

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO PÓ DE BORRACHA DE PNEUS
INSERVÍVEIS EM CERÂMICA VERMELHA**

JULIANA SOARES DE FARIA

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

MARÇO – 2015

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO PÓ DE BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS EM CERÂMICA VERMELHA

JULIANA SOARES DE FARIA

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”.

Área de concentração: Materiais e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Carlos Maurício Fontes Vieira

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

MARÇO – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

34/2015

Faria, Juliana Soares de

Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha / Juliana Soares de Faria. – Campos dos Goytacazes, 2015.

xii, 125 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2015.

Orientador: Carlos Maurício Fontes Vieira.

Área de concentração: Materiais e meio ambiente.

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO PÓ DE BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS EM CERÂMICA VERMELHA

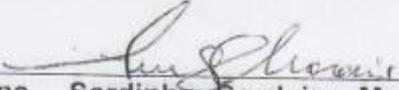
JULIANA SOARES DE FARIA

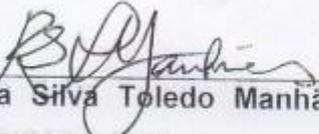
“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”.

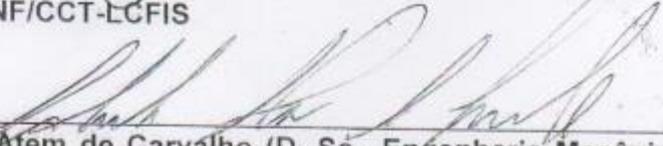
Área de concentração: Materiais e Meio Ambiente

Aprovada em 26 de março de 2015.

Comissão examinadora:


Prof. Alline Sardinha Cordeiro Moraes (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – IFF Campos


Prof. Rosanel da Silva Toledo Manhães (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) - UENF/CCT-LCFIS


Prof. Eduardo Afem de Carvalho (D. Sc., Engenharia Mecânica) – UENF/CCT-LAMAV


Prof. Carlos Mauricio Fontes Vieira (D. Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) - UENF/CCT-LAMAV-Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, que me orienta e está sempre comigo dando força e sabedoria em todas as dificuldades e provações.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela proteção, saúde e inspiração.

Ao meu marido Adriano pela aceitação e ajuda em todos os momentos.

A minha família pelo apoio, entendimento e pelas orações sempre presentes.

Ao professor Carlos Maurício pela orientação e oportunidade de realizar este trabalho.

A UENF pela estrutura física, apoio financeiro e oportunidade para a realização do mestrado.

A Cerâmica Sardinha na pessoa do Sr. Rodolfo e ao IDEA Cíclica, Magé- RJ, na pessoa do Kaká e Luis pelo fornecimento das matérias primas utilizadas neste trabalho.

Aos professores Fernando Vernilli – USP de Lorena-SP, Rubén Sanchez-SEPOL-LAMAV/UENF, Rosane Toledo – LCFIS-CCT/UENF pela realização de análises;

Aos professores Aline Moraes, Eduardo Atem e Rosane Toledo por aceitarem fazer parte da banca de avaliação deste trabalho.

A todos os professores que passaram pela minha formação e comigo dividiram seus conhecimentos.

Aos meus eternos amigos Sebastião, Carla, Isabela, Suelen e Poliana pelo apoio e carinho incondicional.

As colegas de república Laura, Marcelle, Nicolle, Glycia, Larah, Livia e Ingrid.

Aos funcionários e técnicos do LAMAV, LECIV e LZNA e demais colegas: Shirlene, Elaine, Rômulo, Milton, Vanússia, Zulmira, Teresa, Silvio, Michel Picanço, Almir.

Aos anjos Michelle Babisk, Zulmira, Elaine Carvalho, Thaís Mardegan, Larissa e Rosane Toledo pela mão estendida nos momentos de desespero.

Aos mineiros Flaviane, Quésia, Emilene, Águida, Thiago, Elizângela, Tarcília, Kátia, Wander, Kelly, Felipe Costa, pela companhia e pelas caronas nessas estradas.

A todos que me ajudaram direta e indiretamente no desenvolvimento desse trabalho.

Muito obrigada!

Sumário

<u>Lista de Figuras</u>	VII
<u>Lista de Tabelas</u>	X
<u>1. Introdução</u>	1
<u>2. Justificativa</u>	3
<u>3. Objetivos</u>	4
<u>4. Revisão Bibliográfica</u>	5
<u>4.1 O setor de Cerâmica Vermelha</u>	5
<u>4.1.1 Argilas</u>	5
<u>4.1.2 Materiais Cerâmicos</u>	6
<u>4.1.3 O setor Cerâmico</u>	7
<u>4.1.4 Processo de fabricação de cerâmica vermelha</u>	9
<u>4.2 Resíduos Sólidos</u>	10
<u>4.2.1. Definição de resíduos</u>	10
<u>4.2.2 Classificação de resíduos</u>	10
<u>4.3 A problemática dos resíduos sólidos</u>	13
<u>4.4 Aproveitamento de resíduos industriais</u>	16
<u>4.4.1 Incorporação de resíduos na Indústria Cerâmica</u>	16
<u>4.4.2 Vantagens da incorporação de resíduos</u>	18
<u>4.4.3 A incorporação de resíduos combustíveis em cerâmica vermelha</u>	19
<u>4.5 O pneu</u>	23
<u>4.5.1 Legislação sobre pneumáticos</u>	26
<u>4.5.2 A produção de pneus e a problemática dos pneus inservíveis</u>	29
<u>4.5.3 Tecnologias utilizadas para reutilização de pneus</u>	31
<u>4.5.4 A reutilização de pneus inservíveis</u>	33
<u>4.6 Alternativas para destinação ambientalmente correta de pneus</u>	37
<u>4.6.1 Processo de aproveitamento do resíduo pó de borracha de pneu</u>	43
<u>4.6.2 Utilização de resíduos de pneus em asfalto</u>	44
<u>4.6.3 Utilização de resíduos de pneus em concreto</u>	47
<u>4.6.4 Utilização de resíduos de pneus em argamassa</u>	50
<u>4.6.5 Incorporação de resíduos de borracha de pneus em tijolos</u>	55
<u>5. Materiais e Métodos</u>	58
<u>5.1 Materiais</u>	59

<u>5.2 - Métodos</u>	62
<u>5.2.1 - Beneficiamento das matérias-primas</u>	62
<u>5.2.2- Caracterização das matérias-primas</u>	63
<u>5.2.2.1 - Caracterização química</u>	63
<u>5.2.2.1.1 – Análise de FRX</u>	63
<u>5.2.2.1.2– Composição elementar e isotópica de C e N</u>	63
<u>5.2.2.2 - Caracterização mineralógica</u>	64
<u>5.2.2.2.1 - Difração de raios X</u>	64
<u>5.2.2.2.2 - Análises térmicas (TG/ DTG)</u>	64
<u>5.2.2.2.3 – Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</u>	64
<u>5.2.2.2.4 – Poder calorífico</u>	64
<u>5.2.2.3 - Caracterização física</u>	66
<u>5.2.2.3.1 - Distribuição de tamanho de partículas</u>	66
<u>5.2.2.4 – Caracterização morfológica</u>	66
<u>5.2.3- Preparação dos corpos de prova</u>	67
<u>5.2.3.1 - Preparação das formulações</u>	67
<u>5.2.3.2 - Plasticidade</u>	68
<u>5.2.3.3 - Processamento dos corpos de prova</u>	68
<u>5.2.4 – Determinação de propriedades físicas e mecânicas</u>	69
<u>5.2.4.1 - Absorção de água</u>	69
<u>5.2.4.2- Densidade relativa a seco</u>	69
<u>5.2.4.3- Porosidade aparente</u>	70
<u>5.2.4.4- Retração linear de queima</u>	70
<u>5.2.4.5- Tensão de ruptura à flexão</u>	71
<u>5.2.4.6 - Cálculo do coeficiente de variação</u>	71
<u>5.2.5 - Análise microestrutural e de fase dos corpos de prova</u>	72
<u>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	73
<u>6.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS</u>	73
<u>6.1.1 – Massa cerâmica</u>	73
<u>6.1.1.1- Composição química</u>	73
<u>6.1.1.2 – Difração de raios X (DRX)</u>	74
<u>6.1.1.3 – Granulometria</u>	75
<u>6.1.1.4 – Comportamento térmico</u>	76
<u>6.1.1.5 – Morfologia</u>	77

<u>6.1.2 – Pó de borracha</u>	78
<u>6.1.2.1 – Composição química</u>	78
<u>6.1.2.2 - Difração de raios X</u>	79
<u>6.1.2.2.1 – Poder calorífico</u>	80
<u>6.1.2.3 – Granulometria</u>	80
<u>6.1.2.4 – Comportamento térmico</u>	81
<u>6.1.2.4.1 – Análise termogravimétrica (TGA)</u>	81
<u>6.1.2.4.2 – Calorimetria exploratória diferencial (DSC)</u>	82
<u>6.1.2.5 – Morfologia</u>	84
<u>6.2 - Caracterizações das composições</u>	85
<u>6.2.1 - Plasticidade</u>	85
<u>6.2.2 - Características físicas das formulações</u>	87
<u>6.2.3 - Densidade aparente</u>	89
<u>6.2.4 - Retração linear de queima</u>	90
<u>6.2.5 - Absorção de água</u>	91
<u>6.2.6 - Porosidade aparente</u>	92
<u>6.2.7 - Tensão de ruptura à flexão</u>	93
<u>6.2.8 – Análise microestrutural e de fase das cerâmicas incorporadas com pó de borracha</u>	94
<u>6.2.8.1 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</u>	94
<u>6.2.8.2 – Microscopia ótica (MO)</u>	102
<u>6.2.8.2 – Difração de raios X (DRX) das peças queimadas</u>	106
<u>6.3 - Avaliação econômica e energética da incorporação do resíduo pó de borracha na queima</u>	108
<u>7. Conclusões</u>	110
<u>7.1 - Sugestões para futuros trabalhos</u>	112
<u>8. Referências Bibliográficas</u>	113

Lista de Figuras

<u>Figura 1: Fluxograma do processo de fabricação de blocos e telhas cerâmicas (ABC, 2002).</u>	9
<u>Figura 2: Caracterização e classificação de resíduos sólidos (ABNT 10004/2004).</u>	12
<u>Figura 3: Destinação dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos por ocorrência (IBGE, 2010a).</u>	15
<u>Figura 4: Partes constituintes dos pneus de automóveis</u>	25
<u>Figura 5: Matérias-primas empregadas na fabricação dos pneus automotivos (ABIQUIM, 2011).</u>	26
<u>Figura 6: Processo de logística reversa de pneus usados no Brasil (LAGARINHOS, 2008).</u>	28
<u>Figura 7: Balança comercial: Importação e Exportação de Pneumáticos</u>	30
<u>Figura 8: Exemplos do descarte inadequado de pneus no meio ambiente.</u>	30
<u>Figura 9: Fluxograma das tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus (LAGARINHOS et al., 2008).</u>	32
<u>Figura 10: Muro de contenção.</u>	33
<u>Figura 11: Pneus inteiros associados às plantas.</u>	33
<u>Figura 12: Obra de drenagem do Rio Paraguari em Salvador-BA.</u>	34
<u>Figura 13: Barreira de pneus no Autódromo Internacional de Curitiba-PR.</u>	34
<u>Figura 14: Pneus usados como base artificial para formação de corais</u>	35
<u>Figura 15: Exemplos de móveis feitos com pneus</u>	35
<u>Figura 16: Reutilização de pneu em obra de contenção de encosta</u>	36
<u>Figura 17: Exemplo do uso de pneu em decoração e ornamentação.</u>	36
<u>Figura 18: Earthships de pneus no Haiti</u>	37
<u>Figura 19: Cadeia de destinação de pneus (MOTTA, 2008).</u>	39
<u>Figura 20: Processo de trituração de resíduos de pneus.</u>	42
<u>Figura 21: Esquema de coloração do pó de borracha e prensagem de ladrilhos de borracha(Fonte: http://www.amorehp.com/waste%20tire%20crushing.html).</u>	43
<u>Figura 22: Variação da viscosidade em relação ao teor de borracha. (ODA et al. 2001).</u>	46
<u>Figura 23: Efeito da granulometria da borracha na viscosidade do ligante asfalto-borracha (ODA, 2001).</u>	46
<u>Figura 24: Resultados da variação da porcentagem de afundamento em trilha de roda com o número de ciclos (BERTOLLO et al.,2002).</u>	47
<u>Figura 25: Propriedades dos concretos com diferentes teores de borrachas nos estados endurecidos e fresco (Fonte: BEWICK et al., 2010).</u>	48
<u>Figura 26: Absorção de água do traço estudado, aos 28 dias (Fonte: FREITAS, 2007).</u>	49
<u>Figura 27: Gráfico do comprimento das fissuras das amostras</u>	51
<u>Figura 28: Resistência à compressão da pasta de cimento com borracha de pneu (RAGHAVAN, 2000).</u>	53
<u>Figura 29: Resistência à flexão da pasta de cimento com borracha de pneu (RAGHAVAN, 2000).</u>	53

<u>Figura 30: Resultado do Ensaio de redução sonora (Fonte: LIMA et al., 2000).</u>	54
<u>Figura 31: Determinação de traços: Referência (A) e adição da borracha de pneu triturada (B) (Fonte: (NASCIMENTO, 2013).</u>	55
<u>Figura 32: Comparativo da resistência à compressão (MPa), com intervalo de confiança de 90% (Fonte: NASCIMENTO, 2013).</u>	57
<u>Figura 33: Fluxograma das etapas envolvidas neste projeto.</u>	58
<u>Figura 34: Massa Cerâmica adquirida em setor cerâmico de Campos dos Goytacazes.</u>	59
<u>Figura 35: Etapas de separação das raspas de borracha de pneus</u>	61
<u>Figura 36: Equipamentos utilizados no beneficiamento das matérias primas: A- britador de mandíbulas e B-moinho de bolas (Fonte: Arquivo próprio).</u>	62
<u>Figura 37: A: Bomba calorimétrica, B: Calorímetro</u>	65
<u>Figura 38- Difratoograma de raios X da massa cerâmica.</u>	75
<u>Figura 39: Distribuição do tamanho de partículas da massa cerâmica.</u>	76
<u>Figura 40: Curva termogravimétrica (TGA) da massa cerâmica.</u>	77
<u>Figura 41: Micrografias obtidas em microscópio confocal sob aumento de x216(A) e x430(B) das partículas da massa cerâmica.</u>	78
<u>Figura 42: Difratoograma de raios X do pó de borracha.</u>	80
<u>Figura 43: Curva granulométrica do resíduo pó de borracha.</u>	81
<u>Figura 44 - Curvas de análise termogravimétrica (TGA) do pó de borracha.</u>	82
<u>Figura 45: Curvas de DSC/TG do pó de borracha</u>	84
<u>Figura 46 - Micrografias obtidas por MEV do pó de borracha.</u>	84
<u>Figura 47 - Mapeamento obtido no MEV do pó de borracha.</u>	84
<u>Figura 48: Diagrama de Winkler (PRACIDELLI E MELCHIADES, 1997) com as localizações das matérias-primas.</u>	86
<u>Figura 49: Corpos de prova das formulações secas.</u>	87
<u>Figura 50: Micrografias obtidas em microscópio confocal, sob aumento de x216 e x430 da formulação M0.</u>	88
<u>Figura 51: Micrografias obtidas em microscópio confocal, sob aumento de x216 e x430 da formulação M0,5.</u>	88
<u>Figura 52: Corpos de prova das formulações queimadas nas temperaturas 850, 950 e 1050 °C.</u>	89
<u>Figura 53 - Densidade aparente a seco em função da adição de pó de borracha.</u>	90
<u>Figura 54: Retração linear de queima das composições queimadas à 850, 950 e 1050 °C.</u>	91
<u>Figura 55: Absorção de água das composições queimadas à 850, 950 e 1050 °C.</u>	92
<u>Figura 56: Porosidade aparente das composições queimadas à 850, 950 e 1050 °C.</u>	93
<u>Figura 57: Tensão de ruptura à flexão das composições queimadas à 850, 950 e 1050 °C.</u>	94
<u>Figura 58: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M0 queimada a 850 °C.</u>	95
<u>Figura 59: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M0 queimada a 950 °C.</u>	95

<u>Figura 60: Micrografia (MEV) da formulação M0 queimada a 850 °C e espectros de EDS.</u>	96
<u>Figura 61: Micrografia (MEV) da formulação M0 queimada a 950 °C e espectros de EDS.</u>	96
<u>Figura 62: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M0,5 queimada a 850 °C.</u>	97
<u>Figura 63: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1 queimada a 950 °C.</u>	98
<u>Figura 64: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1,5 queimada a 850 °C.</u>	98
<u>Figura 65: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1,5 queimada a 950 °C</u>	99
<u>Figura 66: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1,5 queimada a 1050 °C.</u>	99
<u>Figura 67: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1 queimada</u>	100
<u>Figura 68: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M2 queimada a 1050 °C.</u>	100
<u>Figura 69: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M0,5 queimada a 950 °C.</u>	101
<u>Figura 70: Micrografia (MEV) da formulação M1 queimada a 850 °C e espectros de EDS.</u>	101
<u>Figura 71: Micrografia (MEV) da superfície da formulação M2 queimada a 1050 °C e espectros de EDS</u>	102
<u>Figura 72: Microscopia ótica da formulação M0 queimada a 850 °C.</u>	102
<u>Figura 73: Microscopia ótica formulação M0,5 queimada a 850 °C.</u>	103
<u>Figura 74: Microscopia ótica da formulação M1,5 queimada a 850 °C.</u>	103
<u>Figura 75: Microscopia ótica da formulação M0,5 queimada a 950 °C.</u>	104
<u>Figura 76: Microscopia ótica da formulação M2 queimada a 950 °C.</u>	104
<u>Figura 77: Microscopia ótica da formulação M0 queimada a 1050 °C.</u>	105
<u>Figura 78: Microscopia ótica da formulação M0,5 queimada a 1050 °C.</u>	105
<u>Figura 79: Microscopia ótica da formulação M1 queimada a 1050 °C</u>	106
<u>Figura 80: Difratoogramas de raios X das composições M0, M0,5 e M1 queimadas a 850 °C onde: M-mica muscovita, Q – quartzo, F- feldspato, H- hematita, Ru- rutilo.</u>	107
<u>Figura 81: Difratoogramas de raios X das composições M0, M0,5 e M1 queimadas a 950 °C onde: M-mica muscovita, Q – quartzo, F- feldspato, H- hematita, Ru- rutilo.</u>	107
<u>Figura 82: Difratoogramas de raios X das composições M0, M0,5 e M1 queimadas a 1050 °C onde: M-mica muscovita, Q – quartzo, F- feldspato, H- hematita, Ru- rutilo.</u>	108

Lista de Tabelas

<u>Tabela 1: Principais setores cerâmicos, matérias-primas, áreas utilizadas e características do processo de fabricação (MOTTA et al.,2001).</u>	8
<u>Tabela 2: Conteúdo energético de matérias-primas que podem ser utilizadas pelo processo de queima. (Fonte: DONDI et al., 1997 a).</u>	20
<u>Tabela 3: Características e propriedades cerâmicas de tijolos obtidos a partir de formulações com incorporações de resíduos combustíveis</u>	22
<u>Tabela 4: Composição química dos pneus (ANDRIETTA, 2002).</u>	24
<u>Tabela 5: Materiais Componentes de pneus (ANDRIETTA, 2002).</u>	24
<u>Tabela 6: Produção nacional de pneus de 2006 a 2013 por categoria</u>	29
<u>Tabela 7: Estratégias de reciclagem e reuso de pneus inservíveis, com as suas respectivas opções tecnológicas de tratamento (Fonte: CIMINO et al., 2005).</u>	41
<u>Tabela 8: Média dos resultados dos ensaios de ponto de amolecimento, penetração e ponto de fulgor por teor de borracha (ODA et al., 2001).</u>	45
<u>Tabela 9: Quantidades de fissuras que ocorreram com 24h e com 90 dias</u>	50
<u>Tabela 10: Trabalhabilidade das argamassas em estado fresco</u>	52
<u>Tabela 11: Resultados do ensaio de abrasão das argamassas (Fonte: MENEGUINI, 2003).</u>	55
<u>Tabela 12: Quantidade de tijolos produzidos por traço (Fonte:NASCIMENTO, 2013).</u>	56
<u>Tabela 13: Resistência à compressão (Fonte: NASCIMENTO, 2013).</u>	56
<u>Tabela 14: Composição das formulações preparadas.</u>	68
<u>Tabela 15 - Composição química da massa cerâmica.</u>	73
<u>Tabela 16 - Composição química do pó de borracha.</u>	79
<u>Tabela 17: Limites de Atterberg das formulações/composições</u>	85

RESUMO

FARIA, J. S. **Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha**. 2015. 125f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

O crescente desenvolvimento industrial tem gerado um acúmulo de resíduos sólidos e aumentado a preocupação da sociedade devido ao impacto ambiental causado por estes. O pneu usado é um resíduo indesejável e, quando não possui mais nenhuma possibilidade de aproveitamento, é classificado como pneu inservível, a inutilidade deste está se tornando um problema mundial. A reciclagem de muitos tipos de resíduos tem se tornado possível através da indústria cerâmica que os utiliza como matéria-prima para desenvolver materiais cerâmicos de qualidade. O objetivo do presente trabalho foi incorporar e avaliar o efeito da incorporação de resíduo de borracha de pneus inservíveis nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica vermelha. Para isso, foram preparados corpos de prova com pressão uniaxial a 20 MPa para queima a 850, 950 e 1050 °C, com incorporações do resíduo de 0; 0,5; 1; 1,5 e 2 % em massa cerâmica, proveniente da região de Campos dos Goytacazes-RJ. Foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas dos corpos cerâmicos: retração linear, absorção de água e tensão de ruptura à flexão. A massa cerâmica foi caracterizada por fluorescência de raios X e difração de raios X, e no caso do resíduo foi investigada a composição química elementar, o teor de carbono, o poder calorífico e seu comportamento térmico. Como observado nos resultados, indica-se a incorporação de até 1% do resíduo de pneus em massa cerâmica, pois sua alta concentração de carbono pode prejudicar algumas propriedades da cerâmica além de aumentar a ocorrência de poros no material. O alto poder calorífico do resíduo de pneu representa uma grande possibilidade de economia de energia, para o processo de queima, associada à possibilidade de uma destinação para enormes volumes de passivo ambiental, porém é necessário se pensar no tratamento e minimização dos gases produzidos na queima do resíduo.

Palavras-chave: Resíduos sólidos; Reciclagem; Pó de borracha de pneus; Cerâmica vermelha.

ABSTRACT

FARIA, J. S. **Incorporation of rubber dust residue from unserviceable tires in red ceramic.** 2015. 125f. Dissertation (master) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

The increasing industrial development has generated an accumulation of solid residues and raised the concern of the society due to the environmental impact caused. The used tire is an undesirable residue, and when no longer it has any possibility of reuse, it is classified as unserviceable tire, its uselessness is becoming a global problem. The recycling of many types of residues has become possible through the ceramic industry, which uses them as raw material to develop quality ceramic materials. The objective of this study was to incorporate and evaluate the effect of the incorporation of rubber residue from unserviceable tires in the physical and mechanical properties of red ceramic. For this, specimens were prepared with uniaxial pressure at 20 MPa for burning at 850, 950 and 1050 °C, with incorporation of residues of 0; 0.5; 1; 1.5 and 2 % in ceramic mass, from Campos dos Goytacazes-RJ. The following physical and mechanical properties of the ceramic bodies were evaluated: linear shrinkage, water absorption and flexural stress at rupture. The ceramic mass was characterized by X-ray fluorescence and X-ray diffraction, and in the residue we investigated the elementary chemical composition, the carbon content and the calorific value of its thermal behavior. As seen from the results, the incorporation of up to 1% of the waste tires in the ceramic mass was indicated because its high concentration of carbon may impair certain properties of the ceramic in addition to increasing the occurrence of pores in the material. The high calorific value of the waste tire represents a high possibility of energy saving, to the process of burning, associated with the possibility of a destination for huge volumes of environmental liability, however it is necessary to think about the treatment and minimization of gas produced in burning residue.

Keywords: Solid waste; Recycling; Tire rubber dust; Red ceramic.

1. Introdução

Atualmente, com o constante crescimento populacional, tem-se a necessidade de uma maior demanda por produtos industrializados, que possuem ciclos de vida cada vez menores e muitas vezes são descartados de maneira inadequada. Porém, há uma forte tendência em buscar alternativas de utilização racional dos recursos naturais e ao aproveitamento de muitos dos resíduos lançados no meio ambiente.

Segundo a ABNT (2004), um dos principais causadores de impactos ambientais são chamados resíduos sólidos, que se encontram no estado sólido ou semi-sólido e resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

O pneu usado é um resíduo indesejável e, quando não possui mais nenhuma possibilidade de aproveitamento, ou seja, quando não possui mais utilidade na recauchutagem ou recapagem é classificado como pneu inservível, a inutilidade deste está se tornando um problema mundial. O descarte de pneus inservíveis cresce ano após ano em todo o mundo. São considerados não biodegradáveis e seu tempo de decomposição é indeterminado.

Os resíduos, e principalmente os pneus, quando despejados no ambiente aumentam a poluição do solo, da água, do ar, e ainda contribuem para a problemática das condições de saúde pública, pois estes acumulam água favorecendo a proliferação de insetos transmissores de várias doenças.

Através da resolução 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - Conama, aprovada no Brasil em 26 de agosto de 1999 e em vigor desde janeiro de 2002, instituiu-se a responsabilidade ao produtor e importador de pneus pelo ciclo total de sua mercadoria. Desta forma, para que produtores e importadores obtenham licença ambiental, devem comprovar o recolhimento e destinação dos pneus inservíveis junto ao IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente - órgão responsável pela fiscalização). No entanto, sabemos que existem grandes dificuldades para que a fiscalização aconteça, e conseqüentemente ainda existirão materiais descartados inadequadamente.

Apesar das exigências legais, não tem sido dada destinação correta aos pneus inservíveis, o que segundo Andrade (2007), há tempos são descartados em enormes aterros, vales, rios, beira de estradas, entre outros.

A fragilidade da legislação e a falta de incentivo à reciclagem têm contribuído para o aumento de pneus inservíveis que se acumulam nos escassos aterros sanitários, causando prejuízos para o meio ambiente e para a saúde pública, com o aumento do risco de doenças como a dengue e a febre amarela (CEMPRE, 2006).

Os pneus podem ser utilizados como combustível alternativo em caldeiras de indústrias cimenteiras, de forma inteira ou picada, aproveitando alguns óxidos contidos nos metais dos pneus radiais.

Reciclado, o pneu pode servir como tapetes para automóveis, solado de sapato, pisos industriais e borrachas de vedação. Além disso, o pó gerado na recauchutagem e os restos de pneus moídos podem ser usados, na composição de asfalto de maior elasticidade e durabilidade, e ainda, como elemento aerador de solos compactados e pilhas de composto orgânico (KAMIMURA, 2002).

Segundo Menezes e seus colaboradores (2002), dentre os setores que mais enfatizam a reciclagem de resíduos industriais e urbanos, a indústria cerâmica tem grande destaque em virtude de possuir elevado volume de produção, o que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos.

O volume de consumo, aliado às características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e às particularidades do processamento cerâmico, faz deste ramo industrial uma das grandes opções para a reciclagem de resíduos sólidos.

A incorporação de resíduos na matriz cerâmica traz diversas vantagens para a indústria, como economia de matéria-prima não-renovável, obtenção de produtos com forte apelo ambiental, redução do consumo de energia e outros.

Considerando a problemática em relação ao volume de pneus descartados diariamente, a escassez de matéria-prima para produção da cerâmica, a facilidade do processamento e a possibilidade de melhorias na qualidade do produto final, bem como redução do gasto energético, vê-se que a incorporação de resíduos de pneu em cerâmica pode contribuir significativamente no processo de produção industrial e na preservação ambiental.

Com base no aporte teórico utilizado para compor esta pesquisa, percebe-se que a incorporação de resíduos de pneus inservíveis em cerâmica vermelha ainda não foi abordada, ratificando a importância do instrumento de pesquisa.

Portanto a intenção desta foi válida, pois, apresenta-se como uma tentativa de buscar melhores condições ambientais, econômicas e energéticas.

2. Justificativa

Destacam-se como justificativas, os seguintes pontos:

- A grande preocupação em relação aos pneus inservíveis, pois o aproveitamento de materiais reciclados constitui uma ação imprescindível tanto para a preservação de recursos naturais, quanto para viabilização de produtos alternativos com custo mais reduzido.
- A participação de universidades e instituições brasileiras, de pesquisa tecnológica, tem sido relevante nos estudos de novas alternativas de reciclagem de pneus inservíveis. Entretanto, os aspectos de viabilidade técnica são restritos, desconhecendo-se estudos adequados que demonstrem a possibilidade econômica e ambiental da reciclagem de pneus inservíveis, por exemplo, na cerâmica utilizada na construção civil.
- Com a pesquisa apresentada, ansiou-se dar destinação ambientalmente correta para resíduos de pneus inservíveis, evitando assim problemas decorrentes do seu descarte no ambiente. Buscando a possibilidade de melhoria do processamento e da qualidade das cerâmicas fabricadas no município de Campos dos Goytacazes/RJ com a incorporação deste resíduo.

3. Objetivos

O objetivo principal desta dissertação de mestrado foi avaliar a possibilidade de aproveitamento do resíduo de pó de borracha, proveniente da recauchutagem de pneus usados, destinado à incorporação em cerâmica vermelha. E como objetivos específicos:

- Caracterizar as matérias-primas quanto às propriedades físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas;
- Identificar a quantidade adequada do resíduo pó de borracha a ser incorporado em função do efeito na plasticidade da massa e propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas;
- Determinar a temperatura mais apropriada para queima e produção da cerâmica, com a incorporação do resíduo;
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas com a incorporação do resíduo e relacionar com sua microestrutura;
- Verificar a possibilidade de redução do gasto energético, no processo de sinterização, com a incorporação do resíduo.

4. Revisão Bibliográfica

4.1 O setor de Cerâmica Vermelha

4.1.1 Argilas

As argilas são as principais matérias-primas da indústria cerâmica e, portanto, são utilizadas em grandes quantidades. Para serem economicamente viáveis é necessário que essas matérias primas tenham o custo de extração e beneficiamento baixo.

As matérias-primas utilizadas na fabricação dos produtos cerâmicos originam-se na natureza. Algumas são incorporadas aos produtos em sua forma natural, outras são previamente beneficiadas e processadas (VAN VLACK, 1973).

Segundo Borba *et al.* (1996), pode-se de modo geral classificar as matérias primas cerâmicas em dois grupos: (i) plásticos (materiais argilosos) e (ii) não plásticos (fundentes, inertes, carbonatos, talcos). As matérias primas plásticas conferem importantes características na fase de conformação das peças cerâmicas, tais como trabalhabilidade e resistência mecânica a cru, e no processamento térmico, como estrutura e cor (MOTTA *et al.*, 2002).

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, as deformações e a sinterização. Devido principalmente ao seu papel na fase de queima, os materiais não-plásticos são ainda qualificados como inertes, vitrificantes e fundentes (MOTTA *et al.*, 2002).

A grande diversidade de argila encontrada na superfície da Terra permite que se obtenham produtos cerâmicos com as mais diversas características tecnológicas.

Segundo Motta *et al.* (2004), entender as características físicas, químicas e mecânicas das argilas é fundamental no processamento cerâmico, para obter informações da avaliação do uso específico e adquirir produtos de boa qualidade. São exemplos dessa busca, os pesquisadores, Dondi (1999), Vieira *et al.* (2000), Hajjaji *et al.* (2002), Sei *et al.* (2004), Dutra *et al.* (2006) e Grun (2007) que caracterizaram argilas de diferentes regiões, com o intuito de fornecer dados e parâmetros para seu uso como matéria-prima de produtos cerâmicos.

4.1.2 Materiais Cerâmicos

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC,2002), “material cerâmico é todo o material inorgânico, não metálico, obtido geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas”. Eles são tipicamente de natureza cristalina (têm uma estrutura ordenada) e são compostos formados entre os elementos metálicos e não metálicos tais como: o óxido de alumínio (alumina, Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e nitreto de silício (Si_3N_4).

Conforme Bauer (2000) e Santos (1975), a palavra cerâmica é derivada do vocábulo grego *keramikos*, que significa “feito de terra”. Segundo Moraes (2006), é uma arte antiga que acompanha a história da humanidade, desde o período pré-neolítico, quando se percebeu que a argila, quando deixada sob o sol escaldante, endurecia.

Os primeiros objetos cerâmicos produzidos tinham forma bem definida e utilidade de armazenar água e alimentos. No entanto, pode-se dizer que os objetos cerâmicos feitos de maneira mais sistemática surgiram no período neolítico, quando o homem constatou que o calor endurecia a argila. Estudos arqueológicos indicam que a presença de cerâmica mais simples ocorreu na região amazônica, há mais de 5000 anos atrás (SEBRAE, 2008). Há relatos da atividade de fabricação da cerâmica no Brasil desde antes da chegada dos colonizadores portugueses, em 1500. A cerâmica mais elaborada foi detectada na Ilha de Marajó, que compreendia técnicas de raspagem, incisão, excisão e pinturas elaboradas.

Depois da Segunda Guerra Mundial, ocorreu grande expansão do parque cerâmico nacional, com a instalação de várias indústrias e de produção diversificada. Até então, a produção estava concentrada no ramo de produtos de queima para a construção civil. As novas unidades fabris, de porte variado, passaram a produzir materiais de revestimento (pisos, azulejos e pastilhas), cerâmica sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça e porcelana de mesa, de adorno e técnica, materiais abrasivos e refratários (DUAILIBI FILHO & ROCHA, 1988).

Atualmente com a abundância de matérias primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais fizeram com que as indústrias cerâmicas brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos

atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada (ABC,2002).

4.1.3 O setor Cerâmico

O Brasil abriga os maiores produtores e consumidores de cerâmica argilosa do mundo. A região norte do Estado do Rio de Janeiro, localizado no sudeste brasileiro, tem uma área de cerca de 1000 quilômetros quadrados abundante em argilas formadas por sedimentos quaternários, transportadas pelo rio Paraíba do Sul (RAMOS, 2000).

Na atualidade isso tem motivado o desenvolvimento de um setor de cerâmica para tijolos e telhas que compreende mais de cem pequenas e médias indústrias com uma produção total estimada em mais de 100 milhões de peças/mês. As indústrias regionais contam com um grande número de depósitos naturais de onde extraem a argila. Para a maioria das indústrias existentes a forma de processamento é muito empírica, o que frequentemente resulta em produtos de baixa qualidade (VIEIRA *et al.*, 2007).

A indústria cerâmica brasileira utiliza processos manuais ou mecânicos de modelagem que podem ser por prensagem ou extrusão. As temperaturas de queima oscilam entre 950 °C e 1250 °C, conforme a natureza da argila, do produto cerâmico, do forno utilizado e das condições econômicas do local (SANTOS, 1989).

A partir da matéria-prima utilizada, identificam-se as cerâmicas tradicionais (ou silicáticas) de base argilosa e outras, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Principais setores cerâmicos, matérias-primas, áreas utilizadas e características do processo de fabricação (MOTTA *et al.*,2001).

Classificação		Produto	Matéria-prima							Moagem via úmida	Moagem via seca	Processo de				Temperatura de Queima (C)					
Tipo de	Grupo**/ Setor		Argila	Não -Plástica					Outros			Extrusão	Tornearia	Preseagem	Colagem	800	900	1.000	1.100	1.200	> 1.200
				Argila	Caulim	Feldspato	Filito	Talco													
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica Vermelha	Blocos, lages	P								P									
			Telha	P			O						P	P							
			Agregado leve	P							O		P								
	2	Cerâmica Branca	Grês Sanitário		P	S	P	O		S	O	P									
			Porcelana Mesa		P	P				P	P		S	S	O						
			Porcelana Eletr.		P	P				P	P		S	S	O						
			Faiança		P	O	S	S	S	P	S	P				P					
	3	Revestimentos	Pisos Rústicos	P							O		P								
			Pisos via Seca	P								P		P							
			Azulejo		P	P			O	S	S	P			P						
			Piso Gresificado	O	P	S	S	P	O		S	P		O	P						
			Grês Porcelânico		P	S	P		O		S	O	P			P					
	Outros		Refratários			O				O	P										
			Isolantes			O				O	P										
			Especiais							O	P										
Cimento			S						P	S	O	P									
Vidro									S	P	P										

P = Processo ou composição principal (> 20 %)
 S = Processo ou composição secundária (< 10%)
 O = Processo ou composição ocasional

As regiões sul e sudeste foram as que mais se desenvolveram no setor cerâmico, em razão da maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infraestrutura e distribuição de renda, associado à disponibilidade de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, nelas encontra-se uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos.

4.1.4 Processo de fabricação de cerâmica vermelha

O processo de fabricação de produtos cerâmicos pode variar em partes de uma olaria ou cerâmica para outra, mas assemelham-se parcial ou totalmente em relação ao produto por elas produzido como blocos de vedação e telhas.

A produção de cerâmica vermelha consiste basicamente das seguintes etapas: preparação das matérias primas; umidificação (dentro do limite de plasticidade cerca de 30%); processamento em misturadores e homogeneizadores; conformação por extrusão ou prensagem; secagem e queima. O fluxograma (Figura 1) ilustra os processos de fabricação de blocos cerâmicos e telhas segundo a ABC (2002).

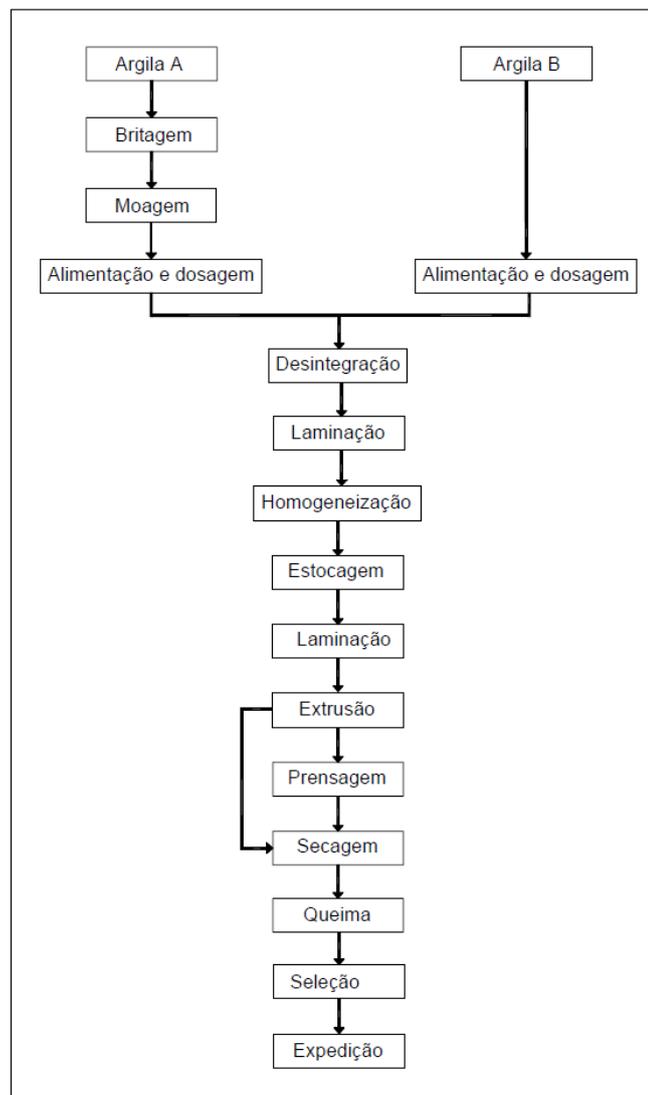


Figura 1: Fluxograma do processo de fabricação de blocos e telhas cerâmicas (ABC, 2002).

4.2 Resíduos Sólidos

4.2.1. Definição de resíduos

Resíduo pode ser considerado qualquer material que sobra após uma ação ou processo produtivo. Segundo Vieira *et al.* (2006) o conceito de resíduo pode variar com o tempo e o espaço; um material deixa de ser um resíduo no determinado momento que lhe é atribuído um valor.

Diversos tipos de resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) são gerados nos processos de extração de recursos naturais, transformação, fabricação ou consumo de produtos e serviços. Esses resíduos passam a ser descartados e acumulados no meio ambiente causando não somente problemas de poluição, como caracterizando um desperdício da matéria originalmente utilizada. Segundo Vieira *et al.* (2006), os resíduos industriais se definem como quaisquer materiais sólidos, pastosos ou líquidos, resultantes de processos industriais como de fabricação, transformação, utilização, consumo ou limpeza, cujo produtor ou possuidor destina-o ao abandono. Devido às características peculiares, esses resíduos geralmente não podem ser lançados na rede de esgoto ou em corpos de água.

De acordo com a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 10004/2004), os resíduos sólidos são: “Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição e lodos provenientes de sistemas de tratamento de água incluídos nesta definição, sendo estes gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções, técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível”.

4.2.2 Classificação de resíduos

A classificação de resíduos envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, seus constituintes e características e a comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (ABNT, 2004).

Segundo a NBR 10004/2004 os resíduos sólidos são classificados em:

-Resíduos classe I – Perigosos: estes podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente, exigindo tratamentos e disposição especiais em função de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

-Resíduos classe II – Não perigosos. Que ainda podem ser subdivididos em:

-Resíduos classe II A – Não inertes. Estes não apresentam periculosidade, podendo apresentar propriedades de solubilidade em água, combustibilidade ou biodegradabilidade.

-Resíduos classe II B – Inertes. São aqueles que ao serem submetidos a testes de solubilização (NBR10007/2004) não apresentam constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água.

O resíduo que não se enquadra em nenhuma das características anteriores deve passar por ensaios laboratoriais para averiguar o grau de periculosidade do mesmo. Para a realização desses ensaios é necessário consultar as normas:

- I) **ABNT 10005** – Procedimento para obtenção de lixiviado de resíduos sólidos: estabelece critérios para realização do ensaio de lixiviação, extração de algumas substâncias por meio de percolação.
- II) **ABNT 10006** - Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos: estabelece critérios para realização do ensaio de solubilização, visando solubilizar uma amostra do resíduo e avaliar a concentração dos elementos aí contidos.
- III) **ABNT 10007** – Amostragem de resíduos sólidos: estabelece critérios de coleta e amostragem dos resíduos.

A norma 10004/2004 da ABNT estabelece os critérios de classificação e os códigos para identificação dos resíduos de acordo com suas características, e, todos os resíduos ou substâncias estão listados nos anexos da referida norma.

A Figura 2 ilustra a classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente.

