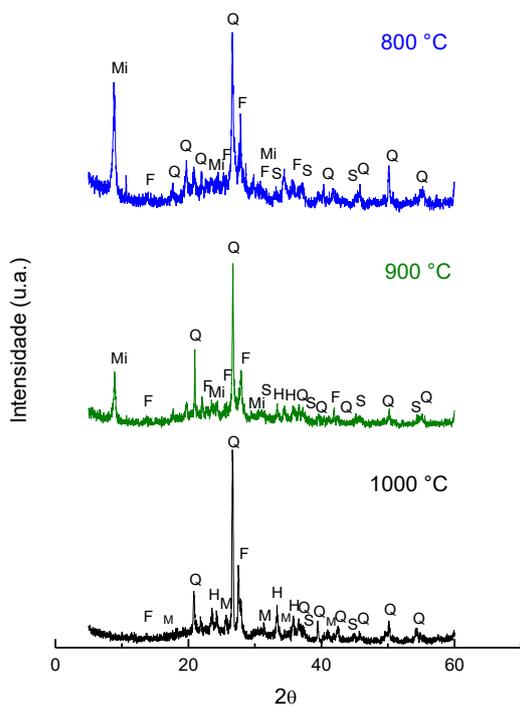


Figura 13 - Corpos de prova após a queima a 800, 900 e 1000 °C das massas A (a), B (b), C (c), D (d) e E (e).

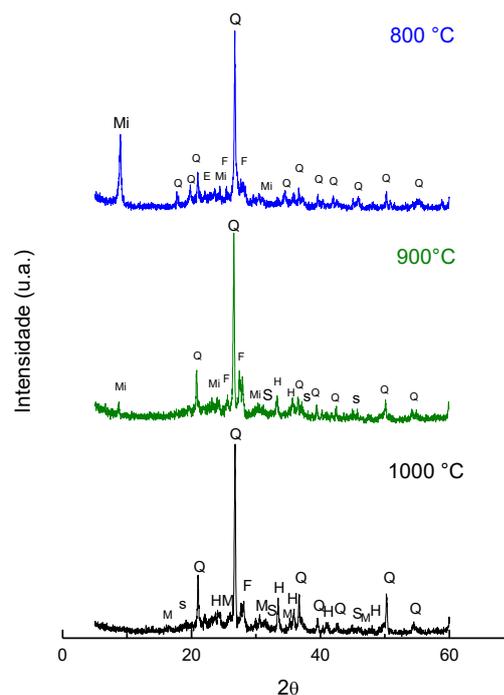
Observou-se similaridade na coloração das peças, os corpos de prova queimados a 800 °C apresentaram uma tonalidade marrom, os queimados a 900 °C adquiriram cor alaranjada e a 1000 °C cor vermelha. As peças obtidas com as massas A e B apresentaram coloração mais escura, podendo ser relacionado ao maior teor de ferro apresentado pelas mesmas, conforme dados da Tabela II. A mudança significativa na coloração que ocorre a 1000 °C se dá devido à liberação do ferro bivalente, que por oxidação passa a ferro trivalente, que é o responsável pela cor vermelha (Roveri *et al.*, 2007; Furlani *et al.*, 2010). Ficou evidenciado que a adição do resíduo a massa não altera as características de coloração da peça após a queima.

5.2.7 DRX das amostras após a queima e percentuais de fases cristalinas

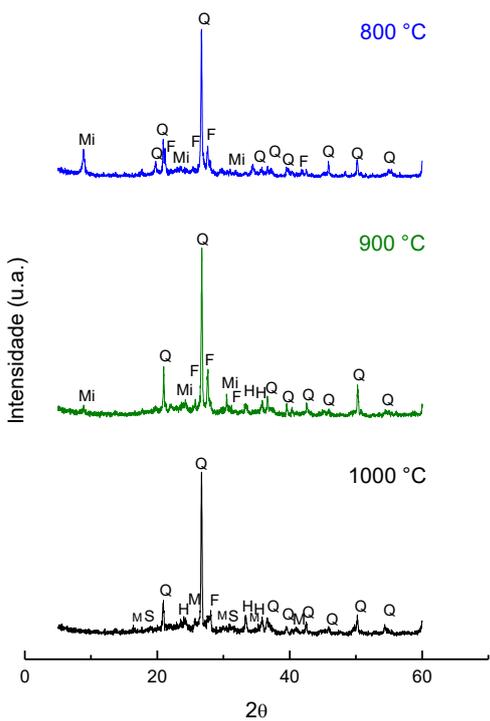
Na Figura 14 estão expostos os difratogramas de raios X das massas A, B, C, D e E após queima nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C.



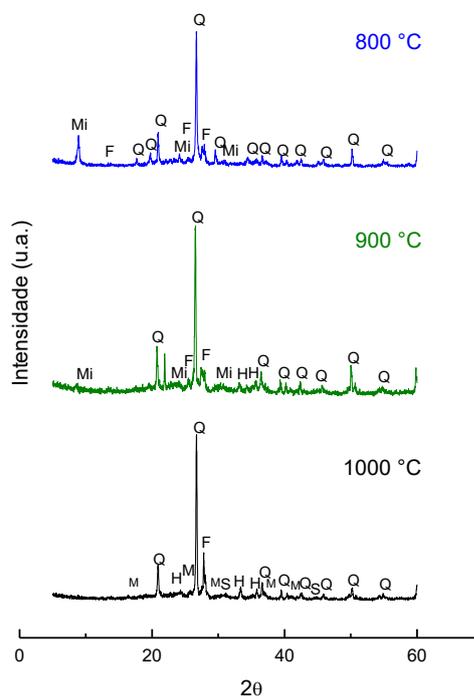
(a)



