UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

LAERTE MELO BARROS

Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado

São Carlos
2016

LAERTE MELO BARROS

VERSÃO CORRIGIDA ORIGINAL DA UN IDADE

Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Bellini Ferreira

São Carlos

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

B277c

Barros, Laerte Melo
Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado / Laerte Melo Barros; orientador Eduardo Bellini Ferreira. -- São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais e Área de concentração Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.). -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Concreto. 2. Construção civil. 3. Agregados. 4. Alta resistência. 5. Pó de vidro. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LAERTE MELO BARROS.**

Título da tese: "Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado".

Data da defesa: 17/10/2016.

Comissão Julgadora:	Resultado:
Prof. Dr. **Eduardo Bellini Ferreira** **(Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	Aprovado
Prof. Associado **Rafael Salomão** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Dr. **Libânio Miranda Pinheiro** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Dr. **Márcio Raymundo Morelli** (Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)	APROVADO
Prof. Dr. **Bruno Luis Damineli** (Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos/IAU)	APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:
Prof. Titular **Antonio José Felix de Carvalho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Aos meus pais e minha família,

por todo amor e carinho

Agradecimentos

Qualquer trabalho, por menor que seja, não é obra de uma única pessoa. Este não teria sido possível se não fosse a ajuda de vários profissionais e pessoas especiais que direta e indiretamente somaram um pouco de seus valores. Quero expressar os meus agradecimentos:

Ao meu professor orientador, Prof. Eduardo Bellini Ferreira, pela seriedade e dedicação com que conduziu as diversas etapas da pesquisa. Obrigado pela confiança, pela orientação cuidadosa, levando-me a ultrapassar limites e avançar na pesquisa até a sua conclusão. E que este seja o começo de várias outras pesquisas.

À minha família, minha filha Rebeca e a minha querida esposa Juliana, minha companheira e eterna namorada, pelo incentivo, compreensão, cumplicidade e carinho, sem palavras para expressar o apoio.

Aos meus pais João (em memória) e Olenina pela formação que me deram, e a todos os meus irmãos que de alguma forma sempre me incentivaram através de conversas e orações.

Agradeço a um grande incentivador, meu amigo Dr. Carlos Benedito Santana de Silva Soares, por me estimular desde o início do curso.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM, em particular aos colegas da Gerência Educacional e aos estagiários do curso de Construção Civil.

Aos professores das disciplinas que cursei no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia e Materiais da EESC-USP.

Aos colegas de Pós-Graduação e do Grupo de Engenharia de Materiais Vítreos: Marcelo, Raúl, Roger e José.

Aos colegas de profissão pelas conversas e diversas trocas de informações: Leonardo Martins da KonKrex Engenharia de Concreto, Júlio Magalhães da Protege Engenharia, Djalma Bentes da UNINORTE, Anderson Osório da ArtConsto e Pedro Liotto do Centro de Instrução de Guerra na Selva.

Aos meus alunos de iniciação científica no IFAM: André Pascoal, Thiago Barros e Vinícius Albuquerque pela incansável ajuda na moagem de vidro, produção dos concretos e realização dos ensaios.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LAMEV), do Departamento de Engenharia de Materiais, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), e seu Laboratorista Wagner.

Ao Laboratório de Materiais de Construção e Resistência dos Materiais, do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM), em particular aos colegas Engenheiros Rubervan Magalhães, José Evangelista e Daniel.

Ao Laboratório de Análises Minerais (LAMIN) - MA e Laboratório de Microscopia Eletrônica (LAMEV) - BE da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), pelo auxílio na realização de alguns ensaios.

Ao Laboratório do Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas UFAM, ao Professor Dr. Raimundo Humberto Lima, a Prof. Drª Carina Michelin e ao Laboratorista Alfredo.

Ao Instituto de Desenvolvimento de Tecnologia (INDT), e seu pesquisador Edson Francisco Medeiros.

À Secretaria de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Materiais na pessoa do Sr. Victor Barioto pela eficiência nas informações das atividades do Programa, e a todos os funcionários que me apoiaram durante minha passagem por esta Escola de Engenharia.

À CAPES pela concessão de bolsa na fase final da pesquisa, através do Programa de Formação Doutoral.

Ao CeRTEV – Centro de Pesquisa, Tecnologia e Educação em Materiais Vítreos, e a FAPESP (Processo nº 2013 / 07793-6)

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), por subsidiar as bolsas de iniciação científica.

E meu eterno agradecimento a Deus pela sua infinita misericórdia.

Resumo

BARROS, L. M. **Concreto de alta resistência a partir de matérias-primas amazônicas e vidro reciclado.** 202p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

O concreto é um dos materiais mais utilizados pela indústria da construção civil. Apesar de novos materiais terem entrado no setor da construção, ele não perdeu o seu valor devido as suas boas propriedades mecânicas, baixo custo e a alta flexibilidade construtiva. O concreto é responsável por uma parcela significativa do impacto humano ao meio ambiente, mas apesar de tudo é um dos materiais mais empregados e importantes da atualidade. A necessidade em agregar valor à grande quantidade de resíduos gerados no mundo é uma oportunidade para inclusão de novos materiais na formulação dos concretos, em substituição aos tradicionais. Quando as matérias-primas naturais são substituídas por resíduos sólidos, vários benefícios são alcançados, como a conservação dos recursos naturais, minimização da eliminação inadequada de rejeitos e liberação de áreas para fins mais nobres. Resíduos de vidro podem ser considerados como potenciais componentes do concreto e a sua utilização na produção dos mesmos impede a sua simples disposição em aterros. Dependendo do tamanho da partícula e da proporção de vidro utilizada na produção de concreto, comportamentos opostos podem ser observados: i) a reação álcali sílica relacionada a efeitos negativos de expansão, e ii) a reação pozolânica que melhora a resistência mecânica. Com a finalidade de promover o uso sustentável das matérias-primas amazônicas na construção civil de Manaus, foram produzidos concretos convencionais empregando-se seixo de rio e brita granítica como agregados graúdos, levando-se em conta fatores como disponibilidade regional e melhores características mecânicas. Os resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral entre os concretos produzidos com os dois tipos de agregados não apresentaram diferenças significativas. Com os resultados da pesquisa para o concreto convencional, realizou-se o desenvolvimento de concretos de alta resistência. Nesta fase, a pesquisa avaliou o efeito de resíduos de vidro moído em adição ou substituição ao cimento Portland na resistência mecânica de concretos, através de ensaios de compressão axial e tração por compressão diametral aos 7, 14, 21, 28 e 90 dias de cura, como resultado da atividade pozolânica do pó de vidro abaixo de 75 μm. O nível mais adequado de substituição do cimento por pó de vidro foi de 10%, que apresentou acréscimo de resistência à compressão axial de 69 MPa para 71 MPa aos 90 dias em comparação ao concreto convencional, enquanto que as misturas com adição

de vidro apresentaram crescimento em praticamente todas as idades, comparadas à mistura de controle. A pesquisa também avaliou o desempenho de misturas com substituição e adição de sílica ativa, que apresentaram melhores resultados de resistência em relação às misturas contendo apenas pó de vidro reciclado. Os resultados obtidos mostraram que tanto o vidro em pó quanto a sílica têm efeito significativo na resistência do concreto.

Palavras-chave: concreto, resíduos, pozolânica, alta resistência, vidro.

Abstract

BARROS, L. M. **High strength concrete from Amazonian raw materials and recycled glass**. 202p. Thesis (Doctorate). Graduate Program in Materials Science and Engineering, School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos.

Concrete is one of the materials most used by the construction industry. Although new materials entered the construction industry, it did not lose its value due to its good mechanical properties, low cost and high constructive flexibility. Concrete is responsible for a significant portion of the human impact on the environment, but it is one of the most used and important materials nowadays. The need to add value to the large amount of waste generated in the world is an opportunity to include new materials in the formulation of concrete instead of traditional ones. When natural raw materials are replaced by solid waste, several benefits are achieved, such as conserving natural resources, minimizing the improper disposal of waste, and releasing areas for nobler purposes. Glass waste can be considered as potential components of the concrete and its use in the production of these prevents its simple disposal in landfills. Depending on the particle size and the glass ratio used in concrete production, opposite behaviors can be observed: i) the silica alkali reaction related to negative expansion effects, and ii) the pozzolanic reaction that improves mechanical strength. In order to promote the sustainable use of Amazonian raw materials in the civil construction of Manaus, conventional concretes were produced by using river pebbles and granite gravel as large aggregates, taking into account factors such as regional availability and better mechanical characteristics. The results of axial compressive strength and diametral compression traction between the concretes produced with the two types of aggregates did not present significant differences. With the results of the research for the conventional concrete, the development of concrete of high resistance was carried out. In this phase, the research evaluated the effect of ground glass residues on addition or substitution to Portland cement in the mechanical strength of concretes, through axial compression and diametral compression traction at 7, 14, 21, 28 and 90 days of cure, as a result of the pozzolanic activity of the glass powder below 75 μm. The most adequate level of substitution of cement by glass powder was 10%, which presented increase of axial compressive strength from 69 MPa to 71 MPa at 90 days in comparison to conventional concrete, while the mixtures with glass added showed growth at almost all ages, compared to the control mix. The research also evaluated the performance of mixtures with substitution and addition of active silica, which presented better resistance

results compared to mixtures containing only recycled glass powder. The results showed that both glass and silica have a significant effect on the strength of the concrete.

Keywords: concrete, waste, pozzolanic, high strength, glass.

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

ASTM	American Society for Testing and Materials
ACI	American Concrete Institute
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
Abividro	Associação Brasileira das Indústrias de Vidro
AIE	Agência Internacional de Energia
a/c	Relação água/cimento
a/ag	Relação água/aglomerante
CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
CP	Cimento Portland
CNQ	Confederação Nacional do Ramo Químico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C_2S	Silicato dicálcico
C_3S	Silicato tricálcico
C_3A	Aluminato tricálcico
C_4AF	Ferro-aluminato tetracálcico
DRX	Difratometria de rios X
Fck	Resistência característica do concreto à compressão
EB	Especificação Brasileira
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EDS	Espectrometria por dispersão de energia
FAPEAM	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FRX	Fluorescência de raios X
GCC	Grupo Cementos de Chihuahua
IFAM	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas
LAMEV	Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura
LAMIN	Laboratório de Análises Minerais
MEV	Microscopia eletrônica de varredura

MPa	MegaPascal
NM	Norma Mercosul
m_{sat}	Massa saturada
m_s	Massa seca
m_i	Massa imersa
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PDF	Powder Diffraction File
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
T_f	Temperatura de fusão
T_g	Temperatura de transição vítrea
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
UNINORTE	Centro Universitário do Norte
Σ	Tensão
WBCSD	World Business Council for Sustainable Initiative

Sumário

1 Introdução 29

2 Revisão bibliográfica 35

2.1 Vidro 35

2.2 Definição de vidro 36

2.3 Estado vítreo 37

2.4 Panorama do vidro no mercado nacional e internacional 39

2.5 As indústrias do cimento e do vidro versus desenvolvimento sustentável 44

2.6 Cimento Portland 47

2.7 Aditivos químicos 51

2.8 Adições minerais 58

2.9 Sílica ativa 61

2.10 Pó de vidro 62

2.11 Agregado 62

2.12 Compatibilidade entre aditivos e cimentos 67

2.13 Água 68

2.14 Concretos 68

2.15 Concreto de alta resistência 69

2.16 Concreto de alta resistência versus concreto de alto desempenho 71

2.17 Microestrutura do CAD 72

3 Materiais e métodos 75

3.1 Pó de vidro 76

3.2 Cimento Portland 78

3.3 Pó de sílica 79

3.4 Agregados 80

3.5 Glenium 51 81

3.6 Tec-flow 83
3.7 Recover 83
3.8 Pesquisa de campo 84
3.9 Difratometria de raios X do pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland 85
3.10 Difratometria de raios X da areia, seixo e brita 86
3.11 Granulometria a laser 87
3.12 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) 89
3.13 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland 91
3.14 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras fraturadas de concreto .. 92
3.15 Caracterizações complementares 92
3.16 Ensaios mecânicos 94
3.17 Produção de concretos convencionais 94
3.18 Dosagem 95
3.19 Produção de concretos 95
3.20 Moldagem dos corpos de prova 96
3.21 Ensaios de resistência à compressão axial 98
3.22 Ensaios de resistência à tração por compressão diametral 98
3.23 Ensaio de porosidade e massa específica 100
3.24 Análise pela estatística de Weibull 101
3.25 Dosagem do alta resistência com substituição/adição de pó de vidro e pó de sílica103
3.26 Produção de concretos de alta resistência 103
3.27 Moldagem dos corpos de prova 104
3.28 Ensaios de resistência à compressão axial 104
4 Resultados e discussão 107
4.1 Pesquisa de campo 107
4.2 Difratometria de raios X 109

4.3 Pó de vidro 109
4.4 Cimento Portland 111
4.5 Areia, seixo e brita 114
4.6 Granulometria à laser 114
4.7 Espectrometria de fluorescência de raios X 118
4.8 Caracterização química do vidro 119
4.9 Caracterização química do cimento Portland 120
4.10 Caracterização química do pó de sílica 120
4.11 Microscopia eletrônica dos agregados finos 121
4.12 Vidro 124
4.13 Sílica 125
4.14 Cimento Portland 127
4.15 Caracterização do cimento 129
4.16 Agregados 130
4.17 Dosagem concreto convencional 134
4.18 Ensaios de resistência à compressão axial 135
4.19 Ensaios de resistência à tração por compressão diametral 137
4.20 Análise estatística de Weibull 138
4.21 Concreto de alta resistência 145
4.22 Dosagem 145
4.23 Consistência dos concretos 146
4.24 Resistência à compressão axial 147
4.25 Resistência à tração por compressão diametral 154
4.26 Porosidade 161
4.27 Microscopia eletrônica de varredura das amostras fraturadas 166
5 Conclusões 175
6 Referências bibliográficas 177

7 Apêndices 191

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação bidimensional: (a) composto hipotético com arranjo cristalino simétrico e periódico (b) rede do vidro de mesma composição, em que fica caracterizada a ausência de simetria e periodicidade. 36
Figura 2 - Variação do volume específico de um material em função da temperatura. 38
Figura 3 - Variação do volume e T_g em função da temperatura e taxa de resfriamento. 39
Figura 4 - Demanda mundial de vidro planos em 2011 (MONTANO e BASTOS, 2014). 40
Figura 5 - Produção de vidros por segmento (CNQ, 2015). 42
Figura 6 - Fases que acontecem com o aquecimento da matéria-prima do clínquer (adaptado de ISAIA, 2005). 50
Figura 7– a cadeia polar hidrofílica do aditivo é adsorvida na superfície da partícula de cimento (b) partículas de cimento floculadas; (c) dispersão das partículas após a adição do superplastificante (AÏTCIN, 2000). 55
Figura 8 - (a) adsorção das moléculas do superplastificante; (b) superfícies afastadas induzem forças repulsivas. 57
Figura 9 - (a) repulsão decorrente do arranjo dos átomos nas moléculas do superplastificante adsorvido nas partículas de cimento; (b) inibição de alguns locais reativos. 57
Figura 10 - (a) Forma dos grãos do agregado (b) arredondamento. Adaptado de (POWERS, 1953). 64
Figura 11 - Forma de distribuições granulométricas de agregados. 66
Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental 75
Figura 13 - Moinhos: (a) modelo Contenco; (b) modelo Servitech. 77
Figura 14 - Separação do material: (a) procedimento de peneiramento; (b) fracionamento das amostras. 77
Figura 15 - Forma de armazenamento das amostras de vidro e sílica em sacos de papel e de plástico 78
Figura 16 – Sacos de 50 kg do cimento Portland Nassau CP IV- 32 78
Figura 17– Embalagem da sílica em pó, saco de 20 kg. 79
Figura 18 - Origem dos agregados: (a) Areia de terra firme, jazida Arco Iris a 120 km de Manaus; (b) Brita granítica, Jazida Figueiredo a 150 km de Manaus. 81
Figura 19 - Efeito da defloculação dos grãos de cimento (a) sistema floculado (aglutinado) (b) sistema defloculado (disperso) (AÏTICIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994). 82

Figura 20 - Preparação das amostras para difratometria de raios X: (a) amostras pulverizadas; (b) amostra prensada. 85
Figura 21 - Difratômetro de raios X modelo X´Pert Pro MPD 86
Figura 22 - (a) moagem dos materiais; (b) materiais ajustados aos porta-amostras. 87
Figura 23 - Granulômetro a laser 89
Figura 24 - Preparação das amostras para fluorescência de raios X: (a) pesagem das amostras; (b) equipamento de prensagem. 90
Figura 25 - Fluorescência de raios X: (a) amostras prensadas; (b) espectrômetro WDS sequencial. 91
Figura 26: Ensaio de abatimento do concreto: (a) preparação para lançamento das camadas; (b) determinação da medida de abatimento. 96
Figura 27: Procedimentos de moldagem: (a) aplicação de óleo mineral (b) moldagem e adensamento dos corpos de prova. 97
Figura 28: Procedimentos de desmoldagem: (a) identificação (b) cura saturada. 97
Figura 29: Ensaio de tração por compressão diametral: (a) amostra sob o efeito de carga (b) amostra após o rompimento. 100
Figura 30: Procedimentos de moldagem: (a) aplicação de óleo mineral (b) moldagem e adensamento vibratório dos corpos de prova. 104
Figura 31 - Consumo de concretos das obras pesquisadas com diferentes resistências aos 28 dias na cidade de Manaus. 107
Figura 32: Consumo de concreto das centrais pesquisadas com diferentes resistências aos 28 dias na cidade de Manaus. 108
Figura 33 - Difratograma da amostra de pó de sílica. 110
Figura 34 - Difratograma da amostra de cimento Portland 111
Figura 35 - Difratograma da amostra de cimento Portland 112
Figura 36 - Difratograma da amostra de cimento Portland 113
Figura 37 - Difratograma de raios X: (a) areia, (b) brita; e (c) seixo. 114
Figura 38 - Distribuição granulométrica do pó de vidro. 115
Figura 39 - Distribuição granulométrica do pó de sílica. 116
Figura 40 - Distribuição granulométrica do cimento Portland 117
Figura 41 - Gráfico comparativo entre os volumes das partículas de pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland. 117
Figura 42 - Gráfico comparativo entre as composições granulométricas do pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland. 118

Figura 43 - Comparação entre os teores dos principais componentes do pó de sílica informados pelo fabricante, empresa GCC, e obtidos por FRX no presente trabalho. 121
Figura 44 – Micrografias das matérias-primas. 122
Figura 45–Micrografias das matérias-primas utilizadas. As marcas numeradas indicam as posições onde foram realizadas análise por EDS. 124
Figura 46 - Micrografia da amostra de cimento Portland MEV/EDS-USP. 127
Figura 47 - Gráfico da curva granulométrica da areia. 132
Figura 48 - Gráfico comparativo de granulometria da brita e do seixo 133
Figura 49 – Tensões de ruptura em compressão uniaxial de concretos com diferentes f_{ck} (20 e 25 MPa), em função da idade: (a) concretos produzidos com seixo, (b) concretos produzidos com brita. 136
Figura 50 – Tensões de ruptura em tração por compressão diametral, em função da idade no rompimento: (a) seixo e brita, fck = 20 MPa; (b) seixo e brita, fck = 25 MPa. 138
Figura 51 - Determinação das funções estatísticas do módulo de Weibull para as misturas de seixo e brita para 20 Mpa aos 28 dias 143
Figura 52 - Determinação das funções estatísticas do módulo de Weibull para as misturas de seixo e brita para 25 MPa aos 28 dias. 143
Figura 53 - Resultado dos testes de consistência: (a) Misturas de substituição; (b) Misturas de adição 147
Figura 54 - Resistência à compressão axial de concretos com diferentes proporções de vidro e sílica em substituição ao cimento Portland, em função do tempo de cura. (a) misturas M_1 e M_2. (b) misturas M_1 e M_3. 149
Figura 55 - Resistência à compressão axial de concretos com diferentes proporções de vidro e sílica em substituição ao cimento Portland, em função do tempo de cura: (a) misturas M_1 e M_4; (b) misturas M_1 e M_5 150
Figura 56 - Resistência à compressão axial de concretos com diferentes proporções de vidro e sílica adicionadas ao concreto além da proporção de cimento Portland, em função do tempo de cura: (a) misturas M_1 e M_6; (b) misturas M_1 e M_7. 151
Figura 56 - Resistência à compressão axial de concretos com diferentes proporções de vidro e sílica adicionadas ao concreto além da proporção de cimento Portland, em função do tempo de cura: (a) misturas M_1 e M_6; (b) misturas M_1 e M_7. 152
Figura 57 - Tensão de ruptura por compressão axial de concretos com diferentes níveis de adição e substituição de vidro e sílica aos 90 dias. 154

Figura 58 - Tensão de ruptura por compressão diametral de misturas com diferentes proporções de substituição e adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função de tempo de cura. 156
Figura 58 - Tensão de ruptura por compressão diametral de misturas com diferentes proporções de substituição e adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função de tempo de cura. 157
Figura 58 - Tensão de ruptura por compressão diametral de misturas com diferentes proporções de substituição e adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função de tempo de cura. 158
Figura 59 - Resultado dos ensaios de tensão por compressão diametral de todas as misturas aos 90 dias de rompimento. 159
Figura 60 - Porosidade de misturas com diferentes proporções de substituição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função do tempo de cura. 162
Figura 61 - Porosidade de misturas com diferentes proporções de adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função do tempo de cura. 163
Figura 62 - Massa específica de misturas com diferentes proporções de substituição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função do tempo de cura. 165
Figura 63 - Massa específica de misturas com diferentes proporções de adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função do tempo de cura. 165
Figura 64 - Imagem da microestrutura de concreto com 10% de pó de vidro e 90 dias de cura. 166
Figura 65 - Imagem da mistura de concreto aos 7 dias com 10% vidro 168
Figura 66 - Microestrutura do concreto com substituição de 10% de pó vidro e 90 dias de cura 169
Figura 67 - Microestrutura de concreto convencional com 90 dias de cura 170
Figura 68 - Mapeamento químico da superfície fraturada da mistura de concreto com 10% de substituição de pó de vidro. Onde: (a) apresenta a micrografia da superfície fraturada; (b) a sobreposição dos elementos químicos; e (c), (d), (e), (f), (g), (h) e (i) o mapeamento individual dos elementos alumínio, cálcio, enxofre, ferro, magnésio, sílica e sódio, respectivamente. 171
Figura 69 - Imagem da microestrutura de concreto com 10% de pó de vidro e 90 dias de cura. 172
Figura 70 - Mapeamento químico para o elemento sódio. 172
Figura 71 - Imagem da partícula de vidro 173

Figura 72 - Mapeamento químico (a) sobreposição de elementos; (b)mapeamento químico individual. 173
Figura 73 - Detalhe da reação da partícula de vidro e massa de hidratação do cimento. 174

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Consumo de vidros planos no Brasil 44
Tabela 2 - Composição dos principais minerais do clínquer 48
Tabela 3 - Óxidos presentes no clínquer 49
Tabela 4 - Classificação dos concretos quanto à resistência mecânica. 69
Tabela 5. Classes de resistência dos concretos estruturais 70
Tabela 6 - Espessura das amostras de vidro plano utilizadas. 76
Tabela 7 - Características químicas da sílica 79
Tabela 8 - Características físicas da sílica 80
Tabela 9 - Dados técnicos do Glenium 51 82
Tabela 10 - Dados técnicos do Tec-Flow 7000. 83
Tabela 11 - Resumo dos dados técnicos do Recover 84
Tabela 12 - Condições das análises granulométricas a laser. 88
Tabela 13 - Compostos cristalinos identificados no pó de sílica 110
Tabela 14 - Compostos cristalinos identificados no cimento CP IV Z - 32 112
Tabela 15 - Compostos cristalinos de Lizardita e a Brownmillerita identificados no cimento CP IV Z - 32 113
Tabela 16 - Compostos cristalinos Birnessita e Caolinita identificados no cimento CP IV Z 113
Tabela 17 - Análises químicas (% massa) por fluorescência de raios X. 119
Tabela 18 - Análise química por fluorescência de raios X; elementos traços. 119
Tabela 19 - Classificação pela norma ASTM C618-5 como pozolana silicosa. 121
Tabela 20 - Composições químicas do vidro MEV/EDS - CPRM - BELÉM 124
Tabela 21 - Comparação entre as composições químicas principais do vidro 125
Tabela 22 - Composições químicas da sílica MEV/EDS - CPRM - BELÉM 126
Tabela 23 - Comparação entre as composições químicas principais da sílica 126
Tabela 24 - Composições químicas do cimento Portland MEV/EDS - USP 128
Tabela 25 - Composições químicas do cimento Portland MEV/EDS - CPRM - BELÉM 128
Tabela 26 - Comparação entre as composições químicas principais de cimento Portland 129
Tabela 27 - Características físicas do cimento utilizado 130
Tabela 28 - Características da areia, brita e seixo usados na produção dos concretos 131
Tabela 29 - Granulometria do agregado miúdo - areia 131

Tabela 30 - Granulometria do agregado graúdo - brita..... 133
Tabela 31 - Granulometria do agregado graúdo - seixo..... 134
Tabela 32 - Dosagem dos materiais usados na produção dos concretos com seixo - f_{ck} = 20 e 25 MPa..... 135
Tabela 33 - Resultados da análise estatística de Weibull – Seixo (f_{ck} = 20MPa) – 28 dias... 140
Tabela 34 - Resultados da análise estatística de Weibull – Brita (f_{ck} = 20MPa) - 28 dias 140
Tabela 35 - Resultados da análise estatística de Weibull – Seixo (f_{ck} = 25MPa) - 28 dias ... 141
Tabela 36 - Resultados da análise estatística de Weibull – Brita (f_{ck} = 25MPa) - 28 dias 141
Tabela 37–Resumo dos resultados de resistência mecânica utilizados para a estatística de Weibull..... 142
Tabela 38 - Dosagem dos materiais usados na produção dos concretos de alta resistência adicionados com pó de vidro e pó de sílica 146
Tabela 39 – Consistência de diferentes misturas para concreto..... 147
Tabela 40 – Tensão de ruptura em compressão axial (MPa)de misturas contendo pó de vidro e sílica ativa em substituição e adição ao cimento Portland..... 148
Tabela 41 – Variação (%) da resistência à compressão axial de misturas contendo pó de vidro e sílica ativa em substituição e adição ao cimento Portland. 148
Tabela 42 - Tensão de ruptura em tração por compressão diametral (MPa) de misturas contendo pó de vidro e sílica ativa em substituição e adição ao cimento Portland. 155
Tabela 43 - Variação (%) da resistência à tração por compressão diametral de misturas contendo pó de vidro e sílica ativa em substituição e adição ao cimento Portland. 155

1 Introdução

O concreto é o material mais utilizado pela indústria da construção civil no mundo. É um sólido artificial que se molda à criatividade do homem para construção de casas de alvenaria, rodovias, pontes, edifícios, torres de resfriamento, usinas hidrelétricas e nucleares, obras de saneamento, plataformas petrolíferas, etc. No Brasil, embora novos materiais tenham sido utilizados no setor da construção, o concreto não perdeu seu valor. Estima-se que as concreteiras tenham produzido 51 milhões m³ de concreto em 2013 e atingirão 73,3 milhões m³ em 2017 (ABCP, 2013).

O concreto é um material compósito constituído essencialmente de um aglutinante, como o cimento Portland, agregados e água. O agregado é um material granular, como britas, seixos, ou resíduos de construção e demolição. De acordo com a NBR 7211, o termo agregado graúdo se refere a partículas de diâmetro maior que 4,75 mm (peneira de n° 4), e o termo agregado miúdo se refere-se às partículas de agregados de diâmetro entre 75 μm (peneira de n° 200) e 4,75 mm.

O concreto é responsável por uma parcela significativa do impacto humano ao meio ambiente. Aproximadamente uma tonelada de dióxido de carbono é lançada na atmosfera para cada tonelada de cimento produzida, além da grande quantidade de recursos naturais e da demanda energética para produzi-lo. Apesar de todo o impacto, o concreto é um dos materiais de construção mais empregados e importantes da atualidade, sendo produzidas mais de 10 bilhões de toneladas deste material por ano no mundo (MEYER, 2009).