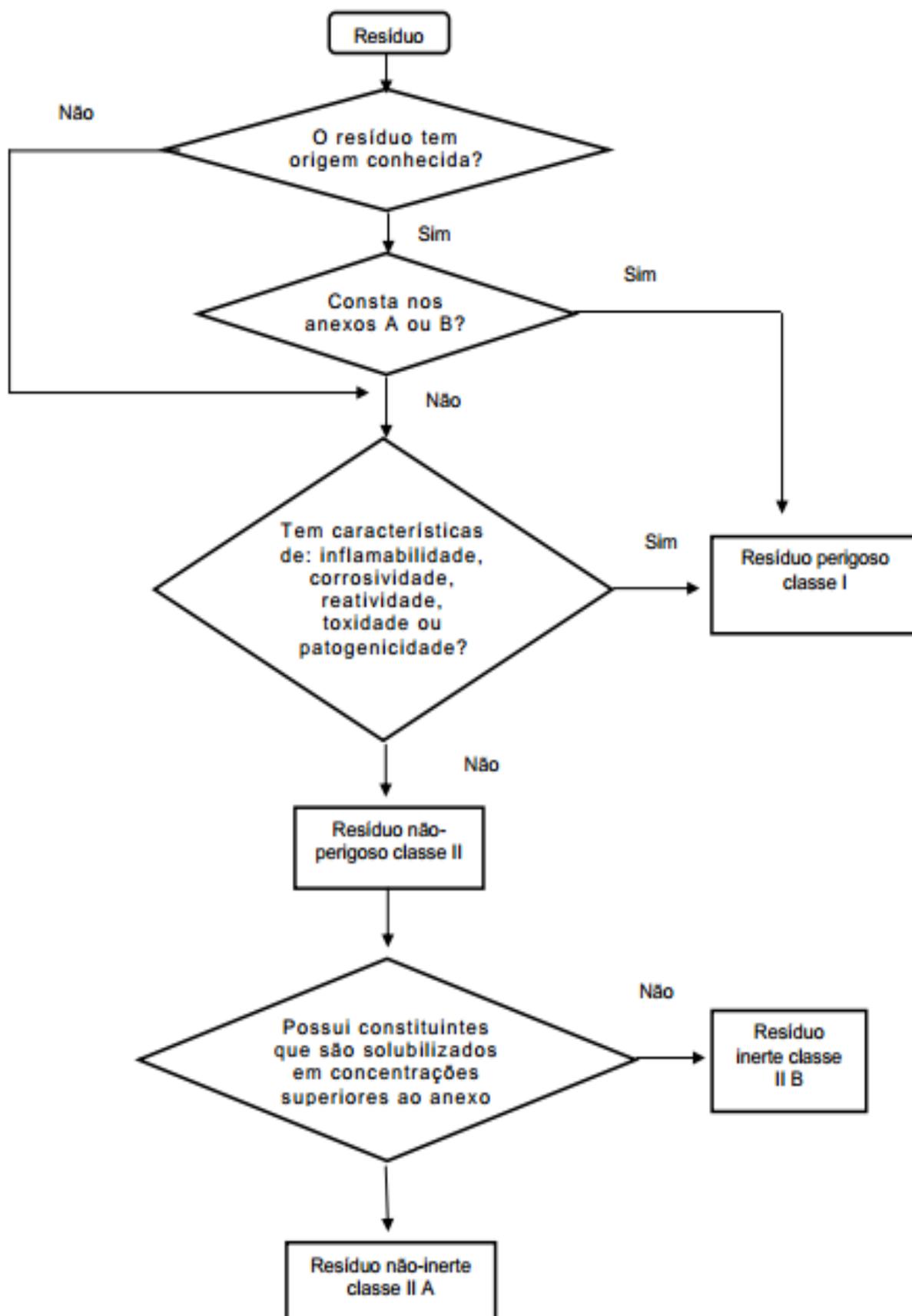


Figura 2: Caracterização e classificação de resíduos sólidos (ABNT 10004/2004).

Segundo Ribeiro e Morelli (2009), os resíduos sólidos são materiais em estado sólido ou semissólido que resultam das atividades humanas, podendo ser classificados em industriais e urbanos de acordo com a localidade em que eles se formam. Os resíduos, urbanos são os domiciliares, de serviços de saúde, de poda e capina ou ainda aqueles de portos, aeroportos e ferrovias, e, os industriais são provenientes de indústrias de transformação, rejeitos radioativos, de construção e demolição.

Segundo estudo realizado por Bertollo, Junior & Schalch (2002), o resíduo de pneus é classificado como não perigoso Classe II A – não inerte, por apresentar teores de metais (zinco e manganês) no extrato solubilizado superior aos padrões estabelecidos pela NBR 10.004/2004.

Dentro da codificação de resíduos, os Resíduos de Borracha são classificados como não perigosos e conforme anexo H da referida norma, o código é A008.

Segundo Dondi *et al.* (1997) e Vieira e Monteiro (2009) pode-se classificar os resíduos sólidos quanto à sua incorporação na cerâmica vermelha, dentro da classificação proposta pelos autores, o resíduo de pneus inservíveis é considerado um resíduo combustível.

4.3 A problemática dos resíduos sólidos

O problema relacionado aos resíduos sólidos vem se agravando desde a Revolução Industrial, pois com o constante crescimento populacional nos centros urbanos, a grande variedade de embalagens disponíveis no mercado e o aparecimento da “era dos descartáveis” a situação assumiu proporções assustadoras. Além do resíduo domiciliar e comercial a situação se agrava com o aumento dos resíduos: tecnológico, industrial, e de resíduos de saúde produzidos atualmente, aos quais se acrescentam o resíduo atômico e entulho espacial.

Segundo Bacelar (2005), os resíduos são separados em: domiciliar, comercial e público, onde o responsável por seu recolhimento até a destinação final é a Prefeitura Municipal; mas também existem os lixos especiais (portos e aeroportos), industrial, hospitalar e agrícola, e os responsáveis são os próprios geradores. Como o Governo é o responsável pelo lixo urbano, ele é “obrigado” a coletar esses resíduos e a depositá-los em lugares adequados que não prejudiquem a natureza nem a vida.

No Brasil, segundo dados do IBGE (2010a) a disposição final do lixo é precária, constando que mais de 50% são vazadouros a céu aberto (lixões), 22% aterros controlados, 27% aterro sanitário, 11% usina de triagem para reciclagem, 3,8% usina de compostagem e 0,6% usina de tratamento para incineração; com isso, pode-se observar que tanto a população como o meio-ambiente estão sendo muito prejudicados.

O resultado do Censo 2010 indica que a população brasileira é cerca de 190.732.694, mostra também que a população é mais urbanizada que há 10 anos: em 2000, 81% dos brasileiros viviam em áreas urbanas, agora são 84%. A região Sudeste segue sendo a região mais populosa do Brasil, com 80.353.724 pessoas.

Na Figura 3 pode-se fazer a comparação em relação a destinação dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos por ocorrência entre os anos 2000 e 2008, onde constata-se a realidade em relação à disposição de resíduos atualmente.

Esses dados vêm confirmar o que pesquisas tem revelado a todo instante: é preciso reduzir o consumo de materiais descartáveis, reduzir a exploração de agregados naturais e não renováveis, e criar alternativas para reaproveitar as toneladas de materiais inservíveis à disposição.

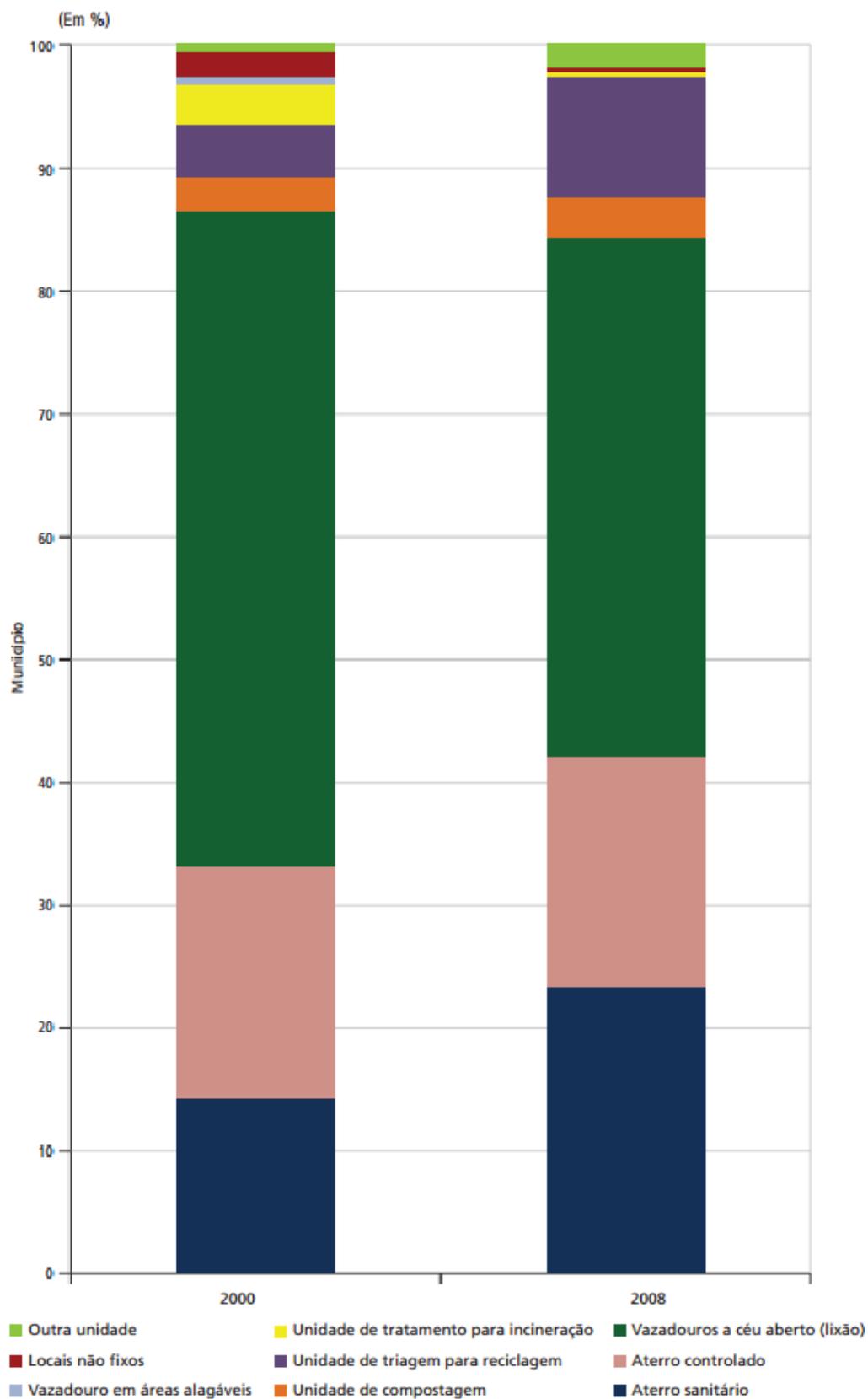


Figura 3: Destinação dos resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos por ocorrência (IBGE, 2010a).

4.4 Aproveitamento de resíduos industriais

O aproveitamento de resíduos industriais não é um fato novo, mas é um importante passo para a sociedade e vem ocorrendo em muitos países. Algumas das razões que levam a reciclagem de resíduos são: escassez ou diminuição de matéria-prima, aumento do consumo/produção de resíduos e compensação em relação à alta do petróleo (WENDER & BALDO,1998).

O presente trabalho irá abordar a utilização de resíduos na indústria cerâmica, bem como alternativas de incorporação de resíduos na fabricação dos produtos cerâmicos.

4.4.1 Incorporação de resíduos na Indústria Cerâmica

A indústria cerâmica é considerada hoje um dos setores que mais reciclam resíduos, sejam eles industriais ou urbanos; isto se deve ao fato da grande demanda de matéria-prima e sua produção, facilitando a incorporação de vários resíduos.

Realizando estudos sobre a reciclagem de resíduos industriais e urbanos, Dondi e colaboradores (1997), verificaram que devido à plasticidade e composição variável das massas argilosas tornou-se possível a incorporação de vários tipos de resíduos. Seja com o objetivo de melhorar as propriedades das argilas ou ainda obter pequenas modificações nas propriedades do produto final a incorporação de resíduos é viável também, para reduzir os rejeitos provenientes das diversas atividades industriais.

Pelas características dos resíduos industriais e urbanos e em relação a incorporação dos mesmos em massas cerâmicas, Dondi *et al.* (1997), classifica-os em:

- a) Resíduos redutores de plasticidade;**
- b) Resíduos combustíveis;**
- c) Resíduos fundentes;**
- d) Cinzas volantes.**

A quantidade de resíduos incorporados às massas cerâmicas pode variar consideravelmente, mas essas provocam mudanças nas propriedades físicas e mecânicas dos produtos (SABRAH *et al.*,1987).

Segundo Dondi *et al.* (1997a), quando adicionados às massas cerâmicas, os resíduos redutores de plasticidade, provocam a redução da plasticidade geral do

produto. São resíduos provenientes das indústrias de mineração e beneficiamento mineral. Menezes *et al.* (2002) referem-se a outros resíduos: que são oriundos da própria indústria cerâmica (rejeitos de tijolos e revestimentos e peças com defeitos), de amianto (considerado cancerígeno, sendo abolida sua utilização na última década), de extração de ardósia, pedra sabão e rochas ornamentais.

Os resíduos combustíveis em geral possuem elevada quantidade de matéria orgânica, quando queimados liberam calor devido às reações exotérmicas o que favorece a economia de combustível para a queima dos produtos. Esses resíduos conferem aumento da porosidade e conseqüentemente a redução da retração e resistência mecânica das peças cerâmicas. Segundo Dondi *et al.* (1997a), nesta categoria inclui resíduos de exploração de carvão, estação de tratamento de água, rejeitos urbanos, de indústria têxtil e de curtume, resíduos derivados de extração e refino de petróleo, e da indústria de papel e madeira.

Os resíduos fundentes também representam ganho energético de combustível para a queima das massas pois diminuem o ponto de fusão das mesmas além de diminuírem a porosidade do material. Esses resíduos são provenientes da lama de esmaltação das cerâmicas e dos rejeitos da indústria mecânica e metalúrgica e apresentam em sua composição compostos como sílico-aluminosa, alcalinos e alcalinos terrosos (DONDI *et al.*, 1997).

Os resíduos chamados cinzas volantes são provenientes da queima de produtos com elevado teor de carbono, produzindo matéria inorgânica que não tem propriedades combustíveis (DONDI *et al.*, 1997). Como exemplos pode-se citar a incineração de lixo urbano que tem como objetivo: gerar energia e reduzir o volume e a massa desses resíduos, visando à economia de espaço e promover a desinfecção do aterro com a queima da matéria-orgânica (BARBIERI *et al.*, 2000).

Vieira e Monteiro (2009) apresentaram uma revisão atualizada sobre a incorporação de diferentes tipos de resíduos sólidos em cerâmica vermelha. De acordo com o estudo, os autores propuseram a seguinte classificação:

- a) Resíduos combustíveis;**
- b) Resíduos fundentes;**
- c) Resíduos que afetam as propriedades cerâmicas.**

Os resíduos combustíveis são aqueles que apresentam alto poder calorífico devido à elevada concentração de matéria-orgânica. Essa categoria inclui resíduos

da indústria de papel, lama de alto forno e resíduos derivados da extração e refino de petróleo.

Os resíduos fundentes são assim denominados, pois apresentam uma quantidade relativamente alta de metais alcalinos e alcalinos terrosos (K_2O e Na_2O) que em reação com a sílica e a alumina promovem a formação de fase líquida aumentando a densificação. Nessa categoria os autores incluem resíduo de serragem de rochas ornamentais, vidro e cinzas.

Os resíduos que afetam as propriedades cerâmicas como aqueles que interferem na resistência mecânica, absorção de água e retração linear. Os autores classificam como resíduos de mineração, chamote, lodo de tratamento de água e cinzas.

Estudos sobre a incorporação de resíduos em cerâmica vermelha têm se tornado cada vez mais habituais, e sendo alvo de interesse científico, visto que algumas vantagens são observadas. A incorporação de resíduos em cerâmica vermelha minimiza os prováveis impactos causados ao meio ambiente se estes forem descartados indevidamente.

O setor de cerâmica vermelha é capaz de absorver com grande facilidade a incorporação de materiais alternativos em sua formulação (DONDI *et al.*, 1997a), de forma que uma das propriedades das argilas que favorecem a inertização dos resíduos é a capacidade de troca de íons. Mediante ao apresentado, nota-se a importância do estudo de resíduos gerados pelas indústrias civil, metalúrgica, siderúrgica, têxtil, mineração, papel e celulose entre outras e a possibilidade de incorporação na massa argilosa.

4.4.2 Vantagens da incorporação de resíduos

Segundo Freitas *et al.* (2011), os resíduos gerados no processo industrial se tornam um problema para as indústrias, fato que tem levado muitos órgãos municipais, associações, universidades e as próprias indústrias, a buscarem soluções viáveis para a questão dos resíduos. Soluções estas que sejam criativas, práticas e operacionais, para tentar resolver ou minimizar tais problemas.

Em virtude do volume de produção a indústria cerâmica tem grande capacidade de absorção de resíduos, sejam eles industriais ou urbanos, além de ser destaque na reciclagem de resíduos devido à capacidade de neutralizar e estabilizar vários resíduos tóxicos (MENEZES *et al.*, 2002).

Os materiais utilizados na indústria cerâmica são, geralmente, muito heterogêneos, já que consistem de argila, que são matérias primas com uma composição muito ampla (FABBRI *et al.*, 1995a, 1995b). Por esta razão, segundo Dondi *et al.* (1997a), estes materiais podem tolerar a presença de diferentes tipos de resíduos, mesmo em percentagens elevadas.

A incorporação de resíduos em cerâmica envolve pelo menos duas vantagens ambientais: reciclagem e inertização dos mesmos, que são muitas vezes poluentes e difíceis de eliminar, além da economia de argila, a matéria-prima.

Ainda segundo Dondi *et al.* (1997a), a adição de resíduos industriais e urbanos como matéria-prima para a cerâmica, muitas vezes tem efeitos positivos sobre as propriedades dos artigos semiacabados. Os efeitos envolvem todo o processo de fabricação (de moldagem, secagem e aquecimento) e tem repercussões sobre as propriedades dos produtos acabados, tais como encolhimento, porosidade e resistência mecânica.

Para Dondi *et al.* (1997a) em muitos casos há diferenças no consumo de energia, o que pode ser reduzido devido à contribuição calórica fornecida por muitos tipos de resíduos, como exemplo o resíduo de borracha de pneu, chamados resíduos combustíveis.

4.4.3 A incorporação de resíduos combustíveis em cerâmica vermelha

Em geral, os resíduos combustíveis são provenientes de processos industriais que contêm alto teor de substâncias orgânicas e lhes conferem elevado poder calorífico. Este grupo inclui os resíduos: da exploração de carvão, das estações de tratamento de rejeitos urbanos, da indústria têxtil e de curtume, da indústria do papel e madeira e derivados da extração e refino do petróleo (DONDI *et al.*, 1997a).

A tendência de reciclagem de resíduos com poder calorífico na indústria cerâmica, pode ser considerada promissora visto que são resíduos que estão sendo dispostos no ambiente e a utilização destes pode significar economia de biomassa, pois segundo Manfredini *et al.* (2005), a maior parte da energia investida no processo de produção de tijolos e telhas cerâmicas provém de biomassa (lenha, serragem, cavaco, retalho de móveis e, até, sabugo de milho), que são recursos renováveis.

O resíduo borracha de pneu, dentro da classificação proposta por Dondi *et al.* (1997) e Vieira e Monteiro (2009), é um resíduo combustível e de acordo com

Menezes *et al.* (2002), a utilização desses resíduos por parte das indústrias cerâmicas pode ser efetuada de duas maneiras: por incorporação dos resíduos à massa cerâmica ou mistura com os combustíveis responsáveis pela queima do corpo cerâmico, sendo que, em ambos os casos, é utilizado o poder calorífico dos resíduos para auxiliar na queima.

Ainda segundo Menezes *et al.* (2002), a utilização de materiais combustíveis como auxiliares de queima pode chegar a propiciar economia energética da ordem dos 45%, porém, muitos cuidados devem ser tomados ao se fazer uso de resíduos na queima, já que estes podem liberar vários gases altamente nocivos à saúde humana, sendo indispensável e recomendado o uso de filtros para gases.

Pela observação da Tabela 2 é possível conhecer o conteúdo energético de matérias-primas que podem ser utilizadas no processamento cerâmico. Observa-se que o conteúdo energético dos resíduos é bastante variável; todavia, podem ser utilizados de forma bastante rentável se forem queimados em condições oxidantes, a fim de se ter um máximo rendimento dos combustíveis.

Também pode ser utilizada uma mistura de resíduos, para se ter um balanço energético que otimize a queima, sendo este comportamento já muito utilizado por produtores próximos a polos petroquímicos, onde há abundância de rejeitos do refino do petróleo.

Tabela 2: Conteúdo energético de matérias-primas que podem ser utilizadas pelo processo de queima. (Fonte: DONDI *et al.*, 1997 a).

<i>Tipo de Resíduo</i>	<i>Energia Específica (kcal/kg)</i>
Lama de lavagem de lã	Variável
Lama da indústria de papel	416
Exaustão de óleos minerais	1700
Resíduos da indústria têxtil	4500 – 7000
Resíduos da azeitona	4447
Resíduos da indústria de curtumes	2000
Serragem de madeira	1670 – 4540
Coque de petróleo	7500 – 7700
Resíduos da extração e tratamento de carvão	300 – 1380
Cinzas	350 – 2771
Resíduos da noz de coco	3060

Freitas (2009) em seu estudo sobre a incorporação de coque de petróleo em cerâmica vermelha concluiu que o elevado poder calorífico pode possibilitar uma economia significativa de combustível na etapa de queima.

Dentro de análises realizadas no trabalho foram observados picos exotérmicos, momento em que acontece a queima de carbono fixo e de material volátil, ocorrendo liberação de calor. Sendo esta característica, a razão do principal benefício para seu uso no segmento de cerâmica vermelha: a economia de energia.

Entretanto, o autor ressalta que a incorporação deste material pode aumentar a porosidade da cerâmica e conseqüentemente acarretar incremento da absorção de água e redução da resistência mecânica, devendo ser aproveitadas incorporações em quantidades a ~1% em peso nas temperaturas usuais de queima da cerâmica vermelha, ou seja, inferiores a 1000°C.

Menezes *et al.* (2002) evidenciam que: a utilização de resíduos combustíveis adicionados às massas cerâmicas pode provocar sensível diminuição da resistência mecânica do corpo, agregada à formação de grande quantidade de poros com a volatilização do combustível na queima, e, alterar a composição mineralógica do produto, caso a queima não provoque a adequada oxidação dos resíduos, deixando carbono na massa, o qual pode atuar como agente redutor durante o restante da queima.

Segundo Dondi *et al.* (1997a), as adições, em termos de quantidade de resíduos que podem ser utilizadas em corpos cerâmicos, são bastante modestas, quase nunca mais do que 10% em massa, e além das economias de energia durante a queima, os principais efeitos (em adição) incluem aumento da porosidade e a diminuição da resistência mecânica do mesmo.

Observa-se na Tabela 3, as propriedades e características de tijolos obtidos a partir de formulações com incorporações de resíduos combustíveis, que a quantidade de resíduos incorporados às formulações é muito dependente do tipo de rejeito, variando de valores inferiores a 10% a valores em torno de 50%.

Tabela 3: Características e propriedades cerâmicas de tijolos obtidos a partir de formulações com incorporações de resíduos combustíveis

(Fonte: MENEZES *et al.*, 2002).

Características Cerâmicas	Tipo de Resíduo					
	Indústria de Papel	Lama de Esgoto	Lodo Orgânico	Casca de arroz	Cinza de Carvão	Turfa
Teor de resíduo (%)	0 - 15	20 - 40	13 - 26	6 - 10	5 - 10	0 - 9
Técnica de moldagem	Extrusão	Extrusão	Extrusão	Extrusão	Extrusão	Extrusão
Temperatura de queima (°C)	850 - 1050	950 - 1050	1150	800 - 900	850- 1050	950
Absorção de água (%)	2 - 17	38 - 40	11 - 16	17 - 23	14 - 26	21 - 27
Retração de Queima (%)	-0,25 - 4,40	5 - 6	11	0,1	0,3	29-33
Resistência à Flexão (MPa)	5 - 24	2 - 4	3 - 5	5 - 8	5 - 11	8-10

Em relação às características mecânicas, verifica-se que a elevada porosidade, expressa pela absorção de água, conduz a baixos valores de resistência, sendo este um fator determinante no êxito dos produtos para qualquer aplicação cerâmica. Observa-se, ainda, que a grande maioria das massas com resíduos apresentou corpos cerâmicos com valores de resistência > 5 MPa, apropriados para a produção de tijolos.

Baseado na literatura: Amaral & Domingues (1991), Dondi *et al.* (1997) e Menezes *et al.* (2002), a utilização de rejeitos combustíveis pode ter efeitos significativos nas propriedades finais do corpo cerâmico e nas suas características de processamento, principalmente quando são incorporados às massas cerâmicas.

Como exemplo os autores citam a utilização de resíduos provenientes do refino do petróleo na fabricação de peças cerâmicas, onde estes podem atuar como plastificantes e lubrificantes (além de redutores do consumo de energia) ou a utilização de resíduos combustíveis diversos, a fim de se obter produtos com características de isolamento térmico e ou acústico, em virtude da porosidade provocada pela volatilização do material.

4.5 O pneu

Para definir um pneu pode-se dizer que são camadas de borracha ajustadas a um aro e têm o objetivo de amortecer o contato entre o veículo e a via sobre a qual este trafega, mas, a primeira iniciativa de definição de pneus veio com a Resolução CONAMA nº 258/99:

- Pneu ou pneumático: todos os artefatos infláveis, constituídos basicamente por borracha e materiais de reforço, utilizados para rodagem de veículos;
- Pneu ou pneumático novo: aquele que nunca foi utilizado para rodagem, sob qualquer forma, enquadrando-se, para efeito de importação;
- Pneu ou pneumático reformado: todo pneumático que foi submetido a algum tipo de processo industrial com o fim específico de aumentar sua vida útil de rodagem em meios de transporte, tais como recapagem, recauchutagem ou remoldagem, enquadrando-se, para efeitos de importação; e
- Pneu ou pneumático inservível: aquele que não mais se presta para o processo de reforma que permita condição de rodagem adicional.

A composição típica de um pneu é borracha natural, borracha sintética, negro de fumo, tecido de nylon, fibras de aço e aditivos, como tintas, óleos, etc (ANDRIETTA, 2002).

Segundo Rocha *et al.* (2007), elastômeros à base de butadieno são amplamente utilizados na indústria automobilística. Dentre esses se destacam os copolímeros de butadieno-estireno (SBR) e butadieno-acrilonitrila (NBR). O elastômero mais utilizado na confecção de pneus é o copolímero butadieno-estireno (SBR), contendo 25%, em peso, de estireno. O poli cis-isopreno, que é a borracha natural, o poli trans-isopreno, a borracha sintética e o poli cis-butadieno que são outros componentes usados na confecção de pneus. A borracha natural garante as propriedades elásticas, e a sintética fornece a estabilidade térmica.

Os hidrocarbonetos são os constituintes básicos em maior quantidade na composição do pneu de um veículo de passeio e há uma pequena diferença entre a composição de pneus de carros e veículos pesados às Tabelas 4 e 5 apresentam, em porcentagem, os itens que fazem parte da composição de pneus radiais para automóveis.

A borracha natural representa entre 30% e 40% do peso de um pneu de caminhão e entre 15% e 20% de um pneu de carro de passeio. Os fabricantes de pneu consomem cerca de 70% da produção mundial de borracha natural, que

apresenta várias qualidades: maleabilidade, grande resistência mecânica e térmica e aderência em todos os tipos de solo.

Tabela 4: Composição química dos pneus (ANDRIETTA, 2002).

Elemento/Composto	Quantidade (%)
Carbono	70,0
Hidrogênio	7,0
Óxido de zinco	1,2
Enxofre	1,3
Ferro	15,0
Outros	5,5

Tabela 5: Materiais Componentes de pneus (ANDRIETTA, 2002).

Material	Quantidade (%)	
	Carro	Caminhão
Borrachas	48,0	45,0
Negro de fumo	22,0	22,0
Aço	15,0	25,0
Tecido de nylon	5,0	-
Óxido de zinco	1,0	2,0
Enxofre	1,0	1,0
Aditivos	8,0	5,0

Um fio de aço é embutido no talão, que se ajusta ao aro da roda e, nos pneus de automóveis do tipo radial, uma manta de tecido de nylon reforça a carcaça e a mistura de borracha/elastômeros é espalmada, com uma malha de arame de aço entrelaçada nas camadas superiores. Pela Figura 4, observam-se diferentes ângulos das partes de um pneu e seus respectivos componentes.

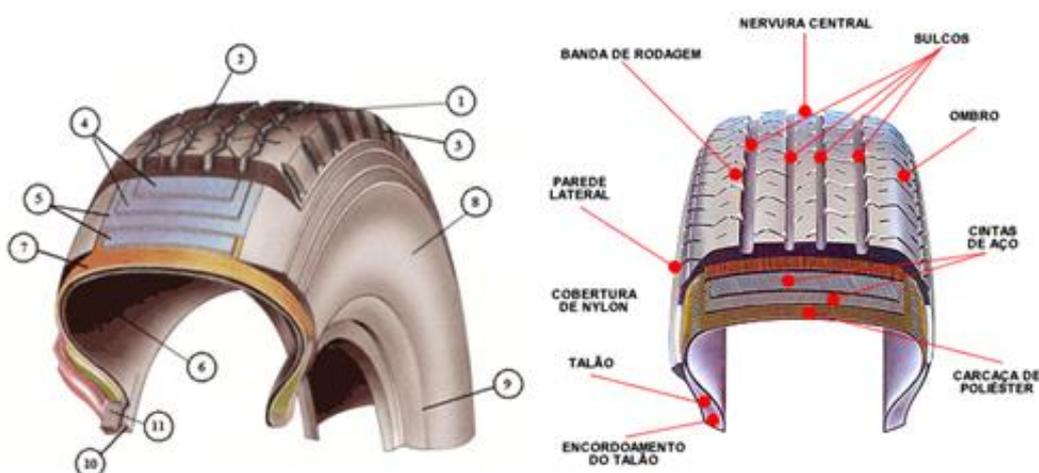


Figura 4: Partes constituintes dos pneus de automóveis
(Fonte: http://www.bfcompneus.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=158:partes-do-pneu&catid=37:dicas&Itemid=56).

Pela análise da Figura 4, pode-se identificar os índices numéricos apresentados:

1. Banda de rodagem – é a parte do pneu que entra em contato com o solo;
2. Sulcos – são as cavidades que recortam a superfície da banda de rodagem;

3. Ombros – são partes do pneu entre a banda de rodagem e os flancos.
Lona (s) ou cinta (s) de proteção;

4. Parte exterior da estrutura resistente do pneu – tem a finalidade de proteger as lonas/cintas de trabalho;

5. Lonas ou cintas de trabalho – são as partes do exterior da estrutura resistente do pneu radial que tem a finalidade de estabilizar o pneu;

6. Revestimento interno – é toda a superfície interna do pneu, constituída de componentes de borracha que tem a função de proteção;

7. Interior da estrutura – é a parte resistente do pneu cujos cordonéis estendem-se de um talão a outro;

8. Flancos ou laterais – são as partes do pneu compreendidas entre os limites da banda de rodagem e os talões, também conhecido como flanco costado;

9. Cordão ou filete de centragem – é a linha em relevo próxima da área dos talões que tem a finalidade de indicar visualmente a correta centralização do pneu no aro;

10. Talões - são partes do pneu que entram em contato com o aro, garantindo a sua fixação ao mesmo; na Figura 9 o talão da direita é de um pneu sem câmara;

11. Aro do talão – é o elemento metálico interno (carcaça), estrutura resistente formada por um conjunto de lonas e eventuais cintas de proteção ou de trabalho (BRIDGESTONE, 2013).

Além da complexidade na fabricação de um pneu, também há a complexibilidade nos processos de fabricação de seus componentes. O fluxograma apresentado na Figura 5 mostra as matérias-primas e suas origens, empregadas no processo de fabricação de um pneu automotivo.

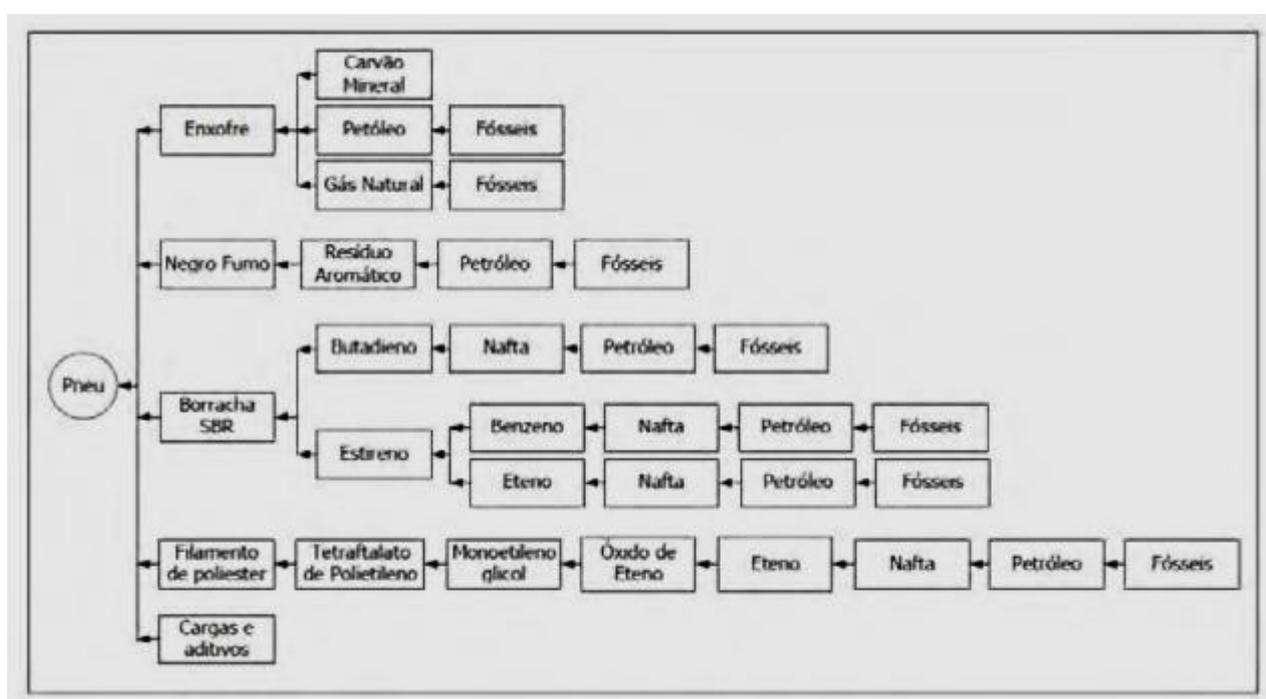


Figura 5: Matérias-primas empregadas na fabricação dos pneus automotivos (ABIQUIM, 2011).

4.5.1 Legislação sobre pneumáticos

Em 1999 foi aprovada a Resolução nº 258/99 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) que instituiu a responsabilidade do produtor e do importador pelo ciclo total do produto, ou seja, a coleta, o transporte e a disposição final. Desde 2002 os fabricantes e importadores de pneus devem coletar e dar a destinação final para os pneus usados. Os distribuidores, revendedores, reformadores e consumidores finais são co-responsáveis pela coleta dos pneus servíveis e inservíveis, os quais devem colaborar com a coleta (CONAMA, 1999).

A partir de 2002 para cada 4 pneus produzidos ou importados (novos ou reformados) um pneu inservível deveria ser reciclado. A partir de 2003 a relação deveria ser de dois pneus produzidos ou importados (novos ou reformados) para um pneu inservível reciclado. Em 2004 a proporção foi de um pneu produzido ou importado novo para um pneu inservível reciclado. Em 2005 a relação cresceu para cada 4 pneus produzidos ou importados novos, cinco pneus usados deveriam ser reciclados; e, para cada 3 pneus importados reformados de qualquer tipo deveriam ser reciclados 4 pneumáticos usados (ABIP, 2005).

No quinto ano de vigência dessa legislação, as normas e os procedimentos estabelecido nesta Resolução seriam revisados. Desde 2005 a Resolução nº 258/99 encontrava-se em processo de revisão pelo IBAMA, em 2006 a meta era de para quatro pneus produzidos ou importados novos, cinco pneus usados deveriam ser reciclados.

A quantidade de pneus descartados e sua durabilidade no meio ambiente têm motivado a proposição de medidas mitigadoras dos impactos ambientais negativos e a realização de pesquisas em vários países, inclusive no Brasil, para que se possa dar um destino adequado para este resíduo.

A Resolução CONAMA nº. 416/2009 conceitua a destinação ambientalmente adequada de pneus inservíveis como:

Procedimentos técnicos em que os pneus são descaracterizados de sua forma inicial, e que seus elementos constituintes são reaproveitados, reciclados ou processados por outra(s) técnica(s) admitida(s) pelos órgãos ambientais competentes, observados a legislação vigente e normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e a segurança, e a minimizar os impactos ambientais adversos. (IBAMA, 2012).

Em agosto de 2012 o Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis divulgou um Relatório de Pneumáticos objetivando o atendimento à resolução nº 416 do CONAMA, com dados fornecidos pelos fabricantes e importadores inseridos no Cadastro Técnico Federal (CTF), além das empresas destinadoras de pneumáticos inservíveis.

No art. 33 da lei 12.305, as cadeias de produtos com obrigatoriedade de programação de logística reversa são: agrotóxicos e seus resíduos e embalagens, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes de vapor de sódio e mercúrio e luz mista,

produtos eletroeletrônicos e seus componentes, óleos lubrificantes seus resíduos e embalagens, e também os pneus.

No decreto 7.404/2010 em seu artigo Art. 13. a logística reversa é instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado pelo conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para aproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente apropriada. Pela análise da Figura 6, é possível entender a logística reversa de pneus.

Além da lei 12.305, a resolução nº 416 de 30 de setembro de 2009 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) dispõe sobre a prevenção da degradação ambiental causadas por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada.

Mais do que legislação, é necessário identificar e responsabilizar todos os participantes da cadeia de coleta e destinação final dos pneus para que atuem dentro da legislação de proteção ambiental.

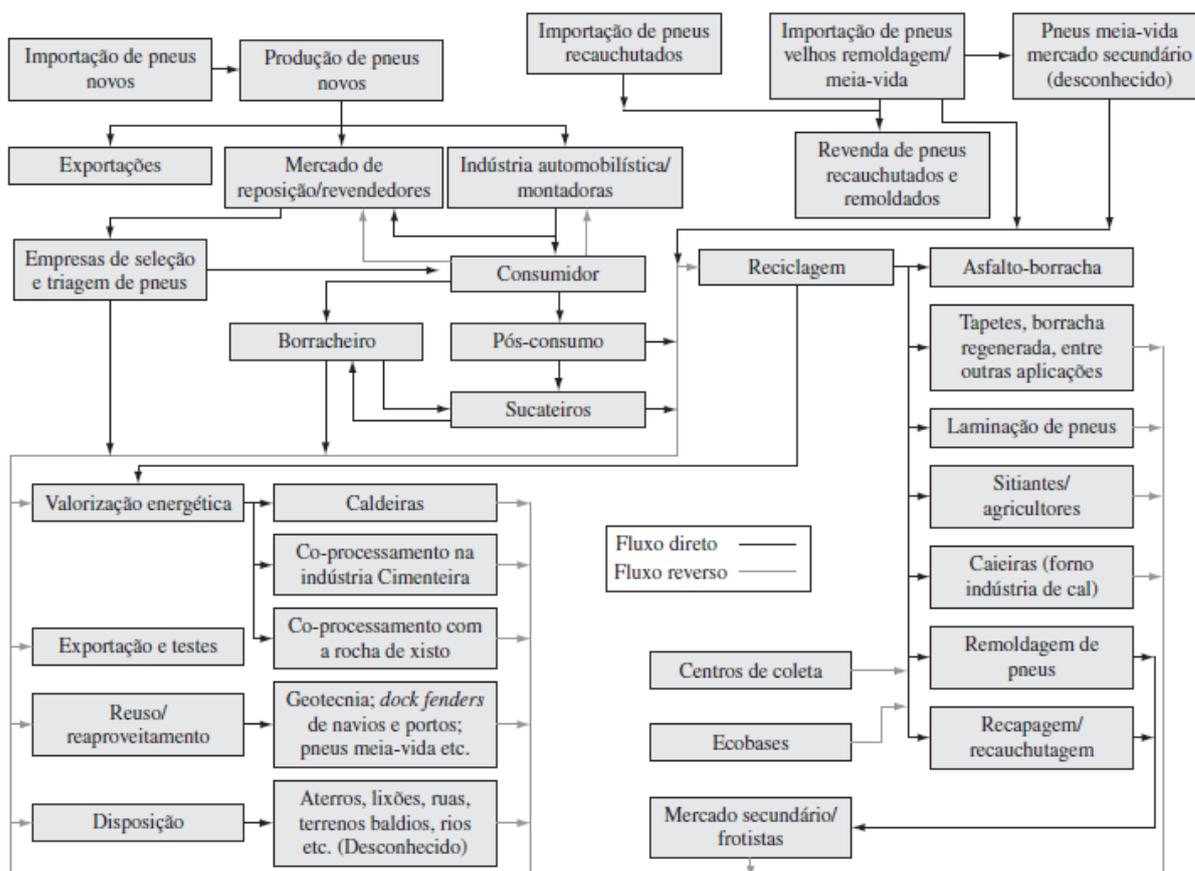


Figura 6: Processo de logística reversa de pneus usados no Brasil (LAGARINHOS, 2008).

4.5.2 A produção de pneus e a problemática dos pneus inservíveis

O grande volume de veículos, principalmente caminhões e máquinas, produzidos no Brasil em 2013, contribuiu para um novo recorde na produção de pneus. De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), a indústria brasileira produziu 68,8 milhões de pneus, um aumento de 9,8% em relação a 2012 (Tabela 6).

No segmento de camionetas, a alta foi de 20,7% para 9,9 milhões de unidades, enquanto no de veículos de carga o incremento foi de 15,2%, para 8,23 milhões de unidades. O segmento de pneus para veículos de passeio, o principal destino da produção nacional, registrou expansão de 6% para um total de 32,46 milhões de pneus.

Tabela 6: Produção nacional de pneus de 2006 a 2013 por categoria
(Fonte: ANIP, 2014).

PRODUÇÃO POR CATEGORIA (Milhares de unidades)								
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
CARGA	6.947,40	7.319,30	7.367,10	6.033,60	7.735,30	7.448,80	7.138,00	8.231,30
CAMIONETA	5.894,00	6.058,40	5.841,90	5.599,80	7.940,80	8.470,60	8.267,80	9.904,50
PASSEIO	28.948,70	28.791,40	29.585,90	27.489,30	33.812,80	32.568,20	30.406,40	32.463,80
MOTO	11.438,80	13.725,50	15.249,30	13.158,10	15.205,60	16.078,50	14.519,50	15.041,60
AGRÍCOLA	559,3	698,2	776	593,3	781,4	793,8	807,2	928,5
OTR	129,3	131,9	127,2	86,7	136	109,7	107,8	103,3
INDUSTRIAL	498,5	462,1	716,4	1.083,30	1.633,20	1.396,90	1.360,30	2.072,80
AVIÃO	51	60,9	47,6	41,8	60	60,1	54	52,6
TOTAL	54.467,00	57.247,70	59.711,40	54.085,90	67.305,10	66.926,60	62.661,00	68.798,40

As importações também cresceram cerca de 7,33% em relação a 2012 totalizando 44,9 milhões de unidades. As exportações encolheram 7,36% em um total de 13,6 milhões de pneus. A Figura 7 mostra a balança comercial em relação à importação e exportação de pneus.

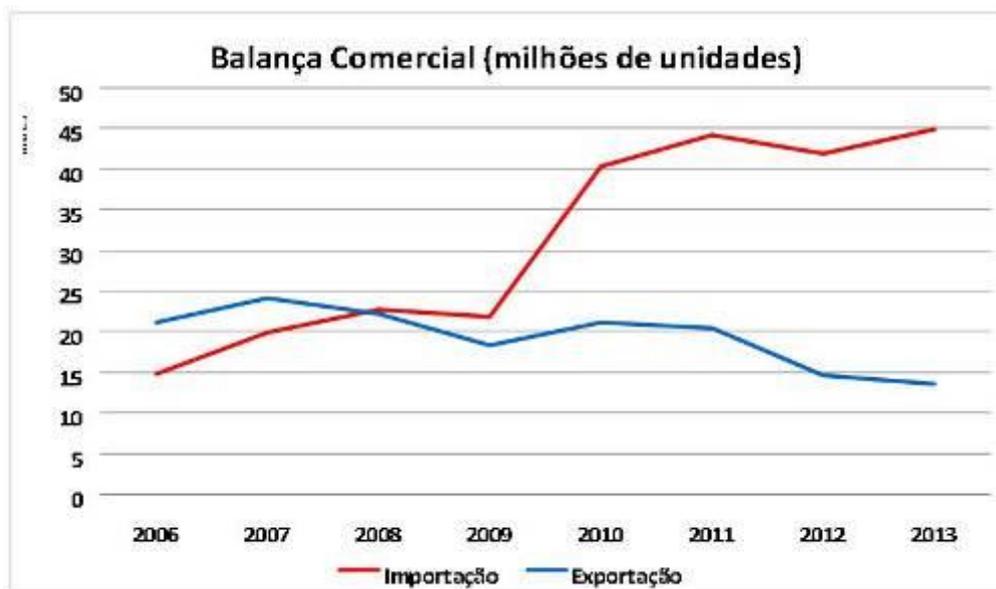


Figura 7: Balança comercial: Importação e Exportação de Pneumáticos
(Fonte: ANIP 2014).

