



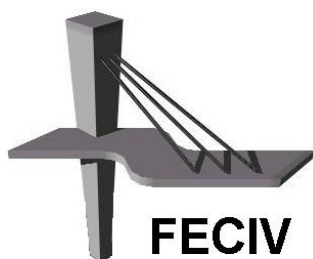
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO DE VIDRO NA  
PRODUÇÃO DE PISOS POLIDOS**

**Goubyan Borges Guimarães**

**UBERLÂNDIA, 2015**



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**Goubyan Borges Guimarães**

## **AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUO DE VIDRO NA PRODUÇÃO DE PISOS POLIDOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Leila Aparecida de Castro Motta**

Uberlândia, 15 de Junho de 2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

G963a      Guimarães, Goubyan Borges,  
2015      Avaliação do uso de resíduo de vidro na produção de pisos polidos /  
Goubyan Borges Guimarães. - 2015.

Orientadora: Leila Aparecida de Castro Motta.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Pisos - Teses. 3. Resíduos de vidro -  
Teses. I. Motta, Leila Aparecida de Castro. II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.  
Título.

CDU: 624

---



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



**ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ATA Nº:** 144/2015

**CANDIDATO:** Goubyan Borges Guimarães

**Nº. Matrícula:** 11312ECV008

**ORIENTADOR:** Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leila Aparecida de Castro Motta

**TÍTULO:** "Avaliação do uso de resíduo de vidro na produção de pisos polidos"

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Estruturas e Construção Civil

**LINHA DE PESQUISA:** Construção Civil

**DATA DA DEFESA:** 15 de junho de 2015

**LOCAL:** Sala de webconferência 03, bloco 5M.

**HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA:** 9h - 11h15 min

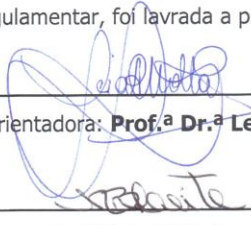
Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

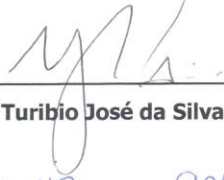
☒ APROVADO

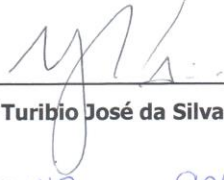
☐ REPROVADO

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professora Orientadora:  **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU**

Membro externo:  **Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mônica Batista Leite – Departamento de Tecnologia/UEFS**

Membro interno:  **Prof. Dr. Turibio José da Silva – FECIV/UFU**

Uberlândia, 15 de JUNHO de 2015.

*Aos meus pais, Maria Aparecida Moura*

*e Jean Sorel Borges.*

*Ao meu avô Sebastião Moura Lucas, que Deus o tenha*

*† 22-09-2013*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder saúde e disposição para superar as dificuldades em minha vida.

À minha querida família por apoiar-me durante todo o meu caminho, em especial aos meus pais Jean Sorel e Maria Aparecida, à minha irmã Pricylla Borges e aos meus avós Magnólia e Sebastião Moura; vocês são as bases das minhas conquistas.

Não poderia esquecer da minha namorada Daiane Andrade, por estar presente durante todo o meu mestrado com todo seu carinho, incentivo e amor.

Agradeço à minha professora e orientadora Leila de Castro, que além de contribuir com suas orientações científicas, soube também orientar-me diante das minhas dificuldades para desenvolver um bom trabalho.

Ainda, aos profissionais do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem - LEPU, da Universidade Federal de Uberlândia, por fornecer equipamentos essenciais na execução de determinados ensaios.

À atual técnica e sempre amiga Aline Martins, do laboratório de Saneamento da Universidade Federal de Uberlândia, obrigado pelo seu auxílio e carisma inconfundível, suas contribuições técnicas foram decisivas.

Às empresas Cibasa e Centro Cerâmico do Brasil - CCB, que foram fundamentais no fornecimento de materiais e equipamentos para a realização desta pesquisa.

Agradeço imensamente a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram ou almejavam a concretização do meu trabalho, obrigado a todos e desejo-lhes a guarda de Deus.

“O difícil, é apenas o desconhecido ”

*Alceu Alves Junior*

GUIMARÃES, G. B. Avaliação do uso de resíduo de vidro na produção de pisos polidos. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

## RESUMO

---

Convencionalmente os pisos argamassados são compostos de agregados minerais fragmentados que misturados ao cimento Portland possui larga utilização em grandes empreendimentos. Neste trabalho foi avaliado a possibilidade do emprego do resíduo de vidro em substituição aos agregados minerais utilizados na fabricação de pisos polidos. Foram produzidas amostras com agregado natural, utilizadas como referência, e placas com o resíduo de vidro com dois tipos de cimento. O intuito foi verificar o desempenho físico e mecânico do material proposto, aliada a reciclagem do resíduo de vidro. Foram realizados ensaios de absorção de água, abrasão profunda e flexão. Ensaio acelerado da reação álcali agregado foi realizado nas amostras para avaliar a possibilidade de ocorrência da reação Álcali Sílica. Posteriormente foi realizado análise de microscopia eletrônica de varredura e difratometria de raio X. Ao final não houve perdas nas propriedades em termos de absorção de água e abrasão profunda, nas amostras produzidas com resíduo de vidro em relação às amostras produzidas com agregado natural. Apenas houve diminuição na resistência à flexão nos resultados obtidos aos 180 dias de idade. Entre as amostras produzidas com resíduo de vidro, verificou-se alta possibilidade de ocorrência da reação álcali sílica nas amostras produzidas com CPII F40, o que ocorreu de modo menos expressivo nas amostras produzidas com CPIV 32.

**Palavras-chave:** pisos; resíduo de vidro; reação álcali agregado.

GUIMARÃES, G. B. Evaluation the use of glass waste to produce polished floors. MSc Dissertation, School of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2015.

## ABSTRACT

---

Conventionally the floors mortar are composed of ground mineral aggregates that mixed with Portland cement have extensive use in large enterprises. In this work was evaluated the possibility to aplicate glass waste to replace the mineral aggregates used in the manufacture of polished floors. Samples were produced with natural aggregate, used as reference, and plates with glass waste with two types of cement. The objective was to determine the physical and mechanical performance of the offered material, allied with the recycling of glass residue. Tests were conducted of water absorption, deep abrasion and bending test. Accelerated test of alkali aggregate reaction was realized on the samples to assess the possibility of alkali-silica reaction. Posteriorly, we realized analyse scanning electron microscopy and X ray diffraction. At the end there was not loss in properties in terms of water absorption and deep abrasion, in the samples produced with glass residue in relation to the samples produced with natural aggregate. There was only reduction in the flexural strength in the results obtained at 180 days of age. Among the samples produced with glass waste, was found high possibility of occurrence of the Alkali Silica Reaction in the samples produced with CPII F40, that occurred less expressive may, in the samples produced with CPIV 32.

**Keywords:** floors; glass waste; alkali aggregate reaction.

# SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

## SÍMBOLOS

|                     |                               |
|---------------------|-------------------------------|
| $\text{CO}_3^{2-}$  | Carbonato                     |
| $\text{CaCO}_3$     | Carbonato de cálcio           |
| $\text{NaCO}_3$     | Carbonato de sódio            |
| cm                  | Centímetro                    |
| $\text{cm}^3$       | Centímetro cúbico             |
| $\text{dm}^3$       | Decímetro cúbico              |
| $\neq$              | Diferente                     |
| g                   | Gramas                        |
| $\text{g/cm}^3$     | gramas por centímetros cúbico |
| $\text{OH}^-$       | Hidroxila                     |
| $\text{Ca(OH)}_2$   | Hidróxido de Cálcio           |
| $\text{Mg(OH)}_2$   | Hidróxido de Magnésio         |
| $\text{Na(OH)}$     | Hidróxido de Sódio            |
| h                   | Hora                          |
| $\text{Ca}^{2+}$    | Íon cálcio                    |
| $\text{H}^+$        | Íon hidrogênio                |
| $\text{OH}^-$       | Íon hidroxila                 |
| $\text{O}^{2+}$     | Íon oxigênio                  |
| $\text{SiO}_4^{4-}$ | íon silicato                  |
| $\text{O}^{2+}$     | Íon silício                   |
| $\text{Na}^+$       | Íon sódio                     |
| L                   | Litro                         |
| $>$                 | Maior que                     |
| $<$                 | Menor que                     |
| mm                  | Milímetro                     |
| $\text{mm}^3$       | Milímetro cúbico              |

|         |                    |
|---------|--------------------|
| min     | Minutos            |
| M       | Molar              |
| N       | Newton             |
| O       | Oxigênio           |
| $SiO_2$ | Óxido de Silício   |
| PE      | Pernambuco         |
| rpm     | Rotação por minuto |

## **SIGLAS**

*ABNT* - Associação Brasileira de Normas Técnicas

*ASTM* - American Society for Testing and Materials

*ANOVA* - Análise de Variâncias

*CAP* - Cimento Asfáltico de Petróleo

*CCB* - Centro Cerâmico do Brasil

*CONAMA* - Conselho Nacional do Meio Ambiente

*CPII F40* - Cimento Portland Composto com Fíler, classe 40

*CPIV 32* - Cimento Portland Pozolânico, classe 32

*IBGE* - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

*P36* - Lixa de ferro grana 36

*P60* - Lixa de ferro grana 60

*PRNS* - Política Nacional de Resíduos Sólidos

*DRX* - Difratorômetro ou difratometria de raio X

*MEV* - Microscopia ou microscópio Eletrônico de Varredura

*MG* - Minas Gerais

*Ca(OH)<sub>2</sub>* - Portlandita

*pH* - Potencial Hidrogeniônico

*Ca<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O* - Silicato de Cálcio Hidratado

*RAA* - Reação Álcali Agregado

*RAS* - Reação Álcali Sílica

*RV-CPII* - Resíduo de vidro com cimento CPII F40

*RV-CPIV* - Resíduo de vidro com cimento CPIV 32

*AN-CPII* - Agregado Natural com cimento CPII F40

# LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Diagrama de Venn. ....                                                                     | 21 |
| Figura 2: Materiais recicláveis coletados nas associações e cooperativas de Uberlândia em 2014. .... | 33 |
| Figura 3: Gel maciço e gretado. ....                                                                 | 41 |
| Figura 4: Produtos cristalizados sobre a argamassa. ....                                             | 41 |
| Figura 5: Produtos cristalizados sobre a superfície dos agregados. ....                              | 41 |
| Figura 6: Etringita dispersa na argamassa. ....                                                      | 41 |
| Figura 7: Material maciço, duro e opaco. ....                                                        | 42 |
| Figura 8: Material maciço e fibroso. ....                                                            | 42 |
| Figura 9: Difractometria de raios X da amostra de gel coletado. ....                                 | 43 |
| Figura 10: Difractograma de raio X de amostras de géis puros. ....                                   | 44 |
| Figura 11: Partícula de sílica reativa envolvida com pasta de cimento Portland. ....                 | 45 |
| Figura 12: Partícula de sílica não hidratada. ....                                                   | 46 |
| Figura 13: Partícula de sílica hidratada. ....                                                       | 47 |
| Figura 14: Ataque dos íons OH <sup>-</sup> ao grupo Silanol. ....                                    | 48 |
| Figura 15: Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas. ....                        | 49 |
| Figura 16: Vidro obtido nas coletas. ....                                                            | 57 |
| Figura 17: Máquina de Abrasão Los Angeles. ....                                                      | 58 |
| Figura 18: Frasco de Chapman. ....                                                                   | 60 |
| Figura 19: Formas para confecção das placas 10x10x1cm. ....                                          | 64 |
| Figura 20: Adensamento da argamassa. ....                                                            | 64 |
| Figura 21: Polimento superficial. ....                                                               | 66 |
| Figura 22: Acabamento lateral. ....                                                                  | 66 |

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23: Aplicação da cera. ....                                                                                          | 67 |
| Figura 24: Corte das amostras.....                                                                                          | 68 |
| Figura 25: Ensaio de absorção de água. ....                                                                                 | 69 |
| Figura 26: Abrasímetro CAP. ....                                                                                            | 71 |
| Figura 27: Imagem ilustrativa do ensaio de Flexão.....                                                                      | 73 |
| Figura 28: Porta amostra da câmara de vácuo do MEV. ....                                                                    | 75 |
| Figura 29: Fotografia utilizada para identificar a região micrografada. ....                                                | 76 |
| Figura 30: Equipamento de difratometria de raio X utilizado.....                                                            | 78 |
| Figura 31: Resultados do ensaio de absorção após análises estatística. ....                                                 | 82 |
| Figura 32: Resultados do ensaio de abrasão após análises estatística.....                                                   | 87 |
| Figura 33: Resultados do ensaio de flexão após análises estatística. ....                                                   | 91 |
| Figura 34: Interface entre o agregado e pasta da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, aos 28 dias.....        | 93 |
| Figura 35: Detalhe da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 28 dias de idade.....                           | 93 |
| Figura 36: Amostra de resíduo de vidro produzida com CPII F40, aos 28 dias, indicando a presença de fissuras.....           | 93 |
| Figura 37: Interface entre o agregado e pasta, da amostra com agregado natural e CPII F40, aos 28 dias de idade.....        | 93 |
| Figura 38: Amostra de resíduo de vidro com CPII F40, indicando a presença de poros, aos 28 dias de idade. ....              | 94 |
| Figura 39: Poros presente nas amostras produzidas com agregado natural, aos 28 dias de idade.....                           | 94 |
| Figura 40: Detalhe do poro visualizado na amostra confeccionada com resíduo de vidro e CPII F40, aos 28 dias de idade. .... | 94 |
| Figura 41: Micrografia do poro da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 28 dias de idade.....               | 94 |
| Figura 42: Interface do agregado e pasta, .....                                                                             | 95 |

|                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| na amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 28 dias de idade..                                               | 95  |
| Figura 43: Interface do agregado e pasta, na amostra produzida com agregado natural e CPII F40, aos 28 dias de idade..... | 95  |
| Figura 44: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, aos 28 dias de idade.....                    | 96  |
| Figura 45: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, aos 180 dias de idade.....                   | 96  |
| Figura 46: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, aos 28 dias de idade.....    | 96  |
| Figura 47: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, aos 180 dias de idade.....   | 96  |
| Figura 48: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 28 dias de idade.....                     | 97  |
| Figura 49: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 180 dias de idade.....                    | 97  |
| Figura 50: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 28 dias de idade.....     | 97  |
| Figura 51: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 180 dias de idade.....    | 97  |
| Figura 52: Superfície da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, antes do ensaio acelerado.....                | 98  |
| Figura 53: Superfície da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, após ensaio acelerado.....                    | 98  |
| Figura 54: Superfície da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, antes do ensaio acelerado.....                 | 99  |
| Figura 55: Superfície da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, após ensaio acelerado.....                     | 99  |
| Figura 56: Superfície do agregado de resíduo de vidro da amostra produzida com CPII F40, antes do ensaio acelerado.....   | 100 |

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 57: Superfície do agregado de resíduo de vidro da amostra produzida com CPII F40, depois do ensaio acelerado. ....    | 100 |
| Figura 58: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, antes do ensaio acelerado. ....                 | 100 |
| Figura 59: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, depois do ensaio acelerado. ....                | 100 |
| Figura 60: Detalhe do poro da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, antes do ensaio acelerado. ....             | 101 |
| Figura 61: Detalhe do poro da amostra produzida com resíduo de vidro e CPII F40, depois do ensaio acelerado. ....            | 101 |
| Figura 62: Interface do resíduo de vidro com a pasta de CPII F40, antes do ensaio acelerado. ....                            | 101 |
| Figura 63: Interface do resíduo de vidro com a pasta de CPII F40, depois do ensaio acelerado. ....                           | 101 |
| Figura 64: Interface do resíduo de vidro com a pasta de CPIV 32, antes do ensaio acelerado. ....                             | 102 |
| Figura 65: Interface do resíduo de vidro com a pasta de CPIV 32, depois do ensaio acelerado. ....                            | 102 |
| Figura 66: Amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, antes do ensaio acelerado. ....                                 | 103 |
| Figura 67: Amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, depois do ensaio acelerado. ....                                | 103 |
| Figura 68: Superfície do resíduo de vidro da amostra produzida com CPIV 32, depois do ensaio acelerado. ....                 | 103 |
| Figura 69: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, depois do ensaio acelerado. .... | 103 |
| Figura 70: Resultado do ensaio de difratometria de raio X da amostra de CPII F40. ....                                       | 104 |
| Figura 71: Resultado do ensaio de difratometria de raio X da amostra de CPIV 32. ....                                        | 104 |

# LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Critério de Chauvenet. ....                                                                                    | 55 |
| Tabela 2: Consumo de materiais. ....                                                                                     | 63 |
| Tabela 3: Resultados da caracterização dos agregados utilizados. ....                                                    | 79 |
| Tabela 4: Resultados obtidos no ensaio de absorção de água.....                                                          | 80 |
| Tabela 5: Resultados do ensaio de abrasão profunda, obtido nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CPII F40. .... | 83 |
| Tabela 6: Resultados do ensaio de abrasão profunda, obtido nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CPIV 32.....   | 84 |
| Tabela 7: Resultados do ensaio de abrasão profunda, obtido nas amostras produzidas com agregado natural.....             | 85 |
| Tabela 8: Resultados obtidos, no ensaio à flexão realizado nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CPII F40. .... | 88 |
| Tabela 9: Resultados obtidos, no ensaio à flexão realizado nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CPIV 32.....   | 89 |
| Tabela 10: Resultados obtidos, no ensaio à flexão realizado nas amostras produzidas com agregado natural.....            | 90 |

# SUMÁRIO

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| <b>1 Introdução</b>                                       | 20 |
| 1.1 Justificativa                                         | 20 |
| 1.2 Objetivo Geral                                        | 23 |
| 1.3 Objetivos Específicos                                 | 23 |
| <b>2 Revisão Bibliográfica</b>                            | 24 |
| 2.1 Pisos polidos                                         | 24 |
| 2.2 Resíduos sólidos da construção civil                  | 26 |
| 2.3 Vidro e o resíduo de vidro                            | 29 |
| 2.4 Reciclagem e reutilização do resíduo de vidro         | 32 |
| 2.5 Resíduo de vidro na matriz de cimento Portland        | 35 |
| 2.5.1 Reação álcali-sílica (RAS)                          | 37 |
| 2.5.2 Mecanismo de formação e expansão da RAS             | 44 |
| 2.5.3 Medidas mitigadoras para evitar a ocorrência da RAS | 50 |
| <b>3 Programa experimental</b>                            | 53 |
| 3.1 Metodologia                                           | 53 |
| 3.2 Materiais                                             | 55 |
| 3.2.1 Aglomerante                                         | 55 |
| 3.2.2 Resíduo de vidro                                    | 56 |
| 3.2.3 Agregado natural                                    | 56 |
| 3.3 Procedimento Experimental                             | 57 |
| 3.3.1 Obtenção e preparo do resíduo de vidro              | 57 |

|                                                                                     |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.2 Caracterização dos agregados utilizados .....                                 | 59        |
| Massa específica do agregado natural e do resíduo de vidro .....                    | 59        |
| Massa unitária e cálculo do volume de vazios .....                                  | 61        |
| 3.3.3 Produção e caracterização das amostras .....                                  | 61        |
| Produção das amostras para os ensaios .....                                         | 61        |
| Ensaio de absorção de água .....                                                    | 68        |
| Ensaio de abrasão profunda .....                                                    | 70        |
| Ensaio de flexão .....                                                              | 72        |
| Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....                                     | 74        |
| Ensaio acelerado .....                                                              | 75        |
| Difratometria de raios X (DRX) .....                                                | 77        |
| <b>4 Resultados e análises.....</b>                                                 | <b>79</b> |
| 4.1 Massa específica, massa unitária e índice de vazios dos agregados.....          | 79        |
| 4.2 Ensaio de absorção de água .....                                                | 80        |
| 4.3 Ensaio de abrasão profunda.....                                                 | 82        |
| 4.4 Ensaio de Flexão .....                                                          | 88        |
| 4.5 Microscopia eletrônica de varredura .....                                       | 92        |
| 4.5.1 Microscopia eletrônica de varredura das amostras, aos 28 dias de idade.....   | 92        |
| 4.5.2 Microscopia eletrônica de varredura das amostras, 28 e 180 dias de idade..... | 96        |
| 4.5.3 Microscopia eletrônica de varredura após ensaio acelerado .....               | 98        |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| 4.6 Difractometria de raio X .....         | 104 |
| <b>5 Conclusões</b> .....                  | 106 |
| 5.1 Sugestões para trabalhos futuros ..... | 109 |
| REFERÊNCIAS .....                          | 110 |
| ANEXO A.....                               | 118 |
| ANEXO B.....                               | 121 |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Justificativa

O desenvolvimento econômico de um país relaciona-se diretamente com as questões ambientais, bem como, com os estudos relativos à escassez dos recursos naturais. Por essa razão tem-se procurado novos recursos e técnicas que possibilitem o uso de fontes alternativas de materiais para minimizar os impactos ao meio ambiente, bem como promover atividades que sejam sustentáveis.

Segundo Mousinho (2003), define-se desenvolvimento sustentável como sendo o equilíbrio entre o desenvolvimento econômico e a preservação do meio ambiente englobando os aspectos econômicos, sociais e ambientais conforme ilustrado no diagrama de Venn, Figura 1.

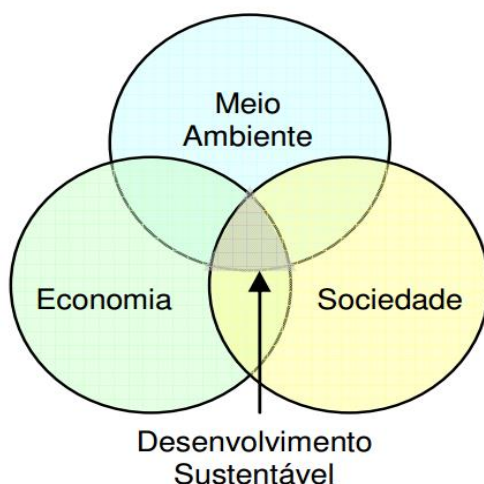
O relatório Brundtland<sup>1</sup> considera o desenvolvimento sustentável como sendo “O desenvolvimento que atende às necessidades do presente, sem comprometer a

---

<sup>1</sup> O Relatório de Brundtland, elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, faz parte de uma série de iniciativas, anteriores à Agenda 21, as quais reafirmam uma visão crítica do modelo de desenvolvimento adotado pelos países industrializados e reproduzido pelas nações em desenvolvimento, e que ressaltam os riscos do uso excessivo dos recursos naturais sem considerar a capacidade de suporte dos ecossistemas (BRUNDTLAND, 1991).

capacidade das futuras gerações atenderem às suas próprias necessidades”.

Figura 1: Diagrama de Venn.



Fonte: (PARKIN et al., 2003).

O surgimento de novas tecnologias vem crescendo muito ao longo do tempo após um período no qual, pouco preocupou-se com a preservação dos recursos naturais. O desenvolvimento sustentável é um grande desafio atual e tema central de discursões no cenário internacional. Um problema mundial que aflige os municípios, juntamente com a sociedade, são as questões de redução no consumo energético, destinação de resíduos, emissão de gases poluentes etc.

Normalmente os municípios brasileiros não possuem um modelo adequado de gestão dos resíduos sólidos, coletados nos pequenos e grandes centros urbanos, adotando como solução convencional a deposição destes resíduos em vazadouros ou aterros sanitários (MONTEIRO, 2001).

Segundo Pinto (1999), estima-se que, as cidades brasileiras de médio e grande porte, geram uma massa de resíduo sólido que varia entre 41% a 70% da massa total dos resíduos urbanos.

A elevada geração de resíduos aliado às destinações incorretas causam

diversos problemas, os quais comprometem o meio ambiente e geram problemas sociais, ambientais e econômicos. Dentre os resíduos sólidos descartados pelo homem, estão os resíduos de vidros eliminados no consumo de bens e nos comércios designados como vidraçarias.

Segundo dados da Cempre (2013), estima-se que o Brasil produz em média 800.000 toneladas de vidro por ano, sendo que desse total 220.000 toneladas/ano são recicladas, o que corresponde a 27,6% do total gerado. De acordo com Santos (1998), a quantidade de vidro descartado nos aterros e lixões do Brasil, corresponde a 2% do total de resíduos gerados.

Em estudo realizado em 2013, em visita à 17 estabelecimentos que eliminam o resíduo de vidro na cidade de Uberlândia, a quantidade média de resíduo de vidro eliminado anualmente, é de aproximadamente 37 toneladas/ano. Dentre os quais, 29 toneladas é reciclado ou reutilizado e 8 toneladas é destinado ao aterro sanitário local.

Encontrar soluções adequadas para a disposição final do resíduo de vidro, é um grande desafio para a sociedade, tendo em vista os diversos problemas ambientais que podem ser causados por uma disposição inadequada.

Diante deste contexto, busca-se atualmente novas alternativas para a destinação do resíduo de vidro, além de estudos científicos que comprovam novas formas de reutilizar e reciclar os resíduos provenientes da construção civil de forma assegurar a sustentabilidade das atividades deste setor.

Esta preocupação ampla que envolve principalmente responsabilidade ambiental, que suscitou o desenvolvimento da pesquisa, que tem por objetivo principal estudar a viabilidade do uso de resíduo de vidro na matriz de cimento Portland, especificamente para a confecção de pisos argamassados empregando os métodos de produção tradicionais de pisos polidos.

## **1.2 Objetivo Geral**

Estudar a possibilidade do uso de resíduo de vidro para a produção de pisos argamassados polidos em substituição aos agregados usualmente utilizados na sua fabricação, mediante estudo da durabilidade, desempenho físico e mecânico.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Avaliar as propriedades físicas e mecânicas do piso proposto, mediante à realização de ensaios de absorção de água, abrasão profunda e flexão.

Estudar as possíveis interações do resíduo de vidro com o cimento Portland, principalmente no que se refere à ocorrência da reação álcali-sílica, através da evolução das propriedades físicas e mecânicas com o tempo.

Investigar a microestrutura dos materiais produzidos, por Microscopia Eletrônica de Varredura, aos 28 e 180 dias de idade.

Verificar a possibilidade de ocorrência da (RAA), em amostras confeccionadas com resíduo de vidro, por meio de análise visual, ensaio de microscopia eletrônica de varredura e ensaio de difratometria de raio X, após exposição à condições de aceleração destas reações.

# **CAPÍTULO 2**

## **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Pisos polidos**

Em geral, pisos de concreto polido, são confeccionados com materiais que podem ser utilizados em diversos ambientes, tanto internos quanto externos.

Os pisos de concreto polido tornaram-se um grande elemento de decoração em residências de alto padrão construídas nas cidades de Los Angeles e Miami, nos Estados Unidos. Posteriormente, a técnica passou a ser utilizada no Brasil com a mesma finalidade de acabamento interior. A tecnologia ganhou o ambiente residencial, graças aos avanços sobretudo, no processo de polimento e incorporação de aditivos ao concreto. Dentre os aditivos mais utilizados, estão os endurecedores de superfície à base de nanosílica, silicato de sódio, flúor silicato ou impregnantes poliméricos com resina epoxy (SANTOS, 2015).

Ao mesmo tempo, os pisos de concreto polido ganharam o espaço industrial devido sua alta resistência superficial aliada à sua durabilidade, relativa simplicidade de manutenção e fácil polimento.

Dentre as modalidades de pisos polidos produzidos no Brasil estão os pisos de granitina. Estes pisos possuem larga utilização em grandes empreendimentos, como praças de alimentação, centro de eventos, laboratórios e outros locais de grande circulação.

Os pisos de granitina são pisos argamassados, compostos de agregados minerais triturados, tais como mármore, calcário, granito e quartzo, que

misturados ao cimento branco ou comum e água, se transformam em microconcreto, sendo executados sobre contrapiso nivelado e com juntas de dilatação (GUERRA, 2013).

Podem ser preparados diretamente no canteiro com cimento Portland, com grãos de granito, água e corante. Geralmente são executados em painéis com espessura na ordem de 1 cm, com juntas de dilatação de latão, alumínio ou polímero (GUERRA, 2013).

A aplicação é feita da mesma maneira que o emboço, por lançamento, batendo repetidas vezes com a desempenadeira para melhor fixação, seguido de sarrafeamento e desempenamento. Após a endurecimento, dá-se o polimento, e posteriormente a aplicação da resina epóxi ou acrílica (BRITO, 2010).

O acabamento superficial é a etapa final da produção do piso de granitina. Podendo ser realizado inúmeras vezes se necessário, após o polimento inicial e determinado tempo de uso e exposição ao ambiente.

As aplicações de resinas e ceras resultam em superfícies transparentes e impermeáveis que confere proteção e repele com eficiência produtos como óleo, água e líquidos em geral, mesmo em áreas constantemente expostas às ações de intempéries e trânsito intenso de pessoas. Além disso, dificulta a impregnação de sujeiras promovendo uma proteção duradoura, que facilita o processo de limpeza (FREITAS, 2012).

O piso de granitina também é conhecido como granilite, marmorite ou granilito, dependendo da região do Brasil, pode ser fabricado em placas separadas e assentado diretamente no local.

Geralmente são confundidos com pedras de mármore, porém possuem vantagens tais como facilidade de manutenção, custo relativamente mais baixo e beleza original renovável a um simples polimento. Os pisos de granitina apresentam grande resistência a impactos e desgaste superficial, excelente acabamento, cores variadas e ilimitadas combinações decorativas (FARIAS, 2010).

## **2.2 Resíduos sólidos da construção civil**

De acordo com ABNT NBR 15114:2004, resíduos sólidos da construção civil são resíduos provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

A construção civil detém um grande papel na geração dos resíduos sólidos, quer seja, dos advindos do consumo dos recursos naturais ou aqueles resultantes da geração de novos produtos.

Estima-se que cerca de 75% dos resíduos gerados pela construção civil nos municípios, provêm de reformas e demolições, atividades geralmente realizadas pelos próprios usuários dos imóveis (PRS, 2014).

Segundo a ABLP (2009), os resíduos da construção civil representam aproximadamente 61% do lixo dos municípios. Estes resíduos são inertes e não perigosos, porém são muito mais densos que os resíduos comuns e ocupam um volume muito grande nos aterros sanitários.

A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 307, de julho de 2002, foi instituída para estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos quanto a destinação dos resíduos da construção civil, assim como, definir as ações necessárias para minimizar os impactos ao meio ambiente (BRASIL, 2002).