A produção do cimento Portland é altamente poluente e consumidora de energia. Contribui com 5% a 8% das emissões globais de gás carbônico (CO_2) na atmosfera e é responsável por 3% do total do consumo de matéria-prima do planeta. Com relação ao consumo de energia, o cimento é responsável por mais de 90% da energia total necessária para a produção do concreto e perde apenas para as produções de alumínio e ferro (MEHTA e MONTEIRO, 2008); (NAIK, 2005).

No Brasil, em 2013, o consumo aparente de cimento apresentou crescimento de 2,4% em massa. O parque industrial nacional, com a inauguração de novas fábricas e o aumento da capacidade de unidades já existentes, permitiu que o consumo atingisse o patamar de 71,0 milhões de toneladas, o que significa um consumo per capita de 353 kg/ano. Estava previsto para o segundo semestre de 2014 o início do projeto Mapeamento Tecnológico do Cimento no Brasil, coordenado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e pela

Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e com apoio do World Business Council for Sustainable Initiative (WBCSD) e da Agência Internacional de Energia (IEA), cuja proposta era mapear tecnologias existentes e potenciais que pudessem auxiliar a indústria do cimento. Com horizonte até 2050, o projeto buscaria melhorar a eficiência energética da produção de cimento no país, além de reduzir a emissão de resíduos e seus efeitos, respondendo a uma demanda crescente por cimento e contribuindo efetivamente para a substituição parcial ou total das matérias-primas naturais utilizadas na produção do concreto (SNIC, 2013).

O consumo aparente de cimento apresentou uma queda nos últimos anos, atingindo o patamar de 59,7 milhões de toneladas em julho de 2016. O Mapeamento Tecnológico do Cimento teve início em setembro de 2014 e terá a sua primeira etapa finalizada no primeiro semestre de 2017, contando com o apoio de mais de 90% dos produtores de cimento do país (SNIC, 2016), fornecendo assim um cenário preciso sobre o consumo de cimento no país.

Uma das maneiras de reduzir os impactos da produção de concreto é a diminuição do consumo de cimento Portland, não pela simples redução do consumo do concreto em si, que implicaria outros problemas, mas através da substituição do cimento por outros materiais, como é o caso de resíduos e subprodutos de processos industriais, resíduos da construção civil e da agricultura.

Um dos componentes do cimento são os materiais pozolânicos, que reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água em temperatura ambiente, com propriedades cimentícias. A disponibilidade de materiais pozolânicos hoje no mercado não é suficiente para suprir as demandas crescentes da indústria da construção civil, que assim procura alternativas tanto para cimentos como para pozolanas. O uso de pozolana originária de fontes recicláveis tem demonstrado ser uma alternativa vantajosa para a sustentabilidade aplicada à indústria da construção civil, pois representa o uso de fontes energéticas que seriam desperdiçadas em aterros ou disposições finais impróprias. O uso de materiais recicláveis na forma de pozolana é uma alternativa para melhorar o desempenho de compósitos cimentícios e reduzir custos de materiais. Os elevados níveis de emissão de CO_2 durante a produção do *clínquer* do cimento Portland podem ser minimizados com a adição de pozolanas, cimentícias ou não, com foco na produção de concretos sustentáveis (NAIR, FRAAIJ, *et al.*, 2008).

O desenvolvimento humano, a inovação tecnológica, o uso e o reuso equilibrado de recursos disponíveis é o modelo a ser buscado por qualquer setor industrial, ou seja, a cadeia produtiva da construção civil tem novos objetivos a serem cumpridos, além de ter que adotar uma nova postura em sua estrutura organizacional, empresarial e política.

A necessidade de agregar valor aos resíduos gerados no mundo é uma abertura para utilização de materiais em substituição ao cimento, tanto na produção de concretos como na de argamassas, com a finalidade de criar mais alternativas no uso de materiais de construção.

Em qualquer localidade do mundo, o cimento Portland e o aço são utilizados em praticamente todas as obras de construção civil. Em países como o Brasil, onde a matéria-prima na maioria das vezes é tida como abundante, há uma relativa resistência ao uso de materiais ditos não convencionais.

Vários estudos foram realizados nas últimas décadas sobre a aplicação de resíduos de vidro em concretos (SOROUSHIAN, 2012); (BHANDARI e TAJNE, 2013). A reciclagem de materiais tem se tornado uma prática comum. À medida que as formas convencionais de energia vêm se esgotando, novas matrizes energéticas devem ser inseridas no mercado consumidor e a utilização de novos materiais bem como a reciclagem de materiais representam formas alternativas muito significativas de economia de energia.

A eliminação dos resíduos de vidro apresenta-se como um problema em várias cidades do Brasil. Tradicionalmente tais resíduos são provenientes de origens e setores diversos, mas principalmente das indústrias de embalagens e construção civil e, na prática, após utilização, são dispostos em aterros, misturados a outros resíduos. Embora não sejam biodegradáveis e não gerarem resíduos tóxicos, a disposição de resíduos de vidro em aterros sanitários não é uma solução ambientalmente correta, pois isso representa desperdício de matéria-prima e energia, e aumento da necessidade de espaço para disposição.

A adição ou substituição parcial de cimento Portland por pó de vidro no concreto pode ser considerada uma solução vantajosa e de grande impacto na sustentabilidade das indústrias da construção civil e vidreira. Seus benefícios estão relacionados à otimização do uso de matéria-prima e do consumo de energia. As atividades da construção civil serão mais sustentáveis quando incorporam resíduos de outras indústrias ou de outros setores da própria construção civil ao seu processo construtivo e de produção, pois os impactos ambientais associados ao processamento de materiais reciclados são menores que aqueles associados à extração e ao processamento usuais (CORDEIRO, 2006).

Os resíduos de vidro vêm de uma variedade de fontes, fábricas de fibras de vidro, indústria de embalagens, indústria automobilística, construção civil e até de centros de reciclagem, podendo ter composições químicas diferentes devido a suas diferentes aplicações. A maioria dos vidros pode ser utilizada em concretos se adequadamente atenuados os efeitos danosos de sua adição a argamassas e concretos. A pressão causada no concreto pela expansão do gel de silicato que se forma do contato do vidro com a umidade no ambiente

alcalino do concreto pode ser maior que a resistência à tração do mesmo, possibilitando o aparecimento de microfissuras danosas ao concreto armado, pois expõe as barras de aço estruturais à oxidação. Não de forma simples, vidro tem sido usado como substituto de agregados em concretos, mas os resultados não têm sido satisfatórios devido aos efeitos de expansão e redução de resistência decorrentes da forte reação álcali-sílica que ocorre entre o cimento e o vidro (JOHNSTON, 1974). Estudos têm demonstrado que o tamanho das partículas é um fator determinante para a reação entre o cimento e a sílica contida no vidro, que depende da área de superfície das partículas (CHEN, HUANG, *et al.*, 2006); (FEDERICO e CHIDIAC, 2009), (FEDERICO e CHIDIAC, 2009).

Atualmente, Manaus experimenta um momento de grandes transformações em virtude do crescimento horizontal e vertical da cidade. De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016), a cidade de Manaus concentra mais de 50% da população do estado Amazonas. O Pólo Industrial de Manaus contribui com o maior PIB gerado no Estado. Das cidades brasileiras, é a sexta maior economia do País (IBGE, 2013). Esses números representam uma significativa demanda por infraestrutura básica como moradias, transporte, saneamento básico, energia e outros, que afetam diretamente a indústria da construção civil e a utilização de materiais oriundos de recursos naturais.

Entretanto, resíduos de vidro podem ser considerados potenciais componentes do concreto e sua reutilização impediria assim o desperdício causado pela disposição simples no aterro sanitário de Manaus, dada a inviabilidade econômica do transporte até outros centros recicladores.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012) no relatório de pesquisa sobre o Diagnóstico de Resíduos Sólidos Urbanos, a estimativa da concentração gravimétrica de vidro nos resíduos coletados nas cidades brasileiras é de 2,4%. Em Manaus, segundo a Secretaria Municipal de Limpeza Pública (SEMULSP, 2014), a entrada diária de resíduos sólidos no aterro sanitário correspondeu a 2.654,5 toneladas, existindo assim um desperdício anual de aproximadamente 23.253 toneladas de resíduos de vidro que poderiam ser reutilizados em forma de pó finamente moído em substituição ou adição ao cimento Portland.

Pelo exposto, a presente pesquisa teve por objetivos: a) caracterizar materiais comuns utilizados na produção de concretos em Manaus; b) produzir concretos convencionais com diferentes relações água/cimento, contendo também diferentes proporções de agregados de procedência das regiões vizinhas à cidade de Manaus; c) submeter os corpos de prova resultantes a ensaios mecânicos de compressão e tração (via compressão diametral),

determinando-se a resistência do material em função das proporções dos componentes adicionados; d) selecionador os melhores materiais, considerando-se a sua qualidade e disponibilidade na cidade de Manaus; e e) com os resultados da pesquisa para o concreto convencional, realizar um estudo experimental visando o desenvolvimento de concretos de alta resistência com substituição de cimento por pó de vidro reciclado. Para avaliação dos resultados, amostras foram submetidas a ensaios mecânicos em diferentes idades e a análises microestruturais.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Vidro

O vidro é um material que acompanha a humanidade desde seus primórdios. Acredita-se que os primeiros vidros foram produzidos intencionalmente pelo Homem com a finalidade de adorno por volta de 3.500 A.C., provavelmente na Síria[1]. No século 1 na costa sírio-judaica houve uma grande revolução na arte de produzir objetos de vidro com a invenção da técnica de sopro, que consiste em colher uma porção de vidro fundido na extremidade de um tubo e soprar na outra, dando origem a uma peça oca, tornando mais fácil a produção de frascos e recipientes em geral. O uso de recipientes de vidro se disseminou no Império Romano. A produção de vidro transparente foi descoberta por volta do ano 100 D.C., na Alexandria, com a adição de dióxido de magnésio. A partir daí, vidros relativamente planos passaram a ser utilizados por arquitetos romanos em janelas, deixando passar luminosidade para o interior das casas de famílias abastadas. Placas eram fabricadas a partir de formas ocas e alongadas, obtidas por sopro, cortadas longitudinalmente e esticadas enquanto o vidro ainda se mantinha viscoso. Até hoje se utiliza a técnica do sopro para moldar diversos tipos de embalagens (SMITH, 1964).

Segundo Doremus (1973) , o primeiro espelho confeccionado com vidro teria sido feito na França por volta de 1685, fazendo com que o monopólio na produção de vidros planos ou laminados estabelecido em Veneza passasse gradativamente à França.

De acordo com Akerman (2000) em 1665, na França de Luiz XIV foi criada a companhia que viria a ser chamada de Saint Gobain, com a finalidade de produzir vidros para espelhos, diminuindo a dependência de Veneza. A tecnologia do sopro veneziana foi substituída por uma nova metodologia, que consistia em despejar a massa líquida para fabricação de vidro em uma grande mesa metálica e por cima passar um rolo, dando forma fina e plana à peça. Mas esse vidro deveria ser posteriormente polido, pois sua superfície era bastante irregular, antes de ser destinado a espelhos.

Nos séculos XVIII, XIX e XX, com a Revolução Industrial e o desenvolvimento da física e da química, a indústria vidreira cresceu bastante, tanto quanto aos processos de fabricação, que passaram a ser automáticos e intensivos, quanto à aplicação do vidro, que pela redução considerável de preço deixou de ser um artigo de luxo.

---

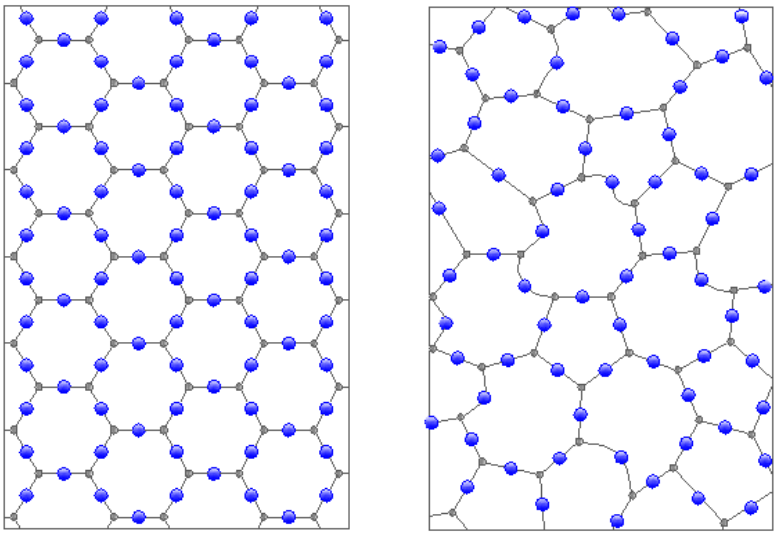
[1]https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_glass

2.2 Definição de vidro

Os vidros tradicionais pertencem à classe de materiais cerâmicos. Dentre suas aplicações estão recipientes, lentes, fibras de vidro, tanto para reforço como em comunicação, janelas e fachadas de prédios. Os vidros mais comuns são produzidos a base de sílica e contém outros óxidos, especialmente CaO, Na_2O, K_2O e Al_2O_3, que definem suas propriedades. Suas principais características são a transparência óptica e a relativa facilidade com a qual podem ser fabricados (CALLISTER, 2008).

Lebedev (1921), na tentativa de explicar a estrutura dos vidros, propôs a Hipótese do Cristalino, classificando os vidros como um produto inorgânico fundido que atinge por resfriamento uma condição rígida, sem que ocorra cristalização.

Com a publicação do artigo "The atomicarrangement in glass", Zachariasen (1932) estabeleceu a teoria estrutural para formação de vidros por fusão/resfriamento, propondo um arranjo atômico estendido em uma rede tridimensional, com forças interatômicas comparáveis às do cristal de mesma composição, mas com ausência de simetria e periodicidade de longo alcance (ou seja, várias distâncias interatômicas). A Figura 1 representa, em um esquema bidimensional, o arranjo cristalino, simétrico e periódico de um cristal e a rede assimétrica e aperiódica de um vidro de mesma composição.



(a) **(b)**

Figura 1 - Representação bidimensional: (a) composto hipotético com arranjo cristalino simétrico e periódico (b) rede do vidro de mesma composição, em que fica caracterizada a ausência de simetria e periodicidade.

Materiais cristalinos possuem átomos distribuídos periodicamente e regularmente no espaço, Figura 1 (a), e são anisotrópicos, ou seja, suas propriedades dependem significativamente da orientação cristalográfica.

Por sua vez, os vidros apresentam isotropia e distribuição atômica irregular, como observado na Figura 1 (b). Os vidros apresentam semelhanças com dois estados da matéria, líquido (no que se refere à estrutura atômica) e sólido (no que se refere à rigidez dos átomos na estrutura). Também apresentam escoamento viscoso, observada em altas pressões. O estado vítreo é a combinação do tempo de rigidez curto, característico dos elementos cristalinos, e o tempo de fluidez longo, dos líquidos (RAO, 2002).

Por vários anos, foi válida a definição de vidro como sendo um material inorgânico, baseado principalmente em sílica, resfriado sem cristalização para uma condição rígida, formando uma rede tridimensional com ausência de simetria e periodicidade.

Para Alves, Gimenez e Mazali (2001) a natureza química do material não pode ser usada como critério para definir vidro, pois, embora a maioria dos vidros seja formada por compostos inorgânicos, contendo sílica em sua formulação, existem vidros metálicos e vidros orgânicos que hoje são bastante conhecidos.

Zarzycki (1991) definiu vidro como um sólido não cristalino que exibe o fenômeno de transição vítrea. Atualmente essa é a definição mais aceita no meio científico. Essa definição considera o aspecto fenomenológico, pois nem todo sólido não cristalino apresenta o fenômeno de transição vítrea, assim como o aspecto estrutural, pois afirma que o vidro é um material não cristalino.

2.3 Estado vítreo

Tradicionalmente a maioria dos vidros é obtida pelo método de fusão-resfriamento, que envolve a fusão dos componentes em altas temperaturas, depois submete-se a massa fundida a um processo de resfriamento rápido o suficiente para impedir a cristalização. Durante o resfriamento o material pode passar por dois processos distintos: o de transição vítrea e da cristalização (DOREMUS, 1973); (ARAÚJO, 1997).

Com a diminuição rápida da temperatura, se toda a massa fundida passar pela transição vítrea, haverá a formação de um vidro. Porém, se a diminuição da temperatura for bastante lenta ocorrerá formação de cristais.

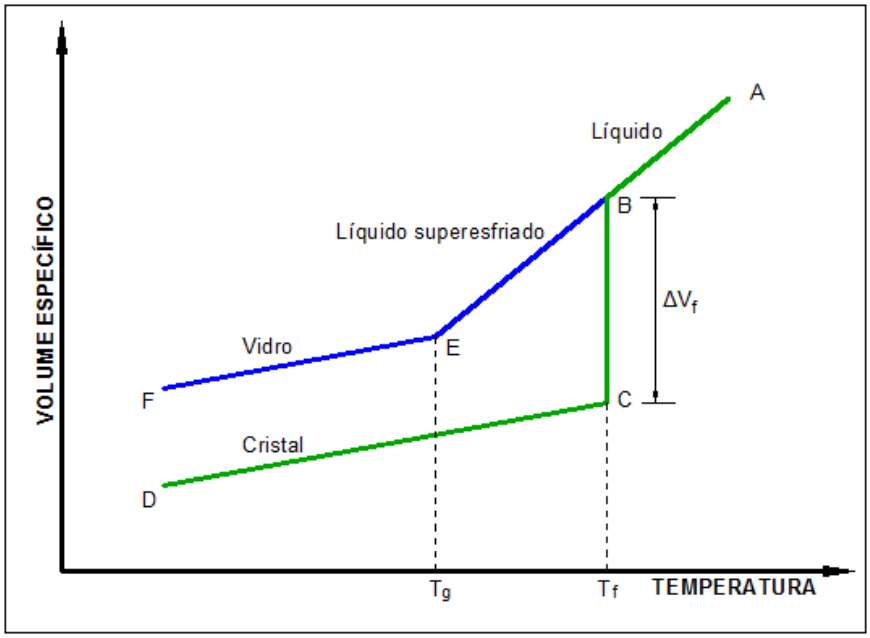


Figura 2 - Variação do volume específico de um material em função da temperatura.

No equilíbrio, os materiais apresentam uma temperatura característica de fusão, em que o material estará totalmente líquido acima dessa temperatura. Pode-se definir também uma temperatura de solidificação, em que o material estará totalmente sólido abaixo dela. Materiais com fusão congruente, ou seja, em que o líquido tem a mesma composição do sólido, a fusão ou solidificação ocorre em uma mesma temperatura $\mathbf{T_f}$, como na Figura 2. Nessa figura, no ponto **A** o material é um líquido estável, com um determinado volume específico, porém, à medida que se resfria, o arranjo interno dos átomos se modifica. Quando chega ao ponto **B**, ou seja, na temperatura de fusão ou solidificação, o material pode seguir caminhos diferentes, dependendo da taxa de resfriamento. Sendo a taxa de resfriamento baixa, ocorrerá cristalização em $\mathbf{T_f}$. Nesse caso, faz-se necessário um determinado intervalo de tempo até que as unidades atômicas ou moleculares se orientem e atinjam posições regulares específicas para a formação de um cristal. O volume diminuirá drasticamente em **BC**, sem variação de temperatura devido a perda de calor latente. A diminuição do volume específico compensa a perda de calor em consequência do arranjo atômico. O cristal formado segue então por **CD**, onde o sólido se contrai com a queda de temperatura não mais devido a rearranjos atômicos, mas sim devido à contração térmica. Voltando ao ponto **B**, sendo a taxa de resfriamento suficientemente alta, não haverá tempo para que os átomos ou moléculas se organizem para formar cristais, então se obtém um líquido super-resfriado, passando o material do estado líquido de equilíbrio para um estado de instabilidade. Ao longo de **BE**, a

viscosidade do material aumenta com o decréscimo da temperatura. Para alguns materiais, no ponto **E** a viscosidade é tão alta que impossibilita a movimentação de átomos ou moléculas para rearranjo atômico. Essa temperatura é chamada de transição vítrea, e a partir dela, no resfriamento, embora o material continue com uma estrutura atômica amorfa, característica de líquidos, o comportamento do material é o de um sólido elástico, denominado vidro.

A temperatura de transição vítrea depende da taxa de resfriamento, Figura 3, e, portanto, do método empregado para sua determinação. $\mathbf{T_g}$ não é um ponto fixo, mas um intervalo de temperaturas onde ocorre a transição do estado viscoso de um líquido super-resfriado, para um estado onde não se observa mais relaxação estrutural, característico de um sólido elástico. Convencionalmente, $\mathbf{T_g}$ é definido como o valor limite de temperatura abaixo do qual não se observa mais relaxação estrutural. Pode-se observar que uma determinada massa de vidro que sofreu resfriamento rápido ocupa maior volume, por ter tido menos chance de se organizar, apresentando então menor densidade, quando comparada ao mesmo vidro submetido a um resfriamento mais lentamente.

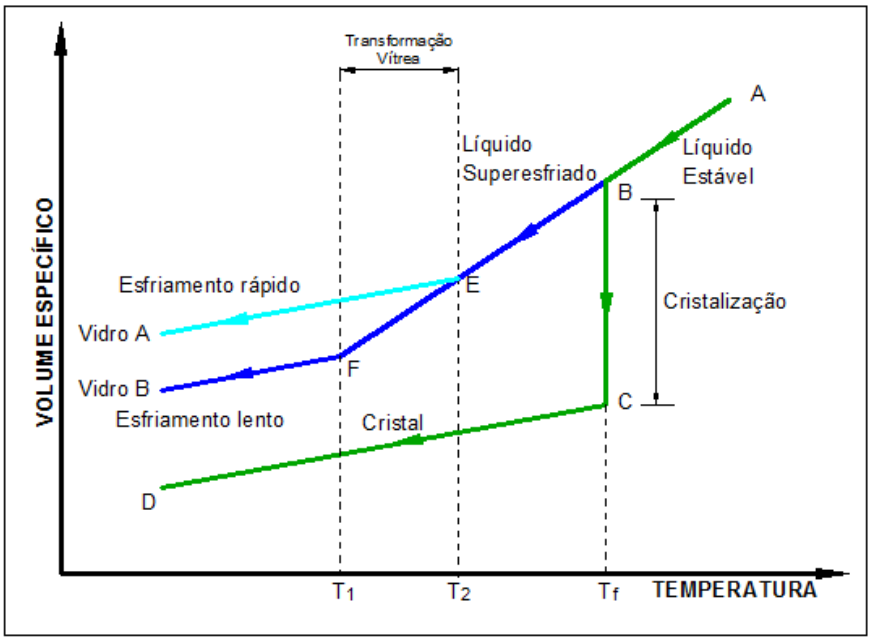


Figura 3 - Variação do volume e $\mathbf{T_g}$ em função da temperatura e taxa de resfriamento.

2.4 Panorama do vidro no mercado nacional e internacional

Quando analisamos a dinâmica da economia mundial, o crescimento do mercado de vidro plano é maior nos países em desenvolvimento, nos quais existe maior potencial de crescimento dos mercados consumidores. A América do Norte e a Europa são mercados

maduros, com um consumo *per capita* de cerca de 14 kg e 8,5 kg de vidro plano por ano, respectivamente. Por outro lado, regiões como a Ásia e a América do Sul ainda registram baixo consumo *per capita*, na ordem de 4 kg e 6 kg por ano, respectivamente (MONTANO e BASTOS, 2014).

No cenário mundial os principais produtores de vidro são Japão, China, Estados Unidos e alguns países da União Europeia, em especial Alemanha, França, Itália, Bélgica, Espanha e Portugal. O mais rápido e acentuado crescimento de mercado tem acontecido na China, que tem mostrado maior aquecimento da demanda em função da indústria automotiva e da construção civil em geral. As informações disponíveis sobre a China revelavam expansão da produção, principalmente nas regiões sul e leste do país, com destaque para o segmento de vidro plano (ROSA, COSENZA e BARROSO, 2007).

A China, os Estados Unidos e a União Europeia juntos representam 75% da demanda mundial de vidro plano. Nesses países os mercados podem ser classificados como maduros no que se refere ao consumo de vidro plano, motivo pelo qual a maior parte da demanda nesses três mercados é voltada para produtos de maior valor agregado. A China, que representava na década de 1990 1/5 da demanda mundial, hoje corresponde à metade do mercado global de vidros planos, conforme se pode observar na Figura 4 (MONTANO e BASTOS, 2014).

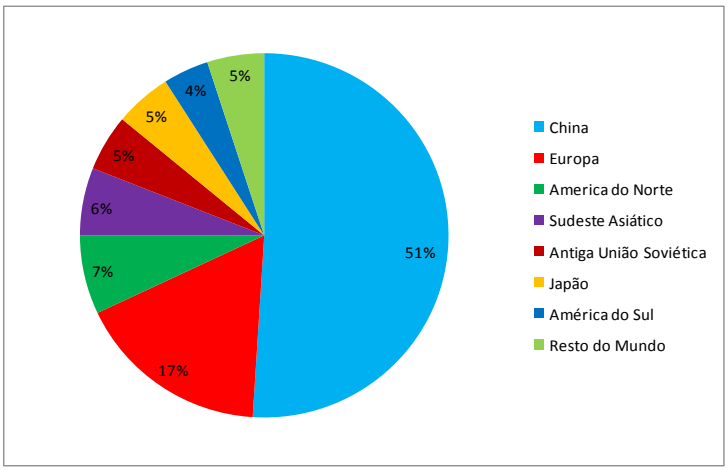


Figura 4 - Demanda mundial de vidro planos em 2011 (MONTANO e BASTOS, 2014).

Uma planta de produção de vidro plano pelo método *float*, denominado vidro *float* por simplicidade, necessita de um investimento de capital muito elevado e, dependendo de seu tamanho, da região em que será implantada, da qualidade e da complexidade do produto que será fabricado, pode representar um investimento que varia entre 60 a 200 milhões de euros. Depois de entrar em operação, a planta deve funcionar diariamente e sem interrupções durante toda sua vida útil de, em média, entre dez e quinze anos. Após esse período a estrutura deverá

ser total ou parcialmente substituída, a um valor de reconstrução entre 30 a 50 milhões de euros. Para se tornar viável economicamente, deve atingir taxa de ocupação, capacidade de produtividade, em torno de 75% (NSGGROUP, 2011).

Setorialmente, cerca de 90% de todo o vidro *float* produzido no mundo é consumido pelo mercado da construção civil. Esse percentual pode ser distribuído igualmente entre a construção de novas edificações e a realização de reformas e ampliações. Já a indústria automobilística consumiu cerca de 3,7 milhões de toneladas de vidro, dos quais 80% foram utilizados na fabricação de veículos novos e 20% foram para o mercado de reposição (MONTANO e BASTOS, 2014).

O setor de vidro pode ser definido como um oligopólio homogêneo. É dominado por grupos que atuam internacionalmente, dentre os quais os japoneses AGC e NSG, o francês Saint-Gobain e o norte americano Guardian, todos com unidades no Brasil. Estima-se que 80% da produção mundial de vidro sejam provenientes de empresas multinacionais pertencentes a esses grupos, enquanto os outros 20% são divididos entre pequenas e médias empresas regionais (ROSA, COSENZA e BARROSO, 2007).

Os principais mercados consumidores do vidro plano são a construção civil e a indústria automobilística, mas existem outros consumidores de menor escala, como os de eletrodomésticos e móveis, setores cuja demanda também é ligada à construção civil, tendo em vista que a oferta de novos espaços habitacionais e, principalmente, residenciais tem reflexo direto na sua aquisição. Na construção civil, o vidro pode ser utilizado em portas, janelas, fachadas e no interior de prédios residenciais e comerciais, tanto na construção de novas unidades quanto para reposição em reformas e ampliações. A utilização de vidros nos empreendimentos transmite um aspecto de modernidade aos imóveis. Seu uso de forma apropriada permite maior aproveitamento da iluminação natural, proporcionando economia no uso de energia elétrica e a adesão a práticas de sustentabilidade ambiental, o que representa outra forte tendência de mercado. O comportamento do mercado é utilizar cada vez mais esse material nos empreendimentos imobiliários, tanto por questões estéticas quanto por questões econômicas e ambientais (MONTANO e BASTOS, 2014).

