

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola

Área de Concentração: Construções Rurais e Ambiente

VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO POLIMÉRICO  
(SBR) DA INDÚSTRIA CALÇADISTA NA CONFECÇÃO DE  
ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

ITAMAR FERREIRA DA SILVA

Campina Grande – Paraíba  
Fevereiro - 2012

# ITAMAR FERREIRA DA SILVA

## VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO POLIMÉRICO (SBR) DA INDÚSTRIA CALÇADISTA, NA CONFECÇÃO DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutor.

**Orientador:** Prof. Dr. Antônio Farias Leal

**Área de Concentração:** Construções Rurais e Ambiência

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro - 2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFSCar

S586v

Silva, Itamar Ferreira da.

Viabilidade de aplicação do resíduo sólido polimérico (SBR) da indústria calçadista na confecção de elementos construtivos / Itamar Ferreira da Silva. - Campina Grande, 2012.

122f.: il. col.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Farias Leal.

Referências.

1. SBR. 2. Compósitos. 3. Elementos Construtivos. I. Título.

CDU 631.21 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



**PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE**

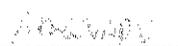
**ITAMAR FERREIRA DA SILVA**

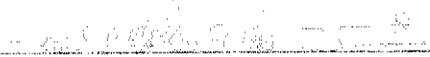
**VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DO RESÍDUO SÓLIDO POLIMÉRICO (SBR)  
DA INDÚSTRIA CALÇADISTA, NA CONFECÇÃO DE ELEMENTOS  
CONSTRUTIVOS**

BANCA EXAMINADORA

PARECER

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Antonio Farias Leal**  
Examinador (DEME/UEPB)

  
\_\_\_\_\_

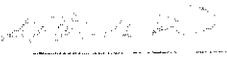
  
\_\_\_\_\_  
**Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento**  
Examinador (TAFEA/UECG)

  
\_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Sandro Marden Torres**  
Examinador (DEMAT/UEPB)

  
\_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Luiz Eduardo Cid Guimarães**  
Examinador (UADI/UECG)

  
\_\_\_\_\_

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Normando Perazzo Barbosa**  
Examinador (CTU/UEPB)

  
\_\_\_\_\_

**FEVEREIRO - 2012**

## Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade de aplicação do resíduo composto de SBR – borracha de estireno butadieno proveniente da indústria calçadista, na produção de elementos construtivos. O resíduo de SBR obtido passou por diversos processamentos e análises, do ponto de vista físico-químico-mineralógico, dentre eles a determinação da granulometria, caracterização do extrato lixiviado, determinação da concentração de pH ao longo do tempo, determinação da absorção de água, tratamento térmico, análise termogravimétrica (TGA), análise por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), análise de determinação de porosidade, análise de espectroscopia por infravermelho (FTIR) e análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para verificação de suas propriedades e seu comportamento quando inserido em matrizes cimentícias, em conjunto com areia em diversas dosagens e fatores de água/cimento, foram realizados ensaios de resistência a compressão simples e de resistência a tensão na flexão em corpos de prova. Através dos resultados obtidos verificou-se que o resíduo possui densidade de  $d = 0,330$ ; apresenta característica hidrofóbica com absorção de água em torno de 10% durante 96h de imersão; libera metais pesados na água quando exposto de forma direta porém pode ser isolado quando encapsulado por pasta de cimento; é de difícil interação com o aglomerante como consequência de sua estrutura física interna e textura externa; o tratamento térmico do resíduo abaixo de 200°C não apresenta melhorias significativas nos corpos de prova confeccionados; exposto entre 200°C a 750°C, o material se degrada perdendo 68% de sua massa; é bastante poroso com índice de 57%; permite a confecção de tijolo através de formas com descanso de 48h. Foram obtidos valores acima de 4MPa nos ensaios de compressão simples dos corpos de prova confeccionados com fator  $f_{a/c} = 0,333$ .

**Palavra-chave:** SBR; compósitos; elementos construtivos

## Abstract

The aim of this work is to study the viability of the application of SBR waste compound – styrene butadiene rubber derived from the footwear industry, in the production of constructive elements. The SBR waste obtained passed through various processes and analyses, in terms of physical-chemical-mineralogical, among them were determination of particle size, characterization of the extract leachate, determination of the pH concentration over time, determination of the water absorption, thermal treatment, thermogravimetric analyses (TGA), energy dispersive spectroscopy analyses (EDS), analyses of the porosity determination, analyses of the infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy analyses (MEV). For the verification of its properties and behavior when inserted into cementitious matrices, along with sand in various dosages and water/cement factors, tests were performed in specimens to determine compressive strength and tension strength in flexion. Through the obtained results it was verified that the waste has a density  $d = 0.330$ ; presents hydrophobic characteristics with water absorption of 10% during 96h of immersion, releases heavy metals in water when exposed directly however can be isolated when encapsulated by cement paste; difficult interaction with the binder as a consequence of its internal physical structure and external texture; the thermal treatment of the waste bellow  $200^{\circ}\text{C}$  does not present significant improvements in the confectioned specimens, exposed between  $200^{\circ}\text{C}$  to  $750^{\circ}\text{C}$ , the material degrades losing 68% of its mass; it is quite porous with contents of 57%, allows the confection of bricks through forms with 48h rest. Values over 4MPa were obtained from the tests of compressive strength in the specimens made with factor  $w/c = 0.333$ .

Key-words: SBR, composite, constructive elements

# Sumário

## 1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo Geral .....	19
1.2 Objetivos Específicos .....	20

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Déficit Habitacional no Semiárido Brasileiro .....	21
2.2 O Uso dos Recursos Naturais na Construção Civil .....	23
2.3 Utilização de Resíduos Sólidos na Confecção de Compósitos .....	25
2.4 Resíduos Sólidos no Brasil .....	28
2.4.1 Resíduos sólidos da indústria de calçados .....	30
2.4.1.1 Borracha de Estireno Butadieno (SBR) .....	31
2.5 Caracterização Físico-Químico-Mineralógica de Resíduos Sólidos.....	34
2.6 Alvenaria de Blocos de Concreto .....	36
2.6.1 Propriedades dos blocos de concreto .....	38

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos Materiais .....	41
3.1.1 Água .....	41
3.1.2 Areia .....	41
3.1.3 Resíduo Sólido de borracha de Estireno Butadieno (SBR) .	41
3.1.4 Cimento .....	42
3.2 Caracterização Físico-Químico-Mineralógica do Composto SBR .....	43
3.2.1 Análise granulométrica .....	43
3.2.2 Ensaio de lixiviação .....	44
3.2.3 Determinação da concentração de pH ao longo do tempo ....	44
3.2.4 Determinação da absorção de água .....	45
3.2.5 Tratamento térmico .....	45
3.2.6 Análise termogravimétrica – TGA .....	46
3.2.7 Análise por espectroscopia de energia dispersiva – EDS .....	46
3.2.8 Análise de espectroscopia de infravermelho – FTIR .....	47
3.2.9 Análise de determinação da porosidade .....	47
3.2.10 Análise por microscopia eletrônica de varredura – MEV .....	47

3.3	Conformação e Ensaio com Corpos de Prova Cilíndricos e Prismáticos	48
3.3.1	Conformação dos corpos de prova para ensaio de compressão simples e de tração na flexão	48
3.3.2	Determinação da resistência à compressão simples e da tração na flexão	50
3.3.3	Determinação da capacidade de absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente	51
3.4	Conformação e Ensaio com Blocos/Tijolos	52

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1	Resultados da Caracterização Físico-Químico-Mineralógica do SBR ..	53
4.1.1	Composição granulométrica do resíduo	53
4.1.2	Composição físico-química do extrato lixiviado	55
4.1.3	Concentração de pH da água ao longo do tempo	57
4.1.4	Resultado do tratamento térmico do resíduo	58
4.1.5	Resultado da absorção de água do resíduo	62
4.1.6	Análise termogravimétrica – TGA	65
4.1.7	Análise de espectroscopia por energia dispersiva – EDS	69
4.1.8	Análise de espectroscopia por infravermelho – FTIR	71
4.1.9	Porosidade do resíduo	73
4.1.10	Microscopia eletrônica de varredura	74
4.2	Resultados dos Ensaio com Corpos de Prova Cilíndricos e Prismáticos	77
4.2.1	Ensaio de referência da compressão simples e da absorção de água dos corpos de prova (cimento : areia) – traços 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6	77
4.2.2	Primeiro Ensaio – Resistência à compressão simples dos corpos de prova (cimento : SBR) – traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6	78
4.2.3	Imagens do interior do corpo de prova (cimento : SBR) – traço 1:6	80
4.2.4	Segundo Ensaio – Resistência à compressão simples dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) – traço 1:4	81

4.2.5	Terceiro Ensaio – Resistência à compressão simples e absorção de água dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) – traço 1:3 .....	84
4.2.6	Quarto Ensaio – Resistência à compressão simples e absorção de água dos corpos de prova (cimento : SBR com e sem tratamento térmico + areia) – traço 1:3 (50% SBR / 50% areia) .....	86
4.2.7	Ensaio de flexão dos corpos de prova (cimento : SBR com e sem tratamento térmico + areia) – traço 1:3 (50% SBR / 50% areia) .....	90
4.3	Resultados dos Testes de Conformação de Blocos/Tijolos em Diversos Métodos .....	95
4.3.1	Ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 – resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm, com e sem tratamento térmico ...	101
4.3.2	Ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 – com 40, 30, 20 e 10% de resíduo retido na peneira 2,4mm, sem tratamento térmico.....	103
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	105
<b>6.</b>	<b>SUGESTÕES</b> .....	107
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	108
<b>ANEXO A</b>	– Método de utilizado para obtenção de extrato lixiviado .....	115
<b>ANEXO B</b>	– Relatórios das análises químicas dos extratos lixiviados .....	116
<b>ANEXO C</b>	– Análise estatística do primeiro ensaio - resistência à compressão simples (cimento : SBR) traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 .....	117
<b>ANEXO D</b>	– Análise estatística do segundo ensaio - resistência à compressão simples (cimento : SBR + areia) traço 1:4 .....	118
<b>ANEXO E</b>	– Análise estatística do terceiro ensaio - resistência à compressão simples (cimento : SBR + areia) traço 1:3 .....	119

<b>ANEXO F</b> – Análise estatística do quarto ensaio - resistência à compressão simples dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) traço 1:3 - resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm com e sem tratamento térmico .....	120
<b>ANEXO G</b> – Resultado do ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos	121
<b>ANEXO H</b> – Análise estatística do ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 com 40, 30, 20 e 10% de resíduo retido na peneira 2,4mm, sem tratamento térmico.....	122

## Lista de Figuras

Figura 1: Copolímero de poliadição .....	31
Figura 2: Artefatos fabricados com SBR .....	32
Figura 3: Blocos vazados de concreto .....	37
Figura 4: Sequência de caracterização do resíduo de SBR .....	39
Figura 5: Diagrama de confecção e dos ensaios dos corpos de prova e tijolos .....	40
Figura 6: Resíduo de SBR .....	41
Figura 7: Resíduo de SBR homogeneizado e quarteado .....	43
Figura 8: T1 = Corpo de prova sem revestimento; T2 = com cobertura de pasta de cimento (CC) e T3 = com cobertura de pasta de cimento e impermeabilizante (CCS) .....	45
Figura 9: Retenção de material nas peneiras.....	54
Figura 10: Retenção de material nas peneiras – SBR beneficiado .....	55
Figura 11: Redução do volume de EVA e SBR após tratamento térmico ....	58
Figura 12: Redução do volume da amostra em relação ao tempo decorrido em estufa a 100°C .....	60
Figura 13: Redução da massa da amostra em relação ao tempo decorrido em estufa a 100°C .....	60
Figura 14: Somatório da massa de água absorvida – Resíduo 9,6mm (sem tratamento térmico) .....	62
Figura 15: Somatório da massa de água absorvida – Resíduo 9,6mm (com tratamento térmico) .....	63
Figura 16: Foto ampliada da parte superior do produto que dá origem ao resíduo .....	64
Figura 17: Foto ampliada da parte inferior do produto que dá origem ao resíduo .....	65
Figura 18: Foto ampliada da parte interna do produto que dá origem ao resíduo .....	65
Figura 19: Análise termogravimétrica do resíduo retido na peneira 2,4mm .	66
Figura 20: Análise termogravimétrica do resíduo retido na peneira 1,2mm .	66
Figura 21: Análise termogravimétrica do resíduo retido na peneira 0,6mm .	67
Figura 22: Análise termogravimétrica do resíduo retido na peneira 0,3mm .	67

Figura 23: Decomposição térmica do resíduo acima de 300°C .....	69
Figura 24: Resultado do EDS da amostra branca .....	69
Figura 25: Resultado do EDS da amostra amarela .....	70
Figura 26: Resultado do EDS da amostra azul .....	70
Figura 27: Resultado do EDS da amostra preta .....	71
Figura 28: FTIR do SBR da cor branca .....	72
Figura 29: FTIR do SBR da cor amarela .....	72
Figura 30: FTIR do SBR da cor azul .....	73
Figura 31: FTIR do SBR da cor preta .....	73
Figura 32: Distribuição do tamanho dos poros .....	74
Figura 33: Imagem adquirida em MEV - SBR / cimento + areia .....	75
Figura 34: Imagem adquirida em MEV do resíduo de SBR polido .....	75
Figura 35: Imagem adquirida em MEV do interior do resíduo de SBR cortado .....	76
Figura 36: Ampliação de imagem do interior do resíduo de SBR cortado ...	76
Figura 37: Tipos de ruptura ocorridas com os corpos de prova (cimento : SBR) traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 .....	79
Figura 38: Fotografias realizadas em microscópio óptico – traço 1:6 (ampliação x6,7, x10, x20 e x40) .....	80
Figura 39: Médias - Tensão / Deformação – 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 (cimento : SBR) .....	81
Figura 40: Retenção de material nas peneiras – AREIA .....	82
Figura 41: Médias - Tensão / Deformação – 1:4 (cimento : SBR + areia) 60/40, 70/30, 80/20 e 90/10 (SBR/areia) .....	83
Figura 42: Médias - Tensão / Deformação - 1:3 (cimento : SBR + areia) 50/50, 60/40 e 70/30 (SBR/areia) .....	85
Figura 43: Médias - Tensão / Deformação – 1:3 (cimento : SBR + areia) 50/50 (SBR HCTT/ HSTT/ 2,4CTT/ 2,4STT : areia) - ensaio de resistência à compressão simples .....	87
Figura 44: Início de ensaio de flexão .....	90
Figura 45: Ruptura do corpo de prova no ensaio de flexão .....	91
Figura 46: Médias - Tensão / Deformação - 1:3 (cimento : areia) .....	91

Figura 47: Médias - Tensão / Deformação – 1:3 (cimento : SBR + areia) 50/50 (SBR HCTT/ HSTT/ 2,4CTT/ 2,4STT : areia) - ensaio de flexão .....	92
Figura 48: Distribuição do resíduo no interior do corpo de prova, A) 1:3 (cimento: 50% SBR2,4 STT + 50% areia), B) 1:3 (cimento: 50% SBRHomo STT + 50% areia).....	93
Figura 49: Comparação entre os dados de compressão simples, absorção e flexão .....	94
Figura 50: Forma para confecção de tijolos – procedimento batidas ao chão .....	95
Figura 51: Composição do traço 1:3 (cimento : 50% SBR+ 50% areia) .....	95
Figura 52: Desmoldagem do tijolo .....	96
Figura 53: Máquina manual de confecção de tijolo de solo/cimento .....	97
Figura 54: Vista lateral do tijolo desmoldado .....	97
Figura 55: Vista em perspectiva do tijolo desmoldado .....	98
Figura 56: Vista em perspectiva do tijolo desmoldado traço 1:3 (cimento : 80% SBR+ 20% areia) .....	98
Figura 57: Detalhe da rachadura do tijolo desmoldado traço 1:3 (cimento : 80% SBR + 20% areia) .....	99
Figura 58: Detalhe da rachadura do tijolo durante a tentativa de retirada da forma traço 1:3 (cimento : 80% SBR+ 20% areia) .....	99
Figura 59: Tijolos retirados da forma de descanso após 48 horas .....	100
Figura 60: Médias - Tensão / Deformação - tijolo 1:3 (cimento : SBR 50% HCTT/ HSTT/ 2,4CTT/ 2,4STT + 50% areia) .....	101
Figura 61: Médias - Tensão / Deformação - tijolo 1:3 (cimento 40, 30, 20 e 10% SBR 2,4STT + 50% areia) .....	103

## Lista de Tabelas

Tabela 01 - Composição granulométrica do resíduo (1000g) .....	53
Tabela 02 - Composição granulométrica do resíduo beneficiado (1000g)	54
Tabela 03 - Redução do volume e da massa do resíduo retido na peneira 2,4mm e homogeneizado após tratamento térmico de 96h a 100°C.....	59
Tabela 04 - Redução do volume e da massa unitária dos resíduos retidos nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm após tratamento térmico de 96h a 100°C .....	61
Tabela 05 - Absorção de água - Resíduo retido na peneira 9,6mm (sem tratamento térmico) .....	62
Tabela 06 - Absorção de água - Resíduo retido na peneira 9,6mm (com tratamento térmico) .....	63
Tabela 07 - Massa seca, massa saturada, massa imersa, densidade aparente, absorção, porosidade aparente dos corpos de prova (cimento : areia) traços 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 .....	77
Tabela 08 - Composição granulométrica da areia (amostra 1000g) .....	82
Tabela 09 - Massa seca, massa saturada, massa imersa, densidade aparente, absorção, porosidade aparente dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) traço 1:3 .....	85
Tabela 10 - Massa seca, massa saturada, massa imersa, densidade aparente, absorção, porosidade aparente dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) – com e sem tratamento térmico homogeneizado e retido na peneira 2,4mm - traço 1:3 (50% SBR / 50% areia)	88
Tabela 11 - Massa seca, massa saturada, massa imersa, densidade aparente, absorção, porosidade aparente dos tijolos (cimento : SBR + areia) sem tratamento térmico traço 1:3 (10, 20 e 30%) de substituição.....	104

## Lista de Quadros

Quadro 01 - Classificação dos pigmentos inorgânicos baseada na cor – Sistema recomendado pela ISO (International Standard Organization) .....	33
Quadro 02 - Ensaio físico do cimento CP – Z – 32, especificações e normas .....	42
Quadro 03 - Ensaio químico do cimento CP – Z – 32, especificações e normas .....	42
Quadro 05 - Composição dos corpos de prova de referência (cimento : areia) traços 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 .....	49
Quadro 06 - Composição dos corpos de prova da 1ª moldagem (1:2,1:3, 1:4, 1:5 e 1:6) .....	49
Quadro 07 - Composição dos corpos de prova da 2ª moldagem (1:4) .....	49
Quadro 08 - Composição dos corpos de prova da 3ª moldagem (1:3) .....	49
Quadro 09 - Composição dos corpos de prova da 4ª moldagem (1:3) para ensaios de resistência à compressão simples e tração na flexão .....	50
Quadro 10 - Equações e unidades das propriedades de densidade aparente, absorção e porosidade aparente .....	51
Quadro 11 - Composição dos blocos/tijolos para ensaios de resistência à compressão simples .....	52
Quadro 12 - Resultado da análise do extrato lixiviado do resíduo de SBR... ..	56
Quadro 13 - Resultado da análise físico-química do extrato lixiviado da amostra 1:3 (cimento: 50% SBR + 50% areia) mergulhado em água por 60 dias.....	57
Quadro 14 - Valores médios do pH dos tratamentos T1, T2 e T3 ao longo de 60 dias .....	57
Quadro 15 - Resultado da perda de massa dos resíduos retidos nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm durante o ensaio de TGA.....	68
Quadro 16 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples (cimento : areia) traços 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 .....	77

Quadro 17 - Resultado do primeiro ensaio - resistência à compressão simples (cimento : SBR) traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 .....	78
Quadro 18 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples (cimento : SBR + areia) traço 1:4 .....	83
Quadro 19 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples (cimento : SBR + areia) traço 1:3 .....	84
Quadro 20 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) traço 1:3 - resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm com e sem tratamento térmico.....	87
Quadro 21 – Médias das resistências à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos ensaiados no experimento .....	89
Quadro 22 - Resultado do ensaio de flexão (cimento : SBR + areia) traço 1:3 – resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm com e sem tratamento térmico .....	92
Quadro 23 – Resultado de compressão simples, absorção e flexão dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos traço 1:3 (50% SBR – homogeneizado e retido na 2,4mm, com e sem tratamento térmico + 50% areia) .....	94
Quadro 24 – Resultado do ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 - resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm, com e sem tratamento térmico .....	101
Quadro 25 - Comparação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples nos corpos de prova e nos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 – resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm, com e sem tratamento térmico ....	102
Quadro 26 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 com 40, 30, 20 e 10% de resíduo retido na peneira 2,4mm, sem tratamento térmico .....	103

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua presença em minha vida.

A meus pais, irmãs, esposa e filhos, pela fé depositada em minha pessoa.

Ao Orientador Prof. Dr. Antonio Farias Leal que, acima de tudo, apresentou-se como um verdadeiro amigo ao longo desta caminhada, repassando seus conhecimentos tão importantes e fundamentais para a concretização desta Tese.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, cujos ensinamentos abriram novos horizontes na minha formação acadêmica.

Ao Prof. Dr. Marcus Vinicius Lia Fook, da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, pelos contatos com a empresa fornecedora da matéria-prima.

Ao Prof. Dr. André Fiquene de Brito, da Unidade Acadêmica de Engenharia Química, por disponibilizar pessoal e equipamento do LABGER para a realização de análises.

À Profa. Dra. Lucia Helena Garófalo Chaves, da Unidade Acadêmica em Engenharia Agrícola, por disponibilizar o Laboratório de Irrigação e Salinidade para verificação de parâmetros químicos do material utilizado.

À Profa. Dra. Anne Mary Konnig, da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, por disponibilizar seu tempo e material bibliográfico para consulta.

Ao Prof. Msc. João Baptista da Costa Agra de Melo, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, por cooperar e auxiliar no registro fotográfico das amostras no Laboratório de Microscopia.

Ao Prof. Msc. Ademir Montes Ferreira, por disponibilizar o uso das instalações e equipamentos da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil.

Aos professores Drs. Gelmires Araújo Neves, Heber Carlos Ferreira e Hélio de Lucena Lira, pela disponibilidade de equipamentos visando à realização de ensaios.

Aos companheiros de labuta no Laboratório de Reciclagem, pela companhia nas moldagens e ensaios com os corpos de prova.

Enfim, a todos que, de alguma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste sonho. Sem vocês nada disso seria possível.

O meu Muito Obrigado!

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

<b>PIB</b>	–	<b>Produto Interno Bruto</b>
<b>EVA</b>	–	<b>Acetato de Vinila</b>
<b>SBR</b>	–	<b>Borracha de Estireno Butadieno</b>
<b>UNC</b>	–	<b>União Nacional da Construção</b>
<b>FGV</b>	–	<b>Fundação Getúlio Vargas</b>
<b>IBGE</b>	–	<b>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</b>
<b>ABNT</b>	–	<b>Associação Brasileira de Normas Técnicas</b>
<b>ABRELPRE</b>	–	<b>Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais</b>
<b>ABRE</b>	–	<b>Associação Brasileira de Embalagem</b>
<b>STT</b>	–	<b>Sem Tratamento Térmico</b>
<b>CTT</b>	–	<b>Com Tratamento Térmico</b>
<b>H</b>	–	<b>Homogeneizado</b>
<b>ITEP</b>	–	<b>Instituto de Tecnologia de Pernambuco</b>
<b>UFCG</b>	–	<b>Universidade Federal de Campina Grande</b>
<b>CTRN</b>	–	<b>Centro de Tecnologia e Recursos Naturais</b>
<b>MPa</b>	–	<b>Megapascal</b>
<b>Kgf</b>	–	<b>Quilograma-Força</b>
<b>N</b>	–	<b>Newton</b>
<b>LABDES</b>	–	<b>Laboratório de Referência em Dessalinização</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos o setor da construção civil se vem destacando no cenário nacional com representatividade na geração de emprego e renda de toda a cadeia produtiva, evento extremamente importante no crescimento do PIB. Apesar desta situação, o Brasil apresenta um déficit habitacional alto, principalmente nas regiões Sul e Nordeste, nesta última se sobressaindo a zona rural inserida no semiárido brasileiro, com intensa pobreza e problemas climáticos.

Do ponto de vista habitacional, o nordeste brasileiro vem sendo menosprezado pelos órgãos públicos e privados e que, embora apresentem programas e projetos desconsideram, por outro lado, os custos elevados da construção, ainda mais para uma população que vive do campo e possui grande dificuldade de geração de renda fixa.

Apesar do crescimento da construção civil, este setor possui, como pontos negativos, o uso irracional de recursos naturais não-renováveis que são empregados em diversas etapas construtivas e a produção considerável de resíduos sólidos, resultado da falta de planejamento e organização.

Tentando dirimir o problema habitacional e a questão do resíduo sólido, institutos de pesquisas e universidades passaram a analisar a possibilidade de incorporação de resíduos sólidos, tanto da construção civil como industriais, no desenvolvimento de blocos compostos como alternativa de baixo custo e sustentável para diminuição do uso de recursos naturais.

Em relação aos resíduos da construção civil, as pesquisas apresentam diversos resultados expressivos tendo em vista que esse material é inerte e possui, na sua maioria, densidade satisfatória para seu uso na composição de blocos de vedação e até mesmo estrutural; todavia, o uso dos resíduos industriais demanda uma série de estudos e análises visto que os materiais podem conter substâncias químicas, como metais pesados que, em determinada quantidade e situação de exposição, podem contaminar os seres humanos.

A caracterização dos materiais industriais do ponto de vista físico-químico-mineralógica através de equipamentos específicos e de alta precisão, permite um conhecimento maior em relação ao comportamento do resíduo, com simulações em diversas situações de uso, tornando possível um direcionamento mais adequado da sua aplicação para que seja menos agressivo ao meio ambiente e ao homem.

Para viabilizar o uso de resíduos na construção civil faz-se necessário que o mesmo se apresente de maneira constante e em quantidade considerável, para tornar sua aplicação

realmente viável, o que já vem ocorrendo no nordeste do Brasil, no setor de calçados, com a implantação de indústrias nos estados do Ceará, Bahia e Paraíba. A indústria de calçados, cuja produção vem apresentando crescimento anual, é responsável pela geração de uma enorme quantidade de resíduos de difícil degradação e com grande poder de contaminação do meio ambiente.

O crescimento constante da produção deve estar associado diretamente ao tratamento a ser dado ao resíduo produzido por essas empresas, abrindo margem para a reciclagem desses resíduos através de sua incorporação a outros produtos.

Dentre os materiais que necessitam de grande atenção estão o EVA (acetado de vinila) e o SBR (composto de estireno butadieno), em que este último, apenas uma empresa no estado da Paraíba é responsável por produção diária de 3 a 4 toneladas de resíduo, que são encaminhadas para empresas de cimento como fonte de geração de calor em fornos.

Esses materiais se apresentam como agregados leves podendo ser incorporados na elaboração de blocos, tijolos e painéis, com função de isolamento térmico e acústico e até mesmo como elementos construtivos estruturais, possibilitando a redução dos custos das habitações populares no nordeste do Brasil, bem como sua presença nos depósitos sanitários.

A partir dos dados apresentados foi vislumbrada a possibilidade incorporação de resíduo de SBR no desenvolvimento de elementos construtivos compósitos como alternativa sustentável para diminuição do uso de recursos naturais pelo setor da construção civil.

O estudo se justifica de vez que procura contribuir com a redução, tanto do uso de recursos naturais não renováveis como da incidência no meio ambiente de resíduos sólidos oriundos de processos industriais.

## **1.1 Objetivo Geral**

O estudo teve como objetivo geral analisar a viabilidade de aplicação do resíduo sólido polimérico (SBR) da indústria calçadista, na confecção de elementos construtivos.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar as propriedades físico-químico-mineralógicas do composto de SBR;
- Determinar as propriedades físico-mecânicas do composto de matriz cimentícia com agregado leve (SBR);
- Avaliar a viabilidade técnica da utilização de resíduos na produção de blocos/tijolos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Déficit Habitacional no Semiárido Brasileiro

De acordo com Brasil (2008) o problema da moradia continua sendo um dos principais desafios dos governantes e do setor privado, no País. Apesar da ação conjunta de diferentes ministérios, secretarias estaduais, companhias municipais de habitação e entidades de classe, o Brasil ainda apresenta um déficit na ordem de 6 milhões de moradias.

Conforme estudo da UNC em parceria com a FGV, para combater o déficit habitacional brasileiro seriam necessários investimentos da ordem de R\$ 160 bilhões aplicados ao longo de 16 anos, e as projeções do IBGE, são as de que, em 2050, haverá déficit habitacional superior a 30 milhões de unidades.

Em 2008 o déficit habitacional estimado correspondia a 5,546 milhões de domicílios dos quais 4,629 milhões, ou 83,5%, estavam localizados nas áreas urbanas.

Do total do déficit habitacional 36,9% se localizam na região Sudeste, o que corresponde a 2,046 milhões de unidades; em seguida, vem a região Nordeste, com 1,946 milhão de moradias estimadas como déficit, o que corresponde a 35,1% do total, sendo que 1,305 milhão de unidades necessárias nas áreas urbanas e 641 mil moradias necessárias nas áreas rurais, na sua maioria inseridas no semiárido brasileiro.

A Região Nordeste ocupa 18,27% do território brasileiro, com uma área de 1.561.178km<sup>2</sup>; o semiárido é a área de maior abrangência territorial dentre os espaços naturais que compõem a região Nordeste do Brasil (acima dos 60%) (MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO SOCIAL, 2009).

De acordo com Júnior (2007), em 10 de março de 2005 o Ministério da Integração Nacional assinou, na cidade de Almenara, no nordeste de Minas Gerais, a Portaria que instituiu a nova delimitação do semiárido brasileiro atualizando os critérios de seleção e os municípios que passam a fazer parte dessa região.

Para a nova delimitação tomaram-se, por base, três critérios técnicos:

- I - precipitação pluviométrica média anual, inferior a 800mm;
- II - índice de aridez de até 0,5, calculado pelo balanço hídrico que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990;

III - risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.

Com a implantação desses critérios foram incluídos mais 102 municípios aos 1.031 que faziam parte do semiárido brasileiro obtendo-se um acréscimo de 8,66% em relação à área anterior, aumentando de 892.309km<sup>2</sup> para 982.563km<sup>2</sup>, sendo composto por 1133 municípios dos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e norte de Minas Gerais. De acordo com o Ministério do Desenvolvimento Social (2009) com essa modificação a população do semiárido passou para aproximadamente 20.858.264 de pessoas, das quais, 44% residindo na zona rural.

Do ponto de vista físico-climático o semiárido se caracteriza por médias térmicas elevadas (acima de 26°C) e duas estações bem distintas: uma seca, na qual chove muito pouco e uma úmida, quando ocorrem precipitações irregulares que vão de 300 a 800mm, dependendo da região; esta má distribuição das chuvas, associada a uma alta taxa de evaporação, resulta no fenômeno da seca que, periodicamente, assola a população da região.

O semiárido brasileiro é uma região de intensa pobreza, principalmente nas comunidades rurais cuja renda per capita média não chega a um salário mínimo, situação que se agrava ainda mais com o déficit habitacional existente, que ultrapassa 640 mil unidades. Para manter o homem no campo faz-se necessário o mínimo de infraestrutura relacionada sobretudo à moradia residencial, ambientes para criação e suportes para plantio; qualquer ação que por ventura venha tentar sanar um desses itens por meio de reformas ou construções, deve levar em consideração a redução dos custos operacionais e de aquisição de matéria-prima.

Apesar de se tratar de uma das regiões menos populosas seu déficit habitacional é bastante expressivo pois representa 35,1% do total de moradias necessárias em todo o país. Para essas regiões de dificuldade extrema com baixa renda familiar e problemas climáticos, verifica-se urgência do surgimento de soluções de baixo custo como meio de maximizar as ações que viabilizem a permanência do homem no campo. Manter o homem em suas terras colabora em minimizar os problemas habitacionais existentes nos centros urbanos tendo em vista que as cidades apresentam déficit habitacional, tão maior quanto da zona rural, consequência sobretudo do êxodo rural.