Segundo essa resolução, os municípios são obrigados a elaborar um Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil. O plano deve definir responsabilidades quanto à geração, transporte e sobretudo destinação final dos resíduos. Os municípios devem definir e regulamentar leis, bem como as formas pelas quais geradores, transportadores e operadores de áreas de

captação dos resíduos da construção civil devem exercer suas responsabilidades.

Conforme a resolução os resíduos da construção civil são classificados em quatro classes:

Classe A - Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: resíduos provenientes da construção e demolição, reformas e reparos de pavimentação; construção, demolição, reformas e reparos de edificações como componentes cerâmicos, argamassa e concreto;

Classe B - Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel, metais, vidros, madeiras etc;

Classe C - Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação, tais como: produtos oriundos do gesso;

Classe D - Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas e outras instalações industriais.

O objetivo principal dessa resolução é criar medidas mitigadoras para minimizar os impactos decorrentes do lançamento errôneo dos resíduos sólidos ao meio ambiente.

Segundo Cardoso et al. (2006), existe uma grande diversidade de impactos que a construção civil causa ao meio ambiente, que vão além de perdas de materiais à geração de resíduos. Do ponto de vista ambiental, o problema principal com este tipo de resíduo está relacionado principalmente à sua deposição final e aos grandes volumes gerados.

A deposição final e irregular dos resíduos sólidos proveniente da construção civil no meio ambiente pode causar diversos problemas ambientais e sociais, tais como, degradação de mananciais, enchentes, proliferação de insetos e organismos causadores de doenças (SANTANA et al., 2012).

Segundo Pinto (1999), os principais impactos sanitários e ambientais relacionados aos resíduos de construção civil são associados às deposições irregulares, sendo uma conjunção de efeitos deteriorantes do ambiente local, comprometendo a paisagem, o tráfego de veículos e pedestres, a drenagem urbana, entre outros efeitos.

A destinação dos resíduos sólidos em aterros sem os devidos cuidados técnicos, pode causar desabamentos como é o caso da Favela Nova República em São Paulo, onde o desabamento de um aterro executado com resíduo de construção causou a morte de várias pessoas (JOHN & AGOPYAN, 2000).

A deposição irregular do resíduo da construção civil é muito comum no Brasil. Os números estimados por Pinto (1999), para cinco cidades médias, variam entre 10 e 47% do total do resíduo gerado.

A geração dos grandes volumes dos resíduos sólidos da construção civil, principalmente em obras de demolição, é também um problema que geralmente relaciona-se com a destinação irregular. A dificuldade de adequar grandes espaços, bem como, criar um sistema de coleta eficiente para receber e recolher estes resíduos, muitas vezes levam aos responsáveis pelas obras a depositar estes resíduos em áreas clandestinas.

Segundo Murakami et al. (2001) apud Karpinski et al. (2008), as gerações de grandes volumes de resíduos sólidos provenientes da construção civil oriundos dos canteiros de obras são responsáveis por cerca de 20 a 30% do total dos resíduos gerados, pelos países-membros da União Europeia.

Uma das formas para solucionar os problemas gerados quanto a geração e deposição irregular dos resíduos é priorizar soluções de reutilização e reciclagem, em que a construção civil tem um grande potencial de utilização destes resíduos (JOHN & AGOPYAN, 2000).

A Lei nº 12.305/10 sancionada em agosto de 2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que propôs a prevenção e redução na geração de resíduos, tendo como principal proposta à prática de hábitos de consumo

sustentáveis e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e reutilização dos resíduos sólidos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).

Entretanto, durante os 5 anos que se passaram pouco mudou, já que o uso de “lixões” aliada à falta de planos de gerenciamento e a destinação incorreta dos resíduos sólidos, principalmente os provenientes da construção civil, ainda podem ser apontados como os principais fatores causadores de problemas ambientais decorrentes do manejo inadequado desses resíduos.

Dentre os resíduos sólidos proveniente de atividades da construção civil, pode-se destacar o resíduo de vidro, eliminado principalmente nos comércios de vidraçarias responsáveis pelo fornecimento de vidros constituintes de esquadrias e elementos decorativos, como fachadas de prédios, casa e comércios.

## **2.3 Vidro e o resíduo de vidro**

O vidro é um material 100% reciclável e largamente utilizado em todo o mundo. Em geral é uma substância amorfa, inorgânica e fisicamente homogênea, obtida pelo resfriamento de uma massa em fusão que endurece pelo aumento contínuo de viscosidade até atingir a condição de rigidez (ROMANO, 1998).

Devido a diversificada faixa de composição química dos vidros estes apresentam uma ampla variação de propriedades mecânicas, óticas, térmicas, elétricas etc. As propriedades dos vidros, assim como de todos os outros materiais, dependem de suas características estruturais, do tipo de ligações interatômicas, da microestrutura e dos defeitos existentes no material. A estrutura por sua vez, está condicionada a sua composição química, e também ao processo térmico de fabricação (CALLISTER, 2002).

Segundo Akerman (2000), os vidros podem apresentar diversos graus de resistência mecânica, serem densos, leves, impermeáveis e porosos.

Dependendo da sua fabricação e constituição podem ser mais resistentes e empregados para diversos fins industriais.

Os vidros em geral são classificados como um material frágil, pois rompe-se quando submetido a pequenas deformações e possui boa resistência mecânica. Possui grande resistência à ruptura, podendo ser utilizado em pisos, devido sua considerável dureza e rigidez. Não é um material apropriado para locais sujeitos a impactos por não ser relativamente tenaz (CALLISTER, 2002).

Uma das propriedades tecnológicas mais importantes dos vidros é a alta durabilidade química de certas composições. Segundo Pilkington (2010), a durabilidade do vidro pode ser constatada na maioria das cidades que possuem igrejas antigas. O vidro utilizado nestas igrejas continua intacto, a menos que tenha sofrido depredações ou rompeu-se devido a cargas excessivas.

Devido à grande diversidade dos vidros, estes possuem uma ampla aplicabilidade nas diferentes áreas do conhecimento. Alguns vidros podem ser aplicados em temperaturas extremas, como é o caso do vidro borossilicato, e outros fundem-se a baixas temperaturas. A técnica de têmpera térmica é responsável pela alta resistência dos pára-brisas de automóveis, dos vidros balísticos e de lentes (AKERMAN, 2000).

Os vidros são normalmente isolantes elétricos, entretanto, vidros porosos têm sido impregnados com metais para a formação de fibras que são supercondutores de eletricidade. Alguns são condutores iônicos e têm aplicação como eletrólitos sólidos (CRONEMBERGER, 2010).

A fibra de vidro é utilizada na produção de lã extremamente isolante térmica e está presente como reforço em diversos tipos de materiais, como calhas, pias, reservatórios de água, e concretos.

As fibras óticas produzidas de vidro ultrapuro são materiais com alta resistência ao fluxo de corrente elétrica. São atualmente responsáveis por substituírem os tradicionais cabos de alumínio e cobre e possuem grandes vantagens se comparados com os cabos tradicionais (PERON, 2009).

Recentemente, foram desenvolvidos os vidros biodegradáveis, que se decompõem naturalmente no meio ambiente com o passar do tempo. Tais vidros podem ser produzidos para liberar certos elementos químicos na terra e na água. Sua utilização em agricultura, biologia e medicina apresenta diversas aplicabilidades (AKERMAN, 2000).

Devido sua alta durabilidade o vidro é muito empregado para imobilização de resíduos radioativos, provenientes das usinas nucleares, como é o caso dos vidros niobofosfatos e ferrofosfatos produzidos a partir da mistura e fusão de compostos inorgânicos em fornos elétricos e de micro-ondas (GHUSSN, 2005).

Apesar de todos os avanços e aplicações do vidro, o resíduo de vidro é um problema comum nos pequenos e grandes centros urbanos. A utilização do vidro em nosso cotidiano gera resíduos de vidro provenientes de copos, garrafas, vasilhames etc. Na maioria dos casos, a única solução que resta a este resíduo é a sua reciclagem ou destinação em depósitos de lixo.

Pode-se restringir o conceito de resíduo de vidro, também aos produtos resultantes da fusão, pelo calor, de óxidos ou de seus derivados e misturas, tendo em geral como constituinte principal a sílica ou óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) que, pelo resfriamento, endurecem sem cristalizar. Sendo assim o resíduo de vidro é basicamente uma estrutura de sílica fundida com adição de outros componentes (MEZZADRI, 2012).

Conforme Santos (2010), resíduo de vidro é todo vidro já utilizado pelo menos uma vez que, posterior a sua utilização, perdeu sua função primordial e sua reutilização é dificultada por algum fator ou simplesmente é inviável.

Assim sendo, o resíduo de vidro pode-se apresentar em diversos e variados

tipos, pois existe infinitas propriedades específicas do vidro, tais como índice de refração, cor, viscosidade, sendo que, para cada propriedade desejada é necessária uma dada composição e processo de produção.

## **2.4 Reciclagem e reutilização do resíduo de vidro**

Em consequência das diversas possibilidades de aplicações do vidro, é gerado constantemente, uma grande quantidade de resíduos. O vidro está presente no cotidiano das pessoas como em embalagens de conserva de produtos, utensílios domésticos, nos automóveis etc, podendo ser reaproveitado ou reutilizável por diferentes tecnologias e técnicas.

De acordo com a resolução (CONAMA) nº. 307 de julho de 2002 os reaproveitamentos dos resíduos em geral podem ser abordados em três pontos distintos:

- **Recuperação:** O processo de recuperação compreende a etapa de extração e remoção de substâncias indesejáveis, eventualmente presentes nos resíduos e que podem comprometer o processo de reciclagem ou reutilização;
- **Reutilização:** Compreende o processo pelo qual se faz o reuso do resíduo, sem que haja qualquer tipo de transformação ou de beneficiamento do material;
- **Reciclagem:** Processo que consiste no reaproveitamento do resíduo, sendo necessário, portanto, que o material sofra algum tipo de transformação.

A reciclagem dos resíduos, podem gerar inúmeros benefícios, dentre os quais destacam-se:

Redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos

por resíduos reciclados (JOHN & AGOPYAN, 2000);

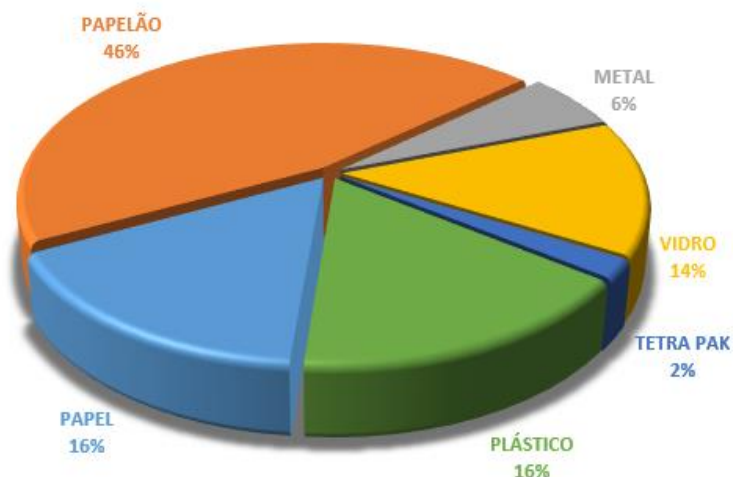
Redução das áreas necessárias para o aterro, devido a diminuição do volume de resíduos produzidos (PINTO, 1999);

Diminuição do processo de poluição do ar, da fauna, da flora etc (JOHN, 1999).

Para adotar atividades de reciclagem e reutilização dos resíduos sólidos, os municípios devem incluir em seu plano de gestão a coleta seletiva e instruir a população sobre as práticas e importância na separação do lixo residencial e comercial, na sua fonte geradora.

Em Uberlândia, segundo a composição em massa representada na Figura 2, o resíduo de vidro representa aproximadamente 14% do total de resíduos provenientes da coleta seletiva em 2014. Outros materiais como papelão, papel e metal representam 47%, 16% e 6% respectivamente, do total de resíduos coletados.

Figura 2: Materiais recicláveis coletados nas associações e cooperativas de Uberlândia em 2014.



Fonte: Adaptado (UBERLÂNDIA, 2014).

Segundo informações disponíveis do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2008 do total de 853 municípios situados no estado de Minas Gerais apenas 155 havia serviços de coleta seletiva, sendo que apenas 19 municípios aplicavam os recursos provenientes da coleta seletiva em

atividades de produção (IBGE, 2008).

O resíduo de vidro é um material que possui infinitas possibilidades de reaproveitamento e reutilização. Diferente de outros materiais, o resíduo de vidro possui um aproveitamento de 100% em sua reciclagem, ou seja, a quantidade de vidro descartado pelo homem pode ser totalmente reciclável simplesmente pelo processo de fusão (OLIVEIRA et al., 2012).

O processo de reciclagem por fusão, consiste basicamente na fusão do vidro utilizado e a formação de novos utensílios, como garrafas, copos etc. A maior preocupação com a reciclagem do resíduo de vidro é a contaminação que pode ocorrer no derretimento do material. Sendo assim materiais como metal ou plástico aderido ao vidro podem contaminar o produto final diminuindo a qualidade do novo produto formado (VOM, 2012).

O resíduo de vidro é um material, que pode ser estocado facilmente na forma triturado, o que facilita principalmente no seu manejo e transporte, e por seguinte sua reciclagem. Pode ser encontrado em diferentes comércios como vidraçarias ou estabelecimentos que utilizam garrafas de vidro para estocar bebidas, tais como as cervejarias e empresas de refrigerantes e sucos.

Segundo Abividro (2009), apesar das facilidades no processo de reciclagem do resíduo de vidro, o índice de reciclagem no Brasil era de apenas 47% em 2008.

A reutilização do resíduo de vidro mais comum e difundida é a utilização de embalagens retornáveis de vidro. As embalagens retornáveis de vidro são usadas basicamente para armazenar líquidos, como refrigerante, cerveja, água, entre outros produtos comumente utilizados. Neste processo, o resíduo de vidro é inserido em um processo cíclico, em que garrafas de vidro são reutilizáveis após passar por um processo rigoroso de esterilização.

Existe um grande leque de possibilidades para a reciclagem e reutilização do resíduo de vidro. Há estudo realizado por Reindl (1998) em que são tratadas mais de sessenta formas de reciclagem de vidro. No trabalho são apresentadas inúmeras formas de reciclagem do resíduo de vidro como por exemplo a sua

utilização em substituição dos agregados para leitos de estradas, materiais abrasivos, blocos de pavimentação, ou mesmo em substituição dos agregados do concreto etc. Todas estas aplicações utilizam o resíduo de vidro moído ou triturado, sendo que as dimensões dos grãos de vidro variam conforme a sua aplicação.

## **2.5 Resíduo de vidro na matriz de cimento Portland**

O uso do resíduo de vidro como agregado constituinte do concreto, na forma de agregados miúdo ou graúdo, já foi estudado por vários pesquisadores nacionais e internacionais. Alguns desses materiais são adicionados à matriz de cimento Portland no intuito de melhorar as propriedades mecânicas dos concretos produzidos.

Federico e Chidiac (2009), Luz e Ribeiro (2008), dentre vários pesquisadores realizaram estudos utilizando o resíduo de vidro na composição de materiais para construção civil. Tais estudos avaliaram a incorporação desses resíduos na composição de argamassas, no preparo de concretos, na matriz de cimento Portland etc.

Sauer (2013) realizou um estudo do potencial de aplicação dos resíduos de vidro, abordando a aplicação do resíduo de vidro laminado de parabrisas moído, como substituto parcial do cimento em argamassas de recuperação estrutural. Os resultados obtidos no estudo, confirmaram que este material é aceitável para fins cimentantes, devido a atividade pozolânica, o que torna este material uma alternativa como adição mineral.

Pozolana é o material inorgânico, natural ou artificial, silicoso ou alumino-silicoso, que pode apresentar propriedades aglomerantes quando finamente moído, em presença de água e hidróxido de cálcio (MASSAZZA, 1998).

Os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$ , conforme

apresentado na equação 1.



O silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aparece nesta equação com hífen, pois não é um composto bem definido, podendo assumir variadas estequiometrias (RICHARDSON, 2008).

A utilização de resíduo de vidro com características pozolânicas na composição de materiais contendo cimento Portland possui vantagens ambientais e econômicas uma vez que diminui a extração de matéria-prima para a produção do cimento Portland e melhora consideravelmente as propriedades mecânicas da matriz cimentícia, devido a formação adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produto responsável pela maior fração de resistência das pastas de cimento (GOBBI et al., 2011).

Atualmente, diversos materiais pozolânicos, como cinza volante, sílica ativa, metacaulim e cinza da casca de arroz, são utilizados em substituição parcial ao cimento Portland em pastas, argamassas e concretos (NETTO, 2006).

Babu e Prakash (1995) concluíram que o resíduo de vidro pode influenciar a qualidade do concreto não somente pelo efeito pozolânico, mas também, pela melhora da compacidade do material por meio do aumento do empacotamento das partículas. Segundo os resultados obtidos no trabalho, foi constatado que a adição do vidro causou uma melhora significativa no preenchimento de vazios entre os grãos de agregado fino. Já o efeito pozolânico aconteceria com vidros de granulometria fina (<75µm) uma vez que as partículas finas favorecem uma rápida e benéfica reação pozolânica. Para vidros com granulometria grosseira (>0,75µm), a reação álcali sílica aconteceria preferencialmente.

No estudo realizado por Silva et al. (2011), outros benefícios indiretos são destacados sob análise do enfoque social e econômico. Embora, obteve-se

perdas nas propriedades mecânicas dos concretos produzidos com pó de vidro, são destacados os ganhos quanto aos custos operacionais de transporte e manejo. O autor conclui que o uso de pó de vidro para produção de concreto poderá também favorecer o desenvolvimento de profissionais qualificados para aperfeiçoar os procedimentos de coleta seletiva.

Segundo o trabalho de Mageswai e Vidivelli (2010), é possível o uso do pó de vidro moído, como agregado fino para concreto. No trabalho, o pó de vidro designado como SGP (Sheet Glass Powder), substituiu a areia natural nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 100%. O concreto foi analisado pela resistência à compressão, tração e flexão. Segundo os resultados obtidos, houve uma melhora substancial nas propriedades mecânicas dos materiais para as primeiras idades, entretanto houve uma redução significativa nas resistências à tração, compressão e flexão aos 180 dias de idade, fato este, que foi relacionado às consequências da reação álcali-sílica.

Como exemplos da utilização de resíduo de vidro em escala real, pode-se destacar o uso de vidro como agregado fino para concreto. Países como a Austrália já utilizam o vidro moído proveniente do lixo como agregado para concretos em construção (CRENTSIL et al. 2001).

Em Nova Iorque já foram apresentadas recomendações para o uso deste material também para a produção de concretos (MEYER et al., 2001)

No Brasil o uso do resíduo de vidro para uso em concreto e produção de materiais cimentícios é uma técnica ainda pouco utilizada, embora há estudos realizados no assunto em questão, principalmente relacionados à reação álcali sílica e atividade pozolânica.

### **2.5.1 REAÇÃO ÁLCALI-SÍLICA (RAS)**

A reação álcali sílica (RAS) é um tipo de reação álcali-agregado (RAA) que ocorre entre os álcalis do cimento e a sílica reativa dos agregados (FIGUERÔA

& ANDRADE, 2007).

Para ocorrer a reação álcali-agregado, o agregado deve conter formas de sílica capazes de reagir quimicamente com os íons hidroxila e os álcalis presentes na solução dos poros, sendo necessária a presença de água ou umidade para ocorrer a reação. O resultado da reação é a possível formação de um gel branco ou escuro que pode sofrer expansões, causar fissuras e tensões indesejáveis no concreto (MUNHOZ, 2008).

As reações Álcali Agregado podem ser classificadas em três tipos:

Reação álcali-sílica

Reação álcali-silicato

Reação álcali-carbonato

Segundo a ABNT NBR 15577-1:2008 a reação álcali-sílica é um tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do  $\text{Ca(OH)}_2$  originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo.

De acordo com Diamond (1975), a reação álcali-sílica é mais comum do que a reação álcali-silicato e álcali-carbonato, sendo universalmente considerada como a reação entre os íons alcalinos presentes na solução dos poros do concreto e a sílica amorfa presente nos agregados.

A reação álcali-sílica é o tipo de reação química mais relatada no meio técnico e científico entre as reações álcali agregado, sendo que normalmente ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativas envolvidas. Entre as formas mais conhecidas destacam-se: a opala ou sílica amorfa, a calcedônia, a cristobalita, a tridimita, os vidros naturais e artificiais e o quartzo microcristalino (HASPARYK, 2005; PAULON, 1981).

Para ocorrência da (RAS), é necessário que ocorra conjuntamente a presença suficientemente elevada de álcalis, sílica reativa nos agregados e umidade

(LOPES et al., 2004).

As manifestações da reação álcali-sílica podem ocorrer de várias formas, desde expansões indesejáveis, movimentações diferenciais nas estruturas, fissurações, exsudação do gel e interferência nas propriedades mecânicas do material.

A reação álcali-silicato se desenvolve por um processo semelhante ao da reação álcali-sílica, é menos difundida e conhecida, sendo que ocorre de forma mais lenta já que os minerais reativos estão mais disseminados na matriz (POOLE, 1992). Os minerais mais envolvidos na reação álcali-silicato são os expansivos do grupo dos filossilicatos e também alguns tipos de silicatos presentes em rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas); rochas metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos, quartizitos e hornfels) e ígneas (granito) (GILLOTT, 1975).

Segundo Hobbs (1988), o produto resultante da reação álcali-sílica pode ser encontrado no concreto atacado pela reação álcali-silicato, já que o quartzo microcristalino ou deformado é frequentemente presente em agregados contendo filossilicatos.

Furnas (1997) verificou que na reação álcali-silicato, os minerais reativos normalmente têm retículo cristalino deformado sendo que o quartzo está entre esses minerais, pois na maioria das vezes apresenta o retículo cristalino deformado.

A reação do tipo álcali-carbonato envolve uma reação química entre os álcalis e as dolomitas presentes nos calcários, promovendo a formação de compostos como a Brucita ( $Mg(OH)_2$ ), conforme a equação 2.



Este ataque dos álcalis às rochas carbonáticas é denominado de “desdolomitização”, pode gerar fissuras e enfraquecimento da zona de transição em concretos (HASPARYK, 1999; BICZOK, 1972;).

Segundo Figuerôa e Andrade (2007), existem no mundo diversas construções com estruturas de concreto afetadas pela reação álcali agregado. Atualmente as reações podem ser encontradas em diversos tipos de estruturas de concreto, como por exemplo, em Recife (PE) onde constatou-se após a realização de ensaios específicos, manifestações patológicas provenientes da (RAA).

Por outro lado, existem diversos métodos para investigar e detectar a presença da reação álcali agregado no concreto endurecido, dentre os quais podem-se destacar os principais: Análise visual, análise por microscopia eletrônica de varredura, ensaio de difratometria de raios X e ensaio do método acelerado em barras de argamassa (ABNT NBR 15577-1:2008; HASPARYK, 2005; VALDUGA, 2002; PIRES, 2009).

Visualmente, as manifestações mais comuns em estruturas de concreto afetadas pela RAA são o aparecimento de fissurações do tipo “mapa”, exsudação do gel na superfície do concreto, manchas nas argamassas e poros com deposição de material branco no seu interior (HASPARYK, 1999; FURNAS, 1997; TAYLOR, 1997).

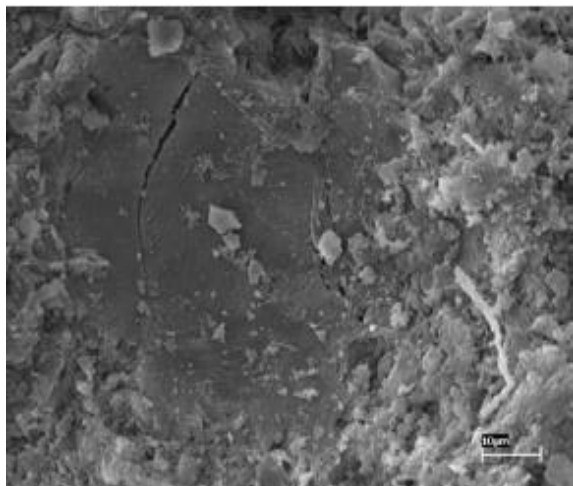
A análise por microscopia eletrônica de varredura, tem sido uma técnica largamente utilizada para conhecimento dos produtos resultantes da reação álcali agregado e aqueles resultantes da hidratação do cimento (VALDUGA, 2002).

Ben Haha et al. (2007), realizaram análise de microscopia eletrônica de varredura, para quantificar a intensidade da reação álcali sílica em micro barras de argamassa e concreto afetados. Lukschová (2009), utilizou MEV entre outras técnicas, para avaliar a potencialidade de determinados agregados, frente a reação álcali sílica, em concretos.

Em análise por microscopia eletrônica de varredura realizados em concretos

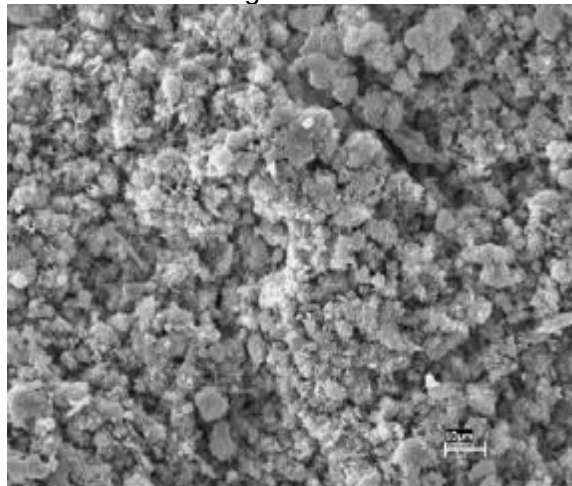
afetados pela reação álcali agregado, apresentados por Hasparyk (2005), foi possível visualizar o gel exsudado preenchendo os poros do concreto com aspecto predominantemente maciço e gretado, com coloração escura, conforme ilustrado na Figura 3. Foram detectados também, produtos cristalizados de natureza sílico-cálcico e potássico, disperso na argamassa e nos poros com coloração esbranquiçada, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 3: Gel maciço e gretado.



Fonte: (HASPARYK, 2005).

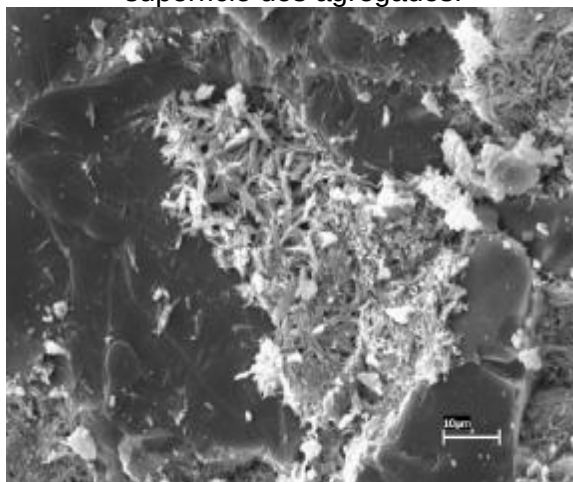
Figura 4: Produtos cristalizados sobre a argamassa.



Fonte: (HASPARYK, 2005).

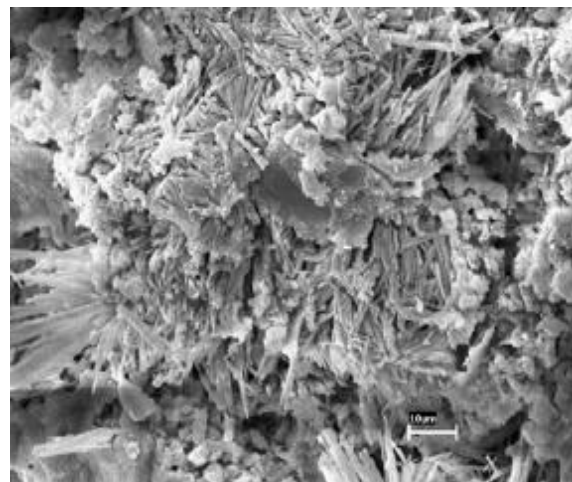
Ainda, conforme Hasparyk (2005), também foram visualizados produtos cristalizados depositados sobre a superfície dos agregados e etringita dispersa na argamassa com coloração essencialmente esbranquiçada, Figuras 5 e 6.

Figura 5: Produtos cristalizados sobre a superfície dos agregados.



Fonte: (HASPARYK, 2005).

Figura 6: Etringita dispersa na argamassa.

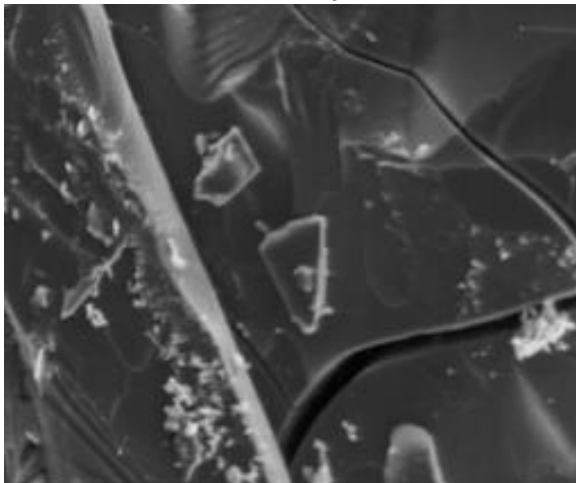


Fonte: (HASPARYK, 2005).

Segundo Marfil e Maiza (2001), ao avaliar amostras obtidas de pavimentos deteriorados devido a ocorrência da reação álcali-sílica, foi observado basicamente dois tipos de materiais resultantes da reação álcali agregado.

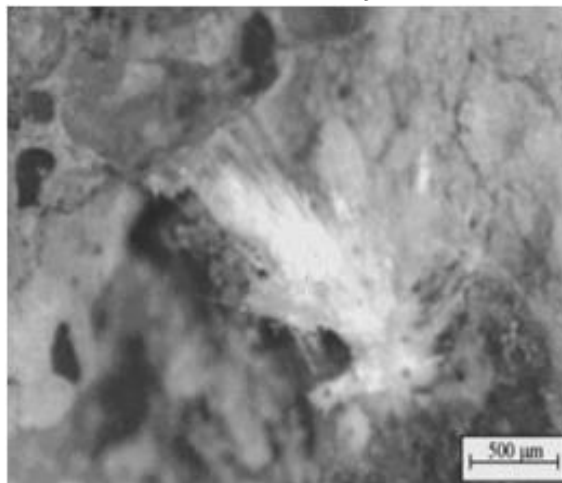
O primeiro de aspecto maciço, duro e opaco e o segundo de aspecto branco brilhante, macio e fibroso associado com cristais de etringita, conforme ilustrado nas Figuras 7 e 8.