(b)



(c)



(d)

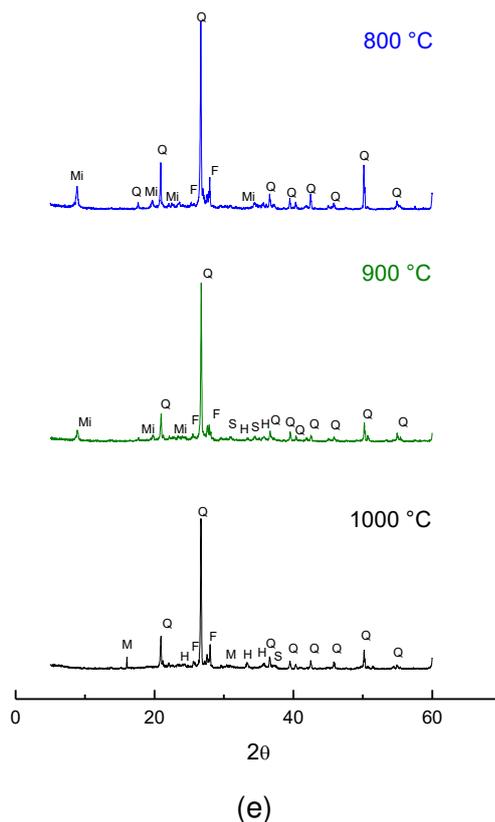


Figura 14 - Espectros de difração de raio X após queima das massas A (a), B (b), C (c), D (d) e E (e). Mi= mica; S= Espinélio; Q= Quartzo; F= Feldspato; H= Hematita; M= Mulita.

As fases cristalinas observadas após a queima foram as seguintes: a 800°C, mica (JCPDS 83-1808), quartzo (JCPDS 46-1045), feldspato (JCPDS 84-0710), espinélio (JCPDS 82-2424); a 900°C, além da mica, quartzo, feldspato, houve formação de hematita (JCPDS 89-8104) e a 1000°C pode-se observar o desaparecimento dos picos da mica e aparecimento da mulita.

As fases quartzo e mica são consideradas residuais, ou seja, provenientes da matéria-prima no seu estado natural, a hematita é proveniente da desidratação de hidróxidos de ferro presente nas massas e surge nas temperaturas acima de 800°C (Vieira & Pinheiro, 2013). Observou-se também a 800 °C que a fase caulinita desapareceu devido a sua desidroxilação, entre 500-600 °C (Mcconville & Lee, 2005; Torres *et al.*, 2007). A 800°C foram detectados picos característicos da fase espinélio, esta fase cristaliza a partir da metacaulinita (Mcconville & Lee, 2005). Na temperatura de 900 °C percebeu-se uma diminuição de intensidade do pico referente à mica, que desaparece completamente a 1000°C, observando-se a presença de picos característicos das fases espinélio e mulita. Alguns autores

acreditam que a mulita é a principal fase responsável pelas propriedades mecânicas dos produtos da cerâmica tradicional, o entrelaçamento das agulhas, a morfologia acicular e a natureza expansiva do seu mecanismo de formação são aspectos fundamentais (Tucci *et al.*, 2007; Lee *et al.*, 2008). Outros consideram também que as partículas de alta resistência (por exemplo, quartzo) envolvidas na matriz vítrea, atuam como inclusões, causando deflexão no caminho das trincas (Tucci *et al.*, 2007).

Na Tabela 5 estão presentes os percentuais das fases cristalinas da massa A obtidos por difração de raios X após a queima nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C.

Tabela 5 - Percentuais das fases cristalinas da massa A após a queima a 800, 900 e 1000°C.

Massas	Fases Cristalinas (%)						
	Quartzo	Mica	Feldspato	Espinélio	Hematita	Mulita	Cristalinidade
A (800°C)	25,27	13,37	26,98	3,85	-	-	82,77
A (900°C)	34,92	15,24	29,70	3,02	3,20	-	86,08
A(1000 °C)	26,85	-	52,84	1,73	4,28	3,65	89,35

Observou-se que para a temperatura de 800°C as fases que apareceram com maior percentual foram o quartzo (25,27%), a mica (13,37%) e o feldspato (3,85%). A fase espinélio foi verificada em menor proporção, apresentando 3,85%. Com o aumento da temperatura para 900°C observou-se um aumento no percentual das fases do quartzo (34,92%), da mica (15,24%) e do feldspato (29,70%), além disso, houve diminuição do percentual da fase espinélio para 3,02%. Para a temperatura de 1000°C notou-se uma diminuição no percentual da fase do quartzo (26,85%), o desaparecimento da fase mica, o aumento da fase feldspato (52,84%), uma nova diminuição da fase espinélio (1,73%) e o surgimento da mulita (3,65%).

A cristalinidade apresentou crescimento ao longo do aquecimento, fato este que pode estar relacionado à nucleação da mulita.

Na Tabela 6 estão presentes os percentuais das fases cristalinas da massa B obtidos por difração de raios X após a queima nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C.

Tabela 6 - Percentuais das fases cristalinas da massa B após a queima a 800, 900 e 1000°C.