De modo geral, o setor vidreiro no Brasil é voltado ao atendimento do consumo interno. Similarmente ao que ocorre no mercado mundial, a oferta também é concentrada em poucas empresas, a maioria controlada por capital estrangeiro. Esses fabricantes fornecem vidro para as indústrias da construção civil, automobilística, moveleira, de eletrodomésticos e eletrônicos, de alimentos e de bebidas, entre outras, e atendem também o consumo de

utilidades domésticas nos mercados residencial e institucional (ROSA, COSENZA e BARROSO, 2007) .

No país o mercado vidreiro foi impulsionado pelo crescimento da renda e por sua melhor distribuição, bem como pelo aumento da oferta de crédito e de seu acesso por uma grande parte da população brasileira. Esses setores revelaram uma dinâmica mais forte nos anos de 2012, 2013 e 2014, porém as perspectivas para os anos de 2015 e 2016 são de grande queda do setor devido à diminuição de vendas do setor imobiliário, da construção civil e de automóveis.

No Brasil a indústria de vidros divide-se em setores de acordo com a fabricação do produto e concentra as suas atividades nos segmentos de vidros planos e domésticos. Entre os anos de 2007 a 2011 a produção apresentou crescimento de 27%. Do total de vidros produzido em 2011, 51% corresponderam a vidros planos, 36% a domésticos, 8% a embalagens e 5% a vidros especiais, Figura 5.

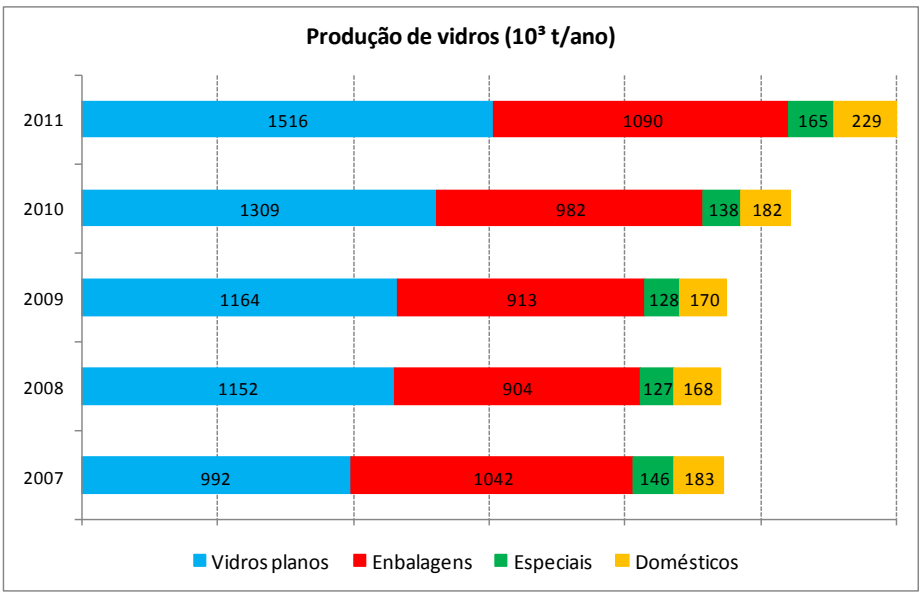


Figura 5 - Produção de vidros por segmento (CNQ, 2015).

Os vidros planos são produzidos em forma de chapas e posteriormente podem ser cortados e processados. Neste setor encontram-se os vidros lisos e os vidros impressos ou vidros fantasia, que apresentam uma das faces com desenhos em relevo, bastante empregado nas obras de construção civil por ser um vidro translúcido, não transparente.

No grupo das embalagens de vidro encontram-se os potes, utilizados para acondicionar alimentos, as garrafas dos diversos tipos de bebidas e os frascos, empregados na embalagem de produtos não alimentícios como medicamentos e cosméticos.

Vidros especiais ou técnicos correspondem às fibras e lãs de vidro, empregados na indústria têxtil e na construção civil como isolante térmico e acústico, os tijolos e blocos de vidro, utilizados na construção civil para iluminação de ambientes internos e composições de fachadas, ampolas para garrafas térmicas, vidros para tubos de imagem, isoladores elétricos de vidro, e as ampolas para medicamentos.

Nos vidros domésticos estão incluídos aqueles usados como louças de mesa, copos, pratos, xícaras, todos os utensílios usados na mesa e culinária e objetos de decoração.

As empresas vidreiras precisam manter uma constante e crescente preocupação com aspectos ligados à qualidade do vidro, segurança e questões relacionadas à sustentabilidade. Isso resulta num dilema para as empresas desse segmento, já que, ao desenvolver vidros com maior resistência física, isolação térmica e acústica, e menor peso, junto coma pressão dos principais clientes por menor preço, reduzem o volume total negociado sem a equivalente agregação de valor ao produto final (ROSA, COSENZA e BARROSO, 2007).

Os principais clientes de vidros planos na construção civil são os transformadores, que tornam o vidro bruto em produto final, e os grandes distribuidores, que fazem a ligação com as pequenas vidraçarias espalhadas por todo o país. No setor automobilístico, os principais clientes são as montadoras, que mantêm contratos estratégicos de fornecimento de longo prazo com os principais grupos que atuam nesse mercado (ROSA, COSENZA e BARROSO, 2007).

Até pouco tempo atrás, a indústria nacional de vidro *float* era composta apenas por duas empresas. Contudo, essa configuração mudou com a entrada de novos participantes no mercado. Essa mudança no padrão de concorrência não ocorreu por acaso, as empresas foram atraídas pela expansão consistente da demanda nos últimos anos (MONTANO e BASTOS, 2014). O segmento de vidros planos teve aumento na produção com a instalação de novas fábricas, uma de capital nacional em Pernambuco em 2013, a Cia Brasileira de Vidros Planos (CBVP), e uma nova unidade da Cebrace na Bahia em 2014. Porém, devido a baixa atividade econômica vivida pelo Brasil nos anos de 2015 e 2016 o consumo aparente de vidros planos teve baixa de 9,9% em 2015. É a primeira queda de consumo registrada no país nos últimos 9 anos, quando teve início o Programa Panorama Abravidro em 2006, Tabela 1.

Tabela 1 - Consumo de vidros planos no Brasil (m³t/ano)

Período	Temperado	Laminado	Tampo, curvo, etc.	Espelho	Insulado	Automotivo comum e outros	Total
2013	632.944	157.290	105.632	138.091	8.569	932.820	1.975.346
2014	663.357	169.319	102.600	143.149	9.922	897.208	1.985.555
2015	623.912	163.523	102.195	126.901	7.269	764.207	1.788.007

Fonte: (ABRAVIDRO, 2016)

Além da areia, fonte de sílica (SiO_2), outra importante matéria-prima para a fabricação do vidro é a barrilha, nome comercial do carbonato de sódio (Na_2CO_3), que é uma substância alcalina, de cor branca, em forma de pó. A barrilha é um produto higroscópico, que absorve umidade lentamente quando exposto à atmosfera, causando aglomeração do produto, não é inflamável, nem explosiva, e é utilizada como agente fundente na indústria do vidro. A sílica é encontrada de forma abundante em todo território nacional, porém a barrilha não tem produção nacional, o que torna necessária sua importação. Não configura risco para a indústria do vidro, devido ao poder de barganha dos conglomerados multinacionais e a sua capacidade de repassar aumentos nos custos para seus clientes (MORAN, 2008).

A fabricação de vidro pode ser classificada como intensiva em energia, considerando que consome, por tonelada, cerca de 1,8 milhão de kcal de energia térmica na fusão, o que equivale a cerca de 200 m^3 de gás, e cerca de 200 kWh/t de energia elétrica em outras etapas do processo (ROSA, COSENZA e BARROSO, 2007).

O gás natural, utilizado no aquecimento do forno, depois de ligado, deve ser mantido aquecido ininterruptamente. Comparado com um conjunto de 23 países, o gás natural consumido pela indústria brasileira está entre os mais caros do mundo. Enquanto a tarifa média dos países analisados é de 14,35 US$/MMBtu, a tarifa média paga no Brasil é 17,3% superior, calculada em 16,84 US$/MMBtu. Essa tarifa ficou abaixo do valor registrado em apenas seis deles – Alemanha, Estônia, Eslováquia, Eslovênia, Hungria e República Tcheca (FIRJAN, 2011).

2.5 As indústrias do cimento e do vidro versus desenvolvimento sustentável

A industrialização em conjunto com a rápida urbanização proporcionou uma melhoria no padrão de vida da humanidade, e trouxe consigo uma série de problemas, sendo o gerenciamento de resíduos sólidos domésticos e indústriais um desses inconvenientes. A

eliminação de resíduos sólidos é um dos grandes dificuldades nas grandes capitais do mundo, incluindo-se nessa lista as do Brasil.

Existe uma evidente relação estabelecida entre a riqueza de um país e a sua geração de resíduos. Países desenvolvidos produzem um grande volume de resíduos, mas nesse processo existe um efeito positivo, pois a própria tecnologia favorece o uso desses resíduos produzidos através do uso eficiente de outras tecnologias. É necessário adaptar e introduzir as chamadas tecnologias limpas para minimizar a geração de resíduos, e produzir os mesmos ou outros produtos melhores com menos matéria-prima natural e menor consumo de energia (ROJAS, FRÍAS e MARÍN, 2006).

Vários benefícios são alcançados quando um gerenciamento de resíduos sólidos é realizado adequadamente. Se a maioria dos resíduos gerados pela indústria da construção civil fosse reutilizada de forma adequada em substituição aos resíduos sólidos naturais, benefícios como a conservação dos recursos, eliminação da disposição inadequada de resíduos e liberação de espaços em aterros sanitários seriam alcançados de forma imediata (BHANDARI e TAJNE, 2013).

Embora novos materiais tenham entrado no setor da construção civil, o cimento não perdeu o seu valor. Aplicado na produção de concreto, o cimento apresenta boas propriedades mecânicas, baixo preço, alta durabilidade e grande flexibilidade de uso. Quando comparado a outros materiais, apresenta expressiva vantagem.

O Brasil é responsável por 1,7% da produção mundial de cimento. É o 8º maior produtor mundial. O setor é operado por 12 grupos empresariais que têm plantas industriais espalhadas por 23 estados da Federação mais o distrito federal, totalizando 75 unidades produtivas, sendo 51 plantas integradas e 24 unidades só de moagem. Está prevista a construção de pelo menos 15 novas plantas integradas até 2014, o que aumentará consideravelmente a capacidade produtiva do parque nacional (SNIC, 2008). Apesar da queda de crescimento nos anos de 2011 e 2012, o cimento apresentou alta no consumo aparente de 2,4%, com 71 milhões de toneladas consumidas em todo território nacional, representando um consumo per capita de 353 kg/hab/ano (SNIC, 2013).

Foi proposto para o segundo semestre de 2014 o início do projeto Mapeamento Tecnológico do Cimento no Brasil, coordenado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC) e pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), e com apoio do World Business Council for SustainableInitiative (WBCSD) e da Agência Internacional de Energia (AIE). A proposta desse estudo é mapear tecnologias existentes e potenciais que possam auxiliar a indústria do cimento, com horizonte até 2050, buscando melhorar a

eficiência energética no país, além de reduzir a emissão de resíduos e seus efeitos, respondendo às demandas cada vez mais frequentes, contribuindo efetivamente para a substituição parcial ou o aparecimento de novas matérias-primas utilizadas na produção do concreto (SNIC, 2013).

A produção do cimento Portland é um processo altamente poluente e que consome bastante energia, contribuindo com cerca de 5% a 8% das emissões globais de gás carbônico (CO_2) na atmosfera. A produção de uma tonelada de cimento emite uma tonelada de dióxido de carbono. Além disso, a indústria do cimento é responsável por 3% do total do consumo de matérias-primas no mundo. Com relação ao consumo de energia, o cimento é responsável por mais de 90% da energia total necessária para a produção de concreto (GARTNER, 2004); (NAIK, 2005).

Por sua vez, o vidro é um material 100% reciclável. Em princípio, a mesma unidade de vidro pode ser aproveitada inúmeras vezes, constituindo uma grande vantagem do ponto de vista ambiental, não só pela economia de matérias-primas, como também pela menor geração de resíduos sólidos urbanos (CNQ, 2015). Segundo estimativas da Associação Brasileira das Indústrias de Vidro (Abividro), a utilização de 10% de cacos na fabricação do vidro significa ganho energético de 4% e redução de 5% nas emissões de CO_2.

Os resíduos de vidro vêm de uma variedade de fontes, fábricas de fibras de vidro, indústria de engarrafamento, indústria automobilística, construção civil e até de centros de reciclagem, podendo ter composições químicas diferentes devido às suas diferentes aplicações. A maioria dos vidros pode ser utilizada em concretos se adequadamente atenuados os efeitos da reação álcali-sílica, que resulta na formação de um silicato na forma de gel, causando expansões indevidas nos concretos. A pressão causada por essa expansão é maior que a resistência à tração do concreto, possibilitando o aparecimento de microfissuras, principalmente nos concretos armados, expansões que são extremamente danosas às barras de aço dos elementos estruturais, por sofrerem oxidação com a exposição à atmosfera. Muitos esforços têm sido direcionados para o uso do vidro como substitutos dos agregados em concretos, mas os resultados alcançados não têm sido satisfatórios, devido aos efeitos de expansão e redução da resistência em argamassas e concretos decorrentes da forte reação álcali-sílica que ocorre entre o cimento e o vidro (JOHNSTON, 1974).

Todos os vidros de silicato, independente de sua composição química, geram uma reação pozolânica quando adicionados ao concreto, porém produzem também grandes quantidades de compostos de sódio, que se depositam na superfície, na forma de eflorescências, e internamente criam um ambiente altamente alcalino, promovendo reações

álcali-sílica que favorecem os efeitos de expansão que podem destruir a peça (JIN, MEYER e BAXTER, 2000).

Várias pesquisas sobre o uso de vidro como agregados graúdos e miúdos em substituição aos agregados naturais em concretos vêm sendo realizadas, mas os melhores resultados até o momento foram alcançados com a utilização de vidro como substituto do cimento (BHANDARI e TAJNE, 2013). Por ser um material amorfo e possuir um elevado teor de sílica, o vidro apresenta condições favoráveis para a reação pozolânica, maximizada quando o vidro em pó tem partículas de tamanho igual ou menor que 75 µm (KOU e XING, 2012). O elevado teor de sódio é a preocupação para a utilização de vidros no concreto, mas estudos demonstraram que o vidro finamente moído não contribui para a reação álcali-sílica (SHAYAN e XU, 2004); (BHANDARI e TAJNE, 2013).

As características que influenciam o comportamento pozolânico da maioria dos aditivos minerais e do vidro são a granulometria fina e a quantidade de substituição no cimento (SCHWARZ, CAM e NEITHALATH, 2008). A reatividade pozolânica do vidro e a sua utilização ainda são objetos de muitas pesquisas, mas ainda não existe consenso sobre os benefícios de sua utilização (M.KHATIB, NEGIM, *et al.*, 2012); (SOUNTHARARAJAN e SIVAKUMAR, 2013); (BHANDARI, DHALE, *et al.*, 2014).

A reutilização de resíduos de vidro não só ajudaria a resolver os problemas associados aos resíduos urbanos, mas também se apresenta como um novo recurso para a indústria do cimento. O vidro não é biodegradável e sua disposição em aterros sanitários não é uma solução satisfatória, pois representa desperdício de matérias-primas e energia, além do aumento do custo da disposição.

2.6 Cimento Portland

O cimento Portland é um cimento hidráulico produzido pela moagem de clínquer composto essencialmente por silicatos de cálcio hidratado e pequenas quantidades de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. O clínquer é um aglomerado de 5 a 25 mm de diâmetro de matérias-primas de determinada composição sinterizado em altas temperaturas (ASTM, 2015).

Segundo Neville (1997) todo material com propriedades adesivas e coesivas, capaz de ligar fragmentos de substâncias minerais entre si de modo a formar um todo compacto, pode ser considerado como cimento.

A Associação Brasileira do Cimento Portland (ABCP, 2013) define o cimento hidráulico como um pó fino, com propriedades aglomerantes e ligantes que enrijece sob a ação da água.

(MEHTA e MONTEIRO, 2008) consideram o cimento Portland um pó cinza de partículas angulares produzidas pela moagem do clínquer, sendo uma mistura heterogênea de vários minerais produzidos em reações a altas temperaturas entre óxido de cálcio, sílica, óxido de ferro e alumina. A composição química dos principais minerais presentes no clínquer do cimento Portland comum está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos principais minerais do clínquer

Composição	**Constituição**	**Sigla**	***Propriedades Tecnológicas***
Silicato tricálcico (alita)	$3CaO.SiO_2$	C_3S	Endurecimento rápido; Alto calor de hidratação; Alta resistência inicial.
β-Silicato dicálcico (belita)	$2CaO.SiO_2$	C_2S	Endurecimento lento; Baixo calor de hidratação; Baixa resistência inicial.
Aluminato tricálcico	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A	Pega muito rápida; Suscetibilidade ao ataque em meios sulfatados; Alto calor de hidratação; Alta retração; Baixa resistência inicial.
Ferroaluminato tetracálcico (celita)	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF	Endurecimento lento; Resistência a meio sulfatado; Pouca contribuição para a resistência.
Cal livre	CaO	C	Aceitável em pequenas quantidades; Altos teores causam expansão e fissuração.
Gipsita	$CaSO_4.2H_2O$		Controlador de pega.

Fonte: (ARMELIN e ISAIA, 1991).

O cimento Portland é composto de vários compostos de cálcio, sendo costume enunciar os óxidos individuais e compostos do clínquer por notações químicas simplificadas, seguindo as abreviações da Tabela 3.

Tabela 3 - Óxidos presentes no clínquer

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	$3CaO.SiO_2$	C_3S
SiO_2	S	$2CaO.SiO_2$	C_2S
Al_2O_3	A	$3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Fe_2O_3	F	$4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF
MgO	M	$4CaO.3Al_2O_3.SO_3$	C_4A_3S
SO_3	S	$3CaO.2SO_3.3H_2O$	$C_3S_2H_3$
H_2O	H	$CaSO_4.2H_2O$	CSH_2

Fonte: (MEHTA e MONTEIRO, 2008)

Segundo Pasquel (PASQUEL, 1996), os componentes do clínquer formam duas fases bem cristalizadas: o silicato tricálcico ou alita ($3CaO.SiO_2$ – C_3S) e o silicato dicálcico ou belita ($2CaO.SiO_2$ – C_2S); uma fase intersticial (líquida à temperatura de climatização): o aluminato tetracálcico ($3CaO.Al_2O_3$ – C_3S); e uma fase menos cristalizada: o ferro aluminato tetracálcico ou celita ($4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ – C_4AF). Quando necessário, areia e minério de ferro são adicionados como corretivos do SiO_2 e Fe_2O_3.

Os compostos C_3S, C_2S e C_3A têm grande influência sobre o desenvolvimento da resistência da pasta de cimento. O C_3S é responsável pela resistência mecânica até os 28 dias de idade. O silicato tricálcico em contato com a água forma uma pasta pouco plástica, que é melhorada com a adição de gipsita, que também influencia a pega e a resistência aos três dias de idade. Esse material se hidrata rapidamente aumentando o calor de hidratação (BAUER, 2005).

Os cimentos com elevado teor de C_2S liberam menos calor. O silicato dicálcico é relativamente estável, hidrata-se lentamente e é responsável pela resistência após os 28 dias (BAUER, 2005).

Segundo Bye (BYE, 1983) o cimento Portland é composto da queima controlada de matérias-primas contendo quatro óxidos principais, CaO, SiO_2, Al_2O_3 e FeO_3, que produzem o clínquer, que é um dos dois ingredientes básicos exigidos para sua fabricação, enquanto o outro é sulfato de cálcio na forma de gesso ($CaSO_4.2H_2O$) ou hemidrato ($CaSO_4.1/2H_2O$) ou

anidrita ou sulfato de cálcio ($CaSO_4$) ou uma mistura de dois ou três desses. Raramente a composição química dos óxidos principais do clínquer é encontrada em um único minério em proporções adequadas, sendo necessário preparar misturas de duas ou mais fontes minerais. O calcário na relação de 75% a 80% e a argila nas proporções de 20% a 25% são matérias-primas comuns do clínquer. Quando a proporção adequada de um determinado componente químico essencial não estiver presente na mistura, aditivos corretivos são utilizados, tais como bauxita, areia e minério de ferro.

As rochas calcárias e as rochas argilosas são as principais constituintes do clínquer. Nas transformações mineralógicas que se processam no interior do forno, as fases mais abundantes são calcita, dolomita, quartzo, plagioclásio, caulinita, biotita, muscovita, hematita, entre outras, que são transformados em minerais metaestáveis em temperaturas superiores a 1000 °C, representados pelos silicatos de cálcio alita e belita e por aluminatos de ferro-cálcicos, além de outros minerais em menores proporções como a cal livre, o periclásio e sulfatos alcalinos diversos, Figura 6.

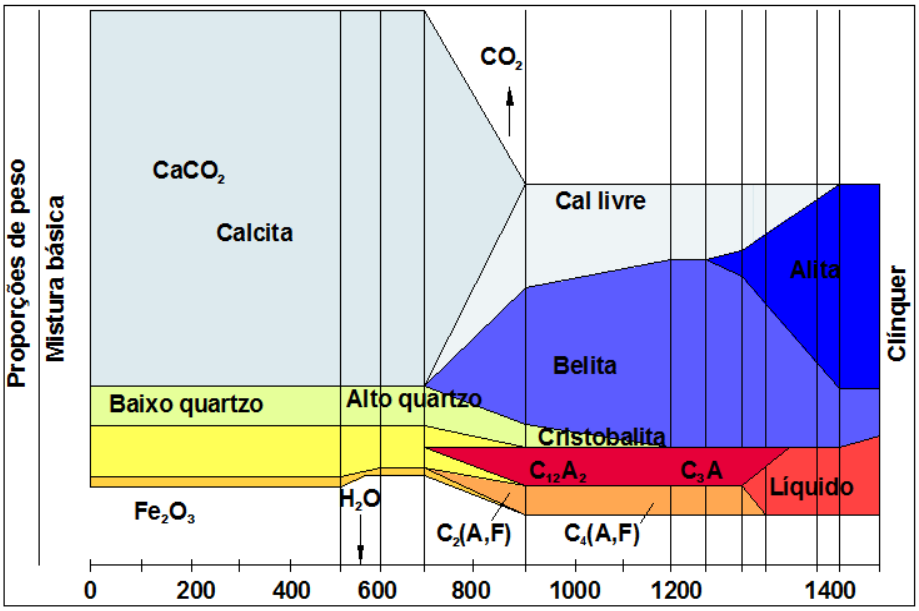


Figura 6 - Fases que acontecem com o aquecimento da matéria-prima do clínquer (adaptado de ISAIA, 2005).

O clínquer é um material com muitas fases e bastante complexo. Suas características e propriedades dependem da composição da matéria-prima moída e do processamento. As características microestruturais de clínqueres de mesma composição química e mesma composição de fases podem variar bastante, dependendo da história térmica (taxa de resfriamento, por exemplo), resultando em cristais de tamanhos diferentes e, por conseguinte,

propriedades hidráulicas diferentes. Tais fatores também influenciam fortemente sua resistência à moagem (ISAIA, 2005).

2.7 Aditivos químicos

A NBR 11768 (ABNT, 2011) chama de aditivo os produtos que, incorporados em pequena quantidade aos concretos de cimento Portland, têm poder de modificar algumas de suas propriedades, no sentido de melhor adequá-las a determinadas condições. São produtos que aumentam o índice de consistência do concreto, mantendo a quantidade de água da mistura inalterada, por exemplo.

Quando o concreto é produzido em sua composição original, para se alcançar certo nível de trabalhabilidade, é preciso usar mais água do que a necessária para hidratar todas as partículas do cimento. A adição em excesso de água à mistura gera aumento de porosidade na pasta hidratada de cimento, que resulta em redução das propriedades mecânicas e durabilidade, pois a água adicional não reage com as partículas de cimento. Um concreto durável, em geral, tem baixa porosidade e antes do início da hidratação os grãos de cimento encontram-se densamente empacotados; é uma mistura caracterizada por uma baixa relação água/cimento que proporciona à mistura propriedades mecânicas elevadas.

A incorporação de água no interior de aglomerados de partículas de cimento durante o processo de produção do concreto é uma ocorrência inevitável, mas esta água fica indisponível para hidratar o cimento, sendo necessária a incorporação de aditivos químicos capazes de reduzir a tendência das partículas de cimento se aglutinarem e, desta forma, diminuir a quantidade de água na mistura. Os primeiros redutores de água eram à base de lignossulfonatos e variavam consideravelmente decomposição, levando a uma variedade significativa nas características de desempenho (KREIJGER, 1988); (HEWLETT e RIXOM, 1977).

Os redutores de água à base de lignossulfonatos só eram efetivos em concretos até determinado limite da relação água/aglomerante, a partir do qual a resistência à compressão se estagnava em torno de 60 MPa, barreira técnica que só foi ultrapassada com a disponibilidade de novos materiais. Os redutores de água disponíveis no mercado no começo dos anos 70 não eram capazes de reduzir a relação água/aglomerante, o que veio a ocorrer pela primeira vez com a introdução dos superplastificantes no mercado, visando desenvolver a tecnologia do concreto de alta resistência (BLICK, PETERSEN e WINTER, 1974); (Chicago Committee on High-Rise Buildings, 1977).

Os superplastificantes são redutores de água de grande efeito, que cuidadosamente compatibilizado ao cimento possibilita diminuir a relação água/aglomerante em concretos de alto desempenho até aproximadamente 0,23 e ainda assim obter um excelente nível de abatimento inicial, entre 100 mm e 200 mm.

O desenvolvimento de superplastificantes foi um avanço com grande efeito sobre a produção e uso de concreto nos anos atuais, levando ao desenvolvimento de uma família crescente de concretos de alto desempenho, tais como concretos de alta resistência, de alta durabilidade, alto adensáveis e outros. (MALHOTRA, 1997); (NAGATAKI, 1988); (COLLEPARDI, 1994) e (MEHTA e MONTEIRO, 2008) são excelentes revisões sobre o desenvolvimento de várias tecnologias que incorporam aditivos superplastificantes na composição de concretos.

São substâncias acrescentadas ao concreto com a função de melhorar as propriedades de trabalhabilidade, controlar o desenvolvimento da resistência, acelerar ou retardar o tempo de pega, evitar a fissuração térmica, além de outras funções no concreto. Estima-se hoje que nos países desenvolvidos 80 a 90% dos concretos produzidos contenham aditivos químicos. Desde o início do seu desenvolvimento na Alemanha e Inglaterra, mais de 350 produtos diferentes já foram lançados, que variam muito em composição química, sendo difícil classificá-los em suas funções, pois muitos desempenham mais de uma (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os chamados aditivos redutores de água de alta eficiencia ASTM C 494 (ASTM, 2015) são produtos incorporados imediatamente antes ou durante a produção de concretos e argamassas, que aumentam sua consistência mantendo constante a quantidade de água na mistura.

São aditivos que agem comumente nas propriedades reológicas do concreto, alterando as reações de hidratação do cimento, podendo variar dependendo de sua concentração, tipo de material cimentício, procedimento de mistura, temperatura ambiente e materiais constituintes. É um produto adicionado durante o processo de produção do concreto, em quantidades não superiores a 5% da massa de cimento contida nos concretos e argamassas, com a função de modificar suas propriedades no estado fresco e/ou no estado endurecido NBR 11768 (ABNT, 2015).

No final dos anos 1960, produtos à base de sulfonatos de naftaleno foram desenvolvidos no Japão. De acordo com (NAGATAKI, 1988), as primeiras aplicações de superplastificante para concreto no Japão foram na produção de estacas de concreto pré-moldado de alta resistência que deveriam suportar o processo de cravação. Simultaneamente,

produtos de sulfonato de melanina foram introduzidos na Alemanha Ocidental, onde o objetivo inicial era desenvolver um concreto mais denso e impermeável, e superplatificantes foram utilizados para melhorar a fluidez sem alterar a relação água/cimento da mistura. Atualmente misturas superplastificantes são utilizados em todo o mundo com várias finalidades para obter alta resitência, alta fluidez e elevada durabilidade.