Segundo Lagarinhos (2008), de 2002 a abril de 2008, o descarte inadequado de pneus correspondeu a 2,1 milhões de toneladas do produto. Nesse período, os importadores de pneus novos cumpriram 97,03% das metas de descarte estabelecidas, os fabricantes, 47,3% e, os importadores de usados, 12,92%.

Sendo o Brasil o detentor da maior frota de veículos dos países em desenvolvimento, é necessário o destino em potencialidade para os pneus usados que só podem ser reformados uma única vez.

A Figura 8 mostra o descarte inadequado de pneus inservíveis.



Figura 8: Exemplos do descarte inadequado de pneus no meio ambiente.

Fontes de figuras: A: <http://envolverde.com.br> e

B: <http://conexocabofrio.blogspot.com.br>.

Devido a todos os inconvenientes que o pneu inservível provoca e a crescente demanda pelo produto é necessária a busca por formas de reutilização

que vão além da reforma, a possibilidade de associar desenvolvimento tecnológico com desenvolvimento sustentável, por meio de ações que promovam a sustentabilidade, levando à preservação dos recursos naturais, e equilibrando o meio ambiente.

Estimativas pressupõem a produção de dois milhões de pneus novos por dia em todo o mundo enquanto o descarte chega a oitocentos milhões. A evasiva da borracha utilizada na fabricação dos pneus de veículos automobilísticos se converteu em um dos maiores problemas ambientais das últimas décadas.

Esse problema é em parte ocasionado pelo aumento da produção anual de pneus e por serem materiais vulcanizados. Outra problemática no rejeito de pneus é que estes materiais são resistentes à degradação ambiental (FUKUMORI *et. al*, 2002).

Os dados vêm assegurar o grande desafio ambiental no descarte final dos pneus em razão do alto grau de complexidade da composição. Observa-se que diariamente são fabricados e descartados milhões de pneus no mundo, além disso, um pneu descartado na natureza leva cerca de 600 anos para se decompor.

Diversos estudos têm sido feitos para consumir grandes quantidades de pneus inservíveis, inteiros ou processados, eles podem ser utilizados em obras de engenharia no lugar de materiais de construção convencionais.

Um dos setores que consome grandes quantidades de materiais é a construção civil, especialmente em países que, como o Brasil, continua ampliando, significativamente, seu ambiente construído. A grande parte dos componentes necessários para a construção de habitações pode ser produzido com materiais inservíveis sem grande sofisticação técnica.

A utilização de resíduos de pneus, como material de construção é uma maneira de diversificar e aumentar a oferta de materiais de construção, viabilizando eventualmente reduções de preço que gera benefícios sociais adicionais através da política habitacional. Esta situação pode ser favorecida pela adoção de medidas de incentivo específicas para a produção de habitações de baixa renda, com o intuito de resolver o problema de déficit habitacional.

4.5.3 Tecnologias utilizadas para reutilização de pneus

Lagarinhos e seus colaboradores (2008), em um levantamento apresentam as tecnologias utilizadas no Brasil para a reutilização, reciclagem e valorização

energética de pneus usados ou inservíveis. Pela observação da Figura 9 nota-se que quanto maior o volume, menor o custo e a tecnologia empregada para destinar os pneus servíveis e inservíveis. A atividade de pré-tratamento é uma atividade que apresenta um alto custo para a reciclagem dos pneus.

O resíduo gerado no processo de reforma dos pneus pode ser utilizado na pavimentação asfáltica, adição a concreto e argamassa, após o processo de peneiramento, como fonte energética em indústrias cimenteiras ou como matéria-prima para fabricação de artefatos de borracha.

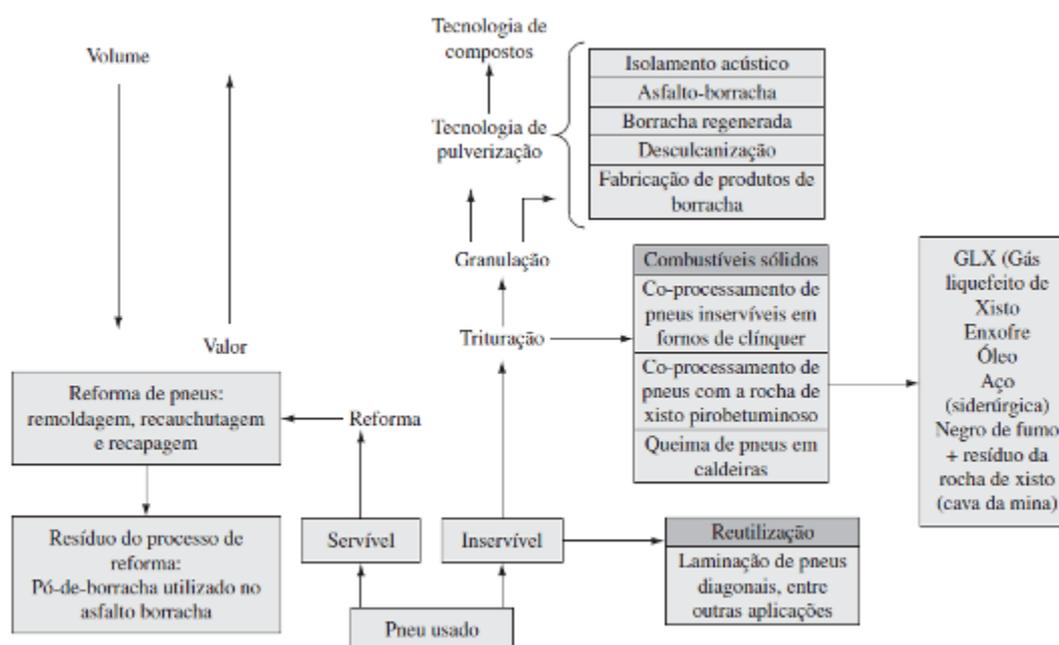


Figura 9: Fluxograma das tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus (LAGARINHOS *et al.*, 2008).

Ainda segundo Lagarinhos *et al.* (2008), entre as tecnologias utilizadas para a reciclagem de pneus no Brasil, as três que se destacam com enorme potencial atualmente são: a atividade de reforma, a valorização energética e a laminação e fabricação de artefatos de borracha.

No Brasil a utilização de pneus na pavimentação asfáltica ainda é incipiente e a utilização destes como combustível ou matéria-prima proporciona uma redução nos custos operacionais e em alguns casos aumento da produtividade do sistema. A tendência é a ampliação do número de indústrias cimenteiras, licenciadas, para o co-processamento de pneus inservíveis em várias regiões do país.

4.5.4 A reutilização de pneus inservíveis

Existem hoje no Brasil e em alguns outros países, alternativas de reciclagem de pneus inservíveis, em muitos casos utilizados de forma inteira. Nestes processos para a reciclagem não é necessário a separação dos componentes do pneu ou a própria trituração antes da utilização, contribuindo assim para a destinação final deste resíduo. Algumas ocorrências encontradas na literatura são apresentadas a seguir.

- **Muros de contenção ou arrimo:** Os pneus são dispostos em camadas horizontais espaçadas verticalmente e interligadas com alças de metal formando camadas e preenchidas com argila ou concreto. (Figura 10).



Figura 10: Muro de contenção.

- **Contenção de erosão do solo:** associados a plantas, os pneus inteiros podem ser utilizados para ajudar na contenção da erosão do solo (MARTINS, 2004), como mostra a Figura 11.



Figura 11: Pneus inteiros associados às plantas.

- **Obras de drenagem:** os pneus são unidos em módulos de aproximadamente 15 pneus e formam um tubo que substitui os bueiros. Segundo Kamimura (2004), esta prática apresentou desempenho aceitável e tem sido adotada nos EUA. Um exemplo de obra de drenagem é mostrado na Figura 12.



Figura 12: Obra de drenagem do Rio Paraguari em Salvador-BA.

- **Limites de território e proteção esportiva:** os pneus são usados em pistas esportivas (Figura 13) formando muros de limitação do território e como proteção para a prática de esportes automotivos de alta velocidade, e em pistas de corridas de cavalos (RAMOS, 2005).



Figura 13: Barreira de pneus no Autódromo Internacional de Curitiba-PR.
Disponível em: <http://www.nobresdogrid.com.br>(2009).

- **Recifes artificiais:** cerca de 15 a 25 unidades de pneus de carros e caminhões são empilhados, comprimidos e fixados com uma mistura de concreto, e depois lançados sobre o leito do mar para formar recifes artificiais (Figura 14), transformando-se em um ambiente propício para a flora e fauna (KAMIMURA, 2004 e RAMOS, 2005), porém muitos biólogos são contra essa prática pois os pneus se soltam com a pressão da água e acabam destruindo os corais.



Figura 14: Pneus usados como base artificial para formação de corais

- **Móveis e obras de arte feitos com pneus:** pneus inteiros podem ser utilizados na confecção de móveis e obras de arte (Figura 15).



Figura 15: Exemplos de móveis feitos com pneus

- **Enchimento ou reforço de aterros e encostas:** segundo Ramos (2005), pneus picados ou inteiros podem ser usados em aterros (Figura 15) para substituir parte do agregado com baixo custo e manter o solo com boa drenagem. Para Martins (2004),

pneus radiais amarrados com fitas de poliéster são matéria-prima barata e eficiente para a construção de aterros e encostas sem comprometimento da obra.



Figura 16: Reutilização de pneu em obra de contenção de encosta

- **Ornamentação de praças e residências:** os pneus podem ser utilizados como objetos para a ornamentação de praças, ruas, parques e residências (Figura 24).



Figura 17: Exemplo do uso de pneu em decoração e ornamentação.

- **Construção de casas com pneus inteiros:** a técnica denominada “earthship” (construção natural) utiliza pneus inteiros e argila que são prensados para confecção das paredes, assentados diretamente sobre o solo, desprovido de vegetação (KAMIMURA, 2004). Na Figura 17 observa-se parte do processo.



Figura 18: Earthships de pneus no Haiti

Disponível em: <http://inhabitat.com/earthquake-resistant-earthships-for-haiti-disaster-relief/tire-earthship/?extend=1>(2010).

4.6 Alternativas para destinação ambientalmente correta de pneus

Depois dos combustíveis os pneus constituem o segundo item de maior custo no uso de veículos automotores e para estender o tempo de vida desses, se desenvolveu o processo de reforma de pneus usados.

Essa prática colabora para minimizar os impactos ambientais associados ao descarte do pneu automotivo. Reduz os custos de manutenção de frotas de veículos, em razão de minimizar os gastos comparados com pneus novos. Contribui também de forma significativa na economia de recursos necessários para a produção de novos pneus, como matérias primas obtidas do petróleo e energia elétrica.

A reforma consiste em substituir a banda de rodagem velha e desgastada por uma banda de rodagem nova, através de processos industriais tais como, recapagem, recauchutagem ou remoldagem.

A **recapagem** é o processo de reconstrução do pneu através da substituição da banda de rodagem.

A **recauchutagem** é processo de reconstrução do pneu através da substituição da banda de rodagem e dos ombros.

A **remoldagem** é processo de reconstrução do pneu através da substituição da banda de rodagem, dos ombros e de toda a superfície de seus flancos (Resolução 258/99 – CONAMA).

Apesar de estes processos prolongarem por muitos anos o uso dos pneus, há limites no número de reformas que um pneu suporta sem afetar seu desempenho (Resolução n.º 258/99- CONAMA). Se bem cuidado um pneu de carga, utilizados em ônibus e caminhões, pode ser reformado até cinco vezes, enquanto que um pneu de automóvel de passeio não se recomenda a reforma mais de uma vez.

Para que um pneu usado seja reformado a estrutura do pneu deve estar intacta para que ele possa ser reutilizado em sua função original sem comprometimento da segurança.

Segundo Almeida (2002), a preservação da estrutura do pneu está relacionada com aspectos como condução, manobra e conservação do veículo, uma vez que desbalanceados, desgastam irregularmente os pneus, além da conservação das vias de trânsito.

Quando um pneu não possui mais nenhuma possibilidade de reforma ou aproveitamento, ele se torna um pneu inservível devendo então seguir para a reciclagem.

De acordo com a Resolução nº 258/99, é proibida qualquer forma de descarte desse resíduo em aterros sanitários, bem como no mar, em terrenos baldios ou alagadiços, margens de vias públicas, cursos d'água e praias, e a queima desses resíduos, exceto para obtenção de energia efetuada por métodos insuscetíveis de causar danos à saúde humana ou meio ambiente. Determina ainda que os procedimentos e técnicas licenciados pelos órgãos ambientais como destinação correta são processos nos quais os pneus são descaracterizados por meios físicos e químicos.

Na Figura 19, o organograma elaborado por Motta (2008) permite entender a cadeia de destinação de pneus usados e inservíveis.

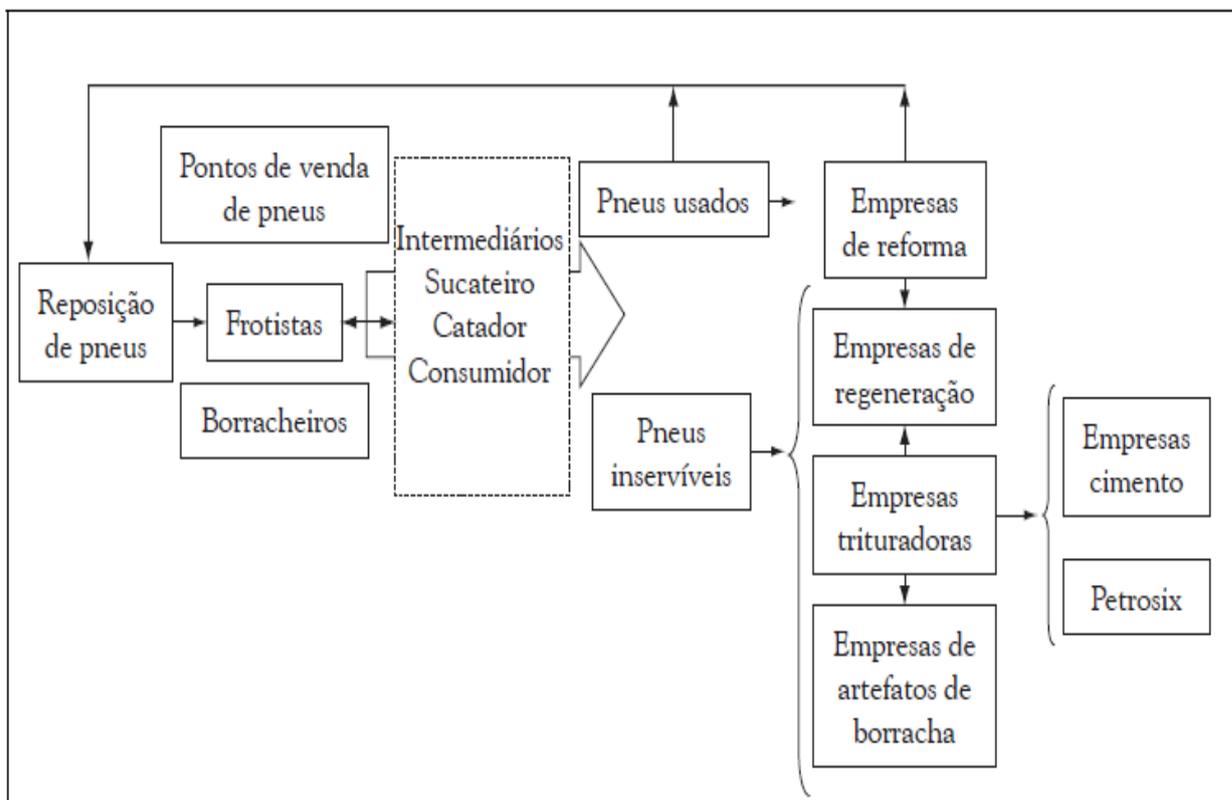


Figura 19: Cadeia de destinação de pneus (MOTTA, 2008).

Segundo Motta (2008), os pneus inservíveis podem seguir três caminhos:

- Pneus convencionais são destinados para as empresas que realizam a laminação e transformação da borracha em artefatos diversos, como solados, cintas de sofá, tapetes para carros e etc;
- Pneus radiais passam por co-processamento, em sua maioria, são triturados e depois encaminhados para empresas produtoras de cimento, para obtenção de energia através da queima nos fornos de clínquer, ou para o Processo Petrosix® da Petrobras que processa xisto betuminoso para obtenção de petróleo bruto;
- Pneus podem ser encaminhados para empresas regeneradoras de borracha, que os transforma em pó de borracha, embora sejam poucas as empresas que realizam este processo, pois a maior parte delas se abastece dos resíduos gerados pelo processo de raspagem dos pneus usados, realizados pelas empresas reformadoras.

No Brasil, a alternativa mais utilizada pelas empresas, produtoras ou importadoras, para obter o certificado de destinação ambientalmente correta dos pneus é a queima controlada para geração de energia.

Segundo dados da CEMPRE (2006), no Brasil de 1999 a 2004, 39% das 386 mil t de pneus inservíveis geradas pelo país foram destinados a fornos de clínquer das empresas produtoras de cimento, resultando numa média anual de 25 mil t.

Das 146 mil t de pneus inservíveis gerados no ano de 2004, 56% foram destinados para a produção de combustível alternativo, 17% para laminação, 19% para reciclagem como matéria-prima para artefatos e 7% para exportação.

Em seu estudo Reschner (2000), classifica a reciclagem de pneus por ordem de preferência dos métodos de processamento e disposição, considerando níveis de investimentos e sensibilidade ambiental:

Primeiro lugar: a recauchutagem do pneu, que se constituiria no verdadeiro sentido da reciclagem.

Segundo lugar, o uso do material e não do produto, referindo-se à comercialização da borracha usada como matéria-prima.

Terceiro lugar, o uso de pneus inteiros usados para recuperação de energia, como suplemento energético em fornos de cimenteiras e termelétricas.

Quarto lugar, o uso de pneus mecanicamente processados, em forma de finas lascas, ou pó, adicionados como suplemento em cimenteiras, e na produção de outros artefatos, etc.

Quinto lugar, devido ao custo de investimento da planta industrial, vem os processos de alteração da estrutura química dos pneus e o uso dos produtos resultantes na recuperação da energia intrínseca. Isto se refere a processos de pirólise e extração supercrítica dos óleos para a produção de combustíveis.

E, em último lugar, a estocagem para aproveitamento posterior dos pneus e a disposição sem maiores cuidados e sem data para aproveitamento.

Segundo Cimino *et al.* (2005), é possível a minimização de resíduos sólidos, com a reutilização da borracha através de um conjunto de práticas que possibilitam reduzir a extração de recursos naturais, a geração de mais resíduos, maximizar a vida útil de áreas destinadas à disposição final de detritos e ampliar a vida útil dos produtos. E no que concerne aos pneumáticos inservíveis, os autores citam algumas das estratégias de minimização associadas à gestão do produto. Na Tabela 7, contempla-se um resumo das estratégias de reciclagem e reuso de pneus inservíveis, com as suas respectivas opções tecnológicas de tratamento.

Tabela 7: Estratégias de reciclagem e reuso de pneus inservíveis, com as suas respectivas opções tecnológicas de tratamento (Fonte: CIMINO *et al.*, 2005).

Estratégias de minimização reciclagem/reuso	Descrição dos processos tecnológicos	Técnicas
Mecânica	Cuminação: - Ambiental e Mecânica, - Criogênica.	Redução do tamanho e processamento do resíduo, transformando-o em uma matéria prima secundária, fechando o ciclo de reciclagem do produto.
Química	Desvulcanização: - Mecânica, - Química, - Ultra-som, - Bio-reação ou Biológica	Recuperação de compostos químicos, por meio da quebra parcial ou total de moléculas, via reações químicas.
Energética	- Co-processamento; - Pirólise	Combustão do resíduo, gerando como produto, a energia que tanto pode ser comercializada, quanto reutilizada para abastecer processos.
De materiais "Lato sensu"	- Recauchutagem; - Recapagem; - Remoldagem; - Diversos usos: Agricultura e Engenharia Civil.	Retirada de partes de um produto que ainda sejam reutilizáveis, com nenhuma ou pouca alteração, possibilitando um novo uso.

Considerando a opção de aproveitamento da borracha, com a reciclagem de pneus, têm-se dentro do processo produtivo a obtenção de insumo regenerado, que sai por menos da metade do custo da borracha natural ou sintética. Possibilita o aperfeiçoamento das propriedades dos materiais confeccionados com a borracha, a economia de energia além de poupar petróleo. Esse processo, ilustrado na Figura 20, consiste na separação dos materiais, sendo o inservível triturado várias vezes até ser reduzido a pó de borracha, o aço removido por eletroímãs e o nylon por peneiras.



Figura 20: Processo de trituração de resíduos de pneus.
(Fonte: <http://www.amorehp.com/waste%20tire%20crushing.html>).

Ponderando sobre a possibilidade de reciclagem de pneus, Blumenthal (1993) afirma que é um processo muito caro, principalmente para fabricação em pequena escala, por serem produzidos com material vulcanizado. Mas ressalta que, se a produção em larga escala torna o processo compensador.

A borracha triturada, apresenta maiores vantagens para quadras esportivas e pavimentação de vias públicas, inclusive no que se refere a estabilização do solo podem ser aplicados na composição de asfalto de maior elasticidade e durabilidade. Na Figura 21 é possível observar a sequência do processo de coloração e fabricação de ladrilhos de borracha, coloridos, para quadras e parques infantis.

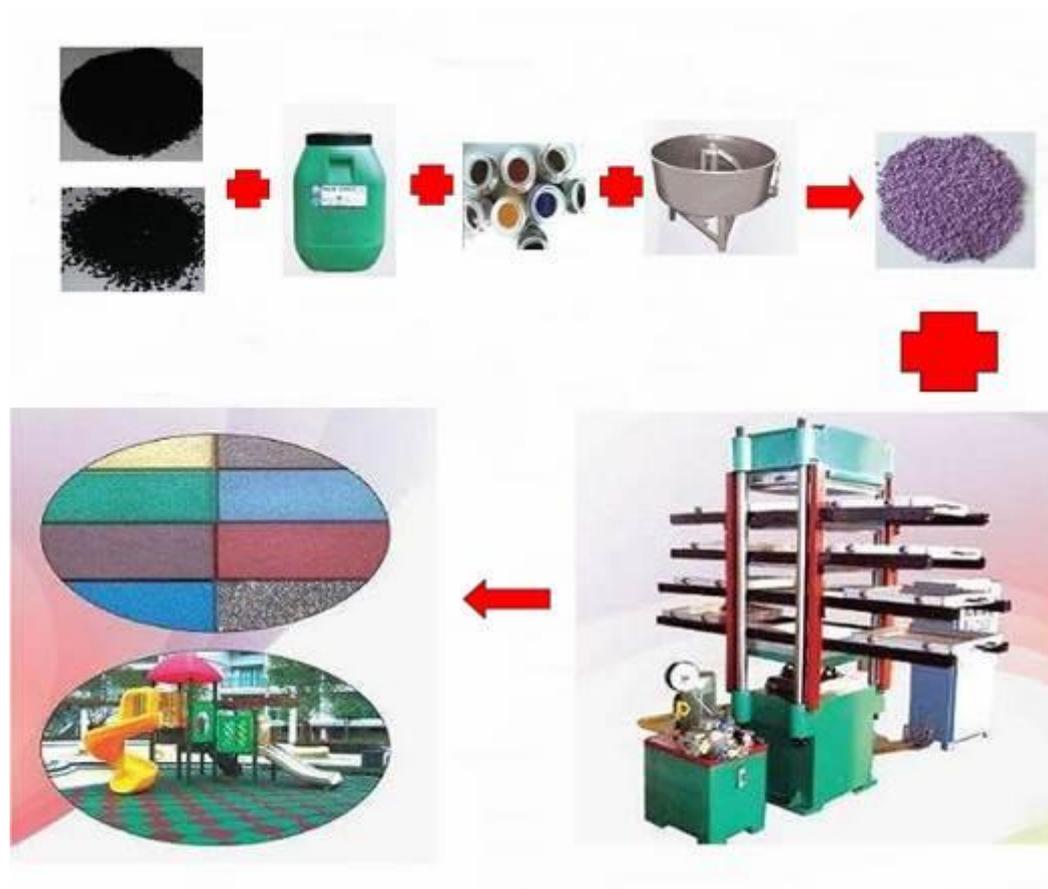


Figura 21: Esquema de coloração do pó de borracha e prensagem de ladrilhos de borracha (Fonte: <http://www.amorehp.com/waste%20tire%20crushing.html>).

Segundo Kamimura (2002), a utilização desses resíduos de pneus, como material de construção na engenharia civil, é uma maneira de diversificar e aumentar a oferta desses materiais, viabilizando eventualmente a redução do preço gerando benefícios sociais adicionais através da política habitacional.

4.6.1 Processo de aproveitamento do resíduo pó de borracha de pneu

Segundo Lagarinhos *et al.* (2008), no Brasil de todas as tecnologias utilizadas para a reciclagem de pneus, as três com maior potencial na reciclagem são: a atividade de reforma (recauchutagem), a valorização energética e a laminação para fabricação de artefatos de borracha.

No processo de laminação, trituração e fabricação de artefatos de borracha, foram utilizados 120,36 mil toneladas de pneus inservíveis o equivalente a 24,07 milhões de pneus inservíveis, ou seja, 50,02% do total reciclado no ano de 2006 no Brasil.

Segundo Adhikari *et al.* (2000), dentre os vários métodos de eliminação de resíduos de borracha a reciclagem ou recuperação é a abordagem mais positiva, porque não salva somente a matéria-prima fóssil, recurso limitado, mas também mantém a qualidade ambiental.

A seguir serão apresentadas algumas aplicações, encontradas na literatura, dos resíduos de pneus inservíveis no campo da construção civil.

4.6.2 Utilização de resíduos de pneus em asfalto

Segundo De Oliveira *et al.* (2007), a solução mais promissora para os pneus inservíveis é fazê-lo voltar para as estradas, porém sob a forma de asfalto. Pesquisadores descobriram que era possível adicionar à composição asfáltica um percentual de borracha de pneu triturada, essa medida aumenta em mais do que o dobro a durabilidade do asfalto.

A borracha de pneu serve como modificador de ligantes asfálticos. Segundo Oda (2000) e Bertollo *et al.* (2002), a incorporação pode ser feita por dois processos.

- O primeiro, chamado de processo seco, consiste em utilizar a borracha como mais um agregado da mistura asfáltica, quando a borracha passará a ser chamado de Agregado-Borracha.

- O segundo, processo úmido, adiciona a borracha moída diretamente ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), a alta temperatura (240°C), tornando os dois uma única mistura chamada de ligante Asfalto-Borracha com propriedades diferentes do ligante inicial.

Ainda segundo Oda (2000), durante muitos anos engenheiros e químicos trabalham misturando borracha natural (látex) e borracha sintética (polímeros) em ligantes asfálticos na tentativa de melhorar as propriedades elásticas da borracha reciclada de pneus em materiais para pavimentação asfáltica. Exemplo, dessa ação é a Companhia de Reciclagem de Borracha, *U.S. Rubber Reclaiming Company*, que introduziu no mercado um produto composto de material asfáltico e borracha desvulcanizada reciclada, denominado RamflexTM.

O pó gerado na recauchutagem e os restos de pneus moídos podem ser aplicados na composição de asfalto de maior elasticidade e durabilidade. Esta técnica é apontada nos EUA como uma das melhores soluções para o fim dos cemitérios de pneus (CEMPRE, 2000).

Oda *et al.* (2001), em seu estudo sobre a incorporação de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação mostra que as misturas asfalto-borracha foram submetidas aos ensaios empíricos utilizados para caracterização de materiais asfálticos (penetração, ponto de fulgor e ponto de amolecimento), apresentados na Tabela 8, pode-se entender:

- o ponto de amolecimento é crescente com o teor de borracha, indicando um aumento na resistência à deformação permanente das misturas contendo asfalto-borracha.
- a adição de borracha torna o ligante mais viscoso, resultando em valores mais baixos de penetração em função do aumento do teor de borracha nas misturas.
- os resultados obtidos, no entanto, mostram que a penetração aumenta até um teor de 12 %, estabilizando ou diminuindo os teores de 18 e 24% de borracha.

Tabela 8: Média dos resultados dos ensaios de ponto de amolecimento, penetração e ponto de fulgor por teor de borracha (ODA *et al.*, 2001).

Teor de Borracha (%)	Granulometria (mm)	Temperatura da mistura (°C)	Ponto de Amolecimento (°C)	Penetração (1/10mm)	Ponto de Fulgor (°C)
0	-	-	51,0	41,7	289
6	#50	160	54,0	40,3	265
6	#50	170	52,0	39,7	278
6	#40	160	55,0	36,7	283
6	#40	170	54,0	36,0	281
12	#50	160	58,0	59,7	317
12	#50	170	60,7	47,0	304
12	#40	160	58,7	51,3	291
12	#40	170	57,0	46,3	296
18	#50	160	62,7	43,0	294
18	#50	170	61,0	46,3	294
18	#40	160	64,0	40,0	308
18	#40	170	60,0	49,0	299
24	#50	160	65,0	48,0	293
24	#50	170	67,0	46,3	294
24	#40	160	65,5	47,0	298
24	#40	170	65,0	49,0	298

Dentre os fatores analisados, o teor de borracha é o que mais influencia a viscosidade do ligante asfalto-borracha, havendo aumento da viscosidade através da elevação do teor de borracha (Figura 22), fator que é acrescido com o aumento da granulometria da borracha (Figura 23).

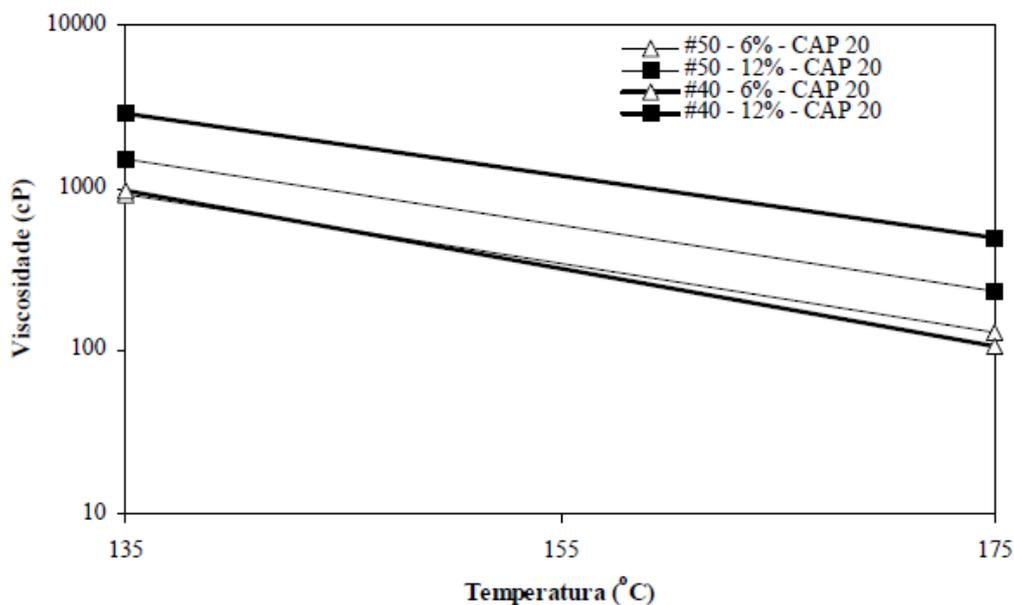


Figura 22: Variação da viscosidade em relação ao teor de borracha. (ODA *et al.* 2001).

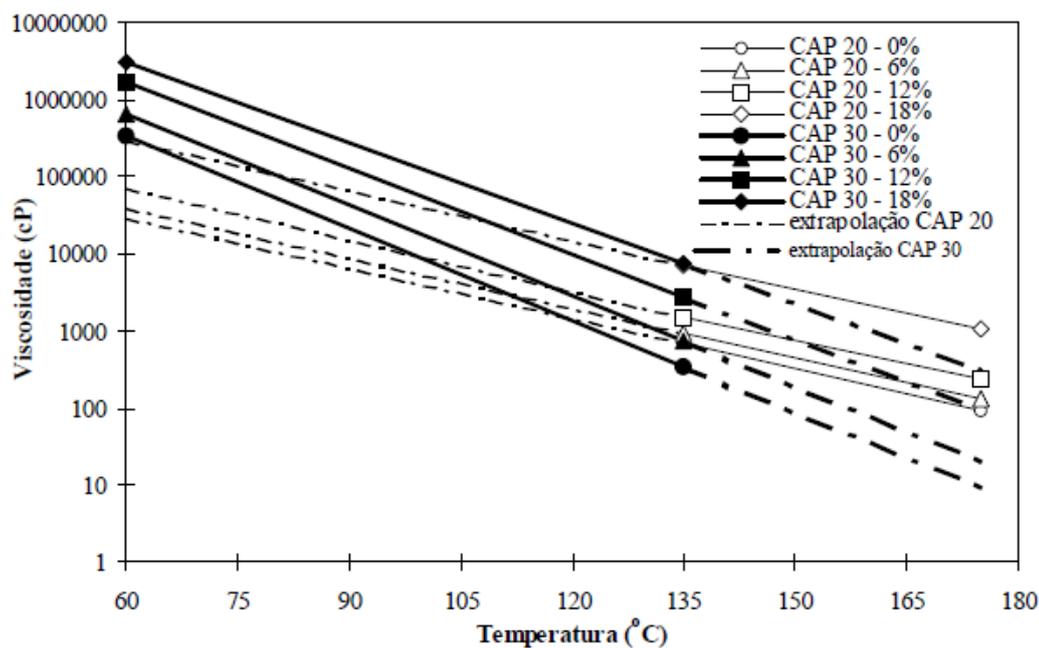


Figura 23: Efeito da granulometria da borracha na viscosidade do ligante asfalto-borracha (ODA, 2001).

Bertollo *et al.* (2002) observaram que misturas modificadas com agregado-borracha com granulometria fina (1,18 – 0,15 mm) possuíam um melhor desempenho quanto à deformação permanente e flexibilidade, quando comparadas a misturas convencionais. Já misturas com Agregado-Borracha de granulometria mais grossa (9,5 – 0,60 mm) mostra um excesso de deformação permanente e maior resiliência.

Pela análise da Figura 24 observa-se que as misturas 1F e 2F apresentaram menores taxas de deformação (curvas menos inclinadas) quando comparadas à mistura de controle, ou seja, essas misturas apresentam menor potencial de desenvolver deformação permanente nas trilhas de roda.

Estes resultados ratificam a teoria que as partículas finas de Agregado-Borracha reagem parcialmente com o ligante, enquanto as partículas maiores funcionam como agregados elásticos (BERTOLLO *et al.*, 2002).

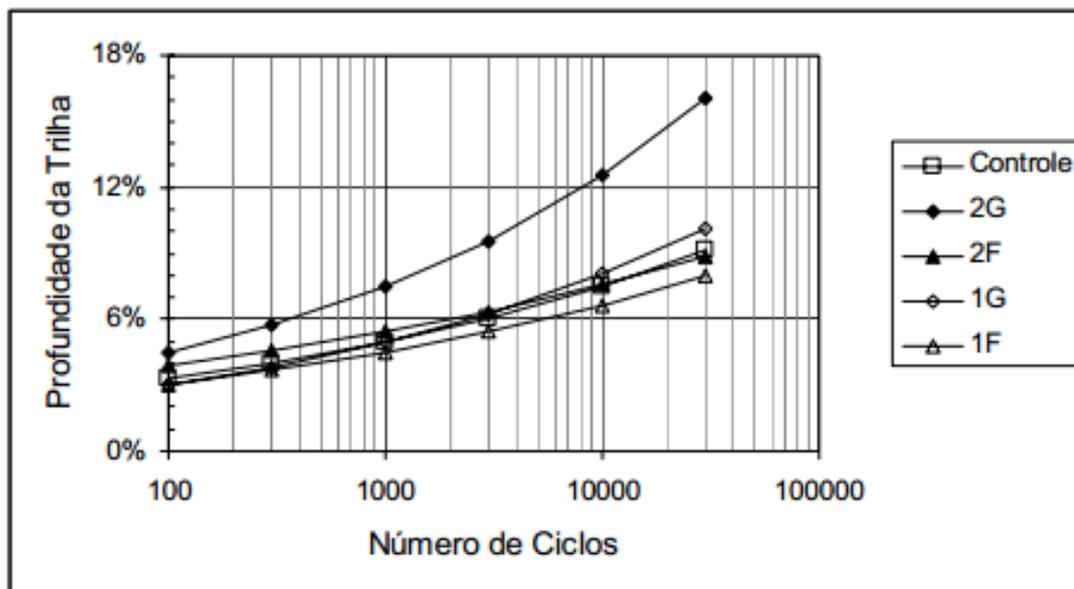


Figura 24: Resultados da variação da porcentagem de afundamento em trilha de roda com o número de ciclos (BERTOLLO *et al.*, 2002).

REIS (2002) mostra que misturas do tipo matriz pétreo de asfalto (SMA) têm excelentes resultados quanto à deformação permanente, possuindo, ao mesmo tempo, módulos de resiliência compatíveis com os de misturas contínuas convencionais. Destaca-se neste trabalho que a utilização de asfaltos modificados por polímero dá uma qualidade a mais às misturas SMA, além de resolver problemas como escorrimiento, deformação permanente e susceptibilidade a altas temperaturas.

Segundo De Oliveira *et al.* (2007), os fabricantes do asfalto-borracha prometem alguns benefícios, como uma maior aderência, redução sensível dos ruídos de atrito e uma maior durabilidade do asfalto.

4.6.3 Utilização de resíduos de pneus em concreto

Bewick *et al.* (2010) avaliaram simultaneamente a resistência à compressão dos concretos produzidos com a substituição da brita em volume por agregados

reciclados de pneus com algumas propriedades no estado fresco que são influenciadas diretamente pelo agregado. A Figura 25 representa de maneira sintetizada o estudo comparativo feito pelos autores, onde é nota-se que a redução da resistência mecânica é provocada também pelas propriedades ligadas ao agregado utilizado.

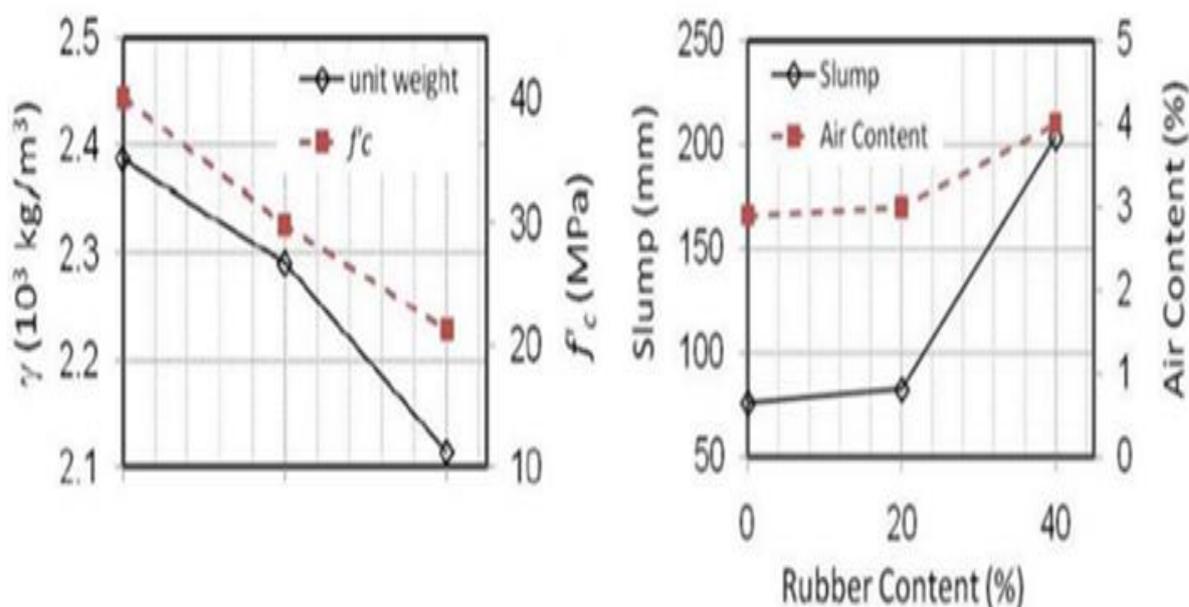


Figura 25: Propriedades dos concretos com diferentes teores de borrachas nos estados endurecidos e fresco (Fonte: BEWICK *et al.*, 2010).

Fioriti *et al.* (2007) demonstraram através de ensaios, com pavimentos intertravados utilizando resíduos de pneus, que ocorre uma queda na resistência à compressão, porém, o piso intertravado tem grande capacidade de absorção de energia.

Nirschl *et al.* (2002) estudando o comportamento mecânico de concretos acrescidos de fibras de borracha vulcanizada, de duas faixas granulométricas diferentes, provenientes do processo de recauchutagem de pneus, elaboraram composições de concreto adicionado de resíduos de borracha de pneus em substituição parcial dos agregados.

Neste trabalho foram realizados aos 7, 28 e 56 dias, ensaios de resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, além de ensaio de absorção d'água dos corpos de prova. Utilizaram-se fibras de borracha vulcanizada passadas na peneira nº 8 – abertura 2,38 mm – e retiradas na peneira nº 20 – abertura 0,8 mm – e fibras passadas na peneira nº 20 – abertura de 0,8 mm.

Os autores concluíram que o uso deste material na construção civil é perfeitamente viável e que a adição das fibras maiores no concreto aumentariam as propriedades mecânicas e diminuiriam a sua trabalhabilidade.

Albuquerque e colaboradores (2002), comparando diversos trabalhos de concretos com borracha de pneu, concluem, principalmente, que quanto ao tamanho da borracha, partículas com dimensão superiores a 4 mm atuam negativamente nas propriedades mecânicas do concreto, sendo inviável seu uso e que o maior problema encontrado foi a aderência entre a borracha e a matriz de cimento, fator amenizado pelo tratamento da borracha.

Segundo Fioriti *et al.* (2002) e Segre *et al.* (2004), a adição de borracha em materiais cimentícios diminui a absorção de água do compósito. Já, o estudo de Lima e Rocha (2004), indica que a absorção aumenta com a incorporação do resíduo.

Concretos de boa qualidade apresentam absorção de água inferior a 10%. No trabalho de Freitas (2007), traços estudados com adição de borracha apresentaram absorção inferior a 5% sendo considerado, pelo autor, como de boa qualidade quanto à absorção.

Freitas (2007) concluiu que o aumento do teor de ar na mistura de concreto fresco, devido à adição de borracha, não prejudicou a absorção de água, o que indica que os vazios internos não estão interligados, portanto, a adição de borracha não interferiu na absorção de água do concreto (Figura 26).