Massas	Fases Cristalinas (%)						
	Quartzo	Mica	Feldspato	Espinélio	Hematita	Mulita	Cristalinidade
B (800°C)	18,78	51,17	11,92	1,26	-	-	83,13
B (900°C)	38,66	16,32	32,36	2,58	3,47	-	93,39
B(1000 °C)	45,87	-	24,90	5,27	6,62	7,20	89,86

Foi possível observar que, assim como aconteceu na Tabela 5, as fases com maior percentual foram o quartzo, a mica e o feldspato, com 18,78, 51,17 e 11,92%, respectivamente. E o espinélio apareceu em menor proporção, com 1,26%. Para 900°C foi observado um aumento das fases quartzo (38,66%), feldspato (32,36%) e espinélio (2,58%), e a diminuição da fase mica (16,32%), além do surgimento da fase hematita, com 3,47%. Com o aumento para 1000°C houve aumento das fases quartzo (45,87%), espinélio (5,27%) e hematita (6,62%), desaparecimento da fase mica, diminuição da fase feldspato (24,90%) e o surgimento da fase mulita (7,20%).

Com relação à cristalinidade, observou-se um aumento entre 800 e 900°C com variação entre 83,13 e 93,39%, enquanto que a 1000°C houve uma diminuição da mesma para 89,86%.

Na Tabela 7 estão presentes os percentuais das fases cristalinas da massa C obtidos por difração de raios X após a queima nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C.

Tabela 7 - Percentuais das fases cristalinas da massa C após a queima a 800, 900 e 1000°C.

Massas	Fases Cristalinas (%)						
	Quartzo	Mica	Feldspato	Espinélio	Hematita	Mulita	Cristalinidade
C (800°C)	41,35	17,67	32,73	4,07	-	-	95,82
C (900°C)	33,63	7,86	46,40	6,40	1,59	-	95,88
C(1000 °C)	54,77	-	21,84	4,23	5,43	10,78	97,05

Como observado na Tabela 7, para a temperatura de 800°C, as fases predominantes são o quartzo, a mica e o feldspato, apresentando 41,35, 17,67 e 32,73%, respectivamente. Quando submetidos à queima a 900°C, houve diminuição

das fases quartzo (33,63%) e mica (7,86%), enquanto as fases feldspato (46,40%) e espinélio (6,40%) apresentaram aumento, além desses, houve a formação da fase hematita (1,59%). Para 1000°C, ocorreu aumento das fases quartzo (54,77%) e hematita (5,43%), a fase mica desapareceu completamente, e houve diminuição das fases feldspato (21,84%) e espinélio (4,23%), além do surgimento da mulita (10,78%).

A cristalinidade apresentou comportamento semelhante ao apresentado na Tabela 5, com aumento da mesma ao longo do aquecimento.

Na Tabela 8 estão presentes os percentuais das fases cristalinas da massa D obtidos por difração de raios X após a queima nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C.

Tabela 8 - Percentuais das fases cristalinas da massa D após a queima a 800, 900 e 1000°C.

Massas	Fases Cristalinas (%)					
	Quartzo	Mica	Feldspato	Espinélio	Hematita	Cristalinidade
D (800°C)	49,90	8,82	30,73	7,11	-	96,56
D (900°C)	57,48	6,99	27,68	3,60	2,55	98,30
D (1000 °C)	69,78	-	14,26	13,05	2,26	99,35

Observou-se que a 800°C as fases predominantes são quartzo e feldspato, apresentando, respectivamente, 49,90 e 30,73%. Em menores proporções, a mica com 8,82% e o espinélio com 7,11%. A 900°C, houve aumento da fase quartzo (57,48%), diminuição das fases feldspato (27,68%), espinélio (3,60) e mica (6,99%), e surgimento da hematita (2,55%). Na temperatura de 1000°C ocorreu aumento das fases quartzo (69,78%) e espinélio (13,05%), enquanto as fases feldspato e hematita apresentaram diminuição, com 14,26 e 2,26%, respectivamente.

Assim como ocorreu nas Tabelas 5 e 7, a cristalinidade também aumentou ao longo do aquecimento.

A Tabela 9 apresenta os percentuais das fases cristalinas da massa E obtidos por difração de raios X após a queima nas temperaturas de 800, 900 e 1000°C.

Tabela 9 - Percentuais das fases cristalinas da massa E após a queima a 800, 900 e 1000°C.

Massas	Fases Cristalinas (%)					
	Quartzo	Mica	Feldspato	Espinélio	Hematita	Cristalinidade
E (800°C)	55,70	28,10	13,39	-	-	97,19
E (900°C)	50,41	15,40	21,95	5,68	-	93,44
E (1000 °C)	62,14	-	25,73	9,65	2,21	99,73

A partir dos resultados apresentados na Tabela 9, observou-se que a 800°C as fases predominantes são quartzo e mica, apresentando, respectivamente, 55,70 e 28,10%. Em menor proporção o feldspato com 13,39%. A 900°C, o quartzo apresentou diminuição (50,41%), assim como a fase mica (15,40%). Já o feldspato apresentou um crescimento (21,95%) e o espinélio surgiu como nova fase (5,68%). Na temperatura de 1000°C ocorreu aumento das fases quartzo (69,78%), feldspato (25,73%) e espinélio (9,65%). Houve também o desaparecimento da fase mica e o surgimento da fase hematita (2,21%).

Assim como ocorreu na Tabela 6, a cristalinidade apresentou uma diminuição entre 800 e 900°C, e um aumento a 1000°C.

5.2.8 Análise Dilatométrica

Na Figura 15 estão expostas as curvas dilatométricas obtidas a partir das massas A, B, C, D e E.

A análise dilatométrica é importante para levantar dados para o desenvolvimento de programas de sinterizações, quais sejam, temperatura de início de formação da fase líquida, transformação de fases, tempo de isoterma, entre outros (Formiga *et al.*, 2008).

É sabido que durante o aquecimento ocorrem reações térmicas no interior das amostras, que são afetadas pela granulometria, temperatura, taxa de aquecimento e composição química.