Figura 7: Material maciço, duro e opaco.



Fonte: (MARFIL et al., 2001).

Figura 8: Material maciço e fibroso.

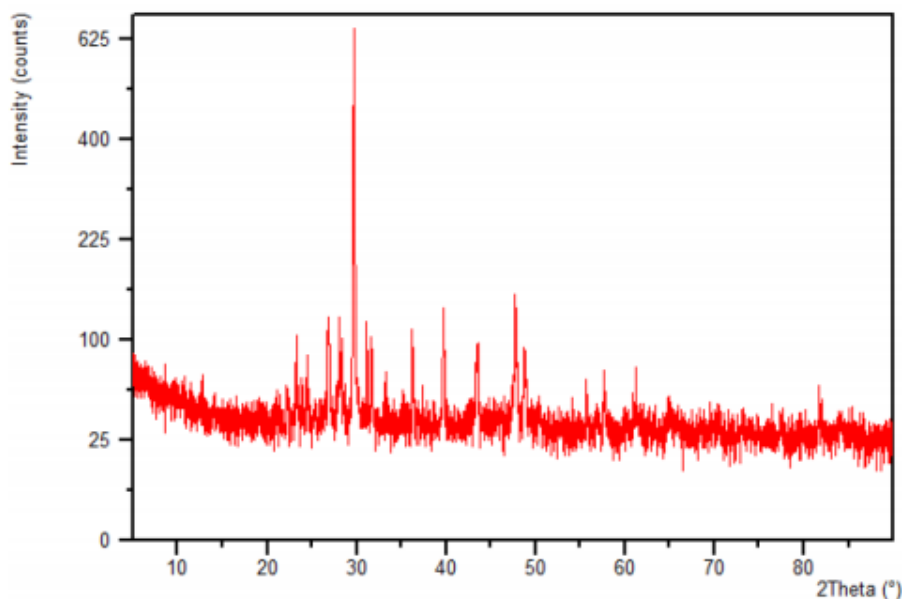


Fonte: (MARFIL et al., 2001).

Outra técnica muito utilizada na identificação da RAS é a Difratometria de raios X, que serve para determinar as fases cristalinas presentes nos materiais, identificar informações sobre a estrutura e estado dos materiais (DAL MOLIN, 2010).

Pires (2009) realizou difratometria de raios X (DRX) em amostras do gel exsudado, e constatou que o material é formado por uma mistura de fases aluminato, silicato de cálcio, silicato de sódio e carbonato de cálcio em menor proporção, sendo difícil atribuir ao difratograma uma ou outra fase química específica, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9: Difratometria de raios X da amostra de gel coletado.



Fonte: (PIRES, 2009).

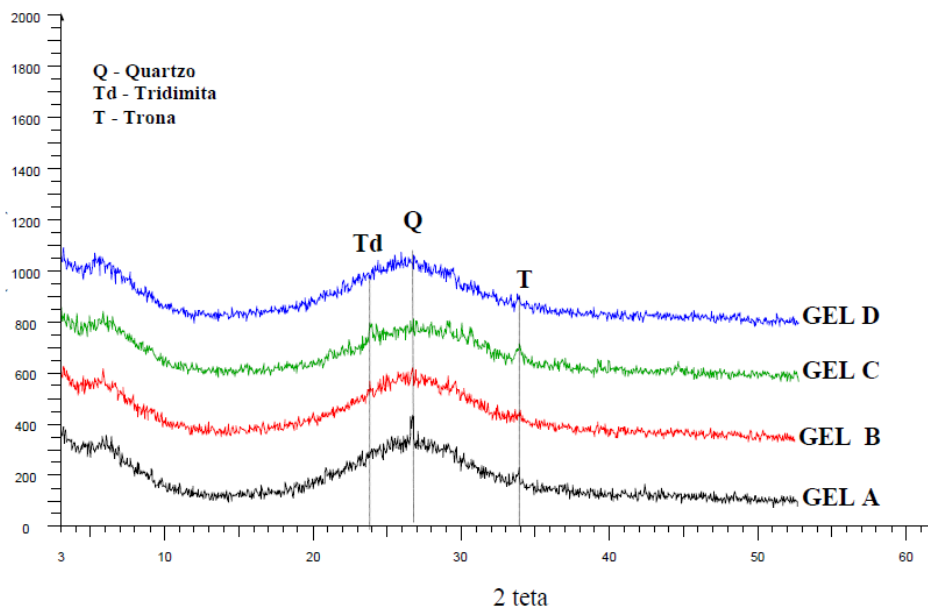
Pereira (2012), ao analisar amostras de vidro silicatos de lítio por DRX, constatou que o material não apresenta picos bem definidos, típico de estruturas amorfas.

Hasparyk (2005), ao realizar difratometria de raio X em amostras de gel puro, constatou que ocorre forte reflexão em 2 teta aproximadamente 26°, típico de silicatos amorfos.

Ainda segundo Hasparyk (2005), foi possível identificar alguns picos de difração que confirmam alguma fase cristalina associada a fase amorfa do gel. Na sua maioria, esses picos estão associados a uma fase rica em sódio (trona), representado pelo carbonato de sódio hidratado ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Outras fases menos expressivas, são identificadas como o quartzo e tridimita, conforme representado na Figura 10.

Figura 10: Difratoograma de raio X de amostras de géis puros.



Fonte: (HASPARYK, 2005)

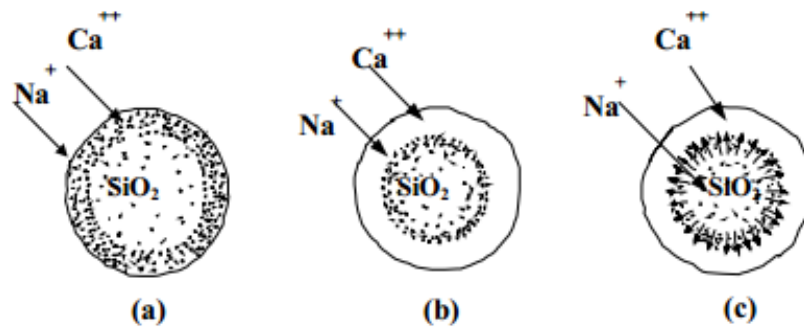
Em termos de mensuração, estudos da combinação agregado e pasta, podem ser realizados segundo a norma americana (ASTM C-1260), na qual, o método tem o objetivo investigar a RAA por meio da avaliação da variação do comprimento de barras de argamassas imersas em solução de hidróxido de sódio (NaOH), de concentração 1N, a uma temperatura de 80 °C. No Brasil, a ABNT NBR 15577-1:2008 estabelece os critérios e métodos para avaliar a reatividade potencial dos agregados.

Devido à composição do vidro, que é basicamente sílica no estado amorfo, existe a possibilidade de ocorrer a reação álcali-agregado RAA, neste caso denominada reação álcali-sílica, consequência da reação química entre a sílica amorfa e os hidróxidos alcalinos constituintes do cimento Portland.

## 2.5.2 MECANISMO DE FORMAÇÃO E EXPANSÃO DA RAS

Segundo Paulon (1981), as fases de formação da reação álcali-sílica podem ser exemplificadas conforme a Figura 11:

Figura 11: Partícula de sílica reativa envolvida com pasta de cimento Portland.



Fonte: (PAULON, 1981)

**1º Fase:** Figura 3 (a) nota-se a partícula de sílica reativa circundada por íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{2+}$  contidos na pasta de cimento em solução básica.

O hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  conhecido como portlandita e denotado como (CH), é o maior responsável pelo meio alcalino. A portlandita é um dos produtos resultante da hidratação do cimento Portland. Algumas horas após a mistura do cimento Portland em água, produtos chamados hidratados precipitam, dentre os principais estão o silicato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio.

O silicato de cálcio hidratado (CSH) é um material semi-amorfo que tem a função de realizar a ligação primária do material, compreendendo cerca de 70% em massa do cimento hidratado. O hidróxido de cálcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  é cristalino e corresponde aproximadamente de 15 à 20% do cimento hidratado (KUTCHKO et al., 2007).

**2º Fase:** Figura 3 (b), devido à alta concentração de ( $\text{Ca}^{2+}$ ) na pasta, forma-se, a uma fina camada de um gel de cal-álcali-sílica de caráter não expansivo ao redor da sílica.

**3º Fase:** Figura 3 (c), os íons de cálcio e sódio penetram na membrana semipermeável, onde reagem com a sílica.

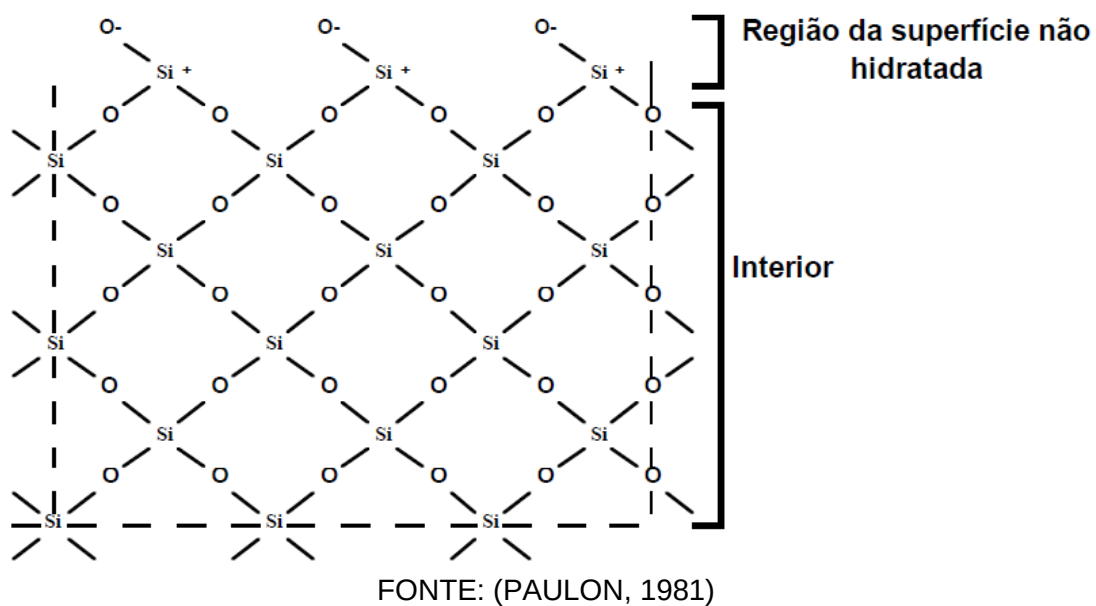
Segundo Paulon (1981), a reação será inócua se a concentração de cálcio for alta o suficiente para assegurar a contínua formação do gel não expansivo, já

que ocorre o consumo de álcalis durante a reação, havendo redução na concentração alcalina. Se a concentração de cálcio não for suficiente, os álcalis reagirão formando um gel de álcali-sílica, que em presença de água, se expandirá e ocasionará fissuras se as forças de expansão do gel forem superiores à resistência à tração da pasta de cimento.

Ainda conforme Paulon (1981), as reações químicas envolvidas na formação do gel sílico-alcalino podem ser ilustradas conforme as Figuras 12 e 13:

A sílica não hidratada é constituída por unidades tetraédricas ( $\text{SiO}_4^{4-}$ ) formando uma estrutura tridimensional através de pontes de (Si-O-Si), e pode ser representada na forma plana conforme a Figura 12.

Figura 12: Partícula de sílica não hidratada.



No interior da sílica, as cargas entre íons ( $\text{Si}^{4+}$ ) e ( $\text{O}^{2-}$ ) estão equilibradas, o que não ocorre na superfície. Na superfície há um déficit de cargas, pois o íon oxigênio está ligado a um único íon de silício, e o íon de silício é ligado a apenas três íons de oxigênio.

Quando ocorre a hidratação da superfície, os íons hidroxilas, provenientes da água, ligam-se ao íon positivo de silício, e o íon positivo ( $\text{H}^+$ ) entra em contato com o íon negativo do oxigênio como ilustra a Figura 13. O que ocorre

inicialmente é uma despolarização da sílica pela hidratação da água.

Em meio alcalino, os íons  $H^+$  presentes na estrutura da sílica reativa, são deslocados pelos íons ( $Na^+$ ), formando uma solução de sílica constituída de cargas negativas e cátions. O balanceamento da equação pelos íons alcalinos forma o gel de natureza sílico-alcalino, conforme descrito pela equação 3.

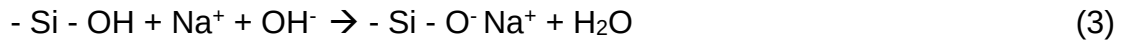
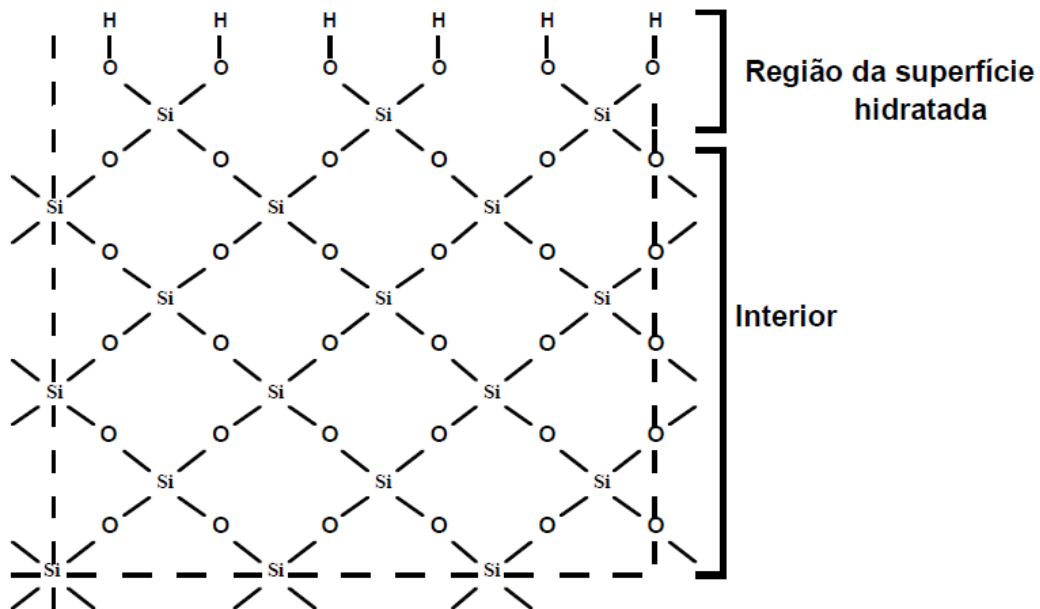


Figura 13: Partícula de sílica hidratada.

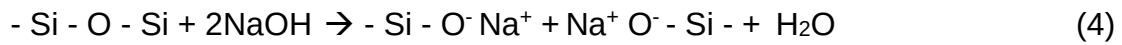


FONTE: (PAULON, 1981)

Devido à composição do vidro natural, que é basicamente sílica no estado amorfo, a estrutura desordenada, aumenta a quantidade de superfícies expostas sem equilíbrio de cargas, o que consequentemente aumenta a suscetibilidade do material à reação (BURIN, 2009; FLORINDO, 2009).

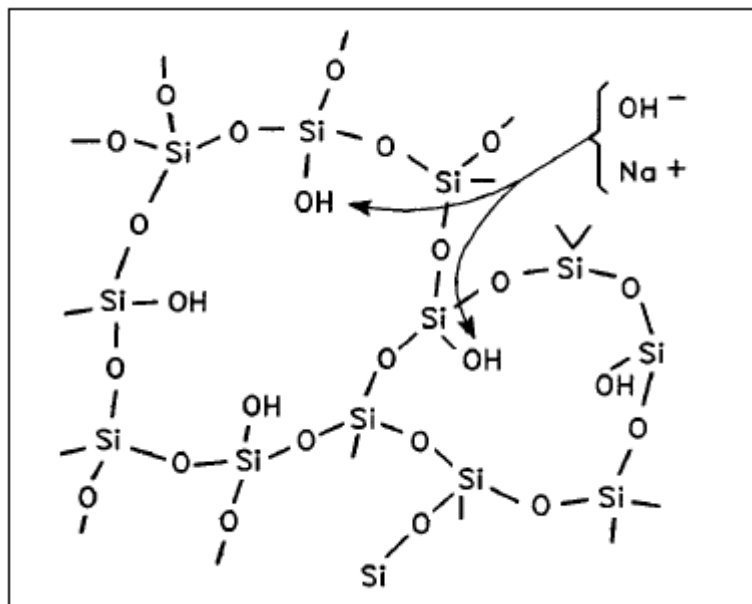
O excesso de  $Na(OH)$ , ataca as ligações mais internas da sílica, os grupos

siloxano (Si-O-Si), de acordo com a equação expressa na equação 4.



Glasser e Kataoka (1981) entre outros pesquisadores tais como Turriziani (1986) e Hasparyk (2005), descrevem o mecanismo que explica este tipo de reação como sendo uma reação do tipo ácido-base. No seu primeiro estágio de formação o grupo Silanol (Si-OH), presente na superfície da sílica é atacado pelos íons hidroxilas ( $\text{OH}^-$ ), liberando água, conforme ilustra a Figura 14.

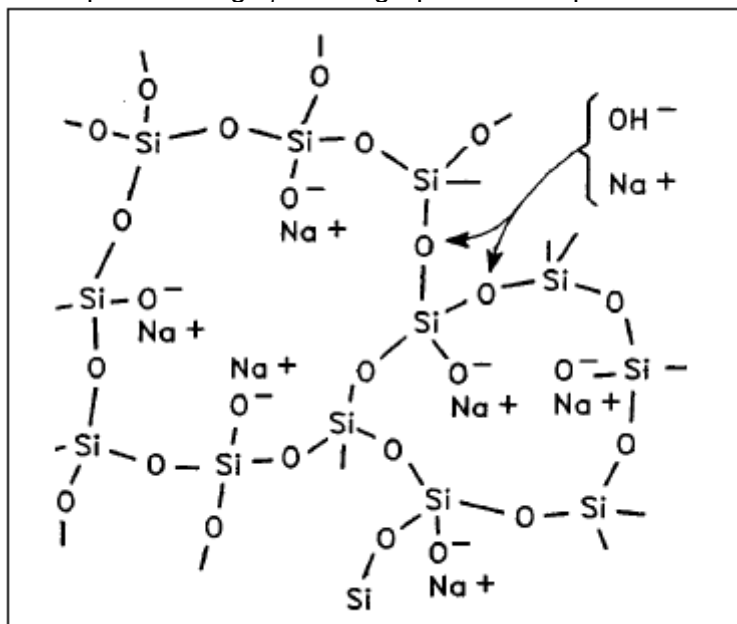
Figura 14: Ataque dos íons  $\text{OH}^-$  ao grupo Silanol.



FONTE: (TURRIZIANI, 1986; HAPARYK, 2005)

Posteriormente na etapa seguinte, representada na Figura 15, ocorre ataque dos íons hidroxilas ao grupo siloxano (Si-O-Si), gerando os monômeros silicatos, que permite a absorção de água e de íons alcalinos, resultando em expansão e fissuração (HASPARYK, 2005).

Figura 15: Ruptura das ligações do grupo siloxano pelos íons hidroxilas.



FONTE: (TURRIZIANI, 1986; HAPARYK, 2005)

O gel sílico-alcálico é muito reativo na superfície, sendo que dependendo das condições do meio, pode absorver água e aumentar de volume (POOLE, 1992; FLORINDO, 2009).

Entre as primeiras teorias formuladas para explicar o mecanismo de expansão da reação álcali sílica, destaca-se a primeira teoria elaborada por Hansen em 1944, a teoria da pressão osmótica.

Segundo esta teoria, hipoteticamente, os produtos da reação ficam confinados dentro de uma membrana semipermeável da pasta de cimento os quais, devido a pressões hidráulicas, causam expansões na estrutura interna do concreto (PAULON, 1981).

Segundo Prezzi et al. (1997), é possível explicar melhor as variações volumétricas causadas pela RAA a partir dos conceitos básicos da química de superfície. As expansões causadas pelo inchamento do gel são atribuídas as forças de repulsão da dupla camada elétrica.

Géis de sílica são formados por partículas extremamente pequenas que se comportam como um sistema coloidal. Segundo os pesquisadores, quando a

fase sólida (superfície da sílica) entra em contato com a fase líquida (solução dos poros do concreto) a superfície do sólido fica com excesso de carga e a interface eletrificada. Este excesso de carga altera as propriedades das duas fases (PREZZI et al.,1997; HASPARYK, 2005).

Na superfície da sílica, desenvolve-se uma dupla camada elétrica de cátions para neutralizar as cargas negativas, sendo essas essencialmente cargas compostas por íons positivos de cálcio, sódio e potássio. Nos locais onde o oxigênio possui ligações incompletas na superfície da sílica amorfa, os íons alcalinos serão adsorvidos através de forças eletrostáticas (PREZZI et al.,1997; SILVA, 2007).

As cargas negativas na superfície das partículas atraem os cátions e repelem os ânions. O campo elétrico criado, o excesso localizado de cátions e a deficiência de ânions se combinam e cria uma força elétrica que interfere na espessura da dupla camada (Prezzi et al., 1997; HASPARYK, 2005).

Segundo Mitchell (1992), a quantidade de cátions na superfície da partícula é proporcional ao (pH) do meio. A temperatura é outro fator que interfere na expansão, sendo que quanto maior, maior a espessura da camada.

### **2.5.3 MEDIDAS MITIGADORAS PARA EVITAR A OCORRÊNCIA DA RAS**

No intuito de minimizar e evitar a possível formação e expansão do gel sílico-alcalino, ao utilizar resíduo de vidro como agregados em misturas cimentícias, são apresentadas algumas medidas mitigadoras para evitar a ocorrência da reação álcali-sílica.

Segundo Purnell et al. (2000), quando são adicionadas fibras de vidro na matriz de cimento Portland estas sofrem degradação das propriedades físicas com o passar do tempo devido ao ataque do meio alcalino da matriz de cimento Portland. Este ataque afeta principalmente a tenacidade, diminuindo

progressivamente sua flexibilidade, tornando o compósito frágil. Segundo Purnell et al. (2000), essa baixa durabilidade das fibras de vidro convencionais em matrizes de cimento Portland é geralmente atribuída a um ou mais destes mecanismos:

- Corrosão das fibras pelo hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido na hidratação do cimento Portland;
- Precipitação dos produtos da hidratação, especialmente do  $\text{Ca(OH)}_2$ ;
- Densificação da matriz na interfase reduzindo a flexibilidade das fibras.

Para contornar a degradação das fibras de vidro, Purnell et al. (2000) citam as seguintes possibilidades:

- Utilizar cimentos de baixa alcalinidade, como cimento pozolânico;
- Adicionar sílica ativa, cinza volante, metacaulinita e outras adições minerais, que tem por objetivo baixar o pH da solução dos poros e reduzir o teor de hidróxido de cálcio.

Para minimizar a formação de  $\text{Ca(OH)}_2$  na hidratação dos componentes do cimento pode-se fazer o uso de polímeros na argamassa, pois segundo Bijen (1993), o polímero diminui o espaço disponível dentro da pasta de cimento para o transporte dos íons pela água contida nos poros.

Afridi et al. (1989) consideram que a modificação por meio de látex diminui a formação de  $\text{Ca(OH)}_2$ , possivelmente devido a absorção de  $\text{Ca(OH)}_2$  nos filmes de polímeros, os quais diminuem a quantidade de íons e o espaço disponível entre os grãos hidratados de cimento, dificultando o transporte de íons através dos poros e capilares.

A utilização de cimentos contendo escória granulada de alto forno ou pozolana, é uma maneira de se diminuir a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  na matriz da argamassa, pois essa escória moída e adicionada ao cimento Portland substitui parte do clínquer no cimento e conseqüentemente diminui a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido. Já a pozolana reage na presença de água e à temperatura normal,

com o hidróxido de cálcio.

Segundo Hasparyk (1999), no que diz respeito as medidas preventivas que podem ser adotadas com o objetivo de evitar a formação da reação álcali-agregado e consequentemente seus efeitos danosos às estruturas de concreto, destacam-se:

- O estudo preliminar da rocha ou agregado a serem empregados na obra,
- A caracterização química do cimento a ser empregados na obra;
- Realização de ensaios em laboratório para verificar a reatividade da combinação agregado- pasta;
- Emprego de adições minerais.

# **CAPÍTULO 3**

## **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **3.1 Metodologia**

Com base nos resultados apresentados por Guimarães e Motta (2014) e em concordância com os objetivos propostos nesta pesquisa, implementou-se a metodologia baseada em programa experimental.

O programa experimental foi dividido inicialmente na coleta e produção do resíduo de vidro, com posterior caracterização dos materiais constituintes e produção das amostras. Posteriormente foram realizados os ensaios de caracterização.

Neste intento, foram confeccionadas placas de pisos com resíduo de vidro e agregado natural de forma que os resultados, tratados em termos comparativos, pudessem fornecer informações a respeito do desempenho mecânico e físico e também avaliar a durabilidade do piso proposto.

Para isso as amostras produzidas foram submetidas à ensaio de abrasão profunda, ensaio de flexão, absorção de água e análise de microscopia eletrônica de varredura. Para complementar a avaliação da durabilidade as amostras produzidas foram submetidas à ensaio acelerado para verificar a ocorrência de reações deletérias dos álcalis do cimento com a sílica do vidro. Os ensaios foram realizados nas idades de 28 e 180 dias.

Foram produzidas 126 placas para os ensaios, sendo 90 nas dimensões 10x10x1 cm<sup>3</sup> utilizadas nos ensaios de abrasão profunda, absorção de água,

microscopia eletrônica de varredura e ensaio acelerado. Foram confeccionadas mais 36 placas para determinação da resistência à flexão, produzidas nas dimensões 20x30x1 cm<sup>3</sup>.

Para a realização de todos os ensaios a quantidade de amostras utilizadas para cada idade foi calculada pelo método de análise de variância (ANOVA). Considerou aceitável o erro quando o número de graus de liberdade encontrado foi maior que 11 (VIEIRA, 2006).

Formulações: 3 (tipos de amostras) – 1 = 2 graus de liberdade;

Total de unidades amostrais: 3 (tipos de amostras) x 5 (repetições para cada tipo de ensaio) = 15 graus de liberdade;

Erro: 15 – 2 = 13 graus de liberdade.

Sendo o número de graus de liberdade do erro maior do que 11, conclui-se que 5 repetições é uma quantidade satisfatória para os ensaios de absorção de água, abrasão profunda e flexão.

Foi aplicado o teste de Chauvenet, nos ensaios de absorção de água, abrasão profunda e flexão, os resultados obtidos estão representados no anexo A.

A tabela 1 lista os valores da razão dos desvios em relação aos desvios aceitáveis para vários valores de “n”, sendo ( $d_{m\acute{a}x}$ ) o maior desvio aceitável (VIANNA, 2011).

Tabela 1: Critério de Chauvenet.

| <b>Número de amostras</b> | <b>Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão</b> |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>n</b>                  | <b><math>d_{\max} / \sigma</math></b>                          |
| 3                         | 1,38                                                           |
| 4                         | 1,54                                                           |
| 5                         | 1,65                                                           |
| 6                         | 1,73                                                           |
| 7                         | 1,8                                                            |
| 10                        | 1,96                                                           |
| 15                        | 2,13                                                           |
| 25                        | 2,33                                                           |
| 50                        | 2,57                                                           |
| 100                       | 2,81                                                           |
| 300                       | 3,14                                                           |
| 500                       | 3,29                                                           |
| 1000                      | 3,48                                                           |

Fonte: Adaptado, Vianna (2011).

O critério de Chauvenet determina que um valor obtido pode ser rejeitado se a probabilidade de obter um valor igual ao dado observado em “n” medições for inferior à  $(1/2n)$ . Portanto, segundo o critério de Chauvenet, a razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão para 5 amostras é 1,65.

Para critério comparativo entre as médias obtidas nos ensaios realizados, foi aplicado o teste T de Student nos ensaios de absorção, abrasão profunda e flexão, conforme Montgomery et al. (2003).

A confecção das amostras seguiu os mesmos métodos tradicionais de produção dos pisos de Granitina.

## 3.2 Materiais

### 3.2.1 AGLOMERANTE

Foram utilizados dois tipos de cimentos para confecção das amostras de resíduo de vidro, o cimento (CPII F40) e o cimento (CPIV 32), considerando a possibilidade de ocorrência da reação álcali sílica e suas possíveis

consequências nas propriedades físicas e mecânicas do material.

A adoção do cimento CPIV 32 foi exclusivamente para minimizar os efeitos da reação álcali sílica devido a possibilidade de ocorrência da reação pozolânica diminuindo, portanto, a quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  disponível na pasta. Já o uso do cimento CII F40 se deve ao fato de ser um cimento com adição mineral inerte, o fíler calcário, para avaliar a potencialidade de ocorrência da reação álcali sílica, já que o resíduo de vidro constitui-se um possível agregado reativo.

### **3.2.2 RESÍDUO DE VIDRO**

Foram utilizados resíduos de vidro, referente a diversos tipos, tais como, espelho, vidro verde claro, vidro transparente, vidro fosco, e outros tipos de colorações menos encontradas. Não foram utilizados vidros aramados, temperados etc. Todo o resíduo fora obtido em vidraçarias sendo submetido a moagem e peneiramento para obtenção do agregado na granulometria adequada.

### **3.2.3 AGREGADO NATURAL**

O agregado de Granitina utilizado para a confecção das amostras utilizadas como referência, foi a Granitina branca, comercialmente conhecida como Granitina 0, que possui grãos de aproximadamente 2,8 mm de diâmetro com distribuição uniforme. É um agregado proveniente da britagem do mármore branco. Neste trabalho, o agregado de Granitina foi tratado como agregado natural.

O agregado natural utilizado foi fornecido pela empresa Cibasa pré moldados e pisos, situada na cidade de Uberlândia (MG). A empresa é especializada na produção de pré moldados e pisos de Granitina.

## 3.3 Procedimento Experimental

### 3.3.1 OBTENÇÃO E PREPARO DO RESÍDUO DE VIDRO

A coleta do resíduo de vidro foi realizada durante o final do mês de junho e início do mês de julho de 2014 nas vidraçarias Metal Vidros Comercial Ltda e Souza Vidros Glass Comércio Ltda, situadas próximas à Universidade Federal de Uberlândia, Campus Santa Mônica. Foram realizadas três coletas em um intervalo de três semanas, o que gerou cerca de 120 kg de resíduo de vidro. Figura 16 ilustra o material obtido ao final das coletas.