Dentro desta perspectiva percebe-se que o setor da construção civil tem papel estratégico como aglutinador de soluções porém ao mesmo tempo em que existe a necessidade de construções de moradias há, também, o efeito devastador do meio ambiente

desse mesmo setor, em decorrência do descontrole da exploração de recursos naturais e da enorme geração de resíduos.

## **2.2 O Uso dos Recursos Naturais na Construção Civil**

A construção civil, seja na zona urbana ou rural, se utiliza dos recursos naturais não renováveis para sua execução. De acordo com John (2000) a atividade da construção civil consome cerca de 15 a 50% dos recursos naturais. Como agravante tem-se que, de todos os resíduos sólidos produzidos em centros urbanos de médio e grande porte no Brasil, cerca de 50 a 80% de valores em massa são provenientes de entulhos produzidos da construção civil (LATTERZA, 2000).

Como forma de reduzir os custos operacionais e de aquisição de matéria-prima, muitas empresas começaram a analisar e a testar a incorporação de resíduos sólidos oriundos de construções e de processos industriais na composição de elementos construtivos, tendo o cimento como aglomerante.

No Brasil, a produção de agregados para a construção civil em 2005, foi da ordem de 331 milhões de toneladas, entre pedras britadas (41%) e areia (59%), com crescimento de 4,8% em relação a 2004. Pelo lado da demanda verificou-se que 70% do consumo de brita se encontravam associados à mistura com cimento Portland (MELO et al., 2009).

Nos últimos anos tem ocorrido aumento considerável na geração de resíduos sólidos no Brasil resultado, provavelmente, do grande crescimento das atividades industriais em conjunto com o processo de urbanização das cidades. A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) relata, em seu relatório intitulado Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, edição 2009, que o país gerou mais de 57 milhões de toneladas de resíduos sólidos em 2009, ou seja, crescimento de 7,7% em relação ao volume do ano anterior (ÁGUA ONLINE, 2010).

Hoje, boa parte dos aterros sanitários e lixões não consegue conter a quantidade de resíduos sólidos geradas diariamente, havendo a necessidade de se reciclar boa parte do que é produzido porém, conforme Farias (2010) apenas 13% de todo o resíduo gerado no Brasil são reciclados, número este considerado baixo em relação a países como a Holanda (39%), Suíça (31%) e Dinamarca (29%) (ABRE, 2010).

Uma solução interessante para a manipulação dos resíduos sólidos é a elaboração de compósitos, tendo em vista diversos estudos de sua aplicação na forma de painéis, telhas, blocos e divisórias, como isolante térmico, acústico e até mesmo como elemento estrutural em habitações populares.

De acordo com Pimentel (2005), o setor da construção civil se destaca pelo grande potencial em absorver vários tipos de resíduos industriais utilizando-se principalmente de processos e métodos construtivos pré-fabricados, que deixam a obra mais “enxuta”, reduzindo seu custo, gerando menos resíduos e ainda preservando o meio ambiente.

Conforme Bezerra (2002) o reúso ou recuperação desses resíduos industriais, além de ajudar nas questões sanitárias e na preservação das reservas naturais de matérias-primas, elimina custos com armazenamento proporcionando economia para as empresas.

A reutilização e a reciclagem de resíduos, após a detecção de suas potencialidades, são consideradas atualmente alternativas que podem contribuir para a diversificação de produtos, diminuição dos custos de produção, fornecimento de matérias-primas alternativas para uma série de setores industriais, conservação de recursos não renováveis, economia de energia e, sobretudo, melhoria da saúde da população (MENEZES et al., 2007).

Comumente se utiliza o resíduo de construção e demolição para elaboração de compósitos porém novas pesquisas buscam encontrar aplicabilidade para os resíduos industriais. Todavia, este tipo de resíduos demanda uma série de estudos e análises haja vista que os materiais podem conter substâncias químicas passíveis de contaminação dos seres humanos; além disto, torna-se imprescindível que o mesmo se apresente de maneira constante e em quantidade considerável, para tornar sua aplicação realmente viável.

Neste contexto se encontra a indústria calçadista que, em decorrência de fatores relacionados ao surgimento de materiais sintéticos, vem gerando resíduos de difícil degradação além de perigosos para o meio ambiente. Segundo a Brazilian Footware (2010) foram produzidos, em 2009, no Brasil, cerca de 725 milhões de pares de calçado, gerando, conseqüentemente, uma quantidade considerável de resíduos de materiais sintéticos, como a borracha de Estireno Butadieno (SBR), hoje amplamente utilizada nos processos de fabricação de calçados, sobremaneira como solado. Após passagem por autoclaves, as sobras deste material, retornam ao processo produtivo como matéria-prima, porém boa parte não utilizável serve de combustível em fornos industriais.

## 2.3 Utilização de Resíduos Sólidos na Confeção de Compósitos

O aproveitamento de resíduos industriais através de seu uso em materiais destinados à construção civil, tem sido uma alternativa com grande potencial, possibilitando a redução dos custos dos produtos da construção (ROCHA, 2003).

Os resíduos gerados no setor da construção civil se apresentam como de baixa periculosidade, facilitando seu estudo e aplicação mas outros setores, como o calçadista, geram resíduos de difícil degradação, surgindo a necessidade de realização de ensaios de caracterização para conhecimento das propriedades físico-químico-mineralógicas intrínsecas ao material.

Garlet (1998) apresentou as aplicações e vantagens na construção civil para o uso de compósitos leves obtidos a partir de agregados de EVA, trazendo contribuições no que se refere ao estudo da granulometria do resíduo de EVA, da dosagem e do comportamento dos compósitos, no estado fresco e endurecidos.

Silva (2003) estudou a incorporação de resíduos de EVA – Etileno Acetato de Vinila (em volume) em tijolos prensados de terra crua com teores de cimento Portland definidos em 6, 8 e 10%, adotando para EVA os teores de 10, 20, 30, 40 e 50% e utilizando duas granulometrias diferentes (EVA = 2,4mm e EVA = pó). Os dados apresentados sobre a resistência à compressão dos tijolos em idade de 28 dias mostraram que, à medida em que se aumentam o teor do resíduo e o tamanho da partícula, a resistência reduz sensivelmente.

Zattera et al. (2005) caracterizaram os resíduos de EVA provenientes de chapas expandidas quanto à morfologia, propriedades térmicas e propriedades mecânicas e determinaram o custo da moagem desses resíduos, visando à sua reutilização.

Rios (2008) analisou a incorporação de resíduos de calçados (SBR) na produção de compósitos leves, destacando-se nos seus estudos os ensaios de inflamabilidade, resistência ao impacto e condutividade elétrica.

Santiago (2008) estudou a utilização de agregados de EVA e resíduo da construção Civil para a obtenção de concretos leves, enquanto Melo & Filho (2009) analisaram as avaliações de cargas de ocupação e impactos em paredes construídas com blocos de EVA; finalmente, Freitas et al. (2009) estudaram o desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno butadieno reciclada de pneus e constataram que o conteúdo de SBR crescente na mistura, diminuiu o desempenho do concreto.

Serrano (2009) estudou a influência da incorporação de diferentes concentrações do resíduo SBR nas propriedades mecânicas e térmicas dos compostos de SBR, para solados.

Weber et al. (2011) propuseram desenvolver e caracterizar formulações contendo um tipo de resíduo industrial, proveniente da fabricação de perfis automotivos, à base de SBR, para possível aplicação na própria empresa; já Alves et al. (2011) procuraram demonstrar o uso do SBR como matéria-prima em nanomateriais (nanotubos e nanofibras) objetivando dar um novo destino aos resíduos de produtos confeccionados com este material.

Uma das soluções encontradas para utilização do resíduo consiste na elaboração de compósitos em substituição parcial de determinado agregado.

Segundo Callister (2006) compósitos são materiais multifásicos constituídos de um ou dois materiais, sendo: uma fase contínua, também chamada matriz, e outra dispersa, chamada carga ou reforço (fibra ou partículas) havendo, também, a camada limite entre os dois, conhecida como interface. Nos compósitos os reforços são impregnados pela matriz permanecendo seus constituintes conservados de suas características individuais. Por definição, um material compósito consiste na combinação de dois ou mais materiais fisicamente distintos, que mantêm suas propriedades individuais sem que haja, necessariamente, interação química extensa entre eles mas que, através da combinação dos constituintes, se obtenha produtos com propriedades específicas para determinada aplicação, incapazes de serem atendidas pelos constituintes individuais.

Compósitos planos e tubulares são testados visando à determinação das suas resistências mecânicas pois as propriedades mecânicas de um material definem sua capacidade de transmitir e resistir aos esforços que lhes são aplicados. Para determinação dessas propriedades nos corpos de prova, são aplicadas cargas sobre os mesmos, expressas em Kgf ou N, as quais resultam em uma distribuição interna de forças ou componentes de forças que podem resultar em mudança na sua forma (CALLINSTER, 2002).

Este novo produto pode ser empregado para os mais variados fins, desde isolante térmico, acústico, até mesmo como elemento estrutural oferecendo maior confiabilidade e vantagens sobre os materiais convencionais, flexibilizando o desenvolvimento de projeto e possibilitando a economia no processo de produção.

Os materiais compósitos possuem a seguinte classificação quanto à natureza de seus componentes:

- Microcomposto – ligas metálicas e plástico reforçado;
- Macrocomposto – asfalto, aço galvanizado, concreto armado;

- Compostos naturais – madeira, osso, bambu

De acordo com Dantas (2004) os compósitos podem ser classificados em função da morfologia de seus agentes de reforços:

- a) Compósitos particulados – consistem de partículas dispersas em uma matriz, nas formas esféricas, planas, elipsoidais, maciças, ocas etc. Em geral, os reforços são de origem mineral e neste caso, normalmente se obtém um aumento da rigidez sem que haja melhoria da resistência à tração do compósito;
- b) Compósitos fibrosos – consistem de fibras aderidas a uma matriz podendo ser longas ( $l > 15$  cm), ou curtas ( $l < 15$  cm), possuindo disposição orientada ou aleatória. São materiais que, em geral, apresentam elevado módulo de elasticidade e resistência à tração;
- c) Compósitos laminados – consistem na combinação de materiais em várias camadas individuais, podendo ser de três tipos: camadas em várias direções, sanduíche, esqueletos ou colmeias;
- d) Compósitos fibrosos híbridos – fazem parte de uma classe que envolve compósitos fibrosos e laminados, inclusos os vários tipos de reforços, como: fibra/partícula e/ou vários tipos de fibras e partículas.

Um compósito é formado por matriz, do reforço e da camada limite entre os dois (interface).

Uma matriz, além de ser responsável pelo aspecto externo do compósito e de proteger o reforço contra ataques químicos e físicos tem, como principal função, dispersar ou aglomerar o reforço e, quando submetida a uma tensão, deve ser capaz de distribuir e transferir as tensões para o componente de reforço. A matriz é um componente importante do compósito já que é ela que transfere as tensões, protege as cargas e/ou reforços, melhora as propriedades de resistência ao impacto e fissuramento sob pressões ambientais e também contribui para facilitar a usinagem e modelagem (DANTAS, 2004).

A matriz consiste na fase contínua do compósito e é responsável pela transferência e homogeneização dos esforços suportados pelos componentes de reforço. Mano (2000) descreve que a matriz de um material compósito pode ser dúctil (orgânica ou polimérica) ou frágil (matrizes de vidro e cimentícias). Em compósitos de matriz cimentícias é utilizado

principalmente o cimento portland. Trata-se de pó fino com propriedade aglomerante, aglutinante ou ligante, que endurece definitivamente sob a ação da água (ABCP, 2002).

A denominação do cimento portland é feita pelo prefixo CP (cimento portland), acrescido de algarismo romano, conforme o tipo de cimento CP I, CP I-S (com adição), CP II-E (composto com escória), CP II-Z (composto com pozolana), CP II-F (composto filer), CP IV (pozolânico de alta resistência), CP V-ARI (Alta resistência inicial) e classe de resistência à compressão mínima após 28 dias de cura, pelos valores 25, 32 e 40MPa. A determinação da resistência à compressão é feita com base na NBR 7215 (ABNT, 1997).

A fase dispersa (carga ou reforço) é composta dos constituintes que, de uma maneira ou de outra, afetam determinadas propriedades do compósito em relação à matriz. Podem ser considerados reforços desde simples cargas minerais muitas vezes incorporadas aos polímeros com o intuito de reduzir custos, até fibras de alta resistência (DANTAS, 2004).

Os elementos de reforço são definidos em função da aplicação do moldado possuindo, como principais requisitos: a melhoria das qualidades desejadas, baixa absorção de umidade, boa impregnação da matriz, baixo custo e disponibilidade (DANTAS, 2004).

Os reforços são responsáveis pela resistência mecânica do material enquanto a matriz conserva a disposição geométrica das cargas, bem como as protege do ambiente exterior. As propriedades mecânicas teóricas de um compósito dependem, sobremaneira, das propriedades dos materiais constituintes (matriz + fase dispersa).

## **2.4 Resíduos Sólidos no Brasil**

Atualmente, dentre os diversos problemas ambientais existentes, os relacionados aos resíduos sólidos urbanos têm-se tornado um dos maiores desafios da humanidade. Com o crescimento acelerado da população houve uma transformação na produção de bens e serviços. Esta, por sua vez e à medida em que são produzidos e consumidos, acarreta uma geração cada vez maior de resíduos, os quais, coletados ou dispostos inadequadamente, trazem significativos impactos à saúde pública e ao meio ambiente (ABREU, 2004).

O surgimento de novas leis ambientais, aplicando severas multas, e o aumento da fiscalização pelos órgãos competentes, têm aumentado, forçosamente o número dos adeptos do “ecologicamente correto” (GARLET, 1998 apud LEAL, 2004).

Ângulo et al. (2001) ainda consideram pouco expressiva a reciclagem de resíduos no Brasil para utilização como materiais de construção, quando comparado aos países desenvolvidos.

É fácil identificar a problemática do resíduo sólido no Brasil, especialmente nos grandes centros, em virtude do volume produzido ser maior do que a capacidade de armazenamento dos depósitos municipais. Além disso, com o crescimento horizontal das cidades, áreas antes afastadas utilizadas para comportar os resíduos sólidos, começam a se tornar “vizinhança” de setores residenciais, trazendo problemas de saúde aos moradores da região.

Outro agravante consiste no desenvolvimento tecnológico, em especial com o surgimento de novos materiais e processos que geram resíduos industriais em grande quantidade e de difícil degradação no meio ambiente. Boa parte desses resíduos não permite sua reciclagem havendo, assim, a necessidade de se criar mecanismos para que o produto, depois de consumido, possa ser reintroduzido na cadeia produtiva, na forma de matéria-prima, para novos produtos.

Segundo NBR 10.004 (ABNT, 2004a), todo resíduo nos estados sólido e semissólido resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos, nesta definição, os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam, para isto, soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004a), os resíduos são classificados da seguinte maneira:

- a) Resíduos Classe I – Perigosos: aqueles que apresentam periculosidade, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- b) Resíduos Classe II – Não Perigosos: aqueles que não apresentam periculosidade como, por exemplo, resto de alimentos, sucata de metais ferrosos e não ferrosos, papel e papelão, plástico, borracha, madeira, material têxtil, minerais não-metálicos, areia de fundição, bagaço de cana entre outros;
- c) Resíduos Classe IIA – Não Inertes: aqueles que apresentam biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água;

- d) Resíduos Classe IIB - Inertes: aqueles que, quando submetidos a contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada em temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se os seguintes aspectos: cor, turbidez, dureza e sabor.

Um setor produtivo que vem crescendo e, por consequência, gerando uma quantidade considerável de resíduos, é o calçadista. Este setor vem sendo alvo de várias pesquisas como, a de Garlet (1998) que estudou o aproveitamento de resíduo de EVA, como agregado para concreto leve na construção civil, e o de Kern (1999) que desenvolveu estudo da viabilidade da incorporação de resíduos de contrafortes de calçados em matriz de gesso, para uso como materiais de construção civil.

O surgimento de novos materiais abre um leque de possibilidades de experimentos para reaproveitamento de resíduos que necessitam de envolvimento de profissionais de diversas áreas, como engenharia de materiais, química, biologia, saneamento, desenho industrial etc.

Conforme Bezerra (2002) o reúso ou recuperação desses resíduos, além de ajudar nas questões sanitárias e na preservação das reservas naturais de matérias-primas, elimina custos com armazenamento, proporcionando economia para as empresas.

#### **2.4.1 Resíduos sólidos da indústria de calçados**

Todo o processo produtivo gera algum tipo de resíduo, seja ele na forma de gás, líquido ou sólido. Não diferente, a indústria calçadista, que se destaca no cenário nacional e que no ano de 2009 produziu 725 milhões de pares<sup>1</sup>, é responsável por uma quantidade considerável de resíduos sólidos decorrente das etapas de produção.

Durante a fabricação do calçado são gerados resíduos na forma de retalho (sobras), oriundos do processo de corte de possíveis refugos de solado, entressola ou palmilha do calçado, e os resíduos em forma de pó, resultado do lixamento do calçado na fase de acabamento (RIOS, 2008).

---

<sup>1</sup> Disponível em <http://www.mundocouro.com.br/brasil-couro-e-calçadista> acessado em 19 de março de 2010

Os resíduos em pó surgem durante o acabamento das peças e são facilmente aproveitados pelas indústrias, podendo servir como cargas de volta ao processo de fabricação (GARLET, 1998).

Em decorrência das características físico-químicas e das composições dos materiais, o volume de resíduo reaproveitado na própria indústria é bem menor do que o esperado (não mais que 40%) do volume por ela gerado (GARLET, 1998).

Apenas uma empresa localizada no Estado da Paraíba é responsável pela produção anual de aproximadamente 175 milhões de pares de sandálias de borracha, gerando em torno de 3 a 4 toneladas diárias de resíduos que não são reintroduzidos no processo produtivo mas são repassados às empresas produtoras de cimento, para a queima nos fornos.

Contudo, a queima da borracha gera enormes quantidades de material particulado e de gases tóxicos (óxidos nítricos ( $\text{NO}_x$ ), óxidos nitrosos ( $\text{N}_2\text{O}$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )), metais pesados (oriundos de pigmentação inorgânica), dioxinas, furanos, compostos aromáticos, partículas, gases ácidos, monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), sulfatos, altamente prejudiciais ao meio ambiente (RIOS, 2008). Este tipo de alternativa apenas desloca o problema dos resíduos sólidos, de uma empresa para outra, não sendo verdadeiramente uma solução ecologicamente correta.

#### 2.4.1.1 Borracha de Estireno Butadieno (SBR)

A borracha de estireno butadieno foi elaborada primeiro na Alemanha, na década de 1930, com o nome de Buna S. e estudada nos Estados Unidos durante a 2ª Guerra Mundial com a denominação de GRS (Government Rubber-Styrene) denominação esta posteriormente substituída por SBR (RIOS, 2008).

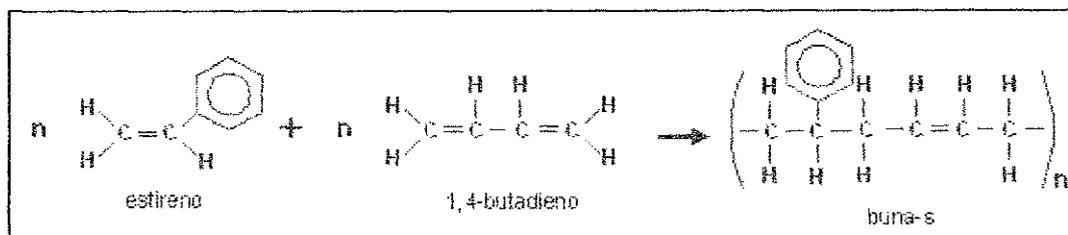


Figura 1: Copolímero de poliadição  
Fonte: (RIOS, 2008)

O SBR é formado pela emulsão de dois polímeros - do butadieno ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$ ) e do estireno ( $\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}=\text{CH}_2$ ) - cujo conteúdo de estireno é de aproximadamente 23,5% havendo, todavia, graus de SBR com teor de estireno de 40 a 85%. A maior parte do SBR, cerca de 90%, é polimerizada por emulsão<sup>2</sup>, e restantes 10 a 15%, polimerizados em solução<sup>3</sup>. Em função da temperatura de polimerização, a borracha obtida é classificada de “*hot rubber*” se a temperatura de polimerização é de cerca de 55°C e de “*cold rubber*” se a temperatura de polimerização se situa entre 5 e 10°C possuindo, essas últimas, melhores características de laboração; seu catalisador é o sódio metálico.

Artefatos de borracha não podem ser obtidos sem que ocorra vulcanização do elastômero, uma vez que a borracha crua não apresenta resistência suficiente para as solicitações de serviço. A vulcanização busca através do uso de um acelerador (enxofre) e de um ativador (óxido de zinco) aumentar a força retrátil, reduzir a quantidade de deformação permanente, melhorar a elasticidade e diminuir a plasticidade (ANJOS, 2007). Sendo uma borracha sintética, facilmente vulcanizável e com custo de fabricação menor em relação à obtenção da borracha natural, rapidamente foi incorporada no desenvolvimento de produtos dos diversos setores produtivos (ANJOS, 2007).



Figura 2: Artefatos fabricados com SBR

Fonte: [http://www.frenzel.com.br/Topic/23/pgs\\_pt\\_produtos\\_oem\\_detalhedefamilias/61/Buchas+e+Coxins.aspx](http://www.frenzel.com.br/Topic/23/pgs_pt_produtos_oem_detalhedefamilias/61/Buchas+e+Coxins.aspx)

<sup>2</sup> **Polimerização por emulsão** utiliza, além do monômero, um iniciador hidrossolúvel, um solvente, um solvente, geralmente água, e um emulsificante, por exemplo, estearato de sódio, os quais propiciam um meio adequado à formação de micelas; a reação se passa em meio heterogêneo. A iniciação é feita por agente químico

<sup>3</sup> **Polimerização em solução** utiliza, além do monômero e do iniciador organossolúvel, um solvente que atua tanto sobre os reagentes quanto sobre o polímero; a reação se passa em meio homogêneo sem a formação de subprodutos. A iniciação é feita por agente químico (MANO, 1999)

O SBR é amplamente utilizado na indústria de artefatos de borracha com vista à produção de componentes para autopeças, fabricação de forro de carpetes, artigos médico-hospitalares, calçados etc.

Segundo Rios (2008) este material é, atualmente, muito usado em solado para calçados, quando formulado com alto teor de estireno (cerca de 83%), e em uma infinidade de peças que requeiram alta dureza na indústria. É classificado como elastômero (classe intermediária entre os termoplásticos e os termorrígidos), não é fusível (propriedade que os materiais possuem de passar da fase sólida para a fase líquida) e apresenta alta elasticidade pois não é rígida como os termofixos. A partir de suas características e por ser explorado em vários setores produtivos, torna-se um resíduo a ser estudado para futuras aplicações.

Para realizar a coloração das borrachas nos processos industriais do setor calçadista é empregado, na sua maioria, pigmento inorgânico que, conforme Heine (1998) é uma substância constituída de pequenas partículas praticamente insolúveis no meio aplicado sendo utilizada de acordo com suas propriedades de coloração, protetora ou magnética. A obtenção de alguns desses pigmentos decorre de processos químicos e físicos, a partir de elementos classificados Metais Pesados.

Quadro 01 - Classificação dos pigmentos inorgânicos baseada na cor – Sistema recomendado pela ISO (International Standard Organization)

Termos	Exemplos
Pigmentos brancos	Dióxido de titânio, sulfeto de zinco, zinco branco
Pigmentos coloridos	Cádmio - amarelo, laranja e vermelho e vermelhão Cromo - verde, amarelo Cobalto - amarelo, violeta, azul, verde Ferro - amarelo, vermelho, azul Chumbo - amarelo Enxofre - azul Manganês - azul e violeta
Pigmentos pretos	Pigmentos de carbono, óxido de ferro

Adaptado de Heine (1998)

A identificação desses metais pesados, sua quantificação e lixiviação, são informações importantes para o planejamento da incorporação do resíduo do setor calçadista na elaboração de compósitos leves; verifica-se, assim, a necessidade de realização de análises para caracterização do resíduo, como forma de especificar a possibilidade de seu uso a determinada aplicação.

## **2.5 Caracterização Físico-Químico-Mineralógica de Resíduos Sólidos**

De acordo com Neves et al. (2010) a caracterização físico-químico-mineralógica é um conjunto de dados relativos às características de determinado material, obtidas através de ensaios, tais como: granulometria em peneiras, massa específica real e aparente, absorção de água, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Entre os métodos de caracterização química se destacam a espectrometria de diversos tipos, óptica, absorção atômica, fluorescência de Raios-X (EDX), tal como as efetuadas no MEV. A caracterização mineralógica também inclui os métodos de análise química acima mencionados e as determinações por análise térmica (DTA e TG), difração de Raios-X e as microscopias.

De acordo com Canevarolo (2004):

### **a) Espectroscopia por Energia Dispersiva – EDS**

A análise por espectroscopia de energia dispersiva busca não só identificar mas também quantificar nas amostras e os elementos químicos presentes em sua composição, entre eles os metais pesados provenientes, possivelmente, do processo de pigmentação.

### **b) Espectroscopia por Infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)**

Espectroscopia por infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) pode ser usada para identificação e caracterização de compostos orgânicos, inorgânicos e poliméricos; basicamente, o que se mede nesta análise é a fração da energia transmitida ou absorvida em relação à incidente em determinado comprimento de onda ou número de onda.

### **c) Microscopia Óptica**

A função do microscópio é produzir uma imagem ampliada do objeto, contendo a informação estrutural pretendida e que possa ser percebida pelo sistema olho-cérebro. Para a percepção correta da estrutura de um objeto é essencial, também, que esta produza variações de intensidade luminosa ou de cor na imagem, que são as únicas características principais a considerar quando se pretende selecionar um sistema de microscopia para observar a

morfologia de um objeto. A formação da imagem e o contraste que ela apresenta dependem da forma como se dá a interação entre a luz e o objeto em estudo. A resolução máxima do microscópio óptico é cerca de  $0,1 \mu\text{m}$  e está limitada pela natureza da luz.

#### **d) Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV**

Diferentemente do microscópio óptico que usa luz na formação de imagens, os microscópios eletrônicos utilizam elétrons. Várias são as vantagens em se utilizar um microscópio eletrônico em relação a um microscópio óptico, em que a principal delas é a resolução, definida como a menor distância entre dois pontos da mostra que podem ser visualizados como dois pontos distintos na imagem (aumento da imagem em até 300.000 vezes). No MEV as imagens têm alta profundidade de foco, o que significa obter diferentes relevos da superfície da amostra, simultaneamente em foco. São imagens tridimensionais e, portanto, mais fáceis de interpretar; geralmente são utilizadas para o estudo de estruturas superficiais ou subsuperficiais de amostras com dimensões relativamente grandes.

#### **e) Análise Termogravimétrica - TGA**

A análise termogravimétrica tem, como objetivo, verificar a perda de massa de uma amostra submetida a uma programação controlada de temperatura e sob uma atmosfera especificada; a TGA é uma técnica possível de analisar as alterações de aquecimento da massa permitindo, então, estabelecer a faixa de temperatura em que elas adquirem composição química fixa, definida e constante, a temperatura em que começa a se decompor, acompanhar o andamento de reações de desidratações, oxidação, combustão, decomposição etc.

#### **f) Porosimetria ao Mercúrio**

A análise de determinação do índice de porosidade permite mensurar a quantidade de espaços vazios e o diâmetro médio dos poros presentes na amostra estudada, dados obtidos através do método de penetração de mercúrio.

### **g) Lixiviação do resíduo**

Segundo Bezerra (2002) apesar de todas as dificuldades de padronização dos testes de lixiviação, pois alguns métodos de ensaios não representam as condições reais pelas quais o material irá passar durante o seu ciclo de vida útil, deve-se realizar testes de lixiviação para avaliar o impacto ambiental causado por um novo produto. Esta análise é tão relevante que, mesmo possuindo boas características técnicas, o produto pode ser inviável se apresentar um impacto ambiental elevado.

A aplicação do resíduo sólido após as análises poderá ser na composição de blocos de concreto em substituição parcial do agregado fino (areia). Esses blocos, dependendo das suas características físicas, podem ser usados em alvenaria estrutural ou não-estrutural.

## **2.6 Alvenaria de Blocos de Concreto**

De acordo com Medeiros (1993), a alvenaria estrutural de blocos de concreto é um processo construtivo que emprega paredes de bloco como elemento resistente, apresentando uma série de aspectos técnico-econômicos, principalmente no grande potencial de racionalização de todas as etapas de construção, através da otimização do uso de recursos temporais, materiais e humanos.

Na alvenaria não estrutural os blocos têm a função de vedação da parede sendo a estrutura realizada com colunas e vigas de concreto com ferragem.

Segundo Medeiros (1993) as características dos blocos de concreto dependem, fundamentalmente, dos fatores: natureza dos materiais constituintes, umidade do material usado na moldagem, proporcionalidade dos materiais, grau de compactação conferido pelo equipamento e método de cura empregado.

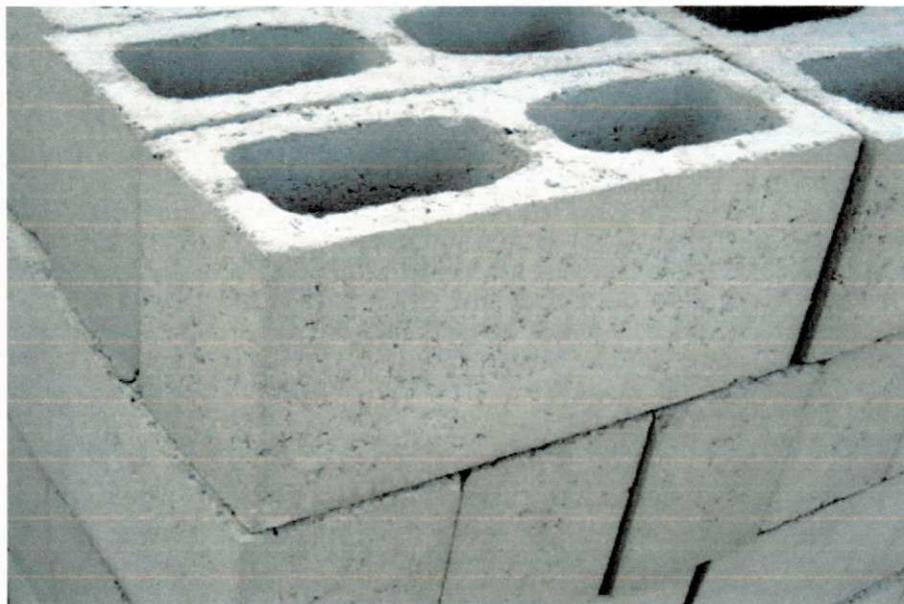


Figura 3: Blocos vazados de concreto  
Fonte: [www.tuboscopel.com.br/imagens/blocos03.jpg](http://www.tuboscopel.com.br/imagens/blocos03.jpg)

A NBR 6136 (ABNT, 2007) define, como blocos vazados, aqueles que possuem furos prismáticos perpendiculares à face que os contém e cuja seção transversal média útil é inferior a 75% da seção transversal bruta. Esta mesma norma estabelece que blocos vazados para alvenaria devam possuir dimensões modulares nominais 200 a 400mm para o comprimento, larguras entre 150 e 200mm e altura de 200mm; além disto, é apresentada uma classificação em relação à resistência e características superficiais, sendo que os blocos de Classe A são os que apresentam resistência à compressão igual ou superior a 6MPa e possuem textura superficial lisa, podendo ser usados em alvenaria aparente. Os blocos da Classe B possuem resistência característica à compressão igual ou superior a 4MPa e textura superficial rugosa, necessitando de revestimento. Enfatiza-se que essas especificações se referem à alvenaria com função estrutural; já para blocos de concreto, sem função estrutural, ABNT 7173 (ABNT, 1982), a média dos resultados de resistência deverá  $\geq 2,5\text{MPa}$ , com nenhum resultado individual menor que 2,0MPa.

Nos últimos anos surgiram novos conceitos de blocos leves aplicados sobretudo para isolamento térmico, acústico, pavimentação e com aplicações impermeáveis, para uso em alvenaria aparente.