De acordo com a Figura 15, observa-se que todas as massas apresentaram o mesmo comportamento. Entre 0-500°C ocorre dilatação devido à energia contida no sistema, fato que favorece a movimentação atômica e as transformações de fases. Nesta faixa de temperatura há também fenômenos tais como: a eliminação da água

livre e adsorvida em forma de gás, que ocorre até a temperatura máxima de 200 °C e reações de desidroxilação de minerais da argila, como a caulinita. Entre 500-600°C ocorre expansão, provavelmente, devido à transformação do quartzo α para quartzo β e a decomposição da calcita. A partir de 900°C as massas deixam de dilatar e iniciam o processo de retração, que pode ser observado pela mudança na inclinação da curva dilatométrica, com a aproximação das partículas, resultando em uma reorganização estrutural que favorece o processo de densificação.

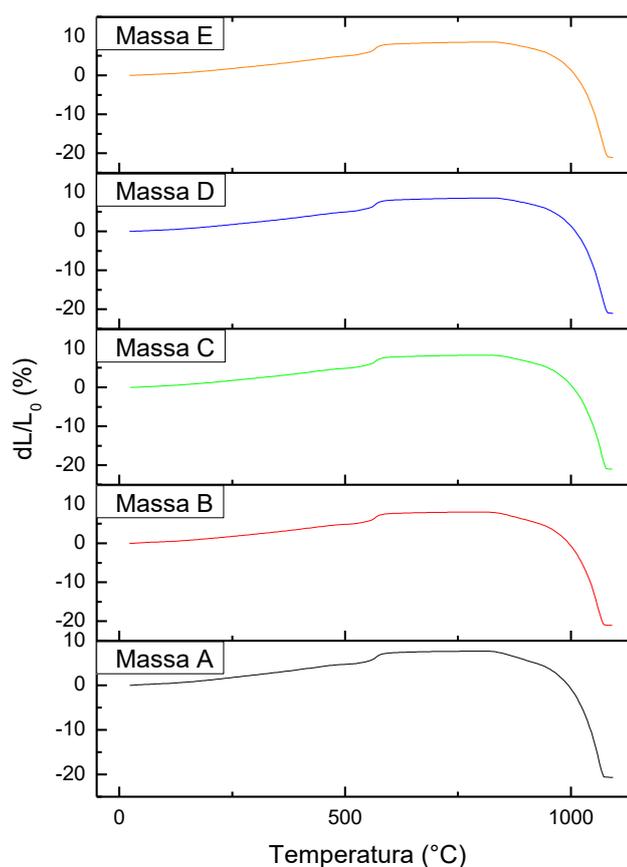


Figura 15 - Curvas Dilatométricas das massas A, B, C, D e E.

5.2.9 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 16 contém as imagens, obtidas através de MEV, da superfície de fratura das peças obtidas com as massas A e B, submetidas à sinterização a 900 e 1000°C.