Figura 16: Vidro obtido nas coletas.



Fonte: Autor (2014).

Inicialmente, todo material recolhido foi lavado e seco, sendo removidas as impurezas presente no material, capaz de alterar a composição do resíduo de vidro ou eventualmente interferir no desempenho do resíduo na matriz de cimento Portland.

A redução do vidro à granulometria desejada foi realizada em máquina de abrasão Los Angeles. Seu funcionamento consiste, basicamente, em um sistema que gira um tambor (construído em aço reforçado) no qual a transmissão é dada por um motor elétrico. A amostra foi colocada dentro do tambor juntamente com as esferas de aço e submetidas a rotações em velocidade

constante.

A adoção da máquina de abrasão Los Angeles foi exclusivamente para a redução do tamanho dos grãos de vidro à granulometria específica, já que o equipamento é utilizado essencialmente para medir o desgaste de agregados graúdos.

Na Figura 17 ilustra a máquina de abrasão Los Angeles utilizada na moagem do resíduo de vidro.

Figura 17: Máquina de Abrasão Los Angeles.



Fonte: Autor (2014).

Tendo em vista os resultados obtidos por Guimarães e Motta (2014), adotou-se para este estudo a faixa de granulometria de 2,4 à 6,3 mm no intuito de obter a melhor compacidade possível e melhor desempenho mecânico do material.

Antes de iniciar a moagem, fixou-se a quantidade de esferas igual a 12 sendo adicionados inicialmente à máquina de Abrasão Los Angeles cerca de 30 kg de resíduo de vidro. O tempo de moagem utilizado foi de 30 minutos.

O tempo, a quantidade de material e quantidade de esferas utilizadas no ensaio foram adotados durante o ensaio. O objetivo foi inferir aos 30 quilos de material introduzidos na máquina um tempo suficiente, capaz de triturar todo material com as 12 esferas disponíveis, mas também no intuito principal de gerar uma

quantidade mínima de desperdício de material com melhor aproveitamento possível.

Ao final de cada peneiramento, todo material acima de 6,3 mm foi retornado à máquina de Abrasão Los Angeles e abaixo da faixa de 2,4 mm foi descartado.

A obtenção do resíduo de vidro nas vidraçarias não gerou nenhum custo à pesquisa já que todo material obtido seria, segundo os proprietários dos estabelecimentos, descartado no aterro sanitário local da cidade de Uberlândia.

### **3.3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS UTILIZADOS**

#### **Massa específica do agregado natural e do resíduo de vidro**

Após obtenção do resíduo de vidro na granulometria especificada, foram realizados os ensaios de massa específica e massa unitária dos resíduos de vidro e do agregado natural sendo posteriormente calculado o índice de vazios dos dois materiais.

Os ensaios de massa específica do resíduo de vidro e do agregado natural foram determinados utilizando o frasco de Chapman.

Os equipamentos utilizados para o ensaio foram:

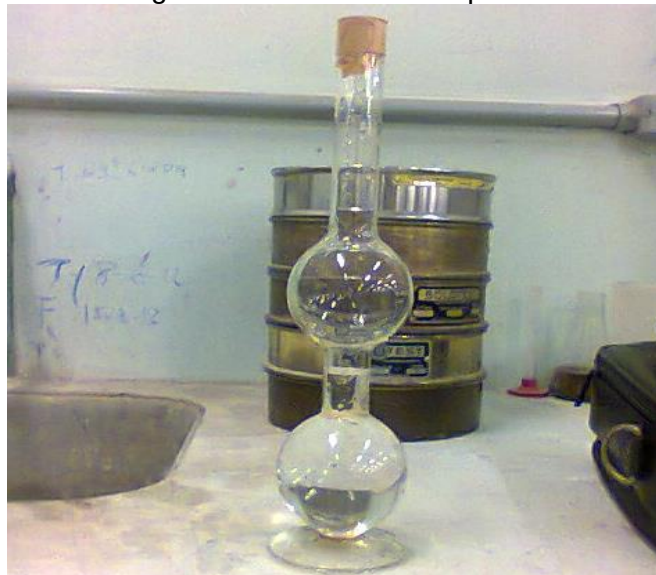
- Estufa capaz de manter a temperatura em  $105 \pm 5$  °C;
- Balança com precisão de 0,001 g;
- Frasco de Chapman;
- Funil metálico

Inicialmente cerca de 1 kg de resíduo de vidro e agregado natural foram secos em estufa em temperatura de aproximadamente 110 °C até massa constante,

sendo posteriormente resfriados em temperatura ambiente;

Mediram-se 500 g de cada material separadamente. Em seguida adicionou-se ao frasco Chapman água até atingir a marca de 200 cm<sup>3</sup>, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18: Frasco de Chapman.



Fonte: Autor (2014).

Para cada amostra, foram introduzidos 500 g de material dentro do frasco, com uso de um funil metálico.

Cuidadosamente, em movimentos circulares, agitou-se o frasco para a eliminação das bolhas de ar presentes no interior do recipiente e realizou-se a leitura final do nível da água. As massas específicas dos dois materiais foram determinadas conforme a equação 5.

$$\rho = \frac{500}{L - 200} \quad (5)$$

Onde:

$\rho$  = Massa específica do agregado miúdo; em g/cm<sup>3</sup>;

L= Leitura final do nível da água (volume ocupado pelo conjunto água-agregado).

### **Massa unitária e cálculo do volume de vazios**

A massa específica aparente ou massa unitária é definida como sendo a relação entre a massa das partículas de um agregado contido em um recipiente e o volume desse recipiente, incluindo os vazios entre os grãos (ABNT NBR NM 45: 2006).

Os ensaios de massa unitária do resíduo de vidro e da Granitina no estado solto e cálculo do volume de vazios, foram determinados conforme a ABNT NBR NM 45:2006. Foram realizadas três determinações de massa unitária para cada amostra.

## **3.3.3 PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS**

### **Produção das amostras para os ensaios**

A produção das amostras para os ensaios, seguiram em geral, os mesmos procedimentos adotados por Guimarães e Motta (2014).

Três tipos de formulações foram produzidos para análises. Inicialmente foram produzidas 30 placas de resíduo de vidro com cimento CPIV 32, 30 placas de resíduo de vidro com cimento CII F40 e 30 placas com o agregado natural com cimento CII F40, nas dimensões 10x10x1 cm<sup>3</sup>.

Em seguida foram confeccionadas mais 36 placas nas dimensões 20x30x1 cm<sup>3</sup> sendo 12 placas de resíduo de vidro com cimento CPIV 32, 12 placas de resíduo

de vidro com cimento CII F40 e 12 placas com o agregado natural com cimento CII F40.

Dentre cada série de 30 placas 10x10x1cm<sup>3</sup>, aleatoriamente foram selecionadas, 3 placas utilizadas no ensaio de absorção de água, 10 placas para serem utilizadas no ensaio de abrasão profunda, 2 placas para serem utilizadas na análise de microscopia eletrônica de varredura e 3 placas para serem utilizadas no ensaio acelerado.

Para o ensaio de flexão foram selecionados aleatoriamente, dentre as 12 placas de cada formulação, 10 placas ensaiadas na idade de 28 e 180 dias.

A produção das amostras seguiu as etapas descritas a seguir:

### **Etapas 1: Determinação das quantidades utilizadas em cada formulação**

A dosagem utilizada para a produção das placas foi fixada em 1:1,5 (cimento: agregado natural), dosagem em volume aparente, usualmente utilizada na confecção de pisos de granitina.

Tendo em vista, os resultados obtidos em 4.1, sendo o índice de vazios do resíduo de vidro maior que o agregado natural, foi realizada uma correção do volume utilizado na mistura. Neste caso, manteve-se o volume real dos agregados constante entre as placas produzidas com resíduo de vidro e com o agregado natural.

A relação água cimento utilizada foi de 0,4. Todas as quantidades dos materiais foram majoradas em 30% para considerar as eventuais perdas na confecção das amostras.

A tabela 2, representa as quantidades de materiais utilizados para produção das amostras.

Tabela 2: Consumo de materiais.

| Formulações                                   | Consumo de materiais por m <sup>3</sup> |               |          | Traço em massa |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|---------------|----------|----------------|
|                                               | Aglomerante (kg)                        | Agregado (kg) | Água (L) |                |
| <i>Placas produzidas com agregado natural</i> | 1019                                    | 1729          | 392      | 1 : 1,7 : 0,4  |
| <i>Placas produzidas com resíduo de vidro</i> | 1019                                    | 1521          | 392      | 1 : 1,5 : 0,4  |

Fonte: Autor (2014).

## Etapa 2: Preparo, moldagem, adensamento e cura

O preparo da argamassa foi realizado em misturador mecânico, argamassadeira com capacidade de 18 litros, sendo todo o processo padronizado e cronometrado seguindo os procedimentos da ABNT NBR 7215:1997.

O uso da ABNT NBR 7215:1997 e os procedimentos adotados, foram exclusivamente para padronizar o processo de mistura, mantendo-se a mesma condição de preparo das argamassas produzidas com o resíduo de vidro e agregado natural.

Para a moldagem das placas nas dimensões requeridas foram confeccionadas fôrmas de madeira que serviram de molde para a produção das amostras 10x10x1 cm<sup>3</sup> e 20x30x1 cm<sup>3</sup>.

Foram utilizados madeira compensada, uma serra elétrica para efetuar os cortes necessários e pregos para a fixação das ripas. A Figura 19, ilustra a fôrma utilizada para moldagem das placas 10x10x1 cm<sup>3</sup>.

Foi utilizado um desmoldante, para facilitar a desforma e consequentemente remoção das placas dos moldes. A aplicação do desmoldante foi realizada com pincel de pintura em duas demãos no intervalo de 1 h, conforme especificações do fabricante.

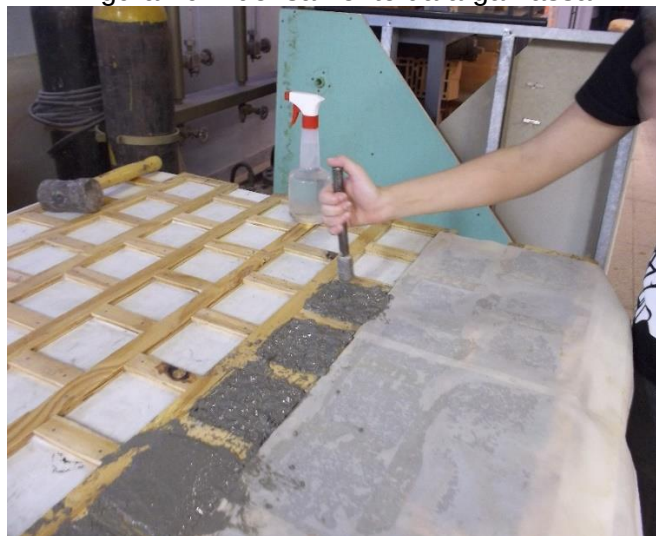
Figura 19: Formas para confecção das placas 10x10x1cm.



Fonte: Autor (2014).

A moldagem das placas foi realizada imediatamente após o preparo da argamassa. O adensamento da argamassa foi realizado com soquete de compactação de massa 340 gramas, com superfície de compactação circular de 25 mm de diâmetro, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20: Adensamento da argamassa.



Fonte: Autor (2014).

No intuito de distribuir uma quantidade de golpes suficiente para adensar toda a superfície das placas, as amostras 10x10x1 cm<sup>3</sup> foram adensadas, cada uma, com 12 golpes. Já as placas 20x30x1 cm<sup>3</sup> foram adensadas cada uma com 72

golpes.

A desmoldagem das placas foi realizada 48 h após a moldagem. A cura das amostras nas primeiras 48 h foi realizada por meio da umidificação superficial das amostras com água e papel toalha para manter a condição saturada. Após desmoldagem, a cura foi realizada por imersão em água em temperatura ambiente durante os primeiros 28 dias.

### **Etapas 3: Polimento e acabamento final**

O polimento ou desbaste superficial das amostras foi realizado com uma esmerilhadeira usada essencialmente no corte e desbaste de elementos metálicos em serralheria e metalurgia. Ao invés de um disco de corte foi acoplado um adaptador com o tipo de lixa específica, que permitiu o desbaste superficial ao invés do corte. Essa adaptação foi utilizada para polir as amostras e realizar um polimento semelhante aos dos pisos de Granitina.

O polimento das amostras foi realizado em duas fases, sendo que no intervalo entre cada polimento foi feito a “estucagem”. A “estucagem”, termo utilizado frequentemente nas marmorarias e empresas especializadas em pisos de Granitina, consiste no preenchimento dos vazios e irregularidades que eventualmente surgem após o primeiro polimento.

O primeiro polimento, denominado polimento grosso, foi realizado com a lixa de ferro (P36), sendo posteriormente utilizado a lixa de ferro (P60), para o polimento fino.

A “estucagem” foi feita com régua metálica, sendo o preenchimento dos vazios realizado com o mesmo cimento utilizado na confecção das amostras, mantendo-se a relação água cimento igual a 0,4.

Um dia após a “estucagem”, foi refeito o polimento fino e finalizada a etapa de polimento superficial das amostras. A Figura 21 ilustra o processo de polimento superficial realizado nas amostras.

Figura 21: Polimento superficial.



Fonte: Autor (2014).

Em seguida foi realizado o acabamento lateral das amostras. Nesta etapa, foi confeccionado uma máquina constituída de motor e disco giratório que permitiu remover principalmente as rebarbas e imperfeições que eventualmente permaneceram após desforma.

A Figura 22, ilustra o procedimento de desbaste lateral das placas bem como a máquina utilizada.

Figura 22: Acabamento lateral



Fonte: Autor (2014).

Após o polimento superficial e desbaste lateral foram preparadas as superfícies das amostras para receber o selador e a cera definitiva. Foi utilizado nas amostras um selador e cera de base acrílica. As etapas utilizadas para aplicação do selador na superfície das amostras, foram:

Primeiramente as amostras foram lavadas em água corrente e removido qualquer sujidade presente na superfície, sendo posteriormente secas em temperatura ambiente;

Em seguida, aplicou-se a primeira camada de selador com rolo de pintura de espuma levemente umedecido, sendo aplicado na superfície das placas em movimentos leves e uniformes;

Após 30 min aplicou-se a segunda camada deixando secar por mais 60 min. A cera foi aplicada após o selador. A Figura 23, representa a aplicação final da cera nas amostras.

Figura 23: Aplicação da cera.



Fonte: Autor (2014).

## Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com os procedimentos propostos no anexo B da ABNT NBR 13818:1997.

As amostras inicialmente  $10 \times 10 \times 1 \text{ cm}^3$  foram cortadas em placas menores para a realização do ensaio de absorção em placas  $5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ . Foram utilizados no total 10 placas de cada formulação. O ensaio de absorção de água foi realizado aos 28 e 180 dias de idade.

O corte das amostras foi realizado com serra disco em aparelho utilizado convencionalmente no corte de pedras de mármore e concreto. Todos os cortes foram realizados em água corrente para minimizar possíveis impactos durante o procedimento. A Figura 24, ilustra o corte de uma das amostras produzidas com resíduo de vidro.

Figura 24: Corte das amostras.



Fonte: Autor (2014).

Inicialmente, todas as amostras foram secas em estufa na temperatura de aproximadamente  $110 \text{ }^{\circ}\text{C}$  até atingir massa constante. Considerou que a amostra atingiu a condição seca, após registrar em um intervalo de 24 h, uma diferença menor que 0,1% entre sucessivas medidas.

Posteriormente as amostras foram mantidas no dessecador com sílica gel até atingir temperatura ambiente. Em seguida, registrou-se a massa  $m_1$  (massa seca) de todas as amostras.

Na sequência, as amostras foram imersas verticalmente em água destilada em processo de fervura, dispostas em uma base metálica em aço conforme representado na Figura 25.

Figura 25: Ensaio de absorção de água.



Fonte: Autor (2014).

O uso da base metálica em aço, teve como objetivo principal, manter a posição vertical das placas durante o ensaio além de garantir as distâncias exigidas no ensaio conforme o anexo B da ABNT NBR 13818:1997.

Durante as duas horas de ensaio, a água destilada foi mantida em condição de fervura e o nível da água mantido constante a uma altura de aproximadamente 5 cm da borda superior das placas.

Finalizada a etapa de fervura, as amostras foram removidas da água e colocadas em contato com água corrente em temperatura ambiente até atingir a condição de equilíbrio.

Com uma espuma ligeiramente úmida enxugou-se levemente a superfície dos corpos de prova, removendo o excesso de água. Posteriormente registrou-se a

massa  $M_2$  de todas as amostras. O cálculo da absorção das amostras foi realizado segundo a equação 6.

$$Abs = \left( \frac{M_2 - M_1}{M_1} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

Abs = Absorção de água das amostras, em porcentagem;

$M_1$  = Massa seca da amostra, expressa em gramas;

$M_2$  = Massa saturada da amostra, expressa em gramas.

### **Ensaio de abrasão profunda**

O ensaio de abrasão profunda foi realizado no Centro Cerâmico do Brasil (CCB), em Santa Gertrudes no Estado de São Paulo, conforme o disposto no anexo E da ABNT NBR 13818:1997.

Segundo a ABNT NBR 13818:1997 as amostras devem conter dimensões suficientes para permitir a realização do ensaio. Portanto, para o ensaio de abrasão profunda foram utilizadas 10 placas de cada formulação, sendo 5 destas placas avaliadas aos 28 dias de idade. As 5 restantes foram submetidas ao ensaio aos 180 dias de idade.

O medidor de abrasão utilizado no ensaio de abrasão profunda foi o Abrasímetro (CAP), equipamento dotado de um disco rotativo em aço, caixa de armazenamento do material abrasivo e suporte para acoplamento da amostra, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26: Abrasímetro CAP.



Fonte: Autor (2014).

Para medir o comprimento de cavidade foi utilizado um paquímetro com precisão de 0,01 mm. O material abrasivo utilizado para o ensaio foram grãos de alumina, grana F80. Foi incidido um fluxo de 100 g de alumina/100 rotações nas amostras a serem ensaiadas. O disco rotativo foi ajustado em  $75 \pm 5$  rpm.

O cálculo da resistência à abrasão profunda foi realizado conforme a equação 7, sendo expresso em volume de material removido por  $\text{mm}^3$ .

$$V = \left( \frac{(\pi \times \alpha)}{180} - \text{sen } \alpha \right) \cdot \left( \frac{(h \times d)}{8} \right) \quad (7)$$

Onde:

$V$  = Volume de material removido em  $\text{mm}^3$ ;

$\alpha$  = Ângulo correspondente ao centro do disco cavidade, sendo que:

$$\left(\frac{sen\alpha}{2}\right) = \left(\frac{C_{cav}}{d}\right)$$

$C_{cav}$  = Comprimento da cavidade em mm;

$d$  = Diâmetro do disco rotativo em mm.

## **Ensaio de flexão**

O ensaio de flexão das amostras foi realizado mediante aplicação de uma força uniformemente distribuída, aplicada a velocidade constante e transversalmente ao centro da face superior da placa, até a ruptura do material.

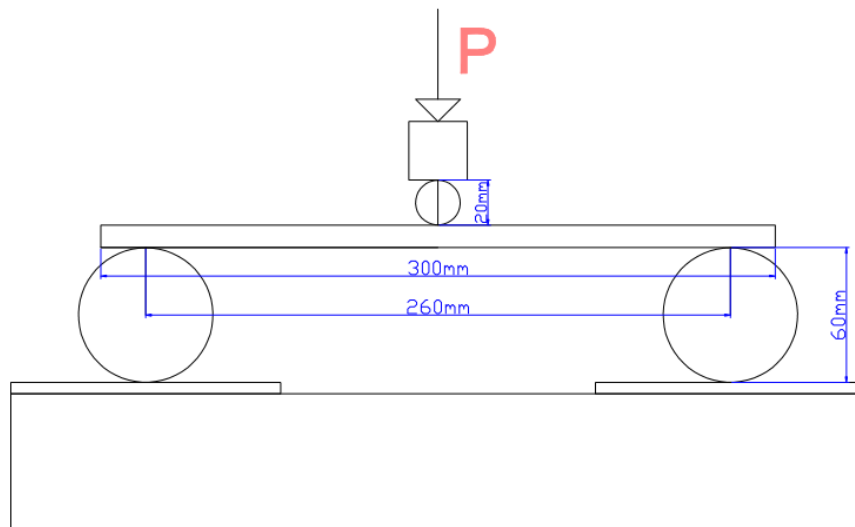
O ensaio teve por objetivo determinar a resistência à flexão das amostras produzidas com resíduo de vidro em termos comparativos às amostras produzidas com o agregado natural.

Neste intento, o ensaio foi realizado conforme os procedimentos do anexo E da ABNT NBR 15805:2010. Para a realização do ensaio foi utilizado a Máquina Universal de Ensaio (EMIC), modelo L 60000, com célula de carga de capacidade de 100 kN.

Foram utilizadas no total 10 placas de cada formulação, sendo 5 amostras avaliadas aos 28 dias de idade e as outras 5, aos 180 dias de idade.

Antes da realização do ensaio as amostras foram imersas em água à temperatura ambiente sendo mantidas nesta condição por 24 h. Em seguida posicionou-se a placa a ser ensaiada sobre as barras de apoio a uma distância entre centros de 260 mm, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27: Imagem ilustrativa do ensaio de Flexão.



Fonte: Autor (2015).

A amostra foi posicionada na máquina e a velocidade de carregamento ajustada para transmitir uma carga com velocidade constante de  $100 \pm 10$  N/s.

A resistência à flexão para as placas que obtiveram ruptura no plano médio, ou seja, na seção central do momento máximo, foi calculada conforme a equação 8, sendo expressa em MegaPascal.

$$f_t = \left( \frac{1,5 \cdot P \cdot L}{b \cdot t^2} \right) \quad (8)$$

Onde:

$f_t$  = Resistência à flexão expressa em Megapascal (MPa);

P = Carga aplicada no centro da placa, expressa em Newtons;

L = Distância entre apoios, expressa em milímetros;

b = Largura da placa ao longo da linha de fratura, expressa em milímetros;

t= espessura da placa, expressa em milímetros.

Para as amostras que obtiveram ruptura fora do plano médio ao longo do comprimento, a resistência foi determinada em função do momento fletor na seção de ruptura.

## **Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) teve o objetivo de identificar a microestrutura do material, a interface agregado-pasta e a possível formação do gel reativo proveniente de reação álcali sílica mediante o uso do resíduo de vidro.

O intuito foi realizar um comparativo entre as amostras produzidas com resíduo de vidro, no que se refere a possibilidade de ocorrência da reação álcali-sílica nas idades de 28 e 180 dias de idade, e comparar a microestrutura resultante nas amostras produzidas com resíduo de vidro com as amostras produzidas com agregado natural.

O ensaio foi realizado no laboratório de usinagem da engenharia mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi o TM 3000 de bancada, modelo Hitachi.

As amostras produzidas com resíduo de vidro foram submetidas à análise aos 28 dias e 180 dias de idade. As amostras produzidas com agregado natural foram submetidas apenas à análise aos 28 dias de idade.

Foram utilizadas amostras quadriculadas de 2 cm de lado, proveniente do corte de uma placa 10x10x1 cm<sup>3</sup>, referente a cada formulação. Os cortes foram efetuados em água corrente, com serra de disco em aparelho.

Todas as amostras receberam um tratamento superficial, tendo sua superfície polida com lixa de ferro grana 200. O intuito foi remover o selador e cera

aplicados anteriormente no acabamento e proporcionar uma superfície lisa e menos rugosa. Antes do ensaio as amostras foram limpas em equipamento ultrassônico em banho-maria Cole Parmer 8848, sendo imersas em acetona (P.A. - A.C.S) durante 5 minutos.

A Figura 28 representa a imagem da amostra extraída da placa produzida com resíduo de vidro e cimento CPIV 32 posicionada na câmara de vácuo do aparelho.

Figura 28: Porta amostra da câmara de vácuo do MEV.



Fonte: Autor (2015).

Todas as amostras produzidas com resíduo de vidro, tiveram sua superfície “mapeada” antes do ensaio de 28 dias para facilitar a identificação da área micrografada, bem como, à posterior localização da região aos 180 dias de idade.

## Ensaio acelerado

O ensaio acelerado nas placas produzidas com resíduo de vidro, foi realizado no intuito de identificar a potencialidade reativa das amostras produzidas com o resíduo, devido a ocorrência da reação álcali sílica. As amostras produzidas com cimento CII F40 e CPIV 32 foram submetidas ao método de ensaio acelerado conforme subitem 7 da ABNT NBR 15577- 4:2008.

O ensaio realizado foi uma adaptação aos objetivos da pesquisa, já que o método descrito na ABNT NBR 15577- 4:2008, destina-se a identificar variações em barras de argamassas confeccionadas com agregados e cimento padrão, no intuito de verificar a suscetibilidade desse agregado participar efetivamente da reação álcali sílica (ABNT NBR 15577- 4:2008).

Para a realização do ensaio acelerado foram utilizadas amostras quadriculadas de aproximadamente 2 cm de lado, extraídas das placas produzidas inicialmente nas dimensões 10x10x1 cm<sup>3</sup>, com disco em aparelho. Todas as amostras foram identificadas e “mapeadas”, para facilitar a identificação da região micrografada após o ensaio acelerado, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29: Fotografia utilizada para identificar a região micrografada.



Fonte: Autor (2015).

Para inspeção visual uma amostra nas dimensões 10x10x1 cm<sup>3</sup> também foi submetida ao ensaio acelerado.

Nesta etapa, as amostras foram imersas em solução alcalina na concentração de 1M de hidróxido de sódio (NaOH), permanecendo nesta condição a temperatura de 80 °C durante 30 dias.

Para proporcionar a total imersão e separação das amostras durante o ensaio, foi utilizado um dessecador para cada formulação.

Após completar os 30 dias de ensaio as amostras foram removidas da estufa e da solução de hidróxido de sódio sendo submetidas à análise visual e microscopia eletrônica de varredura.

## **Difratometria de raios X (DRX)**

O ensaio de difratometria de raios X (DRX) foi realizado com o objetivo de identificar as fases amorfas e cristalinas presentes nos materiais que eventualmente exsudaram após a realização do ensaio acelerado. O objetivo foi comprovar que os materiais formados possuem uma estrutura típica do gel sílico alcalino.

Para a realização do ensaio de difratometria, foi necessário inicialmente separar das soluções de hidróxido de sódio os materiais que supostamente formaram-se durante a realização do ensaio acelerado e que ficaram dissolvidos ou em suspensão na solução.

Portanto, foram gerados uma amostra de cada formulação, referente às amostras de resíduo de vidro produzidas com cimento CII F40 e resíduo de vidro produzidas com cimento CIV 32.

Para separar os materiais, as soluções foram inseridas em estufa à 110 °C, em Beckers separados com capacidade 1 litro, durante 10 dias, tempo suficiente para precipitar todo material contido na solução.

Posteriormente o material foi recolhido e pulverizado em almofariz de ágata com pistilo. As amostras foram analisadas em Difratômetro XRD-6000 marca Shimadzu, conforme ilustrado na Figura 30. A varredura foi realizada a  $2\theta$  variando de 5° a 90°, com velocidade 2°/min.

Figura 30: Equipamento de difratometria de raio X utilizado.



Fonte: Autor (2015).

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E ANÁLISES

#### 4.1 Massa específica, massa unitária e índice de vazios dos agregados

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do resíduo de vidro e agregado natural utilizados, estão representados na tabela 3.

Tabela 3: Resultados da caracterização dos agregados utilizados.

| AGREGADO NATURAL |                         |                  |                         |                  |
|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| MASSA UNITÁRIA   |                         | MASSA ESPECÍFICA |                         | ÍNDICE DE VAZIOS |
| 1º Determinação  | 1,48 kg/dm <sup>3</sup> | Massa inicial    | 500,18 g                | 48,10%           |
| 2º Determinação  | 1,45 kg/dm <sup>3</sup> | Leitura inicial  | 200 ml                  |                  |
| 3º Determinação  | 1,47 kg/dm <sup>3</sup> | Leitura final    | 376,5ml                 |                  |
| VALOR FINAL      | 1,47 kg/dm <sup>3</sup> | VALOR FINAL      | 2,83 kg/dm <sup>3</sup> |                  |
| RESÍDUO DE VIDRO |                         |                  |                         |                  |
| MASSA UNITÁRIA   |                         | MASSA ESPECÍFICA |                         | ÍNDICE DE VAZIOS |
| 1º Determinação  | 1,47 kg/dm <sup>3</sup> | Massa inicial    | 500,13 g                | 40,20%           |
| 2º Determinação  | 1,49 kg/dm <sup>3</sup> | Leitura inicial  | 200 ml                  |                  |
| 3º Determinação  | 1,51 kg/dm <sup>3</sup> | Leitura final    | 401,0 ml                |                  |
| VALOR FINAL      | 1,49 kg/dm <sup>3</sup> | VALOR FINAL      | 2,49 kg/dm <sup>3</sup> |                  |

Fonte: Autor (2015).

Ao avaliar os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos agregados

utilizados, as massas unitárias obtidas para o agregado natural e resíduo de vidro foram respectivamente 1,47 kg/dm<sup>3</sup> e 1,49 kg/dm<sup>3</sup>.

Entretanto, o agregado natural apresentou uma massa específica maior que o resíduo de vidro, sendo 2,83 kg/dm<sup>3</sup> para o agregado natural e 2,49 kg/dm<sup>3</sup> para o resíduo de vidro. Consequentemente o índice de vazios obtido para o agregado natural foi maior se comparado com o resíduo de vidro, sendo de 48,1% para o agregado natural e 40,2% para o resíduo de vidro.

Portanto, as quantidades de agregados foram ajustadas para manter o mesmo índice de vazios a ser preenchido pela pasta nas amostras.

## 4.2 Ensaio de absorção de água

Os valores obtidos no ensaio de absorção aos 28 dias e 180 dias de idade, estão discriminados na tabela 4.