Ressalta-se que o tipo de agregado usado na composição dos blocos interfere na aderência com a pasta de cimento, alterando tanto a homogeneidade como a resistência do concreto pois sua resistência mecânica permite maior ou menor grau de compactação.

## **2.6.1 Propriedades dos blocos de concreto**

### **a) Resistência à Compressão**

De acordo com Maciel (2002), a resistência à compressão de um bloco de concreto é a principal variável de controle do processo produtivo do bloco podendo determinar, através do diagrama tensão x deformação, algumas propriedades importantes como, por exemplo: o módulo de elasticidade. Segundo as normas Brasileiras NBR 6136 (ABNT, 2007) e a NBR 7173 (ABNT, 1982), para se calcular a resistência dos blocos vazados deve-se utilizar a área bruta.

Maciel (2002) afirma que a resistência à compressão dos blocos de concreto depende, fundamentalmente, do fator água/cimento, da natureza dos materiais (aglomerante + agregado), da qualidade da água utilizada, da eficiência da moldagem e das condições de cura (melhor hidratação = boa resistência).

### **b) Resistência à Tração**

O conhecimento da resistência à tração dos blocos de concreto é de extrema significância para o desempenho da alvenaria uma vez que esses esforços são responsáveis pela resistência das paredes das construções.

Maciel (2002) relata que as resistências são influenciadas por fatores, outros, como os métodos pelos quais a resistência à tração é medida, a qualidade do concreto (baixa, média ou alta resistência) e as características dos agregados.

### **c) Capacidade de Absorção**

Maciel (2002) descreve que a capacidade de absorção de água é uma característica relacionada à porosidade do material; é uma propriedade importante do bloco de concreto que deve ser determinado pois irá indicar a quantidade de vazios existentes no bloco.

Todos esses dados devem ser levados em consideração durante o processo de inclusão de agregados diversos para a elaboração dos compósitos à base de resíduos sólidos urbanos.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo foi dividido em duas partes em que, a primeira inclui o processo de caracterização dos materiais e do resíduo compósito de SBR e a segunda, a confecção dos compósitos e os ensaios físicos-mecânicos dos corpos de prova e dos blocos/tijolos.

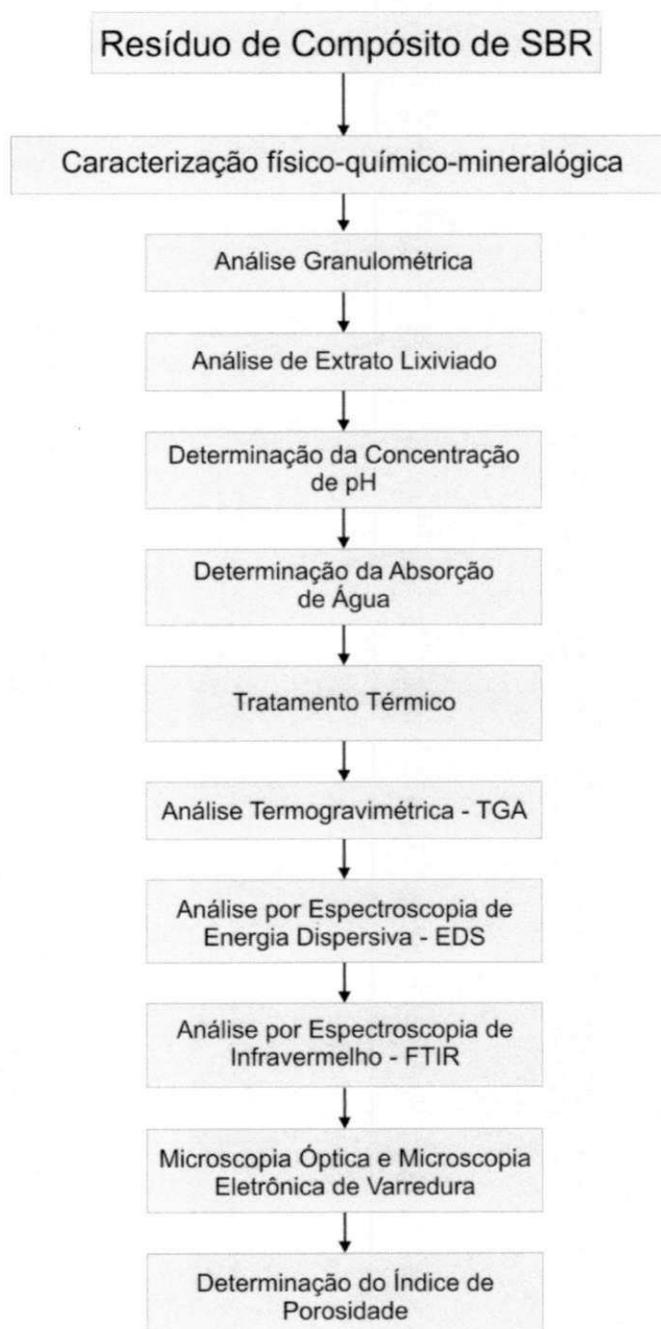


Figura 4: Sequência da caracterização do resíduo de SBR

Na Figura 5 é apresentado o diagrama da confecção e dos ensaios dos corpos de prova e tijolos (compósitos).

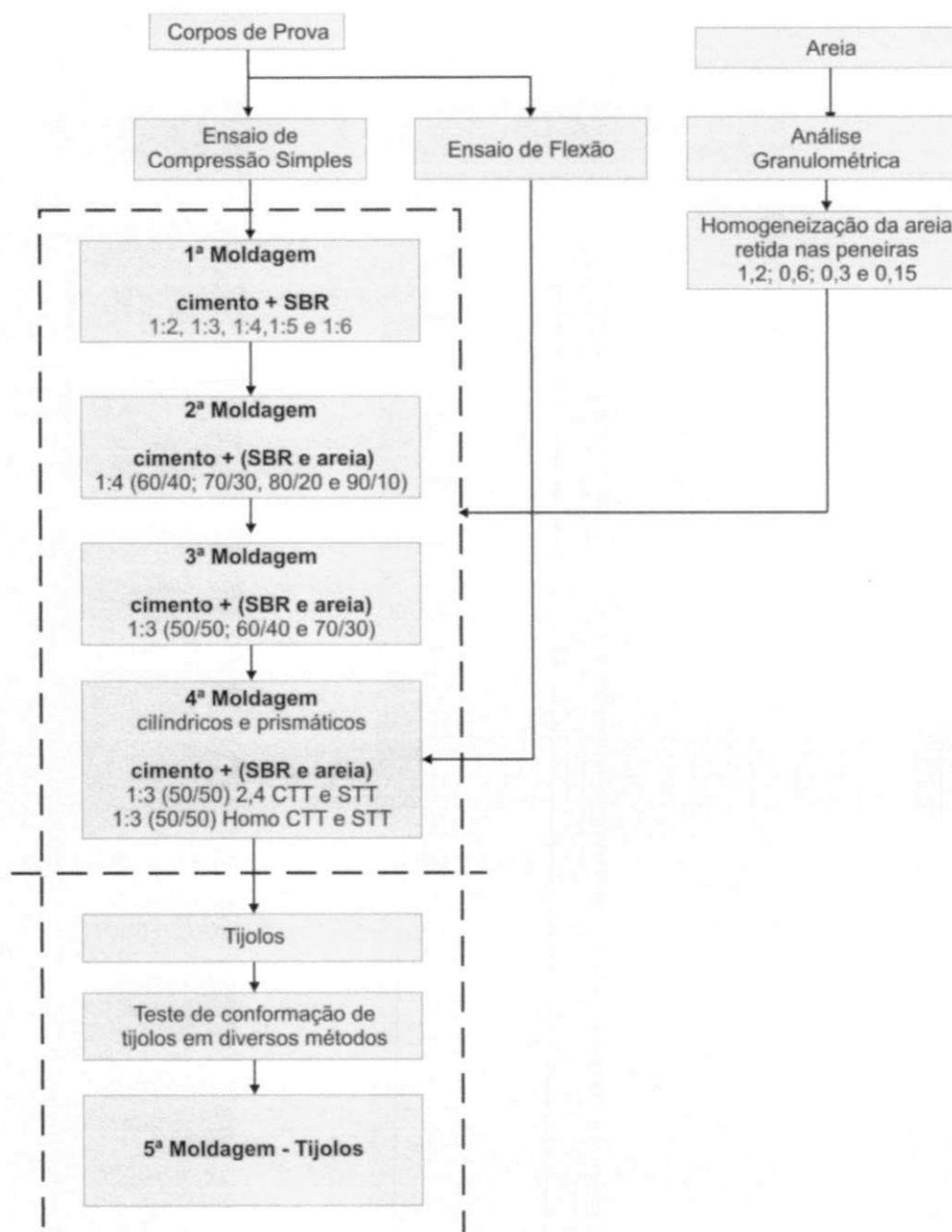


Figura 5: Diagrama de confecção e dos ensaios dos corpos de prova e tijolos

## 3.1 Caracterização dos Materiais

### 3.1.1 Água

A água potável utilizada na pesquisa foi proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Campina Grande, PB

### 3.1.2 Areia

A areia utilizada foi oriunda do leito do Rio Paraíba e caracterizada segundo a NBR 7217 (ABNT, 1987) que determina a composição granulométrica e o modo de finura.

### 3.1.3 Resíduo Sólido de borracha de Estireno Butadieno (SBR)

O SBR foi obtido na cidade de Campina Grande, como resíduo proveniente do processo de fabricação de sandálias de tira.

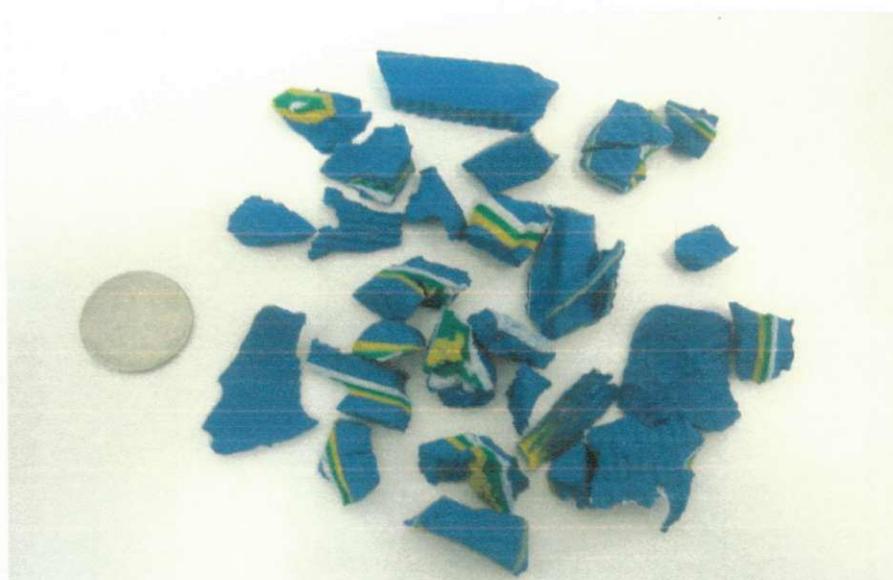


Figura 6: Resíduo de SBR  
Fonte: Própria

### 3.1.4 Cimento

O cimento utilizado na confecção dos corpos de prova foi o cimento Portland CP II – Z- 32, com as seguintes características:

Quadro 02 - Ensaio físicos do cimento CP II - Z - 32, especificações e normas

ENSAIOS FÍSICOS	Especificação / ABNT	
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	≥2600	NBR NM 76
Tempo de início de pega (h:min)	≥1	NBR NM 65
Tempo de fim de pega (h:min)	≤10	NBR NM 65
Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	NBR 11579
Finura na peneira # 325 (%)	-	NBR 9202
Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	NBR 11582
Consistência normal (%)	-	NBR NM 43
Resistência a compressão 1 dia (MPa)	-	NBR 7215
Resistência a compressão 3 dias (MPa)	≥10,0	NBR 7215
Resistência a compressão 7 dias (MPa)	≥20,0	NBR 7215
Resistência a compressão 28 dias (MPa)	≥32,0	NBR 7215

Disponível em [http://www.cimento.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=98&Itemid=151](http://www.cimento.org/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=151) acessado em 15 de março 2011

Quadro 03 - Ensaio químicos do cimento CP II - Z - 32, especificações e normas

ENSAIOS QUÍMICOS	Especificação / ABNT	
Perda ao fogo (%)	≤6,5	NBR 5743
Resíduo insolúvel (%)	≤16,0	NBR 5744
Trióxido de enxofre - SO <sub>3</sub> (%)	≤4,0	NBR 5745
Óxido de cálcio livre - CaO Livre (%)	-	NBR 7227
Óxido de magnésio - MgO (%)	≤6,5	NBR 9203
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	NBR 9203
Óxido de silício - SiO <sub>2</sub> (%)	-	NBR 9203
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	-	NBR 9203
Óxido de cálcio - CaO (%)	-	NBR 9203
Equivalente alcalino (%)	-	-

Disponível em [http://www.cimento.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=98&Itemid=151](http://www.cimento.org/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=151) acessado em 15 de março 2011

## 3.2 Caracterização Físico-Químico-Mineralógica do Composto SBR

Para a caracterização do SBR foram realizados: a determinação da granulometria, análise do extrato lixiviado, determinação da absorção do resíduo, tratamento térmico, TGA (análise termogravimétrica), EDS (análise por espectroscopia de energia dispersiva), FTIR (análise de espectroscopia de infravermelho), porosimetria ao mercúrio e o MEV (microscopia eletrônica de varredura).

### 3.2.1 Análise granulométrica

O resíduo adquirido passou pelo processo de cominuição, através de moinho de facas; após este procedimento o resíduo foi homogeneizado e quarteado (Figura 7), retirando-se uma amostra de 1000g para determinação da granulometria através do método de peneiramento em conjunto de peneiras vibratórias conforme NBR 7217 (ABNT, 1987).



Figura 7: Resíduo de SBR homogeneizado e quarteado  
Fonte: Própria

### 3.2.2 Ensaio de lixiviação

Através de pesquisas bibliográficas foram identificadas, na composição do SBR, a presença de enxofre (processo de vulcanização) e o óxido de zinco (acelerador de reação), além de alguns metais pesados presentes, comumente, nos componentes de pigmentação. A retirada do extrato de uma amostra do resíduo de SBR foi processada no Laboratório de Engenharia Química – LABGER (CCT/UFCG). A primeira etapa do procedimento consistiu em determinar a solução de extração e, como segunda etapa, foi pesada uma amostra de 100g do resíduo colocada posteriormente dentro do recipiente com a solução de extração, tendo-se completado o volume de 2L; o recipiente foi lacrado e agitado durante 18hs em aparelho rotativo, para ensaio de lixiviação (ANEXO A).

No final deste período o material foi retirado do recipiente de extração e separado em suas fases de componentes, líquido e sólido, através de um filtro de fibra de vidro de 0,6 $\mu$ m; já uma amostra de 200ml do extrato lixiviado foi encaminhada à Fundação FUNMINERAL, localizada em Goiânia, GO, e ao LABDES (UFCG) para realização da análise físico-química.

Outra análise realizada consistiu em mergulhar, durante 60 dias, em 1000ml de água, corpos de prova na forma de cubo (8cm<sup>3</sup>), revestidos com uma parede de 0,5cm de espessura de pasta de cimento, com 7 dias de cura, confeccionados na proporção de 1:3 de cimento com agregado, este último composto de 50% SBR e 50% areia.

Este experimento propôs-se verificar se o cimento é capaz de isolar a amostra, impedindo a liberação dos metais pesados na água, principalmente os que se apresentaram superiores aos estabelecidos pelo Ministério da Saúde, na primeira amostra. Enfim, esta amostra de água foi enviada ao ITEP para análise (ANEXO B).

### 3.2.3 Determinação da concentração de pH ao longo do tempo

A partir do ensaio anterior e se utilizando de corpos de prova com o mesmo dimensionamento e de recipientes parcialmente abertos e com a mesma quantidade de água, foi acompanhado o comportamento do pH da água, em três situações distintas de confecção de corpos de prova (**T1** = sem cobertura de pasta de cimento, **T2** = com cobertura de 0,5cm de pasta de cimento e **T3** = com cobertura de 0,5cm de pasta de cimento e uso de

impermeabilizante) conforme Figura 8, sendo mensurado o pH da água ao longo do tempo (7, 14, 21, 28 e 60 dias).



Figura 8: T1 = Corpo de prova sem revestimento; T2 = com cobertura de pasta de cimento (CC) e T3 = com cobertura de pasta de cimento e impermeabilizante (CCS)

Fonte: Própria

### 3.2.4 Determinação da absorção de água

O procedimento consistiu em colocar, em recipiente com água, totalmente imersas, seis amostras de resíduo retidos na peneira de malha 9,6mm, com e sem tratamento térmico de 96h, em estufa a 100°C, durante períodos sequenciais de 10, 30min, 1, 3, 24 e 96h. As amostras eram retiradas após o tempo decorrido, sacudidas durante 30 segundos dentro de uma peneira forrada com filtro de papel, para retirada do excesso de água e pesadas em balança de precisão de 4 casas decimais (SHIMADZU AY220 – Max 220g d = 0,1mg) sendo a diferença entre o peso final, e o peso inicial a massa de água absorvida pela amostra, representada na forma de porcentagem.

### 3.2.5 Tratamento térmico

De acordo com Melo (2009), o custo adicional com tratamento térmico dado ao resíduo significa um aumento no custo do beneficiamento do agregado mas se deve considerar a vantagem associada à alteração das características das partículas (redução do tamanho e

aumento da densidade) e o ganho de resistência à compressão, no seu caso em relação aos blocos de EVA.

De acordo com os estudos de Garlet (1998), o tratamento térmico (permanência do resíduo de EVA imerso em água a 100°C durante 30min) provocou expulsão dos gases expansivos presentes na sua composição, retraindo as partículas, deixando-as mais densas e com menor absorção de água. Bezerra (2002, p.75) obteve, trabalhando com EVA  $d_{\max} = 9,6\text{mm}$  uma redução de volume de 75%, usando o mesmo método.

Para realização do tratamento térmico do SBR, optou-se por uma análise comparativa com dois procedimentos:

- a) Ferver, durante 30min, 1000ml de resíduo com dimensão máxima de 9,6mm (Garlet, 1998; Bezerra, 2002);
- b) Aquecer em estufa a temperatura de 100°C, durante 96h, 1000ml de resíduo retido na peneira 2,4mm e do resíduo homogeneizado (25% de material retido nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm).

### **3.2.6 Análise Termogravimétrica - TGA**

Este procedimento foi executado conforme ASTM D6370-99, no Laboratório de Reciclagem da UFCG, em equipamento SHIMADZU, modelo DTG-60H com taxa de aquecimento 12,5°C/min até a temperatura de 1000°C, sob atmosfera de ar com termopar posicionado sobre a amostra, com corrente de ar de arrasto de 50ml/min e com cadinho de platina.

### **3.2.7 Análise por espectroscopia de energia dispersiva - EDS**

Este procedimento foi executado conforme ASTM D6370-99, no Laboratório de Caracterização/UFCG, em equipamento SHIMADZU, modelo SSX-550 SUPERSCAN – Scanning Electron Microscope.

A amostra foi cortada em tamanho adequado (0,5cm x 0,5cm x 0,5cm) sendo afixada em porta-amostra por fita de carbono; posteriormente, teve sua superfície metalizada a ouro e, na apresentação dos resultados, foi eliminado o elemento Ouro (Au) dos gráficos.

### **3.2.8 Análise de espectroscopia de infravermelho - FTIR**

Este procedimento foi executado no Laboratório CERTBIO/UFCG.

As análises utilizando-se a técnica de espectroscopia na região do infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) do gel e das membranas, foram realizadas em temperatura ambiente e o equipamento utilizado foi um Spectrum 400 da Perkin Elmer. A técnica FTIR foi usada para identificar as bandas características dos grupos funcionais presentes no material, utilizando-se a faixa de varredura de 4000 a 600cm<sup>-1</sup>.

### **3.2.9 Análise de determinação da porosidade**

Tal procedimento foi executado no Laboratório de Caracterização/UFCG, em porosímetro de mercúrio tipo MICROMERITICS AutoPore IV.

A mostra de SBR foi cortada (0,5cm x 0,5cm x 0,5cm), pesada e posteriormente colocada no porta-amostra (penetrômetro) com 5cm<sup>3</sup> para sólidos.

A 1ª parte do ensaio a baixa pressão de psin 0 a 17 teve, como função, o molhamento da superfície pelo mercúrio da amostra.

A 2ª parte do ensaio a alta pressão psin 17 a 33.000 teve, como função, a penetração do mercúrio da amostra.

### **3.2.10 Análise por microscopia eletrônica de varredura – MEV**

Este procedimento foi executado conforme ASTM D6370-99, no Laboratório de Caracterização – UAEMat – UFCG, em equipamento SHIMADZU, modelo SSX-550 SUPERSCAN – Scanning Electron Microscope.

A amostra foi cortada em tamanho adequado (0,5cm x 0,5cm x 0,5cm) e afixada em porta-amostra por fita de carbono; em seguida, teve sua superfície metalizada a ouro.

### **3.3 Conformação e Ensaio com Corpos de Prova Cilíndricos e Prismáticos**

#### **3.3.1 Conformação dos corpos de prova para ensaio de compressão simples e de tração na flexão**

Visando à realização dos ensaios mecânicos foram moldados corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing = 5\text{cm}$  e  $h = 10\text{cm}$ ) segundo as NBR 5738 (ABNT, 2003) e NBR 7215 (ABNT, 1997) recebendo, na face superior, argamassa de cimento, no intuito de nivelar os cilindros para a realização dos testes de compressão simples, realizada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007) todavia, foram conformados corpos de prova prismáticos retangulares (4cm x 4cm x 16cm), conforme NBR 12142 (ABNT, 2010), para os ensaios de tração na flexão.

Para confecção dos corpos de prova foram utilizados cimento Portland CP II Z 32, adquirido no comércio local, água potável disponível pelo sistema de abastecimento da cidade, areia oriunda do Rio Paraíba e o SBR obtido em uma empresa da cidade de Campina Grande, em estado pós-moagem, com resíduo retido nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm.

A confecção dos corpos de prova, os ensaios de compressão simples e a tração na flexão, foram realizados no Laboratório de Reciclagem do CTRN/UFCG/PB.

Foi estabelecido o uso do volume dos componentes para a elaboração da mistura a ser utilizada na conformação dos corpos de prova, no intuito de verificar a influência dos teores de SBR sobre os ensaios propostos. Como planejamento experimental foi realizado um delineamento inteiramente casualizado, estabelecendo-se 5 repetições para cada tratamento, sendo os tratamentos constituídos pela mistura ou não de SBR com areia, com variação das substituições de agregado por resíduo, variação da granulometria e se houve ou não tratamento térmico do resíduo.

Em decorrência do conteúdo bibliográfico resumido referente ao manuseio do SBR, foi realizada uma sequência de conformação de corpos de prova, cujos ensaios de compressão simples serviam de base para as novas conformações, a partir de comprovações e deliberações sobre as características do material trabalhado.

Quadro 05 - Composição dos corpos de prova de referência (cimento : areia) traços 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6

Composição	Cimento	Agregado (areia)	Fator $a/c$ (*)
1 : 3	100 ml	300 ml	0,5
1 : 4	100 ml	400 ml	0,5
1 : 5	100 ml	500 ml	0,5
1 : 6	100 ml	600 ml	0,5

(\*) O fator $_{a/c}$  foi de 50%, porém sendo utilizado como referência o peso da amostra de cimento 100ml de cimento = 160g de cimento, logo, 50% de água será = 80g de água = 80ml de água

Quadro 06 - Composição dos corpos de prova da 1ª moldagem (1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6)

Composição	Cimento	Agregado (SBR)	Fator $a/c$ (*)
1 : 2	100 ml	200 ml	0,5
1 : 3	100 ml	300 ml	0,5
1 : 4	100 ml	400 ml	0,5
1 : 5	100 ml	500 ml	0,5
1 : 6	100 ml	600 ml	0,5

Quadro 07 - Composição dos corpos de prova da 2ª moldagem (1:4)

Composição	Cimento	Agregado (SBR + areia)	Fator $a/c$ (*)
1 : 4	100 ml	400 ml 60% SBR / 40% areia	0,5
1 : 4	100 ml	400 ml 70% SBR / 30% areia	0,5
1 : 4	100 ml	400 ml 80% SBR / 20% areia	0,5
1 : 4	100 ml	400 ml 90% SBR / 10% areia	0,5

Quadro 08 - Composição dos corpos de prova da 3ª moldagem (1:3)

Composição	Cimento	Agregado (SBR + areia)	Fator $a/c$ (*)
1 : 3	100 ml	300 ml 50% SBR / 50% areia	0,5
1 : 3	100 ml	300 ml 60% SBR / 40% areia	0,5
1 : 3	100 ml	300 ml 70% SBR / 30% areia	0,5

Quadro 09 - Composição dos corpos de prova da 4ª moldagem (1:3) para ensaios de resistência à compressão simples e tração na flexão

Composição	Cimento	Agregado (SBR + areia)	Fator $a/c$ (*)
1 : 3	100 ml	300 ml 50% SBR / 50% areia SBR retido na peneira 2,4mm. STT	0,5
1 : 3	100 ml	300 ml 50% SBR / 50% areia SBR retido na peneira 2,4mm CTT	0,5
1 : 3	100 ml	300 ml 50% SBR / 50% areia SBR homogeneizado STT	0,5
1 : 3	100 ml	300 ml 50% SBR / 50% areia SBR homogeneizado CTT	0,5

STT – Sem Tratamento Térmico / CTT – Com Tratamento Térmico / homogeneizado (resíduo retido nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm)

Os moldes em aço galvanizados foram untados com óleo mineral para facilitar a retirada dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos e, em seguida, preenchidos com a mistura referente a cada traço recebendo, na face superior, pasta de água e cimento, com a finalidade de nivelar.

Após 24 horas do preenchimento os corpos de prova foram desmoldados e colocados em sacos plásticos hermeticamente fechados para manter a umidade; após 28 dias de cura os corpos de prova foram ensaiados

### 3.3.2 Determinação da resistência à compressão simples e da tração na flexão

Os ensaios de resistência a compressão simples foram realizados na prensa eletrônica SHIMADZU AUTOGRAPH AG IS 100KN obedecendo-se ao procedimento descrito pela NBR 5739 (ABNT, 2007); já os ensaios de tração na flexão foram executados na prensa eletrônica SHIMADZU AUTOGRAPH AG-X 50KN obedecendo-se ao procedimento descrito pela NBR 12142 (ABNT, 2010).

No intuito de verificar a estrutura interna dos corpos de prova, foram realizados cortes, cujas imagens ampliadas foram obtidas a partir do uso de um microscópio óptico.

### 3.3.3 Determinação da capacidade de absorção de água, porosidade aparente e densidade aparente

A determinação da capacidade de absorção dos corpos de prova foi realizada utilizando-se da NBR 9778 (2005), porém a característica esponjosa do composto de SBR contendo gases, cargas e pigmentos, inviabilizou a aplicação de todo o procedimento contido na norma, havendo necessidade de adaptação, caso em que se retirou a etapa de fervura dos corpos de prova submersos em água, por 5 horas.

A princípio, os corpos de prova foram secados em estufa a temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$ , por 24h, e pesados em balança digital, procedimento que continuou até que a diferença entre a massa seca da pesagem anterior e posterior fosse  $\leq$  a 5% do peso menor; posteriormente, as amostras foram imersas em água, a temperatura de  $23 \pm 5^\circ\text{C}$ , pelo tempo de 24h, procedimento que continuou até que a diferença entre a massa saturada das pesagens posterior e anterior fosse  $\leq$  a 5% do peso menor.

Após esta fase os corpos de prova saturados foram levados a uma balança digital hidrostática para determinação da massa imersa; com esses dados foi possível calcular a absorção, a porosidade aparente e a densidade aparente, usando-se as equações contidas no Quadro 10.

Quadro 10 - Equações e unidades das propriedades de densidade aparente, absorção e porosidade aparente

Propriedade	Unidade	Equação	Em que
Densidade Aparente	$\text{g/cm}^3$	$\frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i}$	$M_s = \text{Massa seca}$
Absorção	(%)	$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \cdot 100$	$M_{\text{sat}} = \text{Massa saturada}$
Porosidade Aparente	(%)	$\frac{M_{\text{sat}} - M_s}{(M_{\text{sat}} - M_i)} \cdot 100$	$M_i = \text{Massa imersa}$

Fonte: NBR 9778 (ABNT, 2005)

### 3.4 Conformação e Ensaio com Blocos/Tijolos

Como o material a ser utilizado é leve, verificou-se a necessidade de avaliar qual procedimento de conformação se apresentaria mais adequado para a confecção de blocos/tijolos

- a) Forma com batimento ao chão;
- b) Uso de máquina de prensar tijolos tipo solo/cimento;
- c) Forma de descanso.

Quadro 11 - Composição dos blocos/tijolos para ensaios de resistência a compressão simples

Composição	Cimento	Agregado	Fator $a/c$ (*)
1 : 3	100 ml	300 ml (50% SBR / 50% areia) SBR retido na peneira 2,4mm. STT	0,5
1 : 3	100 ml	300 ml (50% SBR / 50% areia) SBR retido na peneira 2,4mm CTT	0,5
1 : 3	100 ml	300 ml (50% SBR / 50% areia) SBR homogeneizado STT	0,5
1 : 3	100 ml	300 ml (50% SBR / 50% areia) SBR homogeneizado CTT	0,5

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados da Caracterização Físico-Químico-Mineralógica do SBR

Nesta etapa da tese foram apresentados os resultados dos ensaios propostos para caracterização do resíduo de SBR.

#### 4.1.1 Composição granulométrica do resíduo

Na Tabela 01 e na Figura 9 se apresentam os valores da distribuição granulométrica do resíduo pré-processado, adquirido na empresa.

Tabela 01: Composição granulométrica do resíduo (1000g)

<b>Abertura da peneira (mm)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida acumulada</b>	<b>% que passa da amostra total</b>
19,0	0,00	0,00	100,00
9,6	69,24	69,24	30,76
4,8	19,38	88,62	11,38
2,4	5,13	93,75	6,25
1,2	1,83	95,58	4,42
0,6	2,04	97,62	2,38
0,3	1,09	98,71	1,29
0,15	0,88	99,59	0,41
Resto	0,41	100,00	0,00

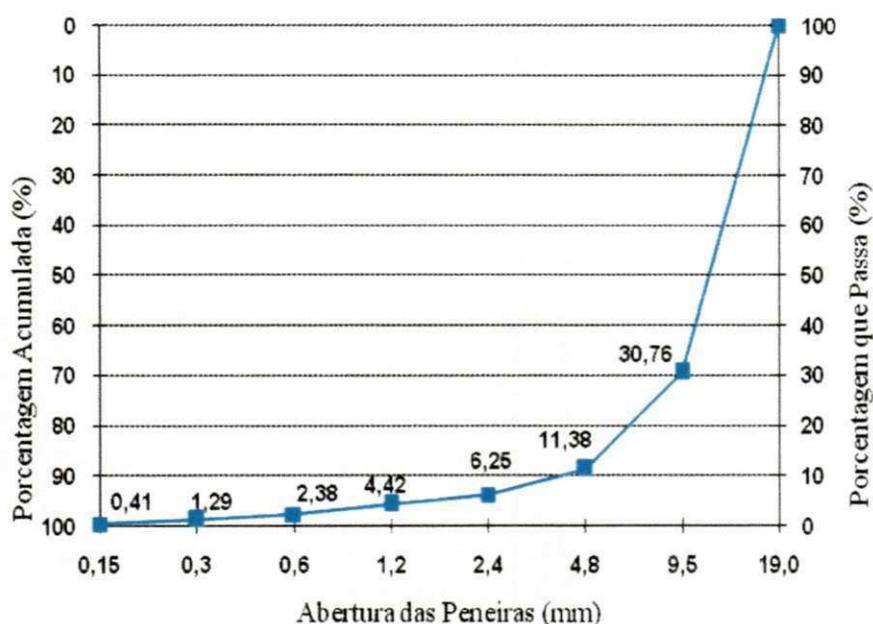


Figura 9: Retenção de material nas peneiras

Conforme o resultado apresentado foi observado que a maior parte do material ficou retida nas peneiras 9,5 e 4,8mm, havendo a necessidade de se realizar novo processo de beneficiamento em moinho de facas rotativas com peneira de passagem de 6,0mm, no intuito de se obter uma granulometria mais adequada para a confecção dos corpos de prova cilíndricos (material retido nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm).