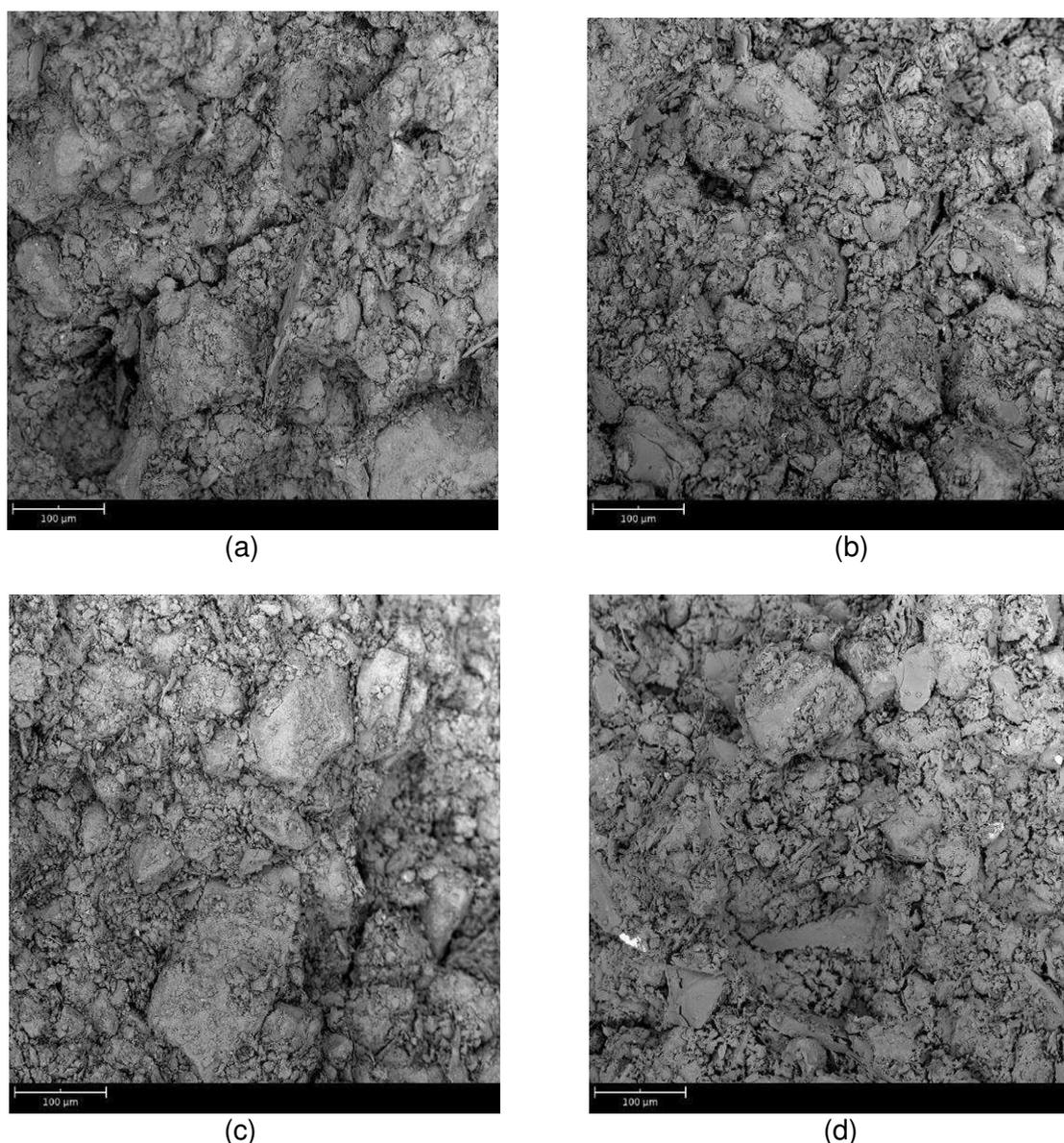


Figura 16 - Micrografias obtidas através de MEV: (a) Massa A - 900°C; (b) Massa A - 1000°C; (c) Massa B - 900°C e (d) Massa B - 1000°C.

As superfícies de fratura são bem irregulares e rugosas, apresentam trincas, poros e partículas de tamanhos e formas variados, aspectos são característicos da fratura intergranular (Babisk *et al.*, 2012). Nas amostras queimadas a 1000°C, principalmente nas peças obtidas com a massa B, foi possível observar algumas áreas apresentando menor porosidade e fase vítrea. Alguns pesquisadores (Vieira *et al.*, 2004; Manhães *et al.*, 2009; Babisk *et al.*, 2012), que também realizaram estudos com a adição de resíduos de rochas ornamentais em massas utilizadas para fabricação de peças da cerâmica vermelha, detectaram superfícies de fratura bem semelhantes às encontradas neste trabalho.

5.2.10 Classificação do resíduo e das massas contendo o resíduo

Quando um novo produto é obtido a partir de resíduos, estes devem ser submetidos a testes rigorosos para garantir a sua segurança para os utilizadores e para o meio ambiente (Cusidó *et al.*, 2015). O resíduo e as massas com a adição do mesmo foram avaliados com relação às características de toxicidade, nas Tabelas 10 e 11 estão presentes os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilidade, respectivamente.

Tabela 10 - Resultado ensaio de lixiviação.

Amostra	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Cr (mg/L)	Cd (mg/L)	Ba (mg/L)	Cu (mg/L)	Ni (mg/L)	Zn (mg/L)	Al (mg/L)	As (mg/L)
Quartzito	<0,010	0,79	<0,010	0,019	0,51	0,19	0,11	0,099	0,36	<0,010
Massa B	<0,010	0,12	<0,010	0,014	1,08	0,047	0,033	0,157	0,86	<0,010
Massa C	0,13	0,34	0,020	0,017	0,73	0,091	0,029	0,39	15,4	<0,010
Massa D	<0,010	<0,010	0,014	0,013	0,24	0,011	0,011	<0,010	0,044	<0,010
Massa E	<0,010	<0,010	0,016	0,014	0,35	0,028	0,009	<0,010	0,097	<0,010
Limite máximo	<30	<10	<5,0	<0,5	<70,0	<200	<7,0	<500	<20	<1,0

Tabela 11 - Resultado ensaio de solubilização.

Amostra	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Cr (mg/L)	Cd (mg/L)	Ba (mg/L)	Cu (mg/L)	Ni (mg/L)	Zn (mg/L)	Al (mg/L)	As (mg/L)
Quartzito	<0,010	<0,010	<0,010	<0,005	0,14	0,011	<0,010	<0,010	0,012	<0,010
Massa B	<0,010	<0,010	<0,010	<0,005	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,050	<0,010
Massa C	<0,010	<0,010	<0,010	<0,005	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,011	<0,010
Massa D	<0,010	<0,010	<0,010	<0,005	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,046	<0,010
Massa E	<0,010	<0,010	<0,010	<0,005	<0,010	<0,010	<0,010	<0,010	0,047	<0,010
Limite máximo	<0,3	<0,1	<0,05	<0,005	<0,7	<2,0	<0,07	<5,0	<0,2	<0,01

Analisando os valores apresentados nas Tabelas 10 e 11, e comparando com os estabelecidos na norma ABNT NBR 10004 (2004), que avalia os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilidade, o resíduo de quartzito e as massas (B, C, D e E) foram classificados como pertencentes à Classe II, não apresentam toxicidade e não são perigosos. O resíduo de quartzito foi classificado como não inerte e pertencente à Classe II A, pois, de acordo com os resultados do ensaio de solubilização (Tabela 11) apresentou concentração de bário (0,14 mg/L) acima do estipulado pela norma (0,7 mg/L), podendo apresentar propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. As massas contendo o resíduo de quartzito foram classificadas como materiais inertes e pertencentes à

Classe II B, pois não apresentaram nenhum componente com concentração superior ao estabelecido em norma.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliada a incorporação do resíduo de quartzito em uma massa da cerâmica vermelha. Foram estudadas massas com 0, 5, 10, 15 e 20% de resíduo. Foram realizados estudos acerca das propriedades físicas e mecânicas das peças queimadas a 800, 900 e 1000 °C. As seguintes conclusões foram obtidas:

- A caracterização do resíduo de quartzito mostrou que a sílica é o componente predominante em sua composição;
- Todas as composições estudadas apresentaram valores de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente dentro dos limites impostos para utilização na cerâmica vermelha;
- Observou-se também que a adição de 5% de resíduo favoreceu a obtenção de peças mais densificadas;
- As massas contendo resíduo apresentaram as melhores propriedades físico-mecânicas quando submetidas a queima a 1000 °C.
- Os resultados referentes à classificação do resíduo e das massas contendo o resíduo segundo a NBR 10004:2004, permitiu classificar o resíduo e as massas como não perigosos, sendo o resíduo pertencente à Classe II A- Não Inerte e as massas pertencentes à Classe II B – Inerte.