Tabela 4: Resultados obtidos no ensaio de absorção de água.

| <b>ABSORÇÃO DE ÁGUA (28 DIAS) (%)</b>  |                                     |                                    |                                     |
|----------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Amostra</i>                         | <i>Resíduo de Vidro (CP II F40)</i> | <i>Resíduo de Vidro (CP IV 32)</i> | <i>Agregado natural (CP II F40)</i> |
| 1                                      | 8,17                                | 8,51                               | 5,53                                |
| 2                                      | 7,80                                | 8,56                               | 6,98                                |
| 3                                      | 8,33                                | 8,38                               | 6,85                                |
| 4                                      | 7,40                                | 7,86                               | 7,27                                |
| 5                                      | 7,47                                | 8,07                               | 6,60                                |
| <b>Média (x<sub>m</sub>)</b>           | <b>7,83</b>                         | <b>8,28</b>                        | <b>6,92</b>                         |
| <b>Desvio (S)</b>                      | <b>0,41</b>                         | <b>0,30</b>                        | <b>0,28</b>                         |
| <b>ABSORÇÃO DE ÁGUA (180 DIAS) (%)</b> |                                     |                                    |                                     |
| <i>Amostra</i>                         | <i>Resíduo de Vidro (CP II F40)</i> | <i>Resíduo de Vidro (CP IV 32)</i> | <i>Agregado natural (CP II F40)</i> |
| 1                                      | 5,98                                | 6,14                               | 5,73                                |
| 2                                      | 5,48                                | 6,03                               | 5,70                                |
| 3                                      | 5,80                                | 6,50                               | 5,89                                |
| 4                                      | 6,38                                | 5,56                               | 5,86                                |
| 5                                      | 5,39                                | 5,85                               | 5,80                                |
| <b>Média (x<sub>m</sub>)</b>           | <b>5,81</b>                         | <b>6,02</b>                        | <b>5,80</b>                         |
| <b>Desvio (S)</b>                      | <b>0,40</b>                         | <b>0,35</b>                        | <b>0,08</b>                         |

Fonte: Autor (2015).

No ensaio de absorção, apenas o valor da amostra 1 produzida com agregado natural aos 28 dias de idade, foi descartado segundo o critério de Chauvenet.

Os valores médios obtidos de absorção e desvio padrão após exclusão do valor discrepante foram respectivamente 6,92% e 0,28.

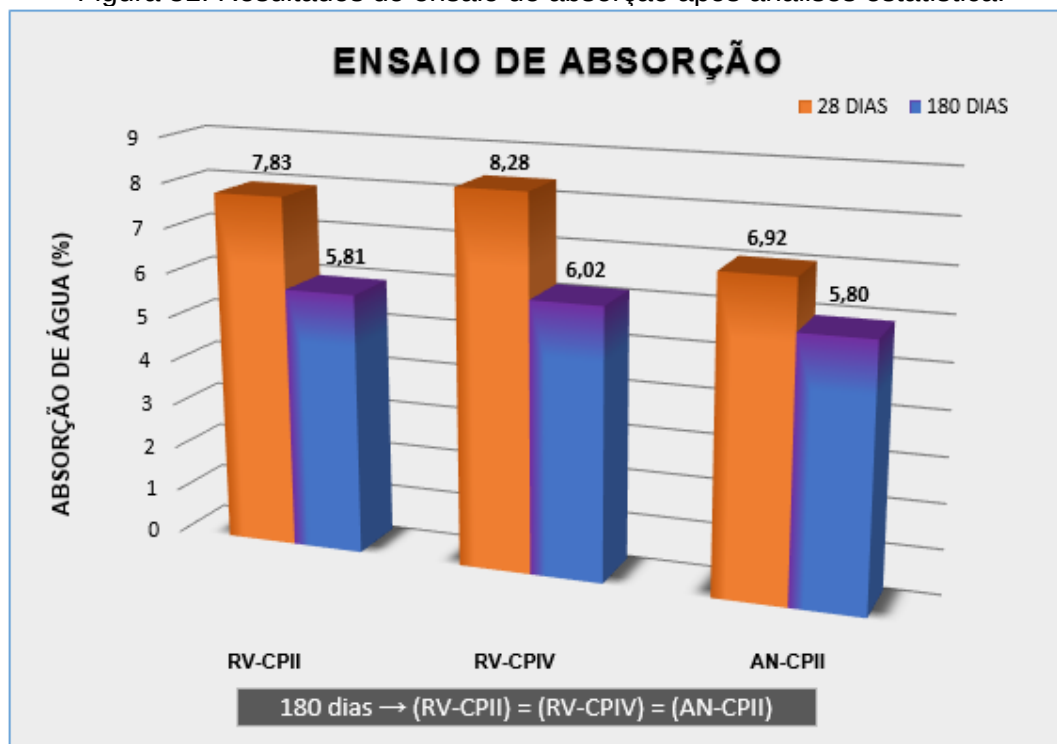
Os resultados obtidos ao aplicar o Teste de T Student no ensaio de flexão estão representados no Anexo B. Para facilitar a discussão dos resultados as amostras produzidas com resíduo de vidro com cimento CII F40, resíduo de vidro com CII 32 e agregado natural com CII F40, foram tratadas como sendo (RV-CII F40), (RV-CII 32) e (AN-CII F40), respectivamente.

Conforme resultados obtidos no ensaio de absorção, não houve diferenças significativas entre as formulações (RV-CII com RV-CII) aos 28 e 180 dias de idade, já que os valores de  $t_{calculado}$ , foram menores que o valor de  $t_{tabelado}$  para um nível de significância de 5% e grau de liberdade calculado.

Por outro lado, os testes entre (RV-CII com AN-CII) e (RV-CII com AN-CII) apresentaram diferenças significativas, ao considerar a idade de 28 dias. Isto não ocorreu aos 180 dias de idade, já que os valores obtidos resultaram novamente em valores de  $t_{calculado}$  menor que o valor de  $t_{tabelado}$ .

A Figura 31, ilustra graficamente os resultados obtidos no ensaio de absorção de água, após exclusão dos dados dispersantes e análise comparativa das três formulações produzidas.

Figura 31: Resultados do ensaio de absorção após análises estatística.



Fonte: Autor (2015).

Portanto, aos 180 dias de idade, todas as formulações produzidas não apresentaram diferenças significativas em relação a absorção de água. Além disso, com o aumento da idade todas as amostras apresentaram redução da absorção de água, conforme pode ser observado na Figura 31.

### 4.3 Ensaio de abrasão profunda

Os resultados obtidos no ensaio de abrasão profunda estão representados nas tabelas 5, 6 e 7.

Para critério de avaliação estatística e exclusão de dados discrepantes aplicou-se o teste de Chauvenet e Teste T, nos resultados obtidos no ensaio de abrasão profunda. Os resultados obtidos, estão representados nos anexos A e B, respectivamente.

Tabela 5: Resultados do ensaio de abrasão profunda, obtido nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CII F40.

| <b>RESÍDUO DE VIDRO COM CIMENTO CII F40</b> |                              |                                                |                              |                                                |                              |                                                |
|---------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>(28 Dias)</b>                            |                              |                                                |                              |                                                |                              |                                                |
| Amostra                                     | POSIÇÃO A                    |                                                | POSIÇÃO B                    |                                                | MÉDIA                        |                                                |
|                                             | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) |
| 1                                           | 41,52                        | 599                                            | 36,66                        | 411                                            | 39,09                        | 505                                            |
| 2                                           | 37,75                        | 449                                            | 36,84                        | 417                                            | 37,30                        | 433                                            |
| 3                                           | 36,17                        | 395                                            | 35,98                        | 388                                            | 36,08                        | 392                                            |
| 4                                           | 39,12                        | 500                                            | 37,14                        | 427                                            | 38,13                        | 464                                            |
| 5                                           | 39,98                        | 534                                            | 38,46                        | 475                                            | 39,22                        | 505                                            |
| Valor médio =                               |                              |                                                |                              |                                                | 37,96                        | 460                                            |
| Desvio padrão =                             |                              |                                                |                              |                                                | 1,31                         | 48,57                                          |
| <b>(180 Dias)</b>                           |                              |                                                |                              |                                                |                              |                                                |
| Amostra                                     | POSIÇÃO A                    |                                                | POSIÇÃO B                    |                                                | MÉDIA                        |                                                |
|                                             | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) |
| 1                                           | 40,47                        | 560                                            | 36,27                        | 402                                            | 38,37                        | 481                                            |
| 2                                           | 38,66                        | 488                                            | 35,48                        | 376                                            | 37,07                        | 432                                            |
| 3                                           | 38,11                        | 467                                            | 40,87                        | 577                                            | 39,49                        | 522                                            |
| 4                                           | 40,81                        | 574                                            | 38,16                        | 469                                            | 39,49                        | 522                                            |
| 5                                           | 38,14                        | 468                                            | 40,81                        | 574                                            | 39,48                        | 521                                            |
| Valor médio =                               |                              |                                                |                              |                                                | 38,78                        | 496                                            |
| Desvio padrão =                             |                              |                                                |                              |                                                | 1,07                         | 39,59                                          |

Fonte: Autor (2015).

Segundo resultados obtidos no ensaio de abrasão profunda, não houve exclusão de valores discrepantes, nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CII F40. Aos 180 dias de idade, houve um aumento da ordem de 2,2% e 7,8%, no comprimento de cavidade e volume de material removido, respectivamente.

A tabela 6 representa os resultados obtidos no ensaio de abrasão profunda para as amostras produzidas com resíduo de vidro e cimento CPIV 32.

Tabela 6: Resultados do ensaio de abrasão profunda, obtido nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CPIV 32.

| <b>RESÍDUO DE VIDRO COM CIMENTO CPIV 32</b> |                              |                                                |                              |                                                |                              |                                                |
|---------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>(28 Dias)</b>                            |                              |                                                |                              |                                                |                              |                                                |
| Amostra                                     | POSIÇÃO A                    |                                                | POSIÇÃO B                    |                                                | MÉDIA                        |                                                |
|                                             | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) |
| 1                                           | 35,48                        | 372                                            | 36,75                        | 414                                            | 36,12                        | 393                                            |
| 2                                           | 36,59                        | 409                                            | 35,96                        | 388                                            | 36,28                        | 399                                            |
| 3                                           | 36,16                        | 394                                            | 36,79                        | 415                                            | 36,48                        | 405                                            |
| 4                                           | 37,74                        | 449                                            | 39,04                        | 497                                            | 38,39                        | 473                                            |
| 5                                           | 37,04                        | 424                                            | 36,91                        | 420                                            | 36,98                        | 422                                            |
| Valor médio=                                |                              |                                                |                              |                                                | 36,46                        | 405                                            |
| Desvio padrão=                              |                              |                                                |                              |                                                | 0,37                         | 12,58                                          |
| <b>(180 Dias)</b>                           |                              |                                                |                              |                                                |                              |                                                |
| Amostra                                     | POSIÇÃO A                    |                                                | POSIÇÃO B                    |                                                | MÉDIA                        |                                                |
|                                             | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) |
| 1                                           | 40,82                        | 575                                            | 40,44                        | 559                                            | 40,63                        | 567                                            |
| 2                                           | 38,68                        | 488                                            | 39,01                        | 501                                            | 38,85                        | 495                                            |
| 3                                           | 39,74                        | 530                                            | 39,95                        | 538                                            | 39,85                        | 534                                            |
| 4                                           | 39,83                        | 534                                            | 39,71                        | 529                                            | 39,77                        | 532                                            |
| 5                                           | 40,41                        | 557                                            | 40,32                        | 554                                            | 40,37                        | 556                                            |
| Valor médio=                                |                              |                                                |                              |                                                | 39,89                        | 537                                            |
| Desvio padrão=                              |                              |                                                |                              |                                                | 0,69                         | 27,78                                          |

Fonte: Autor (2015).

Conforme a tabela 6, ao aplicar o teste de Chauvenet, apenas a amostra 4 produzida com resíduo de vidro e cimento CPIV 32, submetida ao ensaio aos 28 dias de idade, foi desconsiderada segundo o critério. Portanto o valor médio do volume de material removido e desvio padrão obtidos para essa formulação foi de 405 mm<sup>3</sup> e 12,58 mm<sup>3</sup>. Houve um aumento de aproximadamente 9,4% e 32,6%, de 28 para 180 dias de idade, no comprimento de cavidade e volume de

material removido, respectivamente.

Na tabela 7 são apresentados os resultados obtidos para as amostras produzidas com agregado natural e cimento CII F40.

Tabela 7: Resultados do ensaio de abrasão profunda, obtido nas amostras produzidas com agregado natural.

| <b>AGREGADO NATURAL COM CIMENTO CII F40</b> |                              |                                                |                              |                                                |                              |                                                |
|---------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>(28 Dias)</b>                            |                              |                                                |                              |                                                |                              |                                                |
| Amostra                                     | POSIÇÃO A                    |                                                | POSIÇÃO B                    |                                                | MÉDIA                        |                                                |
|                                             | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) |
| 1                                           | 38,83                        | 489                                            | 36,5                         | 406                                            | 37,67                        | 448                                            |
| 2                                           | 36,81                        | 416                                            | 37,35                        | 435                                            | 37,08                        | 426                                            |
| 3                                           | 37,95                        | 456                                            | 38,11                        | 462                                            | 38,03                        | 459                                            |
| 4                                           | 37,76                        | 449                                            | 36,49                        | 405                                            | 37,13                        | 427                                            |
| 5                                           | 39,93                        | 532                                            | 35,16                        | 362                                            | 37,55                        | 447                                            |
| Valor médio=                                |                              |                                                |                              |                                                | 37,49                        | 441                                            |
| Desvio padrão=                              |                              |                                                |                              |                                                | 0,40                         | 14,48                                          |
| <b>(180 Dias)</b>                           |                              |                                                |                              |                                                |                              |                                                |
| Amostra                                     | POSIÇÃO A                    |                                                | POSIÇÃO B                    |                                                | MÉDIA                        |                                                |
|                                             | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) | Comprimento de cavidade (mm) | Volume de material removido (mm <sup>3</sup> ) |
| 1                                           | 40,7                         | 570                                            | 35,53                        | 378                                            | 38,12                        | 474                                            |
| 2                                           | 40,52                        | 562                                            | 37,92                        | 460                                            | 39,22                        | 511                                            |
| 3                                           | 37,49                        | 444                                            | 37,77                        | 454                                            | 37,63                        | 449                                            |
| 4                                           | 41,21                        | 591                                            | 40,08                        | 544                                            | 40,65                        | 568                                            |
| 5                                           | 37,71                        | 452                                            | 41,01                        | 583                                            | 39,36                        | 518                                            |
| Valor médio=                                |                              |                                                |                              |                                                | 38,99                        | 504                                            |
| Desvio padrão=                              |                              |                                                |                              |                                                | 1,18                         | 45,24                                          |

Fonte: Autor (2015).

Ao avaliar a tabela 7, aos 180 dias, houve um aumento no comprimento de cavidade obtido de aproximadamente 4,0%, o que gerou um aumento no volume de material removido de 14,3%. Nenhum valor foi desconsiderado, conforme o critério de Chauvenet, nas amostras produzidas com agregado natural e CII F40.

Entre as amostras produzidas com resíduo de vidro, as amostras produzidas com cimento CPIV 32 obtiveram um valor médio de material removido de aproximadamente 11,9% menor em relação às amostras produzidas com cimento CII F40, nas primeiras idades de ensaio.

Aos 180 dias houve uma inversão nos resultados, sendo que, as amostras produzidas com cimento CPIV 32 obtiveram um valor médio de material removido de 8,3% maior em relação as amostras produzidas com CII F40.

Se comparados as amostras produzidas com resíduo de vidro e agregado natural moldadas com cimento CII F40, o volume de material removido médio obtido para as placas de resíduo de vidro aumentou cerca de 4,3%, em relação as amostras produzidas com agregado natural, aos 28 dias de idade.

Aos 180 dias, houve uma redução de aproximadamente 1,6% em relação às amostras produzidas com agregado natural.

Relativamente, as amostras produzidas com resíduo de vidro confeccionadas com cimento CPIV 32 apresentaram uma redução de aproximadamente 8,2% no volume de material removido em relação as placas produzidas com agregado natural, aos 28 dias de idade.

Passados os 180 dias, houve um aumento de aproximadamente 6,5% no volume de material removido nas amostras produzidas com resíduo de vidro em relação às amostras produzidas com agregado natural e cimento CII F40.

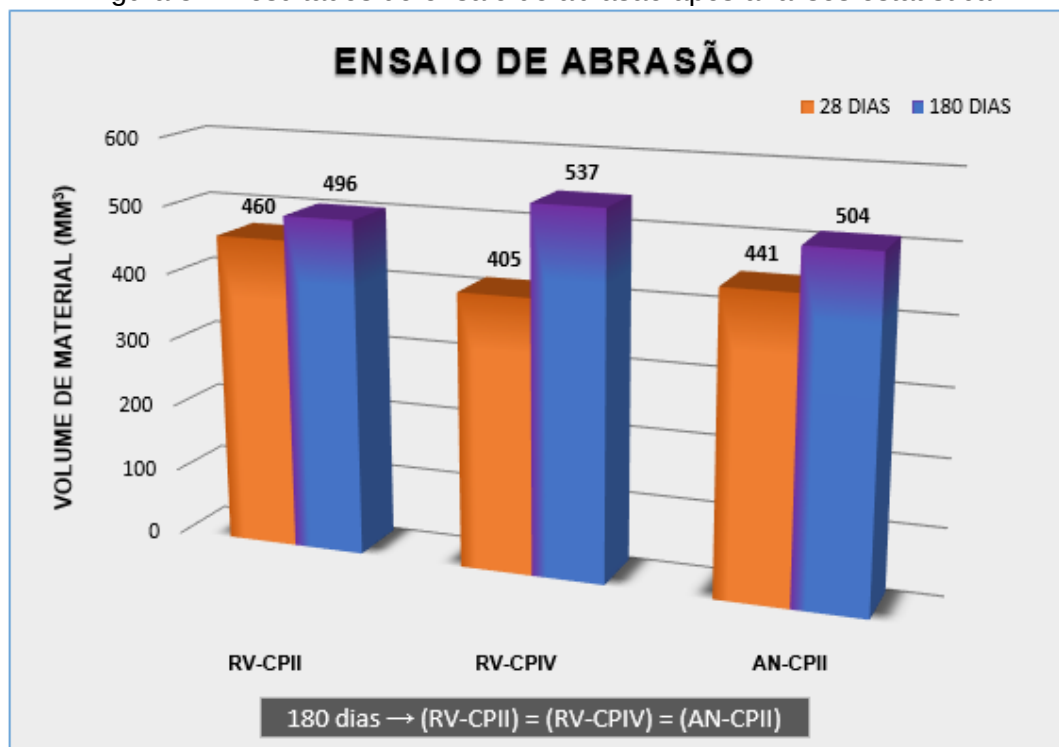
Portanto, houve uma mudança na tendência de todos os resultados obtidos no ensaio de abrasão profunda, nas primeiras idades em relação às idades mais avançadas.

Segundo resultados apresentados no anexo B, ao aplicar o teste T de Student aos resultados de abrasão profunda, os testes realizados entre (RV-CII com RV-CIV) e (RV-CIV com AN-CII) realizados aos 28 dias de idade, foram os testes que apresentaram diferenças nos valores médios de material removido encontrados nos ensaios. Isso não ocorreu aos 180 dias de idade, já que os valores de  $t_{calculado}$ , para as duas formulações, foi menor que o valor  $t_{tabelado}$ .

O teste entre (RV-CPII com AN-CPII), realizado aos 28 e 180 dias, também não resultou em diferenças significativas segundo o teste T de Student.

A Figura 32, ilustra os resultados obtidos no ensaio de abrasão profunda, tratados graficamente e apresentados em termos comparativos, nas duas idades de ensaio.

Figura 32: Resultados do ensaio de abrasão após análises estatística.



Fonte: Autor (2015)

Sendo assim, aos 180 dias de idade, a substituição do agregado natural pelo resíduo de vidro não resultou em ganhos ou perdas em termos de resistência a abrasão profunda.

Os resultados obtidos no ensaio de abrasão profunda para as três formulações produzidas nas idades de 28 e 180 dias, não apresentaram valores dentro do esperado. Era de se supor, que com o aumento das idades das amostras, houvesse uma melhora nas propriedades físicas e mecânicas dos materiais e consequentemente redução no volume de material removido durante o ensaio.

## 4.4 Ensaio de Flexão

O ensaio de Flexão também foi realizado aos 28 e 180 dias de idade. O termo “Médio”, foi designado às amostras que obtiveram ruptura no plano médio da seção. O termo “Fora”, foi designado às amostras que obtiveram ruptura fora do plano médio. Também foi aplicado o critério de Chauvenet e Teste T de Student nos dados obtidos, apresentados no anexo A e B, respectivamente.

Os resultados obtidos no ensaio de flexão aos 28 e 180 dias de idade, após aplicar o critério de Chauvent, estão representados nas tabelas 8, 9 e 10.

Tabela 8: Resultados obtidos, no ensaio à flexão realizado nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CII F40.

| <b>RESÍDUO DE VIDRO COM CIMENTO CII F40</b> |                    |                      |                             |                      |                  |              |
|---------------------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------|--------------|
| <b>IDADE: (28 DIAS)</b>                     |                    |                      |                             |                      |                  |              |
| AMOSTRA                                     | Largura média (mm) | Espessura média (mm) | Distância entre apoios (mm) | Carga de ruptura (N) | Plano de ruptura | Tensão (MPa) |
| 1                                           | 205,28             | 11,57                | 260,00                      | 240                  | Médio            | 3,4          |
| 2                                           | 204,27             | 10,15                | 260,00                      | 180                  | Médio            | 3,3          |
| 3                                           | 204,51             | 10,86                | 260,00                      | 250                  | Médio            | 4,0          |
| 4                                           | 204,48             | 11,02                | 260,00                      | 230                  | Médio            | 3,6          |
| 5                                           | 204,43             | 9,74                 | 260,00                      | 220                  | Médio            | 4,4          |
| Valor médio=                                |                    |                      |                             |                      |                  | 3,7          |
| Desvio Padrão=                              |                    |                      |                             |                      |                  | 0,46         |
| <b>IDADE: (180 DIAS)</b>                    |                    |                      |                             |                      |                  |              |
| AMOSTRA                                     | Largura média (mm) | Espessura média (mm) | Distância entre apoios (mm) | Carga de ruptura (N) | Plano de ruptura | Tensão (MPa) |
| 1                                           | 204,79             | 10,59                | 260,00                      | 160                  | Médio            | 2,7          |
| 2                                           | 204,56             | 9,54                 | 260,00                      | 120                  | Médio            | 2,5          |
| 3                                           | 205,24             | 9,57                 | 260,00                      | 160                  | Médio            | 3,3          |
| 4                                           | 204,08             | 8,99                 | 260,00                      | 110                  | Médio            | 2,6          |
| 5                                           | 204,90             | 9,74                 | 260,00                      | 150                  | Médio            | 3,0          |
| Valor médio=                                |                    |                      |                             |                      |                  | 2,8          |
| Desvio Padrão=                              |                    |                      |                             |                      |                  | 0,33         |

Fonte: Autor (2015).

Conforme resultados obtidos no ensaio de flexão, não houve exclusão de dados discrepantes nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CII F40, aos 28

e 180 dias de idade. Aos 180 dias de idade houve um decréscimo no valor médio da resistência à flexão de aproximadamente 24,3 %, que resultou no valor médio de 2,8 MPa. Os desvios padrões obtidos aos 28 e 180 dias, foram respectivamente 0,46 e 0,33.

A tabela 9 representa os resultados obtidos nas duas idades de ensaio, para as amostras produzidas com resíduo de vidro e cimento CPIV 32.

Tabela 9: Resultados obtidos, no ensaio à flexão realizado nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CPIV 32.

| <b>RESÍDUO DE VIDRO COM CIMENTO CPIV 32</b> |                    |                      |                             |                      |                  |              |
|---------------------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------|--------------|
| <b>IDADE: (28 DIAS)</b>                     |                    |                      |                             |                      |                  |              |
| AMOSTRA                                     | Largura média (mm) | Espessura média (mm) | Distância entre apoios (mm) | Carga de ruptura (N) | Plano de ruptura | Tensão (MPa) |
| 1                                           | 203,75             | 10,19                | 260,00                      | 310                  | Médio            | 5,7          |
| 2                                           | 203,19             | 11,02                | 260,00                      | 270                  | Médio            | 4,3          |
| 3                                           | 204,04             | 11,39                | 260,00                      | 370                  | Médio            | 5,4          |
| 4                                           | 204,19             | 10,07                | 260,00                      | 380                  | Fora             | 4,8          |
| 5                                           | 204,42             | 9,83                 | 260,00                      | 340                  | Médio            | 6,7          |
| Valor médio=                                |                    |                      |                             |                      |                  | 5,4          |
| Desvio Padrão=                              |                    |                      |                             |                      |                  | 0,94         |
| <b>IDADE: (180 DIAS)</b>                    |                    |                      |                             |                      |                  |              |
| AMOSTRA                                     | Largura média (mm) | Espessura média (mm) | Distância entre apoios (mm) | Carga de ruptura (N) | Plano de ruptura | Tensão (MPa) |
| 1                                           | 203,46             | 9,15                 | 260,00                      | 240                  | Médio            | 5,5          |
| 2                                           | 204,27             | 9,90                 | 260,00                      | 360                  | Médio            | 7,0          |
| 3                                           | 204,61             | 10,05                | 260,00                      | 360                  | Médio            | 6,8          |
| 4                                           | 203,94             | 10,91                | 260,00                      | 330                  | Médio            | 5,3          |
| 5                                           | 203,72             | 11,36                | 260,00                      | 340                  | Médio            | 5,0          |
| Valor médio=                                |                    |                      |                             |                      |                  | 5,9          |
| Desvio Padrão=                              |                    |                      |                             |                      |                  | 0,90         |

Fonte: Autor (2015).

Segundo a tabela 9, houve um aumento de aproximadamente 9,3% na resistência à flexão de 28 para 180 dias de idade. Os desvios padrão nas duas idades foram de 0,94 aos 28 dias e 0,9 aos 180 dias. Novamente, não houve exclusão de dados discrepantes nos resultados das amostras produzidas com resíduo de vidro e cimento CPIV 32, segundo o critério de Chauvenet.

A tabela 10 apresenta os resultados obtidos no ensaio de flexão realizado nas amostras produzidas com o agregado natural. Aos 28 dias de idade, apenas o valor da amostra 3 foi excluído segundo o critério de Chauvenet.

Tabela 10: Resultados obtidos, no ensaio à flexão realizado nas amostras produzidas com agregado natural

| <b>AGREGADO NATURAL COM CIMENTO CII F40</b> |                    |                      |                             |                      |                  |              |
|---------------------------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------|--------------|
| <b>IDADE: (28 DIAS)</b>                     |                    |                      |                             |                      |                  |              |
| AMOSTRA                                     | Largura média (mm) | Espessura média (mm) | Distância entre apoios (mm) | Carga de ruptura (N) | Plano de ruptura | Tensão (MPa) |
| 1                                           | 205,11             | 12,17                | 260,00                      | 420                  | Médio            | 5,4          |
| 2                                           | 204,39             | 10,77                | 260,00                      | 330                  | Médio            | 5,4          |
| 3                                           | 204,59             | 11,15                | 260,00                      | 510                  | Médio            | 7,8          |
| 4                                           | 203,74             | 10,83                | 260,00                      | 420                  | Fora             | 4,6          |
| 5                                           | 204,35             | 10,79                | 260,00                      | 380                  | Fora             | 4,2          |
| Valor médio=                                |                    |                      |                             |                      |                  | 5,0          |
| Desvio Padrão=                              |                    |                      |                             |                      |                  | 0,63         |
| <b>IDADE: (180 DIAS)</b>                    |                    |                      |                             |                      |                  |              |
| AMOSTRA                                     | Largura média (mm) | Espessura média (mm) | Distância entre apoios (mm) | Carga de ruptura (N) | Plano de ruptura | Tensão (MPa) |
| 1                                           | 205,05             | 10,43                | 260,00                      | 420                  | Médio            | 7,3          |
| 2                                           | 204,69             | 9,91                 | 260,00                      | 330                  | Médio            | 6,4          |
| 3                                           | 204,25             | 9,92                 | 260,00                      | 510                  | fora             | 6,6          |
| 4                                           | 204,69             | 10,26                | 260,00                      | 420                  | Médio            | 7,6          |
| 5                                           | 203,96             | 9,80                 | 260,00                      | 380                  | Médio            | 7,6          |
| Valor médio=                                |                    |                      |                             |                      |                  | 7,1          |
| Desvio Padrão=                              |                    |                      |                             |                      |                  | 0,57         |

Fonte: Autor (2015).

Observa-se na tabela 10, que aos 180 dias de idade houve um aumento na ordem de 42% na resistência a flexão em relação aos 28 dias de idade.

Em termos comparativos, as amostras produzidas com agregado natural aos 180 dias de idade, apresentaram um aumento na tensão de ruptura de aproximadamente 154% e 20,3% em relação às amostras produzidas com resíduo de vidro com cimento CII F40 e CIIV 32, respectivamente.

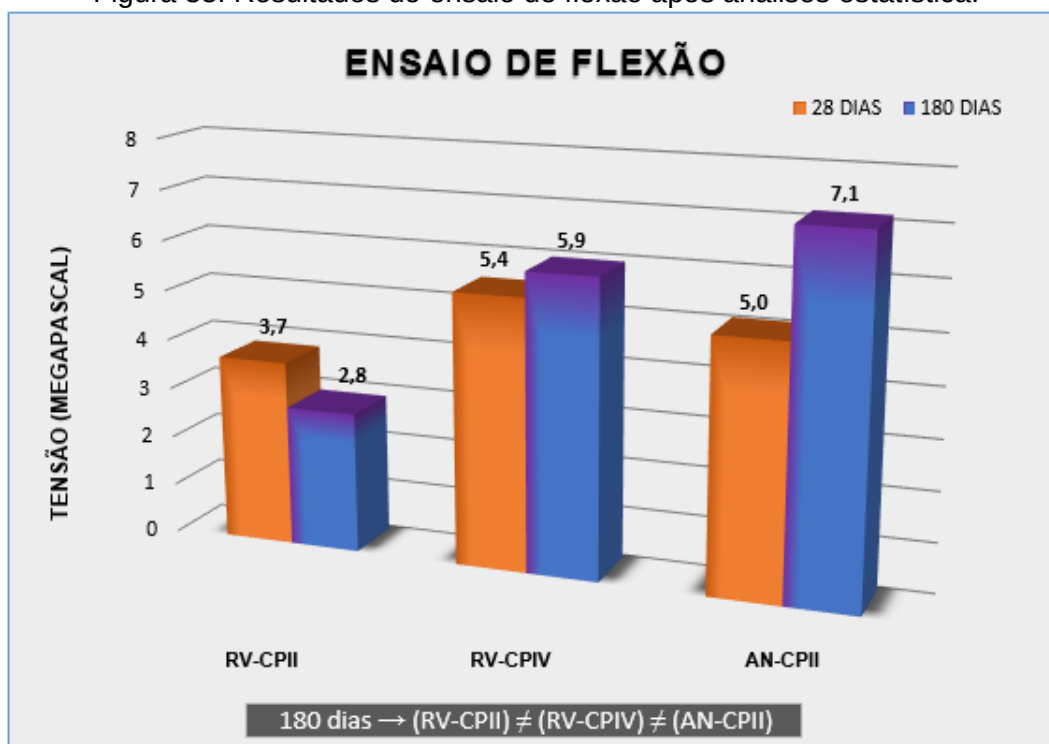
Entre as amostras produzidas com resíduo de vidro as amostras confeccionadas

com CPIV 32, apresentaram um aumento na tensão de ruptura de cerca de 111%, em relação as amostras com CII F40.