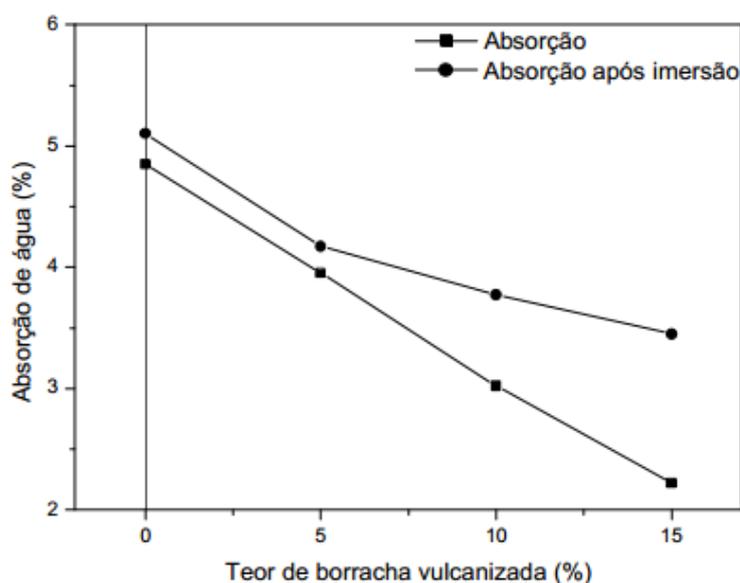


Figura 26: Absorção de água do traço estudado, aos 28 dias (Fonte: FREITAS, 2007).

4.6.4 Utilização de resíduos de pneus em argamassa

Canova e seus colaboradores (2008) encontraram uma alternativa que contribui para a redução de fissuras em revestimentos argamassados ao estudarem uma argamassa de revestimento com resíduos de pneus inservíveis.

A argamassa foi produzida com cimento, cal virgem e areia, no traço 1: 1,5: 9 (em volume) e adição de pó de borracha moída, nas proporções 0, 6, 8, 10 e 12% do volume de agregado. Avaliam a massa específica, o teor de ar incorporado e a retenção de água no estado plástico e em corpos de prova cilíndricos, a resistência à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de deformação estática e a absorção de água por imersão no estado endurecido; e a resistência de aderência à tração e a fissuração em corpos de prova aplicados sobre substrato.

A argamassa com resíduo apresentou menores incidências de fissuras no revestimento (Tabela 9). Apresenta redução no módulo e na resistência e aumenta o teor de ar incorporado (Figura 27).

Tabela 9: Quantidades de fissuras que ocorreram com 24h e com 90 dias
(CANOVA *et al.*, 2008).

Argamassa	24 horas	90 dias	Total
Am 0	11	8	19
Am 6	8	5	13
Am 8	9	2	11
Am10	9	5	14
Am12	8	7	15

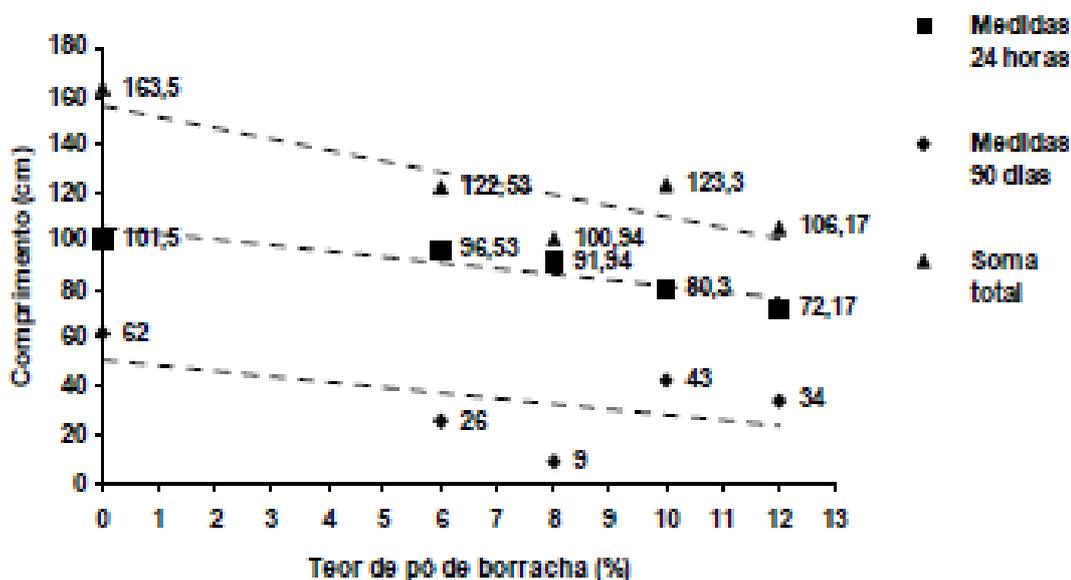


Figura 27: Gráfico do comprimento das fissuras das amostras
(Fonte: CANOVA *et al.*, 2008).

Raghavan *et al.* (1998), avalia a trabalhabilidade e propriedades mecânicas de argamassa de cimento contendo borracha de pneus de automóveis e caminhões. Dois tipos de partículas de borracha foram usados.

Como esperado, a adição de borracha diminuiu a resistência à flexão. Houve influência na forma das partículas de borracha, pois estas em forma de fibra tiveram maior resistência à flexão, quando comparados com as borrachas em forma granular.

Os autores constataram que a argamassa contendo fibras de borracha apresentam melhor trabalhabilidade que a argamassa sem adições (Tabela 10). Observaram também, a tenacidade nos corpos de prova, quando submetidos à flexão.

Tabela 10: Trabalhabilidade das argamassas em estado fresco(Fonte: RAGHAVAN, D. *et. al.*, 1998).

Material adicionado a argamassa	Tempo (segundos)	
	% de cimento	
	1	10
Testemunho	55 +/- 1	_____
Polipropileno	241 +/- 8	_____
GR2	40 +/- 2	58 +/- 3
FR 2.36	36 +/- 1	50 +/- 4
FR 4.75	26 +/- 1	44 +/- 3

Raghavan (2000), em outro trabalho, usando fibras de borrachas de pneus, estudou o comportamento das argamassas, quanto à resistência à compressão e a resistência à flexão. Para verificar a aderência entre a borracha e os compósitos, o autor fez ensaios com pasta de cimento, justificando que esta seria a melhor forma de análise.

Raghavan usou produtos à base de silanos, que é a matéria-prima para a fabricação de silicones (borrachas), como ponte de aderência, para tratamento das superfícies da borracha e ensaiou os corpos de prova curados em temperatura ambiente e temperaturas variando de 150 a 180 °C, esperando que com o aumento da temperatura houvesse uma reação entre o silano e a borracha do compósito.

Os gráficos das Figuras 28 e 29 apresentam a perda de resistência à compressão e à flexão, devido o aumento da quantidade de borracha (sem tratamento) adicionada na argamassa.

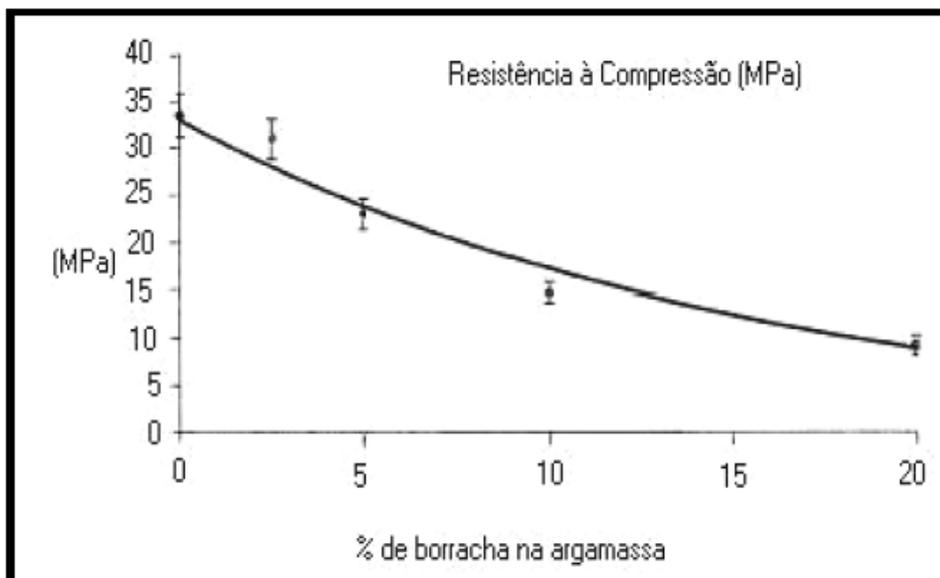


Figura 28: Resistência à compressão da pasta de cimento com borracha de pneu (RAGHAVAN, 2000).

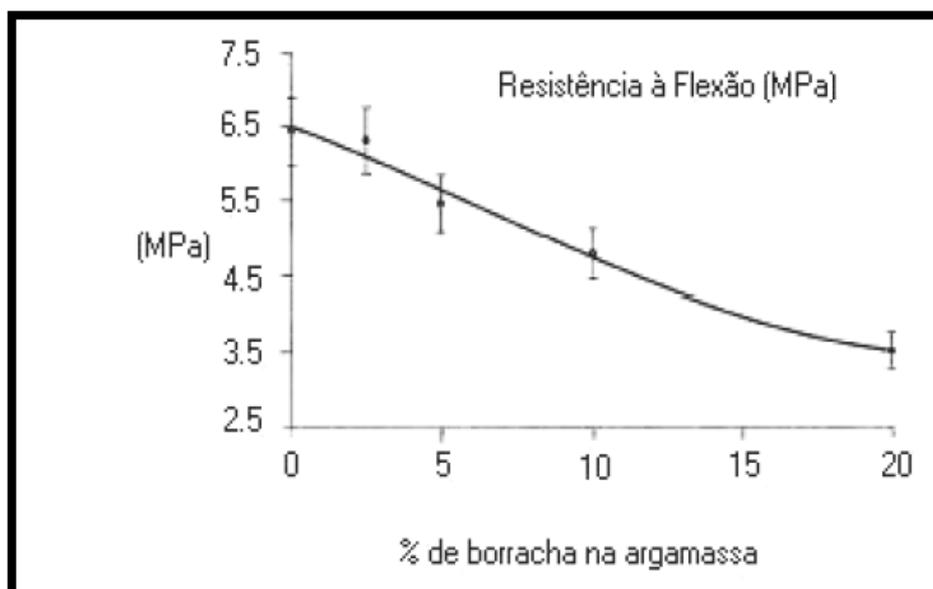


Figura 29: Resistência à flexão da pasta de cimento com borracha de pneu (RAGHAVAN, 2000).

Lima *et al.*,(2000), estudando a argamassa de cimento, com adição de fibras de borracha vulcanizada para a construção civil, efetuou um estudo da sua dosagem com adição de grânulos de borracha vulcanizada, resíduo proveniente da indústria de recauchutagem de pneus usados, analisando suas prioridades para fins de obtenção de um material alternativo para a construção civil.

Analisam-se as características físicas, a resistência mecânica suas propriedades e o isolamento térmico e acústico. Pela análise dos autores a proteção acústica proporcionada por placas produzidas com o compósito argamassa de cimento e borracha podem atingir níveis de atenuamento de 26 a 39 dB, Figura 30.

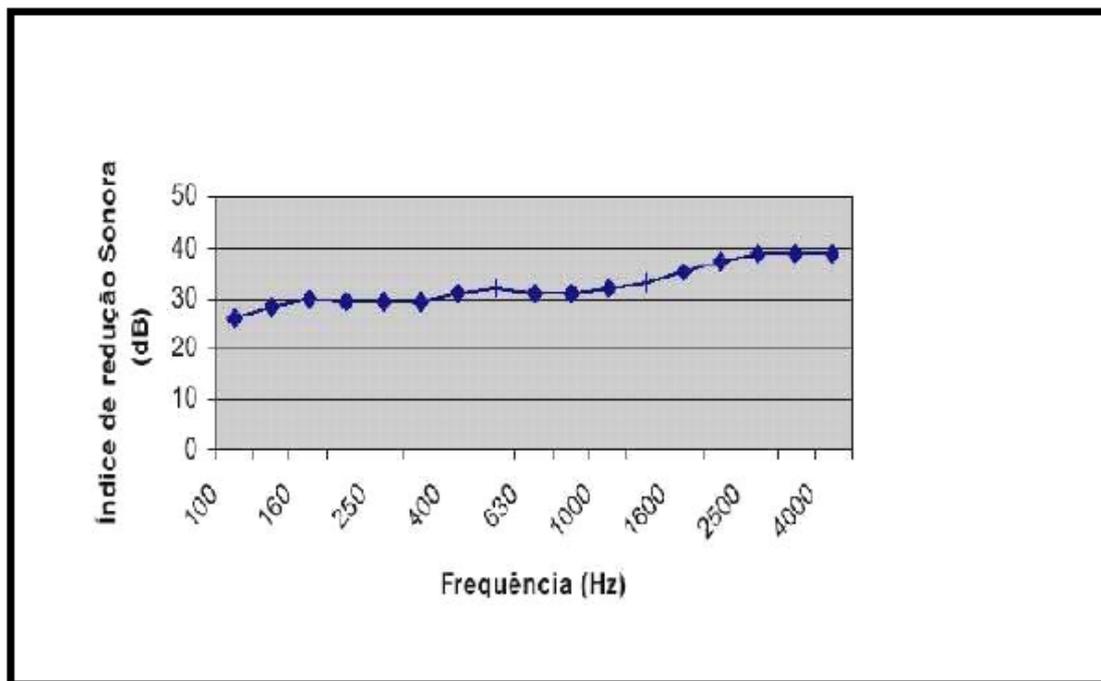


Figura 30: Resultado do Ensaio de redução sonora (Fonte: LIMA *et al.*, 2000).

Meneguini (2003) determinou as principais propriedades mecânicas de uma argamassa de cimento e areia, tendo, como adição, borracha moída de pneus usados tratada com solução de hidróxido de sódio comercial, tanto no estado fresco (índice de consistência) quanto no estado endurecido (absorção de água por capilaridade, compressão axial e diametral, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão).

No ensaio de desgaste por abrasão, resultados mostrados na Tabela 11, para o traço 1:3, a argamassa sem adição do pó de borracha teve desgaste de 8,3 mm, em média, aos 1000 m de percurso e, com a adição de borracha, obteve-se um valor de 4,5 mm, ou seja, um aumento de cerca de 35% da resistência de desgaste à abrasão.

Tabela 11: Resultados do ensaio de abrasão das argamassas (Fonte: MENEGUINI, 2003).

ENSAIO DE DESGASTE POR ABRASÃO			
TRAÇO	DESGASTE (mm)		DENSIDADE APARENTE (g/cm ³)
	500 M	1000 M	
1:3 c/ adição	3	4,5	1,62
1:3 s/ adição	4,5	8,3	1,79
1:5 c/ adição	1,8	3,7	1,53
1:5 s/ adição	2,5	5	1,74
1:7 c/ adição	4	7	1,46
1:7 s/ adição	3	7,5	1,73

4.6.5 Incorporação de resíduos de borracha de pneus em tijolos

Em um estudo realizado por Nascimento (2013), com o objetivo de formular adobes regionais com diferentes proporções de borracha de pneu triturada, utilizou a argila, da região do Agreste Pernambucano, fibra de feno e borracha de pneus triturada, proveniente de processos de recauchutagem.

Neste trabalho as matérias-primas foram caracterizadas por análise granulométrica e determinação de índices físicos, bem como limites de plasticidade e liquidez. Foram produzidos corpos de prova com as seguintes dimensões: 10 x 15 x 25 cm, e com as composições apresentadas na Figura 31.

A		B	
Traço de referência		Traços	Borracha de pneu triturada
2,0 baldes	Solo Seco	Traço 01	1 kg (0,5 baldes)
3,0 baldes	Solo Natural	Traço 02	2 kg (1,0 baldes)
1,5 baldes	Água	Traço 03	4 kg (2,0 baldes)
0,5 balde	Fibra (Feno imerso em água)	Traço 04	6 kg (3,0 baldes)

Obs.: O balde utilizado é de 8 L.

Figura 31: Determinação de traços: Referência (A) e adição da borracha de pneu triturada (B) (Fonte: (NASCIMENTO, 2013).

Foi feita a caracterização física dos tijolos, representada pela determinação da massa específica aparente, pela retração e pela absorção de água (Método do Cachimbo e Ensaio de Capilaridade). E a caracterização mecânica, representada pela resistência a compressão. A Tabela 12 mostra a quantidade de corpos de prova produzidos de acordo com cada traço.

Tabela 12: Quantidade de tijolos produzidos por traço (Fonte: NASCIMENTO, 2013).

Tijolos Produzidos	
Traços	Unidades
Traço 1	9
Traço 2	9
Traço 3	10
Traço 4	10

Foi mantida a resistência à compressão, aumentando a capacidade do tijolo absorver energia de ruptura, além disso, tornou o tijolo mais leve, melhorou a absorção de água de uma forma geral e manteve as alturas iniciais, retraindo na largura e no comprimento diferente do traço de referência que retraiu na altura.

Pela análise da Tabela 13 e Figura 32 podem-se observar os resultados obtidos de resistência à compressão para todos os traços.

Tabela 13: Resistência à compressão (Fonte: NASCIMENTO, 2013).

Nº do Tijolo	Resistência a Compressão - Fck (MPa)				
	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4	Traço Referência
1	3,12	2,89	2,78	2,21	2,48
2	2,43	2,45	3,02	2,15	2,78
3	2,54	2,74	2,90	2,38	2,98
4	2,40	3,06	2,82	2,57	2,29
5	2,78	2,85	2,48	2,51	3,17
6	-	-	2,49	2,83	3,00
Média	2,65	2,80	2,80	2,36	2,74
Desvio Padrão	0,30	0,22	0,22	0,25	0,34
Intervalo de Confiança	0,29	0,21	0,18	0,21	0,28

Com os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão percebe-se que não houve alteração na resistência à compressão no traço 1, 2 e 3 quando comparado ao tijolo de referência, com 90% de confiança para 9 ou 10 corpos de prova de cada traço, com os tijolos com adição da fibra de borracha de pneu.

O único traço que sofreu uma perda de média 14% em resistência a compressão, foi o traço 4, essa perda de resistência deve ter ocorrido devido uma grande quantidade de borracha presente nesse traço.

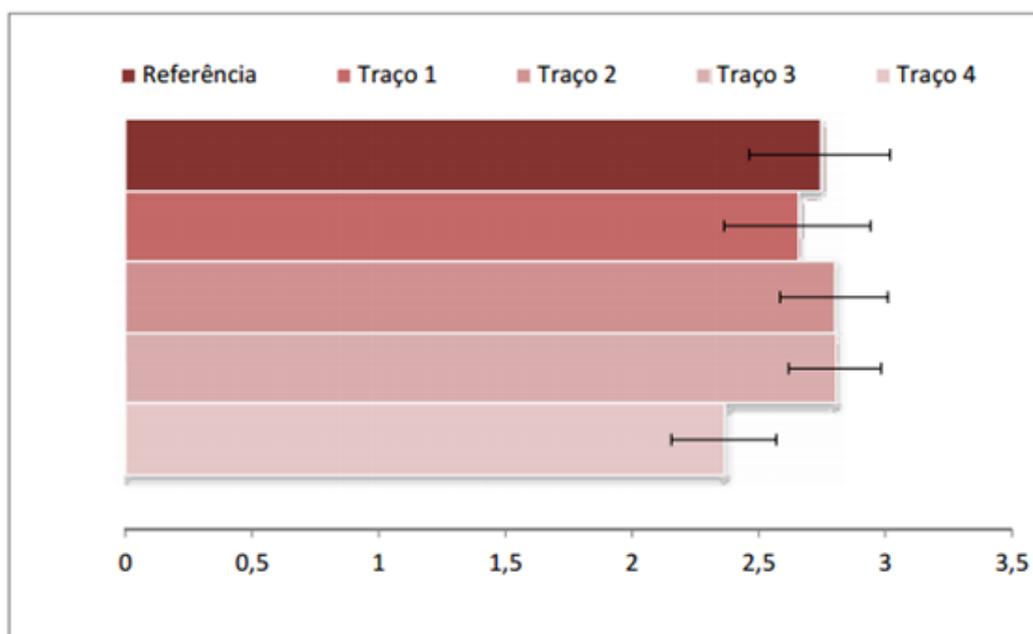


Figura 32: Comparativo da resistência à compressão (MPa), com intervalo de confiança de 90% (Fonte: NASCIMENTO, 2013).

Do ponto de vista estrutural, o ideal é que o tijolo não retraísse, nem expandisse em sua altura, o que ocorreu com a maioria dos tijolos desse estudo, com a adição de fibras de borracha de pneu.

Dentro dos erros experimentais, de dificuldades na moldagem, em termos de resistência à compressão, capilaridade, absorção de água, retração, Nascimento (2013), considerou a adição da fibra da borracha de pneu como positiva.

Conclui-se esta seção, ressaltando a ausência do aporte teórico da incorporação de resíduos de pneus em tijolos queimados. Em detrimento da inexistência de literatura este trabalho apresenta-se como fase experimental, o que garante a validação ou refutação da utilização do resíduo a ser incorporado.

5. Materiais e Métodos

A seguir estão descritos os materiais e métodos que foram empregados nesta pesquisa de mestrado, e envolvidos nas diversas etapas relacionadas tanto com as matérias-primas, quanto com o processamento e ensaios utilizados. A Figura 33 apresenta o fluxograma experimental desenvolvido.

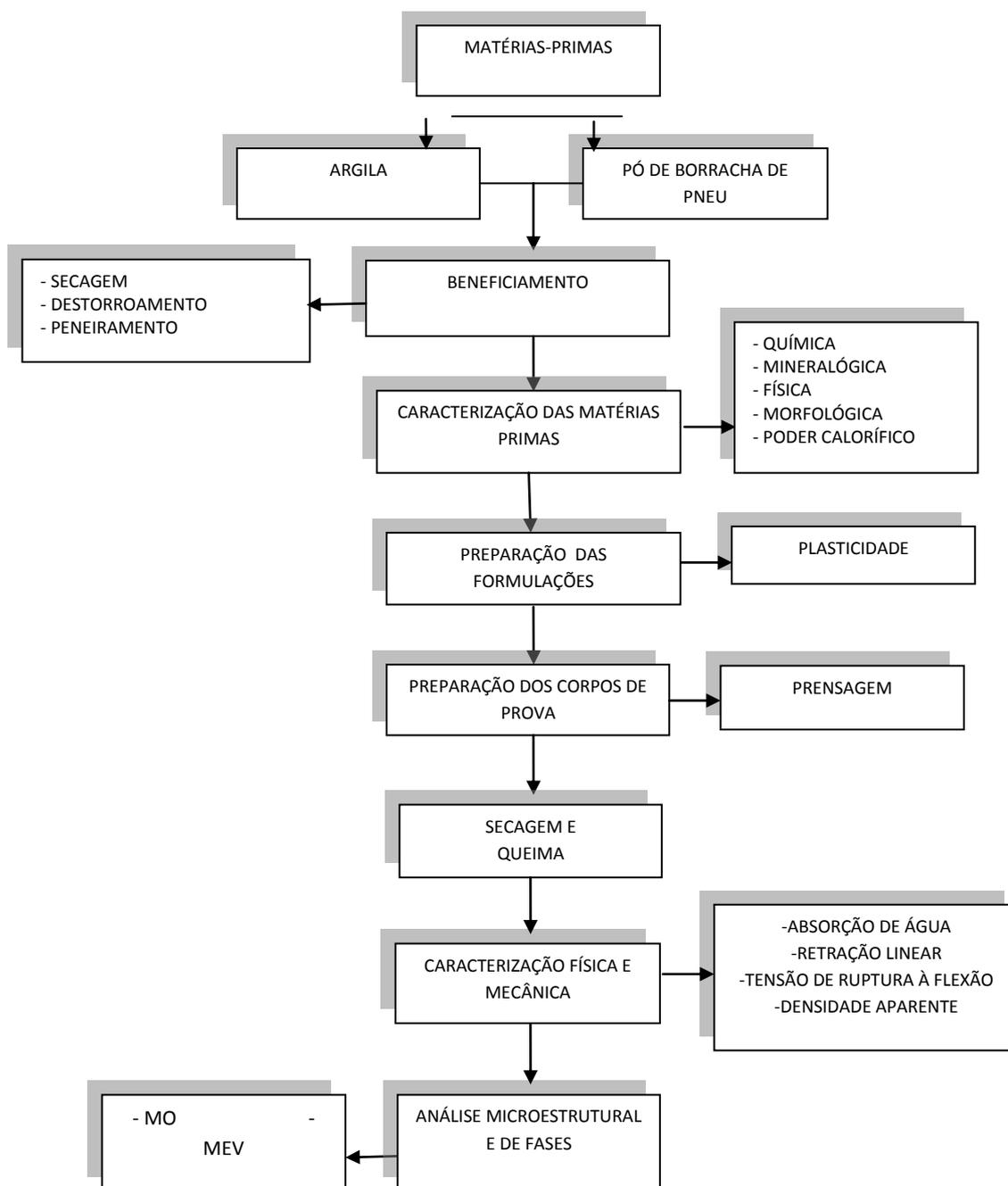


Figura 33: Fluxograma das etapas envolvidas neste projeto.

5.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizadas como matérias-primas uma massa cerâmica argilosa e o resíduo de pó de borracha gerado no setor de recauchutagem de pneu.

A massa cerâmica (Figura 34) utilizada é composta por argilas caulínicas do Município de Campos dos Goytacazes/RJ, proveniente da Arte Cerâmica Sardinha, localizada no Pólo de Cerâmica Vermelha de Campos dos Goytacazes.



Figura 34: Massa Cerâmica adquirida em setor cerâmico de Campos dos Goytacazes.

O resíduo de pó de borracha de pneu, utilizado nesta pesquisa foi disponibilizado pelo Instituto IDEA Cíclica (Instituto para Desenvolvimento Ambiental e Tecnológico), localizado na cidade de Magé - RJ.

O Instituto para Desenvolvimento Ambiental e Tecnológico (IDEA Cíclica) atua na busca de alternativas que colaborem para que empresas e instituições, ecologicamente conscientes, possam dar um destino ambientalmente seguro a seus resíduos, e um dos maiores exemplos deste esforço, é a instalação da unidade localizada no Condomínio Industrial Unidas em Santo Aleixo- Magé-RJ Magé-RJ, que recebe mensalmente cerca de 50 toneladas de raspas de pneus provenientes de recauchutadoras do Rio de Janeiro e Espírito Santo

As raspas de borracha são coletadas na cidade do Rio de Janeiro, nas regiões dos lagos, norte e noroeste fluminense em transporte do próprio instituto, já o material proveniente do estado do Espírito Santo é entregue pelas recauchutadoras no galpão localizado em Magé-RJ.

Visando o atendimento à resolução CONAMA 258, que determina a destinação final de pneus inservíveis imposta a fabricantes, importadores e distribuidores de pneus, o IDEA Cíclica instalou uma unidade fabril de processamento de raspas de borracha, matéria-prima resultante da recauchutagem

de pneus. O objetivo principal é processar essa matéria-prima, transformando-a em pó de borracha, permitindo assim o retorno desse material para a produção de pisos, tapetes de carro, solados de sapato, asfalto e demais utilizações para a produção de artefatos de borracha.

A Figura 35 mostra o processo de separação das raspas de borracha de pneus. O resíduo de borracha chega até a unidade de Magé-RJ, em sacos de fibra, em várias granulometrias e segue para o equipamento composto por várias peneiras sobrepostas (cada uma com uma abertura própria) e vibratórias para separação do material por tamanho de partícula. Dentro deste equipamento existem vários imãs para captação de partes metálicas que sobram no meio das raspas de pneu. Após a separação do pó de borracha em diferentes granulometrias ocorre o empacotamento desse material que é revendido para diversos ramos conforme a granulometria e aplicação final.

O IDEA Ciclica processa cerca de 40 toneladas de raspas de borracha por mês e o pó de borracha é comercializado por R\$ 700,00 a tonelada, porém o gasto energético com o processamento é alto o que não garante lucratividade com a separação do resíduo.

O principal destino dessa borracha em pó é a produção de gramado sintético que utiliza o pó de borracha em substituição à areia, para aumentar a durabilidade e resistência do material sintético, bem como tornar o gramado mais macio a fim de não causar lesões aos usuários em caso de queda sobre o mesmo.

Há empresas que trabalham com asfalto e pisos de academias que também são parceiras do IDEA e utilizam o resíduo na preparação da lama asfáltica, para pavimentação de rodovias e, na confecção de pisos para academias e clínicas de fisioterapia.



Figura 35: Etapas de separação das raspas de borracha de pneus

(Fonte: Arquivo próprio).

5.2 - Métodos

5.2.1 - Beneficiamento das matérias-primas.

Inicialmente, a massa cerâmica foi coletada, seca ao ambiente e desagregada em britador de mandíbulas (Figura 36-A) após o processo de cominuição, foi seca durante 24 horas em estufa a 110 °C e posteriormente peneirada em 20 mesh (0,420 mm). O restante da peneiração foi submetido à moagem em moinho de bolas (Figura 36-B), com esferas de porcelana de diferentes diâmetros durante duas horas a fim de reduzir sua granulometria.

Já o resíduo de pó de borracha de pneu disponibilizado pela empresa IDEA Cíclica-Magé-RJ passou por um processo de peneiração para ser retiradas partes de granulometria grosseira, mas não passou por beneficiamento, pois é disponibilizado com granulometria reduzida. Então iniciou-se o processo de preparação das amostras a serem enviadas para ensaios de caracterização.

Ao final, ambos foram colocados, separadamente, em vasilhame fechado para sua posterior utilização, de modo a não absorver umidade do ar.

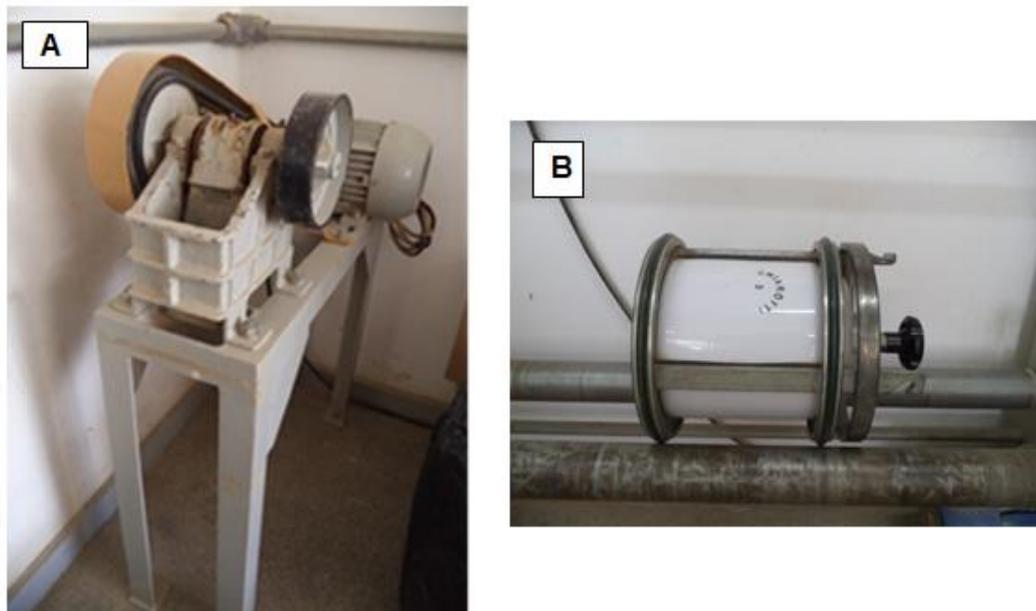


Figura 36: Equipamentos utilizados no beneficiamento das matérias primas: A-britador de mandíbulas e B-moinho de bolas (Fonte: Arquivo próprio).

5.2.2- Caracterização das matérias-primas

As matérias-primas foram submetidas à caracterização química, mineralógica e física através de técnicas de espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de energia, espectrometria de massa e difração de raios X.

5.2.2.1 - Caracterização química

5.2.2.1.1 – Análise de FRX

A composição química da massa cerâmica foi determinada utilizando um espectrômetro de fluorescência de raios X, de energia dispersiva (ED-XRF), da marca Shimadzu, modelo EDX 700, acoplado a um computador para o processamento de dados. Esta análise foi realizada no Instituto SENAI/SC de Tecnologia - Materiais – LDCM.

Também foi determinada a perda ao fogo das matérias-primas, de acordo com a expressão:

$$PF = \frac{M_s - M_c}{M_s} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

PF- perda ao fogo (%);

Ms - massa da amostra seca a 110 °C em estufa (g);

Mc - massa da amostra calcinada a 1000 °C por 1 hora.

5.2.2.1.2– Composição elementar e isotópica de C e N

A composição elementar foi determinada a partir de uma massa de aproximadamente 1,0 mg de pó de borracha em cápsula de Sn.

A determinação dos teores de carbono e nitrogênio foi realizada no Analisador Elementar Flash 2000 (*Organic elemental analyzer - Thermo Scientific*). Os valores foram expressos em percentual (%), sendo a precisão obtida com três repetições, realizadas a cada 20 amostras. O nível de reprodutibilidade analítica dentro da mesma amostra foi a partir de 95 % (MEYERS, 1994). O limite de detecção para C e N foram 0,05 %, 0,02 %, respectivamente.

5.2.2.2 - Caracterização mineralógica

5.2.2.2.1 - Difração de raios X

A análise mineralógica qualitativa dos minerais presentes, tanto da massa cerâmica quanto no resíduo de borracha, foi realizada através de difração de raios X (DRX), em um difratômetro de raios X marca Shimadzu modelo XRD 7000, operando com radiação de Cu-K α e varredura na faixa do ângulo de difração 2θ variando de 5° a 100 °Com velocidade de 2°/min.

As fases cristalinas foram identificadas por comparação entre as intensidades e as posições dos picos de Bragg com aqueles das fichas padrão JCPDS – *Joint Comitee of Powder Diffraction Standards*.

5.2.2.2.2 - Análises térmicas (TG/ DTG)

Em complemento à caracterização mineralógica das matérias-primas foram utilizados ensaios de análise termogravimétrica (TG/DTG), realizadas em um analisador simultâneo ATG-ATD, marca Shimadzu, modelo DTG-60H (LAMAV/UENF). O ensaio foi realizado em temperatura ambiente até 800 °C, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

5.2.2.2.3 – Análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Pela realização desta análise é possível saber em que temperatura, ou faixa de temperatura que o pó de borracha de pneu apresenta suas transições e porcentagem de cristalinidade, considerando sua massa molar e dispersão.

Esta análise foi feita no sistema DSC QDSC 2000- TA Instruments, com resfriamento controlado (LNCS) na Unidade de Caracterização Térmica e Superficial da Central de Química/ Instituto de Química da Universidade de São Paulo (USP) em Lorena-SP.

5.2.2.2.4 – Poder calorífico

Para determinar o calor de combustão ou poder calorífico superior (PCS) do resíduo pó de borracha, utilizou-se um calorímetro adiabático com uma bomba calorimétrica *Plain Jacket Oxygen*, modelo 1341 (Figura 37 A) do Laboratório de Zootecnia e Nutrição Animal (LZNA/UENF). A obtenção do PCS foi baseada na metodologia constante no Manual de Instruções do equipamento.

O resíduo pó de borracha foi seco em estufa (100 °C) por 24 horas e após peneirado em peneira de 100 mesh (0,15 mm).

Utilizando um cadinho de ferro pesou-se cerca de 1g de resíduo, que após foi inserido em uma cápsula de combustão e fixado em uma haste e colocado na bomba (Figura 37 A); a amostra é ligada por um fusível de ignição à bomba, que após fechada recebe 35 atm. de oxigênio. A câmara de combustão é colocada num balde isolado do ambiente, contendo 2 kg de água destilada. Após fechou-se todo o sistema, e foi necessário aguardar cerca de 5 minutos para estabilização da temperatura dentro da bomba e iniciou-se a reação aquecendo a amostra através de uma corrente elétrica que passa por um fio até o fusível e este até a amostra.

A reação de combustão é exotérmica e conseqüentemente aquece a água que circunda a câmara. A variação da temperatura em função do tempo é determinada pelo termômetro de precisão, acoplado no calorímetro (Figura 37 B), onde se obtém os dados que relacionam estas duas grandezas.

Após a análise foi feita uma inspeção do interior do cadinho quanto a sinais de espalhamento da amostra ou resíduos não queimados. No caso do resíduo de borracha não havia massa residual. Como todo o calor liberado foi utilizado para elevar a temperatura da água e a partir dos dados de temperatura x tempo o equipamento calculou o poder calorífico/ calor de combustão em kcal/kg.

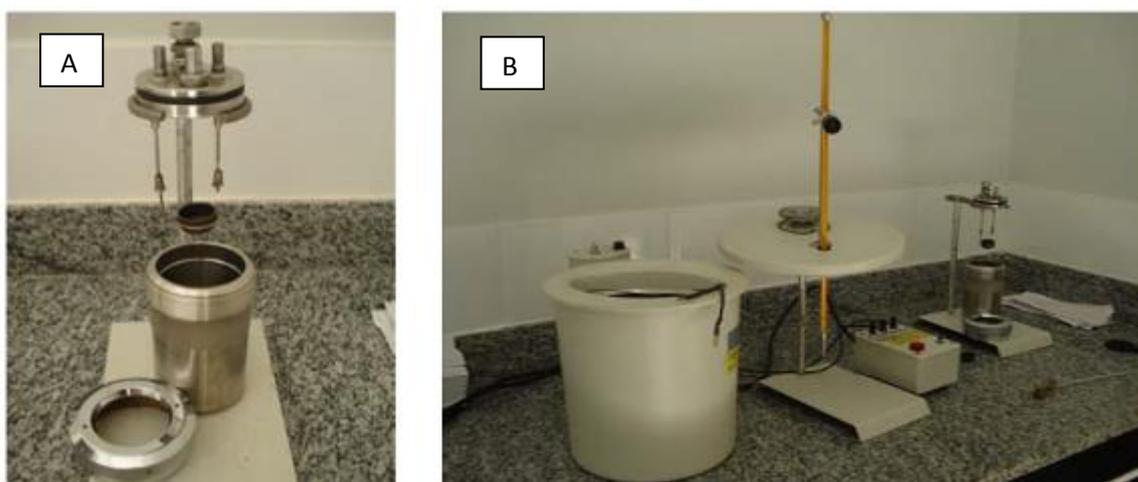


Figura 37: A: Bomba calorimétrica, B: Calorímetro

5.2.2.3 - Caracterização física

5.2.2.3.1 - Distribuição de tamanho de partículas

A análise granulométrica do resíduo foi determinada via processo combinado de peneiramento e da massa cerâmica por sedimentação, de acordo com procedimentos padronizados na norma NBR 7181 (ABNT, 1984).

O procedimento de peneiramento consiste basicamente na classificação do tamanho de partículas que ficam retidas no peneiramento grosso até 20 mesh, e por um peneiramento fino que é constituído por peneiras de 20, 40, 60, 100 até 200 mesh.

A técnica de sedimentação efetuada com dispersão de 70 g da amostra em 125 mL de água com adição de 5,71 g de hexametáfosfato de sódio tamponada com 1 g de carbonato de sódio com a finalidade de desagregar as partículas. A solução é agitada durante 15 minutos e colocada em tubos de teste. O diâmetro esférico equivalente das partículas da amostra é calculado através da lei de Stokes, na qual a velocidade de sedimentação depende do tamanho da partícula e da viscosidade do fluido.

5.2.2.4 – Caracterização morfológica

Com a finalidade de analisar morfológicamente as matérias-primas, foram realizadas: Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Microscopia Óptica (MO).

A morfologia do resíduo foi analisada por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando um microscópio Joel, modelo JSM 6460 LV, com espectrômetro de energia dispersiva (EDS) acoplado, da Coppe/UFRJ. As amostras do resíduo bruto, após secagem em estufa a 110°C por 24 horas, foram recobertas com ouro em metalizador Shimadzu modelo IC-50. A microanálise do material foi realizada por EDS para complementar a análise topográfica e identificar os elementos químicos presentes ou partículas de segundas fases.

A microscopia óptica (MO) foi utilizada para observação e análise da morfologia das partículas presentes no resíduo de borracha. A análise foi realizada no resíduo *in natura*, por meio do microscópio confocal Olympus, modelo CGA, no setor de Materiais Superduros do Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV/UENF).

5.2.3- Preparação dos corpos de prova

O objetivo desta etapa foi o de formular uma massa cerâmica compatível para produção de produtos de cerâmica vermelha. Para isso, foi necessário considerar alguns aspectos relevantes, a saber:

- A falta de aporte teórico, com resultados de trabalhos científicos, relacionado à incorporação de resíduo de borracha em cerâmica vermelha;
- Avaliação dos resultados de plasticidade a fim de investigar o efeito das composições na trabalhabilidade da massa cerâmica incorporada com diferentes percentuais 0, 1, 2, 3, 4, 5 e 10% em peso de resíduo de borracha;
- Realização de pré-testes laboratoriais com o intuito de se investigar o efeito dos percentuais e granulometria do resíduo de borracha com melhores respostas nos parâmetros tecnológicos avaliados, quando adicionados à massa cerâmica.

Após as considerações citadas, foram determinadas formulações utilizando massa argilosa com adições de 0 a 2,5% em peso de resíduo de borracha. A limitação do teor de 2,5% ocorreu em função a) dos valores obtidos para o índice de plasticidade de Atterberg; b) da aparência física dos corpos de prova antes e após a queima; c) da resistência mecânica dos mesmos antes e após a queima.

5.2.3.1 - Preparação das formulações

Nesta etapa foi feita a preparação das formulações com incorporação do resíduo de pó de borracha de pneu na massa argilosa nas seguintes concentrações: 0; 0,5; 1; 1,5 e 2% em massa.

A massa cerâmica após ser seca em estufa (110 °C) e desagregada em britador e moinho de bolas foi, assim como o pó de borracha, passada em peneira ABNT 40 mesh (0,425 mm). Todo o material foi pesado de acordo as formulações, previamente calculadas.

As formulações foram homogeneizadas a seco em um moinho de bolas durante 20 minutos e posteriormente as composições foram armazenadas em sacos plásticos.

A Tabela 14 mostra as formulações preparadas com as composições da massa cerâmica e do resíduo pó de borracha.

Tabela 14: Composição das formulações preparadas.

Mistura (M)	Massa Argilosa (% em massa)	Pó de Borracha (% em massa)
M 0	100,0	0,0
M 0,5	99,5	0,5
M 1	99,0	1,0
M 1,5	98,5	1,5
M 2	98,0	2,0

5.2.3.2 - Plasticidade

A plasticidade foi obtida de acordo com as normas da ABNT NBR-7180 (ABNT, 1984). O índice de plasticidade (IP) de Atterberg é dado por:

$$IP = LL - LP \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde o limite de plasticidade (LP) é o teor de água, expresso em % do peso de pasta seca a 110°C, acima do qual a massa argilosa pode ser moldada em cilindros, com cerca de 3 a 4 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento. O limite de liquidez (LL) é o teor de água expresso em % do peso de pasta seca a 110 °C, acima do qual a pasta flui como líquido quando ligeiramente agitada. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LECIV/UENF).

5.2.3.3 - Processamento dos corpos de prova

As formulações que já haviam sido preparadas passaram por umidificação com 8% de água (em massa) e após pesagem (cerca de 160 g) foram preparados 16 corpos de prova com prensagem uniaxial a 20 MPa nas dimensões 114,0 x 25,0 x 11,0 mm. Após prensagem, os corpos de prova foram secos em estufa por 24 horas.

Para a sinterização dos corpos de prova foi utilizado um forno laboratorial elétrico com taxa de aquecimento de 2 °C/min com temperaturas de patamar de 850, 950 e 1050 °C e foram mantidos na temperatura patamar por 3 horas e resfriados por convecção natural, desligando-se o forno.

Antes da sinterização foi determinada a densidade relativa a seco das peças e após foram determinadas absorção de água, retração linear, porosidade aparente e os testes de resistência mecânica.

5.2.4 – Determinação de propriedades físicas e mecânicas

5.2.4.1 - Absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado pelo método da fervura. Os corpos de prova queimados foram inicialmente secos em estufa a 110 °C até peso constante, sendo em seguida, resfriados e pesados.

Para esse ensaio colocou-se os corpos de prova em recipientes com água fervente por 2 horas, e o resfriamento foi realizado com a imersão dos mesmos em água. Posteriormente, retirou-se a água superficial de cada peça, registrando-se novamente a massa. A absorção de água foi calculada de acordo com a Equação 3:

$$AA (\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde:

AA = absorção de água (%);

M_u = massa do corpo de prova queimado e úmido (g);

M_s = massa do corpo de prova queimado e seco (g).