Portanto, a incorporação de resíduo de quartzito em massas da cerâmica vermelha é uma alternativa para diminuir a poluição do meio ambiente e conservar os recursos minerais, sem comprometer as propriedades dos produtos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência da taxa de aquecimento e da temperatura de queima nas propriedades físicas e mecânicas de peças obtidas com as massas utilizadas neste trabalho.
- Utilizar massas cerâmicas de outras olarias e comparar com os dados obtidos neste trabalho;
- Confeccionar corpos de prova através do método de extrusão e comparar os resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS E TÉCNICAS. **NBR 10004/2004**. Resíduos Sólidos. 2004.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005/2004**. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos: Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 16p.

ABNT-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006/2004**. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos: Rio de Janeiro: ABNT, 2004, 3p.

BABISK, M. P.; VIDAL, F. W. H.; RIBEIRO, W. S.; AGUIAR, M. C.; GADIOLI, M. C. B.; VIEIRA, C. M. F. Incorporação de resíduo de quartzitos em cerâmica vermelha. **Holos**, v.6, p. 169-177, 2012.

BACCOUR, H., MEDHIOUB M., JAMOSSI, F., MHIRI, T. Influence of firing temperature on the ceramic properties of Triassic clays from Tunisia. **Journal of materials processing technology**, v. 209, p. 2812–2817, 2009.

BARBA, A.; BELTRÁN, V.; FELIU, C.; GARCÍA, J.; GINÉS, F.; SÁNCHEZ, E.; SANZ, V. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerâmicas**. 1ed. ITC, 1997.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Waste to energy – key element for sustainable waste management. **Waste management**, v. 37, p. 3-12, 2015.

BILGIN, N.; YEPREM, H. A.; ARSLAN, S.; BILGIN, A.; GÜNAY, E.; MARŞOĞLU, M. Use of waste marble powder in brick industry. **Construction and Building Materials**, v.29, p. 449-457, 2012.

BRAGA, F. S.; BUZZI, D. C.; COUTO, M. C. L.; LANGE, L. C. Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.15, p. 237-244, 2010.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5ed. LTC, Rio de Janeiro, 2002.

COSTA, A. G.; CAMPELLO, M. S.; PIMENTA, V. B. Rochas ornamentais e de revestimento de Minas Gerais: principais ocorrências, caracterização e aplicações na indústria da construção civil. **Geonomos**, v. 8, p. 9-13, 2000.

CUSIDÓ, J. A., CREMADES, L. V., SORIANO, C., DEVANT, M. Incorporation of paper sludge in clay brick formulation: Ten years of industrial experience. **Applied Clay Science**, v. 108, p. 191–198, 2015.

CUSTÓDIO, A.; CUSTÓDIO, M.; COREGGIO, R. P.; CARGNIN, M. Estudo da compactação de massas para cerâmica vermelha. **Revista Técnico Científica (IFSC)**. Santa Catarina, v.3, p. 215-225, 2012.

DEVANT, M.; CUSIDÓ, J. A.; SORIANO, C. Custom formulation of red ceramics with clay, sewage sludge and forest waste. **Applied Clay Science**, v. 53, p. 669-675, 2011.

DONDI, M. Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: métodos experimentais e interpretação dos dados. **Cerâmica Industrial**, v. 3, p. 36-40, 2006.

FORMIGA, F. L.; ARAUJO, P. A. S.; DUTRA, R. P. S.; VARELA, M. L.; NASCIMENTO, R. B.; PASKOCIMAS, C. A. Uso da técnica de dilatométrica no estudo do efeito da adição de resíduo de caulim na massa de porcelanato. **Cerâmica Industrial**, v. 13, p. 1-5, 2008.

FREITAS, C. S. R.; PEREIRA, I. A. F. S.; PEREIRA, M. L. G.; SIMÕES, T. C. R.; FERREIRA, A. A. L. Influência de Diferentes Processos de Conformação nas

Características Finais de Produtos Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v.14, p. 15-18, 2009.

FURLANI, E., TONELLO, G., MASCHIO, S. Recycling of steel slag and glass cullet from energy saving lamps by fast firing production of ceramics. **Waste Management**, v. 30, p. 1714–1719, 2010.

GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. **Ciência & Saúde Coletiva**, v.17, p. 1503-1510, 2012.

GUERINO, K. B.; VICENZI, J.; BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN, C. P. Uso de Areia de Fundição como Matéria-prima para a Produção de Cerâmicas Brancas Triaxiais. **Cerâmica Industrial**, v.15, p. 42-46, 2010.

GUGGENHEIM, S.; CHANG, Y.; GNOOS, A. F. K. V. Muscovite dehydroxylation: high-temperature studies. **American Mineralogist**, v. 72, p. 537-550, 1987.

HASSAN, K. M.; FUKUSHI, K.; TURIKUZZAMAN, K.; MONIRUZZAMAN, S. M. Effects of using arsenic-iron sludge wastes in brick making. **Waste Management**, v. 34, p. 17072-17078, 2014.

HEIDER, M.; MAIA, C. M. Rochas Ornamentais de Revestimentos – Sumário Mineral 2014. **Departamento Nacional de Produção Mineral**, 2014.

HOJAMBERDIEV, M.; EMINOV, A.; XU, Y. Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles. **Ceramics International**, v.37, p. 871-876, 2011.