A partir do beneficiamento com tempo estimado de 40 minutos para 30kg, obteve-se a seguinte composição granulométrica:

Tabela 02: Composição granulométrica do resíduo beneficiado (1000g)

Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada	% que passa da amostra total
9,6	0,00	0,00	100,00
4,8	3,82	3,82	96,18
2,4	69,45	73,27	26,73
1,2	16,30	89,57	10,43
0,6	5,99	95,56	4,44
0,3	1,65	97,21	2,79
0,15	2,40	99,60	0,40
Resto	0,40	100,00	0,00

Ø Max ≤ 5% da % retida acumulada = 4,8

Módulo de Finura =  $(\sum \% \text{ retida acumulada}) / 100 = 459,03/100 = 4,5903$

Verifica-se que, com a peneira 2,4mm, obteve-se um acúmulo de 73,27% do material processado, inviabilizando sua classificação em uma das faixas granulométricas presentes na NBR 7211 (ABNT, 2009). A partir desta situação planejou-se a utilização da série normal para homogeneização do material objetivando-se obter conformação mais coerente dos corpos de prova, ou seja: 25% do material retido nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm; ao término do procedimento foi calculada a densidade do resíduo homogeneizado  $d = 0,329$ .

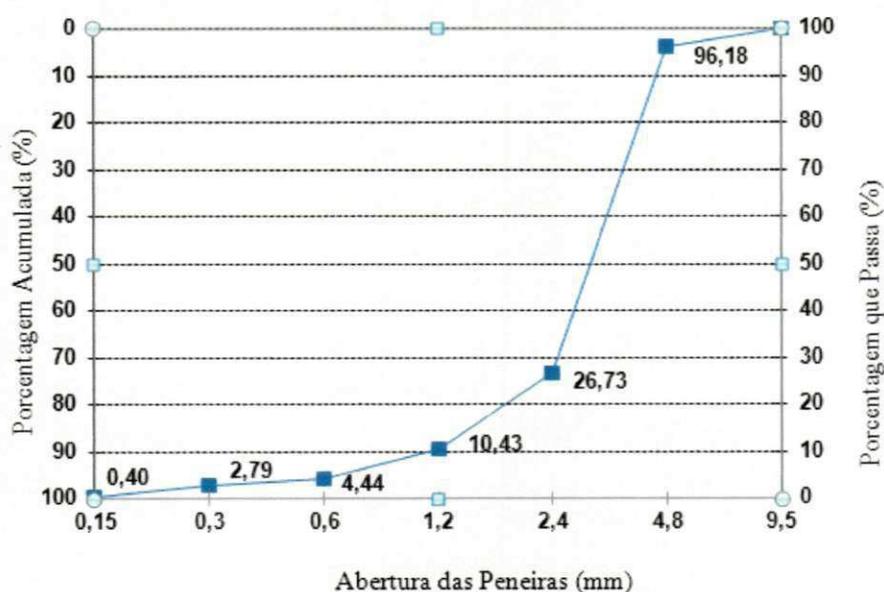


Figura 10: Retenção de material nas peneiras – SBR beneficiado

#### 4.1.2 Composição físico-química do extrato lixiviado

No Quadro 12 foram apresentadas as quantificações das substâncias presentes no extrato lixiviado do resíduo porém vale salientar que o resultado apresentado na análise foi específico desta amostra, não sendo generalizado para outros resíduos.

Os limites máximos adotados foram referentes à TABELA I – CLASSE 1 – ÁGUA DOCE, previstos na Portaria nº 518, do Ministério da Saúde.

Quadro 12 - Resultado da análise do extrato lixiviado do resíduo de SBR

<b>Parâmetros Inorgânicos</b>	<b>Quant. Contida na amostra mg/L</b>	<b>Valor máximo permitido mg/L</b>
Arsenio	<0,010	0,01
Bario	0,578	0,7
Cádmio	0,024	0,005
Chumbo	0,109	0,01
Cromo total	< 0,01	0,05
Prata	<0,005	0,01
Alumínio	0,022	0,2
Cobre	< 0,005	2
Ferro	0,230	0,3
Manganês	< 0,100	0,1
Sódio	702,0	200,0 *
Zinco	54,50	5
Cobalto	0,008	0,05
Enxofre	< 0,100	-
pH	6,00	6,0 – 9,0
Cloretos	29,07	250,0
Sulfatos	409,92	250,0

Verificou-se que cádmio, chumbo, alumínio, sódio, zinco e sulfato, tiveram seus valores superiores aos estabelecidos na Portaria citada anteriormente. A presença do sódio e do zinco ocorreu por serem utilizados como catalizador e acelerador, respectivamente, no processo de vulcanização da borracha (COSTA, 2003). O cádmio, o chumbo e o sulfato estão presentes, possivelmente, no processo de pigmentação da borracha e, em sendo assim, o resíduo de SBR foi classificado como CLASSE I – PERIGOSO conforme NBR 10004 (ABNT, 2004a).

A partir desta constatação identificou-se a necessidade de se analisar o comportamento do resíduo de SBR quando misturado ao aglomerante (cimento) com isolamento à base de pasta de cimento, que não se enquadraram nos limites máximos permitidos.

Quadro 13 - Resultado da análise físico-química do extrato lixiviado da amostra 1:3 (cimento: 50% SBR + 50% areia) mergulhado em água, por 60 dias

Outros parâmetros	Quantidades contidas nas amostras		
	SBR (puro) mg/L	1:3 (cimento : SBR + areia) mg/L	Valor máximo permitido mg/L
SÓDIO	702,00	20,24	200,00
SULFATOS	409,92	76,90	250,0
ZINCO	54,50	<0,01	5
CADMIO	<0,024	<0,001	0,005
CHUMBO	<0,109	<0,01	0,010
ALUMÍNIO	0,022	0,02	0,2

Através da nova análise foi possível constatar que os parâmetros que já haviam sido apresentado com valores superiores aos permitidos pelo Ministério da Saúde, sofreram redução da sua presença na amostra de água enquadrando-se no valor máximo permitido justificando, então, a necessidade do uso de cimento para isolamento e retenção das substâncias presentes no SBR.

#### 4.1.3 Concentração de pH da água ao longo do tempo

Outro dado interessante consistiu em se determinar o pH ao longo do tempo como forma de identificar se está ocorrendo liberação de substâncias na água pelo resíduo durante seu uso.

Quadro 14 – Valores médios do pH dos tratamentos T1, T2 e T3 ao longo de 60 dias

Avaliação do pH da água					
TRATAMENTOS	Valores médios do pH				
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	60 dias
T1	11,06	10,37	9,68	9,51	8,16
T2 (CC)	12,67	12,62	12,13	11,76	9,01
T3(CCS)	12,77	12,68	12,03	11,25	9,04

T1 = sem cobertura, T2 = cobertura de cimento e T3 = cobertura de cimento e uso de impermeabilizante

O pH mais baixo da amostra T1 nos primeiros 7 dias de análise em comparação com as amostras T2 e T3 foi ocasionado, possivelmente, pela liberação de substâncias na água, que tornam o pH menos alcalino se comparado com os corpos de prova revestidos por pasta de cimento.

Verifica-se que, nos tratamentos T2 e T3, não se obteve diferença significativa e todos os tratamentos apresentaram pH com 7 dias fora da faixa ideal, apesar de ter sido usada água destilada com  $\text{pH} = 6,8$  para início do experimento. É possível afirmar que a elevação do pH é devida à presença de bicarbonatos, substâncias presentes na constituição do cimento

#### 4.1.4 Resultado do tratamento térmico do resíduo

Com relação ao tratamento através da fervura do resíduo, observou-se redução de 13% com relação ao volume e de 14,9% quanto ao peso da amostra. Porém tal ocorrência ficou muito abaixo do apresentado com o material EVA, que teve redução de 75% do seu volume (BEZERRA, 2002); contudo, um dos agravantes desse tratamento consiste na liberação dos metais pesados contidos no resíduo para a água usada na fervura, gerando um passivo ambiental tão perigoso quanto o SBR bruto.

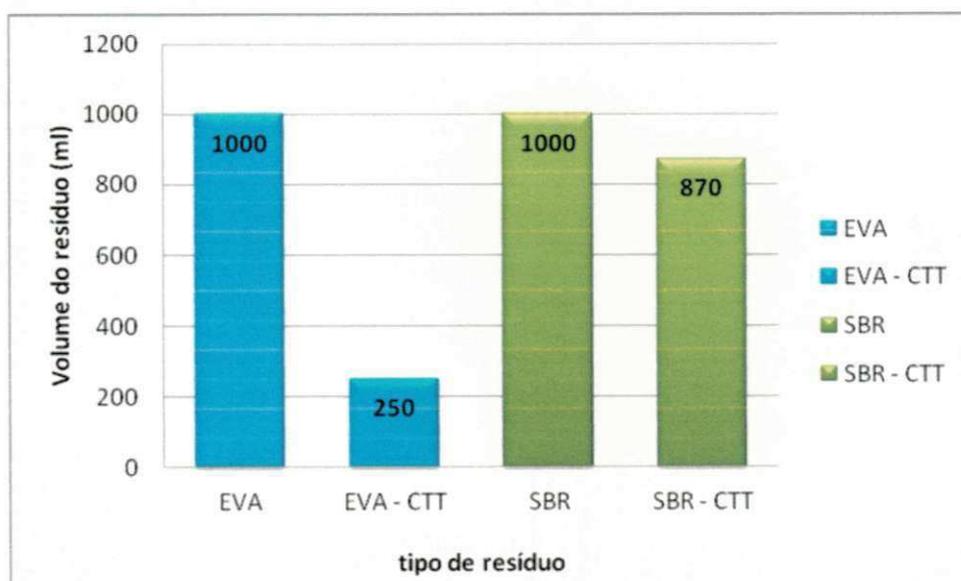


Figura 11: Redução do volume de EVA e SBR após tratamento térmico

Com referência ao tratamento térmico em estufa, constatou-se que o material homogeneizado sofreu maior redução de sua massa em relação ao resíduo retido na peneira 2,4mm, evento que se deve, possivelmente, pelo dimensionamento da partícula pois, quanto menor ela for maior será a penetração do calor no SBR, maximizando a liberação dos elementos voláteis presentes no resíduo, diferente com que ocorre com o resíduo de dimensionamento maior, cuja penetração do calor se concentra na periferia.

O volume do resíduo homogeneizado sofreu menor redução ao ter seus agentes voláteis liberados, em decorrência de um empacotamento mais eficiente, ocasionado pela variação da sua granulometria, diferente do que ocorreu com o resíduo retido na peneira 2,4mm quando um empacotamento menos eficiente provocou uma redução considerável do volume da amostra.

Tabela 03 – Redução do volume e da massa do resíduo retido na peneira 2,4mm e homogeneizado após tratamento térmico de 96h a 100°C

Tratamento Térmico Estufa		Situação Inicial	24 h	48 h	72 h	96 h	Redução
Resíduo retido na peneira (2,4)	Volume (ml)	1000	960	930	910	908	9,2%
	Massa (g)	334,0	331,0	329,7	329,0	328,8	1,55%
Resíduo homogeneizado	Volume (ml)	1000	970	950	940	939	6,1%
	Massa (g)	363,0	339,0	322,0	314,2	314,0	13,5%

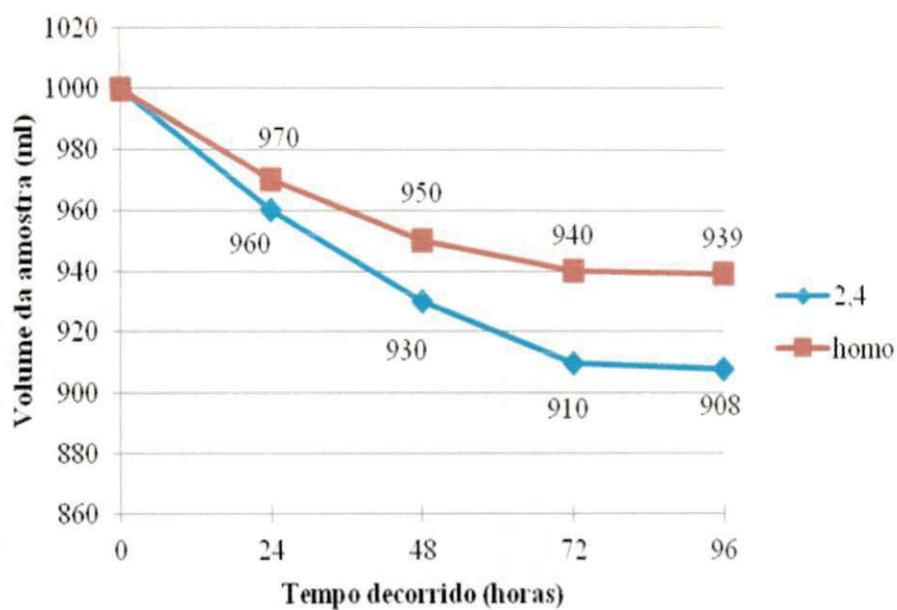


Figura 12: Redução do volume da amostra em relação ao tempo decorrido em estufa a 100°C

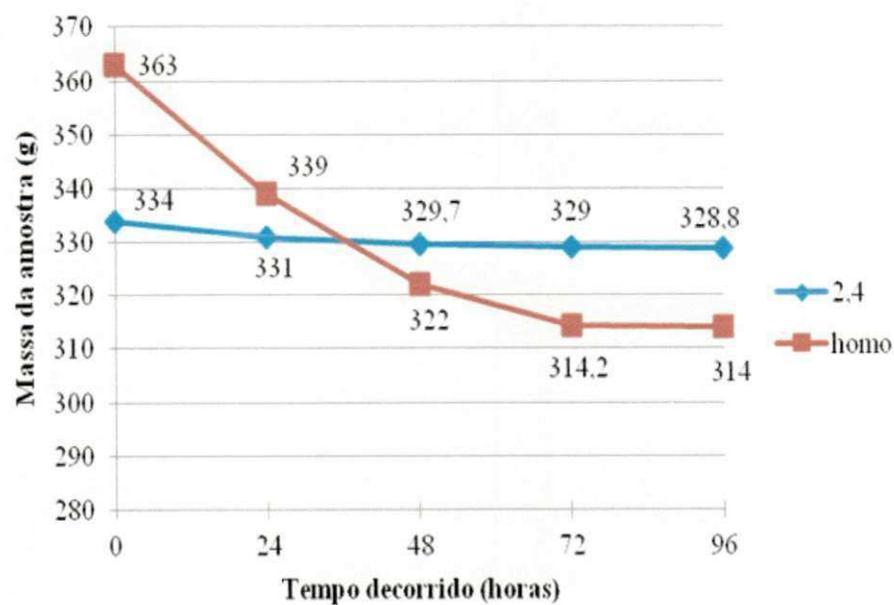


Figura 13: Redução da massa da amostra em relação ao tempo decorrido em estufa a 100°C

Para comprovar tal situação foi medido 1 litro de SBR das peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm, pesada a massa unitária de cada litro sendo posteriormente colocados em estufa a 100°C durante 96h, respectivamente, obtendo-se os seguintes resultados:

Tabela 04 – Redução do volume e da massa unitária dos resíduos retidos nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm após tratamento térmico de 96h a 100°C

Resíduo da peneira	Massa unitária AT	Massa unitária DT	Massa unitária Redução	Volume AT	Volume DT	Volume Redução
2,4	310,22	299,4	3,48 %	1000 ml	890 ml	11%
1,2	295,75	285,5	3,46 %	1000 ml	910 ml	9 %
0,6	269,40	260,2	3,41 %	1000 ml	970 ml	3%
0,3	221,97	214,8	3,20 %	1000 ml	990 ml	1%

AT = antes do tratamento térmico / DT= depois do tratamento térmico / valores aproximados

Pode-se verificar, através das análises apresentadas na Tabela 04, que com o tratamento térmico:

- a) Houve uma redução quase que constante da massa unitária das partículas comprovando que, apesar do processo de cominuição, o resíduo manteve sua composição química, ocorrendo pouca perda dos agentes voláteis com o aquecimento da amostra durante a trituração;
- b) Quanto menor a partícula menor também é a redução do volume da amostra, como consequência do empacotamento (ocupação efetiva dos espaços vazios).

Porém este tipo de tratamento gera um novo resíduo - água com agentes inorgânicos, dentre eles os metais pesados, devendo ser levado em consideração se existe compensação, efetivar tal tratamento do resíduo.

#### 4.1.5 Resultado da absorção de água do resíduo

Pelos dados apresentados na Figura 14 verificou-se que o SBR-STT permitiu penetração de água em sua estrutura, porém de forma lenta. Nos primeiros 30 minutos de imersão ocorreu uma saturação de 1,04%, com aproximadamente 3h; este valor alcançou 1,23%, média de 0,09, por hora; com 24h a absorção se encontrava em 3,57% e com 96h a absorção estava em 9,49% de água.

Tabela 05 - Absorção de água - Resíduo retido na peneira 9,6mm (sem tratamento térmico)

ABSORÇÃO DE ÁGUA							
Amostra	Massa inicial	Tempo de imersão do resíduo					
		10 min	30 min	1h	3h	24h	96h
A-9,6	2,1095	2,1324	2,1384	2,1401	2,1462	2,1816	2,3117
B-9,6	1,2074	1,2147	1,2190	1,2195	1,2200	1,2504	1,3224
C-9,6	1,4784	1,4805	1,4857	1,4868	1,4894	1,5360	1,6391
D-9,6	1,6047	1,6124	1,6133	1,6139	1,6147	1,6425	1,7172
E-9,6	1,4532	1,4740	1,4785	1,4791	1,4799	1,5214	1,6122
F-9,6	0,9036	0,9106	0,9134	0,9139	0,9144	0,9403	1,0066
<b>Média</b>	<b>1,4594</b>	<b>1,4707</b>	<b>1,4747</b>	<b>1,4755</b>	<b>1,4774</b>	<b>1,5120</b>	<b>1,6015</b>
<b>Σ absorção %</b>	<b>0,0</b>	<b>0,77</b>	<b>1,04</b>	<b>1,10</b>	<b>1,23</b>	<b>3,57</b>	<b>9,49</b>

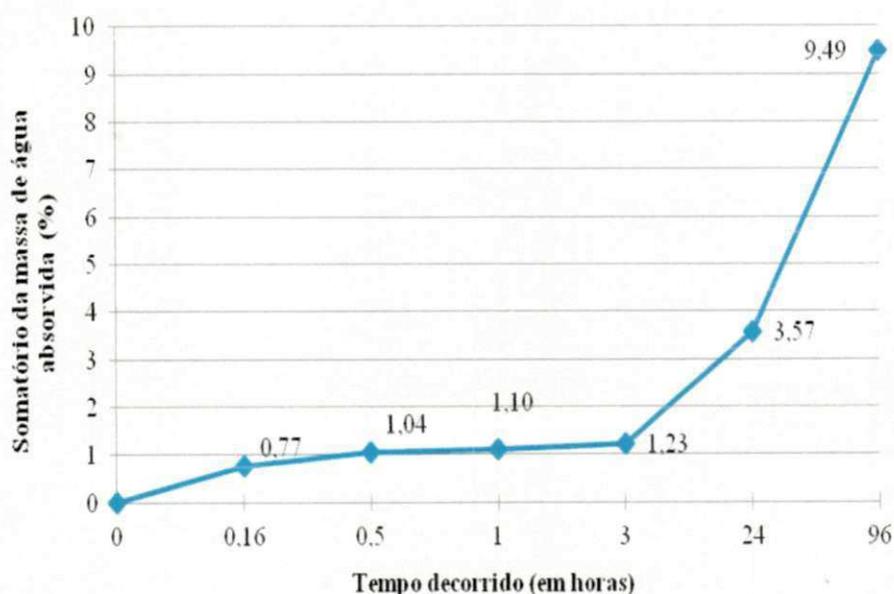


Figura 14: Somatório da massa de água absorvida – Resíduo 9,6mm (sem tratamento térmico)

Pela Figura 15 observou-se que, nos primeiros 30 minutos de imersão, o SBR - CTT obteve saturação de 2,35%, com aproximadamente 3h; este valor foi para 3,16%, média de 0,27 a hora; com 24h a absorção se encontrava em 6,68% e com 96h a absorção alcançou 12,93% de água.

Tabela 06 - Absorção de água - Resíduo retido na peneira 9,6mm (com tratamento térmico)

Amostra	Massa inicial	Tempo de imersão do resíduo					
		15 min	30 min	1h	3h	24h	96h
A-9,6	1,1880	1,2051	1,2213	1,2243	1,2332	1,2827	1,3652
B-9,6	1,3498	1,3665	1,3805	1,3833	1,3909	1,4394	1,5247
C-9,6	0,8092	0,8316	0,8406	0,8441	0,8538	0,8966	0,9788
D-9,6	1,0496	1,0602	1,0723	1,0754	1,0769	1,0981	1,1521
E-9,6	0,9004	0,9098	0,9205	0,922	0,9253	0,9608	1,0246
F-9,6	0,9114	0,9173	0,9200	0,9231	0,9267	0,9545	1,0011
<b>Média</b>	<b>1,0347</b>	<b>1,0484</b>	<b>1,0592</b>	<b>1,0620</b>	<b>1,0678</b>	<b>1,1053</b>	<b>1,1744</b>
<b>Σ absorção</b>	<b>0</b>	<b>1,32</b>	<b>2,35</b>	<b>2,62</b>	<b>3,16</b>	<b>6,68</b>	<b>12,93</b>

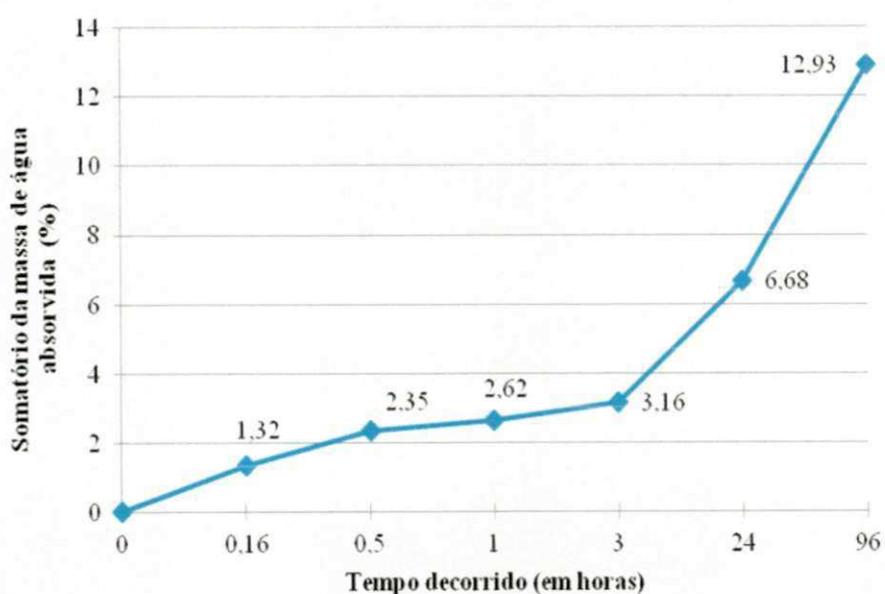


Figura 15: Somatório da massa de água absorvida – Resíduo 9,6mm (com tratamento térmico)

Com o tratamento térmico houve uma absorção de 12,93% enquanto o resíduo sem tratamento térmico obteve 9,96% de absorção em relação ao peso inicial, após 96h de imersão.

Uma observação interessante consiste no fato de que o resíduo estudado não apresentou uma estrutura física padronizada possuindo superfícies com texturas diferenciadas, em decorrência da moldagem térmica existente no processo de fabricação da sandália. Tais comprovações podem ser confirmadas nas imagens obtidas por microscópio óptico das três principais texturas encontradas no resíduo, classificadas pelo autor como parte superior (Figura 16), parte inferior (Figura 17) e parte interna (Figura 18).

Tanto na primeira como na segunda imagem é facilmente observado que a superfície se apresenta lisa com poucas áreas, para penetração da água; já na parte interna sua estrutura porosa permite tanto a penetração como a retenção de água.



Figura 16: Foto ampliada da parte superior do produto que dá origem ao resíduo  
Fonte: Própria



Figura 17: Foto ampliada da parte inferior do produto que dá origem ao resíduo  
Fonte: Própria

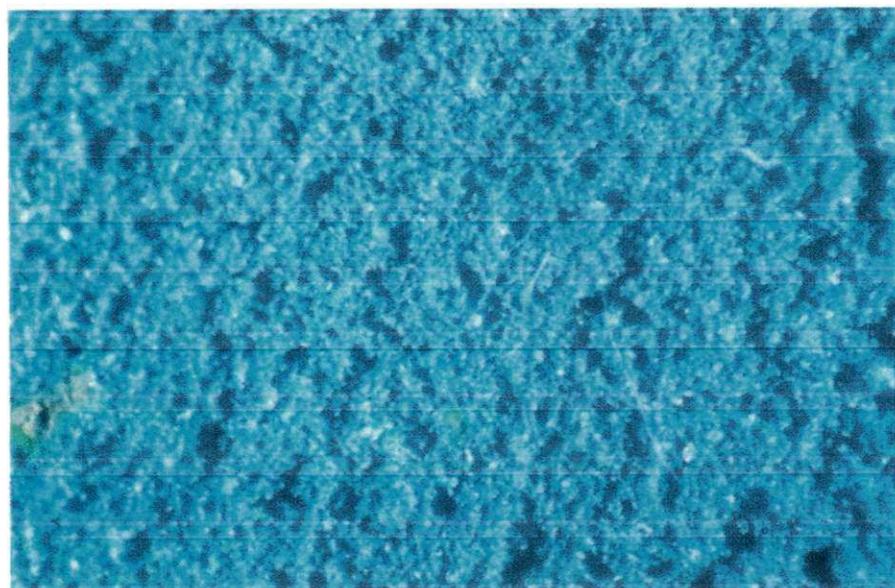


Figura 18: Foto ampliada da parte interna do produto que dá origem ao resíduo  
Fonte: Própria

#### **4.1.6 Análise termogravimétrica - TGA**

Os gráficos a seguir apresentam os resultados das análises termogravimétricas para o resíduo de SBR, empregado nas formulações desta pesquisa.

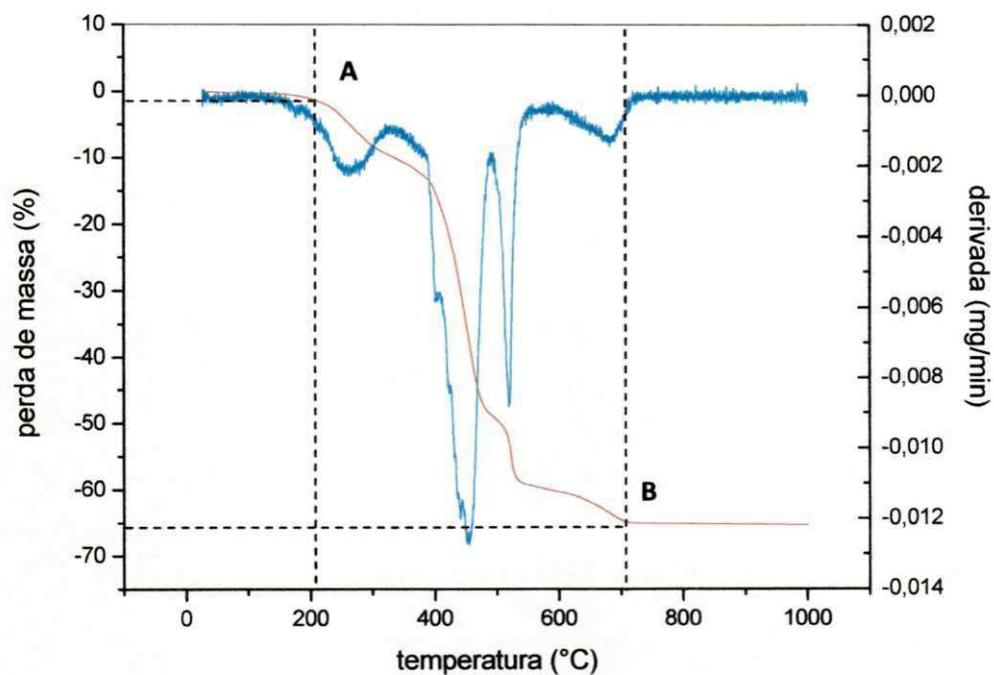


Figura 19: Análise termogravimétrica do resíduo retido na peneira 2,4mm

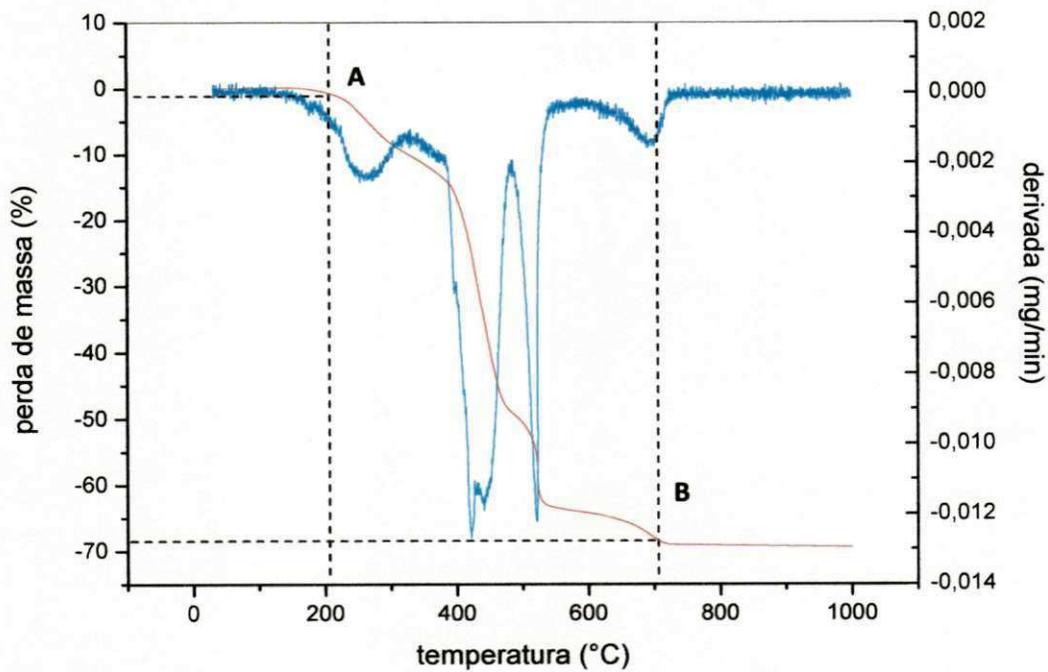


Figura 20: Análise termogravimétrica do resíduo retido na peneira 1,2mm

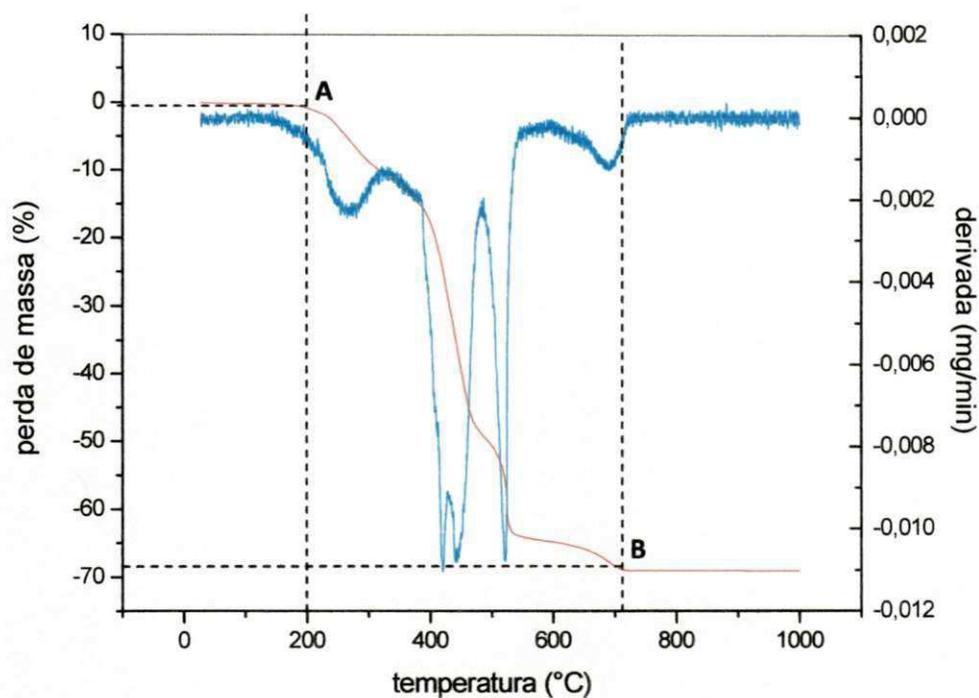


Figura 21: Análise termogravimétrica do resíduo retido na peneira 0,6mm

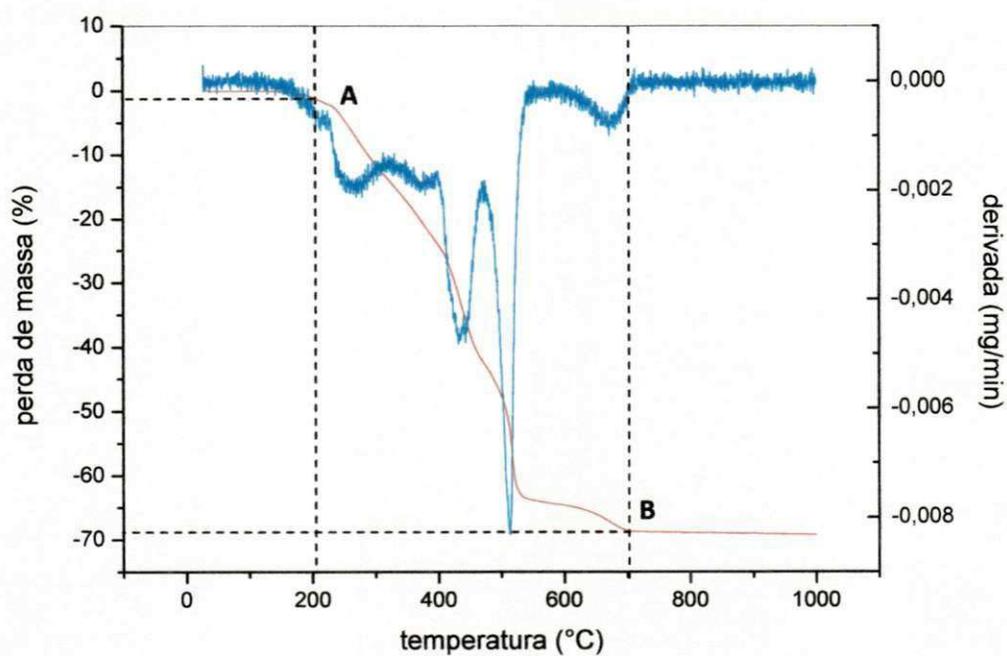


Figura 22: Análise termogravimétrica do resíduo retido na peneira 0,3mm

Pela análise termogravimétrica apresentada, pode-se perceber que antes do ponto A (próximo de 200°C) o processo de decomposição térmica se iniciou com a liberação dos

componentes voláteis. Entre **A** e **B** a perda de massa correspondeu ao conteúdo polimérico e a partir do ponto **B** o resíduo passou a ser termicamente estável. A principal perda de massa foi de aproximadamente 68% na faixa de 200°C a 700°C, correspondente ao elastômero.