Em concordância com os resultados obtidos no anexo B, ao aplicar o teste T de Student nos resultados obtidos no ensaio de flexão, os testes realizados entre as amostras de (RV-CII com RV-CPIV) e (RV-CII com AN-CII), foram os únicos testes que resultaram em diferenças no valor médio da tensão de ruptura encontrados nas amostras produzidas nas primeiras idades de ensaio. Aos 180 dias, todos os testes apresentaram diferenças significativas.

Os resultados obtidos no ensaio de flexão, apresentados graficamente, estão ilustrados na Figura 33.

Figura 33: Resultados do ensaio de flexão após análises estatística.



Fonte: Autor (2015)

Portanto, em termos relativos, o melhor resultado obtido de resistência à flexão aos 180 dias de idade, foram as amostras produzidas com agregado natural. Aos 28 dias de idade, as amostras produzidas com resíduo de vidro e cimento CPIV 32, apresentaram desempenho semelhante às amostras produzidas com

agregado natural. Tendência que não se manteve aos 180 dias de idade.

O baixo desempenho das amostras produzidas com resíduo de vidro em relação às amostras produzidas com agregado natural, aos 180 dias de idade, pode ser devido a forma irregular e textura lisa dos grãos de vidro, observada principalmente ao avaliar a seção de fratura das amostras. Isso pode ter prejudicado a aderência entre a pasta e o agregado.

Por outro lado, a diminuição da resistência à flexão das amostras produzidas com resíduo de vidro com CII F40, de 28 para 180 dias de idade, pode ser consequência da reação álcali sílica. Portanto, foi realizado ensaio de MEV nas amostras produzidas no intuito de confirmar estas hipóteses.

## **4.5 Microscopia eletrônica de varredura**

### **4.5.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS AMOSTRAS, AOS 28 DIAS DE IDADE**

Após os ensaios de desempenho físico e mecânico, as amostras produzidas com resíduo de vidro foram submetidas a análise de microscopia eletrônica de varredura.

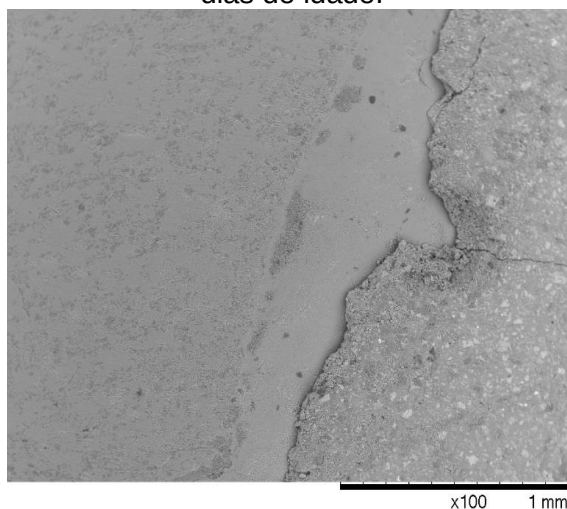
As Figuras 34 a 37, apresentam as imagens obtidas aos 28 dias de idade, nas amostras produzidas com resíduo de vidro e agregado natural.

Figura 34: Interface entre o agregado e pasta da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, aos 28 dias.



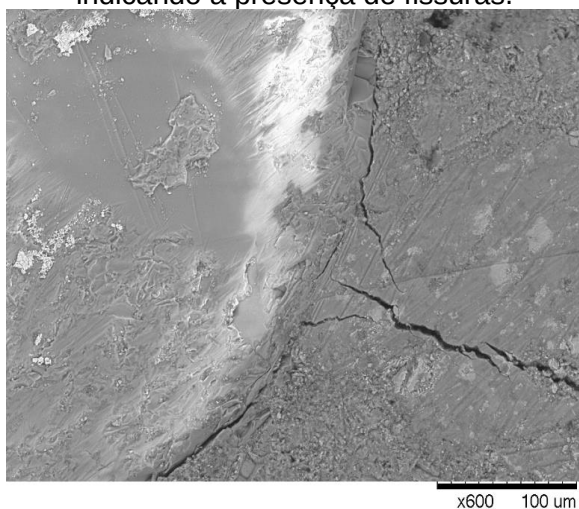
Fonte: Autor (2015).

Figura 35: Detalhe da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 28 dias de idade.



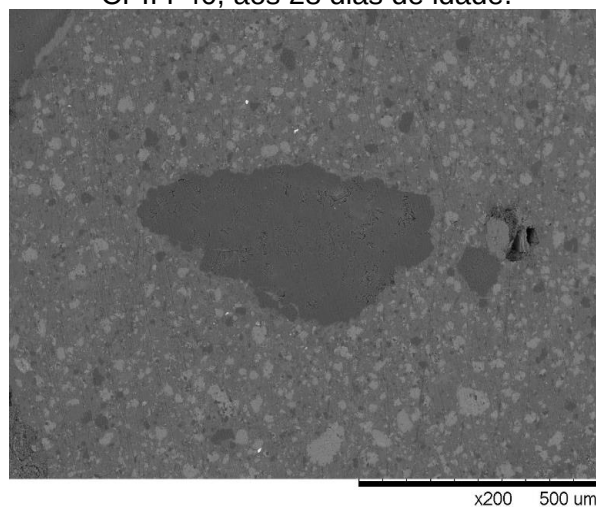
Fonte: Autor (2015).

Figura 36: Amostra de resíduo de vidro produzida com CII F40, aos 28 dias, indicando a presença de fissuras.



Fonte: Autor (2015).

Figura 37: Interface entre o agregado e pasta, da amostra com agregado natural e CII F40, aos 28 dias de idade.



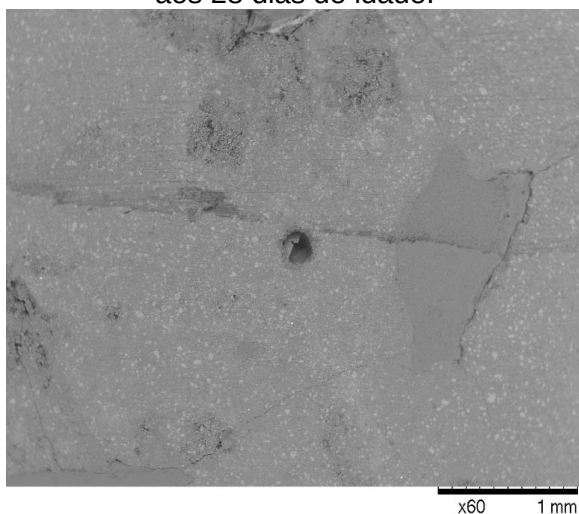
Fonte: Autor (2015).

Nas Figuras 34 e 35, é possível visualizar a interface entre o resíduo de vidro e a pasta de cimento Portland. Neste caso, observou-se na maioria das micrografias obtidas, deposição de pasta sobre os agregados de resíduo de vidro, conforme ilustrado na Figura 35.

Ainda nas Figuras 34 e 35, é possível visualizar fissuras na superfície das amostras produzidas com resíduo de vidro. Na Figura 36, essas fissuras estão

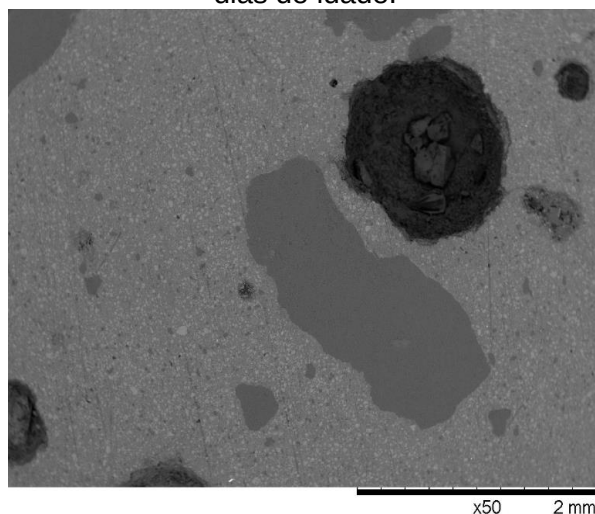
dispersas na matriz cimentícia, envolvendo o agregado de modo tangencial e radial. A incidência de fissuras foi visualizada em diversas amostras produzidas com resíduo de vidro. Conforme a Figura 37, as amostras produzidas com agregado natural, não apresentaram fissuras em torno dos agregados ou na pasta de cimento Portland. Outras micrografias obtidas são apresentadas nas Figuras 38 a 43.

Figura 38: Amostra de resíduo de vidro com CII F40, indicando a presença de poros, aos 28 dias de idade.



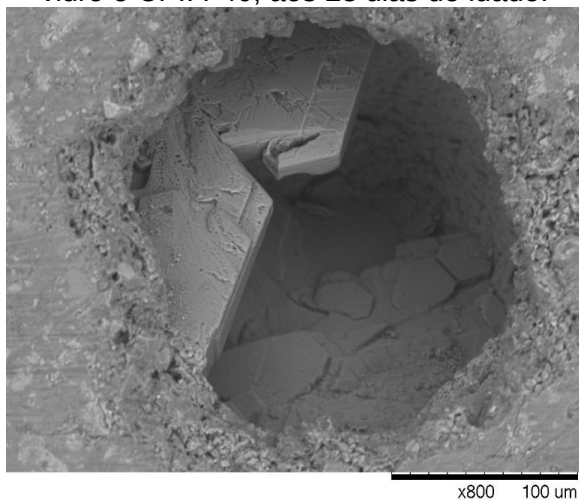
Fonte: Autor (2015).

Figura 39: Poros presente nas amostras produzidas com agregado natural, aos 28 dias de idade.



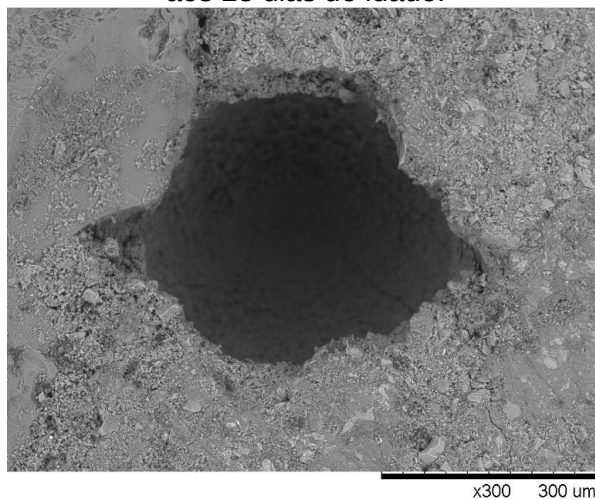
Fonte: Autor (2015).

Figura 40: Detalhe do poro visualizado na amostra confeccionada com resíduo de vidro e CII F40, aos 28 dias de idade.



Fonte: Autor (2015).

Figura 41: Micrografia do poro da amostra produzida com resíduo de vidro e CII V 32, aos 28 dias de idade.

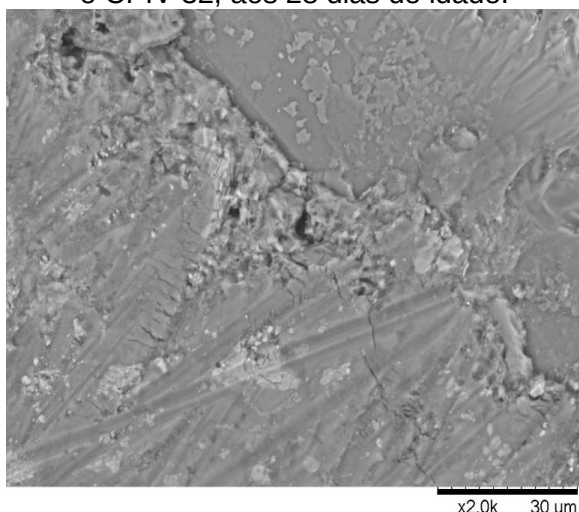


Fonte: Autor (2015).

As principais características observadas nas Figuras 38 à 41 foram a incidência de poros presentes na matriz de cimento em todas as amostras produzidas. Ao avaliar diversas micrografias, constatou-se maior incidência desses poros principalmente nas amostras produzidas com agregado natural, conforme ilustrado na Figura 39.

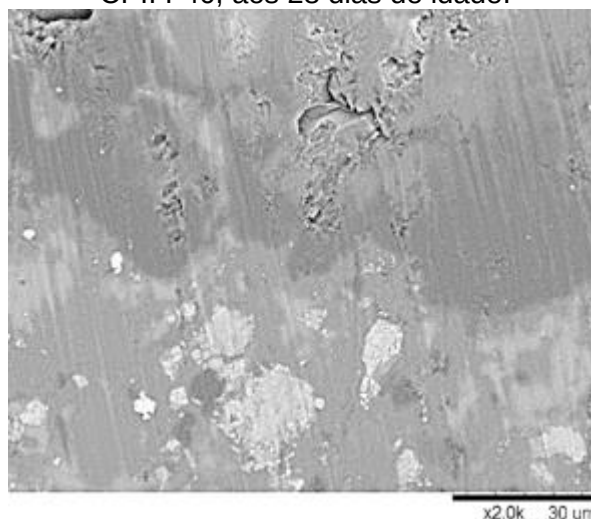
Nas Figuras 42 e 43, são apresentadas as imagens obtidas ao avaliar a interface do agregado e pasta, nas amostras produzidas com resíduo de vidro e agregado natural, aos 28 dias de idade.

Figura 42: Interface do agregado e pasta, na amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 28 dias de idade.



Fonte: Autor (2015).

Figura 43: Interface do agregado e pasta, na amostra produzida com agregado natural e CPII F40, aos 28 dias de idade.



Fonte: Autor (2015).

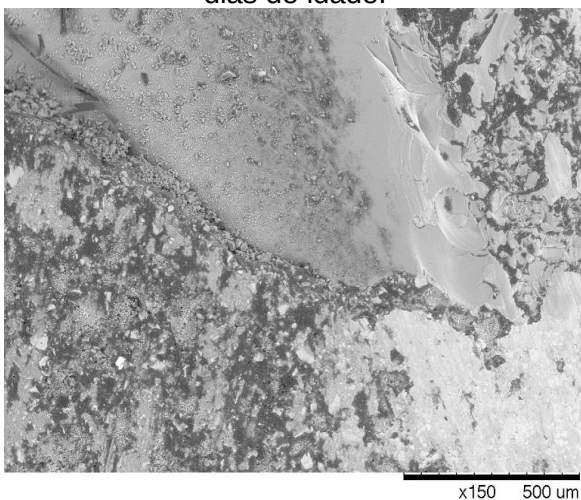
Segundo a Figura 42, é possível visualizar a interface agregado e pasta da amostra produzida com resíduo de vidro e cimento CPIV 32. Conforme as micrografias apresentadas, as amostras produzidas com agregado natural apresentaram melhor acomodação do agregado na pasta de cimento, quando comparadas às amostras produzidas com resíduo de vidro, conforme ilustrado na Figura 43.

Em termos gerais, as amostras produzidas com resíduo de vidro apresentaram irregularidades superficiais e fissuras em diversos pontos em torno dos agregados. As amostras produzidas com o agregado natural obtiveram uma superfície lisa e menos irregular.

## 4.5.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DAS AMOSTRAS, 28 E 180 DIAS DE IDADE

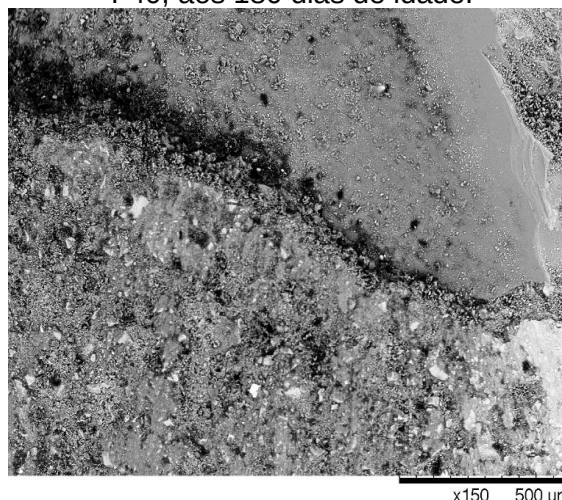
No intuito de identificar possíveis alterações nas amostras produzidas com resíduo de vidro nas idades mais avançadas de ensaio, as amostras produzidas com resíduo de vidro foram submetidas a análise de MEV aos 28 e 180 dias de idade. Os resultados obtidos estão representados nas Figuras 44 a 51.

Figura 44: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, aos 28 dias de idade.



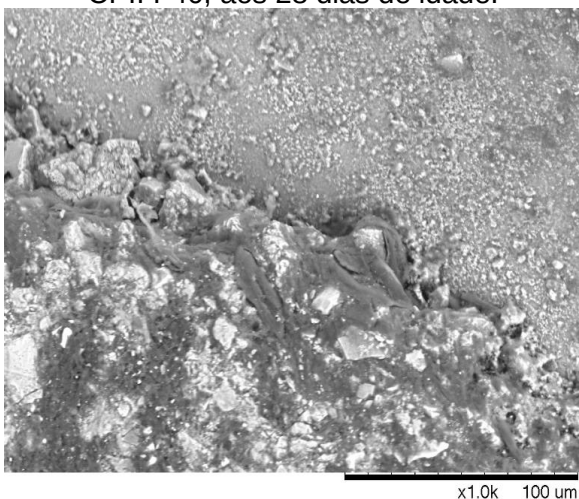
Fonte: Autor (2015).

Figura 45: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, aos 180 dias de idade.



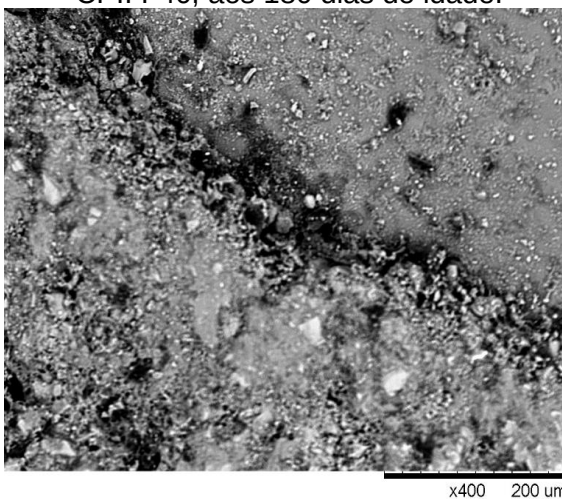
Fonte: Autor (2015).

Figura 46: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, aos 28 dias de idade.



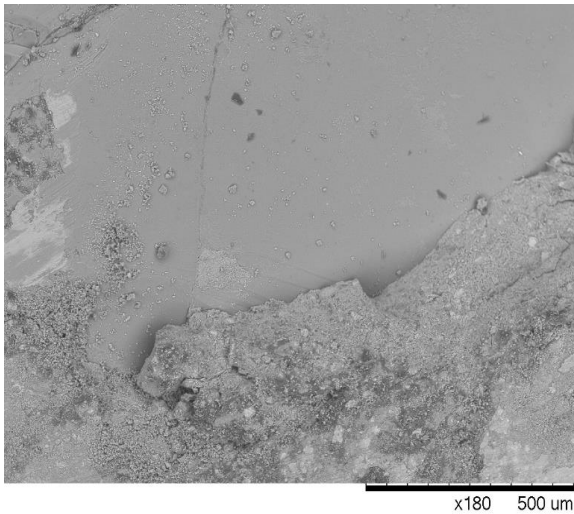
Fonte: Autor (2015).

Figura 47: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, aos 180 dias de idade.



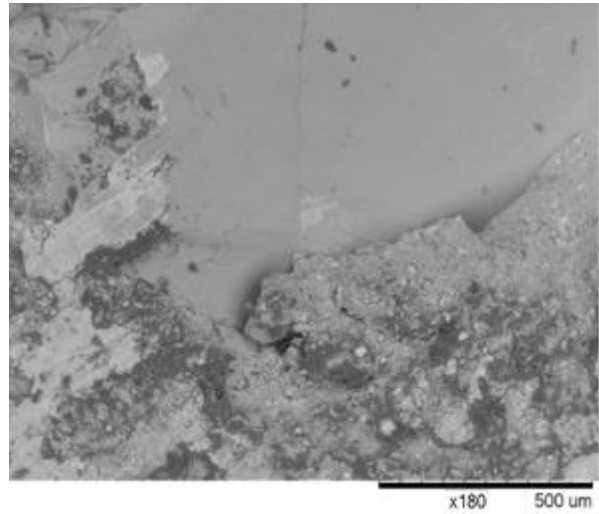
Fonte: Autor (2015).

Figura 48: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 28 dias de idade.



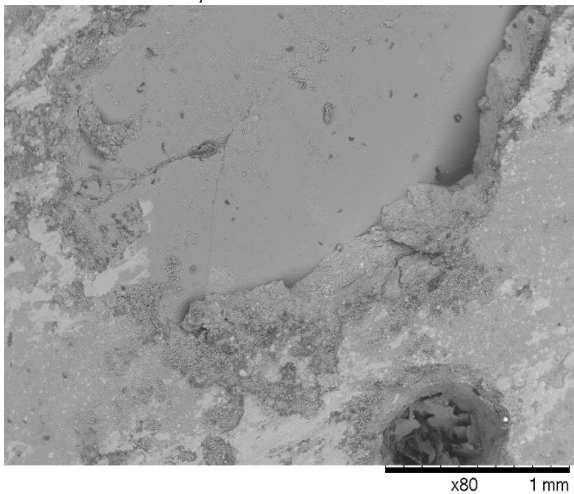
Fonte: Autor (2015).

Figura 49: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 180 dias de idade.



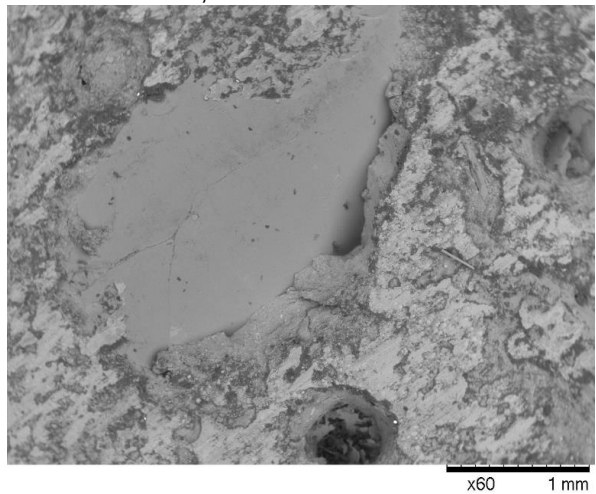
Fonte: Autor (2015).

Figura 50: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 28 dias de idade.



Fonte: Autor (2015).

Figura 51: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, aos 180 dias de idade.



Fonte: Autor (2015).

A principal característica observada nas imagens obtidas na microscopia eletrônica de varredura aos 180 dias de idade, foi uma alteração da pasta em todas as amostras produzidas, sendo mais expressiva nas amostras produzidas com cimento CII F40.

Nas Figuras 45 e 47, que representam as micrografias obtidas de amostras produzidas com cimento CII F40, é possível visualizar uma região de coloração escura, circundando o agregado de resíduo de vidro.

Nas Figuras 49 e 51, que ilustram as micrografias das amostras produzidas com resíduo de vidro e CII 32, também é possível visualizar manchas escuras, presente principalmente na pasta de cimento Portland.

### 4.5.3 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA APÓS ENSAIO ACELERADO

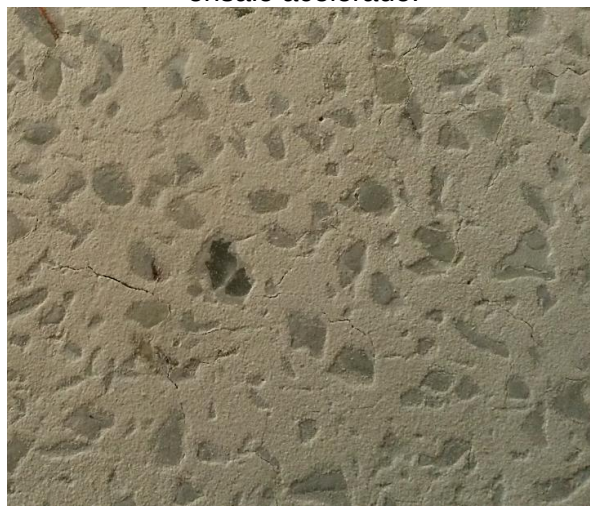
Nas Figuras 52 a 55, são apresentadas as imagens obtidas após ensaio acelerado das amostras 10x10 x1 cm<sup>3</sup> selecionadas para inspeção visual. As superfícies das amostras foram comparadas com o objetivo de constatar características visíveis a olho nu, capazes de verificar o processo de deterioração causado pela reação álcali sílica.

Figura 52: Superfície da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, antes do ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

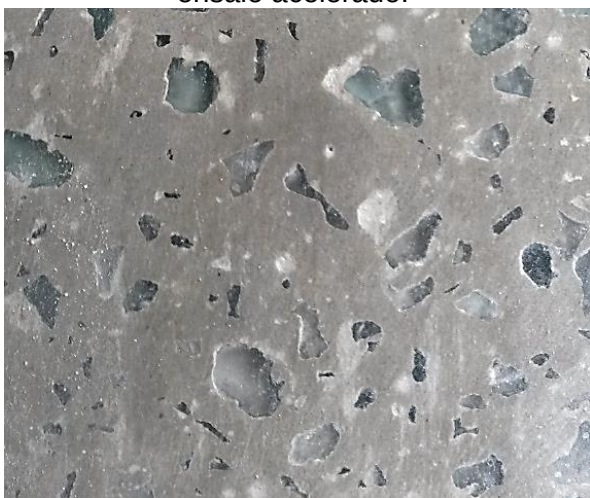
Figura 53: Superfície da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, após ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

De acordo com a Figura 53, que representa a imagem da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, foi observado material esbranquiçado, depositado e disperso, em toda superfície da pasta de cimento Portland. O mesmo material foi visualizado no interior dos poros da pasta e sobre os agregados. Além do material branco, foram constatadas fissuras, especialmente próxima aos agregados.

Figura 54: Superfície da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, antes do ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

Figura 55: Superfície da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, após ensaio acelerado.



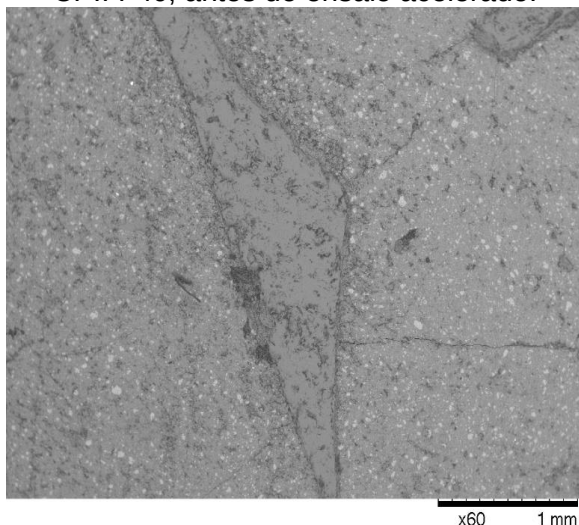
Fonte: Autor (2015).

No que se refere a superfície das amostras de resíduo de vidro produzidas com CPIV 32, foi possível visualizar material branco depositado apenas sobre os agregados, com aspecto semelhante aos encontrados nas amostras produzidas com CII F40.

Nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CPIV 32 não foi visualizado deposição de material branco sobre a superfície da pasta, conforme ilustra a Figura 55. Algumas fissuras dispersas na superfície da pasta também foram visualizadas.

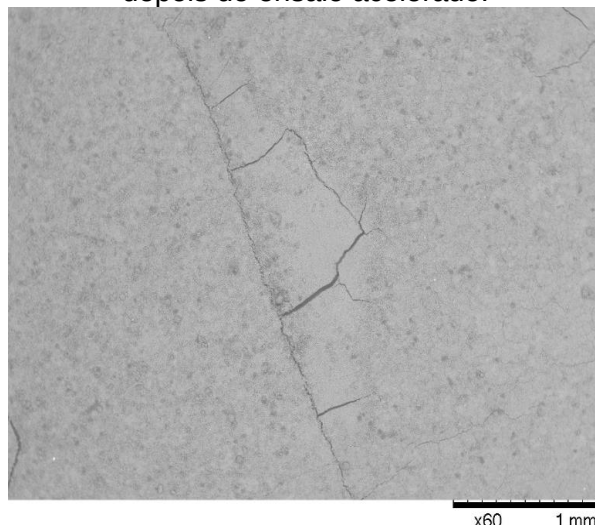
Após análise visual, as amostras de cada formulação, foram submetidas a análise de microscopia eletrônica de varredura. As imagens obtidas são apresentadas nas Figuras 56 a 69.

Figura 56: Superfície do agregado de resíduo de vidro da amostra produzida com CII F40, antes do ensaio acelerado.



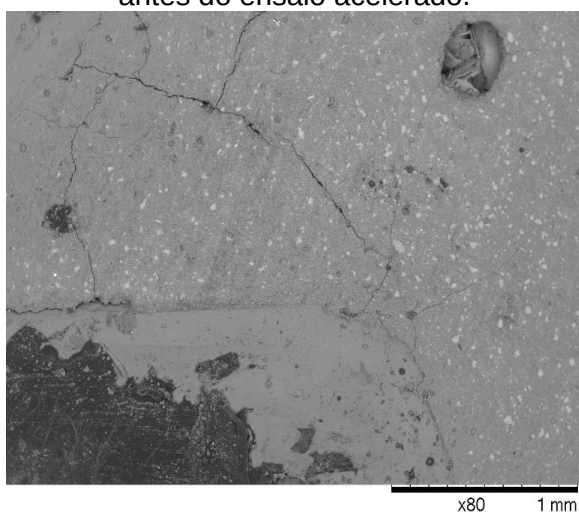
Fonte: Autor (2015).