Segundo (ISAIA, 2005), aditivos são substâncias disponibilizadas pela indústria química moderna à indústria de concreto para modificar suas propriedades e características de diversas formas, permitindo ações favoráveis em:

a) Modificar ou melhorar

- a reologia do concreto no estado fresco, ou seja, melhorar a trabalhabilidade, diminuir a segregação e outros;
- a pega e o rendimento do concreto;
- o conteúdo de ar ou de outros gases do concreto;
- a resistência a ações físicas, mecânicas e químicas;
- a resistência mecânica do concreto, em suas diferentes idades.

b) Obter uma regularidade na fabricação do concreto ou argamassa e especialmente na sua qualidade.

c) Ampliar o campo de aplicação do concreto.

d) Diminuir custos, aumentando o rendimento, facilitando a colocação na obra e permitindo formas e desformas em períodos de tempo mais curtos, considerando todo o conjunto de ações, da produção até a colocação na obra.

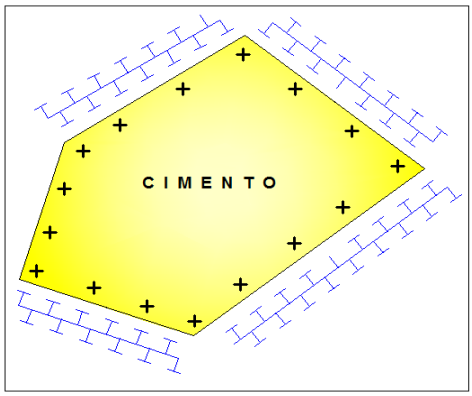
Apesar da complexidade, aditivos são classificados de acordo com suas funções. Alguns aditivos químicos podem agir na mistura de concretos e argamassas instantaneamente, influenciando na tensão superficial da água de amassamento da mistura e agir na superfície das partículas de cimento, enquanto outros afetam as reações químicas entre os compostos de cimento e a água desde os primeiros minutos até um longo período da hidratação. São adicionados aos concretos em quantidades muito pequenas, pois quando acrescentados em excesso modificam as propriedades de hidratação da mistura, diminuindo a resistência do produto (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os concretos de alto desempenho, em particular os concretos de alta resistência, são normalmente concretos densos, com pouca trabalhabilidade e com alto consumo de cimento, e que geralmente necessitam de aditivos químicos plastificantes que têm a função de melhorar a consistência do concreto sem aumentar a demanda por água, aumentar as propriedades

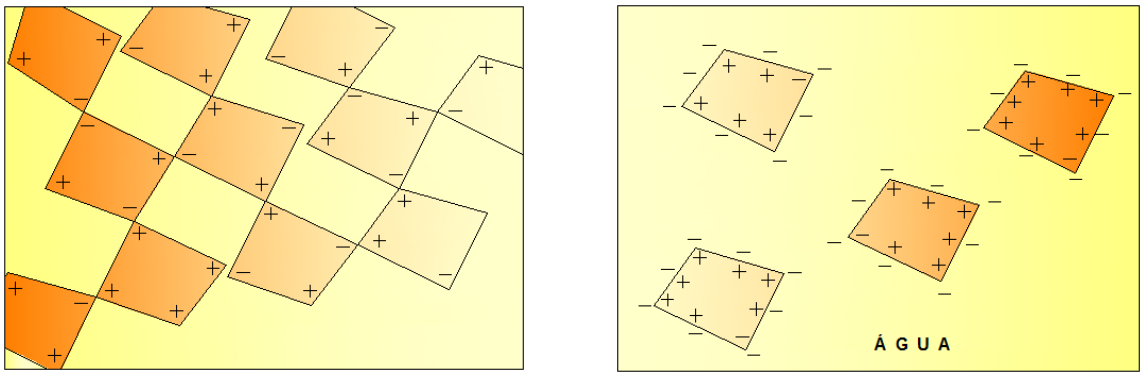
mecânicas e durabilidade da mistura, mantendo a consistência, e reduzir o consumo de cimento, para as mesmas resistências e consistências (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011).

Os tipos mais comuns são os aditivos à base de lignossulfato modificados, as resinas de naftaleno-formaldeído sulfonado, as resinas de melanina-formaldeído sulfonado, e os derivados de éter policarboxílico (PRICE, 2003).

Os sulfônicos dispersam as partículas de cimento por repulsão elétrica, aumentando a carga negativa na superfície das mesmas, solicitando menos água para uma determinada consistência nas misturas de concreto. Quando uma pequena quantidade de água é lançada ao concreto, as partículas de cimento tendem a se agrupar formando flocos, devido às forças de atração entre suas arestas (Figura 7 (b)) (AÏTCIN, 2000). Com a adição do plastificante de cadeia hidrofílica ao sistema água/cimento, a cadeia polar é adsorvida ao longo da superfície das partículas de cimento. As partículas de cimento tornam-se hidrofílicas, pois o surfactante direciona a sua extremidade polar, em vez de sua extremidade apolar, para a água, reduzindo a tensão superficial nas partículas de cimento (Figura 7 (c)). Como resultado o espaço físico entre as partículas de cimento no sistema aumenta devido à repulsão eletrostática, o que ocorre mesmo durante o processo de hidratação, e a floculação é evitada resultando em um sistema bem disperso (AÏTCIN, 2000).



(a)



(b) **(c)**

Figura 7– a cadeia polar hidrofílica do aditivo é adsorvida na superfície da partícula de cimento (b) partículas de cimento floculadas; (c) dispersão das partículas após a adição do superplastificante (AÏTCIN, 2000).

Aditivos superplastificantes permitem elevada redução de água nos concretos sem modificar a consistência no estado fresco, aumentando consideravelmente o abatimento e a fluidez, e produzindo os dois efeitos simultaneamente. São também chamados redutores de água de alta eficiência, pois são capazes de reduzir em três a quatro vezes a quantidade de água de amassamento em uma determinada mistura de concreto, quando comparados aos aditivos plastificantes normais. Com o desenvolvimento dos superplastificantes e à medida que os mesmos tornaram-se mais comuns, notou-se que essas moléculas poderiam ser empregadas para reduzir a quantidade de água em níveis bastante elevados, resultando em concretos e argamassas com grande trabalhabilidade. Pela primeira vez foi possível reduzir a relação água/cimento a níveis mais baixos que 0,30. Em comparação à utilização de aditivos plastificantes comuns que apresentam redução de 5% a 10% na água de amassamento, a redução de água com a utilização de superplastificantes é da ordem de 20% a 30%, sendo o aumento nas propriedades mecânicas de resistências à compressão, à tração por compressão diametral e flexão normalmente proporcionais à redução na relação água/cimento (AÏTCIN, 2000); (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Misturas de concreto contendo superplastificantes à base de naftaleno ou melamina sulfonatos, muitas vezes sofriam perda de trabalhabilidade muito rapidamente, sendo a condição resolvida em situações práticas com a introdução de uma dosagem adicional do superplastificante no local de trabalho, tornando o método incômodo. Em 1986, foram desenvolvidos no Japão os superplastificantes de ação prolongada, que possuem sais de ácido carboxílico que atuam como um dispersante solúvel em água na hidratação do cimento Portland, ajudando a manter a trabalhabilidade do concreto durante um tempo mais prolongado. Atualmente, assim como os aditivos superplastificantes à base de policarboxilato, que contêm um polímero reticulado que confere fluidez elevada, trabalhabilidade em longo

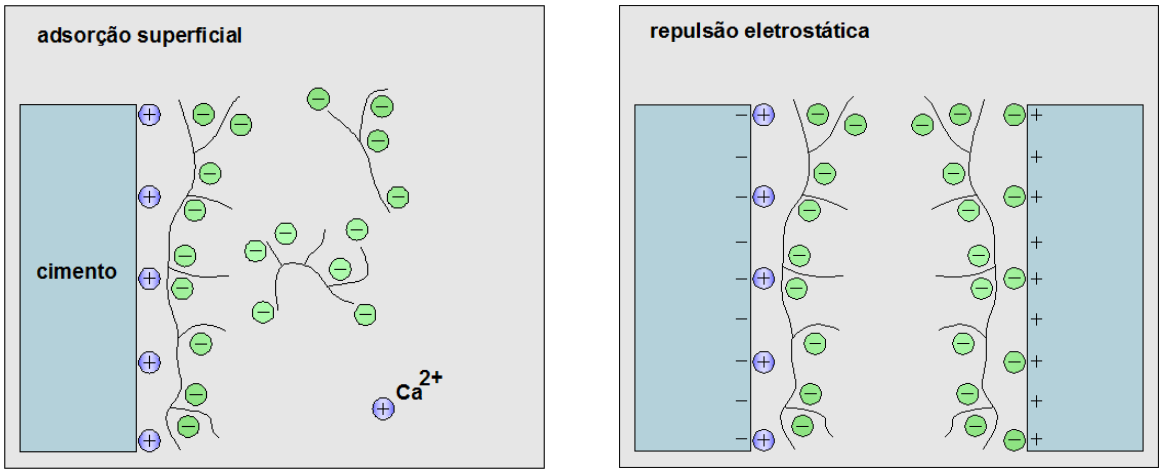
prazo e alta resistência à segregação, os polímeros à base de naftaleno sulfonato e de melanina estão disponíveis comercialmente com as mesmas características (YONEZAWA, 1996); (TANAKA, MATSUO, et al., 1996); (AÏTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994).

Os aditivos superplastificantes são polímeros orgânicos hidrossolúveis de cadeias longas com elevada massa molecular. Polímeros com pesos moleculares maiores são adsorvidos sobre as partículas de cimento influenciando tanto as propriedades de dispersão quanto a morfologia dos produtos de hidratação (AÏTCIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994).

Algumas moléculas orgânicas conhecidas pelas suas propriedades dispersantes podem ser usadas para neutralizar as cargas elétricas presentes na superfície das partículas de cimento, reduzindo sua tendência a flocular. Os redutores de água aniônicos e catiônicos são compostos de moléculas carregadas que neutralizam as cargas elétricas opostas, numa partícula de cimento.

Para se obter suspensões dispersas, as forças repulsivas entre as partículas devem exceder as forças atrativas. Para (PANDOLFELLI, DE OLIVEIRA, *et al.*, 2000) se obter suspensões dispersivas, as forças repulsivas entre as partículas de cimento Portland podem se originar através de: a) adsorção superficial de polímeros de cadeias longas que recobrem as partículas; b) repulsão estérica que depende da adsorção superficial, dificultando a aproximação entre as partículas por impedimento mecânico; c) repulsão eletrostática, que é o desenvolvimento de cargas elétricas opostas na superfície da partícula, decorrente da sua interação com o meio líquido; d) influência do peso molecular que representa a interação das moléculas do dispersante e alguns locais ativos nos grãos de cimento, principalmente locais que mantêm afinidade com os íons RSO_4^- e SO_4^-. Todos esses fenômenos alteram a interfase partícula/líquido do sistema, como ilustrado nas Figura 8 e Figura 9, promovendo a dispersão da suspensão.

Na Figura 8 (a), como o processo de hidratação do C-S-H secundário possui carga negativa, os íons Ca^{2+} formam as cargas positivas adjacentes à superfície da partícula de cimento promovendo a adsorção do aditivo superplastificante carregado negativamente (JOLICOEUR, NKINAMUBANZI, *et al.*, 1994).

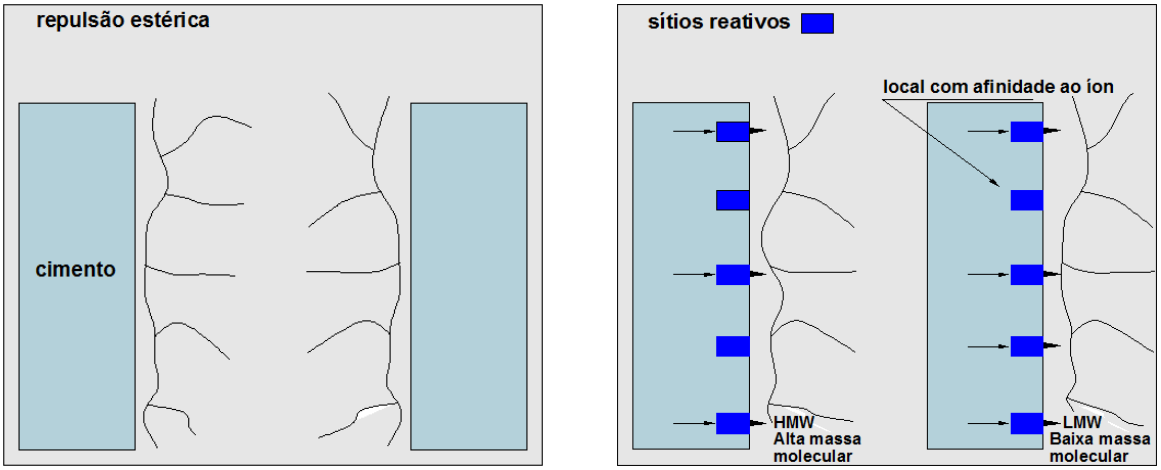


(a) (b)

Figura 8 - (a) adsorção das moléculas do superplastificante; (b) superfícies afastadas induzem forças repulsivas.

Inicialmente, quando a água é lançada no cimento Portland, os principais produtos formados são o silicato de cálcio hidratado C-S-H e o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), processos que ocorrem periodicamente e em momentos diferentes nas partículas de cimento devido a sua diferença de concentração e composição química. A Figura 8 (b) mostra as ações desses superplastificantes adsorvidos ou não nas superfícies das partículas de cimento, o que gera a repulsão eletrostática entre as mesmas.

Para Jolicoeur*et al.* (1994) a repulsão decorrente do arranjo das moléculas do superplastificante em duas partículas de cimento ocorre como mostrado na Figura 9 (a), chamado de efeito estérico, uma espécie de revestimento formado pelas moléculas de superplastificante que causa naturalmente repulsão por impedimento mecânico entre as partículas .



(a) (b)

Figura 9 - (a) repulsão decorrente do arranjo dos átomos nas moléculas do superplastificante adsorvido nas partículas de cimento; (b) inibição de alguns locais reativos.

A Figura 9 (b) apresenta a interação de alguns locais da superfície dos grãos de cimento com afinidades aos íons RSO_4^{--} e SO_4^{--} e as moléculas de superplastificantes. Nesses casos, aditivos superplastificantes com maior massa molecular apresentam maior número de sítios reativos.

2.8 Adições minerais

A incorporação de adições minerais no cimento Portland reduz a quantidade de clínquer necessária, melhorando a ecoeficiência do processo, diminuindo a emissão de gases de efeito estufa e o consumo de energia (ROSKOVIC e BJEGOVIC, 2005). A aplicabilidade de materiais pozolânicos como aditivos na tecnologia do cimento é determinada pela chamada atividade pozolânica. Essa atividade é fortemente relacionada à quantidade de componentes ativos, tais como SiO_2 e Al_2O_3 disponíveis na reação com o hidróxido de cálcio (OGAWA, UCHIKAWA, *et al.*, 1980). Essas adições aumentam a resistência e a durabilidade do concreto em longo prazo. Podem ser materiais naturais, como rochas calcárias e pozolanas; ou subprodutos industriais, como pó de sílica, escória granulada de alto-forno e cinzas de casca de arroz (TAYLOR, 1990); (LEÁS, 1998).

As adições minerais em geral são resíduos de outras indústrias que seriam descartados, muitas vezes de forma imprópria, gerando contaminação e riscos ao solo e fontes naturais de água. Então o uso de adições minerais nas indústrias de cimento e concreto reduz o impacto ambiental que as mesmas causariam se fossem dispostas inadequadamente. Alguns materiais pozolânicos tradicionalmente utilizados, como a sílica ativa, cinzas, metacaulim e cinza de casca de arroz, são subprodutos de processos industriais e agroindustriais, o que contribui ainda mais para reduzir os problemas ambientais e econômicos que seriam associados à sua disposição. Vários trabalhos mostram os avanços tecnológicos, como o aumento de resistência à compressão em concretos e argamassas, e os benefícios ambientais decorrentes da utilização dos materiais a partir de subprodutos industriais ou agroindustriais como (MALHOTRA e MEHTA, 1996); (MEHTA, 2002) e (SATA, JATURAPITAKKUL e KIATTIKOMOL, 2007).

O concreto de alta resistência pode ser produzido empregando-se apenas o cimento Portland como material cimentício, mas a sua substituição parcial pela combinação de uma ou mais adições minerais, quando disponíveis a preços compatíveis, pode ser uma solução vantajosa, não apenas pelo ponto de vista econômico, mas pelo ponto de vista da resistência e da reologia. Os materiais cimentícios suplementares, em quase sua maioria, possuem em sua

composição alguma forma de sílica reativa, que na presença de água combina-se com a cal para formar silicato de cálcio hidratado secundário do mesmo tipo que o formado durante a hidratação inicial do cimento Portland.

A maioria das pozolanas usadas em concreto são subprodutos industriais, dentre as quais estão a sílica ativa, a cinza volatilizada, a cinza da casca de arroz e a escória de alto forno, que quando misturadas ao cimento Portland em proporções adequadas de 20% a 30%, teoricamente toda a cal produzida na hidratação pode transformar-se em silicato de cálcio hidratado C-S-H. A reação (não balanceada) de hidratação do cimento e uma mistura adequada de pozolana pode ser descrita da seguinte forma:

$$\mathbf{3CaO.SiO_2 + 2H_2O \rightarrow CaO.SiO_2.H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow \text{Endurecimento rápido}}$$

$$\mathbf{\text{ou } C_3S + H \rightarrow C\text{–}S\text{–}H + CH}$$

Reação Pozolânica:

$$\mathbf{\text{Pozolana} + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow CaO.SiO_2.H_2O \rightarrow \text{Endurecimento lento}}$$

$$\mathbf{\text{ou Pozolana} + CH + H \rightarrow C\text{–}S\text{–}H}$$

Do italiano pozzuolana ou pozzolana, a palavra pozolana originou-se de Pozzuole, cidade da província de Napoli - Itália (MELHOTRA e MEHTA, 1996). Na época do Império Romano foram feitas as primeiras utilizações de pozolanas, quando se descobriu que as cinzas lançadas pela erupção do monte Vesúvio, após misturadas com cal e água, produziam um material rígido e durável (SOUZA, 2003).

Para (LIBÓRIO *et. al.* 2005), novos aglomerantes hidráulicos podem ser compostos com diferentes partes de materiais como clínquer, gipsita, escória de alto forno, cinzas volantes, sílica ativa de ligas ferro-silício ou silício elementar, cinza extraída de casca de arroz, metacaulim, terras diatomáceas, argilas calcinadas, pós de concretos reciclados, cerâmica moída, vidros, microfibras, cargas, calcário e outros.

As pozolanas são materiais que finamente moídos e em presença de água na temperatura ambiente reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes. São compostos silicosos ou silício-aluminosos que isoladamente possuem pouca ou nenhuma propriedade aglomerante (MELHOTRA e MEHTA, 1996). O hidróxido de cálcio possui elevado grau de solubilização, sendo o primeiro a ser hidratado em presença de água, mas ao contrário dos silicatos e aluminatos, contribui muito pouco para a aglomeração da pasta de cimento hidratada, porém seu consumo pela pozolana produz benefícios nesse sentido, melhorando a resistência mecânica e a durabilidade de argamassas e

concretos. Quando apresentam tamanho micrométrico, as pozolanas possuem ainda a capacidade de colocar-se nos interstícios entre as partículas de cimento e na interface agregado-pasta, favorecendo o empacotamento da mistura, conhecido como efeito filler (CORDEIRO, TOLEDO FILHO, *et al.*, 2008).

Apenas poucas operações são necessárias para transformar alguns dos subprodutos industriais em pozolanas. Essas operações tipicamente correspondem à moagem e classificação, responsáveis pela redução do tamanho e aumento da superfície específica das partículas. Tal aumento da superfície específica é responsável pela cinética das reações no cimento. O uso de aditivos minerais finos ou ultrafinos em adição ou substituição ao cimento Portland permite alcançar uma maior densidade de empacotamento da mistura de argamassas e concretos devido ao chamado efeito microfiller. Outro efeito físico potencialmente importante que surge com a redução do tamanho de partícula é a nucleação heterogênea. Quando partículas finas de pozolana estabelecem-se entre os cristais de clínquer, ocorre nucleação heterogênea de hidratos finos devido à redução da barreira de energia para nucleação na superfície de tais microfillers (GOLDMAN, 1993); (LAWRENCE, CYR e RINGOT, 2003).

A substituição parcial do cimento Portland por uma combinação de dois ou mais materiais cimentícios pode ser uma substituição vantajosa quando disponíveis a preços favoráveis, ou até mesmo quando um determinado material que está sendo descartado de uma forma indesejada pode ser reutilizado e retornar ao processo produtivo, como é o caso do pó de vidro e da sílica, não apenas do ponto de vista econômico, mas do ponto de vista da reologia e da resistência (UCHIKAWA, 1996).

A maioria dos materiais cimentícios suplementares possuem alguma forma de sílica vítrea reativa como característica comum, que na presença de água à temperatura ambiente pode combinar com a cal para formar silicato de cálcio hidratado, do mesmo tipo formado durante a hidratação do cimento Portland. A reação da pozolana com a cal em presença de água formando silicato de cálcio hidratado é geralmente lenta à temperatura ambiente, podendo levar meses para ser completada. Quanto mais fina e vítrea for a pozolana, mais rápida será a reação com a cal (AÏTCIN, 2000).

A hidratação do cimento Portland libera uma grande quantidade de cal como resultado da hidratação do C_3S e do C_2S que contribui muito pouco para a resistência da pasta de cimento hidratada, além de ser facilmente carregado pela água, causando problemas de durabilidade à mistura. Na matriz da pasta de cimento essa lixiviação resulta em aumento de porosidade. Quando o concreto é misturado com pozolana em proporção de 20% a 30%,

teoricamente toda cal produzida pela hidratação do cimento Portland pode ser transformada em silicato de cálcio hidratado C-S-H.

A norma NBR 11768 (ABNT, 2011) classifica as pozolanas em materiais naturais e artificiais. As de origem natural são cinzas vulcânicas com teor de SiO_2 maior que 65% e minerais de origem sedimentar com atividade pozolânica, já as artificiais são provenientes de alguma espécie de tratamento ou subprodutos industriais como a sílica ativa e o pó de vidro. Tanto os materiais naturais quanto os artificiais podem necessitar de processamento para que se ajustem a determinadas composições granulométricas, como é o caso do vidro, que neste trabalho passou por um processo de moagem antes de ser empregado como substituto/adição parcial ao cimento na produção dos concretos de alta resistência.

2.9 Sílica ativa

A sílica ativa é um subproduto da fabricação do silício elementar, das ligas de ferro-silício e outras ligas geradas em fornos de arco elétrico imerso, onde o quartzo é reduzido em silício a temperaturas de até 2000 °C. É um produto constituído principalmente por sílica vítrea finamente granulada.

Normalmente a dosagem de sílica nas misturas de concreto é expressa como percentagem da massa de cimento empregada na formulação, e não deve ser utilizada como percentagem de todos os materiais. Teoricamente, fixando-se a dosagem de sílica a partir do potencial de cal liberada pela hidratação do C_3S e do C_2S, a quantidade de substituição de sílica em misturas de concreto estaria entre 25% e 30% (ISAIA, 2005).

Por apresentar uma granulometria muito fina, pós de sílica têm sido utilizados em argamassas e concretos como complemento para densificar a pasta de cimento. Misturas feitas com esta adição exibem maior resistência à compressão do que as produzidas apenas com materiais convencionais. Observa-se que o uso da sílica melhora a mistura não apenas por agir como material pozolânico, mas também pelo efeito de empacotamento, aumentando a área de interface pasta/agregado, contribuindo para o aumento de resistência. Sua incorporação afeta a fluidez das argamassas e concretos em estado fresco, elevando substancialmente a demanda por água, e sua alta reatividade de hidratação nas primeiras idades aumenta o calor de hidratação (TOUTANJI e EL-KORCHI, 1995); (MAZLOOM, RAMEZANIANPOUR e BROOKS, 2004); (KADRI, AGGOUN e SCHUTTER, 2009).

O aumento do calor de hidratação devido à reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio, principalmente nas primeiras idades, não é observado quando outros materiais

cimentícios suplementares de baixa reatividade são adicionados às misturas de concreto (ROJAS, RIVERAS e FRÍAS, 1999).

2.10 Pó de vidro

O vidro finamente moído tem quantidade adequada de sílica amorfa (SiO_2) para reagir com o hidróxido de cálcio dissolvido na presença de água, para formar compostos hidratados de um modo semelhante aos materiais pozolânicos, tais como pó de sílica e cinza de casca de arroz. Resíduos de vidro moídos com área de superfície específica Blaine superior a 250 m²/kg têm elevada atividade pozolânica (OLIVEIRA, GOMES e SANTOS, 2012).

Materiais que após a moagem ficam com granulometria abaixo de 60 µm e área de superfície específica Blaine superior a 300 m²/kg resultam em produtos que podem ser classificados como pozolânicos independente do tipo de moagem e da morfologia da partícula (CORDEIRO, FILHO, *et al.*, 2009).

Estudos apontam que dependendo da quantidade de pó de vidro incorporada ao cimento, não se observam efeitos prejudiciais a longo prazo. Se os resíduos de vidro forem adicionados ao concreto em granulometria muito fina, há ainda aumento de resistência à compressão nos concretos (BHANDARI e TAJNE, 2013); (SOROUSHIAN, 2012).

2.11 Agregado

Agregado é um material granular, sem forma e volume definidos, derivado de rochas britadas, fragmentos rochosos do leito de cursos d'água e materiais encontrados em jazidas, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para uso em obras de engenharia (PETRUCCI, 2005).

Nas argamassas e concretos convencionais os agregados desempenham papel importante do ponto de vista econômico e técnico, por exercerem influência benéfica sobre algumas características importantes do concreto, como retração e aumento da resistência ao desgaste, sem prejudicar a resistência aos esforços mecânicos, pois a maioria dos agregados apresenta resistência mecânica superior à da pasta de aglomerante (PETRUCCI, 2005).

Segundo (CALLISTER, 2008), nos concretos as partículas dos agregados atuam como uma carga para reduzir o custo global, tendo em vista que são mais baratos que o cimento. Um empacotamento denso do agregado e um bom contato superficial são obtidos

empregando-se partículas com dois tamanhos diferentes; as partículas finas de areia devem preencher os espaços vazios de britas.

Na produção de concretos convencionais a seleção de agregados resistentes não é necessária. Mas, em concretos de alta resistência, a pasta hidratada de cimento e a zona de transição entre a mesma e os agregados são muito resistentes, e se os agregados graúdos não forem suficientemente resistentes, eles passam a ser o elo mais fraco dentro do concreto (AÏTCIN, 2000).

Os agregados com fragmentos lamelares são prejudiciais para a trabalhabilidade, porém os agregados cúbicos ou esféricos resultam em melhor trabalhabilidade. Agregados como os seixos, de textura lisa, tendem a ter uma ligação mais fraca com a pasta. Para (MOLIN, 1995), a distribuição granulométrica do agregado influencia o empacotamento dos grãos, podendo alterar a fração volumétrica de agregado máxima possível de ser incorporada em uma mistura de concreto.

Para se alcançar uma resistência à compressão satisfatória em concretos de alta resistência, a máxima dimensão do agregado deve manter-se entre 9,5 mm a 12,5 mm, como indicado por (AGOSTINI, 1992). Os agregados menores geralmente são mais resistentes que os maiores, o que se deve ao processo de britagem, pois quanto menor o agregado menor a presença de zonas fracas. Em concretos com resistências maiores que 100 MPa, o diâmetro máximo deve ser menor que 10 mm (AÏTCIN e NEVILLE, 1993).

A resistência do agregado graúdo normalmente não é um fator determinante na resistência do concreto, com exceção dos agregados leves. Os agregados são partículas muito mais resistentes do que a matriz e a zona de transição na interface com o concreto. Na maioria dos agregados naturais, raramente a resistência do agregado é considerada, porque a ruptura do concreto é determinada pela resistência das outras fases (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Agregados miúdos são grãos de areia que passam pela peneira 4,75 mm e que ficam retidos na peneira de 0,15 mm (série normal 4,75; 2,36; 1,18; 0,60; 0,30 e 0,15). A classificação dos agregados é feita de acordo com o seu módulo de finura, que é soma das percentagens acumuladas de material nas peneiras da série normal dividido por 100. A areia será considerada fina quando seu módulo de finura ficar entre 1,55 a 2,20, média 2,20 a 2,90 e areia grossa entre 2,90 a 3,50 NBR NM 248 (ABNT, 2003).