5.2.4.2- Densidade relativa a seco

Para a determinação da densidade relativa das peças secas foi utilizado o método dimensional, de acordo com a norma ASTM C 373-72 (1977). Foram realizadas medições do comprimento dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro digital marca MITUTOYO (resolução 0,01 mm) e as massas destes com o auxílio de uma balança digital marca Shimadzu modelo S3000 (resolução 0,01 g). Com o auxílio de um picnômetro foi determinado a densidade real da massa. O cálculo da densidade relativa a seco dos corpos de prova foi realizado com o auxílio da Equação 4

A densidade aparente foi calculada utilizando a seguinte expressão:

$$\rho_{relativa} = \frac{\rho_{ap}}{\rho_{real}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde: $\rho_{ap} = \frac{M}{V}$

ρ_{ap} = densidade aparente da peça seca (g/cm^3);

M = massa (g) e

V = volume (cm^3) dos corpos de prova secos.

5.2.4.3- Porosidade aparente

A determinação da porosidade aparente (PA) dos corpos cerâmicos foi feita de acordo com a norma C373-88 (ASTM). Os corpos de prova tiveram suas massas aferidas após secagem e queima. Para complementar o ensaio utilizou-se a expressão dada por:

$$PA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

PA – porosidade aparente;

M_u – massa dos corpos cerâmicos úmidos (g);

M_s – massa dos corpos cerâmicos secos (g);

M_i – massa do corpo cerâmico imerso em água, que será medida pelo método da balança hidrostática (g).

5.2.4.4- Retração linear de queima

A retração linear dos corpos de prova queimados foi realizada com auxílio de um paquímetro de resolução de 0,01 mm. A retração linear foi calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$RI = \frac{L_0 - L}{L_0} \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

R_L = retração linear (%).

L_0 = comprimento do corpo de prova seco a 110 °C (mm).

L = comprimento do corpo de prova queimado na temperatura de patamar (mm).

5.2.4.5- Tensão de ruptura à flexão

A resistência mecânica dos corpos de prova foi determinada em conformidade com a norma ASTM C674-77 (1977), por meio de tensão de ruptura à flexão em máquina de ensaios universal, da marca Instron, modelo 5582 (LAMAV/UENF). A velocidade de aplicação da carga foi 0,5 mm/min.

A tensão de ruptura à flexão (σ) foi determinada, em três pontos, de acordo com a norma ASTM C674-77 (ASTM, 1977b), calculada pela seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:

σ é a tensão de ruptura à flexão (MPa);

P é a carga aplicada no corpo de prova no momento da ruptura (Newton);

L é a distância entre os cutelos de apoio (mm);

b é a largura do corpo de prova (mm);

d é a espessura do corpo de prova (mm).

5.2.4.6 - Cálculo do coeficiente de variação

Em relação ao coeficiente de variação, apresentado nas figuras, deve-se ressaltar que é um valor calculado em relação à variância do desvio padrão das amostras. A equação abaixo foi utilizada para realização do cálculo:

$$C_V = \frac{S}{\bar{X}} \quad (\text{Eq. 8})$$

C_V = coeficiente de variação

S = desvio padrão amostral

\bar{X} = média das amostras

5.2.5 - Análise microestrutural e de fase dos corpos de prova

Os corpos de prova foram ainda analisados quanto às propriedades microestruturais e investigadas as fases cristalinas presentes na cerâmica após a queima através de microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia óptica (MO) e difração de raios X (DRX).

Análises de MEV e MO foram realizadas nos equipamentos descritos no item 5.2.2.4 de forma que por MO foi possível observar a região de fratura das cerâmicas queimadas e por MEV após cobertura da amostra com uma fina camada de platina e ouro foi possível fazer o mapeamento dos compostos presentes.

A DRX foi empregada com a finalidade de determinar as fases cristalinas das cerâmicas queimadas, utilizando o mesmo equipamento e procedimento descritos no item 5.2.2.2.1.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

6.1.1 – Massa cerâmica

6.1.1.1- Composição química

A Tabela 15 apresenta a composição química da massa cerâmica. Observa-se que a composição química predominante é dada pela presença de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) os quais estão em sua maior parte combinados formando os aluminossilicatos como por exemplo, a mica muscovita e a caulinita (SANTOS,1989).

Nota-se que o teor de óxidos corantes é elevado, principalmente o Fe_2O_3 responsável por conferir a coloração vermelha ou amarelada na maioria das argilas, reduz a plasticidade, mas também diminui a retração e facilita a secagem.

Já os óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) apresentam baixa concentração o que indica a ausência de carbonatos nessa matéria-prima e de acordo com Dias (2011), esses óxidos estão presentes na estrutura da mica muscovita e montmorilonita.

Os óxidos de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O) são fundentes e conferem resistência mecânica quando sinterizados entre 950 e 1000 °C, segundo Ribeiro(2010), nas argilas de Campos dos Goytacazes/RJ estes óxidos encontram-se na composição de mica muscovita e montmorilonita, por exemplo.

É observado uma considerável perda ao fogo (PF) com 13,07%, que está associada a diminuição de peso, até um valor constante, que indica uma perda de material devido ao aumento de temperatura, basicamente indica o teor de matéria orgânica presente na massa cerâmica e à água intercalada (SANTOS, 1989). Mais adiante será visto que isso foi comprovado na análise termogravimétrica (TGA).

Tabela 15 - Composição química da massa cerâmica.

Elemento	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	K_2O	CaO	MgO	P_2O_5	MnO	Na_2O	PF
Teor(%)	45,52	28,67	8,05	1,35	1,47	0,24	0,87	0,15	<0,05	0,35	13,07

6.1.1.2 – Difração de raios X (DRX)

A Figura 38 apresenta o gráfico de DRX da massa cerâmica utilizada neste trabalho. Podem ser observados picos de difração predominantes correspondentes à caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), quartzo (SiO_2), gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), mica muscovita ($\text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e presença de montmorilonita $[(\text{Ca}, \text{Na})_{0,3}\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10} \cdot 2(\text{H}_2\text{O})]$.

O quartzo ou sílica livre é um mineral encontrado naturalmente nas argilas e solos. Considerado uma impureza, atua como material inerte o que segundo Santos (1989), diminui a plasticidade do material e alguns efeitos nocivos devido às suas mudanças de fase cristalina com a elevação da temperatura.

Observa-se a presença da mica muscovita que apresentando tamanho de partícula reduzido pode atuar como fundente devido à presença de óxidos alcalinos; é também um mineral com hábito lamelar e como observado por Vieira *et al.* (2008), pode ocasionar o aparecimento de defeitos nas peças cerâmicas.

A presença de gibbsita indica que nem toda a alumina (Al_2O_3) esteja na estrutura dos argilominerais como observado por Oliveira e Holanda (2004) e Vieira e Monteiro (2004). Ainda segundo estes, a gibbsita é um mineral que contribui para aumentar a perda ao fogo, a refratariedade das argilas e a perda de massa durante a queima.

Nessa massa cerâmica foram identificados picos de difração de baixa intensidade que indicam traços de montmorilonita, comum nas argilas da região de Campos. A montmorilonita é um argilomineral altamente plástico e que apresenta uma grande tendência de reidratação; segundo Ribeiro (2010), em pequenas quantidades, pode alterar significativamente o índice de plasticidade da argila, o que pode acarretar problemas de processamento.

Foram também identificados picos que indicam a presença de anatásio (TiO_2), além de picos de baixa intensidade indicando presença de sepiolita ($\text{Mg}_{18}\text{Si}_{24}\text{O}_{60}(\text{OH})_{12} \cdot (\text{OH}_2)_8 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$). Segundo Coelho e Santos (2007), a sepiolita é um argilomineral de ocorrência rara que pode absorver 2,5 vezes seu peso em água, propriedade responsável pela grande plasticidade do sistema argila – água.

As fases cristalinas identificadas no difratograma (Figura 38) confirmam as composições químicas apresentadas na Tabela 15.

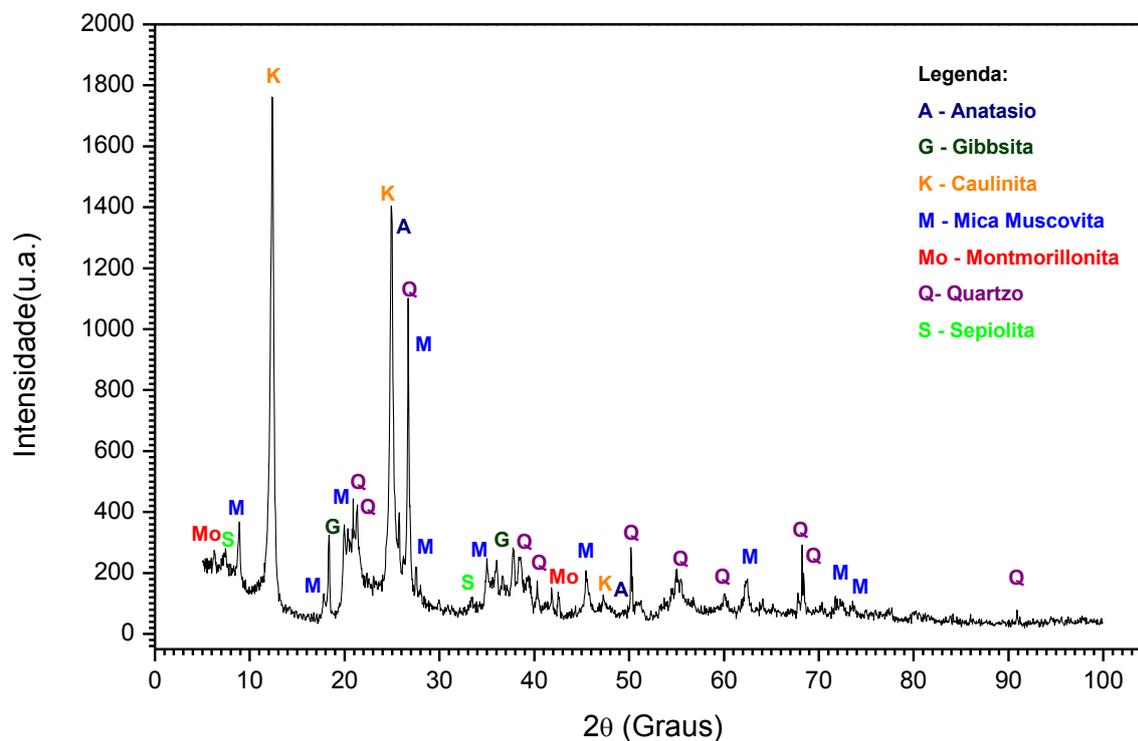


Figura 38- Difratograma de raios X da massa cerâmica.

6.1.1.3 – Granulometria

A Figura 39 apresenta a curva de distribuição de tamanho de partículas da massa cerâmica após destorroamento e peneiramento em malha de 10 mesh (abertura de 2 mm). Observa-se que a “fração argila” é de 51,9% em massa que está associada com tamanho de partícula inferior a 2 μm e confere à massa cerâmica plasticidade em mistura com água. O teor de silte é de 29,1% partículas entre 2 e 20 μm e o teor de areia é de 19% onde as partículas são maiores que 20 μm . A densidade real dessa massa, medida por picnometria, é de 2,63 g/cm^3 .

Segundo Abajo (2000) e Santos (1989), o elevado percentual de argilominerais no intervalo de tamanho de partícula da “fração argila” pode fornecer à massa cerâmica maior plasticidade em mistura com água.

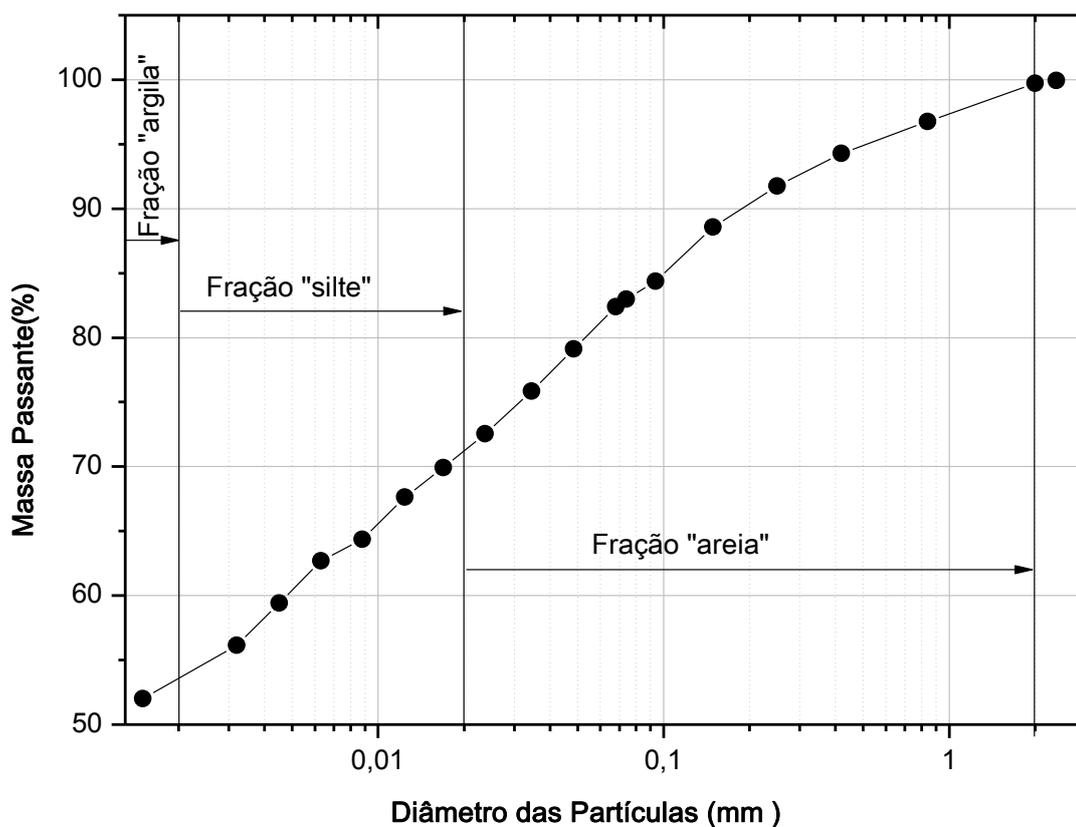


Figura 39: Distribuição do tamanho de partículas da massa cerâmica.

6.1.1.4 – Comportamento térmico

As transformações térmicas do processo cerâmico ocorrem segundo Toledo (2003) , nos seguintes níveis: evaporação da água livre, desidroxilação, oxidação, vitrificação e sinterização da peça cerâmica.

O comportamento térmico da massa cerâmica foi investigado através da análise termogravimétrica (TGA), com o intuito de verificar a variação de massa em função da temperatura de queima dessa massa.

A curva de análise térmica da massa cerâmica, observada na Figura 40, mostra uma perda inicial de massa, em $T < 100$ °C, da ordem de 2%, devido a evaporação de águas de plasticidade, de amassamento e de capilaridade ou águas não ligadas, presentes nos poros. A seguir entre 250 e 320 °C ocorre perda de massa de aproximadamente 2,8%, o que segundo Vieira *et al.* (2000) pode estar relacionado provavelmente a carbonização de matéria orgânica e/ou perda de

grupos de OH^- provenientes de hidróxidos. Acima de 400 °C ocorre a maior perda de massa, na ordem de 9,3% isso pode ser explicado segundo VIEIRA *et al.*, (2000) pela dissociação da água de constituição dos argilominerais ou pela desidroxilação, principalmente da caulinita (SANTOS, 1989) formando a fase amorfa metacaulinita e ainda segundo Toledo(2003) nesta etapa os gases formados a partir de outros materiais são liberados.

Estes resultados confirmam a PF(13,07%) proveniente da matéria orgânica e estão de acordo com Sodré (2001) e Vieira e Monteiro (2003), confirmando a predominância da caulinita, determinada em análise de difra o de raios X, como o principal argilomineral presente nessa massa cerâmica. A perda total de massa foi da ordem de aproximadamente 14%.

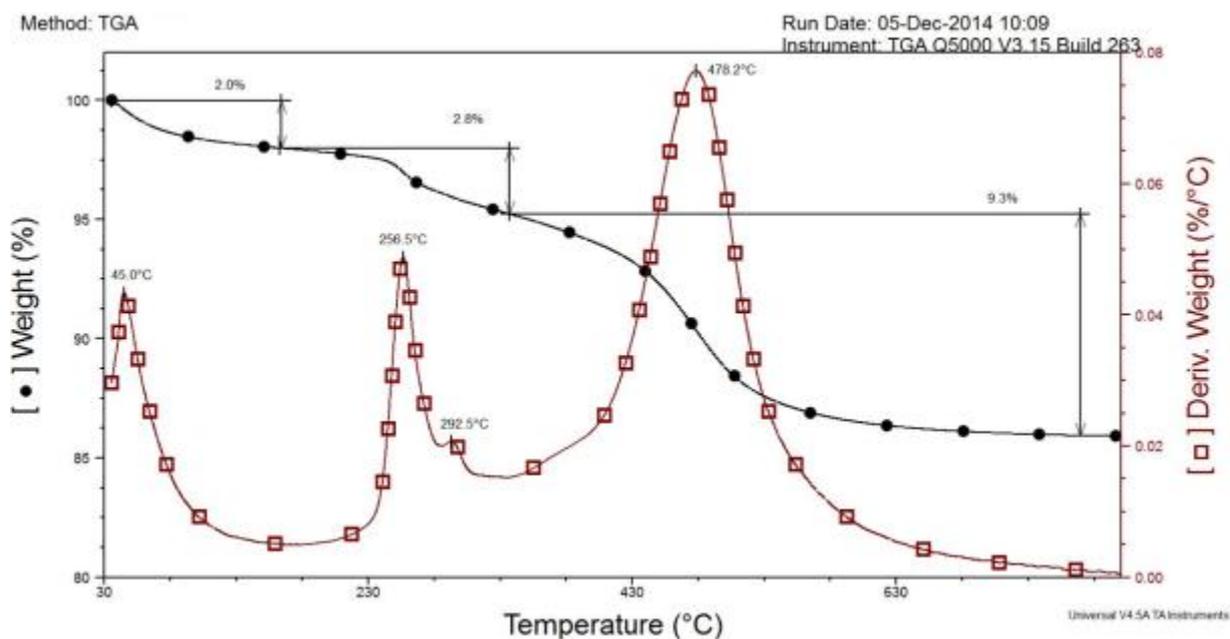


Figura 40: Curva termogravimétrica (TGA) da massa cerâmica.

6.1.1.5 – Morfologia

A Figura 41 mostra as micrografias obtidas por MO da massa cerâmica. As micrografias correspondem às partículas com tamanho inferiores a 0,84 mm, passantes em peneira, de 20 mesh, utilizada neste trabalho. Nota-se uma variedade de tamanho de partículas como no trabalho de Ferreira e Fernandes (1999) e Menezes (2002) que abordaram o efeito de partículas com morfologia irregular em materiais cerâmicos. As micrografias mostram partículas, irregularidade e colora o

amarelada, indicando a presença do ferro na estrutura da caulinita, fato também observado por Freitas (2009). Nota-se em A, a presença de partículas de mica indicadas por setas, em B, quartzo, também indicadas por setas, e partículas escuras (destacadas) que podem ser minerais ferromagnesianos.

Segundo Menezes *et al.* (2007), um elevado tamanho de partículas pode dificultar o comportamento de densificação durante a queima acrescentando a absorção de água e atenuando a resistência dos corpos cerâmicos.

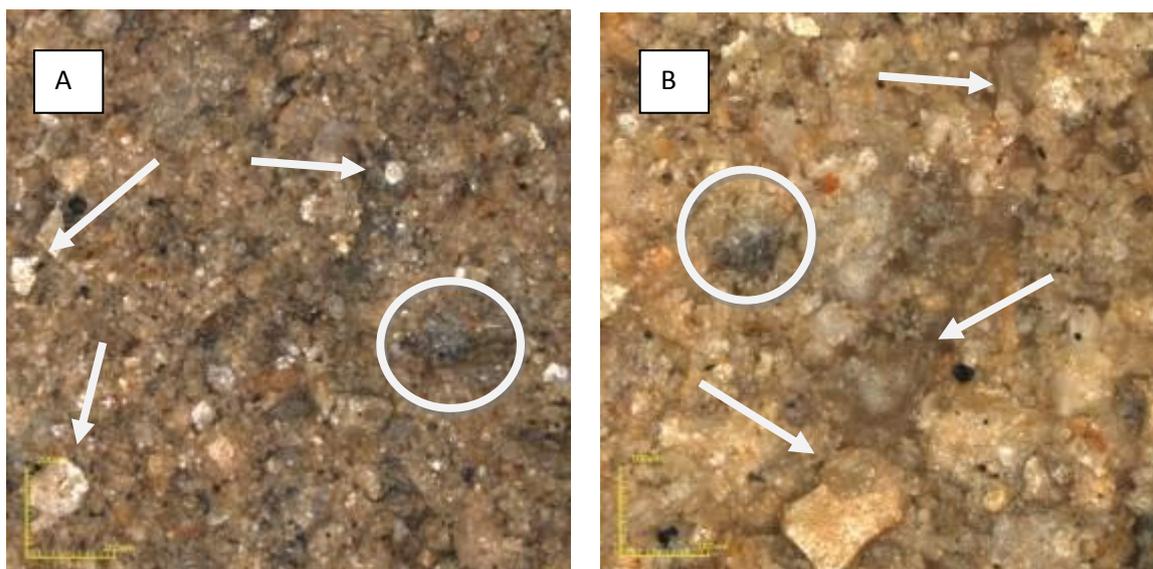


Figura 41: Micrografias obtidas em microscópio confocal sob aumento de x216(A) e x430(B) das partículas da massa cerâmica.

6.1.2 – Pó de borracha

6.1.2.1 – Composição química

Ao analisar a Tabela 16, com os resultados da análise química elementar do pó de borracha, verifica-se a existência de metais pesados como o chumbo (Pb), cromo (Cr) e cádmio (Cd), embora estes não apresentem valores muito expressivos. Nota-se que o magnésio (Mg), alumínio (Al), cálcio (Ca) e enxofre (S) têm uma concentração considerável e a presença destes elementos justificam a ocorrência e identificação dos picos de raios X, apresentados na próxima seção. Os resultados encontrados estão de acordo com Canova *et al.* (2007), que investigou a utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa.

A alta concentração de carbono(C) apresentada nessa análise química também foi verificada por Canova *et al.* (2007), corroborando com os picos de raios X na identificação do poliestireno (C_8H_8)_n e do próprio carbono. Cabe ressaltar que

Massarotto (2007), identificou carbonato de cálcio (CaCO_3) no resíduo de borracha, também do tipo SBR, utilizado em seu trabalho, fato não verificado nesta análise.

Tabela 16 - Composição química do pó de borracha.

Composição Química Elementar ($\mu\text{g.g}^{-1}$)									
Elementos concentração Padrão	Al	Ba	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb
	396.15	493.40	214.43	267.71	327.39	259.94	257.61	231.60	220.35
Percentual	8	2,5	0,09	0,8	2,4	28	2,6	0,7	2,4
Elementos concentração Padrão	Ti	V	Zn	P	S	Ca	K	Mg	Na
	336.12	311.07	213.85	214.91	181.97	317.93	769.89	279.55	589.59
Percentual	1,6	0,4	18,2	8,8	41	3	3,4	8	6,2
Carbono total: 75,8 %									

6.1.2.2 - Difração de raios X

A Figura 42 corresponde ao difratograma de raios X da fração abaixo de 74 μm (200 mesh) do pó de borracha. É possível observar o caráter amorfo do difratograma, cadeias poliméricas amorfas, devido à presença de grande quantidade de carbono. As fases cristalinas encontradas foram poliestireno, sulfato de chumbo, ferro, carbono e sulfeto de magnésio com presença de portlandita, zircita e sulfeto de alumínio e zinco. Deve-se ressaltar que, em consequência de uma composição química complexa, existem outras fases cristalinas, porém de difícil detecção devido à baixa intensidade e sobreposição dos picos.

Segundo Gallato *et al.* (2009), a presença de enxofre e sulfeto de magnésio podem levar à formação de eflorescências nas peças cerâmicas, pois esses compostos podem reagir e solubilizar, depositando-se nas superfícies dos corpos de prova. De acordo com Borlini *et al.* (2005), a presença de óxidos e sulfatos de magnésio podem induzir reações endotérmicas durante o processo de sinterização.

Os picos identificados pelo difratograma de raios X corroboram com os resultados da composição química do resíduo de borracha.

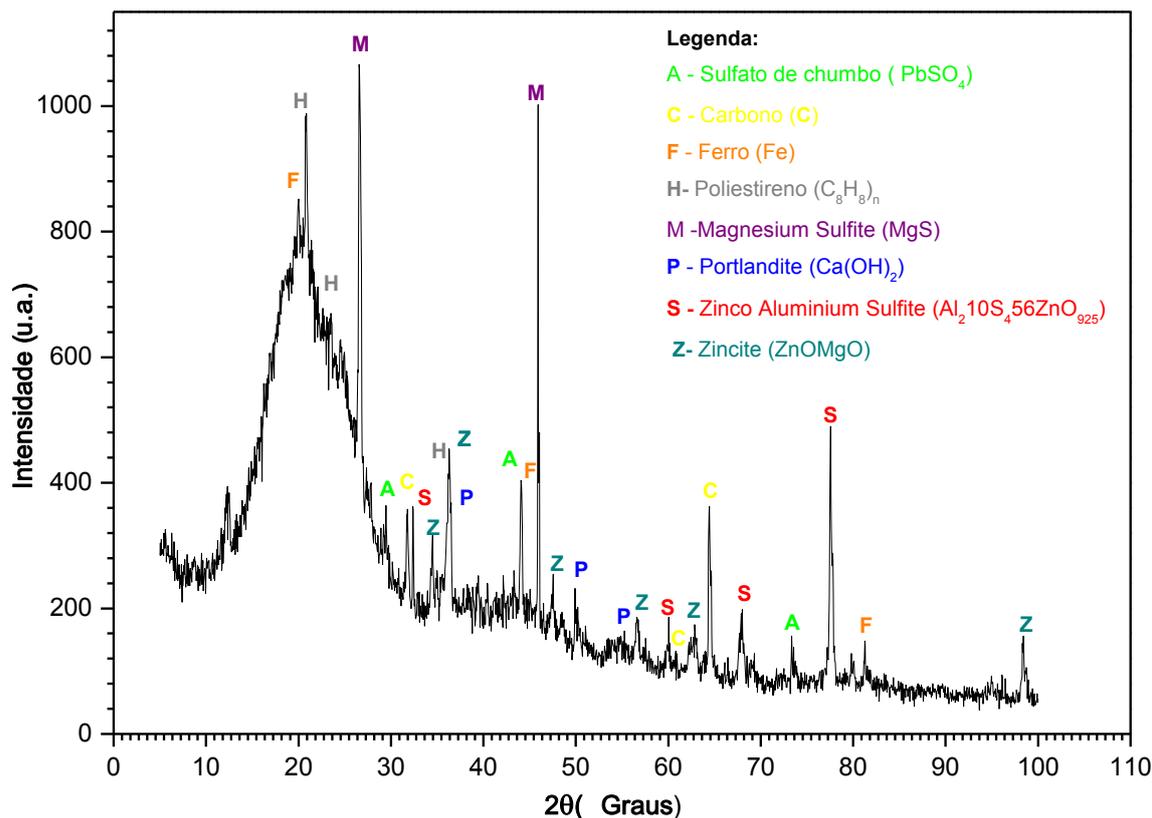


Figura 42: Difratoograma de raios X do pó de borracha.

6.1.2.2.1 – Poder calorífico

O valor do poder calorífico superior (PCS) do resíduo pó de borracha é de 9281 kcal/kg. Segundo Protásio *et al.* (2010), os valores de poder calorífico estão diretamente relacionados com as porcentagens de carbono do resíduo, corroborando com o resultado encontrado (Tabela 16), de 75% de carbono total para o pó de borracha. O valor de PCS encontrado neste trabalho está de acordo com os valores descritos por Dourado (2011), Lagarinhos *et al.* (2008) e Dondi *et al.* (1997b). A presença de elevado percentual de carbono indica que a combustão do material ocorre rapidamente e a liberação de energia durante o processo de queima torna o pó de borracha um resíduo importante para o processo de queima da cerâmica pois, durante esse processo há economia de energia e menor tempo de queima.

6.1.2.3 – Granulometria

A determinação da granulometria do pó de borracha foi feita a partir da quantificação de matéria que conseguiu ultrapassar as malhas de diferentes peneiras. A Figura 43 mostra graficamente o resultado do processo de peneiramento

do resíduo. É importante ressaltar que a técnica aqui empregada pode não ter sido adequada para determinar o tamanho real das partículas, o que pode ter ocasionado apenas a identificação dos aglomerados. Pela análise da Figura 43 observa-se a massa passante em porcentagem e o diâmetro das partículas representantes do resíduo pó de borracha. Nota-se que cerca de 95% das partículas do resíduo apresentam entre 0,1 e 1 mm, granulometria essa também identificada por Segre (2000) e Oda (2001) na incorporação de resíduos de pneus em cimento e cimento asfáltico, respectivamente. Essa fração granulométrica está concentrada na “fração areia” ($>20\mu\text{m}$) o que segundo Melchiades *et al.* (1997), pode reduzir algumas propriedades das peças cerâmicas como resistência à flexão a seco ou após a queima.

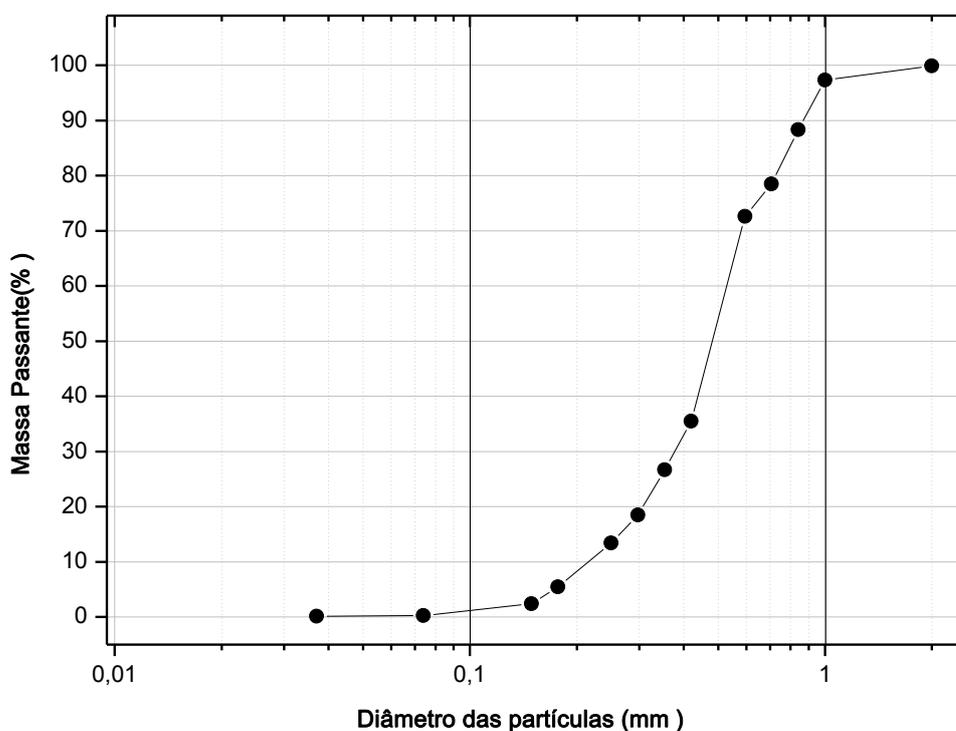


Figura 43: Curva granulométrica do resíduo pó de borracha.

6.1.2.4 – Comportamento térmico

6.1.2.4.1 – Análise termogravimétrica (TGA)

A Figura 44 apresenta as curvas da análise termogravimétrica (TGA) do resíduo pó de borracha de pneus. Foram utilizados 2,9380 mg de resíduo, atmosfera de N_2 na faixa de temperatura de 0 a 800 °C. Pode ser observado na figura que o

resíduo começa a perder massa por volta de 175 °C, evento também observado por Canova *et al.* (2007); por volta de 361,4 °C ocorre maior liberação de energia (pico exotérmico) e conseqüentemente a maior perda de massa (56.2%). Esse fato pode ser explicado pela queima do carbono e materiais voláteis que liberam grande quantidade de calor. Também pode ser percebido outro pico exotérmico por volta de 697,0 °C e nova perda de massa (37,7%), o que pode estar associado à degradação de sulfetos de zinco e alumínio presentes no material, já identificados no DRX e na análise química. O resíduo apresentou uma perda de 95% de sua massa total.

A liberação de energia durante o processo de queima, representada pelo alto poder calorífico, torna o pó de borracha um resíduo importante para o processo de queima pois, durante esse processo há economia de energia e menor tempo de queima, o que é um atrativo para os ceramistas, maior produtividade e lucratividade em relação ao gasto energético.

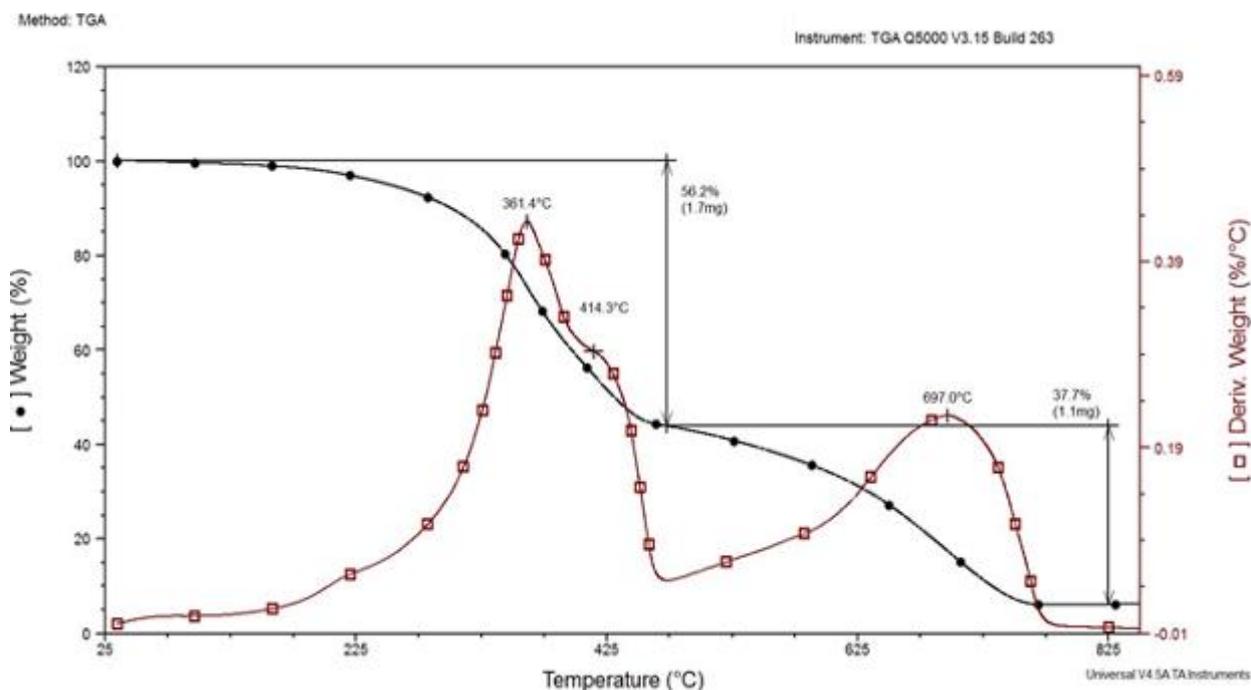


Figura 44 - Curvas de análise termogravimétrica (TGA) do pó de borracha.

6.1.2.4.2 – Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A Figura 45 apresenta a caracterização térmica por calorimetria exploratória diferencial (DSC/TG), realizada principalmente para verificar a transição térmica e o comportamento de degradação do resíduo. A taxa de aquecimento escolhida foi de 10 °C/min com variação de 0 a 900 °C, a massa da amostra foi 13,6 mg e as

análises foram executadas em atmosfera a ar. Os resultados são apresentados na forma de microvolts (μV) versus a temperatura. Analisando o gráfico da figura nota-se que por volta de 70°C há um pico endotérmico o que caracteriza a perda de umidade do material, associado a uma pequena perda de massa. Verifica-se a presença de três picos exotérmicos correspondentes aos estágios de degradação dos hidrocarbonetos do resíduo. Pode ser observado que o resíduo apresenta um pico intenso em 306°C seguido por um menos intenso em 457°C fato relacionado à decomposição do polímero. Segundo Brazier (1981) e Dutra *et al.* (2004), a origem dos picos está na despolimerização dos segmentos polibutadiênicos do polímero (SBR), originando predominantemente butadieno e vinilciclo-hexeno, ocorrendo degradação simultânea do estireno e butadieno no pico mais intenso, de 500 a 600°C . Por volta de 457°C nota-se um pico exotérmico o que de acordo com Dias (2008) corresponde à decomposição térmica da portlandita. Existe a possibilidade de massa residual, uma vez que o ponto de fusão do sulfeto de magnésio (MgS) é acima de 2000°C (Holleman,2001), contudo, não se pode precisar a degradação total do resíduo para a faixa de temperatura utilizada. A ocorrência dos picos exotérmicos corrobora os valores de elevado percentual de carbono (Tabela 16) e a elevada quantidade de energia liberada na combustão do resíduo, seu poder calorífico.

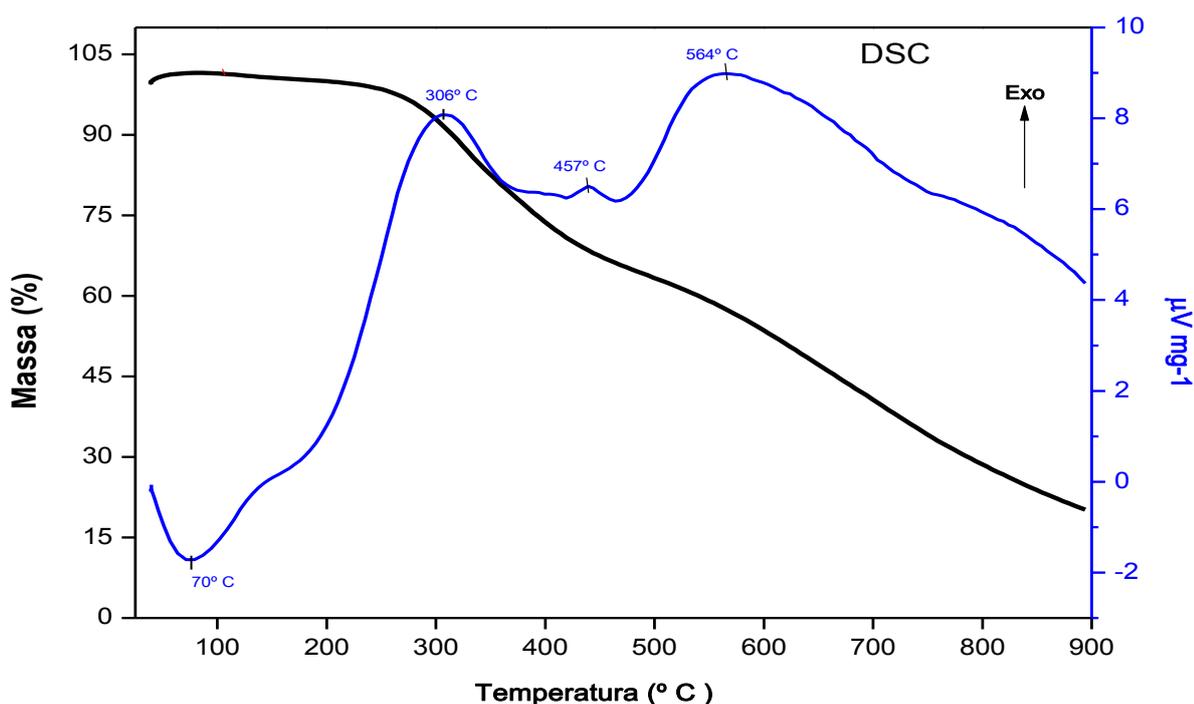


Figura 45: Curvas de DSC/TG do pó de borracha

6.1.2.5 – Morfologia

As imagens da Figura 46 mostram os aspectos morfológicos do pó de borracha. São observadas partículas de tamanho variado e formato irregular.

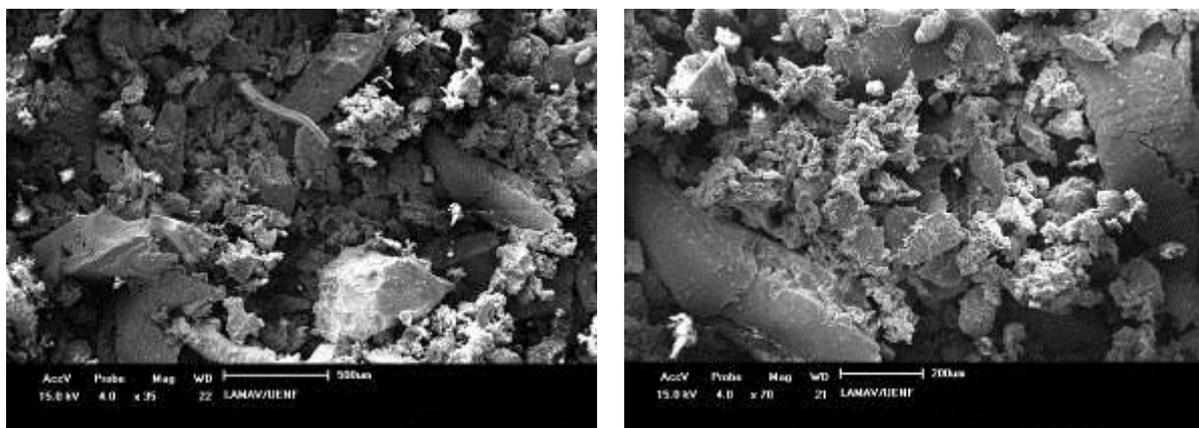


Figura 46 - Micrografias obtidas por MEV do pó de borracha.

No mapeamento (Figura 47) realizado por microscopia eletrônica de varredura (MEV), observando os picos, é notável a presença de carbono (C), oxigênio (O), zinco (Zn), silício (Si), enxofre (S) e ferro (Fe); observação também feita por Monteiro e Mainier (2008), corroborando com a análise química e difratograma de raios X. Os picos de platina (Pt) presentes no mapeamento são resíduos do processo de metalização utilizado para realização do ensaio.

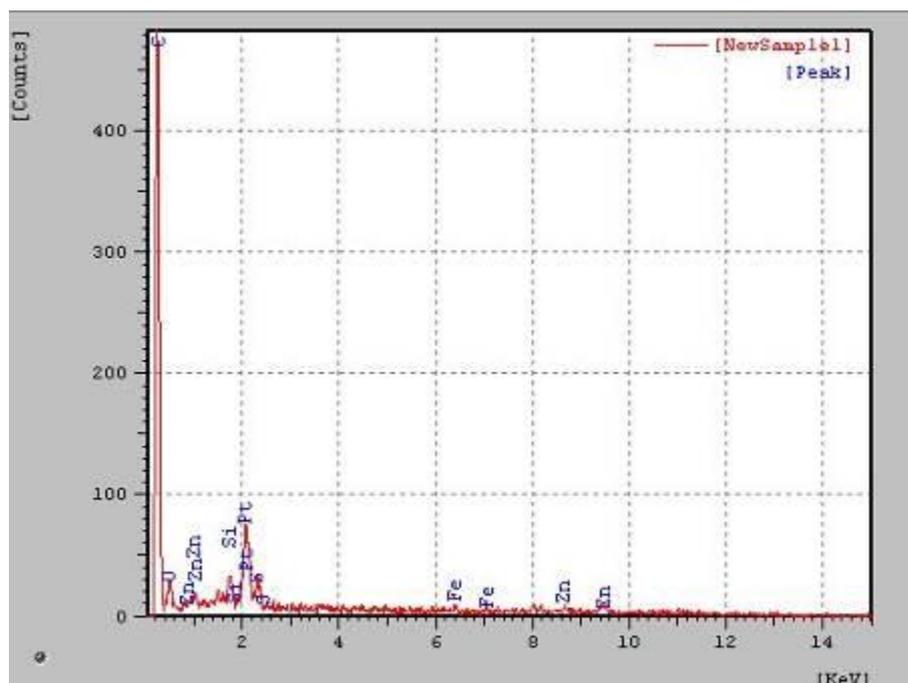


Figura 47 - Mapeamento obtido no MEV do pó de borracha.