Foi elaborado o quadro a seguir com os estágios de perda de massa do resíduo de SBR.

Quadro 15 -- Resultado da perda de massa dos resíduos retidos nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm durante o ensaio de TGA

Resíduo retido na peneira	Estágio Inicial - A		Estágio Final - B	
	T1 $\cong$	Perda de massa	T2 $\cong$	Perda de massa
2,4	201,41	- 0,94	708,85	- 65,24
1,2	202,44	- 0,51	706,78	- 68,72
0,6	200,12	- 0,92	703,18	- 68,62
0,3	203,29	- 1,14	702,28	- 68,56

Observou-se que o comportamento do resíduo das granulometrias retidas nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm se manteve praticamente o mesmo, o que corroborou em afirmar que durante a trituração do resíduo não existiu alteração significativa na sua estrutura química, já que os limites de perda de massa foram praticamente os mesmos.

A partir desses dados constatou-se que os tratamentos térmicos anteriormente empregados não alcançaram a temperatura ideal para haver redução considerável, tanto do volume como da massa do resíduo de SBR (acima de 200°C). Como forma de verificação de tal situação foi colocada uma amostra de 150g do resíduo retido na peneira 2,4mm, em mufla com aquecimento de 10°C por minuto, até a temperatura de 300°C, permanecendo nesta temperatura, durante 10 minutos, tempo em que foram verificadas a queima do SBR e a liberação de gases (tóxicos), devendo tal processo ser executado em mufla com capela. O SBR sofreu modificação de cor e de característica física (Figura 23), deixando de ser um material deformável para se transformar em um material semirrígido.

Com este processo de degradação houve redução da massa da amostra em 7,4% e a densidade passou de 0,301 para 0,421, ou seja, um aumento de 40%.



Figura 23: Decomposição térmica do resíduo acima de 300°C

Fonte: Própria

#### 4.1.7 Análise de espectroscopia por energia dispersiva – EDS

De acordo com os gráficos de EDS, foi possível identificar a presença dos elementos presentes nas amostras branca, amarela, azul e preta.

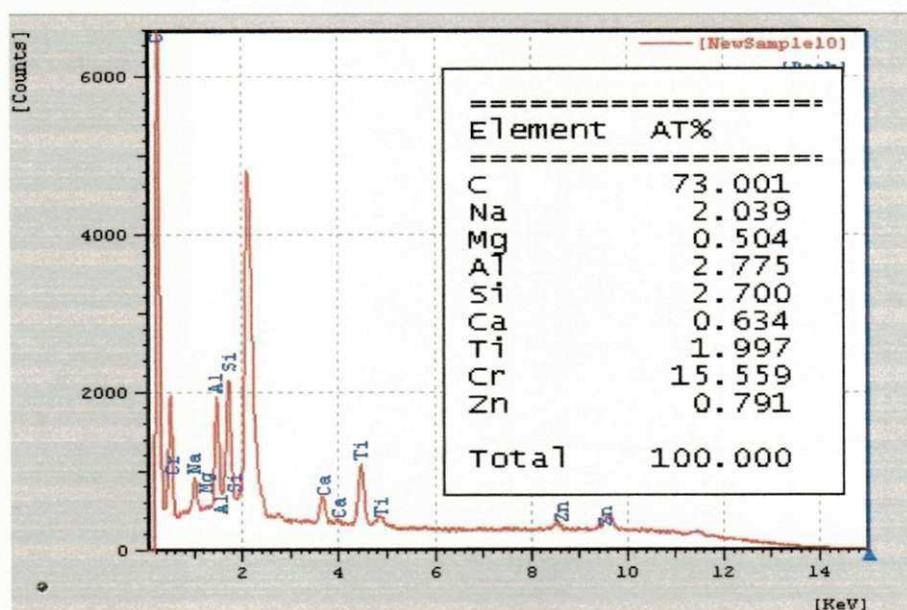


Figura 24: Resultado do EDS da amostra branca

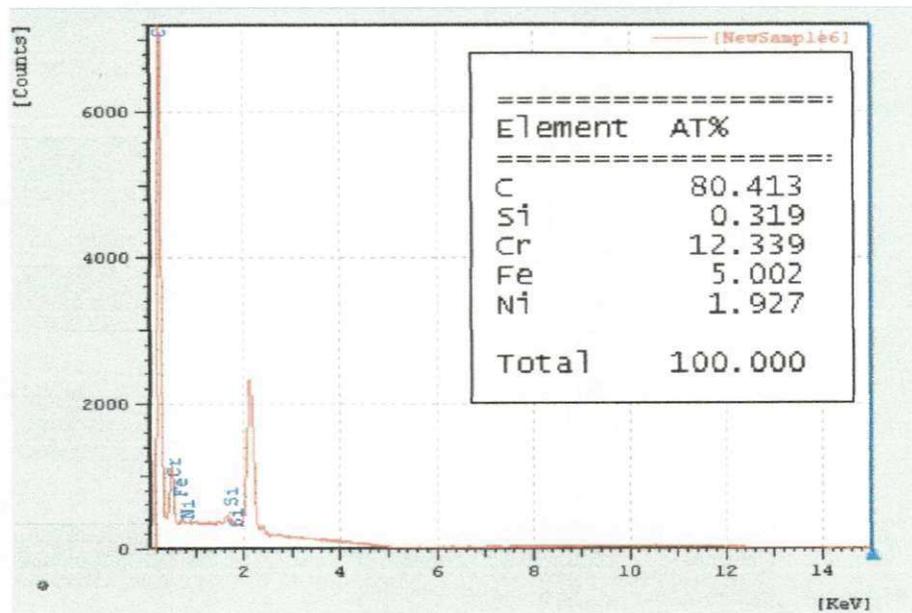


Figura 25: Resultado do EDS da amostra amarela

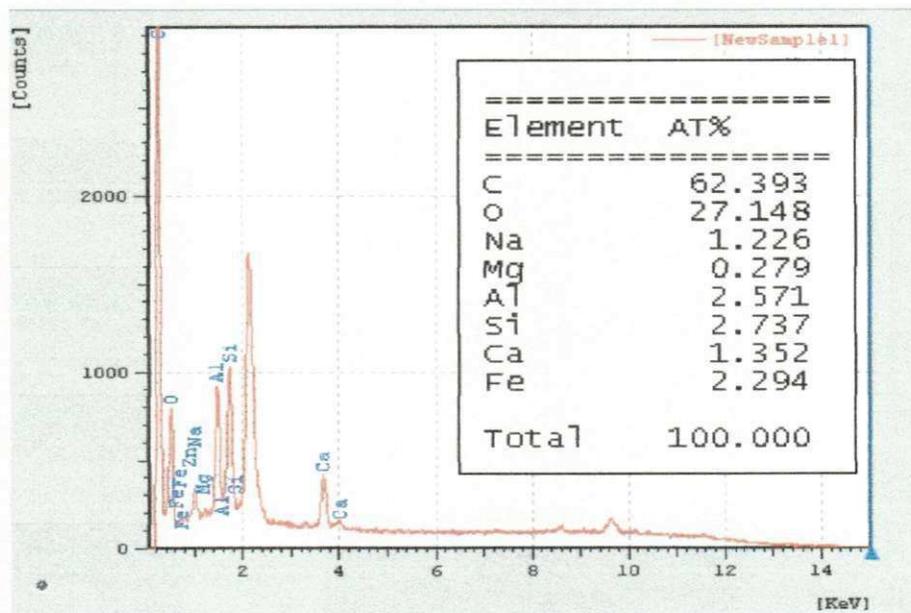


Figura 26: Resultado do EDS da amostra azul

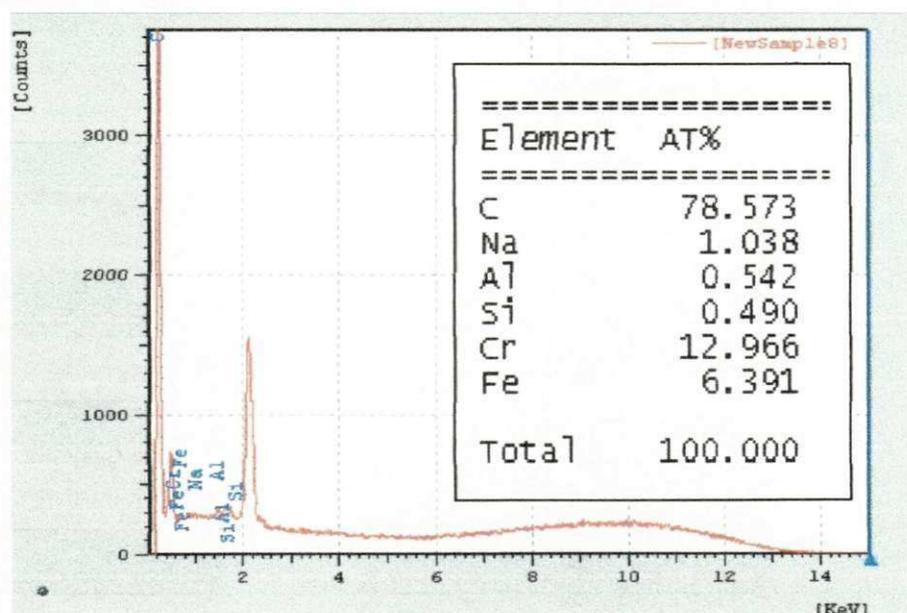


Figura 27: Resultado do EDS da amostra preta

Nas amostras apresentadas para análise, pode-se destacar a presença do cromo, como elemento que se apresenta em quantidade considerável; sua identificação foi caracterizada nas amostras de cor branca, amarela e preta, porém a amostra de cor azul não possui cromo em quantidade a ser mensurada. O titânio na amostra branca tem como origem, o dióxido de titânio e o zinco vêm do sulfeto de zinco, ambos usados para clarear a borracha.

#### 4.1.8 Análise de espectroscopia por infravermelho – FTIR

Pelos dados apresentados na análise de espectroscopia de infravermelho – FTIR, foi possível afirmar que todas as amostras, independente da cor, seja ela branca, amarela, azul ou preta, possuem a mesma composição química em relação aos grupos funcionais.

Praticamente há uma sobreposição de valores e da representação gráfica; os materiais possuem, praticamente, as mesmas características, não havendo diferença significativa neste caso, entre eles.

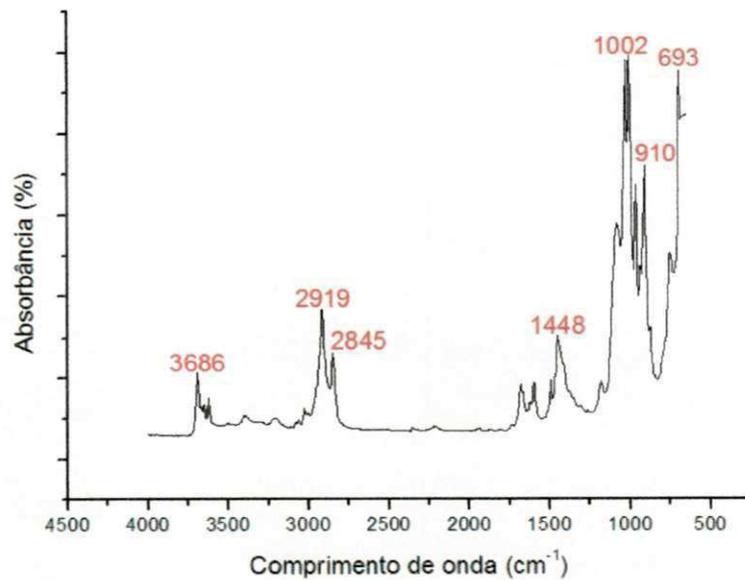


Figura 28: FTIR do SBR da cor branca

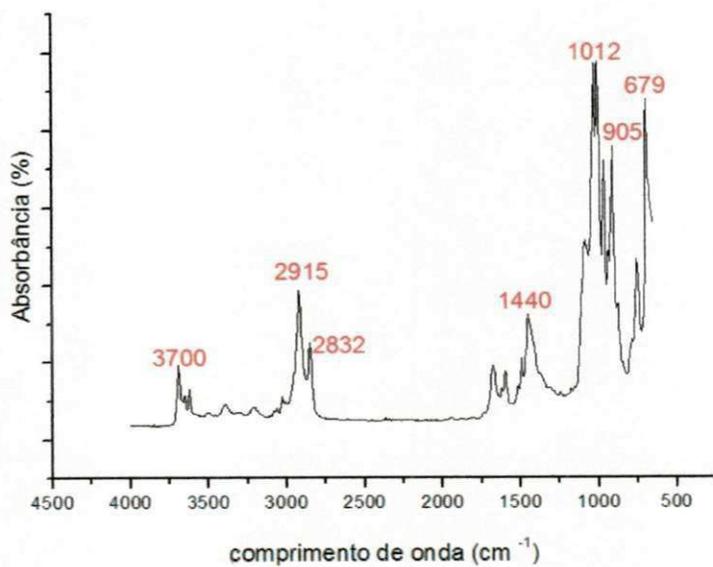


Figura 29: FTIR do SBR da cor amarela

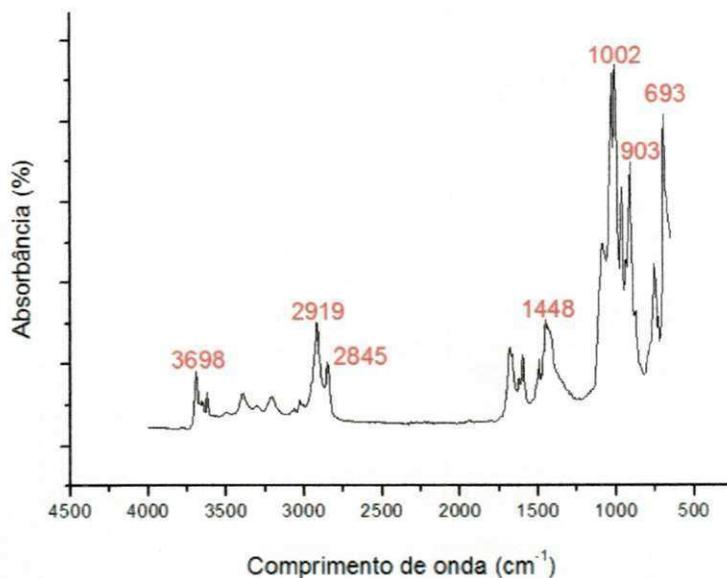


Figura 30: FTIR do SBR da cor azul

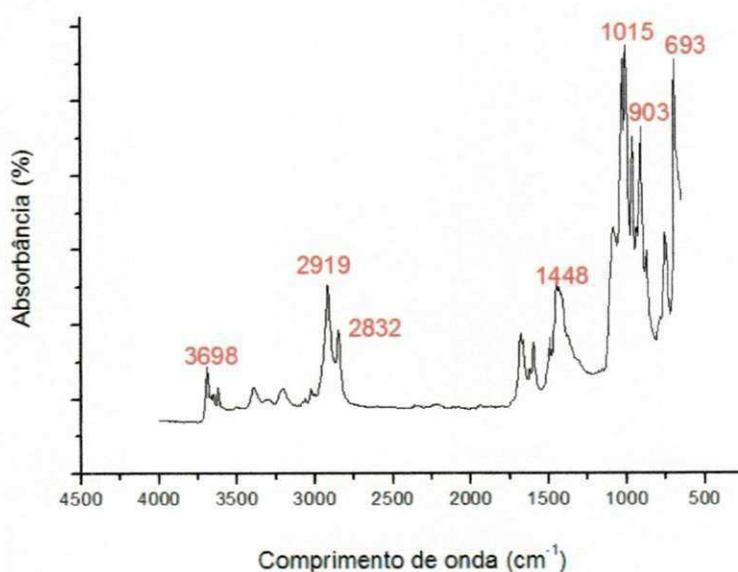


Figura 31: FTIR do SBR da cor preta

#### 4.1.9 Porosidade do resíduo

Com os dados obtidos através do ensaio de determinação do índice de porosidade, verificou-se que o resíduo de SBR possui 57,06% de vazios em sua estrutura e diâmetro médio dos poros 3,64 $\mu$ m (microporos). Este alto índice de porosidade pode ser visualizado nas imagens obtidas no MEV, em que se identificou que o interior da amostra é composto por bolhas. De acordo com a Figura 32 foi possível afirmar que o material não ofereceu resistência à penetração do mercúrio, no início do experimento (Região1), observado com a

verticalização da linha de representação, características inerentes aos ensaios com amostras extremamente porosas.

A Região 2 evidenciou o cessar de penetração do mercúrio, através do surgimento de um patamar.

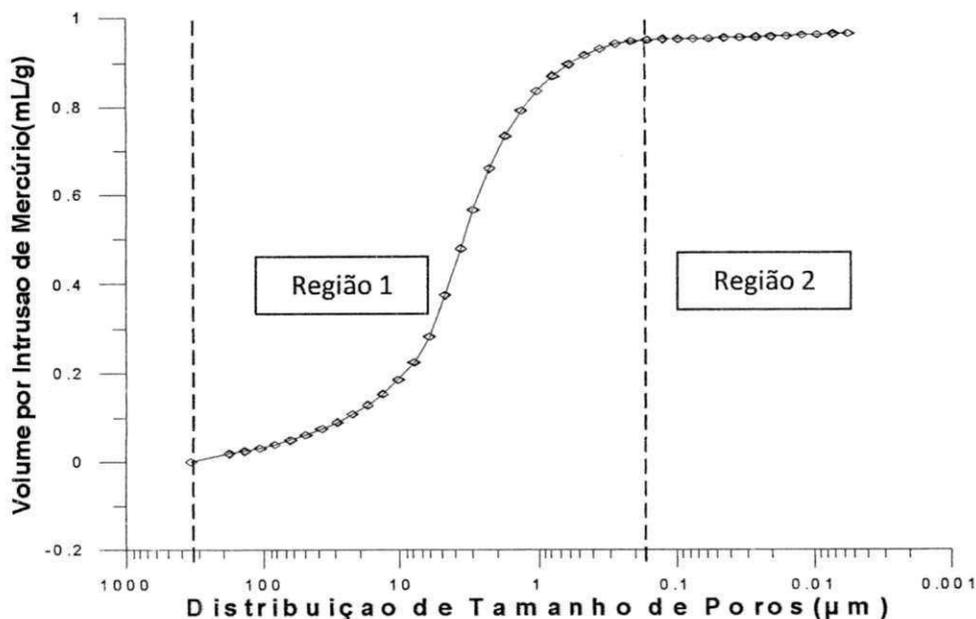


Figura 32: Distribuição do tamanho dos poros

#### 4.1.10 Microscopia eletrônica de varredura

Com o uso do MEV foi possível identificar que o cimento possui boa “ancoragem” no resíduo de SBR, em decorrência das reentrâncias surgidas no processo de cominuição. Nas Figuras 33 e 34 o SBR possui formato de “folhas de alface”, fato se deu pelo processo de polimento, que evidenciou a necessidade de se ter um método adequado para preparação da amostra a ser ensaiada.

Percebe-se que não houve penetração da massa de cimento com areia dentro do resíduo, o que ocorreu possivelmente por este não possuir canais conectando os poros externos com o interior do resíduo.

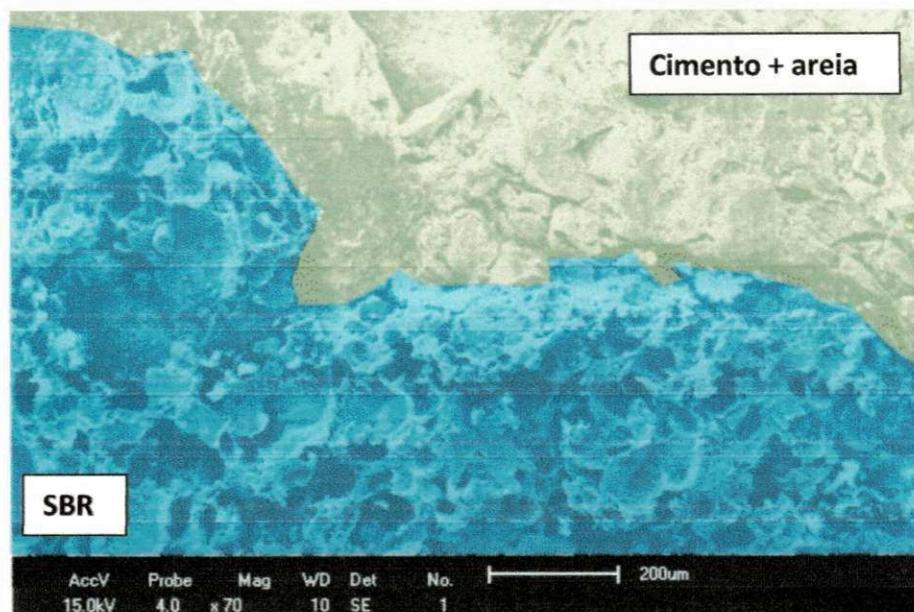


Figura 33: Imagem adquirida em MEV - SBR / cimento + areia

Fonte: Própria

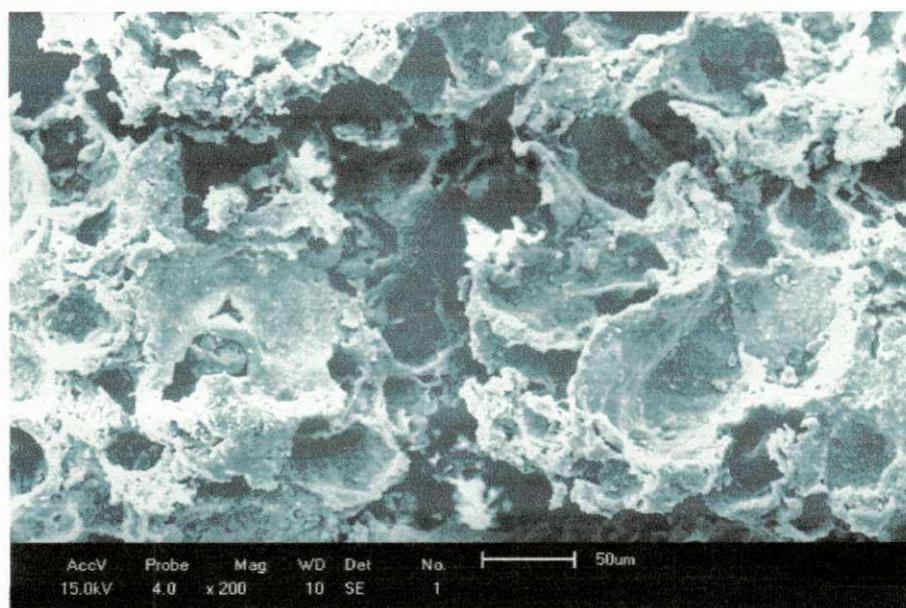


Figura 34: Imagem adquirida em MEV do resíduo de SBR polido

Fonte: Própria

Nas Figuras 35 e 36, cujo corte da amostra foi realizado com auxílio de estilete, foi possível perceber as bolhas e as cargas presentes no interior da amostra. Essas cargas têm origem tanto mineral como polimérica, com o reuso de boa parte do resíduo de SBR que não pode ser reaproveitado no processo de vulcanização da borracha.

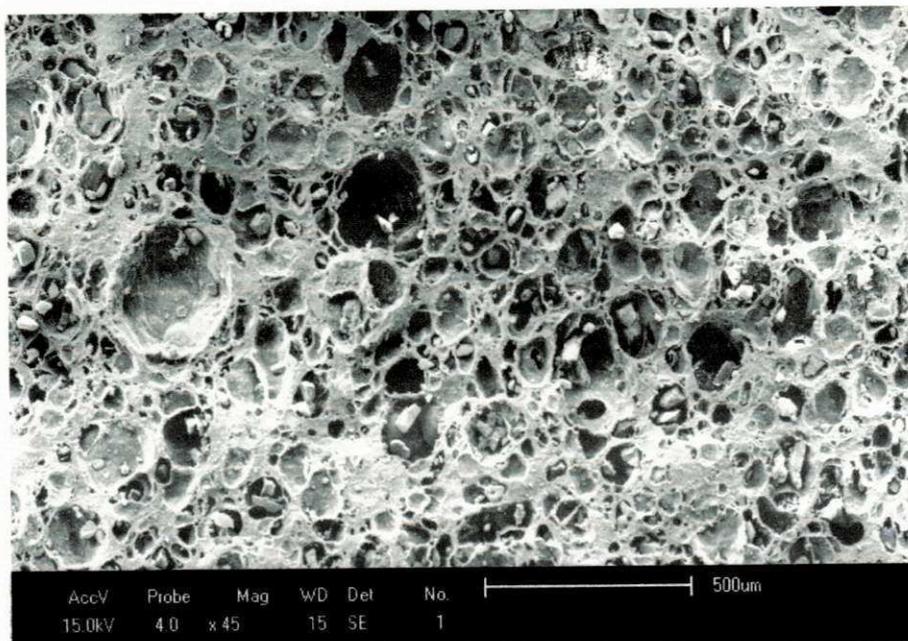


Figura 35: Imagem adquirida em MEV do interior do resíduo de SBR cortado  
Fonte: Própria

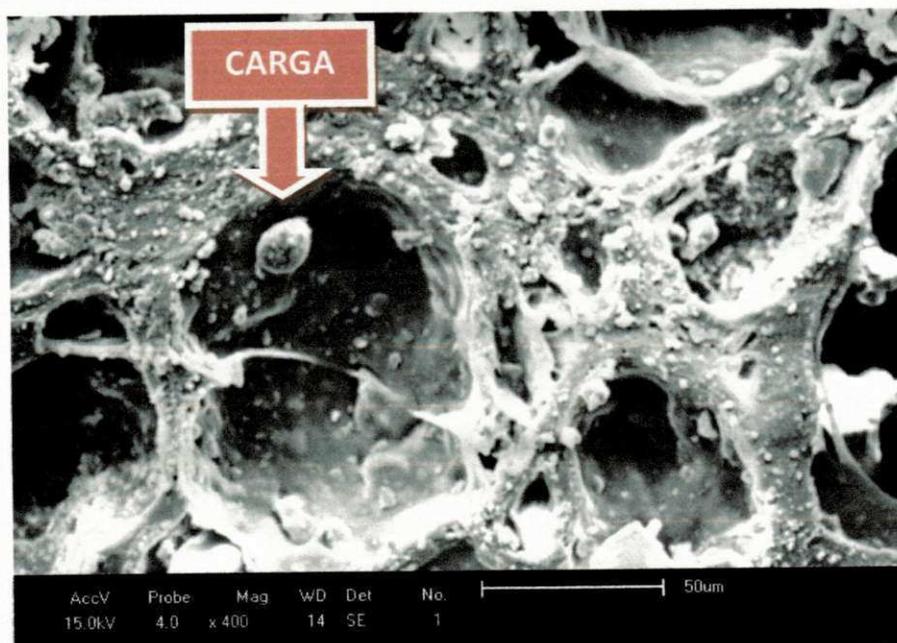


Figura 36: Ampliação de imagem do interior do resíduo de SBR cortado  
Fonte: Própria

## 4.2 Resultados dos Ensaio com Corpos de Prova Cilíndricos e Prismáticos

### 4.2.1 Ensaio de referência da compressão simples e da absorção de água dos corpos de prova (cimento : areia) – traços 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6

Para se ter uma referência comparativa, resolveu-se obter o resultado de compressão simples, utilizando-se cimento e areia (em volume) nas proporções de 1:3 à 1:6. Os corpos de prova foram identificados por letra, sendo coletada a amostra aleatoriamente.

Quadro 16 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples (cimento : areia) traços 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6

Resistência à Compressão Simples em MPa (megapascal)				
TRAÇO	1:3	1:4	1:5	1:6
	A – 8,70629	D – 7,48825	D – 2,87336	F – 3,95187
	D – 10,0193	A – 5,55829	A – 4,31017	G – 4,11556
	B – 7,58129	C – 5,47829	H – 5,06022	H – 3,63288
	F – 9,72581	H – 5,15916	B – 4,24689	E – 4,62430
	C – 8,27026	B – 6,27648	F – 4,79959	D – 4,51640
<b>MÉDIA</b>	<b>8,86059</b>	<b>5,99209</b>	<b>4,25805</b>	<b>4,16820</b>

Tabela 07 - Massa seca, massa saturada, massa imersa, densidade aparente, absorção, porosidade aparente dos corpos de prova (cimento : areia) – traços 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6

Absorção de Água							
		Massa Seca (g)	Massa Saturada (g)	Massa Imersa (g)	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Porosidade aparente (%)
1:3	E	373,2	407,8	214,5	1,93	9,27	17,90
	I	370,0	406,4	212,1	1,90	9,84	18,73
	H	371,3	404,7	213,8	1,95	9,00	17,50
1:4	F	361,2	398,4	205,5	1,87	10,30	19,28
	E	360,2	397,5	203,8	1,86	10,36	19,26
	G	360,1	397,2	203,7	1,86	10,30	19,18

1:5	C	354,5	391,8	200,3	1,85	10,52	19,47
	E	356,0	388,5	199,9	1,89	9,13	17,23
	G	338,4	373,6	190,5	1,85	10,40	19,22
1:6	C	342,9	378,5	191,2	1,83	10,38	19,01
	A	343,8	382,3	193,5	1,82	11,20	20,40
	B	341,5	379,9	194,2	1,84	11,24	20,68

#### 4.2.2 Primeiro Ensaio – Resistência à compressão simples dos corpos de prova (cimento : SBR) – traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6

Foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing = 5\text{cm}$  e  $h = 10\text{cm}$ ) segundo as normas NBR 5738 (ABNT, 2003) e NBR 7215 (ABNT, 1997), constituídos dos traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6, de cimento com agregado de SBR homogeneizado com fator de água/cimento de 0,5. Após 28 dias de cura os corpos de prova foram ensaiados para obtenção dos resultados de compressão simples e absorção de água.