Figura 57: Superfície do agregado de resíduo de vidro da amostra produzida com CII F40, depois do ensaio acelerado.



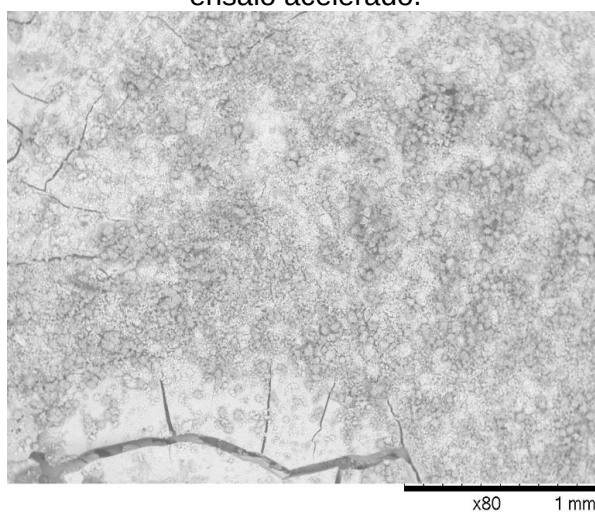
Fonte: Autor (2015).

Figura 58: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, antes do ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

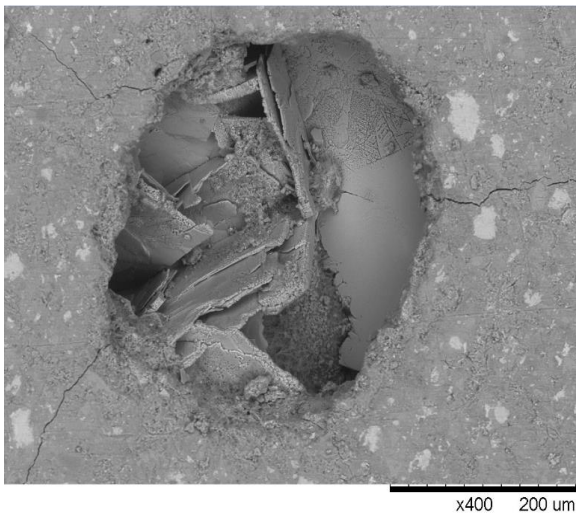
Figura 59: Micrografia da amostra produzida com resíduo de vidro e CII F40, depois do ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

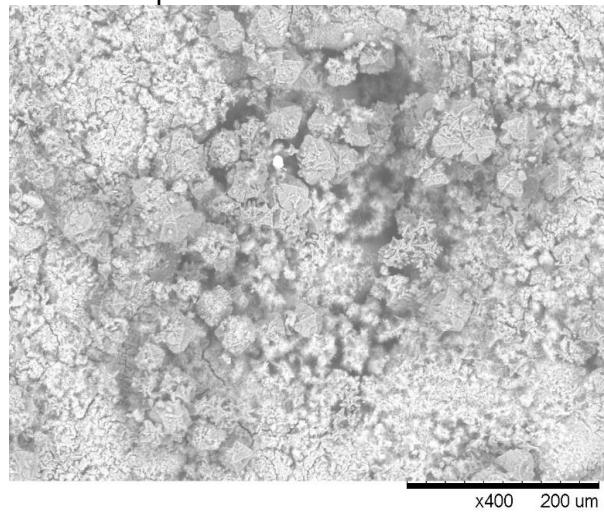
Conforme as imagens 56 a 59, que representam as micrografias obtidas nas amostras produzidas com resíduo de vidro e cimento CII F40, foi observado a presença de material maciço gretado depositado sobre os agregados, após o ensaio acelerado. Material branco com aspecto esponjoso, também foi visualizado depositado nos poros da amostra, conforme a Figura 59.

Figura 60: Detalhe do poro da amostra produzida com resíduo de vidro e CPlI F40, antes do ensaio acelerado.



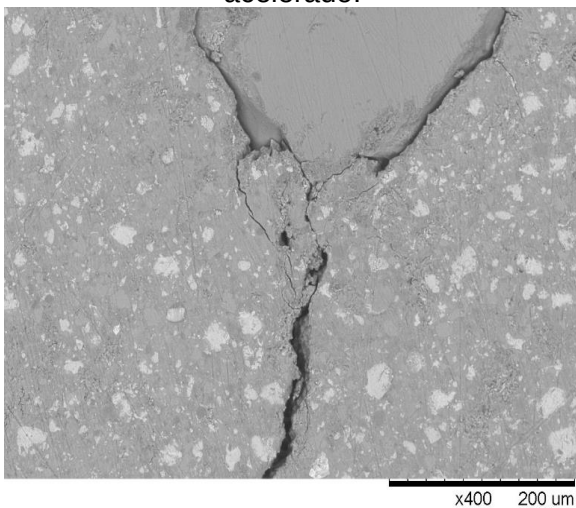
Fonte: Autor (2015).

Figura 61: Detalhe do poro da amostra produzida com resíduo de vidro e CPlI F40, depois do ensaio acelerado.



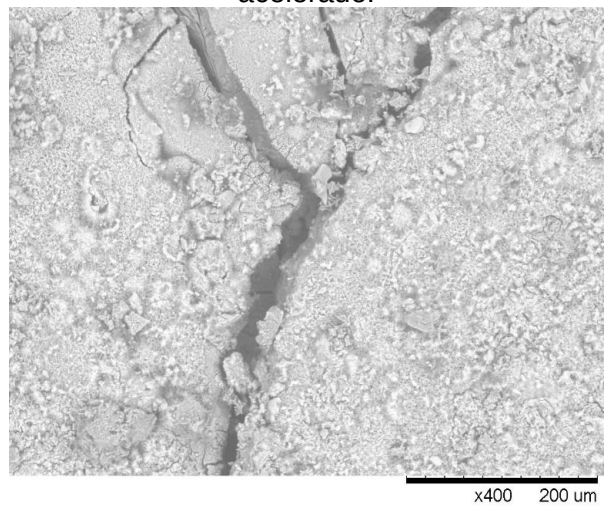
Fonte: Autor (2015).

Figura 62: Interface do resíduo de vidro com a pasta de CPlI F40, antes do ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

Figura 63: Interface do resíduo de vidro com a pasta de CPlI F40, depois do ensaio acelerado.



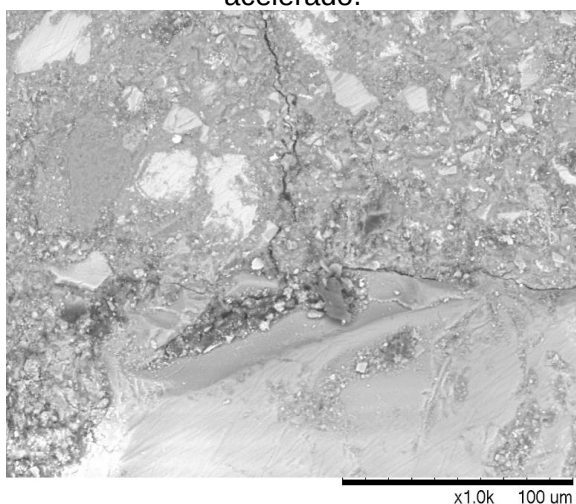
Fonte: Autor (2015).

Nas Figuras 60 e 61, observou-se considerável alteração na morfologia devido a presença de produtos cristalizados contidos principalmente no interior dos poros da pasta de CPlI F40, com aspecto predominantemente branco e esponjoso.

Conforme Figuras 62 e 63, material gretado também foi visualizado próximo as bordas dos agregados. Houve um aumento no tamanho das fissuras encontradas inicialmente em torno dos agregados de resíduo de vidro, conforme ilustrado na Figura 63.

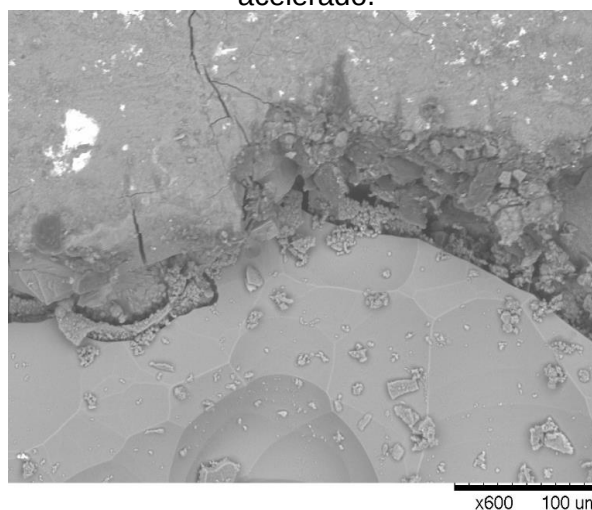
As Figuras 64 a 69 ilustram as micrografias obtidas para as amostras produzidas com resíduo de vidro e cimento CPIV 32, após serem submetidas ao ensaio acelerado.

Figura 64: Interface do resíduo de vidro com a pasta de CPIV 32, antes do ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

Figura 65: Interface do resíduo de vidro com a pasta de CPIV 32, depois do ensaio acelerado.

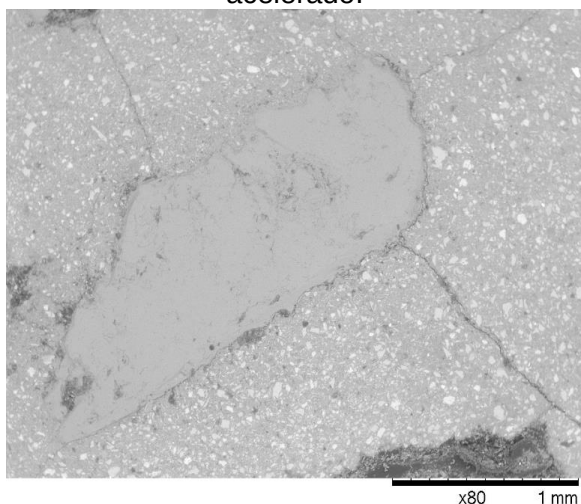


Fonte: Autor (2015).

A principal característica observada aos 180 dias de idade nas amostras produzidas com resíduo de vidro e CPIV 32, foram agregados com as bordas preenchidas com material escuro, conforme representa a Figura 65.

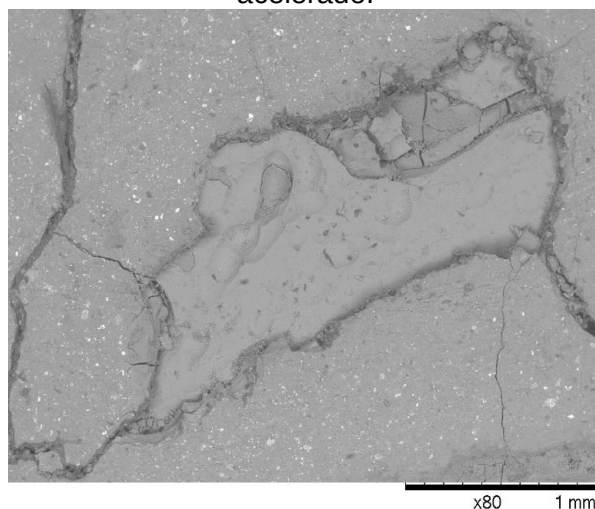
A maioria dos agregados apresentaram alteração na superfície do resíduo de vidro devido a formação de "crateras" visualizadas ao longo da superfície do agregado, possivelmente resultante da reação da solução de hidróxido de sódio com a sílica presente na superfície do vidro, Figuras 65 e 67.

Figura 66: Amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, antes do ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

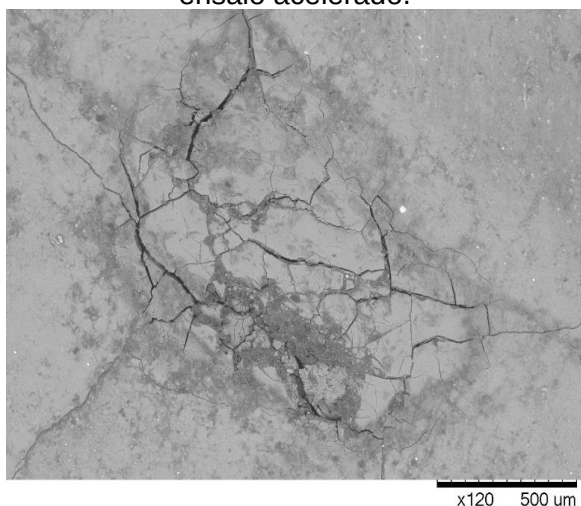
Figura 67: Amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, depois do ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

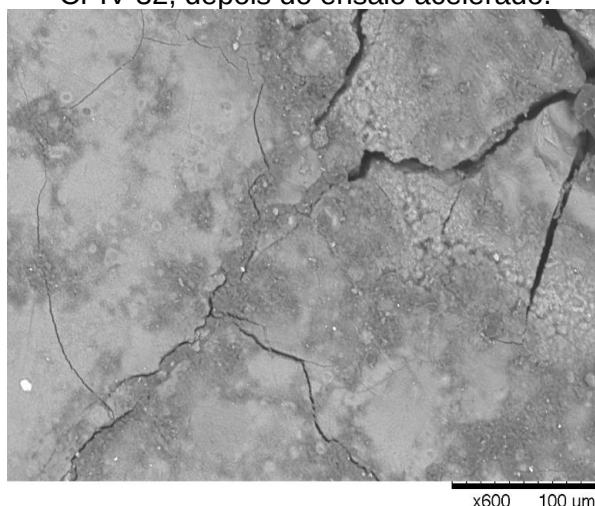
Foi constatado um aumento na quantidade de fissuras presentes na pasta, próximo à superfície dos agregados, Figuras 66 e 67.

Figura 68: Superfície do resíduo de vidro da amostra produzida com CPIV 32, depois do ensaio acelerado.



Fonte: Autor (2015).

Figura 69: Interface agregado e pasta, da amostra produzida com resíduo de vidro e CPIV 32, depois do ensaio acelerado.



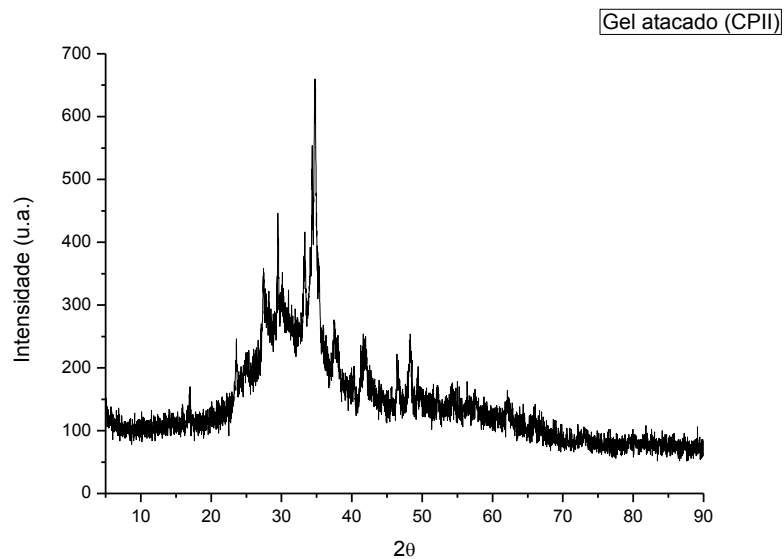
Fonte: Autor (2015).

Conforme as Figuras 68 e 69, foi observado deposição de material escuro maciço, com aspecto gretado, sobre alguns agregados. Neste caso, em quantidades bem menor, se comparado às amostras produzidas com resíduo de vidro e CPII F40.

## 4.6 Difratometria de raio X

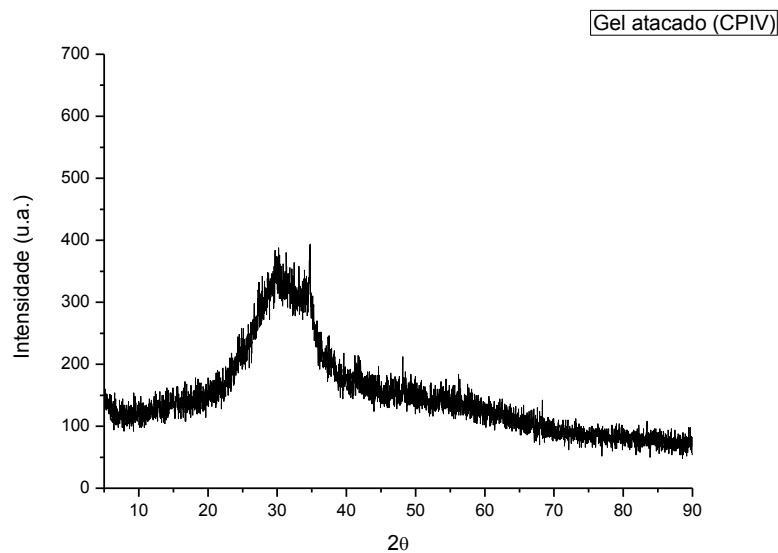
As Figuras 70 e 71, representam os difratogramas dos materiais precipitados da solução de hidróxido de sódio utilizada no ensaio acelerado.

Figura 70: Resultado do ensaio de difratometria de raio X da amostra de CPII F40.



Fonte: Autor (2014).

Figura 71: Resultado do ensaio de difratometria de raio X da amostra de CPIV 32.



Fonte: Autor (2014).

Ao avaliar o difratograma obtido do material coletado no ensaio acelerado realizado nas amostras de resíduo de vidro produzido com CII F40, observou-se forte reflexão no material em  $2\theta$ , entre 25 e 35°. Essa forte reflexão também aparece no difratograma do material coletado no ensaio acelerado das amostras produzidas com CII 32.

Picos de difração foram identificados, no material coletado das amostras produzidas com cimento CII F40, nesse caso, de modo mais expressivo que os encontrados nas amostras confeccionadas com cimento CII 32. Essas fases representam na sua maioria como sendo o silicato de sódio e o silicato de cálcio.

Na difração de raio X realizado no material obtido das amostras produzidas com CII 32, também foi observado a formação de picos de difração, porém de forma pouco expressiva, indicando alguma ou outra fase cristalina associada a estrutura do material. Estas fases foram identificadas como sendo em sua maioria o silicato de sódio. Também foi observado a presença de silício, associada a estrutura do material.

Portanto, a identificação de picos de difração nos materiais coletados no ensaio acelerado, indicou a presença de fase cristalina associada a fase amorfa do material coletado da solução de hidróxido de sódio, principalmente nas amostras produzidas com CII F40.

# CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES

Em concordância com os objetivos do trabalho são apresentadas as conclusões obtidas, no intuito de avaliar o uso de resíduo de vidro para a produção de pisos polidos. Ao analisar os resultados obtidos quanto às propriedades físicas e mecânicas dos materiais estudados, chegaram-se as seguintes conclusões:

A utilização do resíduo de vidro em substituição ao agregado natural não resultou em diferenças significativas, em termos de absorção de água e abrasão profunda, quando comparadas às amostras com agregado natural.

No ensaio de absorção realizado aos 180 dias de idade, o valor médio obtido para as amostras com resíduo de vidro produzidas com CII F40 e CII 32, foram respectivamente 5,81 e 6,02%. Já as amostras produzidas com agregado natural, apresentaram um valor médio final de absorção de 5,8%.

Apenas a substituição do agregado natural pelo resíduo ou utilização do cimento pozolânico ao invés do cimento CII F40, não proporcionou melhora na mistura em termos de absorção de água nas amostras produzidas com resíduo de vidro.

Em termos de abrasão profunda, aos 180 dias de idade, os valores médios obtidos para as amostras produzidas com resíduo de vidro foram de 496 e 537 mm<sup>3</sup> para as amostras produzidas com cimento CII F40 e CII 32, respectivamente. As amostras confeccionadas com agregado natural e cimento CII F40, apresentaram um valor médio de volume de material removido de 504 mm<sup>3</sup>.

Neste caso, a substituição do agregado natural pelo resíduo de vidro também

não proporcionou melhora da mistura em termos de abrasão profunda.

Quanto a resistência à flexão, as amostras produzidas com agregado natural apresentaram melhor desempenho se comparadas às amostras produzidas com resíduo de vidro. Obteve-se, um valor médio de resistência a flexão de 7,10 MPa, aos 180 dias de idade, para as amostras produzidas com agregado natural.

Os menores resultados foram obtidos para as amostras produzidas com resíduo de vidro, sendo de 2,80 MPa para as placas produzidas com cimento CII F40 e 5,90 MPa para as placas produzidas com cimento CIII 32.

A menor resistência à flexão obtida nas amostras produzidas com resíduo de vidro, pode estar relacionada às fissuras encontradas envolvendo o agregado de modo tangencial e radial, visualizadas, na microscopia eletrônica de varredura. É possível que essas fissuras aliada a menor aderência, podem ter contribuído para a redução da resistência à flexão.

Especificamente, no que diz respeito às amostras produzidas com resíduo de vidro e cimento CII F40, houve um decréscimo de 24,3% nos resultados médios obtidos no ensaio de flexão de 28 para 180 dias de idade, o que pode estar associado à reação álcali sílica. No entanto, a análise por MEV não permitiu confirmar esta afirmação.

Imagens obtidas, não revelaram alterações visíveis aos 180 dias de idade, que sustentaram a formação do gel sílico alcalino. Características específicas da reação, como gel maciço de aspecto gretado ou fibroso, não foram visualizadas nas micrografias obtidas. Portanto, apenas com a microscopia eletrônica de varredura, não foi possível concluir que a reação álcali sílica ocorreu entre os 28 e 180 dias de idade.

Consequentemente, não foi possível afirmar que houve maior suscetibilidade das amostras produzidas com CII F40 na ocorrência da reação álcali sílica, e que a mesma influenciou, decisivamente na queda dos valores de flexão obtidos aos 180 dias de idade.

Em relação ao ensaio acelerado, realizado nas amostras produzidas com

resíduo de vidro no intuito de avaliar a possibilidade de ocorrência da reação álcali sílica, observou alta reatividade do resíduo de vidro na ocorrência da reação álcali sílica, quando utilizado o cimento CII F40, o que não ocorreu com o cimento CII 32.

Houve a formação de gel sílico alcalino principalmente nas amostras produzidas com cimento CII F40. Sintomas foram detectados na microscopia eletrônica de varredura, tais como, presença de material maciço gretado depositado sobre os agregados e também sobre a pasta.

Pela microscopia eletrônica de varredura realizada nas amostras produzidas com cimento CII 32, foi observado material escuro de aspecto gretado, depositado sobre alguns agregados. Também houve alteração da superfície do resíduo de vidro, devido a formação de “crateras” visualizadas em algumas micrografias, que sugere reação da superfície do resíduo com a solução de hidróxido de sódio.

Outros aspectos, observados na análise visual reforçam a formação da reação álcali sílica. Nas amostras produzidas com cimento CII F40, foi observado material branco e com aspecto fibroso disperso em toda pasta de cimento, sobre os agregados e contidos no interior dos poros. Além do material branco, foram constatadas fissuras na pasta e também em torno dos agregados.

O ensaio de difratometria de raio X, também sustentou a ocorrência da reação álcali sílica nas amostras produzidas com cimento CII F40 e CII 32, sendo mais expressivo nas amostras produzidas com CII F40. Na análise de difratometria realizada nos materiais obtidos no ensaio acelerado, constatou-se a presença de material de estrutura predominantemente amorfa, sugestivo de gel exsudado.

Foram identificadas fases cristalinas associada a estrutura amorfa do material, como o silicato de sódio e silicato de cálcio. Outras estruturas como o silício também foram identificadas nas amostras confeccionadas com cimento CII 32.

Diante dos resultados apresentados, conclui-se que é possível o uso de resíduo

de vidro para produção de pisos polidos, considerando os resultados de desempenho físico e mecânico obtidos, dentro do período analisado. Os ensaios mostraram possibilidade de ocorrência da reação álcali sílica, quando as amostras foram expostas em meios agressivos, o que não ocorreu em condições normais de exposição ao ambiente.

Conclui-se, que para a utilização de resíduo de vidro como agregado constituinte de pisos polidos, o cimento a ser utilizado deve conter menos álcalis possíveis, ou fazer o uso de adições minerais, que reduzam a possibilidade de ocorrência da reação álcali sílica.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Sugere-se portanto, para pesquisas futuras, estudos de aspecto mais prático que possam avaliar a utilização do resíduo de vidro na pasta de cimento Portland em locais submetidos à condições normais de ambiente, capazes de avaliar a possibilidade de ocorrência da reação álcali sílica e sua segurança em relação ao corte superficial.

## REFERÊNCIAS

ABIVIDRO. **Associação técnica brasileira das indústrias automáticas de vidro**. 2009. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br/>>. Acesso em: 20 Set. 2014.

ABLP. **Associação Brasileira de Limpeza pública**. 2009. Disponível em: <<http://www.ablp.org.br/revistapdf/edicao72.pdf>>. Acesso em: 10 Set. 2014.

AFRIDI, M. U. K.; OHAMA, Y.; ZAFAR, M. Behaviour of Ca(OH)<sub>2</sub> in polymer modified mortars. **The International Journal Composites and Lightweight Concrete**, vol.11, 1989.

AKERMAN, M. **Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro**. Saint-Gobain Vidros Brasil. Centro Técnico de Elaboração do Vidro – CETEV, 2000. Disponível em: <[https://www.academia.edu/5290110/Natureza Estrutura e Propriedades do Vidro Natureza Estrutura e Propriedades do Vidro](https://www.academia.edu/5290110/Natureza_Estrutura_e_Propriedades_do_Vidro_Natureza_Estrutura_e_Propriedades_do_Vidro)>. Acesso em: 11 Mar. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C. 1260**. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates ( mortar- bar method) West Conshohocken, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificações e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 15805**: Placas de concreto para piso – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 45**: Agregados- Determinação da massa unitária e volume de vazios – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland- Determinação da resistência a compressão – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577-1**: Agregados- Reatividade álcali agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_. **NBR 15577- 4: Agregados- Reatividade álcali agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, 2008.

BABU, K. G; PRAKASH, P.V. Efficiency of Silica Fume in Concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 25, p. 1273-1283,1995.

BEN HABA, M.; GALLUCCI, E.; GUIDOUM, A.; SCRIVENER, K. L. Relation of expansion due to alkali silica reaction to the degree of reaction measured by SEM image analysis. **Cement and Concrete Research**. v. 37, p. 1206-1214, 2007.

BICZOK, I. **Corrosion y protección del hormigon**. Trad. por Emilio J. d'Ocon Asensi. Bilbao/España: Ediciones Urmo, 1972.

BIJEN, J. Improved mechanical properties of glass fibre reinforced cement by polymer modification. In: Simpósio internacional sobre materiais reforçados com fibras para construção civil. **Anais**. São Paulo: EPUSP, 1993.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº. 307, de 5 de julho de 2002. **Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2002**. Diário oficial da união. Brasília, 2002.

BRITO, D. R.; **Tecnologias das construções**. 2010. Disponível em: < [http://drb-assessoria.com.br/REVESTIMENTO\\_DE\\_PAREDE.pdf](http://drb-assessoria.com.br/REVESTIMENTO_DE_PAREDE.pdf)>. Acesso em: 19 Set. 2014.

BRUNDTLAND, G. H. **Nosso Futuro Comum**: Comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Fundação Getúlio Vargas, 1991.

BURIN, F.R. **Avaliação da utilização de sucata de vidro como adição mineral frente à sílica ativa e como agregado miúdo artificial na produção de materiais à base de cimento**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

CALLISTER JR, W.D. **Ciências e Engenharia dos Materiais**: 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC; 2002.

CARDOSO, F. F.; FIORANI, V. M. A.; DEGANI, C. M. Impactos ambientais dos canteiros de obras: uma preocupação que vai além dos resíduos. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais**. Florianópolis, 2006.

CEMPRE. **Consórcio Empresarial para a Reciclagem**. 2013. Disponível em: <[www.cempre.org.br](http://www.cempre.org.br)>. Acesso em: 10 Mar. 2014.

CRENTSIL, K. S; BROWN, T.; TAYLOR, A. Recycled glass as sand replacement

in premix concrete. In: **Eco-Recycled Australia and CSIRO - Guide Specification**. Austrália, 2001.

CRONEMBERGER, N. **Materiais vítreos**. 2010. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/92161812/Materiais-Vitreos>>. Acesso em: 16 Mar. 2014.

DAL MOLIN, D. C. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: 2. Ed. Editora G C Isaia, 2010.

DIAMOND, S. A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. **Cement and Concrete Research**. v. 5, p. 329-345, 1975.

FARIAS, A. L. G. **Processos construtivos III pisos e pavimentação**. 2010. Disponível em: < <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABLVAIE/piso-pavimentacao#>>. Acesso em: 16 Mar. 2014.

FEDERICO, L.M.; CHIDIAC, S.E. Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete – Critical review of treatment methods. **Cement and Concrete Composites**. v. 31, p. 606-610, 2009.

FIGUERÔA, J. P.; ANDRADE, T. **O ataque da Reação Álcali Agregado sobre as estruturas de Concreto: A descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de pontes e edifícios na Região Metropolitana do Recife**. 1. Ed. Recife: Editora Universitária UFPE. 2007.

FLORINDO, R. N. **Estudo da reação álcali-sílica em concretos através de ressonância magnética nuclear de alta resolução**. Dissertação (Mestrado em física). Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

FREITAS. **Tintas para pintar cerâmica do piso**. 2012. Disponível em: <<http://www.comopintar.com.br/tinta-para-pintar-ceramica-do-piso>>. Acesso em: 11 Set. 2014.

FURNAS. **Concreto massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaios e propriedades**. São Paulo: Editora Pini, 1997.

GHUSSN, L. **Síntese e caracterização de vidros niobofosfatos e ferrofosfato utilizados como meio para imobilização de U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>**. Tese (Doutorado em ciências na área de tecnologia nuclear). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GILLOTT, J. E. Alkali- Aggregate reactions in concrete. **Engineering Geology**, v. 9, p. 303-326, 1975.

GLASSER, L. S.; KATAOKA, N. The chemistry of “alkali- aggregate” reaction. **Cement and Concrete Research**. v. 11, p. 1-9, 1981.

GOBBI, A.; MATTANA, A. J.; MEDEIROS, M. H. F. Uso de análise hierárquica para a escolha de adições pozolânicas para o concreto: Uma aplicação inicial. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Florianópolis: IBRACON, 2011.

GUERRA, R. S. T.; **Passo a passo granilite**. 2013. Disponível em: <<http://www.clubedoconcreto.com.br/2013/11/granilite-passo-passo.html>>. Acesso em: 14 Mar. 2014.