IZIDIO, L. L.; SUBTIL, G. W.; ANDRADE, A. A. Utilização de resíduos sólidos da indústria papeleira como matéria-prima para fabricação de tijolos. **IX Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v.9, p. 200-209, 2013.

JUNIOR, L. A. G.; VARAJÃO, A. F. D. C.; SOUZA, M. H. O.; MORENO, M. M. T. Estudo comparativo das argilas das olarias dos municípios de Alfenas e Areado, MG. **Cerâmica**, v. 58, p. 404-411, 2012.

LEE, W. E.; JAYASEELAN, D. D.; ZHANG, S. Solid-liquid interactions: The key to microstructural evolution in ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v.28, p.1517-1525, 2008.

MANHÃES, J. P. V. T.; MOREIRA, J. M. S.; HOLANDA, J. N. F. Variação microestrutural de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental. **Cerâmica**, v.55, p. 371-378, 2009.

MARTINS, C. A.; SORDI, V. L.; BRUNO, R. S. S.; ZAUBERAS, R. T.; BOSCHI, A. O. Metodologia para avaliação da possibilidade de incorporação de resíduos industriais em massas cerâmicas conformadas por extrusão. **Cerâmica Industrial**, v.10, p. 32-34, 2005.

MCCONVILLE, C. J.; LEE, W. E. Microstructural Development on Firing Illite and Smectite Clays Compared with that in Kaolinite. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 88, p. 2267-2276, 2005.

MEDEIROS, F. K.; AQUINO, R. C. A.; RODRIGUES, A. M. T.; SILVA, H. C.; DIAS, I. B. C.; FERREIRA, H. S. Produção de Tijolos Maciços e Placas Cerâmicas de Revestimento com Adição de Óleo Lubrificante Usado. **Cerâmica Industrial**, v.19, p.38-45, 2014.

MENEZES, R. R.; CAMPOS, L. F.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Aspectos fundamentais da expansão por umidade: uma revisão. Parte I: aspectos históricos, causas e correlações. **Cerâmica**, v.52, p.1-14, 2006.

MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R.; SANTANA, L. N. L.; NEVES, G. A.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granite para produção de blocos e telhas cerâmicos. **Cerâmica**, v.53, p.192-199, 2007.

MOREIRA, J. M. S.; MANHÃES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using ornamental rock powder waste. **Journal of materials processing technology**, v.196, p.88-93, 2008.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JR. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**, v. 6, p. 28-39, 2001.

MOTTA, J. F. M.; CABRAL JR., M.; TANNO, L. C.; ZANARDO, A. As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. **Cerâmica Industrial**, v.7, p.33-40, 2002.

MUÑOZ, P.; MORALES, M. P.; MENDÍVIL, M. A.; JUÁREZ, M. C.; MUÑOZ, L. Using of waste pomace from winery industry to improve thermal insulation of fired clay bricks. Eco-friendly way of building construction. **Construction and Building Materials**, v.71, p. 181-187, 2014.

MYMRINE, V.; PONTE, M. J. J. S.; PONTE, H. A.; KAMINARI, N. M. S.; PAWLOWSKY, U.; SOLYON, G. J. P. Oily diatomite and galvanic wastes as a raw materials for red ceramic fabrication. **Construction and Building Materials**, v.41, p. 360-364, 2013.

NANDI, V. S.; RAUPP-PEREIRA, F.; MONTEDO, O. R. K.; OLIVEIRA, A. P. N. The use of ceramic sludge and recycled glass to obtain engobes for manufacturing ceramic tiles. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, P. 461-470, 2015.

NIRMALA, G.; VIRUTHAGIRI, G. A view of microstructure with technological behavior of waste incorporated ceramic bricks, 2015. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 135, p. 76-80, 2015.

PAZ, Y. M.; MORAIS, M. M.; HOLANDA, R. M. Desenvolvimento econômico regional e o aproveitamento de resíduos sólidos no polo da indústria da cerâmica vermelha

do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, p. 1682-1704, 2013.

PEDROTI, L. G.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F.; BAHIANSE, A. V.; MAIA, P. C. A. Desenvolvimento de massa cerâmica para blocos queimados e prensados. **Cerâmica Industrial**, v. 16, p. 25-30, 2011.

PENTEADO, C. S. G.; CARVALHO, E. V.; LINTZ, R. C. C. Reusing ceramic tile polishing waste in paving block manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 514-520, 2016.

PÉREZ, C. A. S.; PADUANI, C.; ARDISSON, J. D.; GOBBI, D.; THOMÉ, A. Caracterização de Massas Cerâmicas Utilizadas na Indústria de Cerâmica Vermelha em São Domingos do Sul – RS. **Cerâmica Industrial**, v.15, p. 38-43, 2010.

ROVERI, C. D.; ZANARDO, A.; MORENO, M. M. T. Variação da cor e propriedades cerâmicas com o aumento da temperatura de queima de uma argila proveniente da formação Corumbataí, região de Piracicaba – SP. **Cerâmica**, v. 53, p. 436-441, 2007.

SILVA, C. R. L.; CHINELATTO A. L.; CHINELATTO A. S. A. Viabilidade da incorporação do lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE) em massa cerâmica para produção de blocos. **Cerâmica**, v. 61, p. 31- 40, 2015.

SOUZA, C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro. **Revista Matéria**, v. 13, p. 194-202, 2008.

SOUZA, A. J.; PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Processing of floor tiles bearing ornamental rock-cutting waste. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, p. 1898-1904, 2010.

SOUZA SANTOS, P. **Ciência e tecnologia de argilas**. Editora Edgard Blücher, vol. 1, São Paulo, 1989.