Quadro 17 - Resultado do primeiro ensaio - resistência à compressão simples (cimento : SBR) traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6

Resistência à Compressão Simples em MPa (megapascal)					
TRAÇO	1:2	1:3	1:4	1:5	1:6
	A - 1,53942	B - 0,93414	G - 0,73719	H - 0,59398	E - 0,52563
	G - 1,64968	H - 1,15788	H - 0,68960	C - 0,69897	G - 0,59100
	E - 1,90147	G - 0,92675	A - 0,83138	G - 0,76799	B - 0,59457
	B - 1,81048	F - 1,08529	C - 0,64011	D - 0,73540	C - 0,47263
	H - 1,79414	A - 1,00925	F - 0,73161	B - 0,63643	F - 0,62609
<b>MÉDIA</b>	1,73904	1,02266	0,72598	0,686554	0,561984

De acordo com os dados apresentados foi possível verificar que o traço com maior resistência à compressão, foi o 1:2, com aferimento de 1,90MPa e média de 1,73MPa em decorrência da maior quantidade de cimento contida na amostra. Conforme análise estatística (ANEXO C), não houve diferença significativa entre os corpos de prova 1:4, 1:5 e 1:6; esses traços apresentaram maior dificuldade de conformação uma vez que a água utilizada encharcou a massa, dificultando a compactação dos corpos de prova.

Com relação às rupturas dos corpos de prova, as mesmas se concentraram na parte inferior, caracterizando uma ruptura em diagonal.

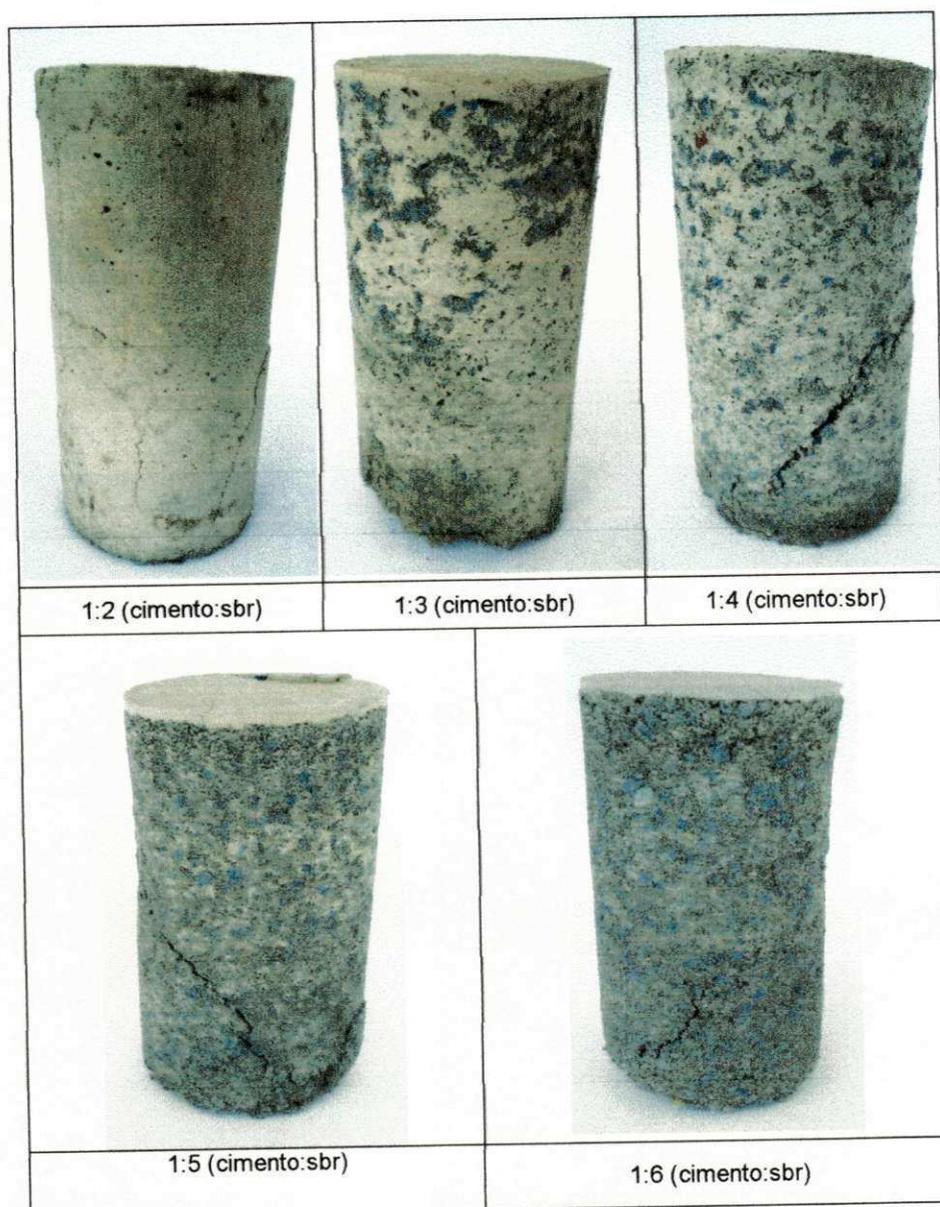


Figura 37: Tipos de ruptura ocorridas com os corpos de prova (cimento : SBR) traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6

Fonte: Própria

#### 4.2.3 Imagens do interior do corpo de prova (cimento : SBR) – traço 1:6

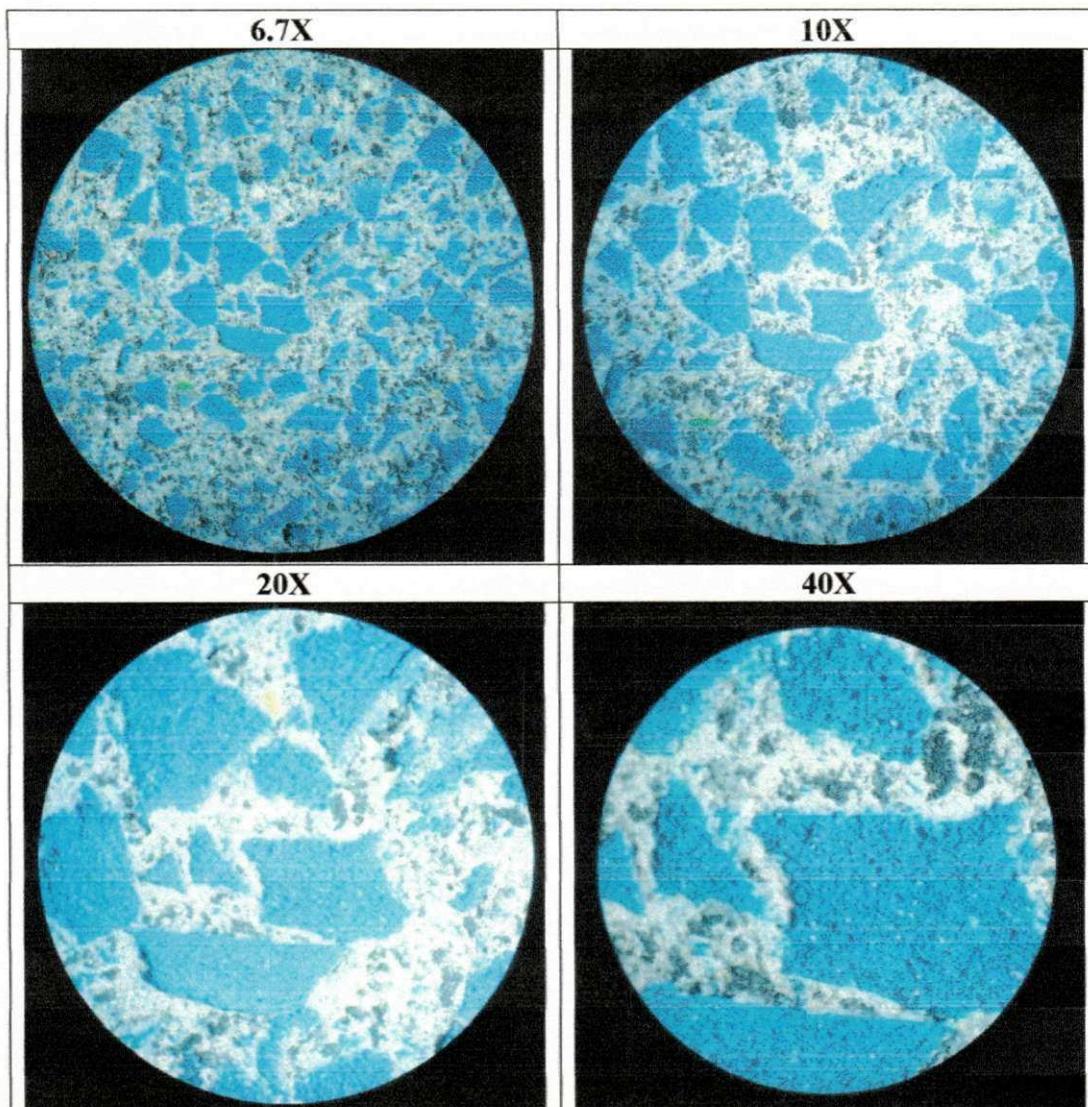


Figura 38: Fotografias realizadas em microscópio óptico – traço 1:6 (ampliação x6,7, x10, x20 e x40)  
Fonte: Própria

Nesta amostra verificou-se boa distribuição do resíduo dentro do composto porém baixa quantidade de cimento se torna visível, resultando no comprometimento dos valores de resistência à compressão simples.

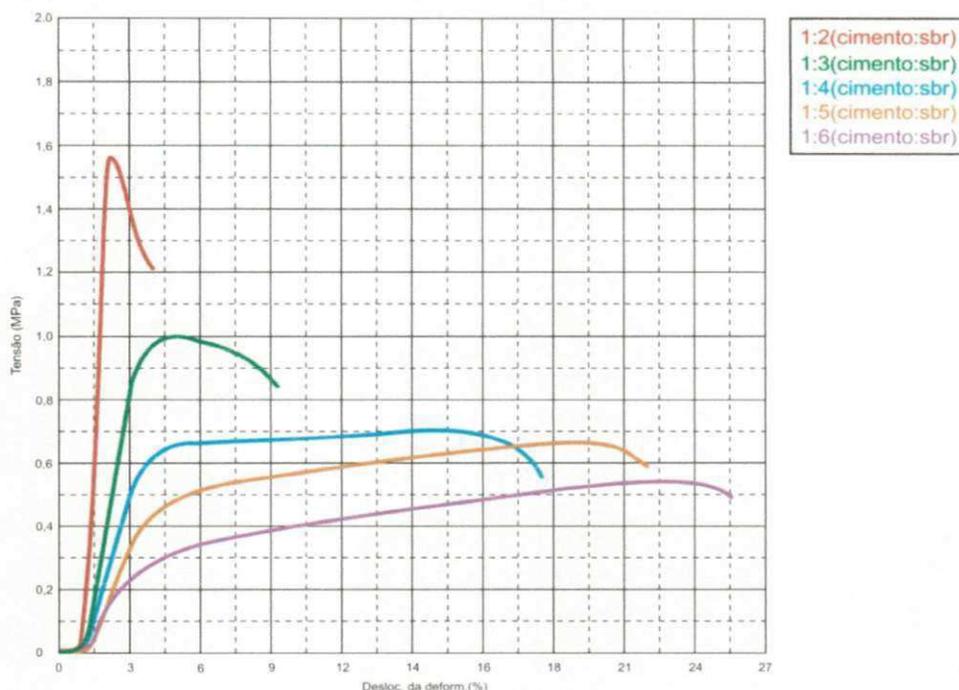


Figura 39: Médias - Tensão / Deformação – 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6 (cimento : SBR)

A partir dos dados obtidos nos ensaios ficou identificado que, quanto maior a quantidade de SBR na amostra, maior também é a elasticidade do corpo de prova.

Outra situação interessante ocorreu em alguns corpos de prova das proporções 1:4 e 1:5, que sofreram diminuição da altura e voltaram à posição próxima do ponto inicial sem deixar visível a ruptura ocorrida durante o ensaio de compressão simples.

Com esses resultados verificou-se a necessidade de incorporar areia na mistura de cimento com SBR, para elevar a resistência à compressão simples dos corpos de prova e reduzir o tempo para saturação de água das amostras; porém assim, trabalhou-se com a mistura de 1:4 (cimento: SBR + areia) mantendo-se, constante o fator<sub>a/c</sub>.

#### 4.2.4 Segundo Ensaio – Resistência à compressão simples dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) – traço 1:4

Foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos ( $\varnothing = 5\text{cm}$  e  $h = 10\text{cm}$ ) segundo as normas NBR 5738 (ABNT, 2003) e NBR 7215 (ABNT, 1997) constituídos do traço 1:4 de cimento com agregado nas seguintes proporções (60% SBR / 40% AREIA, 70% SBR / 30% AREIA, 80% SBR / 20% AREIA e 90% SBR / 10% AREIA), com fator<sub>a/c</sub> de 0,5.

Visando à conformação dos corpos de prova desta segunda etapa (cimento : SBR + areia) se fizeram necessárias a determinação da granulometria da areia, o máximo diâmetro e o módulo de finura.

Tabela 08 - Composição granulométrica da areia (amostra 1000g)

Abertura da peneira (mm)	% Retida	% Retida acumulada	% que passa da amostra total
9,6	0	0	100,00
4,8	2,07	2,07	97,93
2,4	3,71	5,78	94,22
1,2	11,65	17,43	82,57
0,6	25,90	43,33	56,67
0,3	25,77	69,10	30,90
0,15	28,23	97,33	2,67
Resto	2,67	100,00	0

$\emptyset$  Max  $\leq$  5% da % retida acumulada = 4,8

MF =  $(\sum \% \text{ retida acumulada}) / 100 = 235,04 / 100 = 2,3504$

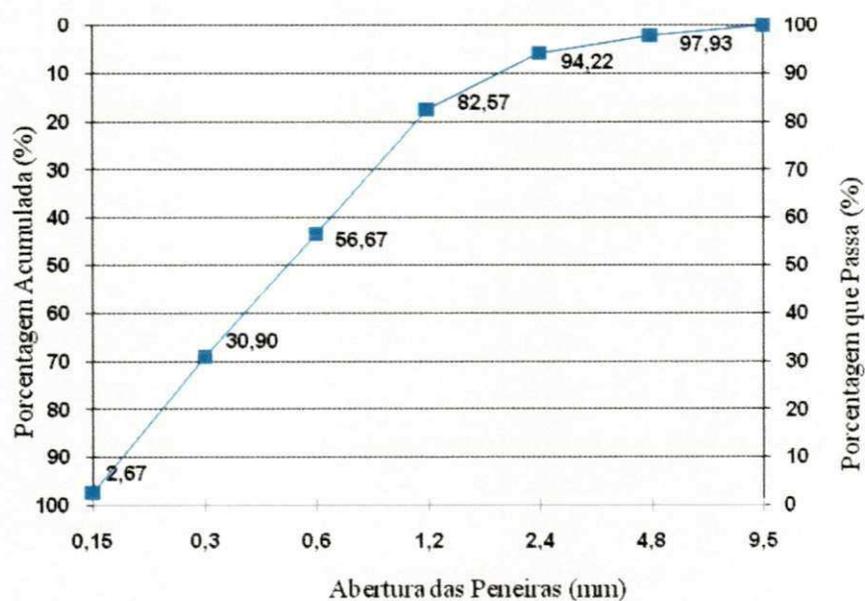


Figura 40: Retenção de material nas peneiras – AREIA

Para a homogeneização da areia foram utilizadas partes iguais em volume dos materiais contidos nas peneiras 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15mm.

Após 28 dias de cura os corpos de prova foram ensaiados para obtenção dos resultados de compressão simples e absorção de água.

Quadro 18 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples (cimento : SBR + areia) traço 1:4

Resistência à Compressão Simples em MPa (megapascal)				
TRAÇO	1:4	1:4	1:4	1:4
	60% SBR 40% AREIA	70% SBR 30% AREIA	80% SBR 20% AREIA	90% SBR 10% AREIA
	A – 2,17807	D – 1,45224	D – 0,95467	F – 0,76709
	D – 2,05976	A – 1,67205	A – 0,97726	G – 0,75235
	B – 2,13208	C – 1,28028	H – 1,03026	H – 0,77768
	F – 2,36361	H – 1,51153	B – 1,06882	E – 0,90964
	C – 1,97035	B – 1,54124	F – 0,98955	D – 0,87927
<b>MÉDIA</b>	2,14077	1,49147	1,00411	0,81721

Com o traço 1:4 (60% SBR e 40% areia) obtiveram-se valores de 2,36MPa (individual) e de 2,14MPa (média). Conforme análise estatística (ANEXO D) não existe diferença significativa entre 1:4 (80% SBR e 20% areia) e 1:4 (90% SBR e 10% areia); além disto, esses dois traços apresentaram dificuldade de compactação da mistura em decorrência do fator  $a/c$  não se adequar a esta proporção.

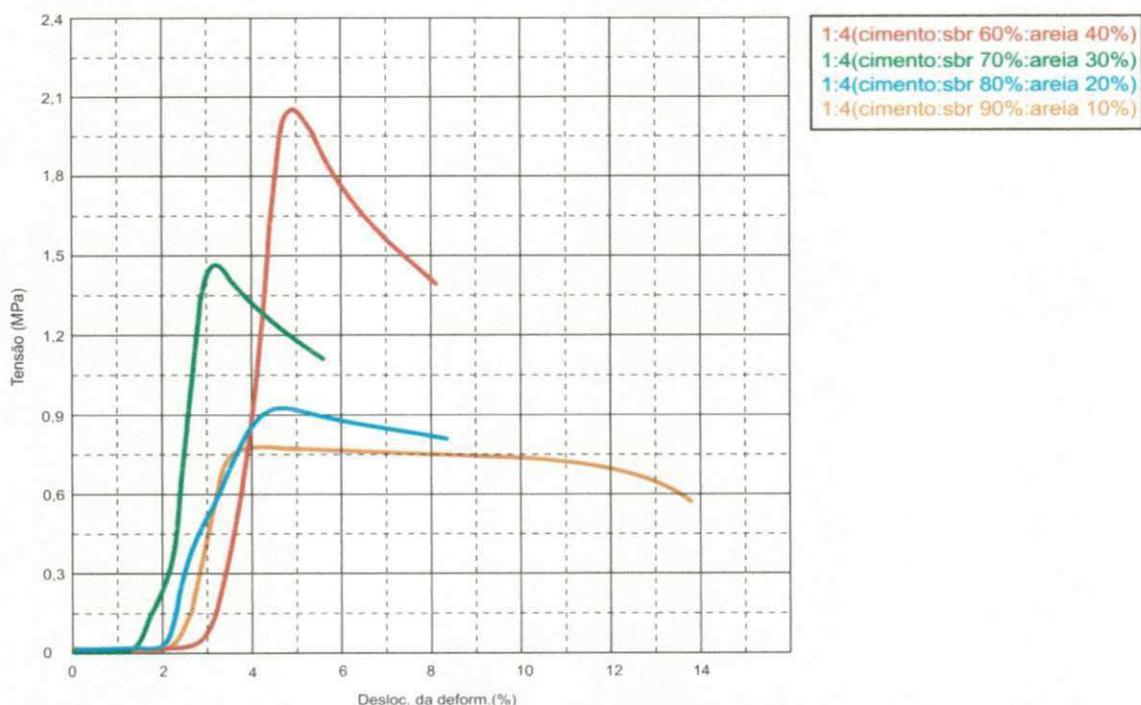


Figura 41: Médias - Tensão / Deformação – 1:4 (cimento : SBR + areia) 60/40, 70/30, 80/20 e 90/10 (SBR/areia)

Com relação ao primeiro experimento, no qual houve a utilização apenas do SBR com cimento obteve-se, como média, 0,726MPa no ensaio de compressão simples; já com a utilização de 40% de areia na composição do traço foram obtidos, como valor médio, 2,141MPa, quase 3 vezes o valor do experimento anterior.

#### 4.2.5 Terceiro Ensaio – Resistência à compressão simples e absorção de água dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) – traço 1:3

A partir da constatação apresentada no parágrafo anterior, vislumbrou-se a possibilidade de testar o traço 1:3 com a variação de SBR e areia (50% SBR / 50% areia, 60% SBR / 40% areia e 70% SBR / 30% areia).

Após 28 dias de cura os corpos de prova foram ensaiados para obtenção dos resultados de compressão simples e absorção de água; para os corpos de prova confeccionados com o traço 1:3, foram calculadas a densidade aparente, absorção e porosidade aparente, já que tais corpos de prova apresentaram resultados mais satisfatórios para compressão simples em relação às duas moldagens anteriores.

Quadro 19 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples (cimento : SBR + areia) traço 1:3

<b>Resistência à Compressão Simples em MPa (megapascal)</b>			
<b>TRAÇO</b>	<b>1:3 (50% SBR / 50% areia)</b>	<b>1:3 (60% SBR / 40% areia)</b>	<b>1:3 (70% SBR / 30% areia)</b>
	G – 2,34840	H – 2,09490	D – 1,71061
	H – 3,07757	C – 2,20731	G – 2,15065
	A – 3,26687	A – 2,40162	B – 2,35606
	C – 2,45848	D – 2,23444	C – 2,66517
	F – 3,30281	B – 2,33349	F – 2,33463
<b>MÉDIA</b>	<b>2,89083</b>	<b>2,25435</b>	<b>2,24342</b>

De acordo com os dados apresentados, o traço 1:3 (50% SBR e 50% areia) obteve valores de resistência à compressão de 3,30MPa (individual) e de 2,89MPa (média) dentro, portanto, da norma NBR 7173 (ABNT, 1982) para confecção de blocos vazados de concreto

simples para alvenaria sem função estrutural. Conforme a análise estatística (ANEXO E) não existe diferença significativa entre 1:3 (60% SBR e 40% areia) e 1:3 (70% SBR e 30% areia).

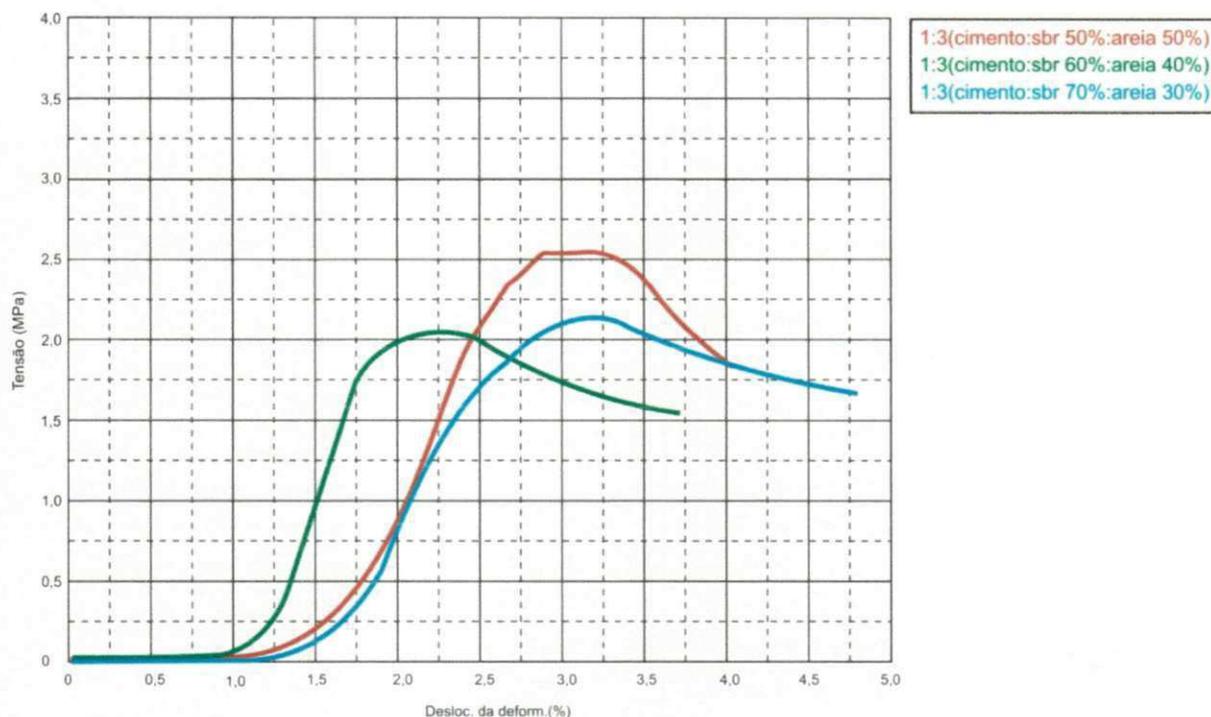


Figura 42: Médias - Tensão / Deformação - 1:3 (cimento : SBR + areia) 50/50, 60/40 e 70/30 (SBR/areia)

Tabela 09 - Massa seca, massa saturada, massa imersa, densidade aparente, absorção, porosidade aparente dos corpos de prova (cimento: SBR + areia) traço 1:3

#### Absorção de Água

Composição dos corpos de prova		Massa Seca (g)	Massa Saturada (g)	Massa Imersa (g)	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Porosidade aparente (%)
1:3 50% SBR 50% areia	B	276,4	316,2	131,41	1,50	14,40	21,54
	D	287,3	327,5	137,25	1,51	13,99	21,13
	I	294,0	333,5	140,62	1,52	13,44	20,48
1:3 60% SBR 40% areia	G	256,8	294,2	109,95	1,39	14,56	20,30
	F	266,4	302,4	112,36	1,40	13,51	18,94
	I	265,2	303,2	111,52	1,38	14,33	19,83
1:3 70% SBR 30% areia	E	259,4	290,2	105,50	1,40	11,87	16,68
	H	270,0	299,7	108,04	1,41	11,00	15,50
	A	258,4	291,1	104,43	1,38	12,65	17,52

Uma situação interessante analisada no quadro anterior, consiste no fato de que, quanto maior a quantidade de borracha no corpo de prova **MENOR** é sua absorção de água, dado que vai de encontro ao que se supunha pois, tendo o SBR característica esponjosa, deveria permitir uma contenção maior de água, em seu interior porém, ao se fotografar o corpo de prova e ampliá-lo 40 vezes, verificou-se que o resíduo de SBR possui, na sua estrutura física, bolhas internas, apresentando-se, assim, como elemento com características de impermeabilidade, fazendo com que a água usada na mistura do agregado com o cimento fique na maior parte retida em sua periferia, não penetrando na estrutura da borracha – a borracha possui característica **hidrofóbica**.<sup>4</sup> Esse tipo de comportamento impede também a penetração do cimento na borracha, no intuito de melhorar a integração dos materiais do compósito.

#### **4.2.6 Quarto Ensaio – Resistência à compressão simples e absorção de água dos corpos de prova (cimento: SBR com e sem tratamento térmico + areia) – traço 1:3 (50% SBR / 50% areia)**

Para verificar a possibilidade de melhoria da conformação dos corpos de prova e da resistência nos ensaios de compressão simples e de flexão, foi utilizado o fator<sub>a/c</sub> 0,33 ao invés do fator<sub>a/c</sub> 0,5, que vinha sendo aplicado; além disto, foi realizado tratamento térmico do resíduo em estufa a 100°C, durante 96h.

Segue, abaixo, a caracterização dos corpos de prova:

- a) 1:3 (50% SBR - **homogeneizado** com tratamento térmico / 50% areia);
- b) 1:3 (50% SBR - **homogeneizado** sem tratamento térmico / 50% areia);
- c) 1:3 (50% SBR - retido na **peneira 2,4mm** com tratamento térmico / 50% areia);
- d) 1:3 (50% SBR - retido na **peneira 2,4mm** sem tratamento térmico / 50% areia);

---

<sup>4</sup> Hidrofóbica - repelir

Quadro 20 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) traço 1:3 - resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm, com e sem tratamento térmico

Resistência à Compressão Simples em MPa (megapascal)				
TRAÇO	1:3 SBR HCTT	1:3 SBR HSTT	1:3 SBR 2,4 CTT	1:3 SBR 2,4 STT
	3,92641	3,99823	5,42806	5,05340
	4,63590	4,55636	4,22915	3,79182
	4,87388	4,41073	4,36232	4,23735
	4,07683	4,30024	4,94363	3,15785
	4,30947	4,26091	3,20615	5,55099
<b>MÉDIA</b>	<b>4,36450</b>	<b>4,30529</b>	<b>4,43386</b>	<b>4,35828</b>

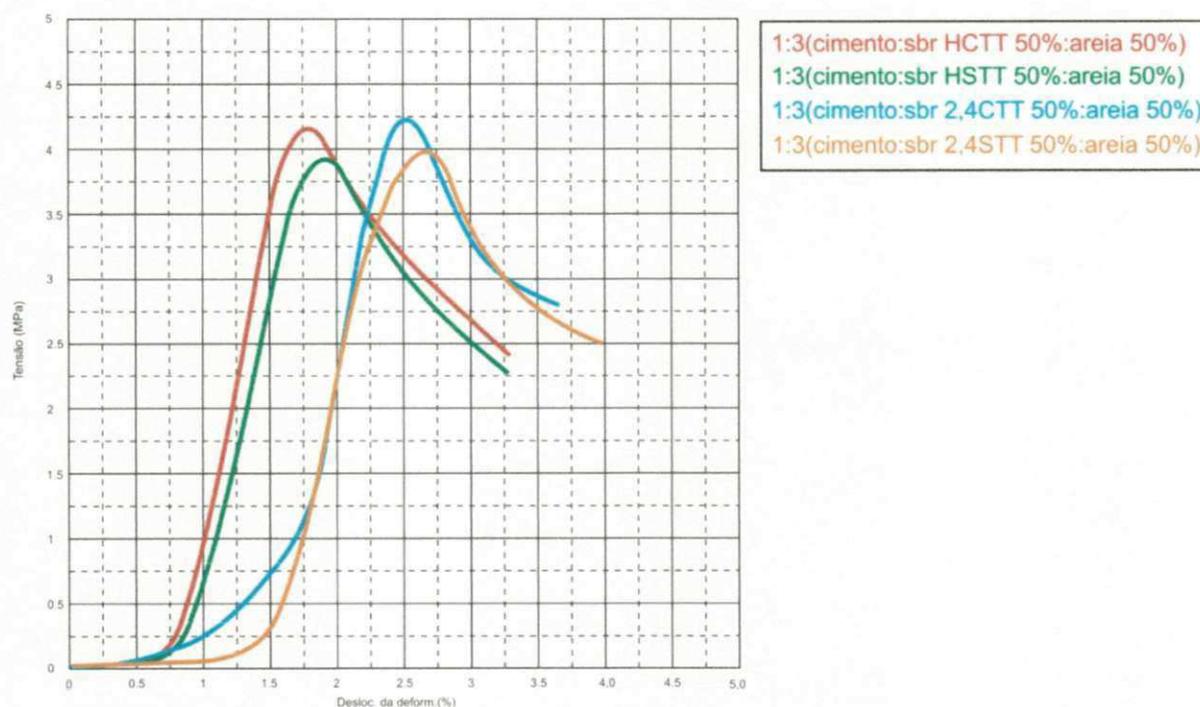


Figura 43: Média - Tensão / Deformação – 1:3 (cimento : SBR + areia) 50/50 (SBR HCTT/ HSTT/ 2,4CTT/ 2,4STT : areia) – ensaio de resistência à compressão simples

Através das análises apresentadas anteriormente, foi verificado que :

- a) Não houve diferença significativa entre os resultados obtidos (ANEXO F);
- b) Levando-se em consideração os custos operacionais para tratamento do resíduo, verificou-se que o melhor resultado consiste no uso do SBR retido na peneira 2,4mm, sem tratamento térmico;
- c) A redução do fator água/cimento melhorou a trabalhabilidade do material e, em contrapartida, elevou os resultados de compressão simples em relação aos resultados obtidos com fator<sub>a/c</sub> 0,5.