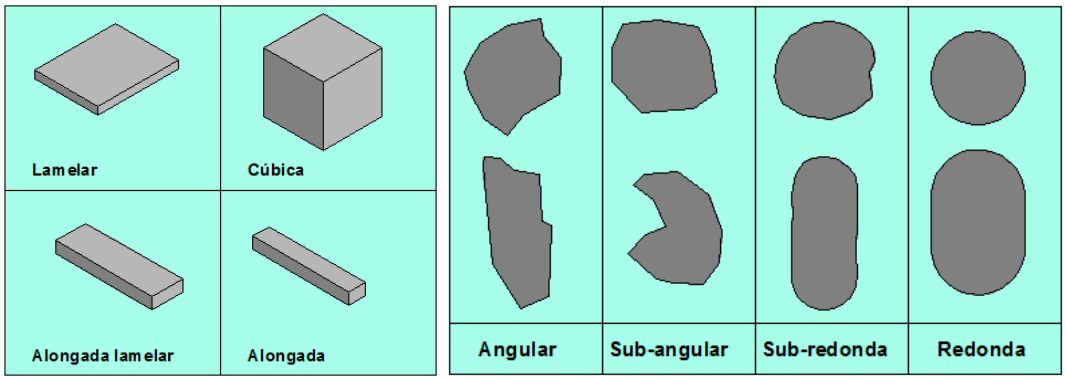
Devido à elevada quantidade de finos do próprio material cimentício, o concreto requer um agregado miúdo com partículas angulosas, graduação grossa e módulo de finura acima de 2,9 para alcançar maior trabalhabilidade e maior resistência. As areias finas com

módulo de finura inferior a 2 diminuem a trabalhabilidade e não oferecem condições de ganho de resistência (AGOSTINI, 1992).

Quanto à origem, os agregados podem ser classificados em: a) agregados naturais, já preparados para uso, não sendo necessária qualquer forma de beneficiamento, derivados de rochas na crosta terrestre geralmente sujeitas aos efeitos de intemperismo, necessitando apenas de classificação granulométrica por peneiramento, como é o caso das areias e seixos de rio; b) agregados britados, submetidos a processo de cominuição, geralmente produzidos em pedreiras por desmonte, britagem e beneficiamento para que possam se ajustar ao uso como agregados para concreto; c) agregados artificiais, derivados de processos industriais complexos envolvendo etapas tais como pulverização, aglomeração e queima, como argilas expandidas e vermiculita expandida; e d) agregados reciclados, provenientes do beneficiamento de entulho de construção ou demolição.

A forma dos grãos que compõem os diversos tipos de agregados para concretos e argamassas influencia suas propriedades no estado fresco. Quando se comparam partículas arredondadas e lisas com as alongadas e ásperas, em geral estas necessitam de aumento na quantidade da pasta de cimento, que aumenta o custo de produção. A forma dos agregados é bastante influenciada pela estrutura e textura da rocha de origem. Os basaltos compactos, que são rochas de estrutura maciça, produzem britas de forma mais cúbica, enquanto as rochas de estrutura em camadas, como o xisto, produzem fragmentos de formas alongadas e lamelares.

A Figura 10 resume a forma dos grãos dos agregados. Deve-se atentar para o fato de que a forma das partículas britadas varia de acordo com seu tamanho, onde grãos maiores em geral são grãos mais alongados, e as partículas alongadas ou lamelares tendem a se orientar segundo um plano e se rompem em flexão.



(a) **(b)**

Figura 10 - (a) Forma dos grãos do agregado (b) arredondamento. Adaptado de (POWERS, 1953).

As partículas formadas por atrito tendem a ter formato arredondado, pela perda dos vértices e arestas, como é o caso das areias de depósitos eólicos, assim como as areias e seixos originários de leitos de rio. Já as rochas intrusivas britadas apresentam vértices e arestas bem definidos, sendo chamadas angulosas, e na maioria das vezes produzem partículas equidimensionais. Os calcários laminados e arenitos quando processados por britadores tipo mandíbula tendem a produzir fragmentos alongados e achatados. As partículas assimétricas são preferíveis do ponto de vista da resistência, pois implicam em melhor empacotamento entre as partículas, por outro lado têm maior área superficial e exigem uma maior quantidade de água para a mesma trabalhabilidade em concretos hidráulicos (ISAIA, 2007).

A textura do agregado tem influência sobre a sua aderência com a pasta de cimento Portland. De acordo com o grau de polimento, a textura da superfície pode ser lisa ou áspera. Os agregados com textura mais áspera favorecem a aderência com a pasta de cimento, influenciando na resistência do concreto. Esse requisito é importante não só para o agregado graúdo, mas também para as areias que contêm grãos alongados e que produzem concretos mais ásperos. A textura superficial do agregado depende da dureza, tamanho do grão, porosidade da rocha matriz e de sua exposição a forças de atrito (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A distribuição granulométrica, definida como a distribuição de tamanhos dos fragmentos de rocha, pode ser avaliada por meio do ensaio de peneiramento. O resultado da análise granulométrica é mais facilmente interpretado com o auxílio de curvas granulométricas, nas quais as ordenadas representam as percentagens acumuladas passantes e a abscissa mostra a abertura das peneiras ou o diâmetro dos grãos em escala logarítmica.

Quanto à forma da curva granulométrica, uma curva é contínua quando apresenta partículas de todos os diâmetros intermediários, desde um valor mínimo até um valor máximo, geralmente apresentando a forma de um "S" suave e alongado na horizontal. A curva será descontínua se apresentar a falta de alguma fração intermediária. Nesse caso a curva tende a apresentar um patamar horizontal no intervalo de fração ausente. A curva é dita uniforme quando a maior parte das partículas pertencer a apenas uma fração granulométrica. A Figura 11 demonstra diferentes distribuições granulométricas dos agregados.

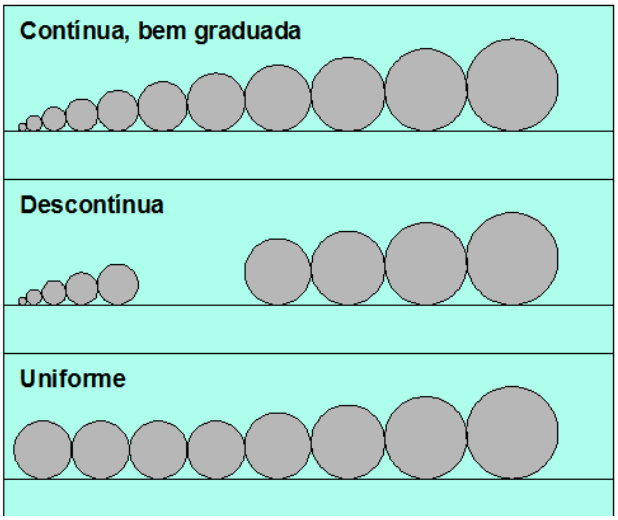


Figura 11 - Forma de distribuições granulométricas de agregados.

Normalmente o uso de areais grossas em concretos de alta resistência está apoiado no fato de todos os traços (ou formulações) serem bastante ricos em partículas finas, devido ao alto teor de cimento e aditivos minerais cimentícios, não sendo necessário adicionar uma areia fina, do ponto de vista da trabalhabilidade e da segregação. O uso da areia grossa leva a um pequeno decréscimo de água na mistura de concreto, o que é vantajoso tanto do ponto de vista da resistência como do ponto de vista econômico. Porém, de maneira geral, não existe vantagem em usar uma areia em substituição a outra. O agregado deve ser livre de impurezas principalmente de argilas e siltes (BAUER, 2005).

Para o uso em concretos de alta resistência, a seleção do agregado graúdo torna-se mais importante à medida que a resistência à compressão de projeto é aumentada. Rochas duras, densas e britadas, tais como calcário, dolomita e granito têm sido usadas com resultados bastante satisfatórios. Do ponto de vista reológico, a forma do agregado graúdo é também importante. Durante a britagem as formas cúbicas equidimensionais devem ser valorizadas mais do que as partículas lamelares e alongadas. Nas britagens os britadores de impacto costumam ser preferidos aos britadores de cone. O método de britagem para produção de partículas cúbicas aumenta o custo de produção, mas é compensado pelo maior teor de agregado graúdo no traço e pelas economias de cimento e superplastificante.

Com relação ao tamanho do agregado, as partículas menores do agregado graúdo são geralmente mais resistentes do que as partículas maiores, pois o processo de redução de tamanho frequentemente elimina os defeitos internos do agregado, tais como poros grandes, microfissuras e inclusões de minerais com pouca resistência. Os tamanhos de agregados cúbicos mais apropriados para a produção de concretos de alta resistência estão no intervalo de 4,5 a10 mm (BAUER, 2005).

2.12 Compatibilidade entre aditivos e cimentos

Os problemas mais comuns de incompatibilidade entre aditivo e cimento são a perda rápida de fluidez, o retardamento de pega, o endurecimento e a incorporação de uma quantidade excessiva de bolhas de ar à mistura. As interações de cimento com aditivo em misturas de concreto são de difícil entendimento, pois envolvem sistemas químicos complexos e que muitas vezes envolvem a combinação de dois ou mais aditivos, sendo que cada um deles foi elaborado para atuar de forma individual na mistura, existindo maior probabilidade de incompatibilidade quando são utilizados em conjunto (JOLICOEUR, NKINAMUBANZI, *et al.*, 1994).

As propriedades benéficas dos ativos nos concretos dependem das interações que ocorrem entre aditivos e os materiais que constituem a mistura. Além do tipo de cimento, as interações dependem do tipo de agregado e como suas características podem influenciar as propriedades físicas e quimícas do concreto. Diversas variáveis, como quantidade empregada, composição e superfície específica do cimento, natureza e proporção dos agregados, relação água/cimento, procedimento de mistura e condições de cura podem interferir no desempenho dos ativos (MAILVAGANAM, 1979); (BURGOS-MONTES, PALACIOS, *et al.*, 2012).

Os parâmetros físicos e químicos para a melhor eficiência dos superplastificantes não são fáceis de serem identificados, medidos e controlados, pois sua ação é em geral muito complexa. O controle do processo deve ser rigoroso para não haver diferença entre distintos lotes. A melhor maneira de avaliar o potencial teórico de um determinado aditivo em dispersar um cimento é analisar sua compatibilidade com o cimento em questão, estudando diretamente suas características reológicas (AÏTCIN, 2000).

O comportamento dos aditivos para concretos e argamassas deve ser estudado primeiramente em laboratório, simulando tanto quanto possível os principais fatores em campo, como as condições de umidade e temperatura. Tal estudo é útil para definir a dosagem mais adequada para a mistura. Alguns ensaios podem ser realizados na pasta de cimento para a dosagem apropriada de aditivo, como o do funil de Marsh, segundo a NBR 7282 (ABNT, 1983), e o ensaio de miniabatimento de Kantro (KANTRO, 1998). Nos dois casos, os ensaios são simples e de fácil interpretação, tendo em vista que na maioria dos casos o objetivo é obter a melhor combinação de aditivo e cimento que será empregada nas argamassas e concretos, e não avaliar a complexidade dos aspectos químicos do sistema.

2.13 Água

A água usada no amassamento de concretos deve ser livre de impurezas que possam prejudicar as reações entre ela e os componentes do cimento. Os maiores defeitos provenientes da pasta de amassamento têm maior relação com o excesso de água empregada do que com as impurezas que ela possa conter. É conveniente verificar o efeito das impurezas sobre o tempo de pega e a resistência mecânica (BAUER, 2005).

O controle da relação água/aglomerante é o principal para obtenção de concretos de alta resistência. A redução desta relação implica em ganho de resistência para o concreto. A relação água/cimento necessária para hidratar o cimento é 0,22, porém é preciso uma quantidade adicional para adequar a trabalhabilidade. Nos concretos convencionais o fator água/cimento fica em torno de 0,45 e 0,60; nos concretos de alta resistência, devido à adição de plastificantes ou superplastificantes, fica em torno de 0,30 (AÏTCIN e NEVILLE, 1993).

2.14 Concretos

De acordo com (PETRUCCI, 2005), o concreto hidráulico é um material de construção constituído de cimento Portland, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (seixo ou brita) e água que, quando misturados, oferecem condições tais de plasticidade que facilitam as operações de manuseio indispensáveis ao lançamento em formas e desenvolvimento de coesão e resistência com o tempo pelas reações que se processam entre o cimento e a água. Por mais de 100 anos, o concreto foi empregado baseado nesse comportamento genérico e a tecnologia envolvida não foi muito explorada, pois concretos com desempenho satisfatório eram obtidos para a grande parcela das aplicações, mesmo com pequenas variações em sua composição e execução (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O concreto, fruto de uma tecnologia simples e uma ciência complexa, somente agora está sendo mais bem compreendido, mas existem vários detalhes ainda a serem desvendados. O endurecimento do concreto atual é resultado de reações entre produtos amorfos ou produtos minerais, água e moléculas orgânicas e em alguns casos sais minerais (AÏTCIN, 2000).

No início do século XX, foram realizadas pesquisas que levaram a um melhor entendimento sobre o concreto. Nessa época, foram introduzidos conceitos e parâmetros de grande importância como granulometria dos agregados, trabalhabilidade e relação água/cimento. No final do século XX foram realizados estudos mais avançados, relacionando

os compostos do cimento e suas reações químicas, até conceitos técnicos como dosagem da água e pasta no concreto (HELENE e TERZIAN, 1992).

Para (MEHTA e MONTEIRO, 2008), com relação a sua massa específica, os concretos podem ser classificados como normal (massa específica em torno de 2400 kg/m^3), leve (1800 kg/m^3) e pesado (>3200 kg/m^3). E conforme a resistência segue o designado na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos concretos quanto à resistência mecânica.

Resistência à Compressão (MPa)	Classificação
< 20	Baixa
20 - 40	Moderada
> 40	Alta

Fonte: (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

De acordo com (MORANVILLE, 1992) a matriz é composta pela zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento propriamente dita. Normalmente a zona de transição apresenta características distintas do restante da pasta. Os componentes da pasta e as características do agregado graúdo definem a espessura e as características desta zona.

A zona de transição é uma região com maior porosidade e heterogeneidade que o restante da pasta. A porosidade é originária da relação água/cimento elevada e da película de água que se forma ao redor do agregado. Nesta região são formados planos preferenciais de ruptura a partir de falhas de aderência entre a pasta e o agregado.

O efeito de superfície, chamado de efeito parede, causado pelo agregado no concreto de resistência normal, juntamente com a exsudação são os responsáveis pela fragilidade da zona de transição, pois a relação água/cimento é maior que a da matriz de cimento.

Em decorrência da grande porosidade a zona de transição é considerada a parte mais fraca do conjunto, pois quando o concreto é submetido a pequenos acréscimos de carregamento e a variações de volume e umidade esta zona estará sujeita a microfissuração muito precocemente (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

2.15 Concreto de alta resistência

A definição de Concreto de Alta Resistência (CAR) é bastante subjetiva e tem mudado com o passar dos anos, é relativa ao local e época, havendo indefinição quanto a um

valor específico por parte dos autores. Um concreto pode ser considerado de alta resistência se apresentar resistência superior à média usual ou possuir especificações superiores às anteriormente alcançadas (MOLIN, KULAKOWSKI e VIEIRA, 1997).

Para (MEHTA e MONTEIRO, 2008), como a maioria dos concretos tem resistência à compressão menor que 42 MPa, todos os concretos acima deste valor são considerados de alta resistência. O efeito da microestrutura nas propriedades desses concretos é mais significativo quando comparadas ao concreto convencional, devendo haver controles mais rigorosos.

A NBR 8953 (ABNT, 2015) classifica o concreto em dois grupos, sendo o grupo I relativo a concretos convencionais, com resistências que variam de 20 MPa a 50 MPa, e o grupo II de concretos de alta resistência, com variação de 55 MPa a 100 MPa, conforme a Tabela 5.

Tabela 5. Classes de resistência dos concretos estruturais

Classe de resistência Grupo I	Resistência característica à compressão (MPa)	Classe de resistência Grupo II	Resistência característica à compressão (MPa)
C20	20	C55	55
C25	25	C60	60
C30	30	C70	70
C35	35	C80	80
C40	40	C90	90
C45	45	C100	100
C50	50		

Fonte: NBR 8953 (ABNT, 2015)

O (ACI, 1998), após revisar suas definições, considera como CAR aquele que apresenta resistência à compressão axial igual ou maior que 55 MPa, porém entende que esta definição de concreto varia de uma região para outra. Ainda para esse comitê, em localidades onde o concreto é fabricado com 62 MPa em escala comercial, os concretos de alta resistência serão aqueles com resistência à compressão entre 83 a 103 MPa.

Alguns estudos mostram que em muitos aspectos a microestrutura e as propriedades dos concretos com resistência superior a 40 MPa são diferentes dos concretos convencionais. Os CAR apresentam maiores benefícios na maioria de suas propriedades, como a resistência à abrasão, permeabilidade, porosidade, trabalhabilidade e outras. As estruturas tornam-se mais duráveis, uma vez que a penetração de agentes agressivos na estrutura acontece pela porosidade e esta tem relação inversa com a resistência, além de resultarem em estruturas

menos deformáveis, e permitirem vãos maiores entre pilares, redução da seção das peças e redução das cargas sobre as fundações (ALVES, 2000).

2.16 Concreto de alta resistência versus concreto de alto desempenho

Ocorre, por vezes, certa confusão no uso dos termos *concreto de alto desempenho* (CAD) e *concreto de alta resistência* (CAR), pois estruturas projetadas com CAD com destaque à baixa permeabilidade ou deformação podem alcançar resistências consideráveis, caso sejam empregados agregados de boa qualidade, existindo assim uma estreita relação de desempenho com resistência, ou seja, o CAD possui mais atributos que o CAR. O alto desempenho pode estar associado a qualquer propriedade do concreto, como facilidade de concretagem, compactação sem segregação, propriedades reológicas, resistência inicial e não apenas a resistência final (SANCHES, 1997).

Jo Coke, presidente do ACI no ano de 1999, definiu concreto de alto desempenho (CAD) como um concreto otimizado para um determinado uso (ALMEIDA, 2005). Nas aplicações práticas, a ênfase no CAD tem mudado de resistência à compressão para outras propriedades como melhor trabalhabilidade, elevado módulo de elasticidade, alta densidade, resistência aos ataques agressivos e baixa permeabilidade (AÏTCIN e NEVILLE, 1993).

A (CERF/ASCE, 1993) atribui a designação de alto desempenho ao concreto que tenha características especiais, as quais não são atribuídas ao concreto convencional, usando materiais e procedimentos usuais. As evoluções obtidas nas características mecânicas dos concretos, juntamente com o desempenho, fizeram com que houvesse uma diferenciação entre concreto de alta resistência e concreto de alto desempenho.

O concreto de alta resistência não pode ser sinônimo de concreto de alto desempenho, pois o CAD pode estar associado a outras características do concreto que não seja a resistência à compressão. Mas a relação não é totalmente incorreta, pois a elevação da resistência é consequência da redução do volume de vazios, que proporciona incrementos no módulo de deformação, trabalhabilidade e durabilidade. Segundo (MALIER, 1992), a constatação vem do fato que dentre as centenas de obras que utilizam concretos com melhor desempenho, 25% dos casos adotaram a resistência mecânica como critério de escolha.

Para (AÏTCIN, 2000), uma maneira de classificar os concretos sem relacionar a resistência a compressão é a proposta por alguns autores de que concreto de alto desempenho tem uma relação água/aglomerante baixa, próxima de 0,40. Neville (1997) afirma, também,

que para um concreto ser considerado de alto desempenho, sua relação água/aglomerante deve ser sempre menor que 0,35.

(FOSTER, 1994) considera CAD aqueles elaborados com materiais apropriados e selecionados de acordo com estudos de dosagem, que são misturados, transportados, lançados, adensados e curados adequadamente, que apresentam desempenho diferenciado no local da estrutura, combatendo esforços de forma diferenciada, interagindo de forma satisfatória com o meio ambiente em que estará exposto, e considerando a ação do carregamento durante o tempo em que foi projetado.

Para (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011) o princípio básico da elaboração de um concreto de alto desempenho está fundamentado na diminuição da porosidade do concreto, por meio da modificação de sua microestrutura, modificação da estrutura dos poros, seus tipos, tamanhos e distribuição. As seguintes ações são necessárias:

- diminuição da relação água/aglomerante e da quantidade total de água por m^3, através do uso de aditivos plastificantes e/ou superplastificantes;

- otimização da granulometria dos agregados para aumentar o esqueleto inerte e obter maior compactação, utilizando-se agregados graúdos de menor diâmetro máximo e adequada composição granulométrica dos finos.

- reforço das ligações químicas primárias e secundárias entre as partículas, pelo uso de adições minerais que provocam o refinamento dos poros e dos grãos, especialmente de silicato de cálcio hidratado (C-H-S).

2.17 Microestrutura do CAD

A microestrutura de um CAD, em particular do que apresenta alta resistência, é diferente de um concreto de resistência normal, por ser mais densa e homogênea e pouco cristalina. Nos concretos usuais, o elo mais frágil é a pasta de cimento hidratado que compõe a zona de transição, enquanto que os CAD possuem microestrutura compacta, em que a zona de transição com o agregado graúdo é bastante delgada ou inexistente (AÏTCIN, 2000).

O calor de hidratação, módulo de elasticidade, retração, cura, resistência à compressão e efeito em altas temperaturas são as propriedades que mais diferenciam o concreto de alto desempenho de um concreto convencional.

(AÏTCIN, 2000) destaca não ser absolutamente verdade que o CAD desenvolve maior calor de hidratação que o concreto usual, pois o emprego de aditivos retardadores e

menor quantidade de água no concreto podem afetar a emanação de calor de hidratação, de modo que os picos de temperatura sejam mais baixos que os concretos convencionais.

3 Materiais e métodos

O fluxograma da Figura 12 apresenta as etapas do procedimento experimental, descritas a seguir.

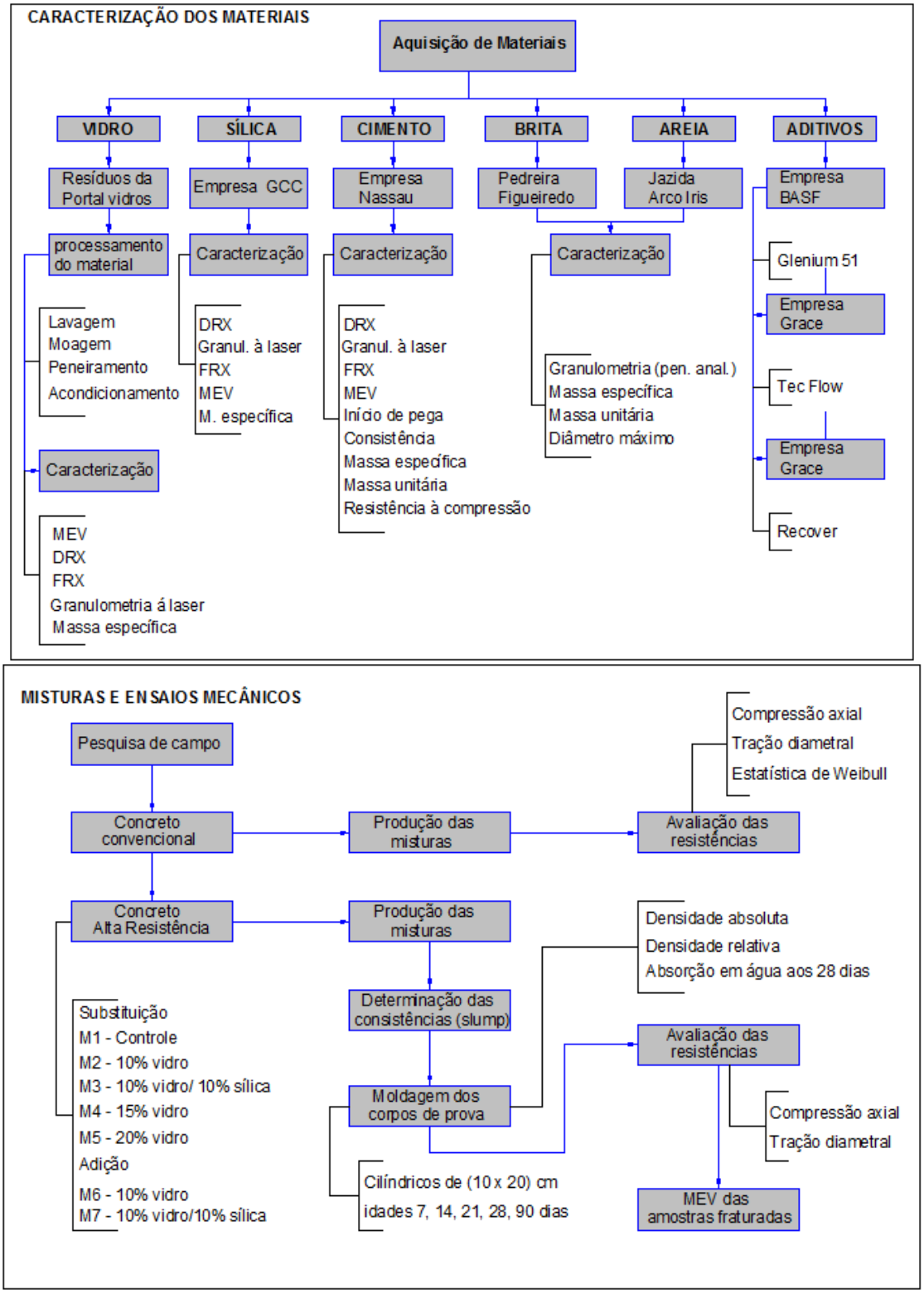


Figura 12 - Fluxograma do procedimento experimental

3.1 Pó de vidro

Os vidros foram coletados na empresa Vidro Rios Ltda., na forma de sobras do corte de vidros planos empregados principalmente na construção civil em Manaus, na composição de fachadas de prédios comerciais e residenciais, esquadrias e sacadas, além de movelarias em geral. Em todos os experimentos com pó de vidro desta pesquisa foram empregados vidros de uma mesma espécie, para minimizar variações não controladas das formulações de concretos.

A espessura de grande parte dos resíduos de vidro empregados variou entre 4 e 6 mm, com máximo de 10 mm. Todos apresentaram coloração levemente esverdeada, mudando um pouco de tonalidade com a espessura. Aparentemente não se diferenciaram quanto ao processo de fabricação. As amostras de resíduos de vidro são descritas conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Espessura das amostras de vidro plano utilizadas.

AMOSTRAS	ESPESSURA (mm)
AM-V1	4
AM-V2	6
AM-V3	7
AM-V4	8
AM-V5	10

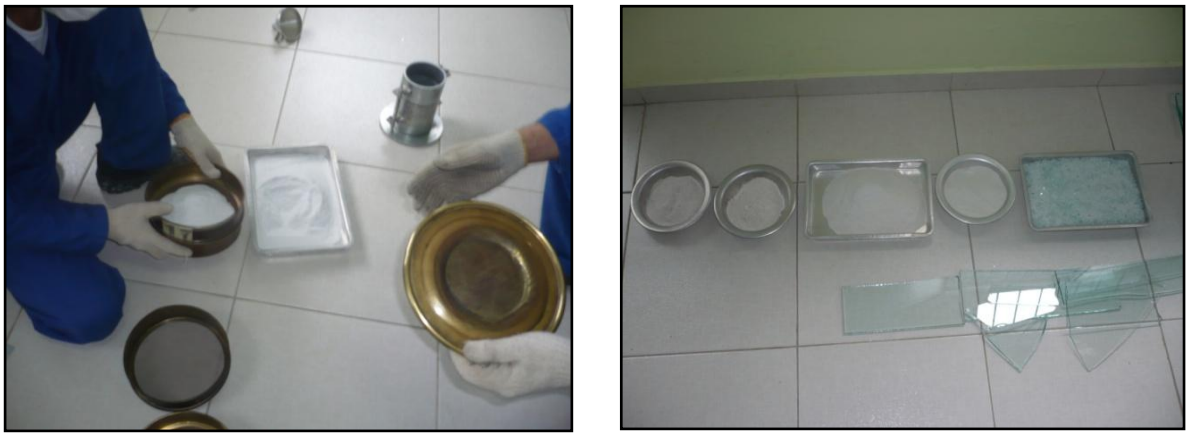
Fonte: Pesquisa de campo

Após coleta e encaminhamento ao Laboratório de Materiais de Construção do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM, os fragmentos de vidro foram lavados em água para retirada de impurezas, secos ao ar e moídos em moinho de bolas. O processo de moagem, Figura 13, foi realizado em duas etapas: uma pré-moagem, em um moinho Contenco I 3021, no laboratório de materiais de construção do IFAM, durante 2h e 30min, e a moagem final em um moinho Servitech CT-248, no laboratório de Geociências da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), por mais 3h, quando finalmente foi realizado o peneiramento do material.