6.2 - Caracterizações das composições

6.2.1 - Plasticidade

A Tabela 17 apresenta os limites de Atterberg das formulações preparadas neste trabalho. Segundo Vieira e Monteiro (2004), os limites de plasticidade (LP) e o índice de plasticidade (IP) indicam, respectivamente, o valor mínimo e o máximo da quantidade de água necessários para a conformação das peças. O IP indica a faixa de consistência plástica, determinado pela diferença entre o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP). Pode-se observar na Tabela 17 que a maior parte dessas formulações está dentro da faixa aceitável de 18 a 30% em limite de plasticidade (LP) e que não ocorre significativa variação entre estes valores, de 28 a 32%. É possível observar que a formulação M0, massa cerâmica, e M0,5 não estão dentro dos limites de plasticidade e de IP, já a formulação M1 encontra-se no limite do LP e as demais estão dentro dos limites. Em todas as formulações, os índices de plasticidade encontram-se com valores superiores aos 10%, o que de acordo com Vieira e Monteiro (2004), é recomendável como mínimo, mas a incorporação do resíduo não melhorou a plasticidade e trabalhabilidade dessa massa cerâmica.

Tabela 17: Limites de Atterberg das formulações/composições

Limites de Atterberg	Formulações (% de resíduo em massa)				
	M0	M0,5	M1	M1,5	M2
LP(%)	32,3	31,8	30,0	28,4	28,1
LL(%)	55,9	56,1	56,6	55,7	52,4
IP(%)	23,6	24,3	26,6	27,3	24,3

LP: Limite de Plasticidade; LL: Limite de Liquidez; IP: Índice de Plasticidade.

Uma das ferramentas utilizadas para orientar no estudo da composição da granulometria de massas cerâmicas é o diagrama de Winkler, demonstrado na Figura 48. Este diagrama permite a recomendação para fabricação de determinados tipos de produtos de cerâmica vermelha, assim como possibilita proceder os ajustes necessários de uma composição granulométrica.

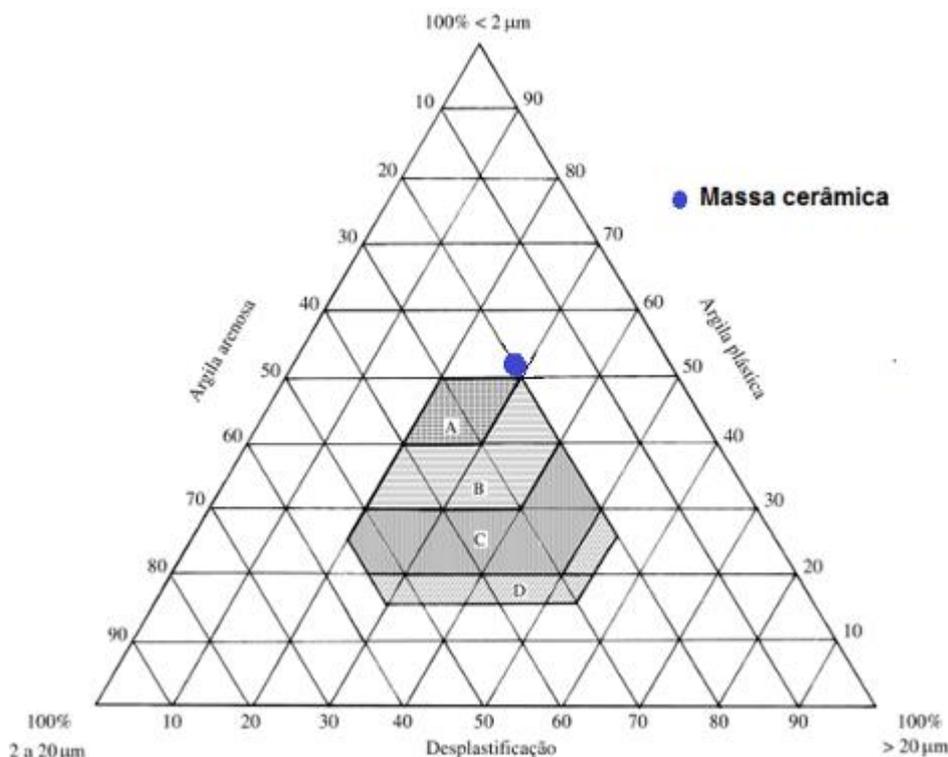


Figura 48: Diagrama de Winkler (PRACIDELLI E MELCHIADES, 1997) com as localizações das matérias-primas.

De acordo com Pracidelli e Melchiades (1997) e Vieira *et al.* (2005), a introdução de materiais não plásticos altera a granulometria das massas cerâmicas, uma vez que as partículas constituintes apresentem tamanhos consideravelmente maiores que a massa cerâmica, como é o caso do pó de borracha com maior porcentagem de grãos na “fração areia” ($> 20 \mu\text{m}$). Não é possível dizer que o resíduo pó de borracha atua como material não plástico, mas sua adição à massa cerâmica reduz a interação argila-água ocasionando pontos de descontinuidade nas peças, ainda segundo Pracidelli e Melchiades (1997), esses pontos produzem poros que permitem a passagem da água do interior até a superfície da peça facilitando e reduzindo o ciclo de secagem.

No diagrama de Winkler, Figura 48, é possível observar que a massa cerâmica encontra-se fora da região apropriada para a fabricação de materiais de qualidade com dificuldade de produção (A), telhas e capas (B), tijolos furados (C) e tijolos maciços (D).

Entretanto, não se pode concluir que a incorporação desse resíduo na massa cerâmica seja benéfica, uma vez que apresenta elevada granulometria ($> 20 \mu\text{m}$) o que segundo Oliveira *et al.* (2004), pode atuar como material não plástico,

reduzindo a fração argila dessa massa cerâmica e conseqüentemente sua plasticidade, episódio também não comprovado pelo índice de consistência de Atterberg (Tabela 17).

6.2.2 - Características físicas das formulações

A Figura 49 apresenta uma fotografia dos corpos de prova secos. É possível observar o aumento de pontos escuros nas peças, sobretudo, com 2% de incorporação do pó de borracha. Estes pontos evidenciam a incorporação do pó, na massa cerâmica. Nota-se certa uniformidade dos pontos sobre os corpos de prova, o que comprova a homogeneização das formulações durante a etapa de preparação das amostras.

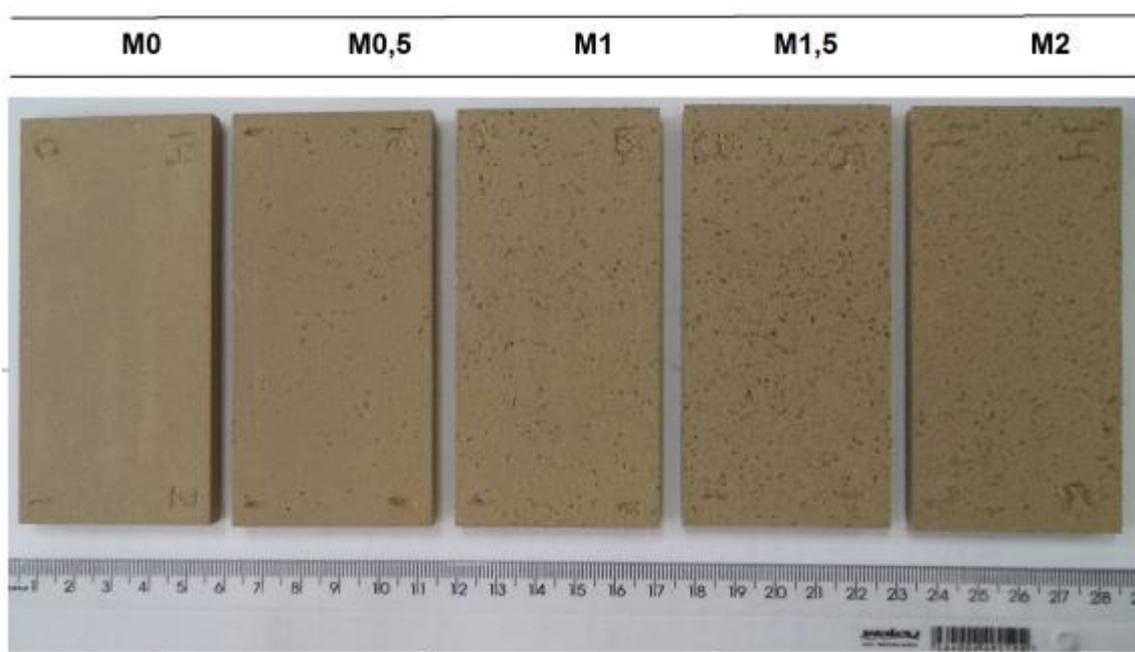


Figura 49: Corpos de prova das formulações secas.

As Figuras 50 e 51 mostram as micrografias obtidas por MO das formulações M0 e M0,5. Na micrografia de M0 (Figura 50) destaca-se a presença de partículas de quartzo e mica; a região escura pode ser minerais ferromagnesianos presentes na massa cerâmica. Pela análise das micrografias (Figura 51), é possível observar a presença de pontos escuros, em destaque, que evidenciam as partículas de borracha no corpo de prova. Nota-se ainda partícula de quartzo, indicada pela seta.

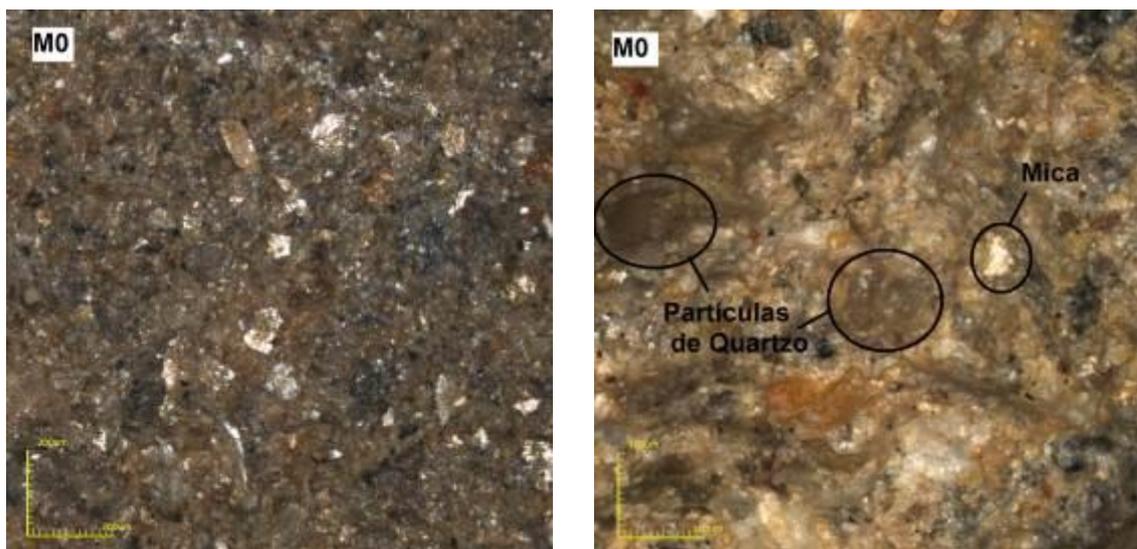


Figura 50: Micrografias obtidas em microscópio confocal, sob aumento de x216 e x430 da formulação M0.

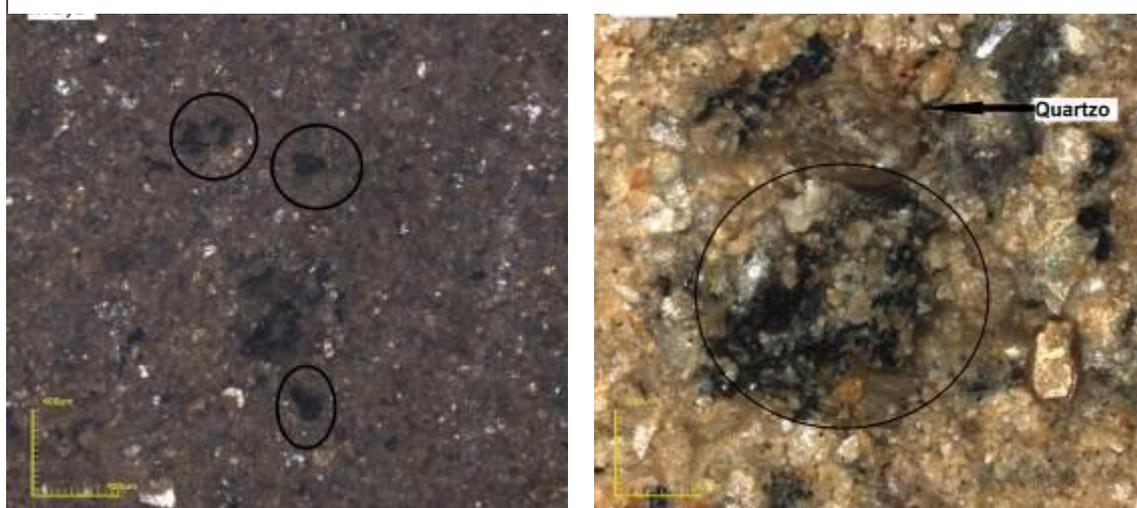


Figura 51: Micrografias obtidas em microscópio confocal, sob aumento de x216 e x430 da formulação M0,5.

A Figura 52 apresenta a fotografia dos corpos de prova queimados. É possível observar manchas amareladas em alguns corpos de prova, com a incorporação do pó de borracha, queimados nas temperaturas de 850 e 950 °C. Essas manchas estão associadas ao aprisionamento dos gases, liberados durante o processo de queima da borracha. Já as peças queimadas a 1050 °C apresentam coloração mais avermelhada. A ocorrência das manchas é proveniente da disposição das peças no forno para queima, ou seja, a forma 'como os corpos de prova foram arranjados no forno levou ao aprisionamento dos gases entre um corpo de prova e outro.

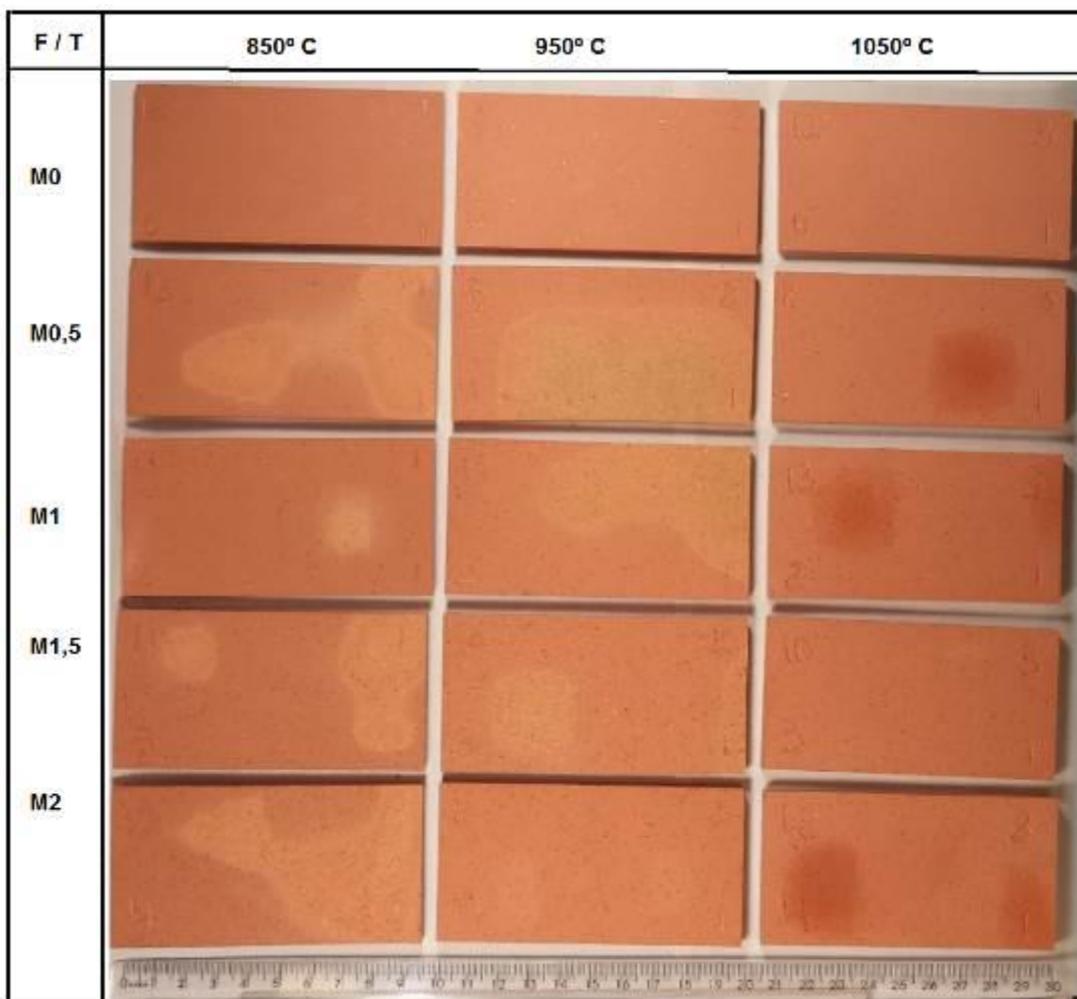


Figura 52: Corpos de prova das formulações queimadas nas temperaturas 850, 950 e 1050 °C.

6.2.3 - Densidade aparente

A Figura 53 apresenta a densidade aparente a seco das formulações. É possível observar que de 0% a 0,5% de pó de borracha incorporado à massa cerâmica, praticamente não ocorreu alteração da massa específica a seco. Para as incorporações acima de 1%, principalmente na incorporação acima de 1.5%, a massa específica a seco diminui gradualmente, indicando que a incorporação do pó de borracha alterou o empacotamento, da massa cerâmica durante a conformação dos corpos de prova. Este fato pode ocasionar defeitos na peça como, por exemplo, trincas.

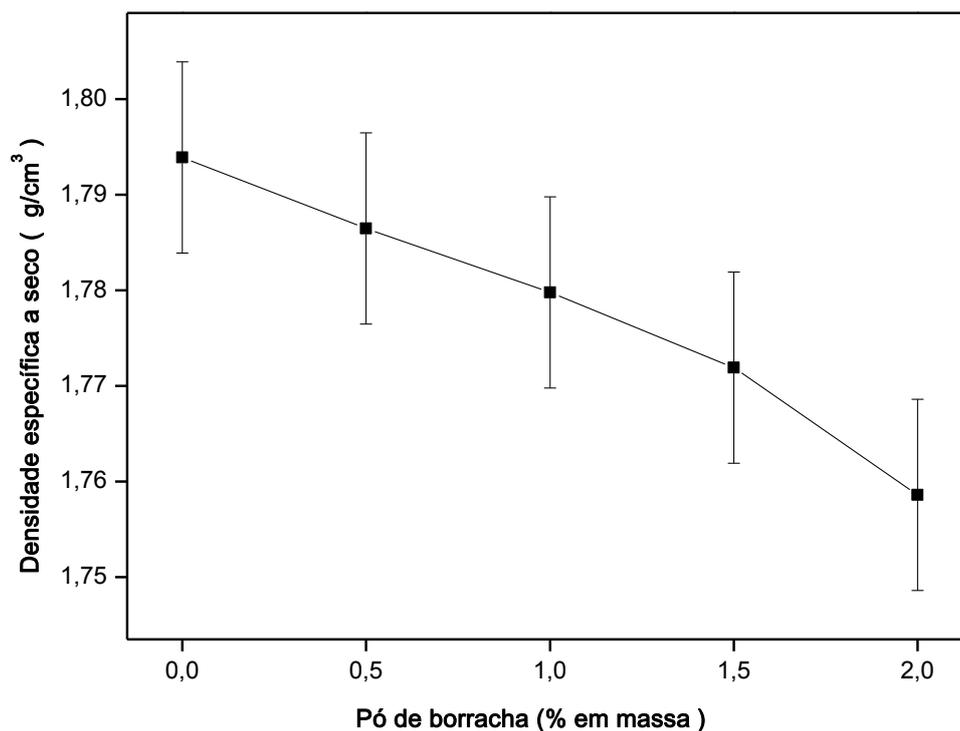


Figura 53 - Densidade aparente a seco em função da adição de pó de borracha.

6.2.4 - Retração linear de queima

A Figura 54 apresenta o comportamento da retração linear das peças cerâmicas em função das temperaturas de queima a 850, 950 e 1050 °C. De modo geral verifica-se que a retração linear de queima praticamente não sofre aumento, em todas as incorporações, na temperatura 850 °C. O aumento pouco significativo ocorre a 950 °C acima de 0,5% de incorporação da borracha, não ocorrendo variação da retração nas incorporações acima de 1%. Nota-se que não ocorre, de maneira considerável, retração linear das peças queimadas a 1050 °C. De um modo geral as peças cerâmicas se mantiveram bem uniformes, fato que pode estar relacionado à granulometria do resíduo, pois segundo Holanda *et al.* (2002), com a adição de partículas na “fração areia” a massa cerâmica adquire maior conteúdo de partículas não argilosas, tendendo a influenciar para uma baixa retração linear.

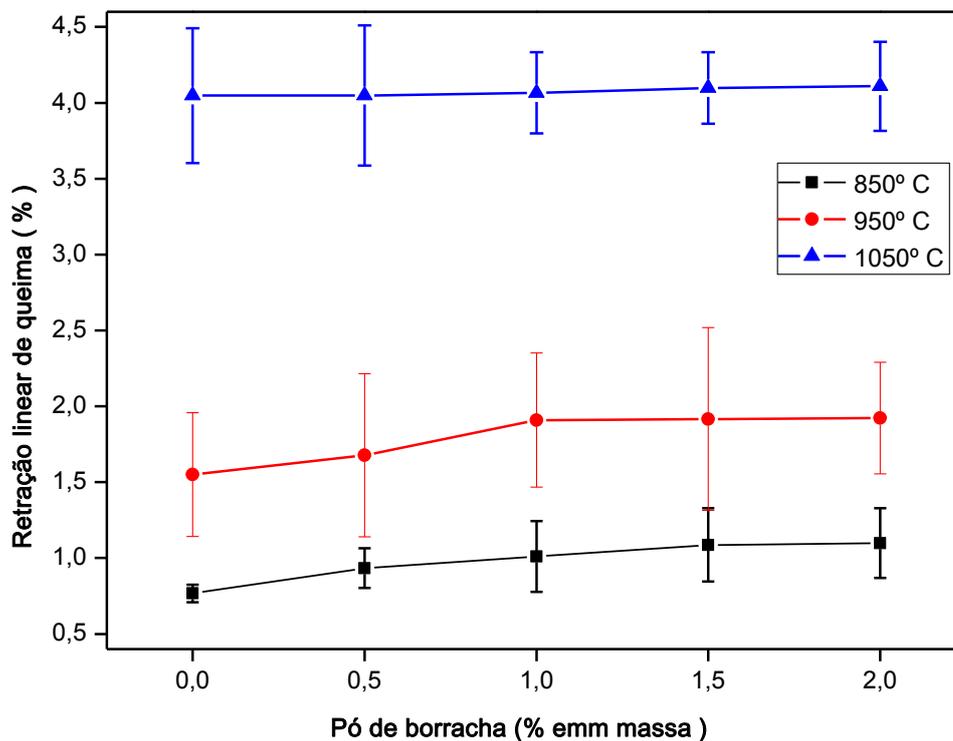


Figura 54: Retração linear de queima das composições queimadas à 850, 950 e 1050 °C.

6.2.5 - Absorção de água

A Figura 55 apresenta o comportamento da absorção de água das peças cerâmicas em função das temperaturas de queima de 850, 950 e 1050 °C. É possível observar que com o aumento da temperatura ocorre redução na absorção de água, principalmente a 1050 °C. Não há diferença considerável entre as incorporações 0 e 0,5%, independente da temperatura, mas observa-se que há um aumento ínfimo, mas gradual na absorção para as incorporações 1, 1,5 e 2%, nas três temperaturas investigadas. O aumento da absorção de água da cerâmica está associado com o aparecimento de porosidade aberta em função da queima do carbono e dos hidrocarbonetos presentes no resíduo, fato também verificado por Freitas *et al.* (2011). De acordo com Produções (2000) *apud* Holanda *et al.* (2002), o valor especificado de absorção de água incide em < 25% para tijolos maciços e blocos cerâmicos, logo, pode-se inferir que na temperatura 1050 °C todas as formulações são apropriadas e na temperatura de 950 °C apenas as formulações M0, M0,5 e M1 estão dentro do limite recomendável para fabricação de tais cerâmicas.

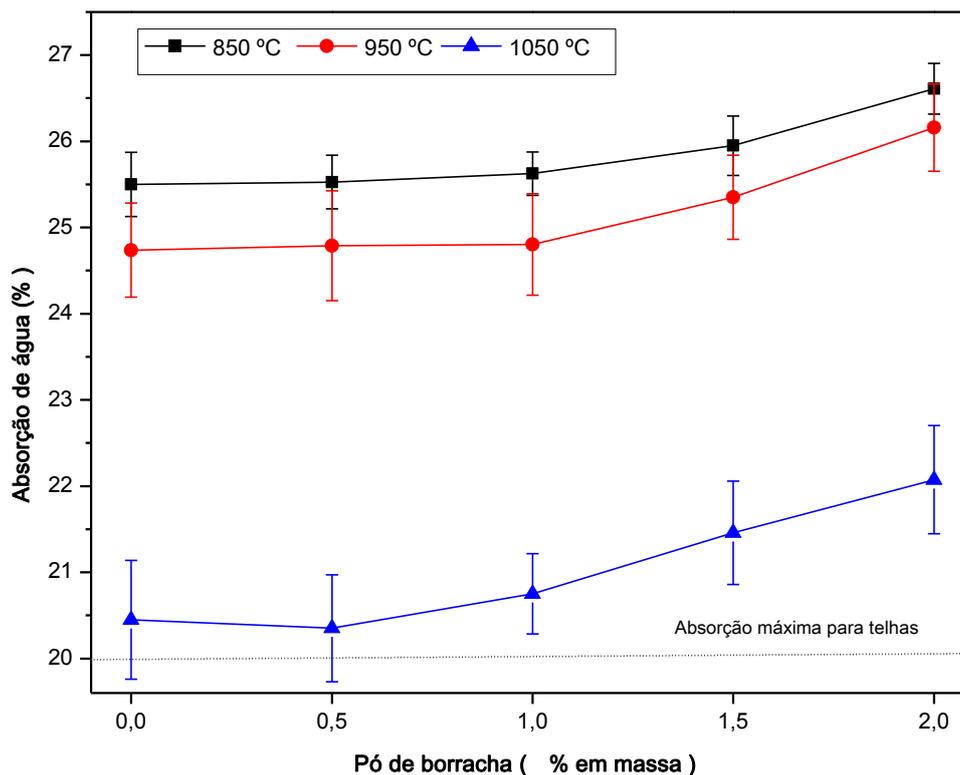


Figura 55: Absorção de água das composições queimadas à 850, 950 e 1050 °C.

6.2.6 - Porosidade aparente

Na Figura 56 está representada a porosidade aparente das peças cerâmicas queimadas à 850, 950 e 1050 °C. A porosidade aparente é definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra. Pela análise da Figura 56 é possível observar que as incorporações são afetadas de acordo com a temperatura de queima. Nota-se que a 950 °C a concentração de poros é maior e nas incorporações 1,5 e 2% a concentração de poros é ainda maior que nas temperaturas 850 e 1050 °C, onde não há variação considerável entre as incorporações realizadas.

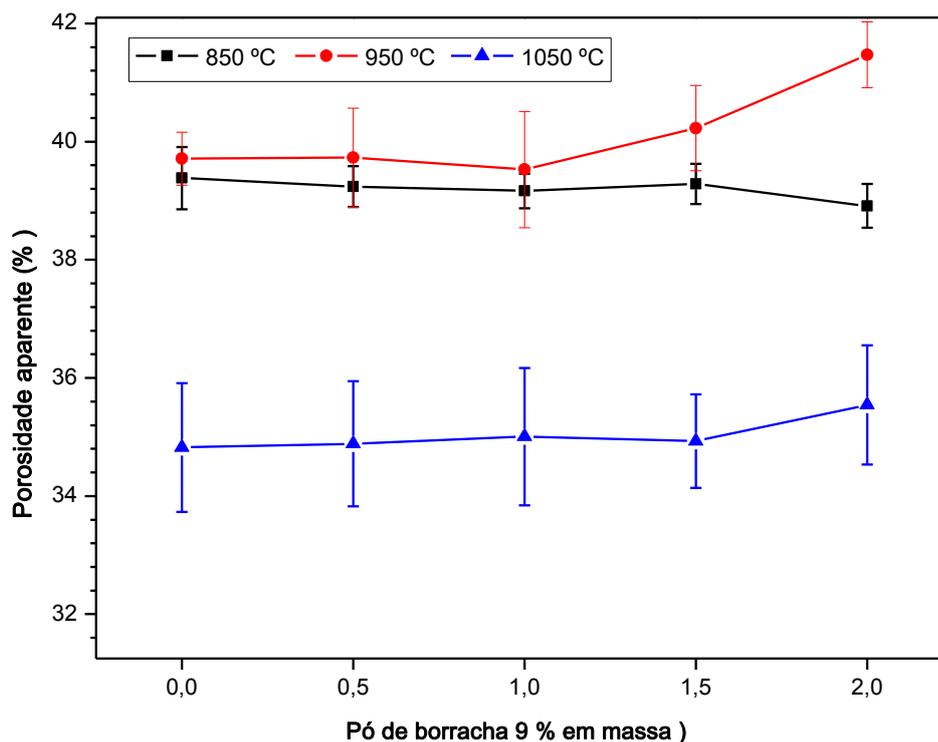


Figura 56: Porosidade aparente das composições queimadas à 850, 950 e 1050 °C.

6.2.7 - Tensão de ruptura à flexão

A Figura 57 apresenta a tensão de ruptura a flexão dos corpos de prova queimados nas temperaturas 850, 950 e 1050 °C, em função do teor de pó de borracha incorporado na massa cerâmica. Observa-se que o aumento da temperatura incrementa a resistência mecânica das peças cerâmicas. Observa-se que todas as formulações sinterizadas em 850 e 950 °C atingem os valores especificados nas normas para a fabricação de tijolos maciços de 2,0 MPa mas somente a formulação M0,5 se aproxima de 5,5 MPa especificado para blocos cerâmicos (Vieira *et al.*, 2000). Em relação às incorporações nota-se que na formulação M1,5 na temperatura 950 °C há aumento da porosidade (Figura 56) o que pode ter contribuído para uma pequena redução da resistência mecânica, a 1050 °C mas não desconjunta do valor especificado em normas, 5,5 MPa, pois esse processo ocorre de modo mais suave .

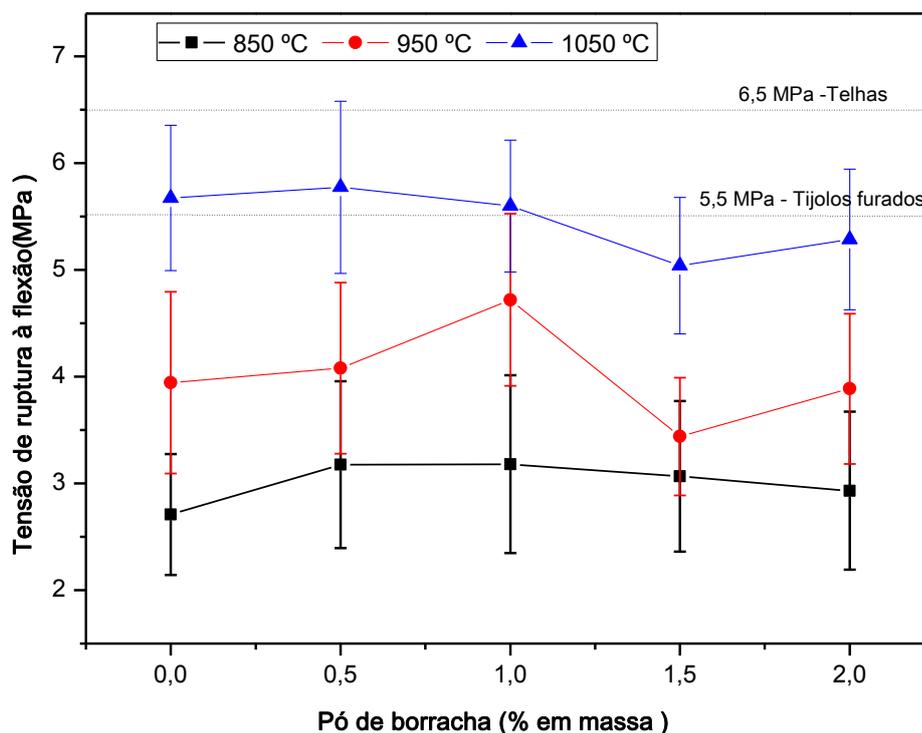


Figura 57: Tensão de ruptura à flexão das composições queimadas à 850, 950 e 1050 °C.

6.2.8 – Análise microestrutural e de fase das cerâmicas incorporadas com pó de borracha

6.2.8.1 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Nota-se pela análise das Figuras 58 e 59 que a formulação M0, massa cerâmica pura, queimada a 850 e 950 °C apresenta uma textura relativamente grosseira e uma microestrutura porosa o que segundo Dias (2011), é típico das argilas de Campos; observam-se grãos de quartzo evidentes e separados da matriz, nota-se também a presença de trincas (Figura 59) fato que segundo Freitas *et al.* (2011), pode estar relacionado à relaxação elástica do material após a saída do molde do dispositivo de extrusão, ou ainda segundo Lima e Moreno (2009) o grau de empacotamento da massa durante a prensagem, e de acordo com Queiroz *et al.* (2010), podem ser provenientes da transformação alotrópica do quartzo.

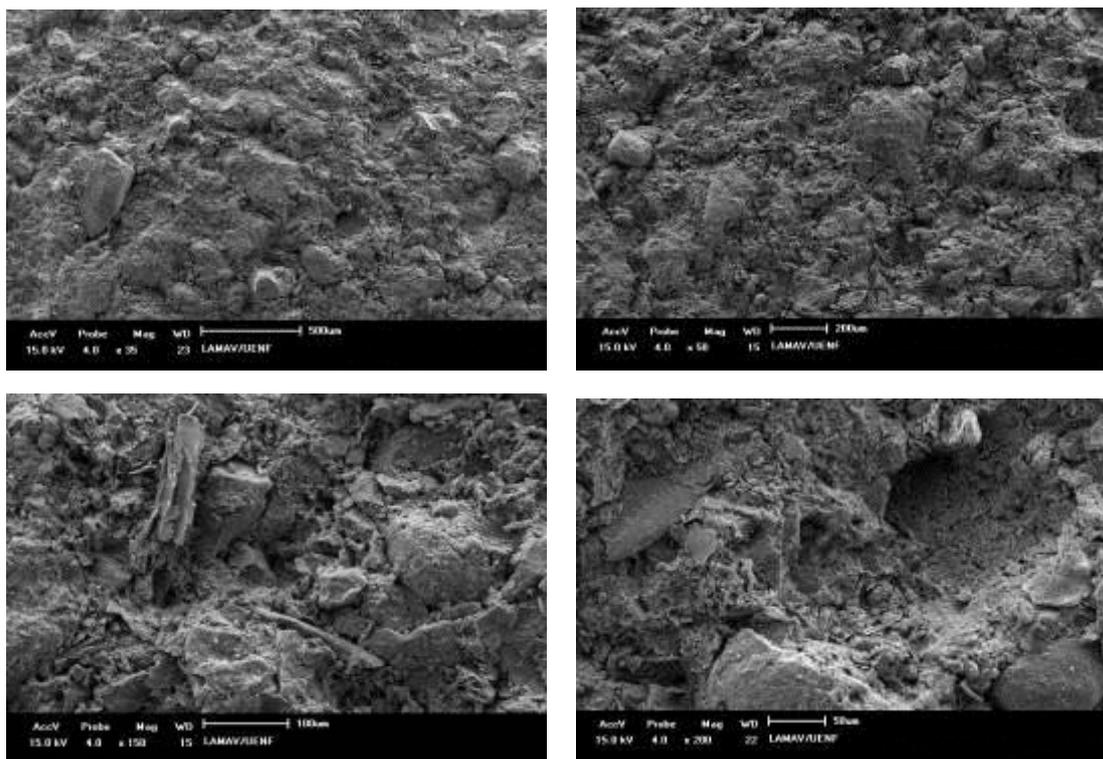


Figura 58: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M0 queimada a 850 °C.

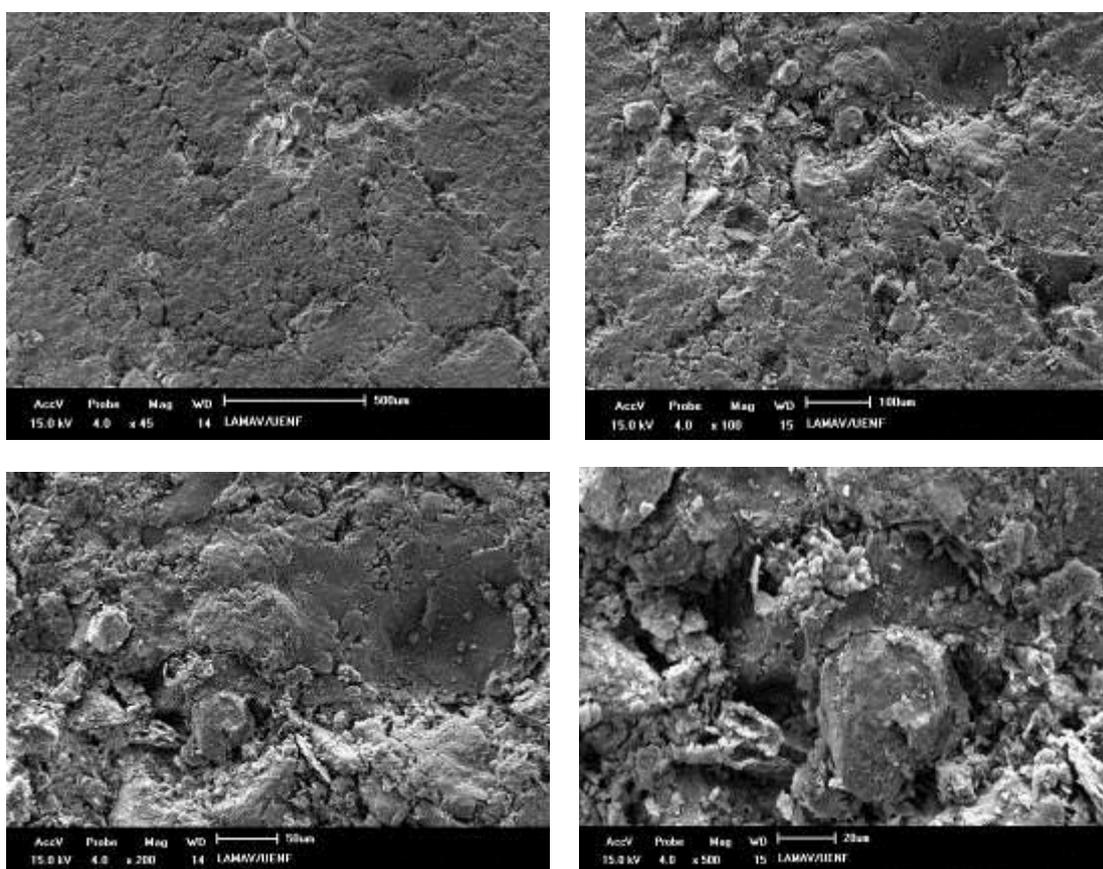


Figura 59: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M0 queimada a 950 °C.

As Figuras 60 e 61 apresentam as micrografias (MEV) da formulação M0 queimada a 850 e 950 °C e seus respectivos espectros de EDS, onde é possível observar que há presença predominante de oxigênio, silício e alumínio. Os picos de platina são provenientes do processo de metalização das peças.

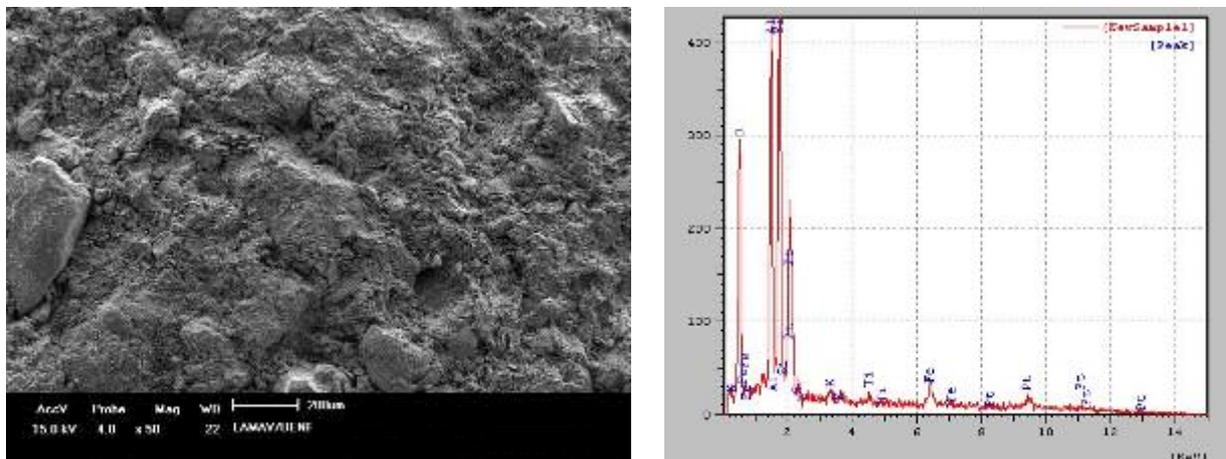


Figura 60: Micrografia (MEV) da formulação M0 queimada a 850 °C e espectros de EDS.

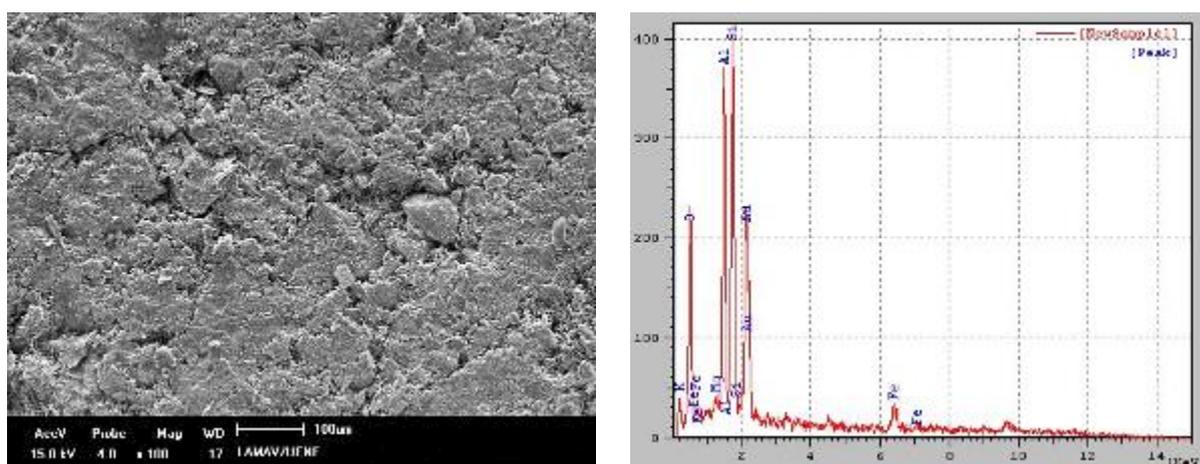


Figura 61: Micrografia (MEV) da formulação M0 queimada a 950 °C e espectros de EDS.