Tabela 10 - Massa seca, massa saturada, massa imersa, densidade aparente, absorção, porosidade aparente dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) – com e sem tratamento térmico – homogeneizado e retido na peneira 2,4mm traço 1:3 (50% SBR / 50% areia)

#### ABSORÇÃO DE ÁGUA

Composição dos corpos de prova		Massa Seca (g)	Massa Saturada (g)	Massa Imersa (g)	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Porosidade aparente (%)
SBR HCTT	E	327,2	358,2	162,46	1,67	9,474	15,84
	H	330,5	362,8	164,45	1,67	9,773	16,28
	B	325,0	355,4	161,79	1,68	9,354	15,70
SBR HSTT	I	312,7	345,5	147,7	1,58	10,489	16,58
	D	315,5	345,6	146,8	1,59	9,540	15,14
	G	311,6	343,8	145,9	1,57	10,334	16,27
SBR 2,4 CTT	D	321,6	350,0	154,08	1,64	8,831	14,50
	G	315,9	344,1	150,54	1,63	8,927	14,57
	B	304,7	331,4	146,04	1,64	8,763	14,40
SBR 2,4 STT	I	301,8	333,4	139,25	1,55	10,471	16,28
	C	305,0	335,6	135,23	1,52	10,033	15,27
	E	313,6	344,1	147,55	1,60	9,726	15,52

No Quadro 21 foi apresentado resumo dos ensaios de compressão simples e de absorção de água, realizado neste trabalho, destacando-se o fator<sub>a/c</sub> como principal elemento responsável pelo aumento ou diminuição dos valores de resistência à compressão simples,

visto que o mesmo, dependendo da sua proporção, viabilizou a trabalhabilidade durante a confecção dos corpos de prova.

Quadro 21 - Médias das resistências à compressão simples dos corpos de prova cilíndricos ensaiados no experimento

Traço	Fator $a/c$	Proporção	Substituição do agregado por SBR (%)	Tratamento Térmico do SBR	Granulom. do SBR	Resistência à Compressão Simples (MPa)	Absorção de Água (%)
<b>Traço 1</b> (cimento : SBR)	0,5	1 : 2	100	Não	homo	1,74 a	-
		1 : 3	100	Não	homo	1,02 b	-
		1 : 4	100	Não	homo	0,73 c	-
		1 : 5	100	Não	homo	0,69 c	-
		1 : 6	100	Não	homo	0,56 c	-
<b>Traço 2</b> (cimento : areia + SBR)	0,5	1 : 4	60	Não	homo	2,14 a	-
		1 : 4	70	Não	homo	1,49 b	-
		1 : 4	80	Não	homo	1,00 c	-
		1 : 4	90	Não	homo	0,82 c	-
<b>Traço 3</b> (cimento : areia + SBR)	0,5	1 : 3	50	Não	homo	2,89 a	13,94
		1 : 3	60	Não	homo	2,25 b	14,13
		1 : 3	70	Não	homo	2,24 b	11,84
<b>Traço 4</b> (cimento : areia + SBR)	0,33	1 : 3	50	Sim	homo	4,36 a	9,53
		1 : 3	50	Sim	2,4	4,31 a	8,84
		1 : 3	50	Não	homo	4,43 a	10,11
		1 : 3	50	Não	2,4	4,36 a	10,07

Traço 1 e Traço 2 significância a nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ) Traço 3 e Traço 4 significância a nível de 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ) de acordo com o Teste de Tukey

Como houve melhoria significativa com relação ao traço 3 e ao traço 4, verificou-se a necessidade de realização de análise estatística para identificar se os fatores, tratamento térmico, variação da granulometria e variação de fator  $a/c$  interferem nos resultados obtidos.

Através da análise estatística (ANEXO G) identificou-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos térmicos nem entre a variação de granulometria, do traço 4, porém foi notória a diferença entre o tratamento (traço 4) e o tratamento adicional (traço 3), em vermelho no quadro acima. De acordo com o teste de Shapiro-Wilk, a 5% de significância os resíduos podem ser considerados normais; através do contraste do tratamento adicional (traço 3) com o fatorial (traço 4), notou-se diferença entre eles; Desta forma, comprovou-se que o fator  $a/c$  é o principal responsável pelo aumento dos valores de resistência à compressão simples.

#### 4.2.7 Ensaio de flexão dos corpos de prova (cimento : SBR com e sem tratamento térmico + areia) – traço 1:3 (50% SBR / 50% areia)

Para verificar as possibilidades de melhoria da resistência a partir do tratamento térmico foram moldados corpos de prova prismáticos (4x4x16cm) com a seguinte composição:

- a) 1:3 (50% SBR - **homogeneizado** com tratamento térmico / 50% areia);
- b) 1:3 (50% SBR - **homogeneizado** sem tratamento térmico / 50% areia);
- c) 1:3 (50% SBR - retido na **peneira 2,4mm** com tratamento térmico / 50% areia);
- d) 1:3 (50% SBR - retido na **peneira 2,4mm** sem tratamento térmico / 50% areia);

Após 28 dias de cura os corpos de prova foram ensaiados.

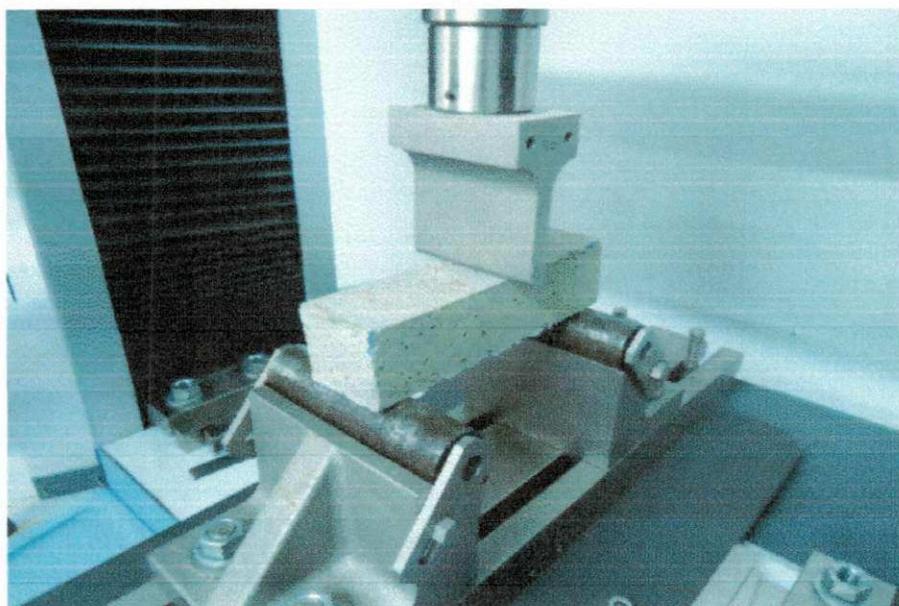


Figura 44: Início de ensaio de flexão  
Fonte: Própria

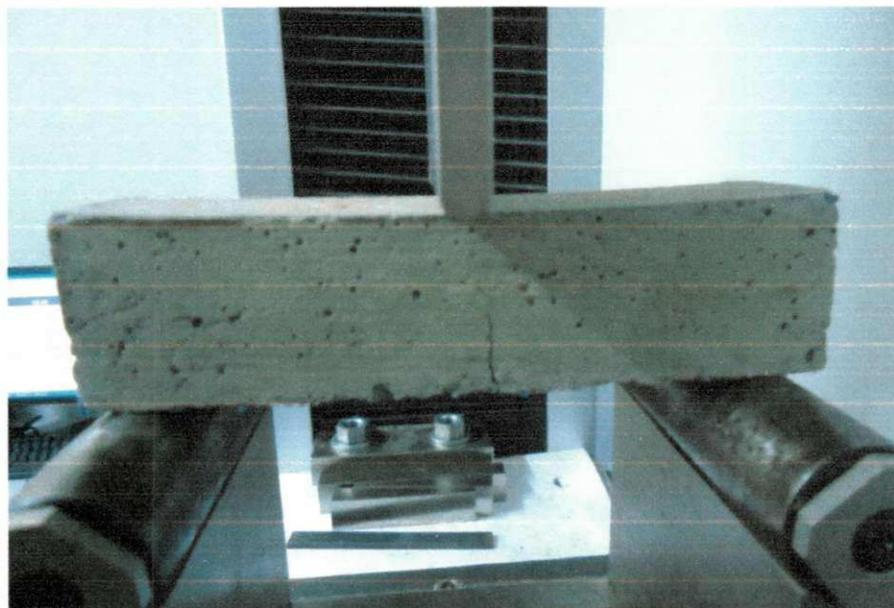


Figura 45: Ruptura do corpo de prova no ensaio de flexão

Fonte: Própria

Para se obter um resultado de referência foram ensaiados corpos de prova apenas com cimento e areia, cujo resultado médio foi 4,09Mpa.

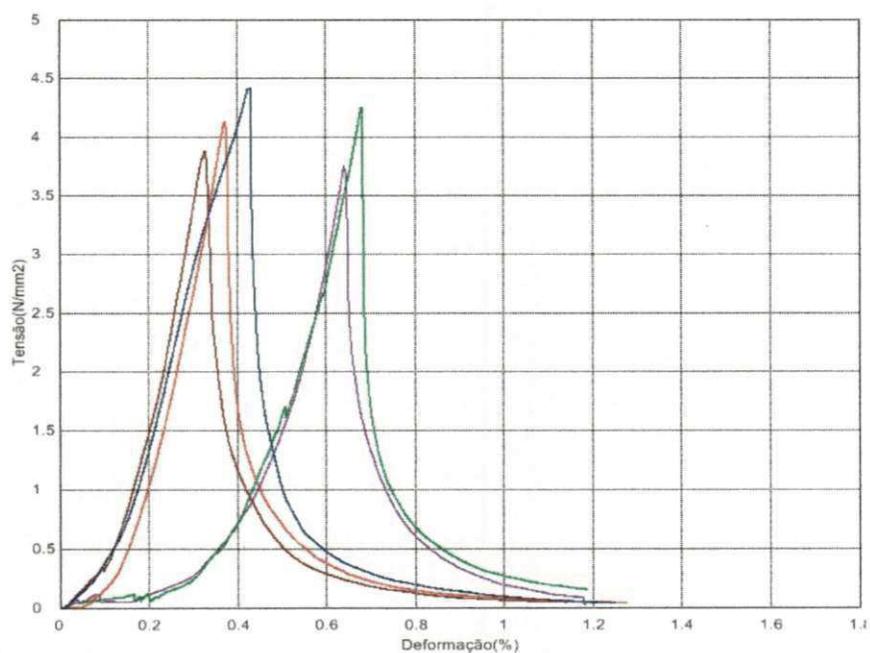


Figura 46: Médias - Tensão / Deformação - 1:3 (cimento : areia)

Quadro 22 - Resultado do ensaio de flexão (cimento: SBR + areia) traço 1:3 - resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm, com e sem tratamento térmico

Resistência à Flexão em MPa (megapascal)				
TRAÇO	1:3 SBR HCTT	1:3 SBR HSTT	1:3 SBR 2,4 CTT	1:3 SBR 2,4 STT
A	1,78758	1,34563	2,07328	1,49046
B	1,76938	1,37927	2,37223	1,46934
C	1,75543	1,21751	2,11620	1,12880
D	1,62684	1,15513	2,06903	1,48472
E	1,71861	1,36738	2,23358	1,44250
<b>MÉDIA</b>	<b>1,73157</b>	<b>1,29298</b>	<b>2,19776</b>	<b>1,40316</b>

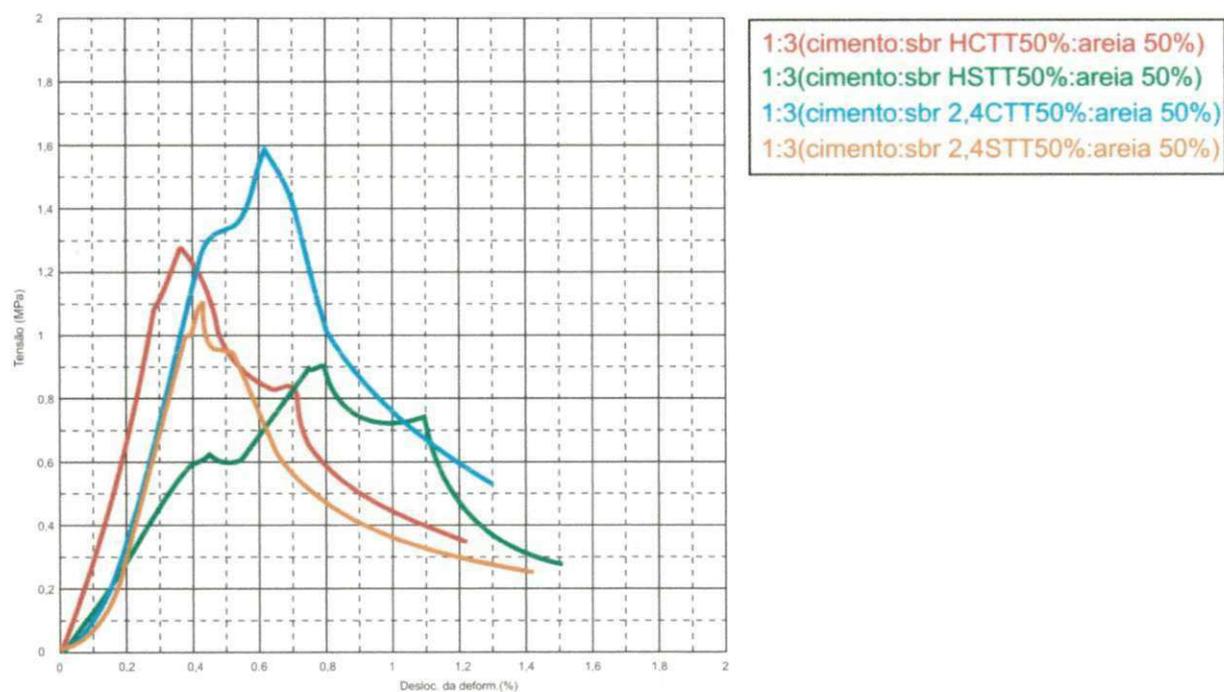


Figura 47: Média - Tensão / Deformação – 1:3 (cimento : SBR + areia) 50/50 (SBR HCTT/ HSTT/ 2,4CTT/ 2,4STT : areia) – ensaio de flexão

Observou-se que o comportamento dos corpos de prova contendo SBR apresentado na Figura 47, obtive comportamento bem diferenciado dos corpos de prova confeccionados apenas com cimento e areia. O surgimento de momentos de ruptura e de elevação da resistência se deu, possivelmente, pela elasticidade do material de vez que, quando a ruptura estava apenas na parte do aglomerante, o rompimento foi identificado porém ao encontrar resíduo de SBR, o mesmo impede a continuidade da linha de rompimento ocasionando aumento da resistência e criando os patamares presentes no gráfico.

Através das imagens abaixo, principalmente no exemplo A, foi possível verificar áreas de maior e de menor concentração do resíduo de cimento/areia, evento explicado pela falta de interação do SBR com os demais elementos, como cimento, água e areia, durante o processo de preparação do composto e colocação na forma, enquanto no exemplo B verificou-se uma distribuição melhor do SBR.

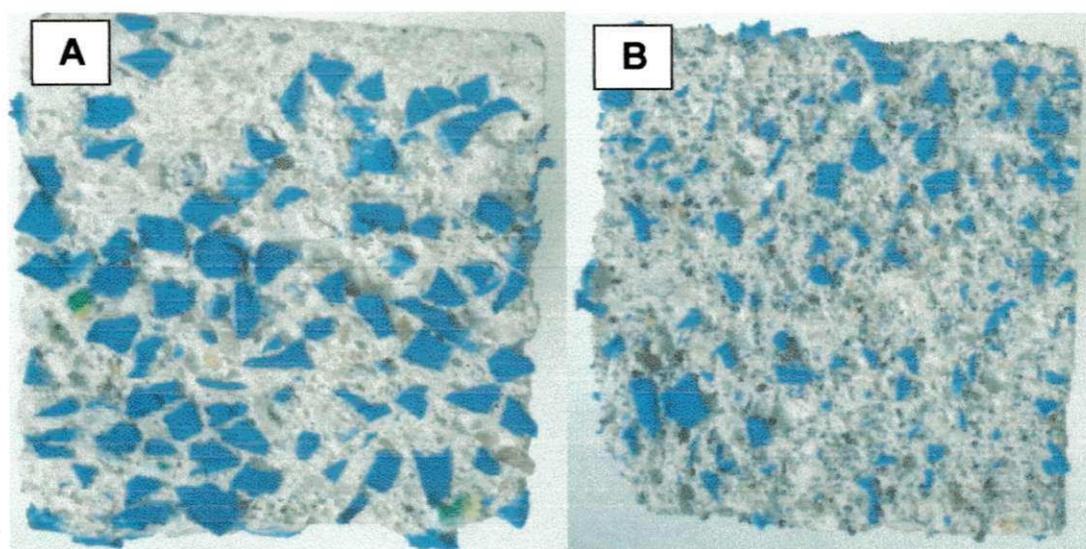


Figura 48: Distribuição do resíduo no interior do corpo de prova, A) 1:3 (cimento: 50% SBR2,4 STT + 50% areia), B) 1:3 (cimento: 50% SBRHomo STT + 50% areia)

Fonte: Própria

No quadro a seguir percebe-se que com tratamento térmico do resíduo houve melhoria nos resultados dos ensaios com os corpos de prova porém esta variação foi mais perceptível nos ensaios de flexão e na determinação do índice de absorção.

Quadro 23 – Resultado de compressão simples, absorção e flexão dos corpos de prova cilíndricos e prismáticos traço 1:3 (50% SBR – homogeneizado e retido na 2,4mm com e sem tratamento térmico + 50% areia)

Composição dos corpos de prova	Compressão Simples	Absorção	Flexão
HCTT	4,36450	9,53	1,73157
HSTT	4,30520	10,12	1,29298
2,4CTT	4,43386	8,84	2,19776
2,4STT	4,35828	10,07	1,40316

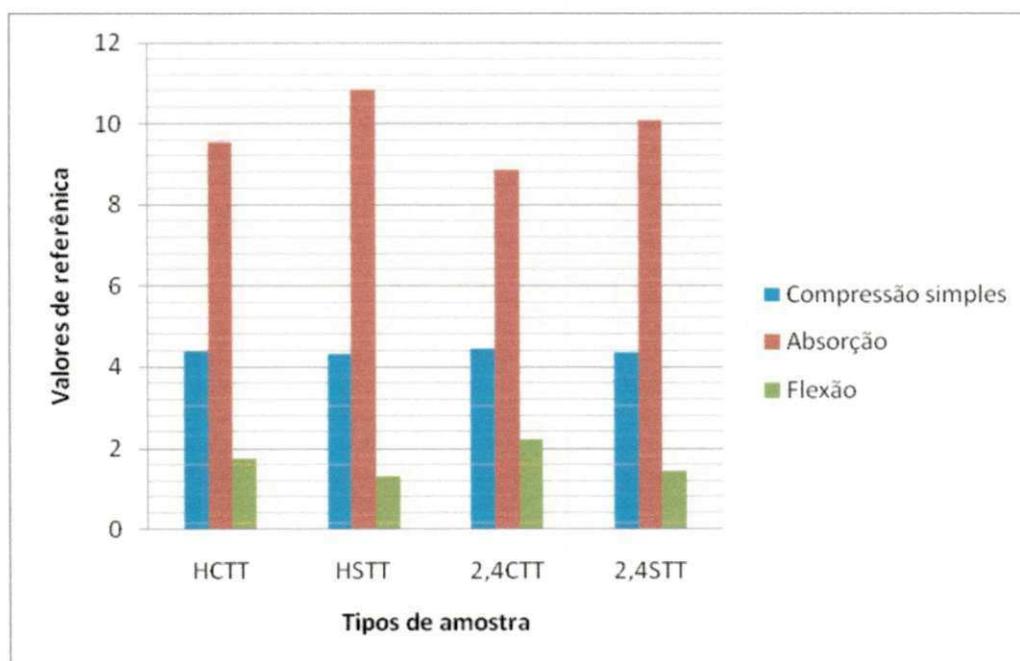


Figura 49: Comparação entre os dados de compressão simples, absorção e flexão

Verifica-se, analisando os dados e o gráfico acima, que os resultados de compressão simples não apresentaram diferença significativa entre eles porém o tratamento térmico melhorou os resultados de resistência à flexão e de absorção, que comprova a liberação de gases retidos na amostra de SBR, aumentando os espaços vazios e favorecendo a interação do resíduo com a massa de água, areia e cimento.

### 4.3 Resultados dos Testes de Conformação de Blocos/Tijolos em Diversos Métodos

Com a definição do traço do compósito de 1:3 (cimento: SBR + areia) e o fator<sub>a/c</sub> 0,33 foram iniciados o processo de prototipagem do molde e a confecção dos blocos para ensaios de compressão simples. O molde foi concebido em 3 partes devendo ser manuseado através do processo de batidas ao chão, para compactar a mistura.



Figura 50: Forma para confecção de tijolos – procedimento batidas ao chão  
Fonte: Própria



Figura 51: Composição do traço 1:3 (cimento : 50% SBR + 50% areia)  
Fonte: Própria

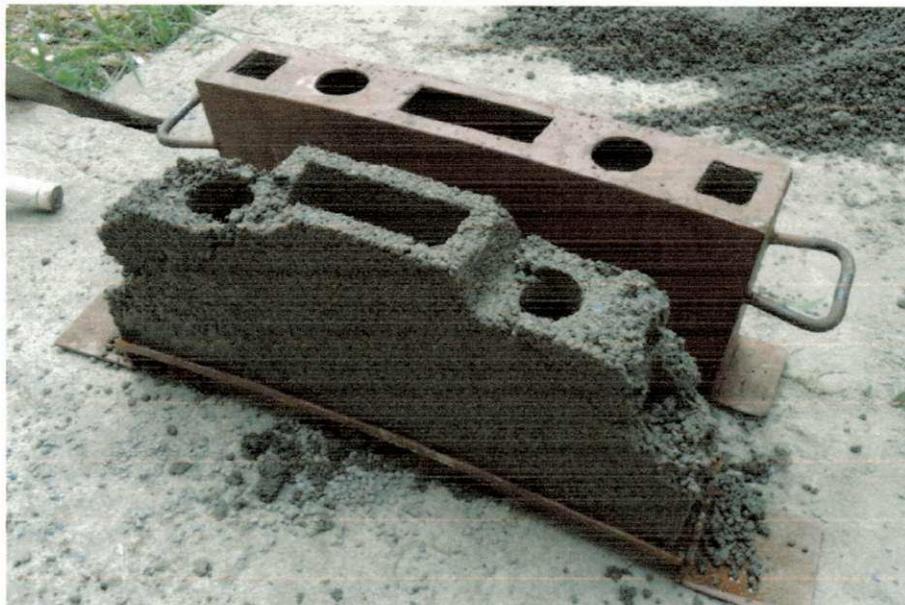


Figura 52: Desmoldagem do tijolo

Fonte: Própria

Durante o procedimento de moldagem e desmoldagem dos tijolos, verificou-se que :

- a) O material colocado dentro do molde NÃO compactou de maneira satisfatória durante o processo de batidas ao chão, tendo em vista as características do SBR (emborrachado e hidrofóbico) que inviabilizam a formação de uma massa coesa, na proporção estabelecida;
- b) As paredes do tijolo se apresentaram instáveis como consequência de sua espessura (2,5cm) e da altura do molde (20cm);
- c) Apesar do uso de óleo mineral no molde para facilitar a retirada do bloco, o grão de SBR, aumenta o atrito na estrutura da parede, partindo o bloco durante sua desmoldagem;

A partir dos resultados obtidos estudou-se a possibilidade de utilizar máquinas de fabricação de tijolos de solo cimento.



Figura 53: Máquina manual de confecção de tijolo de solo/cimento  
Fonte: Própria

Os resultados, porém, também se apresentaram insatisfatórios para o traço 1:3 (50% SBR + 50% areia) fator<sub>a/c</sub> 0,33 pois, apesar da força de compactação empregada pela máquina, os tijolos não tiveram bom acabamento, não formaram um bloco coeso, uma parte da água utilizada na composição da massa foi expelida na prensagem e o tijolo apresentou rachaduras e deformação durante o processo de desmoldagem.



Fonte: Própria



Figura 55: Vista em perspectiva do tijolo desmoldado  
Fonte: Própria

No intuito de se verificar a melhoria do acabamento dos tijolos, experimentou-se utilizar a proporção 80% areia e 20% de SBR; com a redução significativa do SBR foram obtidos melhor conformação e acabamento do tijolo.



Figura 56: Vista em perspectiva do tijolo desmoldado traço 1:3 (cimento : 80%  
SBR + 20% areia)  
Fonte: Própria

Durante a elevação do tijolo para fora do molde, o mesmo apresentou rachaduras na sua superfície, as quais se tornaram mais evidentes durante a tentativa de manuseio do mesmo.



Figura 57: Detalhe da rachadura do tijolo desmoldado traço 1:3 (cimento : 80% SBR + 20% areia)

Fonte: Própria



Figura 58: Detalhe da rachadura do tijolo durante a tentativa de retirada da forma traço 1:3 (cimento : 80% SBR + 20% areia)

Fonte: Própria

Com a utilização de formas de descanso para retirada após 48 horas, obteve-se resultado satisfatório em relação à conformação dos tijolos (22cm x 10cm x 6cm), tanto para o traço 1:3 (cimento : 50% SBR2,4STT + 50% areia) fator<sub>a/c</sub> 0,5, como para o traço 1:3 (cimento : 50% SBRHomoSTT + 50% areia) fator<sub>a/c</sub> 0,5.



Figura 59: Tijolos retirados da forma de descanso após 48 horas  
Fonte: Própria

Para realização dos ensaios de compressão simples, os tijolos foram cortados ao meio e fixados um sobre o outro, com uma pequena camada de pasta de cimento.

**4.3.1 Ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 – resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm, com e sem tratamento térmico**

Quadro 24 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 - resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm, com e sem tratamento térmico

Resistência à Compressão Simples em MPa (megapascal)				
TRAÇO	1:3	1:3	1:3	1:3
	SBR HCTT AREIA 1,2	SBR HSTT AREIA 1,2	SBR 2,4 CTT AREIA 1,2	SBR 2,4 STT AREIA 1,2
A	1,26531	1,32094	1,39281	1,48312
B	1,13188	1,32531	1,34875	1,48844
C	1,37469	1,31719	1,42594	1,92000
D	1,01688	1,47656	1,52281	1,57094
E	1,59563	1,04625	1,34844	1,66906
<b>MÉDIA</b>	<b>1,276878</b>	<b>1,29725</b>	<b>1,40775</b>	<b>1,626312</b>

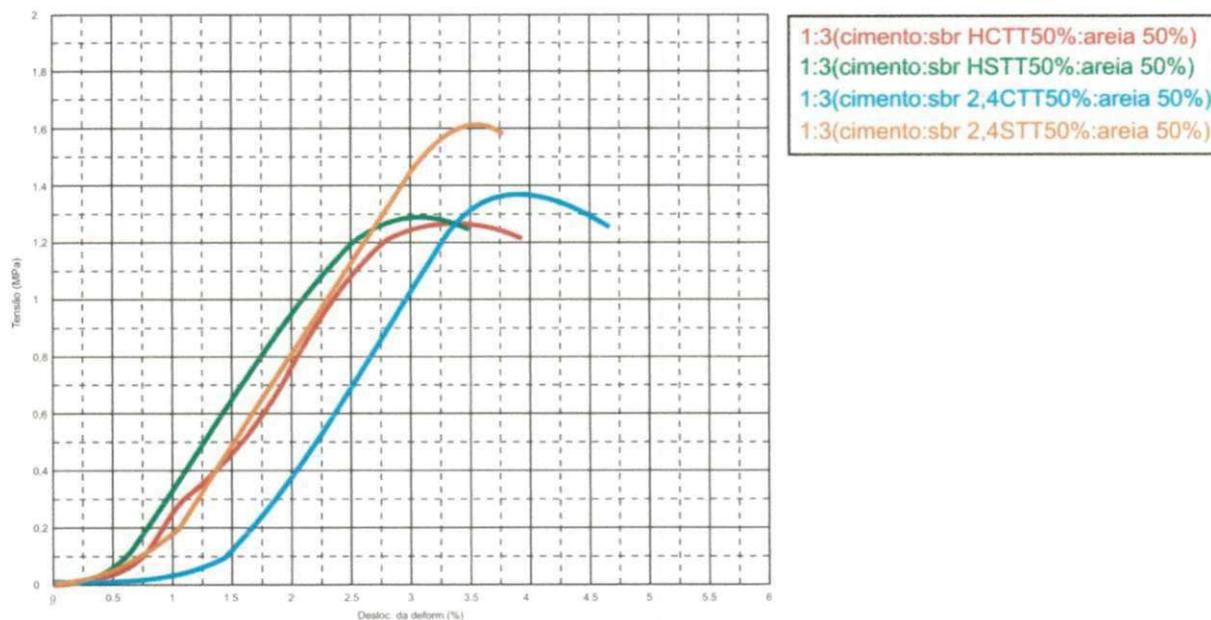


Figura 60: Média - Tensão / Deformação - tijolo 1:3 (cimento : SBR 50% HCTT/ HSTT/2,4CTT/ 2,4STT + 50% areia)

Quadro 25 – Comparação dos resultados dos ensaios de resistência à compressão simples nos corpos de prova e nos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 - resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm, com e sem tratamento térmico

<b>Resistência à Compressão Simples em MPa (megapascal)</b>								
<b>TRAÇO</b>	<b>1:3 SBR HCTT</b>		<b>1:3 SBR HSTT</b>		<b>1:3 SBR 2,4 CTT</b>		<b>1:3 SBR 2,4 STT</b>	
	<b>C</b>	<b>T</b>	<b>C</b>	<b>T</b>	<b>C</b>	<b>T</b>	<b>C</b>	<b>T</b>
<b>MÉDIA</b>	4,36	1,28	4,30	1,30	4,43	1,41	4,36	1,63
<b>Variação</b>	<b>241,81%</b>		<b>221,87%</b>		<b>214,96%</b>		<b>167,98%</b>	

C = corpo de prova; T = tijolo; Variação: sendo T=100%

Pelo que se pode observar na tabela acima, existe uma diferença em média de 210% entre o procedimento de confecção dos corpos de prova e o método empregado para a fabricação dos tijolos.

Foi identificado que nenhuma das amostras com substituição de 50% por resíduo retido na peneira 2,4mm obteve valor satisfatório para sua utilização como tijolo, seja ele com objetivos estruturais ou não.

Este resultado mostrou a necessidade de redução da quantidade de resíduo na amostra para elevar os valores de compressão para que os mesmos se enquadrem ao que se apresenta estabelecido em norma, para este tipo de conformação.

Assim, foram confeccionados e ensaiados tijolos com substituição de 40, 30, 20 e 10% do agregado por resíduo de SBR. O método de ensaio aplicado foi adaptado do método para ensaio de tijolos solo-cimento, contido na NBR 8492 (ABNT, 1984) e seguindo as recomendações da NBR 8491 (ABNT, 1984) que estabelece que a amostra ensaiada não deva apresentar a média dos valores de resistência à compressão simples menor do que 2,0MPa (20kgf/cm<sup>2</sup>) nem valor inferior a 1,7MPa (17kgf/cm<sup>2</sup>), com idade mínima de 7 dias.