(a) **(b)**

Figura 13 - Moinhos: (a) modelo Contenco; (b) modelo Servitech.

Para seleção do pó de vidro foram usadas peneiras de 600, 300, 100 e 75 µm. A Figura 14 ilustra os procedimentos de peneiramento e separação do vidro em pó. O objetivo do procedimento foi separar uma fração mais fina de material para emprego na produção dos concretos aditivados com pó de vidro. Foi utilizado o material passante pela peneira de 75µm.



(a) **(b)**

Figura 14 - Separação do material: (a) procedimento de peneiramento; (b) fracionamento das amostras.

Em cada moagem foram obtidos cerca de 600 g de pó com granulometria abaixo de 75 µm. As quantidades retidas nas outras peneiras foram submetidas a nova moagem, até chegarem à granulometria desejada. Os materiais moídos foram acondicionados no interior de sacos de papel e de plástico, para que não hidratassem naturalmente ao ar, Figura 15.

Figura 15 - Forma de armazenamento das amostras de vidro e sílica em sacos de papel e de plástico.

3.2 Cimento Portland

O cimento utilizado nas formulações de concreto foi o Portland, denominado CP IV-32, de fabricação da empresa Nassau e bastante comercializado em Manaus. O cimento foi fracionado e armazenado em pequenas quantidades em ambiente seco, além de utilizado dentro do prazo de validade, para que suas propriedades originais não fossem alteradas. A Figura 16 mostra dois sacos de 50 kg após o fracionamento das amostras para as dosagens experimentais.

Figura 16 – Sacos de 50 kg do cimento Portland Nassau CP IV- 32 .

Depois de hidratado, aos 28 dias o cimento Portland CP IV-32 alcança uma resistência superior a dos cimentos comuns, tem baixo calor de hidratação, o que o torna

bastante recomendável na concretagem de grandes volumes, em temperaturas elevadas e ambientes agressivos.

3.3 Pó de sílica

A sílica ativa empregada nas dosagens para os concretos é de fabricação da empresa GCC (Grupo Cementos de Chihuahua), que possui três fábricas instaladas nos EUA e três no México, Figura 17. É uma empresa multinacional que produz cimentos, sílica e outros produtos para a indústria de construção.

Figura 17– Embalagem da sílica em pó, saco de 20 kg.

A *Microsilex* foi adquirida no Brasil através da empresa CLANAP - Comércio Importação e Exportação Ltda. As características químicas e físicas da sílica utilizada na produção dos concretos estão apresentadas nas Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 7 - Características químicas da sílica

Propriedades químicas	ASTM C-618	Microsilex
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ (%)	≥ 70,0	91,30
SO_2 (%)	≤ 4,0	0,14
Umidade (%)	≤ 3,0	1,25
Perda ao fogo(%)	≤ 10,0	0,38
Álcalis (%)	≤ 1,5	0,05

Fonte: Catálogo do fabricante.

Tabela 8 - Características físicas da sílica

Propriedades físicas	ASTM C-618	Microsilex
Finura, passa na malha n° 325 (45μm)	ASTM C-430 ≥ 76,0	96
Resistência aos sulfatos até 180 dias (%)	ASTM C-1012 ≤ 0,05	0,03
Reação álcali-sílica até 180 dias (%)	ASTM C-227 ≤ 0,05	0,02
Densidade (%)	ASTM C-188	2,3
Quantidade de água	ASTM C-311 ≤ 115	106
Índice de atividade pozolânica até 7 dias (%)	ASTM C-311 ≥ 75	105
Índice de atividade pozolânica até 28 dias (%)	ASTM C-311 ≥ 75	122
Expansão no almofariz até 14 dias (%)	ASTM C-1260 ≤ 0,1	0,06

Fonte: Catálogo do fabricante.

3.4 Agregados

Os agregados empregados na produção dos concretos estudados são de natureza mineral e comercializados na cidade de Manaus. O agregado miúdo utilizado foi a areia de terra firme, enquanto os agregados graúdos foram seixo de rio e brita granítica.

O agregado miúdo foi uma areia natural adquirida na Jazida Arco Íris, Figura 18 a. Para caracterização desse material, foram realizados ensaios de granulometria, massa unitária e massa específica, de acordo com os procedimentos recomendados pelas normas NBR 7217 (ABNT, 1997); NBR 7251 (ABNT, 1982) e NBR 9776 (ABNT, 1987), respectivamente.

O agregado graúdo seixo rolado teve como origem a Jazida Manacapuru, enquanto a brita granítica foi trazida da Jazida Figueiredo a 150 km de Manaus, Figura 18 b. Todos os agregados passaram por ensaio de granulometria e suas características físicas, a saber, massa

unitária, massa específica, módulo de finura e diâmetro máximo, foram determinados experimentalmente.

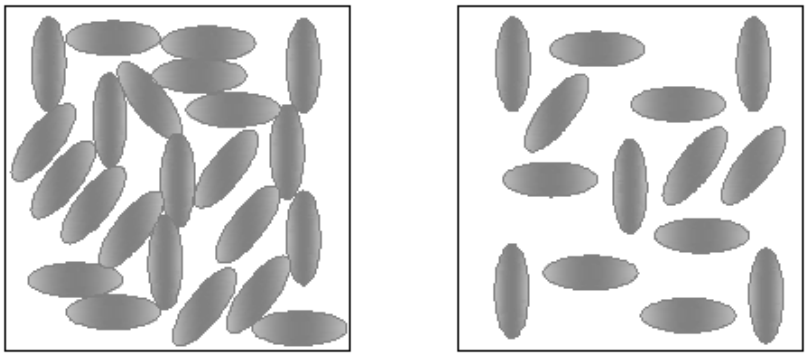
(a) **(b)**

Figura 18 - Origem dos agregados: (a) Areia de terra firme, jazida Arco Iris a 120 km de Manaus; (b) Brita granítica, Jazida Figueiredo a 150 km de Manaus.

Em relação à composição granulométrica dos agregados graúdos, foi verificado que tanto a brita quanto o seixo encontram-se dentro dos padrões da NBR 7211 (ABNT, 2009). Quanto à forma dos grãos, foi possível observar por inspeção visual a diferença entre os dois agregados. O seixo apresenta-se menos irregular, mais arredondado e liso que as britas graníticas, o que influencia a trabalhabilidade das misturas de concreto, pois grãos menos arredondados e mais irregulares demandam maior quantidade de água para alcançar a mesma fluidez.

3.5 Glenium 51

Um aditivo plastificante foi utilizado nas misturas para que fossem alcançadas resistências elevadas, superiores a 50 MPa após 28 dias, nos concretos experimentais. O Glenium 51 é um aditivo superplastificante, recomendado para a fabricação de todos os tipos de concreto quando se necessita de baixo fator água/cimento (a/c) e alta fluidez, e compatível com todos os tipos de cimento Portland. É um aditivo baseado em uma cadeia de éter policarboxílico modificado que atua como dispersante do material cimentício, proporcionando superplastificação e alta redução de água. Os polímeros de éter policarboxílico possuem largas cadeias laterais, que se depositam na superfície das partículas de cimento, causando dispersão por repulsão eletrostática. A Figura 19 apresenta o fenômeno da defloculação dos grãos de cimento.



(a) **(b)**

Figura 19 - Efeito da defloculação dos grãos de cimento (a) sistema floculado (aglutinado) (b) sistema defloculado (disperso) (AÏTICIN, JOLICOEUR e MACGREGOR, 1994).

Como o tempo de pega pode ser influenciado pela temperatura e umidade do ambiente, adotou-se o critério de produção das misturas sempre pela manhã e em área coberta, para minimizar o efeito das altas temperaturas da região de Manaus. Em um primeiro momento, as quantidades recomendadas pelo fabricante foram utilizadas. Posteriormente, tais quantidades foram ajustadas, conforme foram sendo realizadas as misturas, obtendo-se maior eficiência na quantidade do produto. O Glenium é um produto compatível com outros aditivos utilizados na fabricação de concretos, como modificadores de viscosidade, exceto os à base de naftaleno sulfonatos. Os dados técnicos do produto são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Dados técnicos do Glenium 51

TESTE	ESPECIFICAÇÃO
Viscosidade (cps)	< 150
Sólidos (%)	28,5 - 31,5
Massa específica (g/cm³)	1,075 - 1,115
Função	Aditivo superplastificante para concreto
Base Química	Éter policarboxílico
Aspecto	Líquido
Cor	Branco turvo

Fonte: Basf Company.

3.6 Tec-flow

Conforme foram sendo produzidas as misturas de concreto, optou-se pelo uso combinado de mais um aditivo, o Tec-flow 7000, que é um superplastificante compatível com o Glenium 51, para aumentar ainda mais a trabalhabilidade da mistura. O Tec-flow é isento de cloretos, e é baseado em uma cadeia éter carboxílica que também produz efeito dispersante, tornando o concreto altamente moldável e adensável. Nos concretos endurecidos, reduz a permeabilidade, retrações e fissuras, e proporciona elevadas resistências mecânicas iniciais e finais. Deve ser adicionado com todas as matérias-primas já homogeneizadas, evitando-se a adição aos agregados secos. O Tec-Flow 7000 pode ser utilizado em conjunto com outro aditivo, devendo ser adicionado separadamente ao concreto. Os dados técnicos do produto são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Dados técnicos do Tec-Flow 7000.

TESTE	ESPECIFICAÇÃO
Densidade (g/cm³)	1,095 ± 0,02%
Sólidos (%)	40,0 ± 2,0
Massa específica (g/cm³)	1,075 - 1,115
Função	Aditivo superplastificante para concreto
Base Química	Éter policarboxílico
Aspecto	Líquido
Cor	Alaranjado

Fonte: Grace construction products.

3.7 Recover

O Recover é um estabilizador isento de cloretos, destinado a controlar o processo de hidratação dos diferentes tipos de cimento, mantendo por mais tempo a consistência do concreto sem que a mistura perca suas características iniciais. É um aditivo de ação estabilizante, que controla o tempo de pega do concreto, com efeito bastante positivo quando associado a superplastificantes à base de éter carboxílico. As características técnicas do produto são apresentadas na Tabela 11. Deve ser adicionado ao concreto após a mistura dos materiais, não devendo ser adicionado sobre os materiais secos. A dosagem foi ajustada no

decorrer dos ensaios laboratoriais. O fabricante especifica que a quantidade do mesmo nas misturas de concreto oscila entre 0,1 a 1% da massa de cimento.

Tabela 11 - Resumo dos dados técnicos do Recover

TESTE	ESPECIFICAÇÃO
Massa específica (g/cm³)	1,075 - 1,115
Função	Estabilizador de hidratação
Aspecto	Líquido
Cor	Verde

Fonte: Grace construction products

3.8 Pesquisa de campo

Algumas localidades do Brasil, em especial Manaus, utilizam seixos rolados oriundos do leito de rios como agregado graúdo na produção de concretos para construção civil, em decorrência da sua maior disponibilidade e do custo elevado dos agregados britados, que precisam chegar até as centrais dosadoras e localidades consumidoras vindos de outras regiões.

Em Manaus, por exemplo, o preço do agregado britado que vem do Município de Presidente Figueiredo, localizado a 120 km de Manaus, é bastante elevado e a opção de seixos rolados é bastante atrativa. Porém, existem restrições ao seu uso em obras de grande porte.

Esse levantamento teve início no segundo semestre de 2012 e estendeu-se até o final do primeiro semestre de 2013. Foram visitadas as maiores e principais obras em execução na cidade, algumas possuindo usina de fabricação própria, como é o caso da Arena da Amazônia. O objetivo dessa etapa foi identificar os materiais utilizados, suas finalidades, resistências mecânicas de projeto e os meios de controles empregados. Tais informações serviram de base para as outras etapas da pesquisa.

As visitas nas obras foram realizadas em datas coincidentes com os dias de recebimento dos concretos, para que se tivesse maior confiabilidade sobre as informações colhidas. Os dados de resistência dos concretos e os fins a que se destinavam eram conferidos nas notas de recebimento e acompanhamento dos lançamentos.

Foram pesquisadas quinze obras de pequeno, médio e grande porte em execução no período de 2012 e 2013. Os dados eram obtidos através de consulta oral aos engenheiros

residentes e encarregados, ou retirados dos próprios projetos executivos, quando eram permitidas suas consultas, nos canteiros de obra.

Também foi analisada a produção de concreto de três usinas que fornecem concreto aos canteiros de obra na cidade no mesmo período, pois foi verificado que as resistências utilizadas nas grandes obras que possuem usina própria são diferentes das resistências empregadas nas obras de pequeno e médio porte que são produzidos nas usinas comerciais.

3.9 Difratometria de raios X do pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland

Ensaios de DRX foram realizados no Laboratório de Análises Minerais (LAMIN) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em Manaus, como objetivo de caracterizar as fases mineralógicas presentes nos materiais: pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland.

Para DRX as amostras foram pulverizadas em um almofariz de ágata e 10g de cada material moído foram uniformemente depositados em um porta-amostra e prensados por meio de um equipamento manual, Figura 20.

(a) **(b)**

Figura 20 - Preparação das amostras para difratometria de raios X: (a) amostras pulverizadas; (b) amostra prensada.

As análise foram realizadas em um difratômetro de raios X (Figura 21) marca Panalyticalmodelo X´Pert Pro MPD (PW 3040/60), com goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta) e tubo de raios X de ânodo de Cu ($\lambda K\alpha 1$ =1,5406 Å), modelo PW3373/00, foco fino longo, 2200W, 60kV, e detector RTMS, Pixcel/1D.

Figura 21 - Difratômetro de raios X modelo X´Pert Pro MPD

A aquisição de dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X´PertHighScore versão 3.0d, também da Panalytical.

Foram utilizadas as seguintes condições de análise: voltagem 40 kV, corrente 40 mA, faixa de varredura de 5 a 70° (2θ), em passos de 0,02° (2θ), modo de digitalização contínua, tempo de contagem 50 s, divergência de fenda de 1/2°, máscara de 10 mm, e antidispersão de 5,7mm.

A identificação dos minerais foi feita através da comparação do difratograma obtido com padrões (fichas) do banco de dados do International Center dor Diffraction Data – Powder Diffraction File–ICDD-PDF. As fichas são específicas para cada mineral (por ex., quartzo, 46-1045), podendo haver diferentes fichas para o mesmo mineral, principalmente quando há variações na composição química, presença de soluções sólidas, etc.

3.10 Difratometria de raios X da areia, seixo e brita

As análises mineralógicas dos materiais: cimento, areia, brita e seixo utilizados na produção dos concretos de referência foram determinadas por difração de raios X no laboratório do Departamento de Geociências do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal do Amazonas, e as análises foram feitas em equipamento Shimadzu modelo XRD 6000.

A análise das amostras foi feita pela avaliação dos picos presentes no difratograma e pela comparação com um banco de dados específico, sendo possível determinar através de linhas espectrais de energia a composição mineralógica das amostras.

Os ensaios foram realizados após os materiais passarem por um processo de moagem por prensagem manual em um almofariz de ágata, peneiramento em malha de abertura 75 µm, e deposição nos porta-amostras, Figura 22.

(a) **(b)**

Figura 22 - (a) moagem dos materiais; (b) materiais ajustados aos porta-amostras.

3.11 Granulometria a laser

O objetivo do ensaio foi determinar a distribuição granulométrica dos materiais pulverizados: vidro, sílica e cimento Portland. Com os resultados obtidos nesse ensaio é possível a construção de curvas de distribuição granulométrica, importantes na formulação de concretos para determinação de critérios de empacotamento da mistura.

As análises de granulometria a laser foram realizadas no Laboratório de Análises Minerais - LAMIN da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em Manaus. Para avaliar o tamanho das partículas foi utilizado o equipamento Malvern MSS Mastersizer. Para que as partículas fossem analisadas individualmente, água foi utilizada como meio dispersante para os pós de vidro e sílica, e álcool isopropílico como meio defloculante para o cimento Portland. A Tabela 12 apresenta as condições de análise dos experimentos.

Tabela 12 - Condições das análises granulométricas a laser.

Nome da partícula	Pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland
Índice de refração da partícula	0
Índice de absorção da partícula	0
Dispersante	Água/álcool
Índice de refração do dispersante	1,33
Dispersor da amostra	Hydro 2000MU (A)
Módulo de análise	Geral
Obscuração	6,21
Resíduo	1,243
Concentração	0,0058
Span	3,851
Tipo de transformação de resultado	Volume
Volume médio ponderado D (4,3)	25,489
Uniformidade	1,31
Área de superfície específica	0,934
Superfície média ponderada D (3,2)	6,421
d (0,1)	2,454
d (0,5)	14,692
d (0,9)	59,039
Método de amostragem: Pontual	
Método de análise: Espalhamento a laser	

Fonte: CPRM

Devido à facilidade de operação, rapidez e amplitude de leitura, a técnica de análise de tamanho de partículas por granulometria a laser é muito empregada em diversos ramos da ciência. Podem ser analisadas partículas em faixas granulométricas de 10 nm até 3 mm (MANSO, 1999).

As amostras foram pulverizadas em um almofariz de ágata para desmanchar possíveis aglomerados de partículas. Para cada análise, 10 g da amostra foram depositados no

recipiente agitador. Quantidades menores que 10 g poderiam não ser suficientes para que o espalhamento da luz pudesse ser detectado, enquanto que em quantidades muito maiores as partículas podem se aglomerar, resultando em uma composição granulométrica incorreta. A quantidade ótima de partículas é determinada pela "obscuração", que é uma medida da atenuação da luz do laser que incide na suspensão, a qual deve ficar na faixa de 10% a 30%. Para isso, deve-se acrescentar mais amostra ou meio de dispersão até que a faixa correta de obscuração seja alcançada.

Com o bombeamento e a agitação da suspensão sendo realizada pelo equipamento, coloca-se a amostra no recipiente agitador. Após o procedimento padrão do programa e 5 minutos de agitação para cada amostra, os resultados da dispersão granulométrica são apresentados em forma de tabela e posteriormente transferidos para o formato xls para construção da curva granulométrica com auxílio do software Excel. A Figura 23 apresenta o equipamento empregado no experimento.

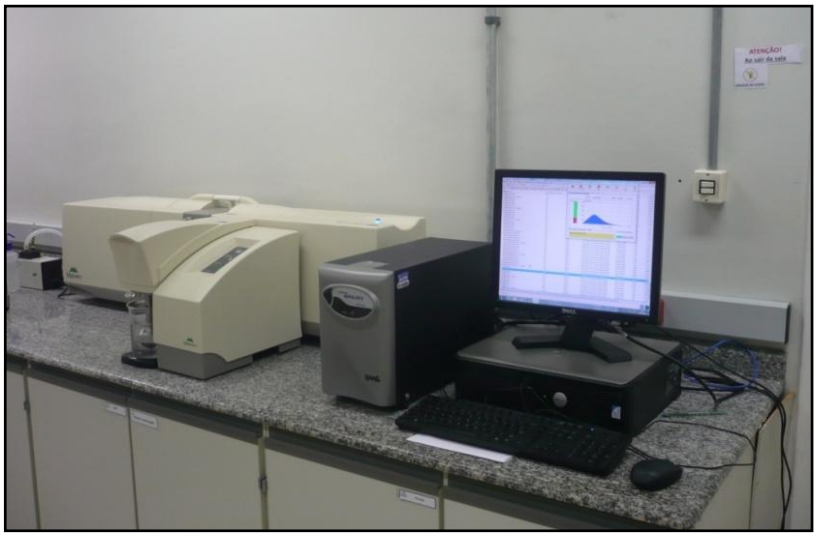


Figura 23 - Granulômetro a laser

3.12 Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

A espectrometria de fluorescência de raios X permite identificar os elementos presentes em uma amostra e pode ter fins qualitativos ou quantitativos. Baseia-se na medição da intensidade de raios X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, após serem excitadas por um feixe de raios X primário ou de partículas, como elétrons, prótons e íons em aceleradores de partículas (MELO JUNIOR, 2007).

Na análise quantitativa padrão o resultado é sempre normalizado para 100%, pois o mecanismo de quantificação é baseado na comparação relativa das intensidades dos picos de raios X característicos emitidos pelos elementos químicos presentes na amostra. As intensidades são corrigidas matematicamente pela equação de parâmetros fundamentais, cujo método apresenta limite de detecção de 0,1%. A sensitividade instrumental é calibrada com 20 padrões diversificados em termos de natureza do material (natural, sintético, pó prensado, disco fundido, etc.) e elementos químicos constituintes (pacote IQ + da Panalytical), para garantir a abrangência de materiais que podem ser analisados.

Para as análises, foram pesados 8 g de cada amostra e 2 g de cera auxiliar de prensagem em uma balança analítica Bel Engineering de fabricação italiana, Figura 24 (a), de capacidade de 120 g e precisão de 0,0001g.

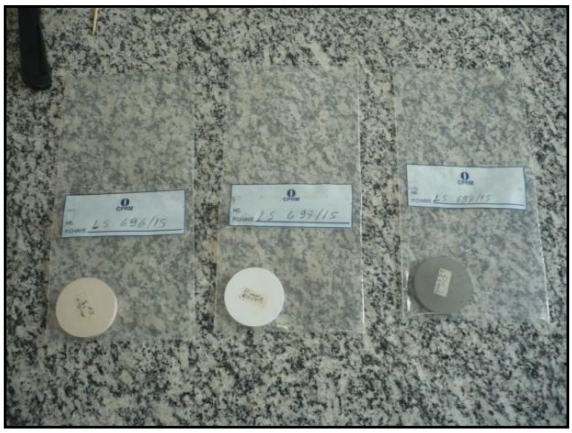
Após a pesagem as amostras secas foram compactadas em uma prensa PR-25A-HDVANEOX de até 25 toneladas-força (tf), Figura 24 (b), a carga aplicada foi de 20 tf.

(a) **(b)**

Figura 24 - Preparação das amostras para fluorescência de raios X: (a) pesagem das amostras; (b) equipamento de prensagem.

Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) foi realizada para determinação da composição química das amostras utilizando um espectrômetro WDS sequencial, modelo Axios Minerals da marca Panalytical, com tubo de raios X de ânodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência de 3,0 kW. A Figura 25 mostra as pastilhas prensadas e o equipamento onde foram feitas as análises.

Em situações que se pretende analisar uma amostra totalmente desconhecida, a técnica de FRX é bastante eficiente e vantajosa, principalmente por permitir uma rápida avaliação qualitativa dos constituintes da matriz. As aquisições e tratamento dos dados foram realizados através do software SuperQ Manager daPanalytical.



(a) **(b)**

Figura 25 - Fluorescência de raios X: (a) amostras prensadas; (b) espectrômetro WDS sequencial.

3.13 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland

Microscopia eletrônica de varredura foi realizada em amostras em pó de vidro, sílica e cimento Portland com o objetivo de observar as características da morfologia e microestrutura das partículas, e identificar os elementos químicos que as compõem.

MEV foi realizada em um microscópio Zeiss, modelo LS15 no laboratório da Gerência de Relações Institucionais e Desenvolvimento (GERIDE) da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais(CPRM) em Belém.

O MEV pode fornecer com relativa rapidez informações sobre a morfologia e identificação dos elementos químicos de uma amostra sólida. É um dos equipamentos mais versáteis disponíveis para a análise de características microestruturais de objetos sólidos.

A etapa de preparação das amostras foi constituída pela seleção das amostras, secagem e recobrimento da superfície com ouro para em seguida ser colocada no interior da câmara do MEV.

As imagens de elétrons secundários (Secundary Electron - SE) das partículas foram obtidas com 20 kV, corrente de feixe entre 230 e 290 nA, distância de trabalho de 8,5 mm e ampliação entre 500 e 1000 vezes.

As análises da composição química dos minerais foram realizadas por espectrometria por dispersão de energia (Energy Dispersive Spectrometry – EDS) de raios X. Essas análises foram feitas com voltagem de 20kV, corrente de feixe de 380 a 450 nA e distância de trabalho de 8,5mm. Os resultados obtidos foram padronizados por espectros de energia de padrões do

programa AZTec da Oxford Instrumentos. Resultados com desvio padrão acima de 10% da concentração do elemento foram descartados do cálculo da composição.

3.14 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das amostras fraturadas de concreto

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Engenharia de Materiais - SMM da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC.

Através da microscopia eletrônica de varredura das amostras fraturadas de concreto de regiões previamente escolhidas foi possível observar a microestrutura dos produtos formados na pasta cimentícia do concreto, os poros, e ainda as zonas de interface e possíveis fissuras e defeitos.

Foram utilizadas amostras das superfícies fraturadas dos ensaios mecânicos de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral escolhidos aleatoriamente nas idades de 7 e 90 dias, ou seja, nas primeiras e últimas idades de hidratação. Passaram por um processo de secagem e metalização a vácuo, tendo-se o cuidado para que o tempo de vácuo não fragilizasse os compostos da microestrutura.

Antes de serem analisadas pelo microscópio eletrônico as amostras passaram pelas seguintes etapas de preparação: (a) secagem em estufa para retirada da umidade por um período de 24 horas; (b) procedimento de secagem a vácuo, por um período de 10 minutos; (c) metalização com carbono, com tempo de recobrimento em dois intervalos de 10 segundos cada, utilizando-se um metalizador Quorum, modelo Q150R ES.

Para verificar a distribuição dos elementos químicos presentes nas amostras fraturadas de concreto foi feito mapeamento por elemento químico. O objetivo do mapeamento foi localizar os pontos da mistura com presença de vidro, para posteriormente ser feita análise microestrutural e a relação do material com a massa cimentícia do concreto.

3.15 Caracterizações complementares

No Laboratório de Materiais de Construção e Resistência dos Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM foram feitos os seguintes ensaios de caracterização:

a. Massa específica do cimento, que é a relação entre a massa do cimento e o seu volume. É indispensável para o cálculo da dosagem e do consumo de cimento por volume de concreto NBR 6474 (ABNT, 1984).

b. Finura do cimento, que fornece indicações do grau de moagem do cimento. Indiretamente pode dar informações sobre a hidratação do cimento da superfície para o interior do cimento, importante para o controle do tempo de estocagem NBR 7251 (ABNT, 1982).

c. Pega do cimento, determinação dos tempos de início e de fim de pega, os quais compreendem os tempos disponíveis para trabalhar, transportar, lançar e adensar os concretos e argamassas NBR NM 68 (ABNT 2003).

d. Resistência à compressão, que deve atender às exigências mínimas de resistência para as várias idades estabelecidas para cada tipo de concreto, podendo-se verificar por parte do fabricante o atendimento à classificação especificada por norma NBR 7215 (ABNT, 1996).

e. Massa unitária de um agregado, relação entre a massa e o volume de certa quantidade de agregado não compactado, considerando-se também os vazios entre os grãos. Este ensaio determina a massa unitária dos agregados, índice necessário à transformação de traços de concreto em massa para volume. NBR NM 45 (ABNT, 2006).

f. Massa específica, relação entre a massa do agregado seco e seu volume, sem considerar os poros permeáveis a água. O objetivo deste ensaio é determinar o volume ocupado pelo componente agregado na mistura de concreto NBR MN 53 (ABNT, 2009).

g. Teor de umidade do agregado, relação em porcentagem entre a massa total da água envolvida na superfície dos grãos dos agregados, que preenche os poros permeáveis do agregado, em relação a sua massa seca NBR 9939 (ABNT, 1987).

h. Consistência do concreto, uniformidade do abatimento entre uma remessa e outra de concreto. Este ensaio aplica-se aos concretos cuja consistência seja plástica, com abatimento igual ou superior a 10 mm NBR NM 67 (ABNT, 1998). O ensaio de abatimento determina a consistência do concreto.

i. Granulometria, classificação das partículas de uma amostra pelos respectivos tamanhos e as frações (massa, volume) correspondentes a cada tamanho NBR NM 248 (ABNT, 2003); NBR 7217 (ABNT, 1997).

j. Módulo de finura, soma das percentagens de grãos retidos, acumulados nas peneiras da série normal (excluídas as peneiras intermediárias), dividida por 100 NBR NM 248 (ABNT, 2003); NBR 7217 (ABNT, 1997).

k. Diâmetro máximo, grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, designação do tamanho de um agregado de diâmetro igual à abertura da malha da peneira, em mm, da série normal, correspondente à percentagem retida acumulada de agregado igual ou imediatamente inferior a 5% em massa NBR NM 248 (ABNT, 2003); NBR 7217 (ABNT, 1997).