TAGUCHI, S. P.; SANTOS, J. C.; GOMES, T. M.; CUNHA, N. A. Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado. **Cerâmica**, v.60, p. 291-296, 2014.

TORRES, H. S. S.; VARAJÃO, A. F. D. C.; SABIONI, A. C. S. Technological properties of ceramic produced from steatite (soapstone) residues-kaolinite clay ceramic composites. **Applied Clay Science**, v. 112-113, p. 53-61, 2015.

TORRES, P.; FERNANDES, H. R.; OLHERO, S.; FERREIRA, J. M. F. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, p. 23-30, 2009.

TORRES, P.; MANJATE, R. S.; QUARESMA, S.; FERNANDES, H. R.; FERREIRA, J. M. F. Development of ceramic floor tile compositions based on quartzite and granite sludges. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, p. 4649-4655, 2007.

TUCCI, A.; ESPOSITO, L.; MALMUSI, L.; RAMBALDI, E. New body mixes for porcelain stoneware tiles with improved mechanical characteristics. **Journal of the European Ceramic Society**, v.27, p.1875-1881, 2007.

VELASCO, P. M.; ORTIZ, M. P. M.; GIRO, M. A. M.; CASTELLÓ, M. C. J.; VELASCO, L. M. Development of better insulation bricks by adding mushroom compost wastes. **Energy and Buildings**, v.80, p. 17-22, 2014.

VELASCO, P. M.; ORTIZ, M. P. M.; GIRO, M. A. M.; VELASCO, L. M. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. **Construction and Building Materials**, v.63, p. 97-107, 2014.

VIEIRA, C. M. F., SOARES, T. M., SANCHEZ, R., MONTEIRO, S. N. Incorporation of granite waste in red ceramics. **Materials Science and Engineering A**, v. 373, p. 115–121, 2004.

VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M. Incorporação de rocha sedimentar em pó em massas para telhas cerâmicas - Parte 2: avaliação microestrutural. **Cerâmica**, v. 59, p. 495-500, 2013.

VIEIRA, C. M. F.; SANCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N.; LALLA, N.; QUARANTA, N. Recycling of electric arc furnace dust into red ceramic. **Journal of Materials Research and Technology**, v.2, p. 88-92, 2013.

VIEIRA, E. V.; SOUZA, M. M.; GONZAGA, L. M. Caracterização dos resíduos da lavra de quartzitos da região do Seridó visando à produção de cerâmica para porcelanato. **Ambiente Mineral – Revista Brasileira de Mineração e Meio Ambiente**, v. 3, p. 16-24, 2013.

VSÉVOLOD, A. M.; KIRILL, P. A.; RODRIGO, E. C.; ANDRÉ, N.; YELAMAN, K. A.; NURALY, S. B.; ROSE, J. L.; IZZO, R. L. S. Red ceramics from composites of hazardous sludges with foundry sand, glass waste and acid neutralization salts. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2015.07.015>, 2015.

ZACCARON, A.; NANDI, V. S.; SILVA, D. B.; COMIN, A. B. Estudo da Utilização do Resíduo Proveniente do Beneficiamento do Carvão Mineral como Matéria-Prima Alternativa na Fabricação de Blocos de Vedação. **Cerâmica Industrial**, v. 20, p. 38-44, 2015.

ZANIN, T. L.; KLITZKE, W.; LUZ JR., L. F. L. Estudo da influência da adição de cinzas de carvão mineral nas propriedades da cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v.59, p. 231-234, 2013.

ANEXO

I. Tabela com as propriedades físico-mecânicas das massas estudadas.

Massas	Absorção de Água (%)			Porosidade (%)			Resistência à Flexão (MPa)			Retração Linear (%)			MEA* (g/cm ³)		
	800 °C	900 °C	1000 °C	800 °C	900 °C	1000°C	800 °C	900 °C	1000°C	800 °C	900 °C	1000 °C	800 °C	900 °C	1000°C
A	17,40±	17,79±	14,88±	31,73±	32,50±	28,39±	2,75±	3,78±	5,20±	-0,103	0,192±	1,402±	1,83±	1,83±	1,92±
	0,40	0,68	0,59	0,63	0,93	0,94	0,27	0,47	0,49	±0,04	0,02	0,12	0,01	0,02	0,06
B	19,05±	18,35±	13,80±	34,03±	33,00±	26,92±	1,38±	2,24±	6,52±	0,035±	0,52±	3,14±	1,79±	1,80±	1,95±
	0,92	1,13	1,05	1,60	1,72	1,81	0,08	0,20	0,51	0,04	0,04	0,10	0,07	0,02	0,02
C	18,86±	18,58±	14,13±	33,57±	33,08±	26,97±	1,45±	2,22±	5,91±	-0,004	0,37±	2,73±	1,78±	1,79±	1,91±
	0,29	3,20	2,13	0,44	4,86	3,69	0,12	0,17	0,38	±0,04	0,06	0,10	0,01	0,05	0,04
D	17,91±	17,99±	14,77±	32,35±	32,47±	27,96±	1,63±	2,11±	4,78±	-0,271	0,131±	2,275±	1,81±	1,81±	1,89±
	0,19	0,48	0,49	0,22	0,57	0,71	0,15	0,28	0,35	±0,04	0,05	0,14	0,01	0,02	0,02
E	16,65±	17,10±	15,89±	30,98±	31,52±	29,77±	1,71±	1,78±	2,87±	-0,44±	-0,34±	0,38±	1,86±	1,84±	1,87±
	0,27	0,21	0,65	0,39	0,29	0,83	0,15	0,16	0,44	0,04	0,02	0,07	0,01	0,01	0,02

*MEA – Massa Específica Aparente