### 4.3.2 Ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 – com 40, 30, 20 e 10% de resíduo retido na peneira 2,4mm sem tratamento térmico

Quadro 26 - Resultado do ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento : SBR + areia) traço 1:3 com 40, 30, 20 e 10% de resíduo retido na peneira 2,4mm, sem tratamento térmico

Resistência à Compressão Simples em MPa (megapascal)				
TRAÇO	1:3	1:3	1:3	1:3
	SBR 2,4STT 40%	SBR 2,4STT 30%	SBR 2,4STT 20%	SBR 2,4STT 10%
A	1,42690	2,03063	2,29156	2,03000
B	1,35344	2,29250	2,16750	2,28340
C	1,61563	1,67188	2,33906	2,72938
D	1,62000	1,92781	1,89625	2,46156
E	1,44594	2,20531	1,95000	2,25437
<b>MÉDIA</b>	<b>1,49194</b>	<b>2,02563</b>	<b>2,12887</b>	<b>2,35175</b>

Com a redução da proporção do resíduo, constata-se um aumento da resistência destacando-se as substituições de 30, 20 e 10%, as que se enquadraram na NBR 8491 (ABNT, 1984). Como a conformação dos tijolos foi apenas a de despejar no molde a mistura, percebe-se que com alguns ajustes no procedimento poder-se-á obter valores melhores.

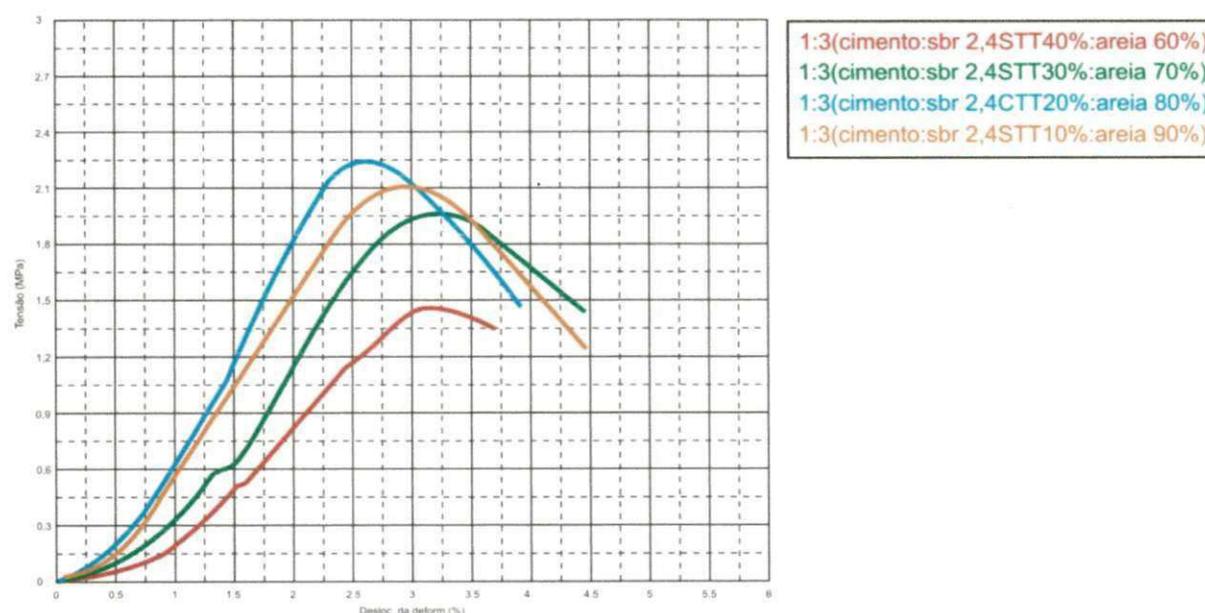


Figura 61: Médias - Tensão / Deformação - tijolo 1:3 (cimento : 40, 30, 20 e 10% SBR 2,4STT + 50% areia)

Tabela 11 - Massa seca, massa saturada, massa imersa, densidade aparente, absorção, porosidade aparente dos tijolos (cimento: SBR + areia) sem tratamento térmico – traço 1:3 (10, 20 e 30%) de substituição

Absorção de Água							
TRAÇO		Massa Seca (g)	Massa Saturada (g)	Massa Imersa (g)	Densidade Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção (%)	Porosidade aparente (%)
SBR 2,4 STT 10%	A	2030,6	2273,2	1128,2	1,77	11,947	21,19
	C	1970,2	2204,0	1097,4	1,78	11,867	21,13
	D	2049,4	2284,2	1144,6	1,80	11,457	20,60
SBR 2,4 STT 20%	A	2052,8	2320,2	1114,4	1,70	13,026	22,18
	C	1973,6	2226,8	1073,8	1,71	12,829	21,96
	D	1981,4	2234,8	1084,4	1,72	12,789	22,03
SBR 2,4 STT 30%	A	1854,8	2099,4	982,6	1,66	13,187	21,90
	B	1902,2	2155,4	1007,6	1,66	13,311	22,06
	C	1847,0	2098,6	982,8	1,66	13,622	22,55

## 5. CONCLUSÕES

Com base na análise nos materiais utilizados e nos ensaios realizados nesta pesquisa, conclui-se que:

### SBR

- O resíduo de SBR da produção de calçados foi classificado como CLASSE I – PERIGOSO, pois seu extrato lixiviado apresentou metais pesados com valores acima do estabelecido pela Portaria nº 518, do Ministério da Saúde, devendo o mesmo ser isolado por pasta de cimento para permitir sua aplicação que, por ventura, tenham contato temporário com água. Esses dados foram confirmados através do ensaio de EDS.
- O resíduo de SBR apresentou-se com características hidrofóbicas, repelindo e dificultando a penetração de água em sua estrutura. Tal ocorrência foi constatada no ensaio de determinação dos índices de absorção de água ao longo do tempo, para resíduos sem e com tratamento térmico, cujos valores foram 9,49% e 12,93% respectivamente, tal como nas imagens apresentadas no MEV, em que foi possível verificar sua estrutura interna, composta principalmente por células fechadas. Esta característica, inerente ao resíduo, dificultou sua interação com o aglomerante (cimento) e o agregado (areia) prejudicando a trabalhabilidade do material nas atividades de conformação e desmoldagem dos corpos de prova e dos tijolos;
- A princípio, observou-se que o material a temperatura de 100°C sofre pequena retração em virtude da expulsão da água, dos gases presentes e do ar incorporado porém, com pouca perda de massa, sem calcinação. O tratamento térmico do SBR abaixo de 200°C conseguiu apenas liberar os elementos voláteis presentes na composição da borracha. A partir de 200°C até 700°C, o resíduo sofreu sua maior degradação física, havendo mudança da cor e da estrutura física, tornando-se, assim, mais rígido.

## COMPOSTO DE SBR COM CIMENTO

- Dependendo da proporção dos elementos que compunham os traços de estudo, o fator  $a/c$  0,5, prejudicou a trabalhabilidade pois as amostras se apresentavam encharcadas, dificultando o adensamento da mistura dentro das formas, tanto para corpos de prova cilíndricos como para tijolos de descanso;
- Através dos ensaios realizados foi possível concluir que tanto a utilização de resíduo homogeneizado (retido nas peneiras 2,4, 1,2, 0,6 e 0,3mm), como material retido na peneira 2,4mm, estando esses com ou sem tratamento térmico, não tiveram diferença significativa entre eles, conforme análise estatística, mas a utilização de fator  $a/c$  0,33 melhorou consideravelmente a trabalhabilidade do material permitindo um aumento de 153% nos resultados de resistência à compressão simples;
- Sem o uso de máquinas de vibroprensa só é possível obter um resultado satisfatório de conformação através da colocação do traço em forma de descanso com tempo mínimo de 48h.

## 6. SUGESTÕES

Estudar e determinar os índices de presença de metais pesados em processos de lixiviação ao longo do tempo no intuito de verificar a partir de que momento o SBR deixa de possuir metais pesados na sua composição em quantidade acima do permitido pelo Ministério da Saúde.

Realizar tratamento térmico do resíduo com temperaturas de 250, 500, 700 e 1000°C, determinar a nova densidade e o volume do resíduo, confeccionar corpos de prova, ensaiar resistência à compressão simples, tração na compressão diametral, flexão e absorção de água.

Testar novos métodos de conformação de placas para adaptação a um processo industrial.

Estudar prováveis aplicações do compósito de SBR como isolante térmico e acústico, abordando questões relacionadas à composição da mistura e design dos blocos para alvenaria.

Identificar novos resíduos e novas proporções a serem empregados em conjunto com o SBR, buscando melhorar os resultados apresentados nos ensaios físico-mecânicos dos corpos de prova.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7. ed. São Paulo, 2002. 28 p.

ABRE. Meio Ambiente e Sustentabilidade. Reciclagem no Brasil. Disponível em: <[http://www.abre.org.br/meio\\_reci\\_brasil.php](http://www.abre.org.br/meio_reci_brasil.php)>. Acesso em: 05 mar. 2010.

ABREU, B. S. de. **Resíduos sólidos urbanos e seus aspectos sociais e econômicos e ambientais** – estudo de caso. 2009. 87 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2009.

ALVES, J. O.; ZHUO, C.; LEVENDIS, Y. A.; TENORIO, J. A. S. Microstructural analysis of carbon nanomaterials produced from pyrolysis/combustion of Styrene-Butadiene-Rubber (SBR). **Materials Research**, v. 14, n. 4, p. 499-504. 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392011000400012&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392011000400012&script=sci_abstract)>. Acesso em: 11 mar. 2012.

ANGULO, S. C. et al. Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem de Resíduos na Construção Civil. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção, 4., 2001, São Paulo. **Anais Eletrônicos...** São Paulo: IBRACON CT-206/IPT/IPEN/PCC, 2001. Disponível em: <[http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV\\_CT206\\_2001.pdf](http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/artigo%20IV_CT206_2001.pdf)>. Acesso em: 16 jul. 2006.

ANJOS, M. R. O. dos. **Avaliação de Borrachas SBR utilizadas em solas de calçados de uso da Marinha do Brasil**. 2007. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, RJ, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7184**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural: Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpo de prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739**: Ensaio de compressão de corpo de prova cilíndricos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria estrutural: Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR 7173**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria sem função estrutural. Rio de Janeiro, 1982.

\_\_\_\_\_. **NBR 7211**: Agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 7217**: Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 8491**: Tijolo Maciço Solo-Cimento. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 8492**: Tijolo Maciço Solo-Cimento. Determinação da Resistência à Compressão e a Absorção d'água. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água por imersão. Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 10004**: Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

\_\_\_\_\_. **NBR 12142**: Concreto - Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos - Método de ensaio, 2010.

BEZERRA, A. J. V. **Utilização do resíduo da indústria de calçados (EVA- etileno acetato de vinila) como agregado leve na produção de blocos vazados de concreto para alvenaria sem função estrutural.** 2002. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 2002.

BRASIL. Ministério das Cidades/ Secretaria Nacional de Habitação. **Déficit Habitacional no Brasil.** Brasília, 2008. Disponível em: <[http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/DHB\\_2008\\_Final\\_2011.pdf](http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/DHB_2008_Final_2011.pdf)>. Acesso em: 14 mai. 2011.

**BRAZILIAN FOOTWARE.** Brasil: fornecedor de calçados para o mercado internacional. Notícias. Disponível em: <<http://www.brazilianfootwear.com.br/nacional/index.php?pagina=noticia&id=597>>. Acesso em: 18 mai. 2010.

CALLINSTER JR.; WILLIAM D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: uma abordagem integrada.** 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 702 p.

CALLINSTER JR.; WILLIAM D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CANEVAROLO JR., S.V. **Técnicas de caracterização de polímeros.** São Paulo: Artliber Editora, 2004. 445 p.

COSTA, H. M. da et al. **Aspectos Históricos da Vulcanização.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, v. 13, p. 125-129, 2003. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-14282003000200011](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282003000200011)> Acesso em: 21 jul. 2011.

DANTAS, R. R. **Uso de compósitos (poliéster/tecido de juta) para construção de silos cilíndricos verticais.** 2004. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2004.

FARIAS, R. **Brasil recicla apenas 13% do que é jogado fora.** SENADO FEDERAL. AGENCIA DE NOTÍCIAS DO SENADO. 23 abril 2010. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br/agencia/verNoticia.aspx?codNoticia=101300>>. Acesso em: 04 jun. 2010.

FREITAS, C. et al. Desempenho físico-químico e mecânico de concreto de cimento Portland com borracha de estireno-butadieno reciclada de pneus. **Química Nova**, v. 32, n. 4, p. 913-918. 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422009000400016](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000400016)>. Acesso em: 14 mai. 2011.

GARLET, G. **Aproveitamento de resíduo de E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) como agregado para concreto leve na construção civil**. 1998. 146 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 1998.

HEINE, G. **Industrial Inorganic Pigments**. 2 ed. New York: Wiley. 1998. 285 p.

JOHN, V. M. **Reciclagem de Resíduos na Construção Civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 113 f. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo/Escola Politécnica, São Paulo, 2000.

JÚNIOR, A. C. L. et al. Blocos de concreto para vedação: estudo da conformidade através de ensaios laboratoriais. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 28., 2008, Rio de Janeiro: RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: RJ, 2008.

JUNIOR, J. de S. P. Nova Delimitação do Semiárido Brasileiro. Câmara dos Deputados. **Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados**. nov. 2007. Disponível em: <[http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/1604/nova\\_delimitacao\\_jose\\_pereira.pdf?sequence=1](http://bd.camara.gov.br/bd/bitstream/handle/bdcamara/1604/nova_delimitacao_jose_pereira.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 07 jun. 2010.

KERN, A. P. **Estudo da viabilidade da incorporação de resíduo de contrafortes de calçados em matriz de gesso para uso como materiais de construção civil**. 1999. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 1999.

LATTERZA, L. Reciclagem de resíduos, a arma do futuro. **ABGE em Revista**. São Paulo, n. 82, p. 12-13, set./out. 2000.

LEAL, A. F. **Utilização de Resíduos das Indústrias de Cerâmicas e de Calçados na Elaboração de Materiais e Produtos à Base de Cimento Portland Reforçados com Fibras**

**de Sisal**, 2004. 128 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2004.

MACIEL, K. R. D. **Desenvolvimento de blocos de concreto para construção de silos circulares de alvenaria sem função estrutural**. 2002. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2002.

MANO, E. B. **Introdução a Polímeros**. São Paulo: Edgar Blucher, 2. ed. 1999.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Edgar Blucher, 2. ed. 2000.

MEDEIROS, J. S. **Alvenaria estrutural não armada de blocos de concreto: produção de componentes e parâmetros de projeto**. 1993. 449 p. Dissertação (Mestrado Engenharia de Civil) - Universidade de São Paulo/Escola Politécnica, São Paulo, SP, 1993.

MELO, A. B.; FILHO, M. R. F. L. Avaliação de desempenho estrutural de protótipo com paredes construídas com blocos de EVA. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 141-155, out./dez. 2009. Disponível em: < <http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/9471/7073>>. Acesso em: 07 jun. 2010.

MENEZES, R. R. et al. Utilização do Resíduo do Beneficiamento do Caulim na Produção de Blocos e Telhas Cerâmicos. **Revista Matéria**, v.12, p. 226-236, 2007. Disponível em: < [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762007000100028&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1517-70762007000100028&script=sci_arttext)>. Acesso em: 25 out. 2011.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO SOCIAL. **O semiárido**. 2009. Disponível em: <<http://www.mds.gov.br/teste-cisternas-2009/historico/semi-arido>>. Acesso em: 12 mai. 2010.

NEVES, G. A. et al. **Resíduos industriais na construção de habitações de interesse social**. Campina Grande: Gráfica e Editora Agenda, 2010. 173 p.: il. CAPÍTULO 5.

NEVES, G. A. et al. **Resíduos industriais na construção de habitações de interesse social**. Campina Grande: Gráfica e Editora Agenda, 2010. 173 p.: il. CAPÍTULO 6.

PIMENTEL, U. H. O. **Utilização de resíduos da indústria de calçados em blocos de vedação com novas geometrias – Bloco EVANG**. 2005. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2005.

RIOS, F. R. A. **Incorporação de resíduos de calçados (SBR) na produção de compósitos leves**. Campina Grande, 2008. 71 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2008.

ROCHA, J. C.; JOHN, V. M. **Utilização de resíduos na construção habitacional**. FINEP: Coleção Habitare, vol. 4, 2003.

SANEAMENTO. Produção de lixo aumenta e mais de 22 milhões de toneladas tem destinação imprópria. **Água online**, 2010. Disponível em: <<http://www.aguaonline.com.br/materias.php?id=3079&cid=1&edicao=474>>. Acesso em: 2 jun. 2010.

SANTIAGO, E. Q. R. **Utilização de agregados de EVA e RCD para a obtenção de concretos leves**. 2008. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, BA, 2008.

SERRANO, C. L. R. **Uso do Resíduo de SBR proveniente da Indústria de Calçados em composições de SBR**. 2009. 155 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, RS, 2009.

SILVA, P. E. **Incorporação de Resíduo da Indústria de Calçados (EVA – Etileno Vinil Acetato) em Tijolos Prensados de Terra Crua**. 2003. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraíba, Escola de Engenharia, Campina Grande, PB, 2003.

WEBER, T. et al. Caracterização de artefatos elastoméricos obtidos por revulcanização de resíduo industrial de SBR (copolímero de butadieno e estireno). **Polímeros**, v. 21, 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282011000500014&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282011000500014&script=sci_arttext)>. Acesso em: 12 dez. 2011.

ZATTERA, A. J. et al. Caracterização de resíduos de copolímeros de etileno-acetato de vinila - EVA. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. 2005, v. 15, n. 1, p. 73-78, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v15n1/24199.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2011.

## ANEXO A - Método de utilizado para obtenção de extrato lixiviado

**Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**

## 1. Referência Normativa

As normas relacionadas a seguir contêm disposições que ao serem citadas neste texto, constituem prescrições para este ensaio. As edições indexadas estavam em vigor no momento da publicação do Protocolo. A ABNT possui a informação das normas em vigor em um dado momento:

- NBR 10004 (ABNT, 2004a) – Resíduos sólidos – Classificação
- NBR 10007 (ABNT, 2004) – Amostragem de Resíduos – Procedimento
- U.S. EPA 1113-19926 – Test Methods for Evaluating Solid Wast. Toxicity Characteristics Leaching Procedure (TCLP). Revision O. 35 p. Physical/Chemical Methods. SW – 846, Washington, D.C., 1992.

**PRIMEIRA ETAPA**

- 1) A primeira etapa do procedimento consiste em determina a solução de extração
- 2) Neste caso, pesar 5,0g (partículas < 9,5mm) em um béquer de 250ml. Adicionar 96,5ml de água deionizada, cobrindo o mesmo com vidro de relógio, sob agitação em um agitador magnético por 5 minutos. Medir o pH.

Se o pH  $\leq 5,0$  usar solução de extração número 1.

Se o pH  $> 5,0$  adicionar 3,5ml de HCL 1N. Homogeneizar a solução, cobrir com vidro de relógio e aquecer a 50°C durante 10 minutos. Esfriar. Se o pH for  $\leq 5,0$  utilizar a solução de extração número 1 e ser for  $> 5,0$  usar a solução de extração número 2.

**SOLUÇÃO NÚMERO 1** – Adicionar 5,7ml de ácido acético glacial a água preparada (1L) e adicionar 64,3ml de NAOH 1,0 N. O pH desta solução deve ser  $4,99 \pm 0,05$ .

**SOLUÇÃO NÚMERO 2** – Adicionar 5,7ml de ácido acético glacial a água preparada (1L). O pH desta solução deve ser  $2,88 \pm 0,05$ .

**SEGUNDA ETAPA:**

- 1) Pesar uma amostra do resíduo de 100g cuja granulometria tenha passado pela peneira padrão de 9,5mm e colocar no vidro de extração;
- 2) Em seguida adicionar lentamente a quantia do fluido de extração apropriado ao recipiente (solução de extração 1 ou 2) extrator, conforme preparo anterior. A solução de extração deve ser 20 vezes a massa utilizada (100g) neste caso, basta apenas completar o volume para 2L, na solução de extração 1 ou 2;
- 3) Fechar o vasilhame de extração firmemente, utilizando fita PTFE para evitar vazamento. Prender o vidro no aparelho de agitação rotativa, iniciar a agitação a  $30 \pm 2$  rpm por  $18 \pm 2$  horas. A temperatura ambiente deve ser mantida a  $23 \pm 2$ °C durante o período de extração;
- 4) O tempo de extração é de  $18 \pm 2$  horas, no final deste período o material é separado do recipiente de extração em suas fases de componentes líquido e sólido, filtrando através de um filtro de fibra de vidro de 0,6 s 0,8µm;
- 5) Medir o pH do extrato lixiviado.

## ANEXO B – Relatórios das análises químicas dos extratos lixiviados

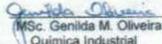
CLIENTE		NATUREZA DO TRABALHO		MATERIAL		REFERÊNCIA DA AMOSTRA		DATA DA COLETA		HORA DA COLETA		DATA DE RECEBIMENTO		RESPONSÁVEL PELA COLETA	
ITAMAR FERREIRA DA SILVA		Análise físico-química		01 (uma) amostra de extrato lixiviado de resíduo de SBR		Extrato lixiviado de resíduo de SBR		Não informada		Não informada		27-04-11		CLIENTE	
Rua Tomas Soares de Sousa, 200, aptº 302 B, Centro, Campina Grande / PB.															

Parâmetros	Resultados	Unidade	Método
Chumbo Total (Pb)	0,109	mg/L	SMEWW 3500 Pb B
Alumínio Total (Al)	0,022	mg/L	SMEWW 3500 Al
Bário Total (Ba)	0,578	mg/L	SMEWW 3500 Ba
Cádmio Total (Cd)	0,024	mg/L	SMEWW 3500 Cd
Cobalto Total (Co)	0,008	mg/L	SMEWW 3500 Co
Cobre Total (Cu)	<0,005	mg/L	SMEWW 3500 Cu
Prata Total (Ag)	<0,005	mg/L	SMEWW 3500 Ag
Cromo Total (Cr)	<10,0	µg/L	SMEWW 3500 Cr B

SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater / NO: Não detectado.

Observações:  
a) Os resultados deste ensaio/análise têm significação restrita e se aplicam tão somente a (s) amostra (s) coletada (s) pelo CLIENTE.  
b) Os resultados apresentados neste documento não podem ser usados para fins promocionais.  
c) A reprodução deste documento para outros fins, só poderá ser feita integralmente sem nenhuma alteração e com a aprovação do laboratório.  
d) Métodos utilizados / APHA - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21ª edição, 2005.

  
MSc. Genilda M. Oliveira  
Química Industrial  
C.R.Q. 01.201.130-PE

  
Marcelo Hermes de Oliveira  
Químico  
C.R.Q. 01.500.021-PE

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº 061.599 A

Recife, 13 de Outubro de 2011

CLIENTE: ITAMAR FERREIRA DA SILVA  
Endereço: Rua Tomas Soares, 200 - aptº 302 B - Centro - Campina Grande - PB  
Natureza do trabalho: Análise Físico-Química Material: 01 (uma) amostra de água  
Ref. amostra: Após tratamento - Deionizada - UFCG  
Procedência amostra: Amostra com resíduo de SBR/Cimento Mergulhado na forma de cubo  
Local coleta: Campina Grande - UFCG  
Data coleta: 25/09/2011 Hora coleta: 08:30h  
Data recebimento amostra: 28/09/2011 Responsável coleta: Cliente

Parâmetros	Resultados	Unidade	Método
Alumínio	0,38	mg/L Al	LQA-PT-015
Cádmio	<0,001	mg/L Cd	LQA-PT-015
Chumbo	<0,01	mg/L Pb	LQA-PT-015
Zinco	<0,01	mg/L Zn	LQA-PT-015

## Observações:

- a) Os resultados apresentados neste documento têm significação restrita e se aplicam exclusivamente à amostra analisada.
- b) Os resultados apresentados neste documento não podem ser usados para fins promocionais.
- c) A reprodução deste documento para outros fins só poderá ser feita integralmente sem nenhuma alteração e com a aprovação do laboratório.

  
Hélda Karle Philippini da Silva  
Técnica Química CRQ 01.403.358-PE  
Laboratório de Química Analítica

  
Conceição de Maria Araújo  
Química Industrial CRQ 01.200.786-PE  
Laboratório de Química Analítica

LQA 6220  
OS 2737/2011

Relatório de Ensaio nº 061.599  
fl. 1/1



**LABDES**  
Laboratório de Referência em Dessalinização

<b>Laudo Nº.: 311/2011</b>	Data da Coleta: 26/10/2011
Interessado: Itamar Ferreira da Silva	Resp. pela Coleta: Interessado
Município: Campina Grande - PB	Data da Entrega da Amostra: 11/11/2011
Localidade: UFCG	Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: ---	Data da Análise: 17/11/2011

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (*)
Alumínio (Al <sup>3+</sup> ), mg/L	0,02	0,2

(\*)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 518/04 MS).

**LAUDO:****OBSERVAÇÕES:**

- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ-9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data: 17/11/2011

ANEXO C – Análise estatística do primeiro ensaio - resistência à compressão simples (cimento + SBR) após 28 dias de cura dos traços 1:2, 1:3, 1:4, 1:5 e 1:6.

=====
   
ASSISTAT versão 7.5 beta (2005) - Homepage <http://www.assistat.com>
  
Por Francisco de A. S. e SILVA DE-G-CTRN-UFMG - Atualiz. 22 08 2010
   
=====
   
Arquivo SBR CIMENT DATA 17 11 2010 Hora 09:39:17
   
=====

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	4	4.18973	1.04743	126.6430 **
Resíduo	20	0.17726	0.00886	
Total	24	4.36699		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )
   
\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )
   
ns não significativo ( $p \geq .05$ )

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	1.73393	a
2	1.01120	b
3	0.72391	c
4	0.68830	c
5	0.66191	c

DMS = 0.17351

MG = 0.91719

CV% = 9.93920

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

DADOS

1.9391	1.8196	1.9011	1.8101	1.7941
1.9611	1.1573	1.9267	1.0832	1.0092
1.7271	1.6896	1.9313	1.8101	1.7313
1.6999	1.6969	1.7679	1.7331	1.6161
1.6136	1.5910	1.6943	1.4726	1.6260

ANEXO D – Análise estatística do segundo ensaio - resistência à compressão simples (cimento + SBR + areia) após 28 dias de cura do traço 1:4

=====
   
ASSISTAT versão 7.5 beta (2009) - Homepage http://www.assistat.com
   
Por Francisco de A. S. e Silva DE-G-CTRN-UFGO - atualiz. 21 05 2010
   
=====
   
Arquivo c s areia Data 25 11 2010 Hora 16:28:35
   
=====

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	3	5,24061	1,74687	141,6716 **
Resíduo	16	0,19716	0,01233	
Total	19	5,43777		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )
   
\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )
   
ns não significativo ( $p \geq .05$ )

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	3,12077	a
2	1,39147	b
3	1,00411	c
4	0,61721	c
EMS =	0,20112	

MG = 1,36339

CV% = 8,14432

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

DADOS

2,17507	2,05976	2,13205	2,36381	1,97035
1,45224	1,67205	1,28028	1,51153	1,54124
,95167	,97726	1,03026	1,06582	,98955
,78709	,75235	,77765	,90964	,87927

SIGLAS E ABREVIATURAS

UFGO = Universidade Federal de Campina Grande
   
CTRN = Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
   
DEAG = Departamento de Engenharia Agrícola

ANEXO E - Análise estatística do terceiro ensaio - resistência à compressão simples (cimento + SBR + areia) após 28 dias de cura do traço 1:3

=====
   
ASSISTAT versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
  
Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.04/03/2011
   
=====
   
Arquivo cimento sbr 13a Data 26/09/2011 Hora 21:31:25

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	2	1.37391	0.68696	5.9974 *
Resíduo	12	1.37452	0.11454	
Total	14	2.74843		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )
   
\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )
   
ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
2	12	3.8853	5.9974	0.0156

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	2.89083 a
2	2.25435 b
3	2.24342 b

DMS = 0.57061

MG = 2.46287 CV% = 13.74181

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

DADOS

2.34840	3.07757	3.26687	2.45848	3.30281
2.09490	2.20731	2.40162	2.23444	2.33349
1.71061	2.15065	2.35606	2.66517	2.33463

ANEXO F – Análise estatística do quarto ensaio - resistência à compressão simples dos corpos de prova (cimento : SBR + areia) traço 1:3 - resíduo homogeneizado e retido na peneira 2,4mm, com e sem tratamento térmico.

=====
   
ASSISTAT versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
  
Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.04/03/2011
   
=====

Arquivo cimento areia sbr ctt stt 13 a
   
Data 26/09/2011 Hora 21:40:33

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	3	0.04176	0.01392	0.0306 *
Resíduo	16	7.26614	0.45413	
Total	19	7.30790		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )
   
\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )
   
ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
3	16	0.0703	0.0306	0.015

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	4.36450 a
2	4.30529 a
3	4.43386 a
4	4.35828 a

DMS = 1.22057

MG = 4.36548 CV% = 15.43688

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

DADOS

3.92641	4.63590	4.87388	4.07683	4.30947
3.99823	4.55636	4.41073	4.30024	4.26091
5.42806	4.22915	4.36232	4.94363	3.20615
5.05340	3.79182	4.23735	3.15785	5.55099

## ANEXO G – Resultado do ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos

Legenda:

FATOR 1: T Térmico

FATOR 2: Granulometria

-----  
 Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
T Térmico	1	0.02271	0.02271	0.0561	0.8152
Granulometria	1	0.01871	0.01871	0.0462	0.8319
T Térmico*Granulometria	1	0.00034	0.00034	8e-04	0.9773
Ad vs Fatorial	1	8.69846	8.69846	21.4955	0,00002
Resíduo	20	8.09331	0.40467		
Total	24	16.83353	0.70140		

-----  
 Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) - p-valor: 0.8356721 - De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os resíduos podem ser considerados normais.

-----  
 Contraste do tratamento adicional com o fatorial

Médias

Adicional 2.890826 a

Fatorial 4.365484 b

-----  
 Interação não significativa: analisando os efeitos simples

T Térmico

De acordo com o teste F, as médias deste fator são estatisticamente iguais.

Níveis Médias

1 N 4.331788

2 S 4.399180

-----  
 Granulometria - De acordo com o teste F, as médias deste fator são estatisticamente iguais.

Níveis Médias

1 24 4.396072

2 H 4.334896

-----  
 Quadro da análise de variância

	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Tratamento	4	8.7402	2.18506	5.3997	0.0040865
Resíduo	20	8.0933	0.40467		
Total	24	16.8335			

-----  
 CV = 15.63 %

-----  
 Teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) p-valor: 0.8356721. De acordo com o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significancia, os resíduos podem ser considerados normais.

-----  
 Teste de Tukey

-----  
 Grupos Tratamentos Médias

a 3S24 4.433862

a 3SH 4.364498

a 3N24 4.358282

a 3NH 4.305294

b 5NH 2.890826

ANEXO H – Resultado do ensaio de resistência à compressão simples dos tijolos (cimento + SBR + areia) traço 1:3 com 40, 30, 20 e 10% de resíduo retido na peneira 2,4mm, sem tratamento térmico.

=====
   
ASSISTAT versão 7.6 beta (2011) - Homepage <http://www.assistat.com>
  
Por Francisco de A. S. e Silva DEAG-CTRN-UFCG - Atualiz.04/03/2011
   
=====
   
Arquivo cimento areia sbr ctt stt tijolo 13 ca
   
Data 26/09/2011 Hora 22:02:24

EXPERIMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO

QUADRO DE ANÁLISE

F.V.	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Tratamentos	3	1.99332	0.66444	14.6423 **
Resíduo	16	0.72605	0.04538	
Total	19	2.71937		

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < .01$ )

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade ( $.01 \leq p < .05$ )

ns não significativo ( $p \geq .05$ )

GL	GLR	F-crit	F	p
3	16	5.2922	14.6423	<0.001

MÉDIAS E MEDIDAS

Médias de tratamento

1	1.49238 b
2	2.02563 a
3	2.35174 a
4	2.12887 a

DMS = 0.38583

MG = 1.99966

CV% = 10.65291

As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Foi aplicado o Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade

DADOS

1.42690	1.35344	1.61563	1.62000	1.44594
2.03063	2.29250	1.67188	1.92781	2.20531
2.03000	2.28340	2.72938	2.46156	2.25437
2.29156	2.16750	2.33906	1.89625	1.95000