3.16 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos estão relacionados à medida da capacidade que um determinado material tem em resistir aos esforços que lhe são aplicados. No presente trabalho, as resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral foram tomadas como referência para a seleção dos agregados graúdos, seixo e brita. Em edificações de concreto, os ensaios de caracterização dessas resistências são bastante utilizados em projetos de estruturas, pois definem os níveis de aceitabilidade do concreto no canteiro de obra. Tais ensaios, quando cuidadosamente programados, reproduzem com grande fidelidade as condições de serviço do material.

3.17 Produção de concretos convencionais

Os ensaios mecânicos de compressão axial e tração por compressão diametral objetivaram verificar as características dos concretos dosados com seixo e brita, para a seleção do melhor agregado empregado na região em resistências convencionais de 20 MPa e 25 MPa, para posterior utilização na produção de concretos de alta resistência com a substituição ou adição do cimento Portland por pó de vidro reciclado. Tais ensaios mecânicos são destrutivos e consistem na aplicação gradativa de carga em corpos de prova de 10 cm de diâmetro por 20 cm de comprimento, com velocidade de aplicação de carga estática, rompidos nas idades de 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Os resultados dos dois ensaios foram analisados na forma de gráficos de tensão versus idade de rompimento para a mesma resistência de projeto e utilização dos dois tipos de agregado.

3.18 Dosagem

Para analisar as propriedades dos concretos tomados como referência, dois fatores foram tomados como os mais significativos: a relação água/cimento (a/c); e a resistência à compressão aos 28 dias.

Foram estudadas dosagens convencionais para as duas resistências de concreto mais empregadas nas obras da cidade de Manaus, f_{ck} = 20 MPa e f_{ck} = 25 MPa, conforme o que foi levantado na pesquisa de campo, uma utilizando concreto com brita e outra utilizando seixo rolado. O f_{ck} representa a resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias de idade. As caracterizações mecânicas foram realizadas através dos ensaios de compressão axial e de tração por compressão diametral.

3.19 Produção de concretos

Após a caracterização dos materiais e definição dos traços a serem empregados na composição dos concretos, foi dado início à produção e moldagem dos corpos de prova, e investigação de suas propriedades essenciais, em seus estados fresco e endurecido.

Os materiais foram misturados em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 150 litros de concreto. Os dois tipos de concreto foram produzidos, variando apenas o tipo de agregado graúdo. Os concretos de resistência 20 MPa e 25 MPa foram produzidos em dias alternados. A produção seguiu as seguintes etapas de execução:

a. Para que não houvesse necessidade de controle da umidade dos materiais, principalmente da areia, os agregados graúdos e miúdos foram postos em estufa para posteriormente serem pesados.

b. A cuba e as pás da betoneira eram umedecidas com água antes do início do processo de amassamento. Posteriormente,100% do agregado graúdo e 70% da água de amassamento eram introduzidos e batidos por aproximadamente 30s, para acionamento da betoneira. Em seguida, 100% do agregado miúdo, 100% do cimento e os 30% de água restantes eram colocados e a betoneira era acionada até a total homogeneização do conjunto.

c. Finalizada a homogeneização, os concretos eram avaliados quanto à trabalhabilidade, que é a energia necessária para manipular o concreto fresco sem perda considerável da homogeneidade do material, pelo teste de abatimento do tronco de cone, *Slump Test*.

O ensaio de abatimento é bastante usado no cotidiano das concreteiras devido à rapidez de execução e simplicidade. É uma boa ferramenta de controle da qualidade do concreto, pois pode detectar mudanças na composição do concreto, principalmente se o teor de água foi modificado a partir do que foi especificado na dosagem original.

O ensaio de abatimento no Brasil é regulamentado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), e faz uso de um equipamento metálico em forma de tronco de cone aberto em ambas as extremidades, com 300 mm de altura, 200 mm de diâmetro superior e 100 mm de diâmetro inferior, mantido firmemente apoiado sobre uma placa metálica e não absorvente, por um operador apoiado sobre os apoios laterais fixados ao molde metálico, como mostra a Figura 26.

(a)

(b)

Figura 26: Ensaio de abatimento do concreto: (a) preparação para lançamento das camadas; (b) determinação da medida de abatimento.

O ensaio consiste em colocar três camadas de concreto no molde, adensar com 25 golpes cada camada. Em seguida, o cone é cuidadosamente erguido e retirado, ao longo de um intervalo de 5 a 10 s.

A escolha da consistência do concreto é definida em função da utilização do concreto ou do tipo de elemento estrutural. No caso de vigas e pilares, os valores máximo e mínimo de abatimento são, respectivamente, 100 mm e 25 mm.

3.20 Moldagem dos corpos de prova

Antes de serem moldados, os cilindros e suas bases foram previamente revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral. Em seguida, a moldagem foi realizada

sempre em duas camadas adensadas por doze golpes cada, com auxílio de uma haste metálica com extremidade semiesférica de 16 mm e comprimento de 60 mm, mostrados na Figura 27.

(a) **(b)**

Figura 27: Procedimentos de moldagem: (a) aplicação de óleo mineral (b) moldagem e adensamento dos corpos de prova.

A última camada deve ser moldada com quantidade em excesso de concreto, de forma que ao, ser adensada, complete todo o volume do molde e seja possível proceder ao seu rasamento, ou seja, eliminação do material em excesso.

(a) **(b)**

Figura 28: Procedimentos de desmoldagem: (a) identificação (b) cura saturada.

Após 24 h os copos de prova foram desmoldados, identificados e curados imersos em água, o que diminui as possibilidades de fissuração por retração Figura 28. Posteriormente, eram retirados da água 24 h antes da realização dos ensaios mecânicos.

Câmaras úmidas são depósitos de armazenamento de corpos de prova de concreto que asseguram que suas propriedades não sejam alteradas até o momento do rompimento NBR 5738 (ABNT, 2015).

3.21 Ensaios de resistência à compressão axial

Para que os concretos atingissem resistências convencionais de 20 MPa e 25 MPa, os primeiros traços foram descartados e as formulações ajustadas, foram alteradas as relações água/cimento (a/c). As formulações definitivas são apresentadas na sessão de Resultados, nas Tabela 32, onde as relações a/c de todas as misturas ficaram abaixo de 0,55.
A resistência à compressão foi calculada através da seguinte expressão:

$$f_c = \frac{4F}{\pi D^2} \tag{1}$$

f_c - resistência à compressão, MPa:
F - carga máxima de ruptura, N;
D - diâmetro do corpo de prova, mm;

Para este estudo foram moldados quatro lotes de concreto, para as duas resistências características e os dois tipos de agregados graúdos: seixo e brita, e a resistência mecânica à compressão axial foi verificada para as idades 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Foram rompidos três corpos de prova (réplicas) para cada idade, tendo sido assim produzidos quinze corpos de prova para cada formulação.

Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2007), no Laboratório de Materiais de Construção e Resistências dos Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, capeados com enxofre e ensaiados em prensa universal modelo N 1500 LC Pavitest, fabricante Contenco e capacidade de 120 tf.

3.22 Ensaios de resistência à tração por compressão diametral

Ensaios de tração por compressão diametral foram realizados em corpos de prova moldados de acordo com os procedimentos já descritos, e com utilização da mesma prensa universal utilizada nos ensaios de compressão axial. Os testes foram realizados de acordo com as normas ASTM D496 (ASTM, 2015); NBR 7222 (ABNT, 2011).

Este método de teste consiste na aplicação de uma força de compressão diametral ao longo do comprimento de um corpo de prova cilíndrico de concreto, a uma taxa constante, até que o rompimento ocorra. Duas tiras de madeira são colocadas entre os pratos da máquina de

compressão e o corpo de prova em ensaio, para minimizar efeitos de rugosidade e aplicação irregular da carga. Essas tiras devem ser isentas de defeitos macroscópicos e ter comprimento igual ao da geratriz do corpo de prova, além de seção transversal com dimensões padronizadas, Figura 29.

Com o valor encontrado da força o cálculo da resistência à tração por compressão diametral do corpo de prova foi determinado através da expressão:

$$\sigma_R = \frac{2F}{100\pi DH} \tag{2}$$

σ_R - resistência à tração, MPa;
F - carga de ruptura, N;
D - diâmetro do corpo de prova, cm;
H - altura do corpo de prova, cm.

Para o ensaio de tração por compressão diametral, também foram moldados quatro lotes de concretos, para as duas resistências características e os dois tipos de agregados graúdos, seixo e brita, e a resistência à compressão axial foi verificada para as idades 3, 7, 14, 21 e 28 dias. Foram rompidos três corpos de prova (réplicas) para cada idade, tendo sido assim produzidos quinze corpos de prova para cada formulação.

Devido à disponibilidade de equipamento e à falta de resultados de resistência de concretos produzidos com os materiais da região Amazônica, para comparação, foi ensaiado um grande número de traços em um período relativamente curto de tempo.

A aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão ao longo do corpo de prova cilíndrico de concreto gera, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. A falha de tração ocorre em vez da falha de compressão, porque as áreas de aplicação de carga estão em um estado de tensão de compressão triaxial, permitindo-lhe suportar tensões de compressão muito mais elevadas do que seriam observadas em um ensaio de resistência a compressão uniaxial.

(a) **(b)**

Figura 29: Ensaio de tração por compressão diametral: (a) amostra sob o efeito de carga (b) amostra após o rompimento.

3.23 Ensaio de porosidade e massa específica

Para cada traço de concreto foram moldados quatro corpos de prova com dimensões 10 cm x 20 cm, submetidos aos ensaios de porosidade e massa específica para as idade de 7, 14, 21, 28, 35, 42 e 49 dias. Os ensaios foram realizados em conformidade com norma (NBR 9778, 2009).

As amostras foram secas em estufa à temperatura de 105 °C durante um período de 24 horas, após o que foram determinadas suas massas secas (M_1). Procedia-se em seguida a imersão das amostras em um tanque com água com temperatura aproximada de 25 °C, durante um período mínimo de 72 horas. Completada a etapa de saturação em água eram retiradas as massas das amostras imersas em água (M_2), e ao ar (M_3), sendo a porosidade e massa específica calculadas pelas fórmulas abaixo:

$$P(\%) = \left(\frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2}\right) x100 \tag{3}$$

$$m = \frac{M_1}{M_2 - M_3} \tag{4}$$

$P(\%)$ = percentagem de porosidade;

M_1 = massa seca, g;

M_2 = massa saturada, g;

M_3 = massa imersa, g.

m = massa específica seca, g/cm³.

3.24 Análise pela estatística de Weibull

Levar em consideração a dispersão e não somente os valores médios dos resultados de resistência mecânica são essenciais para avaliar o comportamento mecânico de materiais frágeis, como os concretos. Uma medida da dispersão dos valores de resistência mecânica de tais materiais pode ser obtida qualitativamente através da estatística de Weibull. Geralmente os valores de resistência mecânica apresentados em tabelas são valores médios de uma série de medições individuais, mas os valores dessa série de resistência apresentam sempre uma dispersão. No caso de concretos com diferentes tipos de agregados essa dispersão deve ser considerada, porque é a partir dela que se pode avaliar o melhor material para uma aplicação almejada, no caso o melhor agregado para a produção de concretos que melhor se apliquem às condições de resistência mecânica necessárias.

O objetivo principal da primeira fase da presente pesquisa foi a escolha dos melhores materiais, não só os que apresentassem melhores resistências, mas os que apresentassem maior confiabilidade, para fabricação de concretos na região Amazônica. Devido às grandes variações de resistências encontradas em diferentes misturas de concreto e até para uma mesma composição nos ensaios de tração por compressão diametral, a análise estatística é fundamental.

Ensaios preliminares de tração por compressão diametral, tanto para as misturas produzidas com seixo quanto para as compostas com brita, apresentaram elevadas dispersões dos valores de tensões de ruptura em idades crescentes. No caso dos concretos produzidos com seixo a média das tensões foi de 3,5 MPa, mas algumas peças se romperam com tensão de 2,8 MPa, enquanto outras com 4,0 MPa, por volta de 15% de desvio.

Para a análise pela estatística de Weibull, foram ensaiados por compressão diametral quinze misturas, cada uma com quinze corpos de prova contendo seixo e o mesmo procedimento foi repetido para a brita, formulados para alcançar resistência característica de 20 MPa aos 28 dias, e o mesmo procedimento foi repetido para a resistência característica de 25 MPa.

A distribuição estatística de Weibull é um tratamento dos valores experimentais que descreve a probabilidade do material falhar quando submetido a um dado nível de tensão. Baseia-se na suposição da falha causada pelo rompimento do elo mais fraco, o que é adequado a materiais cerâmicos em tração, em que o maior defeito é o causador da fratura. A

função de distribuição de probabilidade de falhas conhecida como Distribuição de Weibull é uma expressão para a probabilidade de fratura acumulada expressa por:

$$P_r = 1 - exp\left\{-\left(\frac{\sigma_f}{\sigma_0}\right)^m\right\} \quad (5)$$

onde:

P_r = probabilidade de falha;

σ_f = tensão de ruptura;

σ_0 = constante de normalização

m = módulo de Weibull.

A probabilidade de uma amostra falhar em um determinado valor de tensão é dado pela fórmula:

$$P_{ri} = \frac{(i - 0{,}3)}{(N + 0{,}4)} \quad (6)$$

onde:

i = posição do resultado, tendo os resultados sido organizados em ordem crescente de resistência mecânica;

N = número total de amostras;

P_{ri} = probabilidade de falha do resultado i.

Manipulando-se adequadamente a expressão (1) e considerando σ_f para o qual a probabilidade de falha é 0,632 e que existe um σ_0 abaixo do qual a probabilidade de falha é nula, então:

$$ln\left[ln\left(\frac{1}{1 - P_{ri}}\right)\right] = ln\left(\frac{V}{\sigma_0}\right) + m.\ln(\sigma_f) \quad (7)$$

Onde V = volume da amostra.

3.25 Dosagem do alta resistência com substituição/adição de pó de vidro e pó de sílica

Após os estudos iniciais para avaliação das dosagens, ficou estabelecida uma dosagem padrão, de referência, sem adições minerais, a partir da qual foram produzidas as demais, com adições e/ou substituições de vidro e sílica. As quantidades de aditivos superplastificantes foram obtidas através de tentativa e erro, tendo como ponto de partida a quantidade recomendada pelo fabricante, desde que não houvesse desagregação e perda de consistência excessiva do material.

Para analisar as propriedades dos concretos tomados como referência, dois fatores foram tidos como os mais significativos: a relação água/cimento (a/c) e a resistência à compressão aos 7, 14, 21, 28 e 90 dias.

As misturas e quantidades dos materiais constituintes com a adição e/ou substituição de vidro e sílica em substituição ao cimento Portland estão apresentados na Tabela 38. Nas dosagens estudadas manteve-se constante o fator água/materiais cimentícios (a/mc), sendo que vidro e sílica foram considerados materiais cimentícios. As quantidades de aditivos superplastificantes estão expressas em percentagem em relação à quantidade de materiais cimentícios.

3.26 Produção de concretos de alta resistência

O processo de produção dos concretos de alta resistência com adição de pó de vidro e pó de sílica seguiram praticamente os mesmos procedimentos dos concretos convencionais, mudando apenas o processo de mistura na betoneira.

Nesse caso, após a betoneira ter as pás e cubas umedecidas com água no início do processo, recebia 100% do agregado graúdo e 40% da água de amassamento, e era acionada por aproximadamente 60 s. Em seguida, eram colocados 100% do agregado miúdo, 100% do cimento misturado ao pó de vidro ou sílica e 40% de água, com mais 120 s de acionamento. Posteriormente mais 100% de glenium e 100% de tecflow eram adicionados, com novos 120 s de acionamento. Por último, os 20% de água restantes e 100% de recover eram adicionados, e a betoneira acionada até a total homogeneização do conjunto.

3.27 Moldagem dos corpos de prova

Antes de serem moldados, os cilindros e suas bases foram previamente revestidos internamente com uma fina camada de óleo mineral. Em seguida, a moldagem foi realizada sempre em três camadas adensadas mecanicamente com vibrador de concreto com ponta de lança de 25 mm de diâmetro (Figura 30). A preferência por este processo foi por ser mais eficiente na compactação dos concretos experimentados, reduzindo os espaços livres e bolhas. O bom resultado da compactação realizada segundo esse procedimento foi constatada através de uma melhor resistência após a secagem, quando comparado com resultados de corpos de prova produzidos através compactação manual e por mesa vibratória.

(a) **(b)**

Figura 30: Procedimentos de moldagem: (a) aplicação de óleo mineral (b) moldagem e adensamento vibratório dos corpos de prova.

3.28 Ensaios de resistência à compressão axial

Como eram almejados concretos de alta resistência, acima de 50 MPa, os primeiros traços foram descartados por apresentarem resultados aquém dessa meta, e as formulações ajustadas até resultarem nos traços apresentados na Tabela 38, onde as relações de a/mc para todas as misturas ficaram em 0,36.

Sete séries de misturas foram preparadas em laboratório, entre as quais se inclui uma mistura de controle, ou concreto convencional, sem adição de vidro ou sílica. As proporções de cimento e água foram mantidas constantes para que fossem avaliados os efeitos das várias combinações realizadas. Por exemplo, nos concretos com substituição de 10% de vidro e 10% de sílica foram mantidas as mesmas proporções de água, mesmo que a mistura perdesse um pouco da trabalhabilidade.

Para o estudo de resistência à compressão axial foram moldados 18 corpos de prova para cada mistura, sendo 3 amostras para cada idade e 3 contraprovas. Caso a necessidade de ajuste fosse verificada ao longo do processo de produção do concreto, todas as misturas eram refeitas para que as mesmas condições de produção e dosagem fossem mantidas para todas as amostras de uma mesma série. As amostras foram testadas nas idades 7, 14, 21, 28 e 90 dias.

Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR 5739/2007, no Laboratório de Materiais de Construção e Resistências dos Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - IFAM. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 10 x 20 cm, capeados com cimento e ensaiados em prensa universal modelo N 1500 LC Pavitest, fabricante Contenco e capacidade de 120 tf.

4 Resultados e discussão

4.1 Pesquisa de campo

O gráfico da Figura 31 apresenta as resistências à compressão aos 28 dias da pesquisa às obras e os tipos de agregados graúdos mais frequentemente empregados nas mesmas.

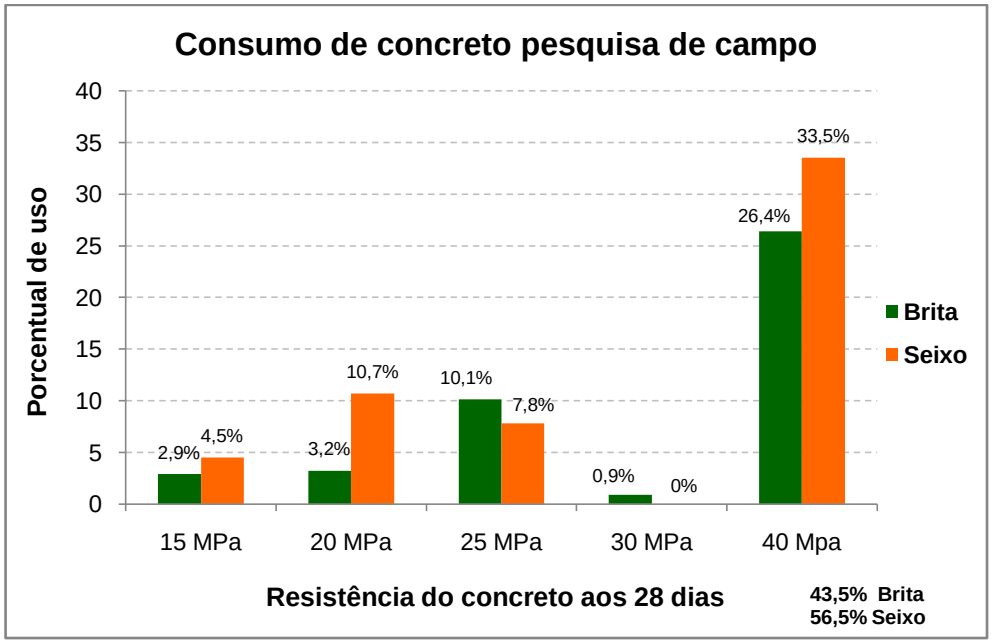


Figura 31 - Consumo de concretos das obras pesquisadas com diferentes resistências aos 28 dias na cidade de Manaus.

No gráfico da Figura 31 destacam-se como de maior utilização os concretos com resistências de 40 MPa aos 28 dias, produzidos tanto com britas como com seixos. O maior uso desse tipo de concreto, no entanto, foi decorrência de estarem sendo construídas em Manaus duas grandes obras para a copa de 2014, a de ampliação do Aeroporto Internacional Eduardo Gomes e a reconstrução do estádio Arena da Amazônia, onde foram utilizados britas e seixos, respectivamente.

Em geral, resistências de projeto de 40 MPa não são comuns nas obras de Manaus e, quando são especificadas, na maioria das vezes, britas são adotadas como agregados graúdos, por existirem estudos mais precisos quanto ao seu uso.

A proporção de concretos consumidos nas obras visitadas no período mencionado foi de 43,5% em volume de concretos produzidos com brita e 56,5% de concretos produzidos com seixo.

As visitas foram realizadas em datas coincidentes com os dias de recebimento dos concretos, para que se tivesse maior confiabilidade nos resultados. Os dados de resistência dos concretos e os fins a que se destinavam eram conferidos nas notas de recebimento e acompanhamento dos lançamentos.

Somente em um dos casos a resistência de projeto nos concretos convencionais nas obras visitadas não estava em conformidade com a NBR 6118 Projeto de estruturas de concreto - Procedimento: as resistências aos 28 dias foram trabalhadas abaixo da especificada. Em todos os outros casos as resistências estavam em conformidade à norma.

Os ensaios de resistência à compressão simples nem sempre foram efetuados pelos construtores, embora seja um ensaio que deve ser realizado na obra para verificar se o concreto recebido apresenta a resistência solicitada.

A situação não se repete quando analisamos a produção de concreto, no mesmo período, nas centrais de concreto pesquisadas e que abastecem as obras de médio e pequeno porte da cidade, conforme mostra a Figura 32.

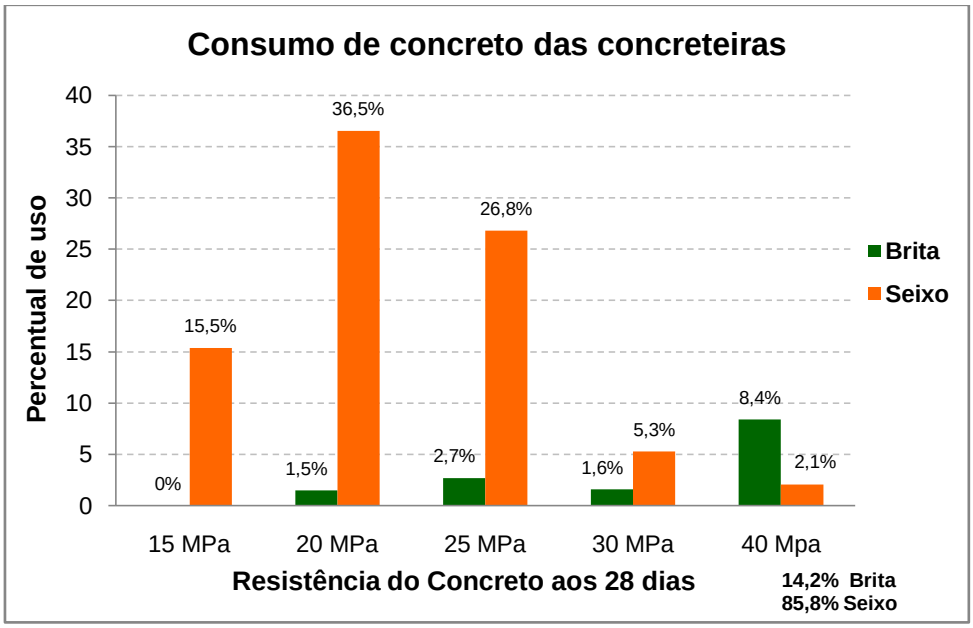


Figura 32: Consumo de concreto das centrais pesquisadas com diferentes resistências aos 28 dias na cidade de Manaus.

As resistências especificadas em projeto ficaram em 20 MPa e 25 MPa, sendo o seixo o principal agregado utilizado na produção dos concretos.

A principal preocupação dos construtores quanto ao recebimento dos concretos convencionais dosados nas centrais comerciais são a resistência característica do concreto e sua trabalhabilidade, pois influenciam diretamente no seu lançamento.

Em todas as obras a preocupação principal com os concretos convencionais é a resistência aos 28 dias. Variando a quantidade de cimento, os outros componentes da mistura, também devem variar para que no final a resistência apresente a característica solicitada pelo construtor.

Apesar das diferenças apresentadas nos gráficos das Figura 31 e Figura 32, pode-se concluir que as resistências padrões empregadas são as de 20 e 25 MPa para concretos produzidos com brita e seixo. Além disso, o seixo é o agregado mais empregado nas obras da cidade de Manaus.

4.2 Difratometria de raios X

Neste item são apresentados os resultados experimentais relativos às caracterizações mineralógicas das amostras de pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland empregados na produção dos concretos do presente estudo.

As amostras foram submetidas à difração de raios X nas mesmas condições de medida. Para cada amostra, será apresentado um difratograma com a posição dos principais picos das fases identificadas através de um banco de dados padrão sistema ICDD-PDF determinados com auxílio de computador.

4.3 Pó de vidro

A Figura 33 apresenta o difratograma de raios X do pó de sílica utilizado na produção dos concretos do presente trabalho. Pode-se observar os picos de difração característicos de fases cristalinas.

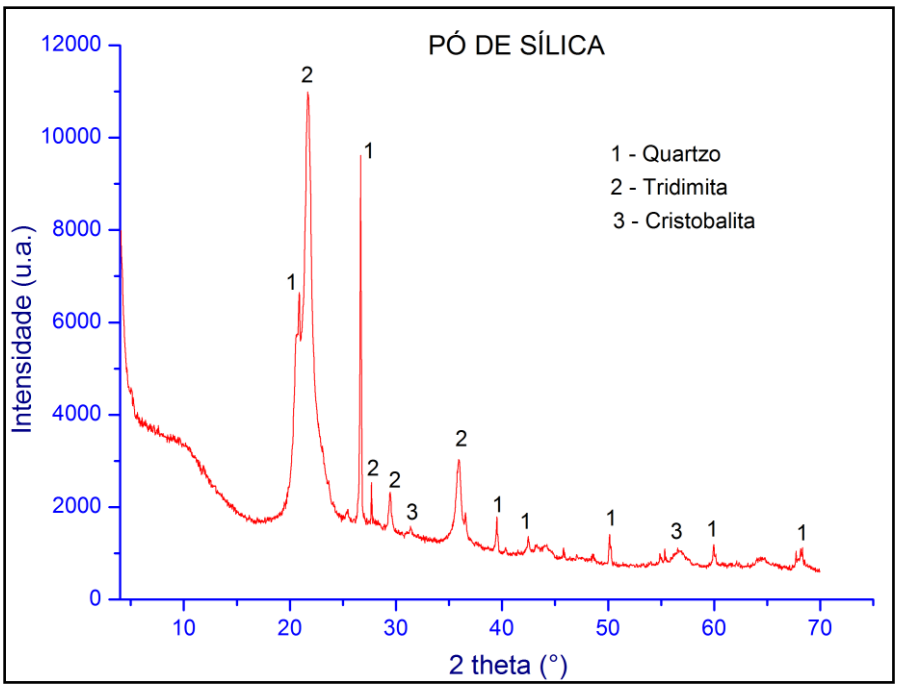


Figura 33 - Difratograma da amostra de pó de sílica.