Nas Figuras 62 a 68 é possível observar a textura das microestruturas das formulações com a presença de várias trincas, fator que aumenta gradativamente com a incorporação do resíduo. O fato das partículas do pó de borracha terem granulometria mais grosseira contribui para um menor empacotamento da massa ocasionando trincas nas peças cerâmicas, o tamanho e ocorrência de poros também aumentam conforme a incorporação do resíduo, que também apresenta maior granulometria; em seu trabalho Freitas (2009), também relatou situação semelhante com a incorporação de resíduos de coque de petróleo. Segundo Vieira e

Monteiro (2004), essa textura com significativa porosidade pode ser devido ao empacotamento das partículas, eliminação de gases e vapor de água durante a queima e transformações alotrópicas do quartzo durante a sinterização. Como o resíduo pó de borracha é rico em carbono e sua combustão é completa, como visto na análise térmica até por volta de 600 °C, ocorre a formação de poros de considerável dimensão, considerando ainda a granulometria do resíduo. Analisando a microestrutura das peças cerâmicas é possível inferir que a incorporação do resíduo, pó de borracha, acarreta gradual acréscimo de trincas na superfície das peças. É possível observar a ocorrência de vários poros nas microscopias da formulação M1,5, em todas as temperaturas, Figuras 64, 65 e 66, fato relacionado a incorporação do resíduo, rico em carbono, o que segundo Dondi *et al.* (1997) e Menezes *et al.* (2002), aumenta a porosidade devido a combustão das substâncias orgânicas e ou carbonáceas aí presentes. Nota-se nas Figura 67 e 68 trincas de elevado diâmetro.

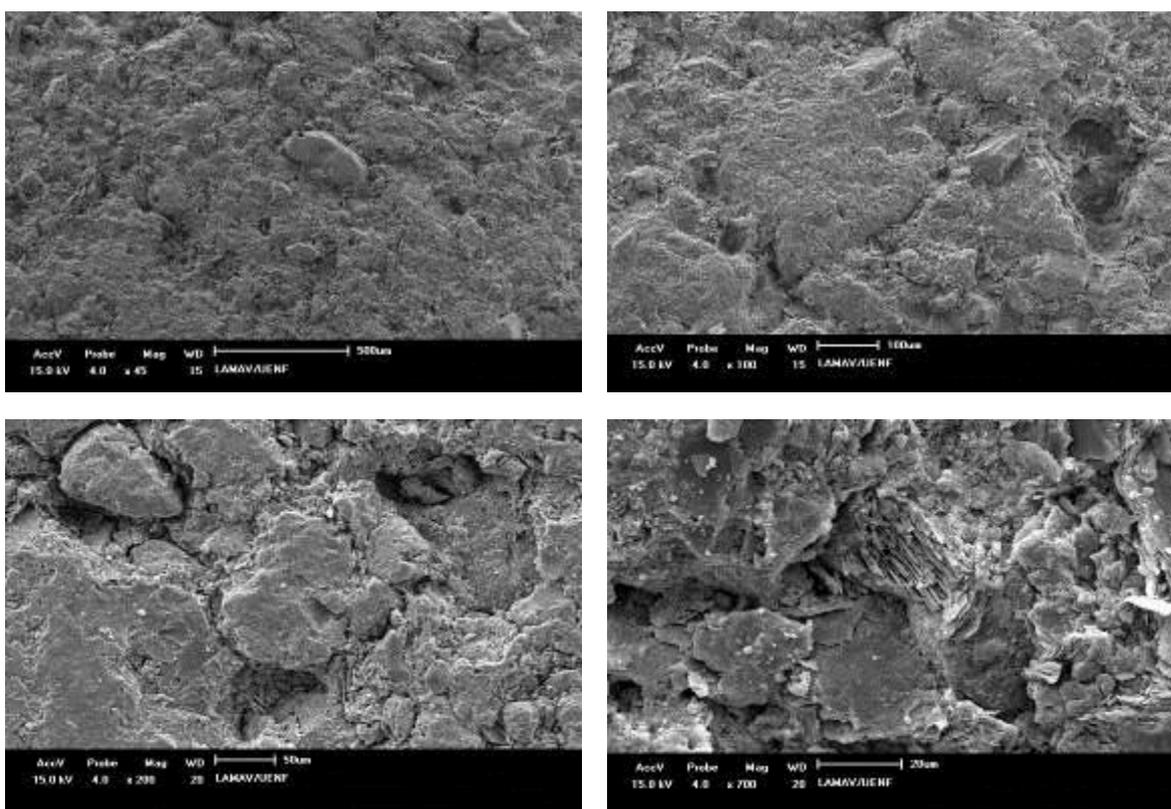


Figura 62: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M0,5 queimada a 850 °C.

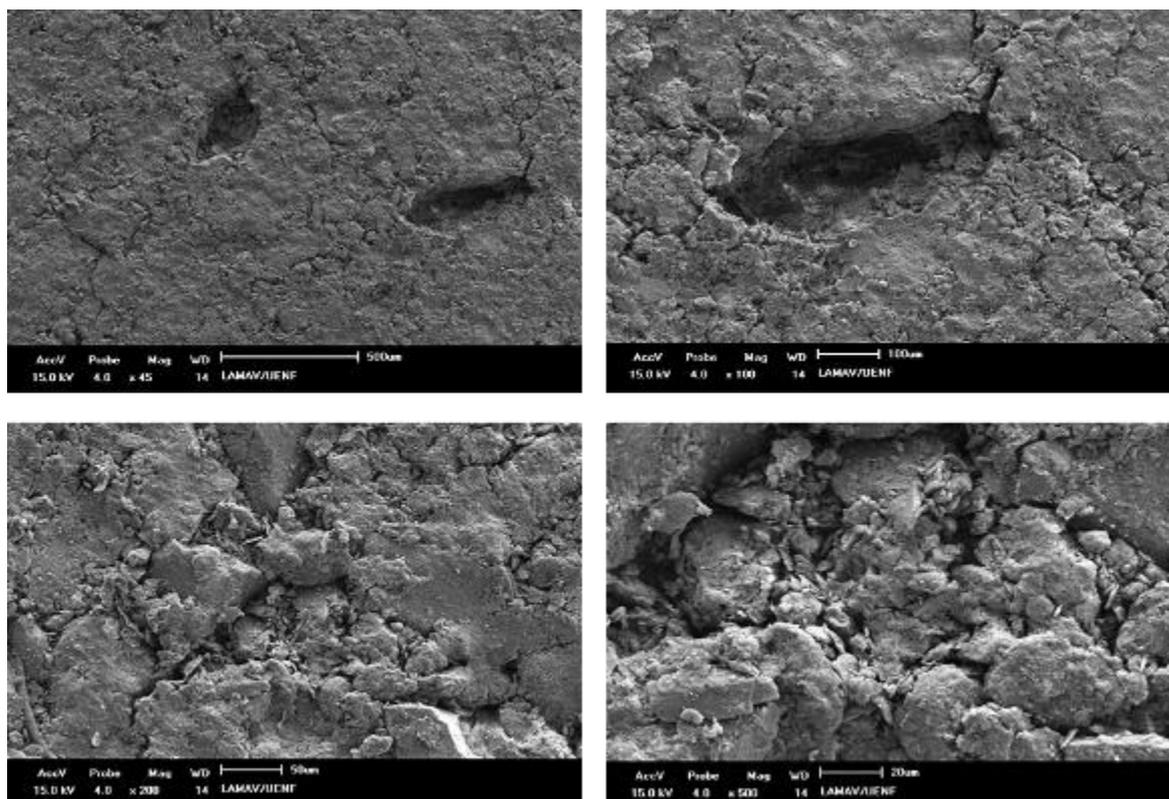


Figura 63: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1 queimada a 950 °C.

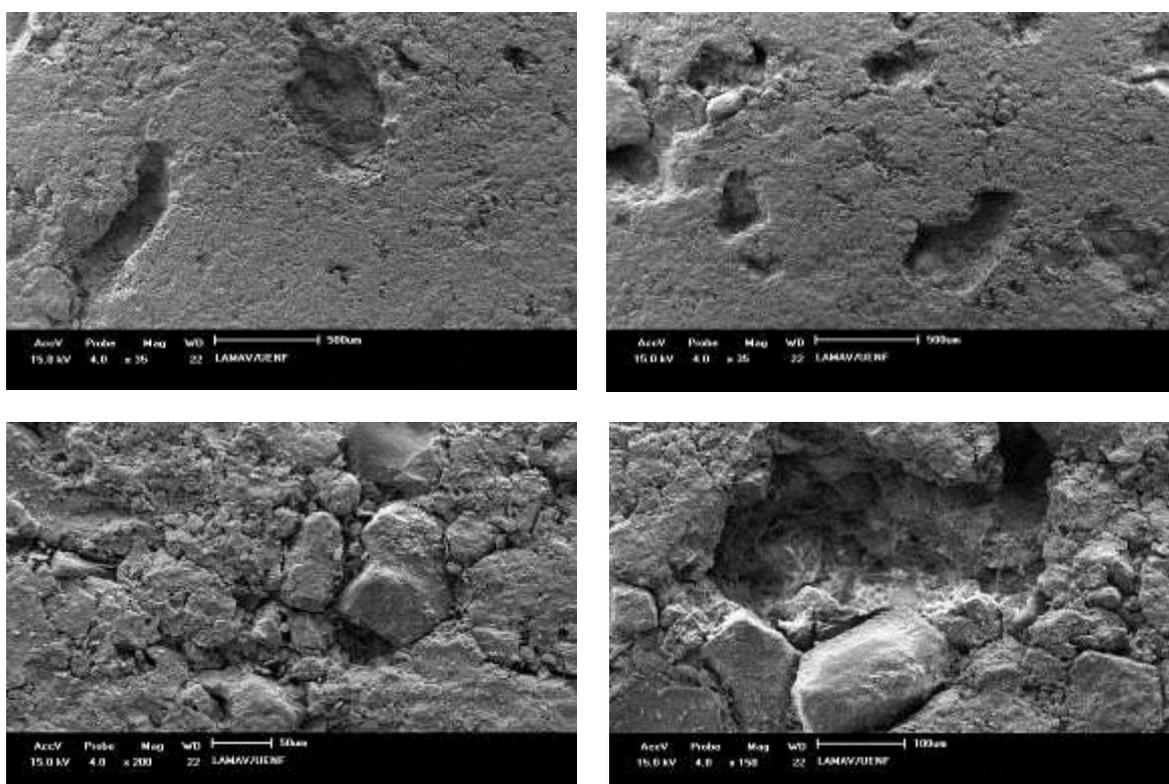


Figura 64: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1,5 queimada a 850 °C.

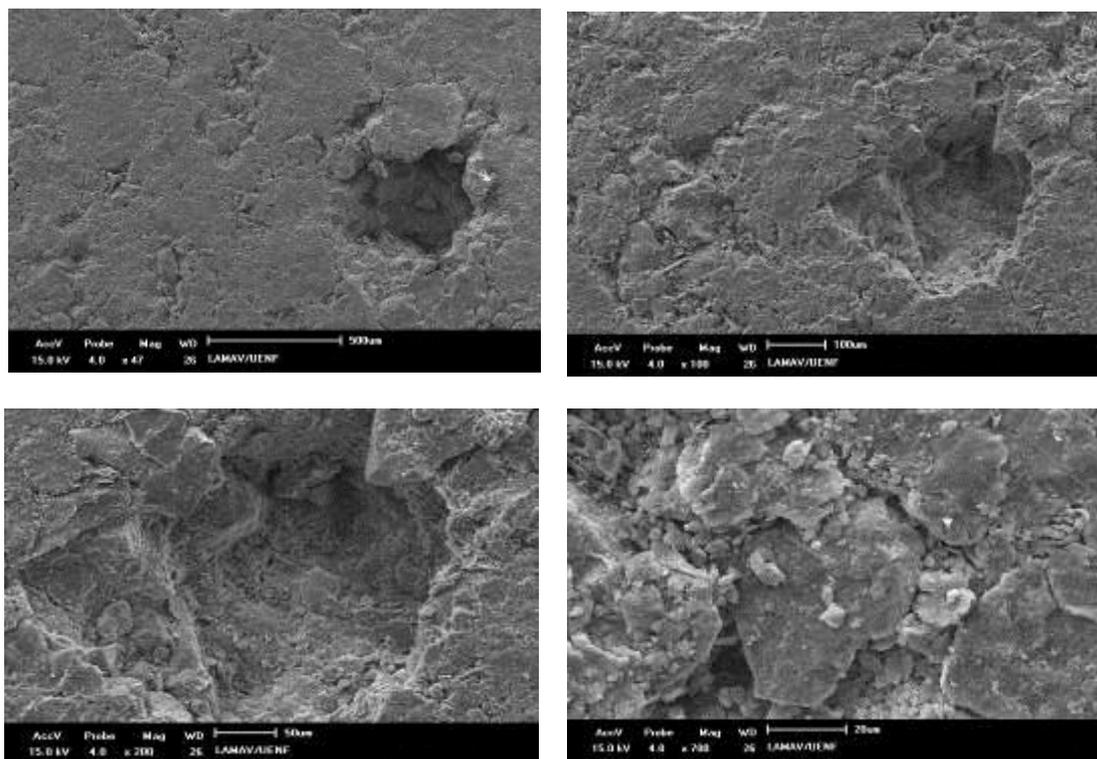


Figura 65: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1,5 queimada a 950 °C

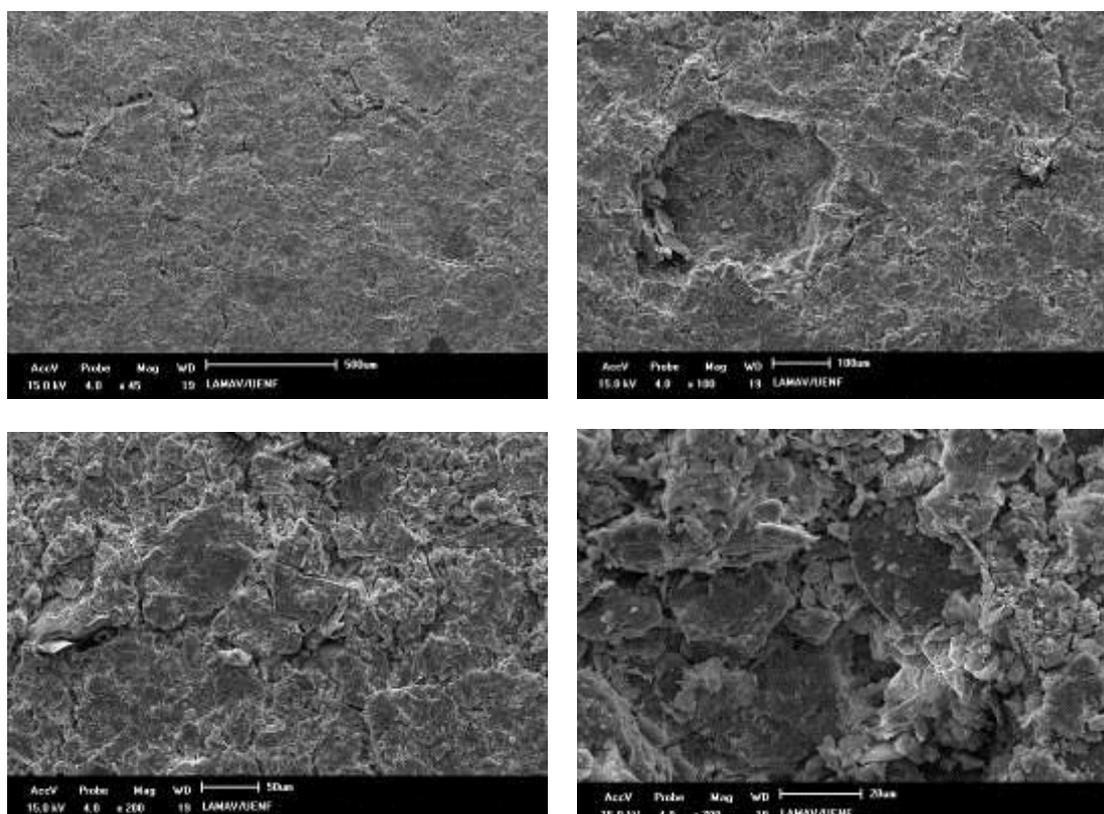


Figura 66: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1,5 queimada a 1050 °C.

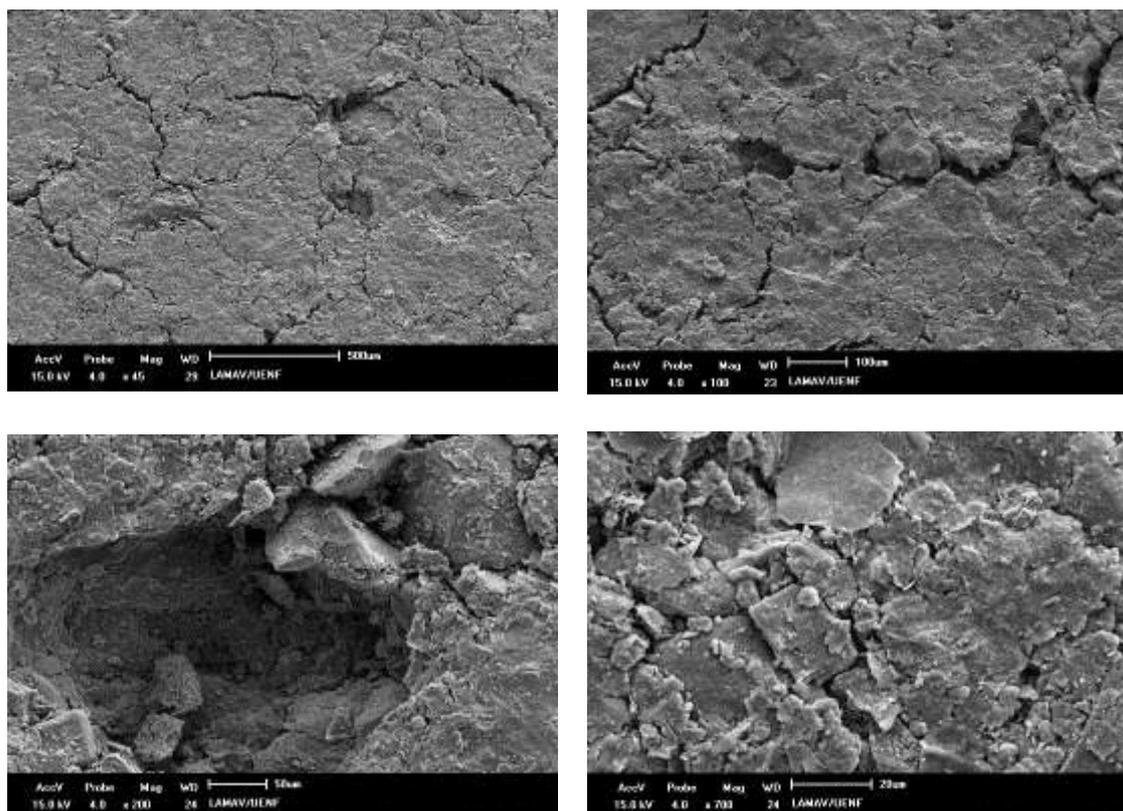


Figura 67: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M1 queimada a 1050 °C.

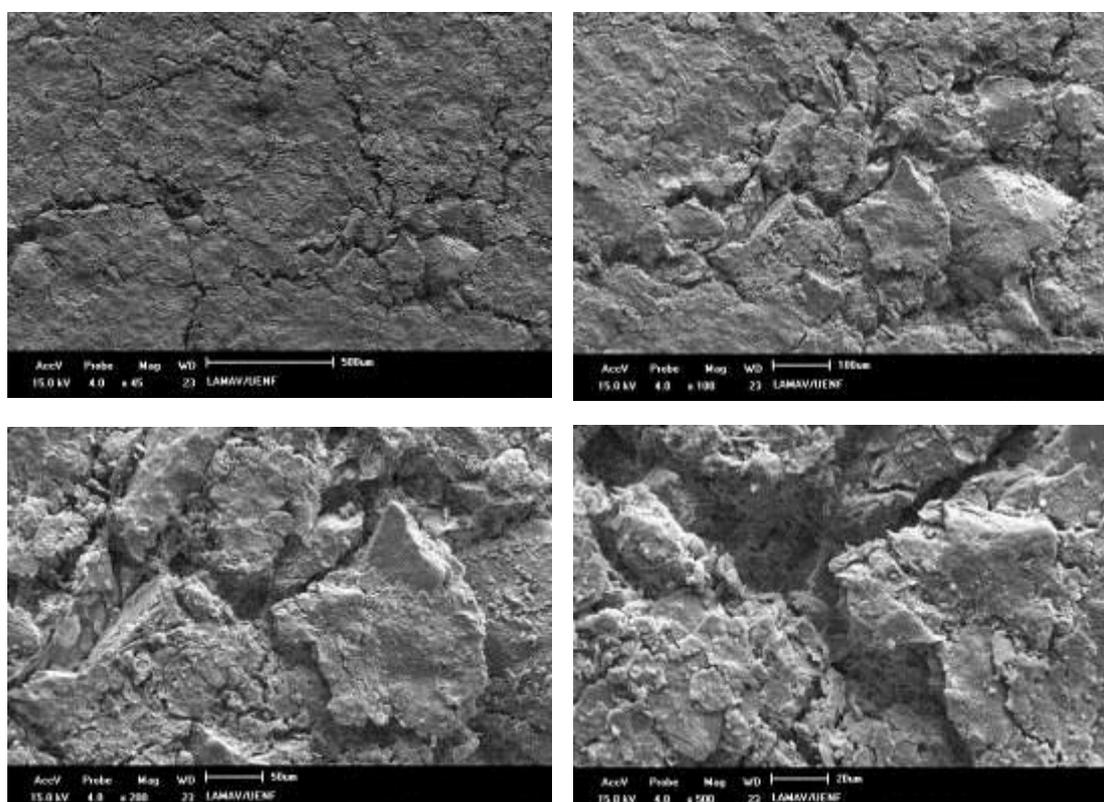


Figura 68: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M2 queimada a 1050 °C.

Nas Figuras 69, 70 e 71 é possível observar as micrografias (MEV) das formulações M0,5, M1 e M2 queimadas nas temperaturas 850, 950 e 1050 °C respectivamente, bem como os espectros de EDS das mesmas, onde pela análise dos espectros de EDS é possível identificar a predominância de oxigênio, alumínio e silício na matriz. É possível observar pelas Figuras 69 a 71 que há espectros de baixa intensidade dos elementos enxofre (S) e magnésio (Mg) indicando a presença destes na matriz cerâmica, isso pode estar relacionado ao sulfeto de magnésio, identificado no difratograma de raios X (Figura 42), que se funde a cerca de 2000 °C. Portanto pode-se afirmar que a incorporação do resíduo pó de borracha altera, mesmo com valores ínfimos, a composição química da cerâmica.

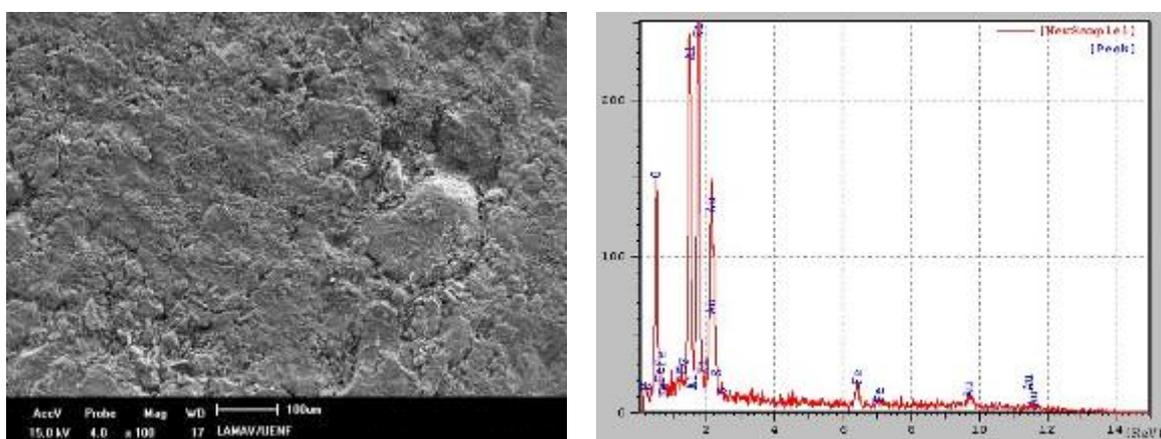


Figura 69: Micrografias (MEV) da superfície de fratura da formulação M0,5 queimada a 950 °C.

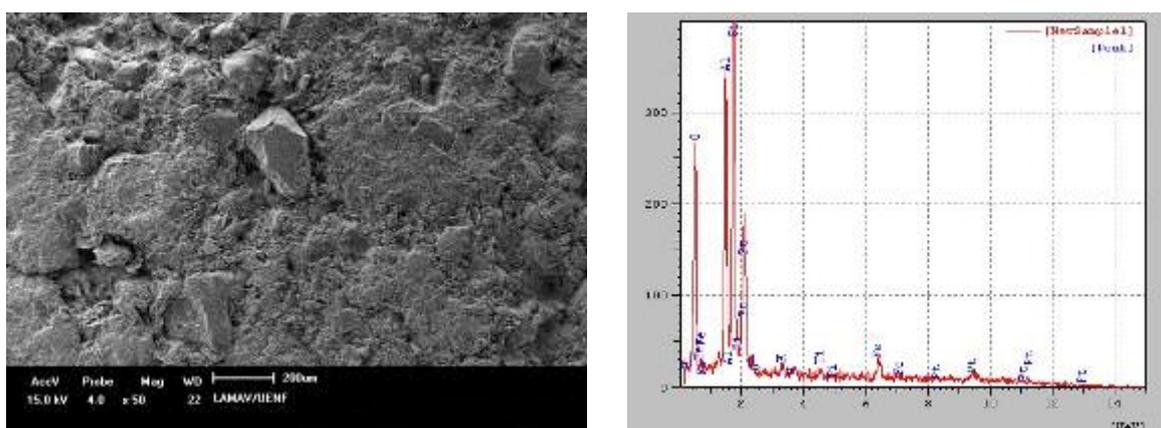


Figura 70: Micrografia (MEV) da formulação M1 queimada a 850 °C e espectros de EDS.

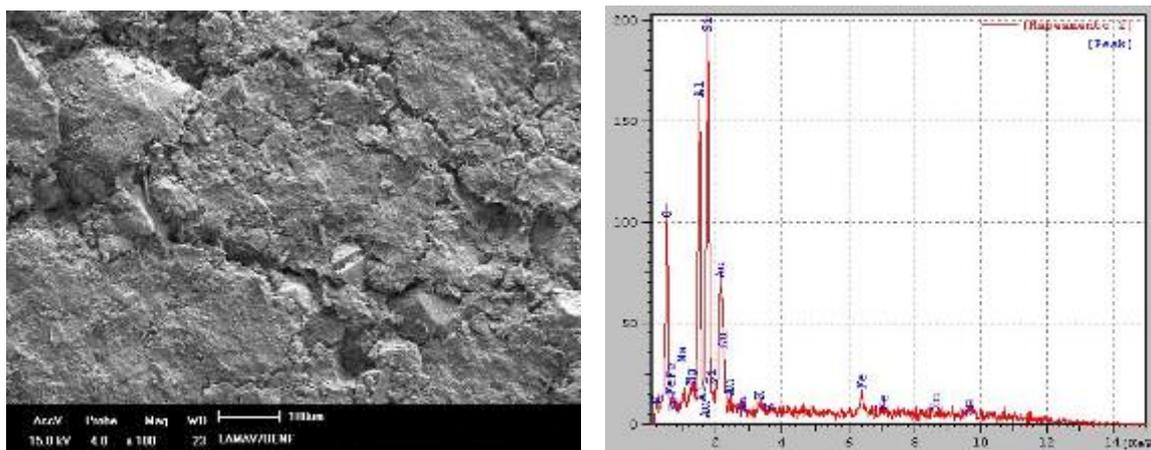


Figura 71: Micrografia (MEV) da superfície da formulação M2 queimada a 1050 °C e espectros de EDS

6.2.8.2 – Microscopia ótica (MO)

As micrografias das Figuras 72, 73 e 74 são das formulações M0, M0,5 e M1,5 com as incorporações de 0, 0,5 e 1,5% de resíduo, respectivamente, todas queimadas a 850 °C. Nota-se a ocorrência de partículas de quartzo (Figura 72 A), mica (Figura 73 A), e de poros em ambas as micrografias (Figuras 72 e 73 B). Nas figuras 73 e 74 observa-se a ocorrência de pequenas trincas, já na Figura 74 B nota-se grandes poros e uma evidente partícula de quartzo em 74 A.

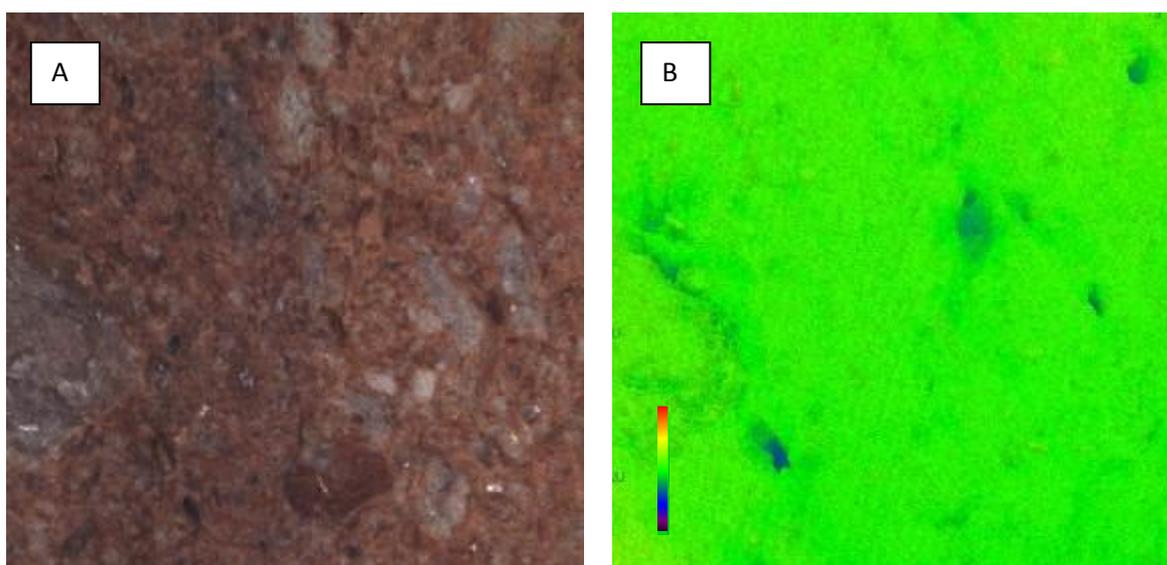


Figura 72: Microscopia ótica da formulação M0 queimada a 850 °C.

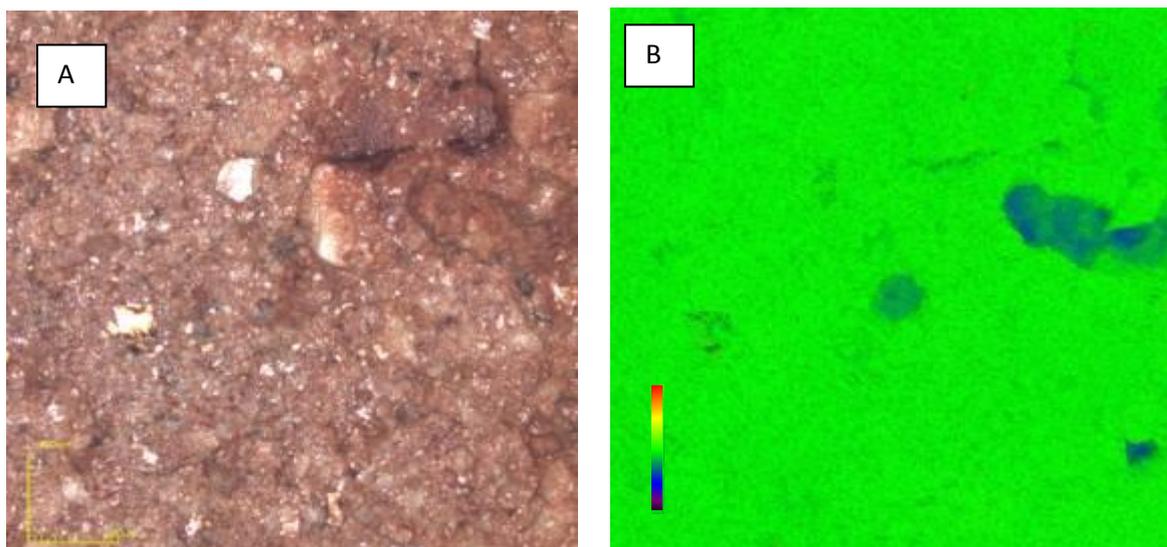


Figura 73: Microscopia ótica formulação M0,5 queimada a 850 °C.

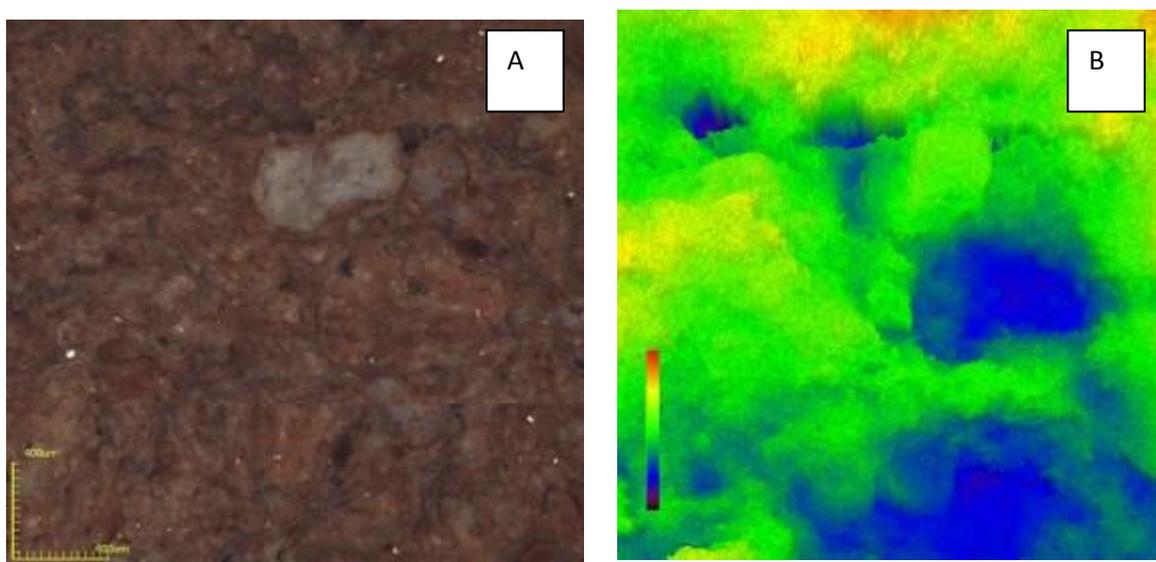


Figura 74: Microscopia ótica da formulação M1,5 queimada a 850 °C.

As Figuras 75 e 76 apresentam as micrografias das formulações M0,5 e M1 queimadas a 950 °C. Nota-se a ocorrência de trinca próximo a partícula de quartzo, Figura 75 A e B, e maior concentração de poros na Figura 76 B, evento relacionado ao teor de borracha incorporado (1% em massa). Pela observação das micrografias das Figuras 75 a 79 é possível perceber a coloração avermelhada das peças cerâmicas, de acordo com Saleiro *et al.* (2010), isso é resultado da quantidade de óxido de ferro (8,05%) determinado na análise química (Tabela 15).

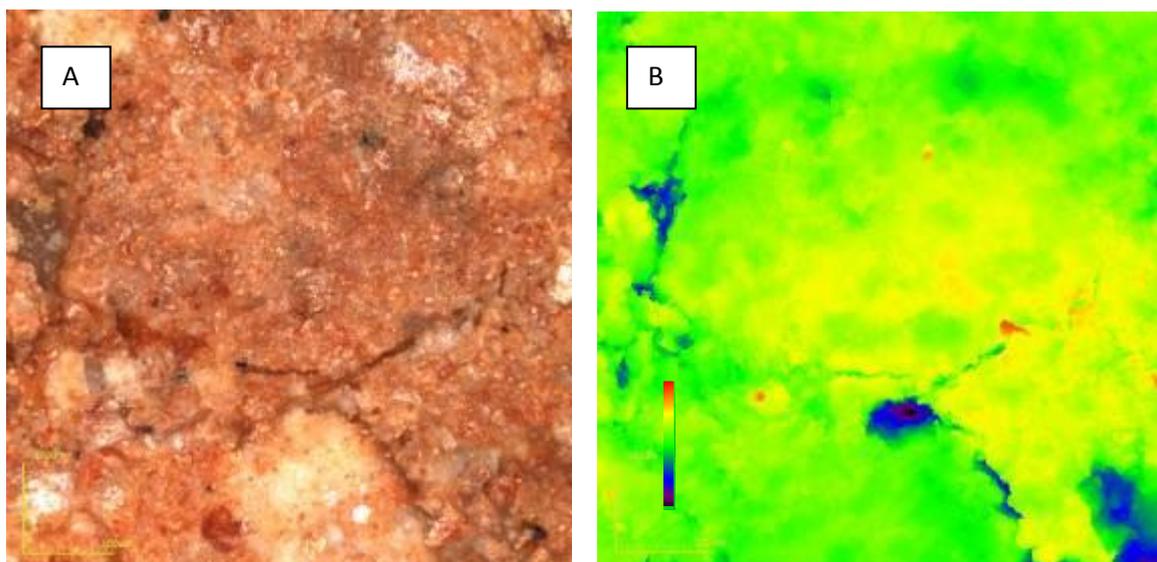


Figura 75: Microscopia ótica da formulação M0,5 queimada a 950 °C.

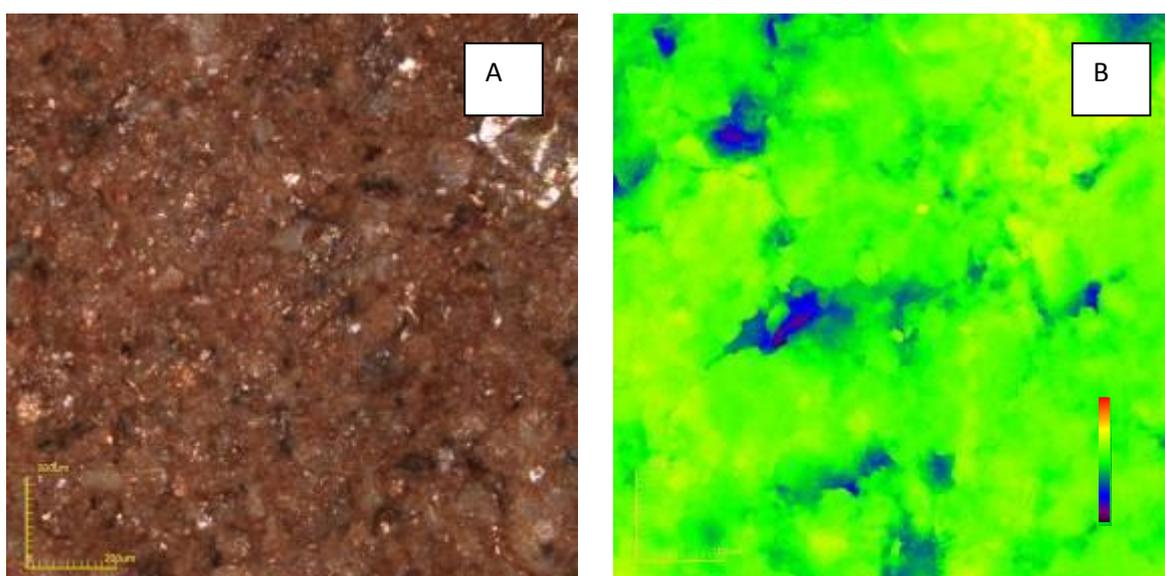


Figura 76: Microscopia ótica da formulação M2 queimada a 950 °C.

As Figuras 77, 78 e 79 apresentam as micrografias das formulações M0, M0,5 e M1 queimadas a 1050 °C. Nota-se a ocorrência microtrincas na superfície da formulação M0 (Figura 77 B), massa cerâmica pura. Na Figura 78 A nota-se a presença de algumas partículas de quartzo e em B notam-se pequenos poros. A Figura 79 A e B, mostra a ocorrência de apenas um poro, porém de elevada profundidade, isso pode ser devido a localização de um grão de borracha com elevada granulometria, que estava nesta região.

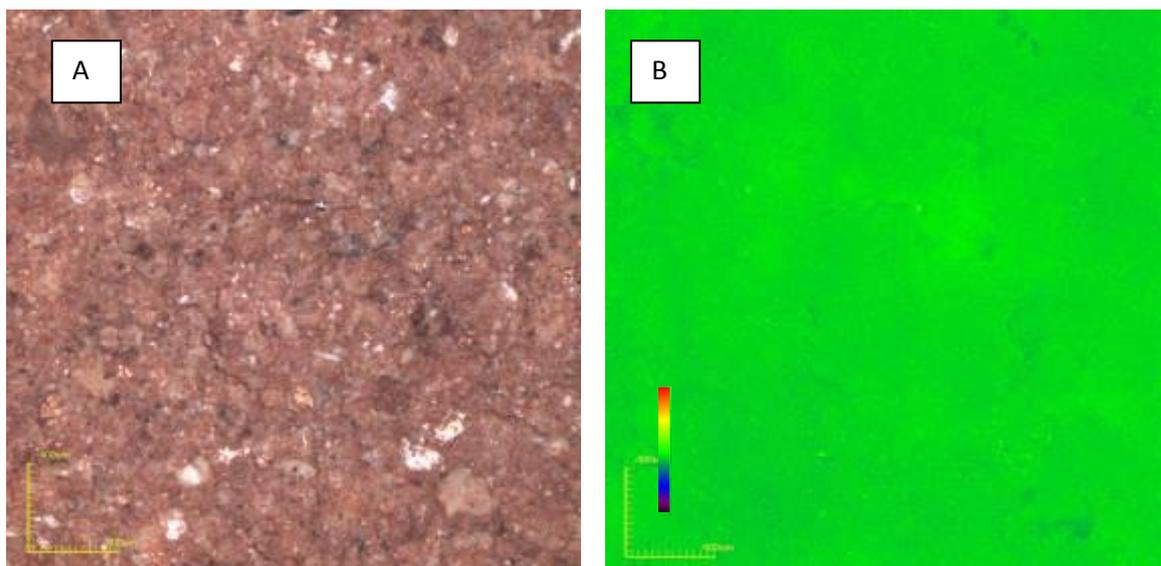


Figura 77: Microscopia ótica da formulação M0 queimada a 1050 °C.