GUIMARÃES, G. B.; MOTTA, L. A.C. Avaliação do uso de resíduo de vidro na substituição aos agregados na composição do piso de granitina. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Natal: IBRACON, 2014.

HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos Mecanismos da Reação Álcali-Agregado – Efeito da Cinza de Casca de Arroz e da Sílica Ativa**. Dissertação (Mestrado em engenharia civil). Universidade Federal de Goiás, Goiás. 1999.

HOOBS, D.W. Alkali-silica reaction in concrete. **London: Thomas Telford**, 1988. 183p

IBGE. **Manejo de resíduos sólidos**. Tabela 107, 2008. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/defaulttabzip\\_man\\_res\\_sol.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/defaulttabzip_man_res_sol.shtm)>. Acesso em: 22 Ago. 2014.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. **Reciclagem de resíduos da construção**. Seminário – Reciclagem de resíduos domiciliares. São Paulo. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2000. Disponível em: <[http://globalconstroi.com/images/stories/Manuais\\_tecnicos/2010/reciclagem\\_res\\_iduos/CETESB.pdf](http://globalconstroi.com/images/stories/Manuais_tecnicos/2010/reciclagem_res_iduos/CETESB.pdf)>. Acesso em: 11 Mar. 2014.

JOHN, V.M.J. Panorama sobre a reciclagem de resíduos na construção civil. In: Seminário de desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. In: 41º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Salvador, 1999.

KARPINSKI, L. A.; PANDOLFO, A.; REINEHR, R.; GUIMARÃES, J.; KUREK, J.; ROJAS, J. W. J. Gestão de resíduos da construção civil: uma abordagem prática no município de Passo Fundo- RS. **Estudos tecnológicos**. v.4, p.69-87, 2008.

KUTCHKO, B.G.; STRAZISAR, B.R.; LOWRY, G.A.; THAULOW, N. Degradation of Well Cement by CO<sub>2</sub> under Geologic Sequestration Conditions. **Environmental Science and Technology**. V. 41, p. 4787-4792, 2007.

LOPEZ, D. A. R.; AZEVEDO, C. A. P.; BARBOSA NETO, E. Avaliação das

Propriedades Físicas e Mecânicas de Concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Revista Cerâmica**. v.51, p. 318-324, 2004.

LUKSCHOVÁ, S. **Alkali-silica reaction of aggregates in real concrete and mortar specimen**. Thesis (PhD), Institute of Geochemistry, Mineralogy and Mineral Resources, Prague, 2009.

LUZ, A.P; RIBEIRO, S. Uso de pó de vidro como fundente para a produção de grés porcelanato. **Revista Matéria**. v.13, p.96-103, 2008.

MAGESWARI, M.; VIDIVELLI, B. The Use of Sheet Glass Powder as Fine Aggregate Replacement in Concrete. **The Open Civil Engineering Journal**. v. 4, p. 65-71, 2010.

MARFIL, S. A.; MAIZA, P. J. Deteriorated pavements due to the alkali-sílica reaction. A petrographic study of three cases in Argentina. **Cemente and concrete research**, v. 31, p. 1017-1021, 2001.

MASSAZZA, F. Pozzolanic Cements. **Cement and Concrete Composites**. v. 15, p. 185-214, 1993.

MEYER, C.; EGOSI, N.; ANDELA, C. Concrete with waste glass as aggregate. Recycling and Re-use of Glass Cullet. In: **Symposium Concrete Technology Unit of ASCE and University of Dundee**. Columbia, 2001.

MEZZADRI. **Ivo Cerâmica**. 2012. Disponível em: <<http://sbrt.ibict.br/dossietecnico/downloadsDT/MTA3>>. Acesso em: 9 Set. 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Política nacional de resíduos sólidos**. 2013. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADuos-s%C3%B3lidos>> Acesso em: 29 Mar. 2014.

MITCHEL, J.K. **Fundamentals of soil behaviour**. University of California, Berkeley. Ed John Wiley & Sons, 1992.

MUNHOZ, F. A. C. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

MONTEIRO, J.H.P. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. 2001. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>> Acesso em: 19 Dez. 2014.

MONTGOMERY, D. e RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Ed. LTC, 2003.

MOUSINHO, P. **Meio ambiente no século 21**. 4. ed. São Paulo: Editora autores

associados, 2003.

MURAKAMI, S.; IZUME, H.; YASHIRO, T.; ANDO, S. HASEGAWA, T. Sustainable building and policy design. Tokyo: **Institute of International Harmonization for Building and Housing**, 2001.

NETTO, R.M. **Materiais pozolânicos**. Monografia (Curso de especialização em construção civil). Escola de engenharia, Universidade federal de Minas Gerais, Belo horizonte, 2006.

OLIVEIRA, M. C. R.; SILVA, A. L. B.; PEREIRA, F. F. A.; COSTA, G. L. S.; MARQUES, S. A. Argamassa produzida com resíduo de vidro substituindo o agregado miúdo. In: VII Congresso Norte Nordeste de pesquisa e inovação. **Anais**. Palmas: CONNEPI, 2012.

PARKIN, S.; SOMMER, F.; UREN, S. Sustainable development: understanding the concept and practical challenge. **Engineering sustainability**. Institution of Civil Engineers.V.156, p.19-26, 2003.

PAULON, V.A. **Reações álcali-agregado em concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1981.

PEREIRA, R. **Caracterização Estrutural e Elétrica de vidros silicatos de lítio dopados com  $\text{Nd}_2\text{O}_3$** . Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2012.

PERON, M. **O que é fibra ótica**. 2009. Disponível em: <<http://www.tecmundo.com.br/web/1976-o-que-e-fibra-otica-.htm>>. Acesso em: 11 Jan. 2015.

PILKINGTON. **Entendendo o vidro**. 2010. Disponível em: <[vidrado.com/loja/blog/noticias/artigos/entendendo-o-vidro](http://vidrado.com/loja/blog/noticias/artigos/entendendo-o-vidro)>. Acesso em: 10 Mar. 2014.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. Tese (Doutorado em engenharia civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

PIRES, K. O. **Investigação do potencial reativo Álcali Agregado residual- Um estudo de caso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.

POOLE, A. B. Introduction to Alkali- aggregate reaction in concrete. **The Alkali-Sílica Reaction in Concrete**. London, 1992.

PREZZI, M.; KURTIS, K. E.; MONTEIRO, P. J. M.; SANTOS, M. C.; ANDRADE, W. P. Importância da Química de Superfície na Reação Álcali-Agregado. In:

Simpósio sobre Reatividade álcali-agregado em estrutura de concreto. **Anais**. Goiânia: 1997.

PRS. **Reciclagem de resíduos sólidos da construção civil**. 2014. Disponível em: <<http://www.portalesiduossolidos.com/reciclagem-de-residuos-solidos-da-construcao-civil/>>. Acesso em: 10 JAN. 2015.

PURNELL, P.; SHORT, N. R.; PAGE, C. L.; MAJUMDAR, A. J. Microstructural observations in new matrix glass fibre reinforced cement. **Cemente and concrete research**, v. 30, p. 1747-1753, 2000.

REINDL, J. Reuse/recycling of glass cullet for non-container uses. **Madison: Dane County Department of Public Works**, 1998.

RICHARDSON, I. G. The calcium silicate hydrates. **Cement and Concrete Research**. v. 38, 137-158, 2008.

ROMANO, A.S. **Vidro**. Iniciação Científica (Graduação em engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SANTANA, L. B.; SANTOS, C.; SANTOS, E. A.; SANTOS, G. B. X. Deposição irregular de resíduos sólidos no conjunto Eduardo Gomes no município de São Cristovão- SE: Uma abordagem a partir da aplicação das geotecnologias. In: VII Congresso Norte Nordeste de pesquisa e inovação. **Anais**. Tocantins, 2012.

SANTOS, A. **Concreto Polido: do chão da fábrica à decoração**. 2014. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/concreto-polido-do-chao-da-fabrica-a-decoracao/>>. Acesso em: 10 Jan. 2015.

SANTOS, A.R. **Vidro- tecnologias para reciclagem**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia civil). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SAUER, A. S. **Estudo do potencial de aplicação do resíduo de vidro laminado em argamassas de recuperação estrutural**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2013.

SILVA, G.A. **Recuperação de blocos de coroamento afetados pela reação álcali-agregado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Católica de Pernambuco. Recife, 2007.

SILVA, A. J. C.; BARBOSA, S.; MOTA, J. M. F.; CARVALHO, J. R. Concreto produzido com parte de resíduo de vidro na ilha de Fernando de Noronha - Pe. In: 53º Congresso Brasileiro do Concreto. **Anais**. Florianópolis: IBRACON, 2011. TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2 ed. London: Editora T. Telford, 1997.

TURRIZIANI, R. Internal degradation of concrete: alkali.-aggregate reaction, reinforcement steel corrosion. In: 8th International Congresso on the Chemistry

of Cement. **Anais**. Rio de Janeiro, 1986.

UBERLÂNDIA. Secretaria Municipal de Serviços Urbanos. **Plano para Resíduos Sólidos - Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS**: Uberlândia, 2014.

VALDUGA, L. **Reação Álcali- agregado: Mapeamento de agregados reativo do estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.

VIANNA, J. **Critério de Chauvenet para decisão do descarte ou aproveitamento de valores medidos que extrapolam a tendência dominante de um conjunto de dados amostrados**. Estudo dirigido. Instituto Federal Sul Rio Grandense, 2011.

VIEIRA, S. **Análise de variância**. 1. ed. São Paulo: Editora atlas, 2006.

VOM, F. **Meio ambiente cidadania e educação**. 2012. Disponível em: <[http://www.planetareciclavel.com.br/sala\\_de\\_aula/Tetra\\_Pak/Cadernos\\_do\\_professor.pdf](http://www.planetareciclavel.com.br/sala_de_aula/Tetra_Pak/Cadernos_do_professor.pdf)>. Acesso em: 22 Mar. 2014.

# ANEXO A

| CHAUVENET- ABSORÇÃO DE ÁGUA  |                        |                                      |                             |                             |                                      |                             |                              |                                      |                             |
|------------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| IDADE: (28 DIAS)             |                        |                                      |                             |                             |                                      |                             |                              |                                      |                             |
| RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40) |                        |                                      |                             | RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32) |                                      |                             | AGREGADO NATURAL (CP II F40) |                                      |                             |
| Amostra                      | Valor obtido ( $X_i$ ) | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) | Valor obtido ( $X_i$ )      | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) | Valor obtido ( $X_i$ )       | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) |
| 1                            | 8,17                   | 0,33                                 | ↓ 0,80                      | 8,51                        | 0,24                                 | ↓ 0,79                      | 5,53                         | -1,11                                | ↑ 1,67                      |
| 2                            | 7,80                   | -0,03                                | ↓ 0,08                      | 8,56                        | 0,28                                 | ↓ 0,93                      | 6,98                         | 0,33                                 | ↓ 0,50                      |
| 3                            | 8,33                   | 0,50                                 | ↓ 1,21                      | 8,38                        | 0,10                                 | ↓ 0,34                      | 6,85                         | 0,20                                 | ↓ 0,30                      |
| 4                            | 7,40                   | -0,43                                | ↓ 1,05                      | 7,86                        | -0,42                                | ↓ 1,39                      | 7,27                         | 0,62                                 | ↓ 0,94                      |
| 5                            | 7,47                   | -0,36                                | ↓ 0,88                      | 8,07                        | -0,20                                | ↓ 0,68                      | 6,60                         | -0,05                                | ↓ 0,07                      |
| Média ( $X_m$ )              | 7,83                   |                                      |                             | 8,28                        |                                      |                             | 6,64                         |                                      |                             |
| Desvio (S)                   | 0,41                   |                                      |                             | 0,30                        |                                      |                             | 0,67                         |                                      |                             |
| IDADE: (180 DIAS)            |                        |                                      |                             |                             |                                      |                             |                              |                                      |                             |
| RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40) |                        |                                      |                             | RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32) |                                      |                             | AGREGADO NATURAL (CP II F40) |                                      |                             |
| Amostra                      | Valor obtido ( $X_i$ ) | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) | Valor obtido ( $X_i$ )      | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) | Valor obtido ( $X_i$ )       | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) |
| 1                            | 5,98                   | 0,17                                 | ↓ 0,44                      | 6,14                        | 0,10                                 | ↓ 0,31                      | 5,73                         | -0,07                                | ↓ 0,81                      |
| 2                            | 5,48                   | -0,33                                | ↓ 0,82                      | 6,03                        | -0,01                                | ↓ 0,02                      | 5,70                         | -0,10                                | ↓ 1,18                      |
| 3                            | 5,80                   | -0,01                                | ↓ 0,02                      | 6,50                        | 0,46                                 | ↓ 1,37                      | 5,89                         | 0,09                                 | ↓ 1,15                      |
| 4                            | 6,38                   | 0,57                                 | ↓ 1,44                      | 5,56                        | -0,48                                | ↓ 1,40                      | 5,86                         | 0,06                                 | ↓ 0,79                      |
| 5                            | 5,39                   | -0,42                                | ↓ 1,04                      | 5,95                        | -0,09                                | ↓ 0,25                      | 5,80                         | 0,00                                 | ↓ 0,05                      |
| Média ( $X_m$ )              | 5,81                   |                                      |                             | 6,04                        |                                      |                             | 5,80                         |                                      |                             |
| Desvio (S)                   | 0,40                   |                                      |                             | 0,34                        |                                      |                             | 0,08                         |                                      |                             |

| CHAUVENET-ABRASÃO PROFUNDA   |                   |                               |                  |                             |                               |                  |                              |                               |                  |
|------------------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|
| (28 DIAS)                    |                   |                               |                  |                             |                               |                  |                              |                               |                  |
| RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40) |                   |                               |                  | RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32) |                               |                  | AGREGADO NATURAL (CP II F40) |                               |                  |
| Amostra                      | Valor obtido (Xi) | Desvio Individual (di=Xi -Xm) | Razão (ΔR= di/s) | Valor obtido (Xi)           | Desvio Individual (di=Xi -Xm) | Razão (ΔR= di/s) | Valor obtido (Xi)            | Desvio Individual (di=Xi -Xm) | Razão (ΔR= di/s) |
| 1                            | 505               | 45,50                         | ↓ 0,94           | 393                         | -25,20                        | ↓ 0,78           | 448                          | 6,50                          | ↓ 0,45           |
| 2                            | 433               | -26,50                        | ↓ 0,55           | 399                         | -19,70                        | ↓ 0,61           | 426                          | -15,50                        | ↓ 1,07           |
| 3                            | 392               | -68,00                        | ↓ 1,40           | 405                         | -13,70                        | ↓ 0,42           | 459                          | 18,00                         | ↓ 1,24           |
| 4                            | 464               | 4,00                          | ↓ 0,08           | 473                         | 54,80                         | ↑ 1,69           | 427                          | -14,00                        | ↓ 0,97           |
| 5                            | 505               | 45,00                         | ↓ 0,93           | 422                         | 3,80                          | ↓ 0,12           | 447                          | 6,00                          | ↓ 0,41           |
| Média (X <sub>m</sub> )      | 460               |                               |                  | 418                         |                               |                  | 441                          |                               |                  |
| Desvio (S)                   | 48,57             |                               |                  | 32,51                       |                               |                  | 14,48                        |                               |                  |
| (180 DIAS)                   |                   |                               |                  |                             |                               |                  |                              |                               |                  |
| RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40) |                   |                               |                  | RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32) |                               |                  | AGREGADO NATURAL (CP II F40) |                               |                  |
| Amostra                      | Valor obtido (Xi) | Desvio Individual (di=Xi -Xm) | Razão (ΔR= di/s) | Valor obtido (Xi)           | Desvio Individual (di=Xi -Xm) | Razão (ΔR= di/s) | Valor obtido (Xi)            | Desvio Individual (di=Xi -Xm) | Razão (ΔR= di/s) |
| 1                            | 481               | -14,60                        | ↓ 0,37           | 567                         | 30,20                         | ↓ 1,09           | 474                          | -30,00                        | ↓ 0,66           |
| 2                            | 432               | -63,60                        | ↓ 1,61           | 495                         | -41,80                        | ↓ 1,50           | 511                          | 7,00                          | ↓ 0,15           |
| 3                            | 522               | 26,40                         | ↓ 0,67           | 534                         | -2,80                         | ↓ 0,10           | 449                          | -55,00                        | ↓ 1,22           |
| 4                            | 522               | 26,40                         | ↓ 0,67           | 532                         | -4,80                         | ↓ 0,17           | 568                          | 64,00                         | ↓ 1,41           |
| 5                            | 521               | 25,40                         | ↓ 0,64           | 556                         | 19,20                         | ↓ 0,69           | 518                          | 14,00                         | ↓ 0,31           |
| Média (X <sub>m</sub> )      | 496               |                               |                  | 537                         |                               |                  | 504                          |                               |                  |
| Desvio (S)                   | 39,59             |                               |                  | 27,78                       |                               |                  | 45,24                        |                               |                  |

| CHAUVENET- ENSAIO DE FLEXÃO |                        |                                      |                             |                            |                                      |                             |                             |                                      |                             |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| IDADE: (28 DIAS)            |                        |                                      |                             |                            |                                      |                             |                             |                                      |                             |
| RESÍDUO DE VIDRO (CPII F40) |                        |                                      |                             | RESÍDUO DE VIDRO (CPIV 32) |                                      |                             | AGREGADO NATURAL (CPII F40) |                                      |                             |
| Amostra                     | Valor obtido ( $X_i$ ) | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) | Valor obtido ( $X_i$ )     | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) | Valor obtido ( $X_i$ )      | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) |
| 1                           | 3,41                   | -0,36                                | ↓0,78                       | 5,72                       | 0,33                                 | ↓0,36                       | 5,39                        | -0,08                                | ↓0,06                       |
| 2                           | 3,34                   | -0,43                                | ↓0,93                       | 4,26                       | -1,12                                | ↓1,19                       | 5,43                        | -0,04                                | ↓0,03                       |
| 3                           | 4,04                   | 0,28                                 | ↓0,60                       | 5,45                       | 0,06                                 | ↓0,07                       | 7,82                        | 2,35                                 | ↑1,65                       |
| 4                           | 3,62                   | -0,15                                | ↓0,33                       | 4,77                       | -0,61                                | ↓0,65                       | 4,57                        | -0,90                                | ↓0,63                       |
| 5                           | 4,43                   | 0,66                                 | ↓1,43                       | 6,72                       | 1,33                                 | ↓1,42                       | 4,15                        | -1,32                                | ↓0,93                       |
| Média ( $X_m$ )             | 3,77                   |                                      |                             | 5,38                       |                                      |                             | 5,47                        |                                      |                             |
| Desvio (S)                  | 0,46                   |                                      |                             | 0,94                       |                                      |                             | 1,42                        |                                      |                             |
| IDADE: (180 DIAS)           |                        |                                      |                             |                            |                                      |                             |                             |                                      |                             |
| RESÍDUO DE VIDRO (CPII F40) |                        |                                      |                             | RESÍDUO DE VIDRO (CPIV 32) |                                      |                             | AGREGADO NATURAL (CPII F40) |                                      |                             |
| Amostra                     | Valor obtido ( $X_i$ ) | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) | Valor obtido ( $X_i$ )     | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) | Valor obtido ( $X_i$ )      | Desvio Individual ( $d_i=X_i -X_m$ ) | Razão ( $\Delta R= d_i/s$ ) |
| 1                           | 2,71                   | -0,12                                | ↓0,36                       | 5,50                       | -0,43                                | ↓0,48                       | 7,34                        | 0,24                                 | ↓0,43                       |
| 2                           | 2,52                   | -0,32                                | ↓0,96                       | 7,01                       | 1,08                                 | ↓1,20                       | 6,40                        | -0,70                                | ↓1,24                       |
| 3                           | 3,32                   | 0,49                                 | ↓1,47                       | 6,79                       | 0,86                                 | ↓0,95                       | 6,59                        | -0,51                                | ↓0,90                       |
| 4                           | 2,60                   | -0,23                                | ↓0,70                       | 5,30                       | -0,63                                | ↓0,69                       | 7,60                        | 0,50                                 | ↓0,89                       |
| 5                           | 3,01                   | 0,18                                 | ↓0,54                       | 5,05                       | -0,88                                | ↓0,98                       | 7,57                        | 0,47                                 | ↓0,82                       |
| Média ( $X_m$ )             | 2,83                   |                                      |                             | 5,93                       |                                      |                             | 7,10                        |                                      |                             |
| Desvio (S)                  | 0,33                   |                                      |                             | 0,90                       |                                      |                             | 0,57                        |                                      |                             |

## ANEXO B

Foram considerados a média, o desvio padrão e um nível de significância de 5%, na determinação do valor de ( $t_{\text{calculado}}$ ) e do grau de liberdade, conforme as equações 9 e 10, respectivamente.

$$t_{\text{CALCULADO}} = \left( \frac{|x_1 - x_2|}{(S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)^{0,5}} \right) \quad (9)$$

$$\text{Grau de liberdade} = \left( \frac{(S_1^2/n_1 + S_2^2/n_2)}{\left\{ \frac{(S_1^2/n_1)^2}{n_1 + 1} + \frac{(S_2^2/n_2)^2}{n_2 + 1} \right\} - 2} \right) \quad (10)$$

Onde:

$x_1$  e  $x_2$  = Médias amostrais do grupo 1 e 2, respectivamente;

$S_1$  e  $S_2$  = Desvios padrões do grupo 1 e 2, respectivamente;

$n_1$  e  $n_2$  = Tamanho das amostras do grupo 1 e 2, respectivamente.

| <b>T STUDENT- ABSORÇÃO DE ÁGUA (28 DIAS)</b> |                   |                                      |                 |                                      |                   |
|----------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| <b>IDADE: (28 DIAS)</b>                      |                   |                                      |                 |                                      |                   |
| <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40)</b>          |                   | <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32)</b>   |                 | <b>AGREGADO NATURAL(CP II F40)</b>   |                   |
| <i>Média= 7,83</i>                           |                   | <i>Média= 8,28</i>                   |                 | <i>Média= 6,93</i>                   |                   |
| <i>Desvio padrão= 0,41</i>                   |                   | <i>Desvio padrão= 0,30</i>           |                 | <i>Desvio padrão= 0,28</i>           |                   |
| <i>Coeficiente de variação= 0,05</i>         |                   | <i>Coeficiente de variação= 0,04</i> |                 | <i>Coeficiente de variação= 0,04</i> |                   |
| <i>n=5</i>                                   |                   | <i>n=5</i>                           |                 | <i>n=4</i>                           |                   |
| TESTE                                        | $ X_{mx}-X_{my} $ | $((S_x^2)/n_x)$                      | $((S_y^2)/n_y)$ | $T_{calculado}$                      | Grau de liberdade |
| (RV-CPII) / (RV-CPIV)                        | 0,45              | 0,03                                 | 0,02            | 1,98                                 | 4                 |
| (RV-CPIV) / (AN-CPII)                        | 1,35              | 0,02                                 | 0,02            | 6,96                                 | 3                 |
| (RV-CPII) / (AN-CPII)                        | 0,90              | 0,03                                 | 0,02            | 3,90                                 | 4                 |
| <b>IDADE: (180 DIAS)</b>                     |                   |                                      |                 |                                      |                   |
| <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40)</b>          |                   | <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32)</b>   |                 | <b>AGREGADO NATURAL(CP II F40)</b>   |                   |
| <i>Média= 5,81</i>                           |                   | <i>Média= 6,04</i>                   |                 | <i>Média= 5,80</i>                   |                   |
| <i>Desvio padrão= 0,40</i>                   |                   | <i>Desvio padrão= 0,34</i>           |                 | <i>Desvio padrão= 0,08</i>           |                   |
| <i>Coeficiente de variação= 0,07</i>         |                   | <i>Coeficiente de variação= 0,06</i> |                 | <i>Coeficiente de variação= 0,01</i> |                   |
| <i>n=5</i>                                   |                   | <i>n=5</i>                           |                 | <i>n=5</i>                           |                   |
| TESTE                                        | $ X_{mx}-X_{my} $ | $((S_x^2)/n_x)$                      | $((S_y^2)/n_y)$ | $T_{calculado}$                      | Grau de liberdade |
| (RV-CPII) / (RV-CPIV)                        | 0,23              | 0,03                                 | 0,02            | 0,98                                 | 4                 |
| (RV-CPIV) / (AN-CPII)                        | 0,24              | 0,02                                 | 0,00            | 1,54                                 | 4                 |
| (RV-CPII) / (AN-CPII)                        | 0,01              | 0,03                                 | 0,00            | 0,05                                 | 4                 |

| <b>T STUDENT- ABRASÃO PROFUNDA</b>   |                     |                                      |               |                                      |                   |
|--------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------|-------------------|
| <b>(28 DIAS)</b>                     |                     |                                      |               |                                      |                   |
| <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40)</b>  |                     | <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32)</b>   |               | <b>AGREGADO NATURAL(CP II F40)</b>   |                   |
| <i>Média= 460</i>                    |                     | <i>Média= 405</i>                    |               | <i>Média= 441</i>                    |                   |
| <i>Desvio padrão= 48,57</i>          |                     | <i>Desvio padrão= 12,5</i>           |               | <i>Desvio padrão= 14,48</i>          |                   |
| <i>Coeficiente de variação= 0,11</i> |                     | <i>Coeficiente de variação= 0,03</i> |               | <i>Coeficiente de variação= 0,03</i> |                   |
| <i>n=5</i>                           |                     | <i>n=4</i>                           |               | <i>n=5</i>                           |                   |
| TESTE                                | $ (X_{mx}-X_{my}) $ | $(S_x^2/n_x)$                        | $(S_y^2/n_y)$ | $T_{calculado}$                      | Grau de liberdade |
| (RV-CPII) / (RV-CPIV)                | 55,00               | 471,81                               | 39,06         | 2,43                                 | 4                 |
| (RV-CPIV) / (AN-CPII)                | 36,00               | 39,06                                | 41,93         | 4,00                                 | 3                 |
| (RV-CPII) / (AN-CPII)                | 19,00               | 471,81                               | 41,93         | 0,84                                 | 4                 |
| <b>(180 DIAS)</b>                    |                     |                                      |               |                                      |                   |
| <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40)</b>  |                     | <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32)</b>   |               | <b>AGREGADO NATURAL(CP II F40)</b>   |                   |
| <i>Média= 496</i>                    |                     | <i>Média= 537</i>                    |               | <i>Média= 504</i>                    |                   |
| <i>Desvio padrão= 39,59</i>          |                     | <i>Desvio padrão= 27,78</i>          |               | <i>Desvio padrão= 45,24</i>          |                   |
| <i>Coeficiente de variação= 0,08</i> |                     | <i>Coeficiente de variação= 0,05</i> |               | <i>Coeficiente de variação= 0,09</i> |                   |
| <i>n=5</i>                           |                     | <i>n=5</i>                           |               | <i>n=5</i>                           |                   |
| TESTE                                | $ (X_{mx}-X_{my}) $ | $(S_x^2/n_x)$                        | $(S_y^2/n_y)$ | $T_{calculado}$                      | Grau de liberdade |
| (RV-CPII) / (RV-CPIV)                | 41,00               | 313,47                               | 154,35        | 1,90                                 | 4                 |
| (RV-CPIV) / (AN-CPII)                | 33,00               | 154,35                               | 409,33        | 1,39                                 | 3                 |
| (RV-CPII) / (AN-CPII)                | 8,00                | 313,47                               | 409,33        | 0,30                                 | 3                 |

| <b>T STUDENT- ENSAIO DE FLEXÃO (28 DIAS)</b> |                     |                                     |               |                                     |                   |
|----------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------|---------------|-------------------------------------|-------------------|
| <b>IDADE: (28 DIAS)</b>                      |                     |                                     |               |                                     |                   |
| <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40)</b>          |                     | <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32)</b>  |               | <b>AGREGADO NATURAL(CP II F40)</b>  |                   |
| <b>Média= 3,77</b>                           |                     | <b>Média= 5,38</b>                  |               | <b>Média= 4,89</b>                  |                   |
| <b>Desvio padrão= 0,46</b>                   |                     | <b>Desvio padrão= 0,94</b>          |               | <b>Desvio padrão= 0,63</b>          |                   |
| <b>Coeficiente de variação= 0,12</b>         |                     | <b>Coeficiente de variação=0,17</b> |               | <b>Coeficiente de variação=0,13</b> |                   |
| <b>n=5</b>                                   |                     | <b>n=5</b>                          |               | <b>n=4</b>                          |                   |
| TESTE                                        | $ (X_{mx}-X_{my}) $ | $(S_x^2/n_x)$                       | $(S_y^2/n_y)$ | $T_{calculado}$                     | Grau de liberdade |
| (RV-CPII) / (RV-CPIV)                        | 1,61                | 0,04                                | 0,18          | 3,44                                | 4                 |
| (RV-CPIV) / (AN-CPII)                        | 0,49                | 0,18                                | 0,10          | 0,93                                | 4                 |
| (RV-CPII) / (AN-CPII)                        | 1,12                | 0,04                                | 0,10          | 2,98                                | 3                 |
| <b>IDADE: (180 DIAS)</b>                     |                     |                                     |               |                                     |                   |
| <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP II F40)</b>          |                     | <b>RESÍDUO DE VIDRO (CP IV 32)</b>  |               | <b>AGREGADO NATURAL(CP II F40)</b>  |                   |
| <b>Média= 2,83</b>                           |                     | <b>Média= 5,93</b>                  |               | <b>Média= 7,1</b>                   |                   |
| <b>Desvio padrão= 0,33</b>                   |                     | <b>Desvio padrão= 0,90</b>          |               | <b>Desvio padrão= 0,57</b>          |                   |
| <b>Coeficiente de variação= 0,11</b>         |                     | <b>Coeficiente de variação=0,15</b> |               | <b>Coeficiente de variação=0,08</b> |                   |
| <b>n=5</b>                                   |                     | <b>n=5</b>                          |               | <b>n=5</b>                          |                   |
| TESTE                                        | $ (X_{mx}-X_{my}) $ | $(S_x^2/n_x)$                       | $(S_y^2/n_y)$ | $T_{calculado}$                     | Grau de liberdade |
| (RV-CPII) / (RV-CPIV)                        | 3,10                | 0,02                                | 0,16          | 7,23                                | 4                 |
| (RV-CPIV) / (AN-CPII)                        | 1,17                | 0,16                                | 0,06          | 2,46                                | 4                 |
| (RV-CPII) / (AN-CPII)                        | 4,27                | 0,02                                | 0,06          | 14,50                               | 3                 |