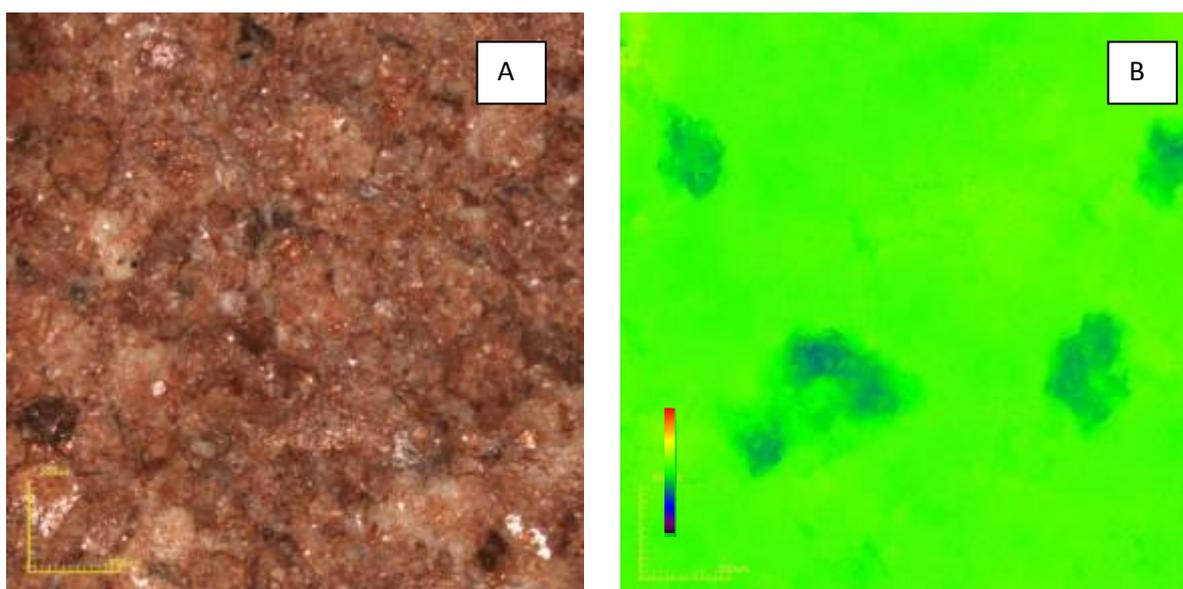


Figura 78: Microscopia ótica da formulação M0,5 queimada a 1050 °C.

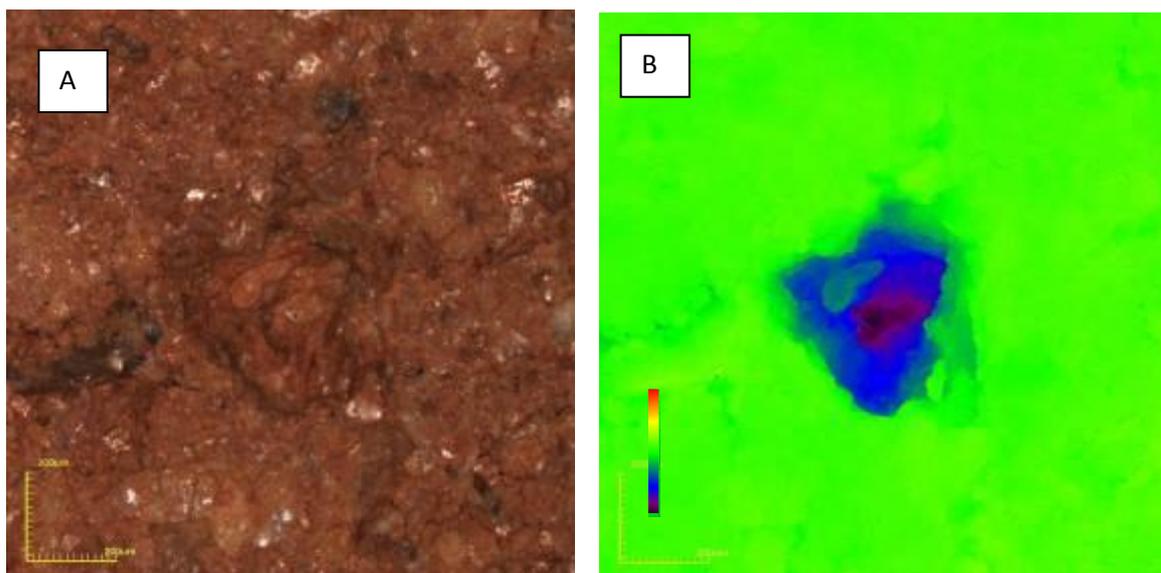


Figura 79: Microscopia ótica da formulação M1 queimada a 1050 °C

6.2.8.2 – Difração de raios X (DRX) das peças queimadas

As figuras 80, 81 e 82 apresentam os difratogramas de raios X das formulações M0, M0,5 e M1 queimadas a 850, 950 e 1050 °C respectivamente. Notam-se algumas fases cristalinas predominantes, nas respectivas temperaturas, como mica, quartzo, hematita e feldspatos e presença de rutilo. Segundo Pessanha (2006), a partir de 1050 °C é esperada a formação de mulita, ocorrência não registrada neste trabalho. A mica e o quartzo são fases ditas residuais (SOUZA, 2007) provenientes da massa cerâmica. Já a hematita segundo Vieira e Monteiro (2002), é proveniente da desidratação de hidróxidos de ferro, presentes na composição química das argilas de Campos dos Goytacazes; a presença de hematita contribui para enaltecer a coloração avermelhada da cerâmica. A presença de rutilo é justificada pela transformação do anatásio-rutilo que, segundo Saleiro *et al.* (2010), ocorre sobre uma extensa faixa de temperatura compreendida entre 350 e 1175 °C, podendo ser influenciada pelo método de preparação da amostra, presença de impurezas ou aditivos e pela atmosfera presente durante a transformação. É possível inferir que a incorporação do resíduo não alterou a composição mineralógica da massa cerâmica.

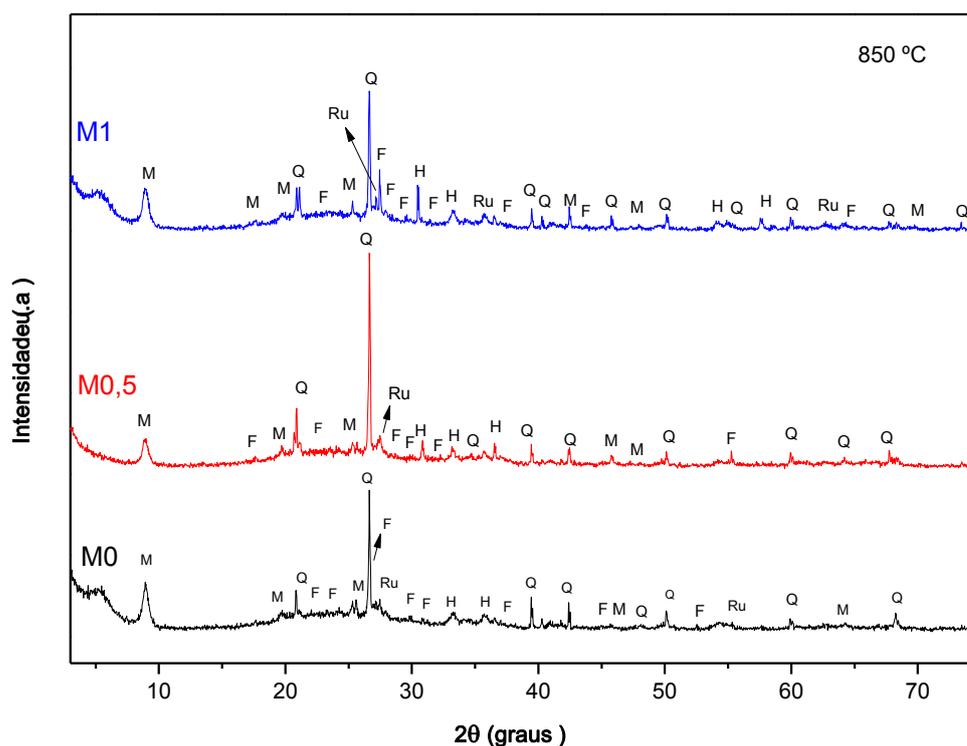


Figura 80: Difratogramas de raios X das composições M0, M0,5 e M1 queimadas a 850 °C onde: M-mica muscovita, Q – quartzo, F- feldspato, H- hematita, Ru- rutilo.

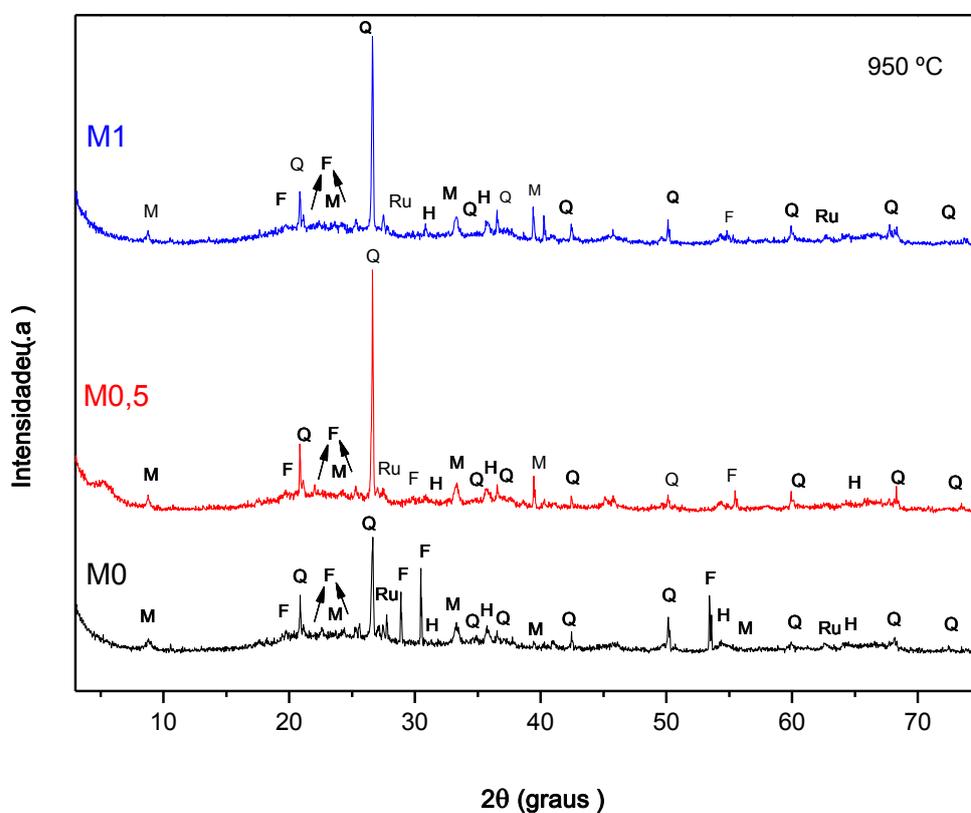


Figura 81: Difratogramas de raios X das composições M0, M0,5 e M1 queimadas a 950 °C onde: M-mica muscovita, Q – quartzo, F- feldspato, H- hematita, Ru- rutilo.

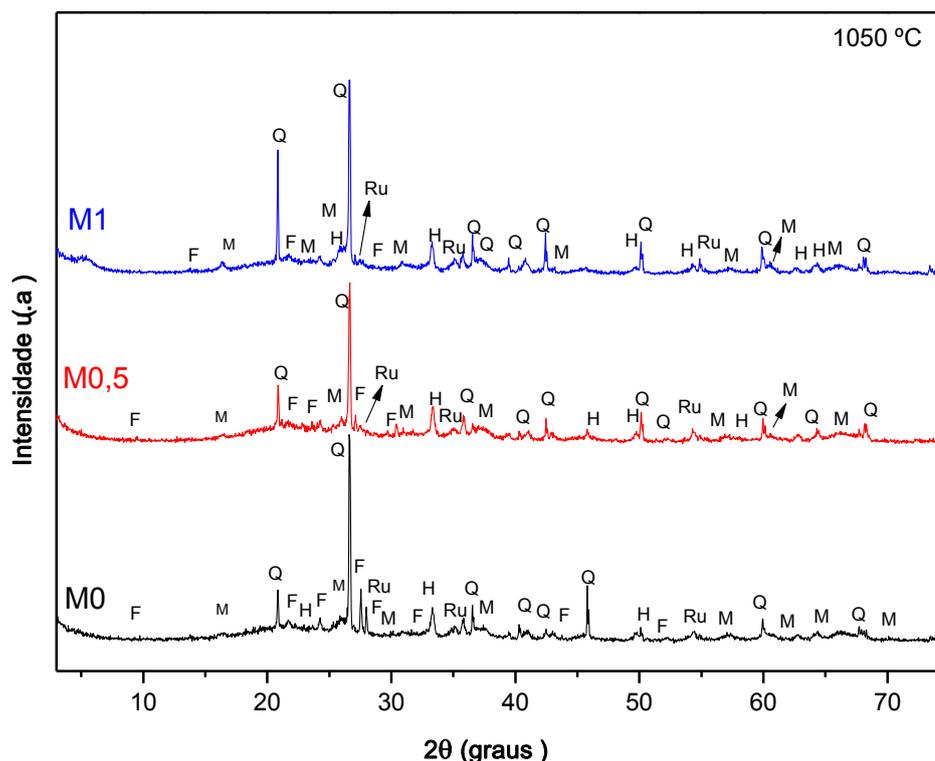


Figura 82: Difratogramas de raios X das composições M0, M0,5 e M1 queimadas a 1050 °C onde: M-mica muscovita, Q – quartzo, F- feldspato, H- hematita, Ru- rutilo.

6.3 - Avaliação econômica e energética da incorporação do resíduo pó de borracha na queima

Neste item serão apresentados os dados relativos à economia energética proporcionada pela incorporação do resíduo pó de borracha a uma massa cerâmica na quantidade de 0,5% em peso. O levantamento da economia energética foi realizado para o forno tipo abóboda de queima a lenha considerando uma temperatura de patamar de 900 °C.

Dados:

- Poder Calorífico da Lenha: 2600 kcal/kg;
- Custo da Lenha: R\$ 66,00 / m³, R\$ 0,16 / kg (densidade de 400 kg/m³);
- Poder Calorífico resíduo pó de borracha: 9281 kcal/kg;
- Custo do resíduo pó de borracha: R\$ 700,00 / tonelada + frete para Campos de R\$ 75,00 / tonelada = R\$ 775,00 / tonelada;
- Rendimento energético do forno abóboda: 780 000 kcal/T;

- Para produzir 1 tonelada de produto cerâmico são necessários 346,2 kg de lenha ao custo de R\$ 55,39 ($346,2 \times R\$ 0,16$).
- ⇒ Uma incorporação de 0,5% em peso de pó de borracha na massa cerâmica dá 5,6 kg de pó de borracha (foi considerado uma quantidade de massa seca, antes da queima, de 1120 quilos, já que ocorre uma perda de massa durante a queima de 11,2%);
- ⇒ Custo: $5,6 \text{ kg} \times R\$775,00 / 1000 = R\$ 4,34$;
- ⇒ Calorias fornecidas pelo pó de borracha = $5,6 \text{ kg} \times 9281 \text{ kcal/kg} = 51.973,6 \text{ kcal}$;
- ⇒ Consumo específico do forno tipo abóboda: 780.000 kcal/T;

Rendimento e economia energética:

- Rendimento do resíduo: $51.973,6 \text{ kcal} / 780000 \text{ kcal} = 0,0666 \sim 6,7\%$.
- Rendimento em relação à lenha: $51.973,6 \text{ kcal} / 2600 \text{ kcal/kg} = 19,98 \text{ kg} \times R\$0,16 \text{ kg} = R\$3,19$.
- Para queimar 1 kg de argila o calor teórico requerido é de 265 kcal o que comprova a eficiência de 30% do forno utilizado.
- ⇒ Considerando que todo o calor gerado pelo resíduo pó de borracha dentro da peça cerâmica é aproveitado a economia seria de 66,6 kg ($51973,6 \text{ kcal} / 0,3 = 173245,3 \text{ kcal}$; $173245,3 \text{ kcal} / 2600 \text{ kcal.kg}^{-1} = 66,6 \text{ kg}$), de lenha ao custo de R\$10,65 ($66,6 \times R\$ 0,16$) por tonelada de produto.
- ⇒ Subtraindo o valor economizado de lenha do custo de resíduo pó de borracha: $R\$ 10,65 - R\$ 4,34 = R\$ 6,32$.

Esse resultado mostra que para cada tonelada de produto cerâmico com 0,5% de pó de borracha a redução do custo energético pode alcançar R\$ 6,32 que equivale a 11,4% ($R\$ 6,32 / R\$ 55,39$).

Em uma cerâmica são produzidos 3000 toneladas de produto por mês (1,5 milhão de peças/mês com massa 2kg/peça). A economia seria de R\$ 18.960,00 ($3000 \times R\$ 6,32$) e a economia energética seria de 22,2% ($173245,3 / 780000$).

Portanto pode-se concluir que o resíduo pó de borracha considerado um resíduo combustível, gera economia energética no ato de sinterização dos produtos cerâmicos. Deve-se investigar melhor essa incorporação uma vez que esta pode até melhorar as propriedades físicas e mecânicas da cerâmica, por meio do fornecimento de calor no interior das peças, o que pode acarretar uma sinterização mais eficiente.

7. Conclusões

Com base nos resultados obtidos na realização deste trabalho pode-se concluir que:

- A massa cerâmica utilizada é constituída por caulinita, quartzo e mica com larga distribuição de tamanho de partículas e elevada “fração areia” (tamanho de partícula > 20 μ m).
- O resíduo pó de borracha apresentou fração granulométrica concentrada na “fração areia” (>20 μ m) o que poderia prejudicar algumas das propriedades mecânicas das peças cerâmicas, mas melhorar a trabalhabilidade da massa.
- A incorporação do resíduo não foi benéfica em relação à trabalhabilidade/plasticidade da massa cerâmica nas concentrações estudadas neste trabalho.
- Verificou-se a existência de metais pesados como o chumbo (Pb), cromo (Cr) e cádmio (Cd) na composição química do resíduo, embora valores não muito expressivos.
- O resíduo tem a propriedade de gerar calor durante o processo de queima das peças cerâmicas, fato confirmado pelo valor de seu poder calorífico, DSC e análise termogravimétrica.
- A incorporação do resíduo pó de borracha em cerâmica não contribuiu para uma variação significativa na absorção de água, para a mesma faixa de temperatura.
- Todas as formulações sinterizadas em 850 e 950 °C atingem os valores especificados nas normas, de resistência mecânica, para a fabricação de tijolos maciços de 2,0 MPa, comprovando que há benefícios com a incorporação do pó de borracha.
- As incorporações de até 1% de pó de borracha na massa cerâmica, são as mais adequadas pois melhoraram a plasticidade, e não alteraram a resistência mecânica quando comparada à massa cerâmica, levando em consideração a barra de erro estatístico.
- Através de espectros de EDS foi possível identificar, após a sinterização, a presença dos elementos enxofre (S) e magnésio (Mg) na matriz cerâmica, evento que pode estar relacionado ao sulfeto de magnésio, identificado no difratograma de raios X antes da queima, portanto pode-se afirmar que a incorporação do

resíduo pó de borracha alterou, mesmo com valores ínfimos, a composição química da cerâmica.

- A microscopia ótica mostrou uma maior concentração de defeitos como poros e trincas, fato que pode estar relacionado ao processamento de prensagem/compactação da massa e à incorporação do pó de borracha com granulometria elevada, portanto como o grau de compactação da massa influenciou a microestrutura das peças cerâmicas, seria necessário aumentá-lo.
- Pelas análises de DRX após o processo de queima comprovou-se que a incorporação do resíduo não alterou a composição mineralógica da massa cerâmica.
- A liberação de energia durante o processo de queima torna o pó de borracha um resíduo importante para o processo de queima, pois, durante esse processo há economia de energia e menor tempo de queima, o que é um atrativo para os ceramistas, maior produtividade e lucratividade em relação ao gasto energético.
- A incorporação desse tipo de resíduo, rico em carbono, em cerâmica vermelha precisa ser em baixa concentração, uma vez que pode aumentar a porosidade das peças e haver a liberação de gases poluentes (não investigados neste trabalho).
- O alto poder calorífico do resíduo de pneu representa uma grande possibilidade de economia de energia associada à possibilidade de uma destinação para enormes volumes de passivo ambiental, porém é necessário se pensar no tratamento e minimização dos gases produzidos pela queima do resíduo.

7.1 - Sugestões para futuros trabalhos

Como sugestões para a realização de trabalhos futuros propõem-se:

- Realizar análise de lixiviação e solubilização a fim de investigar possíveis metais pesados no produto final;
- Realizar avaliações da influência de temperaturas inferiores às realizadas neste trabalho com as mesmas formulações;
- Realizar um teste industrial para confirmar os resultados obtidos no presente trabalho;
- Realizar análise de gases para identificar e quantificar os gases liberados durante o processo de queima;
- Realizar testes de resistência à compressão.

8. Referências Bibliográficas

ABIQUIM – Associação Brasileira da Indústria Química. Disponível em: <<http://www.abiquim.org.br/>>. Acesso em dez/2013

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). Classificação de Resíduos Sólidos, NBR 10004, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). Lixiviação de Resíduos Sólidos, NBR 10005, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004); Amostragem de Resíduos, NBR 10007, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004); Solubilização de Resíduos, NBR 10006, Rio de Janeiro, 2004.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). NBR 7181: Determinação da Análise Granulométrica de Solos, Rio de Janeiro, 1984.

ACCHAR, W.; SILVA, J. E.; MELO-CASTANHO, S. R. H.; SEGADÃES, A. M. Properties of clay based ceramics added with construction and demolition waste. In: Congress Annual Meeting & Exhibition, 138 th., 2009, San Francisco. Anais... 2009, p. 907-910

ADHIKARI, B., DE D., MAITI S. - Reclamation and recycling of waste rubber. Progress in Polymer Science. Elsevier, 2000

ALMEIDA, M.C. Estudo do Ciclo de Vida do Pneu Automotivo e Oportunidade para Disposição Final de Pneus Inservíveis. Dissertação de Mestrado. Universidade de Federal de São Carlos-SP. 201 p. 2002.

AMARAL, S.P.; DOMINGUES, G.H. Oily wastes application in ceramic materials manufacturing. Water Science and Technology, London, v.24, n.12, p.165-176, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE PNEUS REMOLDADOS (2014) – Disponível em:http://www.anip.com.br/index.php?cont=detalhes_noticias&id_noticia=557&area=43&titulo_pagina=%DAltimas%20Not%EDcias – Acesso em Março/2014

ABC - Associação Brasileira de Cerâmica <http://www.abceram.org.br/site/?area=4> Acesso dez/ 2014

AUTÓDROMO INTERNACIONAL DE CURITIBA-PR (2009) – Disponível em: http://www.nobresdogrid.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=271:curitiba-pinhais-pr&catid=74:o-raio-x-dos-autodromos-brasileiros&Itemid=123 - Acesso em abril/2014

BACELAR, Veridiana Simonetti. Lixo urbano. Revista do Instituto de Pesquisas e Estudos, Bauru, n. 44, p. 601-607, set./dez. 2005.

BALANÇO AMBIENTAL NOS OCEANOS: A CRÔNICA DA MORTE ANUNCIADA – Disponível em: <http://www.diarioliberalidade.org/mundo/consumo-e-meio-natural/34908-balan%C3%A7o-ambiental-nos-oceanos-a-cr%C3%B4nica-da-morte-anunciada.html> – Acesso em abril/2014

BARBIERI, L.; CORRADI, A.; LANCELLOTTI, A. (2000). Alkaline and alkaline-earth silicate glasses and glas-ceramics from municipal and industrial waste. *Jornal of the European Ceramic Society*, Amsterdam, 20: 2477-2483.

BAUER, L. A. F. Materiais de construção. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2000. 705 p.

BERTOLLO, S.A.M.; FERNANDES JR, J.L.; VILLAVERDE, R.B.; MIGOTTO FILHO, D. Pavimentação Asfáltica: uma alternativa para a reutilização de pneus usados. *Revista Limpeza Pública*, no 54. Janeiro, 2000

BERTOLLO, Sandra Margarido; JÚNIOR, José Leomar Fernandes; SCHALCH, Valdir. Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. In: XVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. 2002.

BLUMENTHAL, Michael H. Tires. *The McGraw-Hill recycling handbook*. New York, NY: McGraw-Hill, 1993.

BORBA, C. D. G.; NETO, J. B. R.; OLIVEIRA, A. P. N.; ECHUDE, L. C. F.; ALARCÓN, O. E. Estudo de matérias primas fundentes. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 34-39, 1996.

BORLINI, M. C., SALES, H. F., VIEIRA, C. M. F., CONTE, R. A., PINATTI, D. G., & MONTEIRO, S. N. (2005). Firewood ash for application in red ceramic Part I: characteristics of the ash. *Cerâmica*, 51, 192-196.

BORLINI, M. C., SANTOS, B. C., CONTE, R. A., PINATTI, D. G. (2002) Vitrificação de cerâmica vermelha usando cinza de lixo urbano. *Anais do 46 °Congresso Brasileiro de cerâmica*, São Paulo-SP, p.1-11.

BORLINI, M. C.; MENDONÇA, J.L.C.C., VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N.; (2006) "Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar." *Revista Matéria* Vol11 n4(2006) p. 435-443.

BRAGANÇA S.R.; BERGMANN C. P. (2004). Utilização de pó de vidro em uma massa industrial de cerâmica branca. *Anais do XVI CBECIMat*. Porto Alegre-RS.

BRAZIER, D. W. - *Rubber Chem. Technol.* 53, 437, (1981).

BRASIL. Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada (IPEA). Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos: relatório de pesquisa. Brasília, 2012.

CALLISTER, W. D. Ciência e Engenharia dos materiais: uma introdução. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 589 p.

CANEVAROLO JR., S. V. Técnicas de Caracterização de Polímeros. São Paulo: Artliber, 2004, 229-261 p.

CANOVA, José Aparecido; BERGAMASCO, Rosangela; NETO, Generoso De Angelis. A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. Acta Scientiarum. Technology, v. 29, n. 2, p. 141-149, 2007.

CARDOSO C.G.; MACEDO D.C.B.; CALMON J L. "Concreto com borracha de pneu: uma revisão bibliográfica"; 44 °Congresso Brasileiro do Concreto, Belo Horizonte, 2002.

CEMPRE: Compromisso empresarial para reciclagem. Pneus. Ficha Técnica 8 , 2000. Disponível em :< <http://www.cempre.org.br/fichas/ficha8.html> >Acesso em 28/02/2014

COCCO, G.; "Bautite "red mud" in the ceramic industry. Part 2: production of clay-based ceramics", Journal of the European Ceramic Society, 20, pp. 245-252, 2000.

COELHO, Antonio C. Vieira; SANTOS, Pérsio de Souza; SANTOS, Helena de Souza. Special clays: what they are, characterization and properties. Química Nova, v. 30, n. 1, p. 146-152, 2007.

COELHO, Antonio Carlos Vieira; DE SSANTOS, P.; DE SSANTOS, H. Argilas especiais: argilas quimicamente modificadas-uma revisão. Química Nova, v. 30, n. 5, p. 1282, 2007.

Conselho Nacional do Meio Ambiente – " Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999" , Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>>

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – "Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999", Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>>, acesso em: 15 de dezembro de 2013.

DE OLIVEIRA, Otávio José; DE CASTRO, Rosani. Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil. 2007.

DHANAPANDIAN, S.; MANOHARAN, C.; RAMKUMAR, T.; GNANAVELA, B.; SUTHARSAN, P.; SHANTHI, M. Effect of incorporation of granite and marble rejects in clay brick products: physico-mechanical analysis. Acta Physica Polonica, v. 118, n. 4, p. 688-695, 2010.

DIAS, C. M. R., CINCOTTO, M. A., SAVASTANO Jr, H., & JOHN, V. M. (2008). Envelhecimento de longo prazo de telhas onduladas de fibrocimento—O efeito da carbonatação, lixiviação e chuva ácida. *Cement & Concrete Composites*, 30, 255-265.

DIAS, Claudio André Chagas Martins. Reciclagem de lama de alto-forno em cerâmica vermelha. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2011.

DONDI, M. Clay materials for ceramic tiles from the Sassuolo District Northern Apennines, Italy. Geology, composition and technological properties. *Applied Clay Science*, v. 15, n. 3-4, p. 337-366, 1999.

DONDI, M., GUARINI, G., RAIMONDO, M., ZANELLI, C. (2009). Recycling PC and TV waste glass in clay bricks and roof tiles. *Waste Management*, v.29, p.1945–1951.

DONDI, M.; MARSIGLI, M; FABRI, B. (1997 a e b) Recycling of industrial and urban waste in brick production – A Review (Part 2). *Tile & Brick International*, v. 13, nº4, 302-308p

DOURADO, D. C. (2011). Poder calorífico e análise elementar de pneus automobilísticos inservíveis e de frutos da macaubeira. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3156>

DUAILIBI FILHO, J.; ROCHA, J. C. Cerâmicas de alta alumina. *Informativo INT*, v. 20, n. 41, p. 19-23, 1988.

DUTRA, R. C., DINIZ, M. F., RIBEIRO, A. P., LOURENÇO, V. L., CASSU, S. N., & AZEVEDO, M. F. (2004). Determination of NR/SBR content in blends: combining DTG and FT-IR data. *Polímeros*, 14(5), 334-348.

DUTRA, R. P. S.; VARELA, M. L. V.; NASCIMENTO, R. M.; GOMES, U. U.; PASKOCIMAS, C. A.; MELO, P. T. Avaliação da potencialidade de argilas do Rio Grande do Norte, Brasil. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 11, n. 2, p. 42-46, 2006.

EARTHQUAKE RESISTANT TIRE EARTHSHIPS FOR HAITI DISASTER RELIEF (2010) Disponível em: <http://inhabitat.com/earthquake-resistant-earthships-for-haiti-disaster-relief/> - Acesso em maio/2014

ELDIN, Neil N.; SENOUCI, Ahmed B. Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 5, n. 4, p. 478-496, 1993.

FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. (2012). Influência da adição de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha. SIMPÓSIO MATÉRIA, RIO DE JANEIRO, RJ

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. Bras. Ci. Solo, v. 23, p. 507-514, 1999.

FIORITI, C. F.; AKASAKI, J. L.; NIRSCHL, G. C.. Fabricação de Blocos de Alvenaria Utilizando Resíduos de Borracha nos Compósitos de Concreto. In: / CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL. Juiz de Fora/MG, 2002.

FUKUMORI, K.; MATSUSHITA, M.; OKAMOTO, H.; SATO, N.; SUZUKI, Y.; TAKEUCHI, K. (2002) Recycling technology of tire rubber. JSAE Review, v.23, p.259-264. Não impresso

GALATTO, S. L., PETERSON, M., ALEXANDRE, N. Z., da COSTA, J. A. D., IZIDORO, G., SORATO, L., & LEVATI, M. (2009). Incorporação de resíduo do tratamento de drenagem ácida em massa de cerâmica vermelha. Cerâmica, 55, 53-60.

GRUN, E. Caracterização de argilas provenientes de Canelinha - SC e estudo de formulações de massas cerâmicas. 60 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2007.

HAJJAJI, M.; KACIM, S.; BOULMANE, M. Mineralogy and firing characteristics of a clay from the valley of Ourika (Morocco). Applied Clay Science, v. 21, n. 3-4, p. 203-212, 2002.

HILDEBRANDO, E. A.; SOUZA, J. A. S.; NEVES, R. F.. Influência do tipo de argila nas propriedades físico-mecânicas de corpos cerâmicos obtidos com lama vermelha do processo bayer. In: 17^o CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR, 2006.

HOLLEMAN, A. F.; Wiberg, E. "Inorganic Chemistry" Academic Press: San Diego, 2001.

IDEIAS LEGAIS PARA RECICLAR PNEU USADO (2013) – Disponível em: <http://andreaanfrei.blogspot.com.br/2013/12/ideias-legais-para-reciclar-pneu-usado.html> - Acesso em maio/2014

IDEA Cíclica - Instituto para Desenvolvimento Ambiental e Tecnológico. Site oficial da empresa. Disponível em: <<http://www.ideaciclica.org.br>>. Acesso em março/2015.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo S.A Identificação da Destinação de Pneus Inservíveis. Relatório Técnico nº 71.196, vol. I, II, e III. São Paulo, junho 2004.

LIMA, Raimundo Humberto C.; MORENO, Maria Margarita T. Uso da distribuição granulométrica como parâmetro de controle na elaboração da massa cerâmica de composição binária. Cerâmica Industrial, v. 14, n. 5-6, p. 34-38, 2009.

KAMIMURA, Eliane. Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil. 2002. 128 f. Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

MACÊDO, A. N.; COSTA, D. H. P.; TRINDADE, S. R. S.; SOUZA, J. A. S.; CARNEIRO, R. J. F. M.. Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 25-36, 2011.

MACHADO, F.B.; MOREIRA, C.A.; ZANARDO, A; ANDRE, A.C.;GODOY, A.M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A.J.R.; ARTUR, A.C.; OLIVEIRA, M.A.F.de. Enciclopédia Multimídia de Minerais. [on-line].ISBN: 85-89082-11-3 Disponível na Internet via WWW. URL: <http://www.rc.unesp.br/museudpm>. Arquivo capturado em 28 de janeiro de 2015.

MANFREDINI, Constance; SATTLER, Miguel Aloysio. Estimativa da energia incorporada a materiais de cerâmica vermelha no Rio Grande do Sul. *Ambiente Construído*, v. 5, n. 1, p. 23-37, 2005.

MELCHIADES, F.G., PRACIDELLI, S. (1997) Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, 02 (01/02) Janeiro-Abril, p.31-35.

MELLO, R.M. (2006) Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha.Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear-Aplicações Materiais). Instituto e pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo.

MENEZES, R. R. et al. The use of granite wastes as ceramic raw materials. *Cerâmica*, v. 48, n. 306, p. 92-101, 2002.

MENEZES, R. R., De ALMEIDA, R. R., SANTANA, L. N. L., NEVES, G. A., LIRA, H. L., & FERREIRA, H. C. (2007). Analysis of the use of kaolin processing waste and granite sawing waste together for the production of ceramic bricks and roof tiles. *Cerâmica*, 53(326), 192-199.

MONTANO, L.; BIANCHINI, N.; RINCÓN, J.M.; ROMERO, M. (2001). Sintering behavior of pressed red wastes from zinc hydrometallurgy. *Ceramics International*, Oxford, 27: 29-37.

MONTEIRO, L.P.C.; MAINIER, F.B. Queima de pneus inservíveis em fornos de clínquer. *Engevista*, v. 10, n. 1, p. 52-58, 2008.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. (2002). Characterization of clays from Campos dos Goytacazes, North Rio de Janeiro State (Brazil). *Tile & Brick Int*, Vol. 18, p. 152 – 157.

MORADORES DO SUBÚRBIO CONSTRÓI CANAL COM PNEUS USADOS, QUE PREFEITO PROMETEU (2011) – Disponível em: <http://semprenaluta39.blogspot.com.br/2011/08/moradores-do-suburbio-constroi-canal.html> - Acesso em abril/2014

MORAIS, A. S. C. et. al. (2010). Recycling of Fluorescent Lamp Glass into Clayey Ceramic. In: TMS 2011 - 140th Annual Meeting & Exhibition, 2011, San Diego. EPD Congress 2011, 2011. v. 1. p. 1053-1060

MORAIS, D. M.; SPOSTO, R. M. Propriedades tecnológicas e mineralógicas das argilas e suas influências na qualidade de blocos cerâmicos de vedação que abastecem o mercado do Distrito Federal. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 11, n. 5-6, p. 35-38, 2006.

MOTTA, J. F. M.; CABRAL JUNIOR, M.; TANNOM L. C.; ZANARDO, A.; As matérias primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 33-40, 2002.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR, M. As matérias primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 28-39, 2001.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JÚNIOR, M.; TANNO, L. C.; CUCHIERATO, G. As matérias primas plásticas para a cerâmica tradicional: argilas e caulins. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 33-46, 2004.

MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; JUNIOR, Marsis Cabral. As matérias primas cerâmicas. Parte I: o perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. *Cerâmica Industrial*, v. 6, n. 2, p. 28-39, 2001.

MOTHÉ, A. V., VIEIRA, C. M. F., DIAS, C. A. C. M., SÁNCHEZ, R., & MONTEIRO, S. N. (2007). Incorporation of blast furnace sludge into red ceramic. *Cerâmica*, 53(328), 381-387.

NASCIMENTO, Maria Victória Leal de Almeida. Tijolos de adobe confeccionados no Agreste Pernambucano com adição de borracha de pneu triturada. TCC - Universidade Federal de Pernambuco, Engenharia Civil, 2013

NIRSCHL, G.C.; AKASAKI, J.L.; FIORITI C.F.; “Influência da granulometria das fibras de borracha vulcanizada em dosagens de concreto”; 44 °Congresso Brasileiro de Concreto, Belo Horizonte, 2002.

ODA, S. Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação. (Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, EES/USP). 251p. 2000.

ODA, Sandra; JÚNIOR, José Leomar Fernandes. Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 23, p. 1589-1599, 2001.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 50, p. 324-330, 2004.

OLIVEIRA, G. E.; HOLANDA, J. N. F. Utilization of solid waste from siderurgical industry in red ceramic. *Cerâmica*, v. 50, n. 314, p. 75-80, 2004.

PARTES CONSTITUINTES DOS PNEUS DE AUTOMÓVEIS.- BRIDGESTONE - Disponível em: (http://www.bfcompneus.com.br/site/index.php?option=com_content&view=article&id=158:partes-do-pneu&catid=37:dicas&Itemid=56).

PINHEIRO, R. M.; VIEIRA, C.M.F.; RODRIGUEZ, R.S.; MONTEIRO, S.N. (2008) Reciclagem de Resíduo Proveniente de Papel em Cerâmica Vermelha. *Revista Cerâmica Industrial*, São Paulo, v13, nº 1, p.220-227,

PNEUS VELHOS USADOS EM MUROS DE CONTENÇÃO (2013) – Disponível em: http://www.freguesianews.com.br/?opc=meio_freguesia&id_noti=2693 - Acesso em junho/2014

PONTIKES, Y.; RATHOSSI, C.; NIKOLOPOULOS, P.; ANGELOPOULOS, G. N. D.; JAYASEELAN, D.; LEE, W. E.. Effect of firing temperature and atmosphere on sintering of ceramics made from Bayer process bauxite residue. *Ceramics International* 35 (2009) 401–407

PROTÁSIO, T.P., JÚNIOR, M. G., BUFALINO, L., DA SILVA LEITE, E. R., COUTO, A. M., & TRUGILHO, P. F. APROVEITAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA BIOMASSA AGRÍCOLA E FLORESTAL VISANDO A PRODUÇÃO DE ENERGIA-(2010).

RAGHAVAN D., HUYNH H. E FERRARIS C. F.. “ Workability, Mechanical Properties and Chemical Stability of a recycled Tyre Rubber-Filled Cementitious Composite”. *Journal of Materials Science*, 1998, 33, 1745-1752.

RAGHAVAN D.. “Study of Rubber- Filled Cementitious Composites”. *Journal of Applied Polymer Science*, 2000, Vol. 77, 934-942.

RAMOS, L. S. N.(2005) A logística reversa de pneus inservíveis: O problema da localização dos pontos de coleta. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis-SC

RECICLANIP. Para onde vai vão os pneus inservíveis. Disponível em: <http://www.reciclanip.com.br/?cont=formas_de_destinacao_paraondevaos pneusinserviveis>. Acesso em: 15 dez de. 2013.

REIS, Rafael M. M.; BERNUCCI, L. B.; ZANON, Analise L. Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado. *Anais da Reunião de*

Pavimentação Urbana–11º RPU, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, p. 16-19, 2002.

RIBEIRO, Daniel Vêras; MORELLI, Márcio Raymundo. Resíduos Sólidos: problema ou oportunidade. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

RIBEIRO, Mônica Manhães. Material particulado da planta de sinterização de usina siderúrgica integrada em composição de massa de cerâmica vermelha. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Materiais Avançados. Campos dos Goytacazes, 2010.

ROCHA, S.; LINS, V.; SANTO, B. Aspectos do coprocessamento de resíduos em fornos de clínquer. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 16, n. 1, p. 1-10, 2011.

ROCHA, Tereza CJ; SOARES, Bluma G.; COUTINHO, Fernanda MB. Principais copolímeros elastoméricos à base de butadieno utilizados na indústria automobilística. POLIMEROS CIENCIA E TECNOLOGIA, v. 17, n. 4, p. 299, 2007.

RODRIGUES, F.L.; CAVINATTO, V. M. Lixo: de onde vem? para onde vai?. São Paulo, Moderna, 1997.

SABRAH, B.A.; EBIED, E.A. (1987). Utilization of cement-dust a substitute of some Clay content in Clay-sand. Freiburg, 1: 5129-5137.

RECICLAR E REUTILIZAR UM PNEU – Disponível em: <http://www.andif.com.br/ver.php?codigo=398> (2012) – Acesso em agosto/ 2014

SALEIRO, G. T., CARDOSO, S. L., TOLEDO, R., & HOLANDA, J. N. F. (2010). Evaluation of the crystalline phases of supported titanium dioxide in red ceramic. Cerâmica, 56, 162-167.

SANTOS, P. de S. Tecnologia de argilas: Fundamentos. Edgard Blücher Editora Ltda, São Paulo, vol. 1, 1989

SANTOS, P. S. Tecnologia de argilas: aplicação às argilas brasileira. São Paulo: Edgard Blucher, 1975. 340 p.

SEGRE N. , JOEKES I.; “Use of tire rubber particles as addition to cement paste”. Cement and Concrete Research 30 , 2000, 1421-1425.

SEGRE, N.; JOEKES, I.; GALVEZ, A. D.; RODRIGUES, J. A.. Rubber- mortar composites: effect of composition on properties. Journal of Materials Science, v 39, p. 3319-3327, 2004

SEI, J.; TOURÉ, A. A.; OLIVIER-FOURCADE, J.; QUIQUAMPOIX, H.; STAUNTON, S.; JUMAS, J. C.; WOMES, M. Characterisation of kaolinitic clays from the Ivory Coast (West Africa). Applied Clay Science, v. 27, n. 3-4, p. 235-239, 2004

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS (SEBRAE). Cerâmica vermelha para construção: telha, tijolos e tubos. São Paulo: Sebrae Nacional, 2008. 94 p. Sumário Executivo.

SODRÉ, Fernando Fabríz; LENZI, Ervim; COSTA, ACS da. Utilização de modelos físico-químicos de adsorção no estudo do comportamento do cobre em solos argilosos. *Química Nova*, v. 24, n. 3, p. 324-330, 2001.

SOUZA, E. T. A.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Revestimento cerâmico com granito e argila caulínica. *Cerâmica*, São Paulo, v. 50, n. 314, 122-127 p, 2004.

TOLEDO, Rosane. Técnicas Fototérmicas e de Raios-X para o Monitoramento de Sólidos e Gases em Materiais Cerâmicos. 2003. Tese de Doutorado. Ph. D. Thesis.

VAN VLACK, L. H. Propriedades dos materiais cerâmicos. São Paulo: Edgard Blücher, 1973. 318 p.

VIEIRA, C. M. F. e Monteiro, S. N. (2004) Solid state sintering of red ceramic at lower temperatures. *Ceramics International*, v. 30, p. 381-387.

VIEIRA, C. M. F., J. N. F. De HOLANDA, and D. G. PINATTI. "Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes-RJ." *Cerâmica* 46.297 (2000): 14-17.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. (2009). Incorporation of solid wastes in red ceramics - an updated review. *Revista Matéria*, v. 14, n. 3, p. 881 - 905

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Influence of the firing temperature on the microstructure of clays from Campos dos Goytacazes-RJ. *Cerâmica*, v. 49, p. 6-10, 2003.

VIEIRA, C.M.F.,SOARES, T.M.,SÁNCHEZ. R., MONTEIRO, S.N. (2004). Incorporation of granite in red ceramic. *Materials Science and Engineering A* 373 (2004) 115–121

VIEIRA, C.M.F.; ANDRADE, P.M.; MACIEL, G.S.; VERNILLI JR.,F.; MONTEIRO, S.N. (2006). Incorporation of fine steel sludge waste into red ceramic. In: *Materials Science and Engineering A* 427: 142-147.

VILLAREJO, L. P.; IGLESIAS, F. A. C.; MARTÍNEZ, S. M.; ARTIAGA, R.; COSP, J. P.. Manufacturing new ceramic materials from clay and red mud derived from the aluminium industry. *Construction and Building Materials* 35 (2012) 656–665

XAVIER, G.C., SABOYA, F., MAIA, P.C.A., ALEXANDRE, J. (2009) Análise de processos de degradação acelerada em laboratório para estudo da durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito. *Cerâmica*. nº 55, pág. 1-10.