O grupo da sílica reúne diversos polimorfos: minerais cristalinos, variedades criptocristalinas e ainda compostos amorfos. Os minerais desse grupo se formam em ambientes geológicos diversificados e em condições diferenciadas de temperatura e pressão. São conhecidos oito polimorfos de SiO_2 de ocorrência natural e, dentre eles, os mais importantes são quartzo, tridimita, cristobalita, coesita e stishovita (VLACK, 2002).

A difração de raios X da sílica em pó utilizada no presente trabalho apresentou mais de uma fase, como mostrado na Figura 33. A identificação dos picos de difração foi feita pela comparação com fichas do banco de dados do ICDD-PDF. As fases encontradas são indicadas na Figura 33 e na Tabela 13. Os picos mostram a presença de quartzo e tridimita como as fases presentes em maior proporção na sílica ativa empregada na produção dos concretos, e possivelmente traços de cristobalita.

Tabela 13 - Compostos cristalinos identificados no pó de sílica

Nome do composto	Fórmula química	Mineral	Referência
Óxido de silício	SiO_2	Quartzo	00-046-1045
-	SiO_2	Tridimita	00-018-1170
-	SiO_2	Cristobalita	00-039-1425

Fonte: Resultados de laboratório

4.4 Cimento Portland

A Figura 34 apresenta o difratograma com indicação dos compostos cristalinos do cimento Portland. Pode-se verificar a presença de várias fases em sua composição: reflexões agudas e intensas de quartzo, calcita, magnésia e silicato de cálcio, além de reflexões de menor intensidade de brownmillerita, gesso e birnessita, embora a indicação dessas fases minoritárias baseadas em poucos picos de baixa intensidade necessite de mais estudos para confirmação. As identificaçoes dos compostos cristalinos baseadas em fichas do banco de dados do ICDD-PDF estão indicadas na Tabela 14.

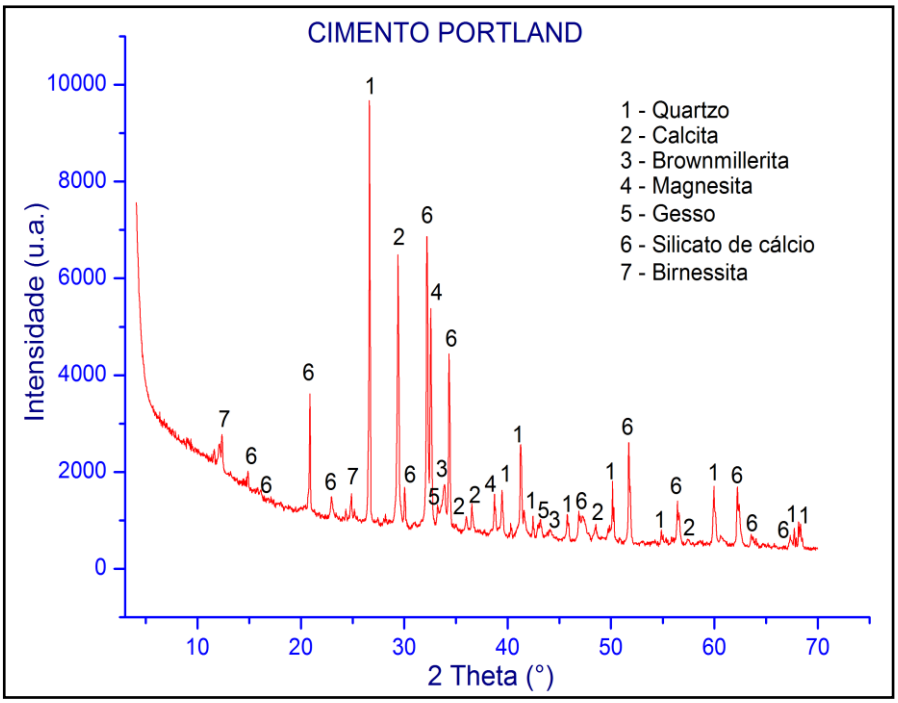


Figura 34 - Difratograma da amostra de cimento Portland

O quartzo está entre os minerais mais abundantes na crosta continental e é um constituinte essencial, ou pelo menos comum, da maioria das rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, e aparece como um dos componentes principais na composição do cimento Portland.

Tabela 14 - Compostos cristalinos identificados no cimento CP IV Z - 32

Nome do composto	Fórmula química	Mineral	Referência
Óxido de silício	SiO_2	Quartzo	00-046-1045
Carbonato de cálcio	$CaCO_3$	Calcita	00-005-0586
C_4AF-Ferro aluminato tetracálcico	$Ca_2(Al,Fe^{+3})_2O_5$	Brownmillerita	00-030-0226
Carbonato de magnésio	$MgCO_3$	Magnesita	00-008-0479
Sulfato hidratado de cálcio	$CaSO_4.2H_2O$	Gipsita (Gesso)	00-033-0311
C_3S - Silicato de cálcio	Ca_3SiO_5	Alita	00-049-0442
Hidróxido de sódio e maganês	$Na_{0,55}Mn_2O_4.1.5H_2O$	Birnessita	00-043-1456

Fonte: Resultado de laboratório

Os minerais Birnessita e Caolinita, assim como a Lizardita e a Brownmillerita, possuem picos principais coincidentes, conforme indicado nas Figura 35 e Figura 36 e Tabela 15 e Tabela 16. Todas essas fases são constituintes do cimento, dificultando desta forma sua individualização por DRX, devido à limitação do método analítico.

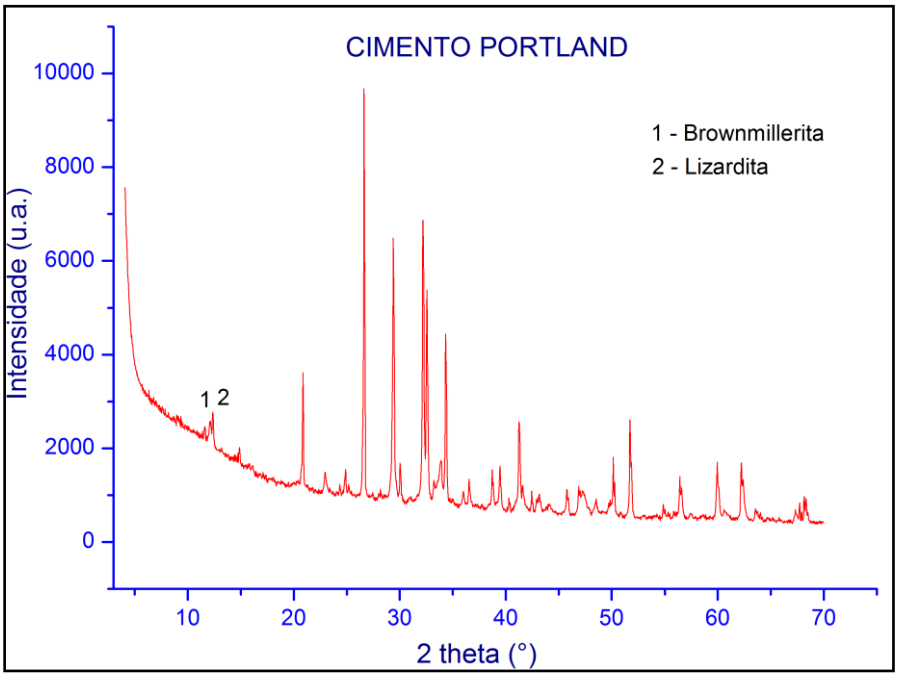


Figura 35 - Difratograma da amostra de cimento Portland

Tabela 15 - Compostos cristalinos de Lizardita e a Brownmillerita identificados no cimento CP IV Z - 32

Nome do composto	Fórmula química	Mineral	Referência
C_4AF-Ferro aluminato tetracálcico	$Ca_2(Al,Fe^{+3})_2O_5$	Brownmillerita	00-030-0226
-	$(Mg,Fe^{2+})_3Si_2O_5(OH)_4$	Lizardita	00-050-1606

Fonte: Resultado de laboratório

Minerais de mesmo grupo possuem estrutura semelhante, precisando de análises complementares para a sua identificação. Algumas dúvidas na identificação de algumas fases podem ser resolvidas através de análises químicas.

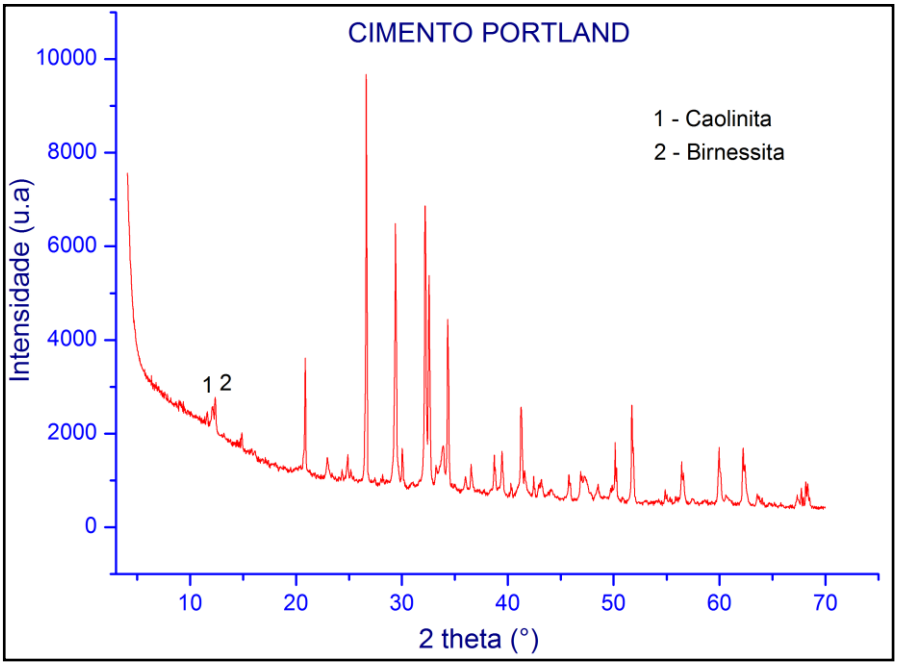


Figura 36 - Difratograma da amostra de cimento Portland

Tabela 16 - Compostos cristalinos Birnessita e Caolinita identificados no cimento CP IV Z

Nome do composto	Fórmula química	Mineral	Referência
-	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Caolinita	00-029-1488
Hidróxido de sódio e maganês	$Na0.55Mn_2O_4.1.5H_2O$	Birnessita	00-043-1456

Fonte: Resultado de laboratório

4.5 Areia, seixo e brita

Nos resultados de DRX mostrados na Figura 37, observa-se que tanto as areias, seixos e britas são compostos primordialmente do mineral quartzo e feldspato, uma vez que todos os materiais são substâncias naturais e provenientes de formações rochosas semelhantes e amplamente distribuídas na região. Além do quartzo e feldspato, podem ser observados em menores quantidades o plagioclásio e a caulinita, não apresentando grande diferença na composição mineralógica dos três agregados.

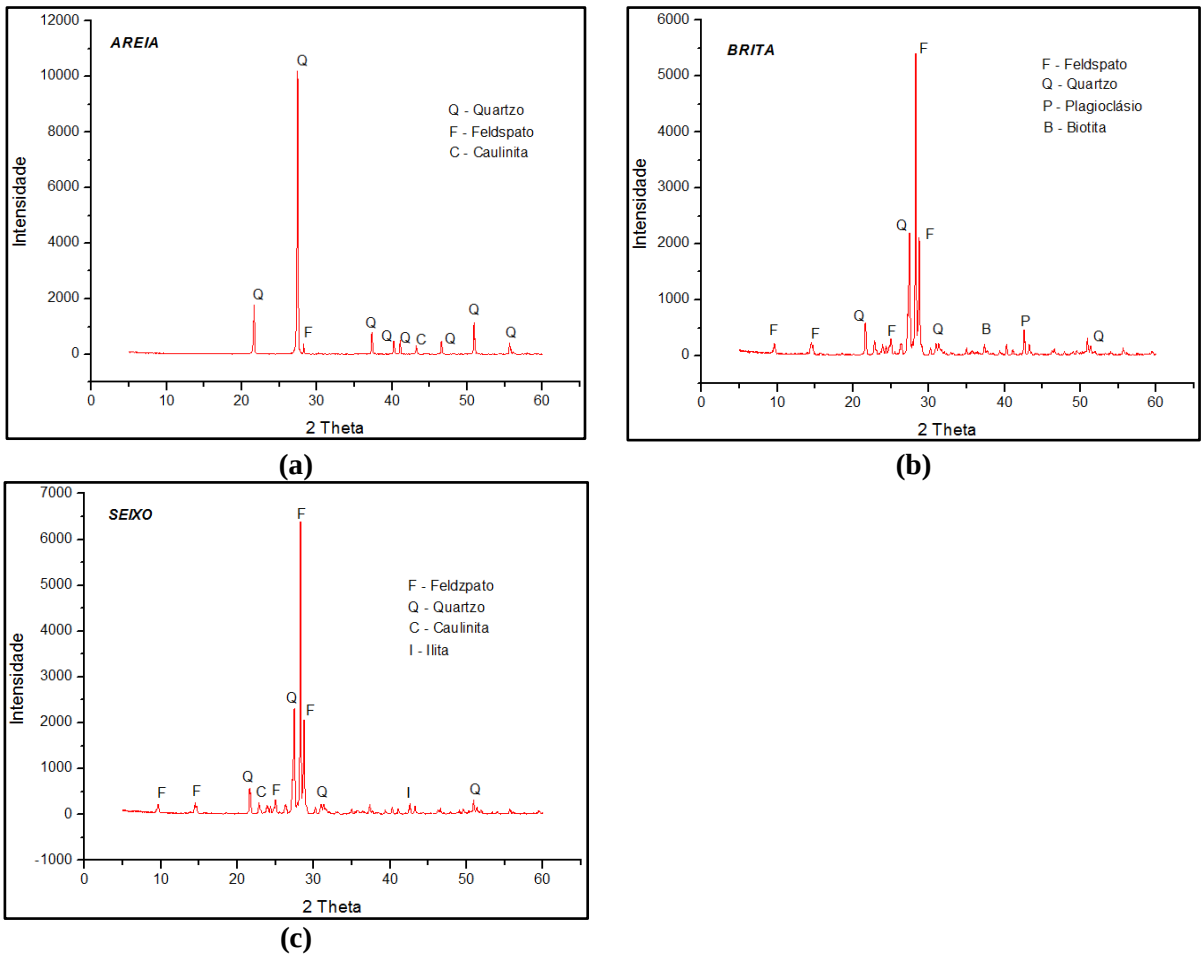


Figura 37 - Difratograma de raios X: (a) areia, (b) brita; e (c) seixo.

4.6 Granulometria à laser

O método de determinação da composição granulométrica por peneiras não é suficiente para caracterização de agregados finos uma vez que partículas alongadas podem passar por peneiras de malhas inferiores, e agregados com dimensões superiores podem estar em grupos de agregados identificados como malha menor, e partículas abaixo de 22 μm (500

mesh) são muito difíceis de serem separadas por peneiras. Além disso, materiais que passam por diferentes processos de moagem podem apresentar a mesma quantidade de material em uma determinada faixa granulométrica, delimitada entre duas peneiras, porém podem apresentar distribuição de tamanhos de partículas diferentes. Além disso, se as partículas forem muito alongadas ou achatadas, pode haver uma diferença bastante grande entre a distribuição de tamanho real e a estimada com esta técnica.

Da Figura 38 à Figura 42 apresentam-se os gráficos dos resultados dos ensaios de granulometria à laser, realizados em pós de vidro, sílica e cimento Portland utilizados no presente estudo. Em uma análise comparativa, Figura 41, pode-se observar que as partículas que compõem o pó dos três materiais possuem tamanhos aproximadamente entre 0,3 e 300 μm. Entretanto, o cimento Portland apresenta granulometria média (~20 μm) entre as granulometrias dos pós de vidro (~60 μm) e de sílica (~15 μm), enquanto a sílica apresenta a maior concentração de partículas abaixo de 10 μm.

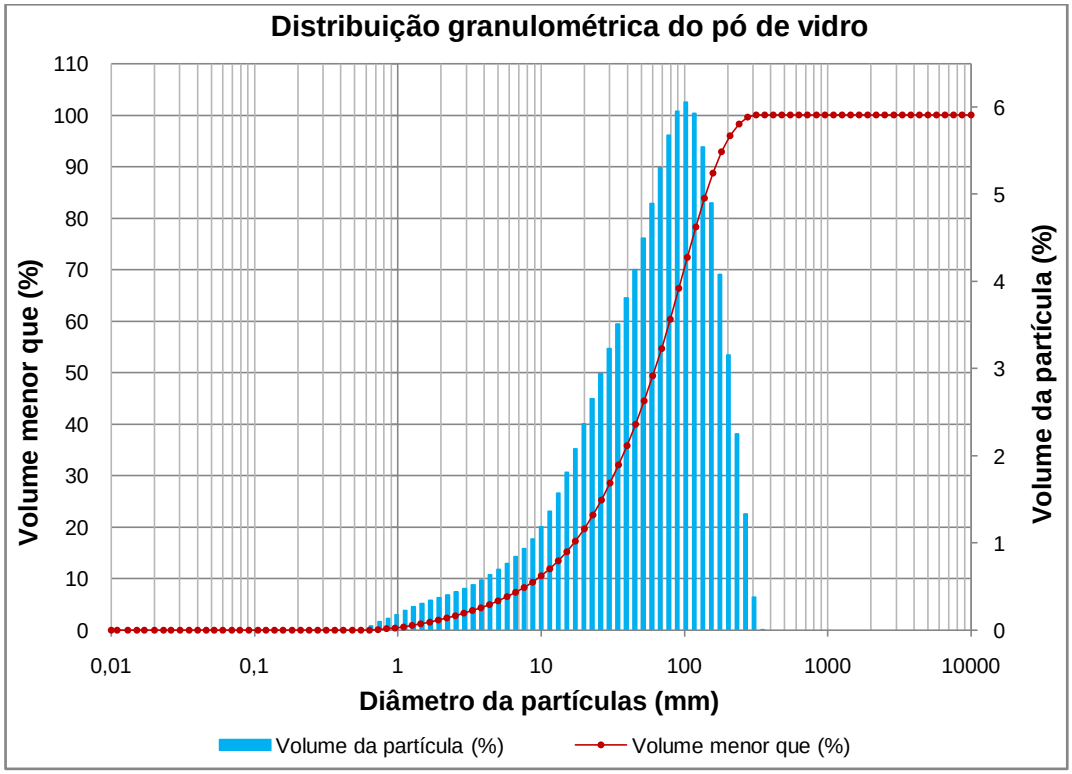


Figura 38 - Distribuição granulométrica do pó de vidro.

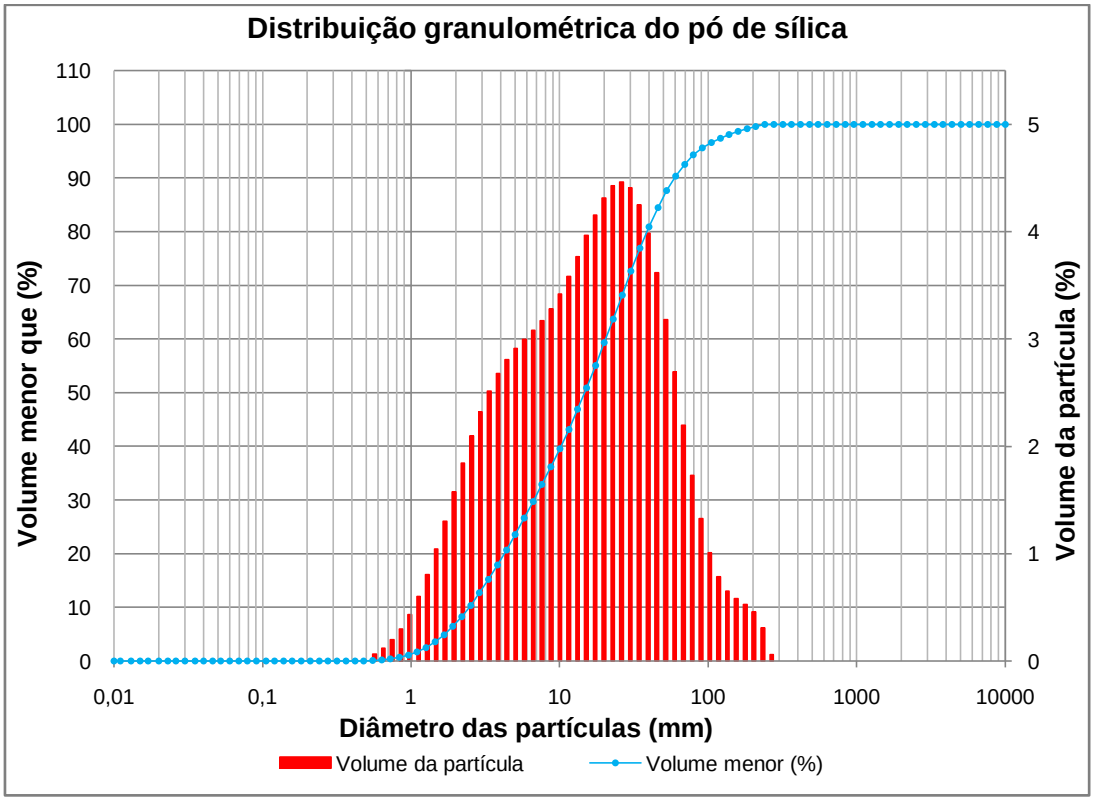


Figura 39 - Distribuição granulométrica do pó de sílica.

O controle da distribuição de tamanhos de partículas é fundamental para a produção dos concretos, influindo de maneira significativa na microestrutura do material e, portanto, em sua resistência mecânica, densidade e permeabilidade. O diâmetro médio não deve ser apresentado como única informação da granulometria de um material particulado. A distribuição granulométrica é muito importante, pois pós com diâmetros médios idênticos podem apresentar diferentes distribuições.

As curvas de distribuição granulométrica da Figura 41 demonstram que o vidro em pó apresenta distribuição granulométrica mais concentrada em tamanhos maiores, com pico em 100 μm, quando comparado com os pós de cimento e sílica, porém sua distribuição é menos irregular. As curvas de granulometria incrementais, comparadas entre si na Figura 42, demonstram que os tamanhos de partículas dos diferentes pós são relativamente próximos, mas nenhuma das três amostras analisadas possui distribuição monomodal.

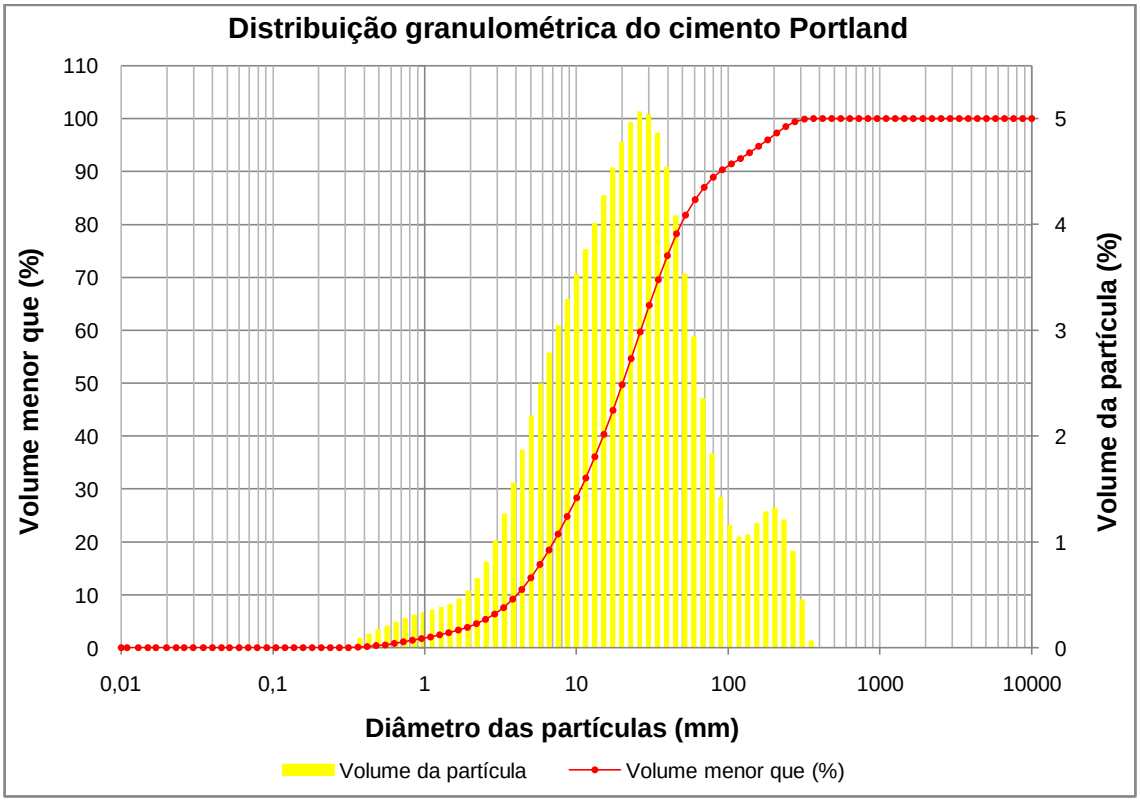


Figura 40 - Distribuição granulométrica do cimento Portland

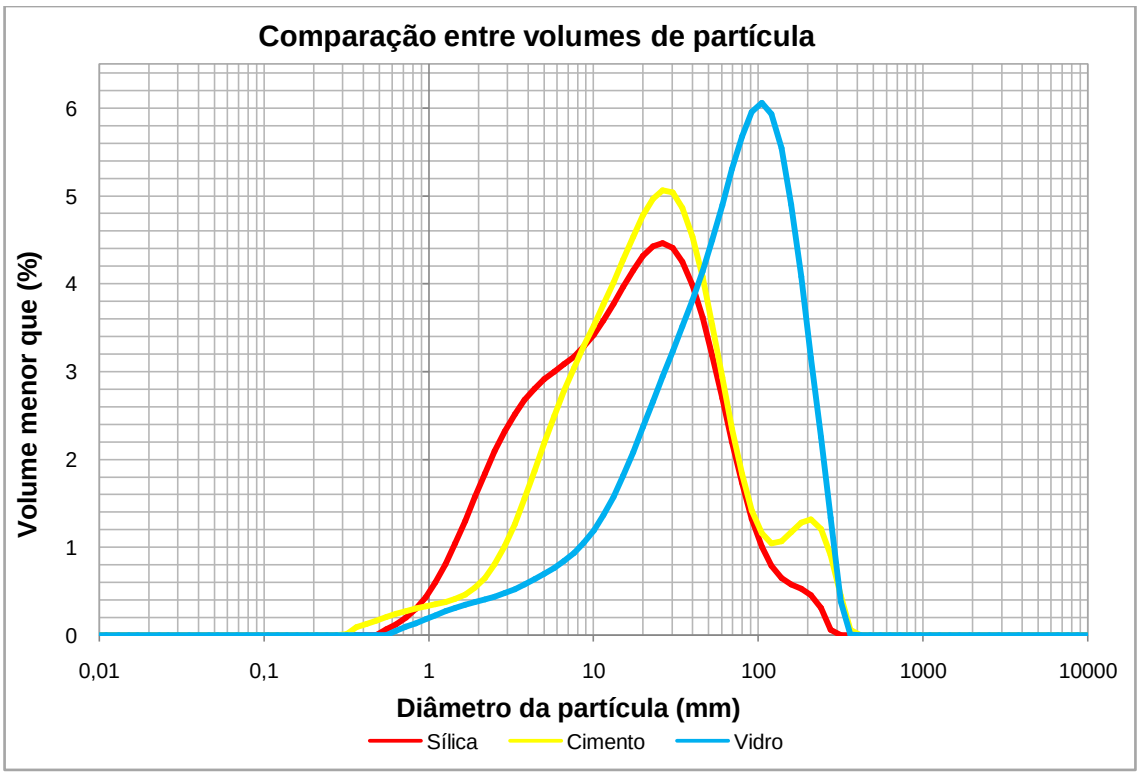


Figura 41 - Gráfico comparativo entre os volumes das partículas de pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland.

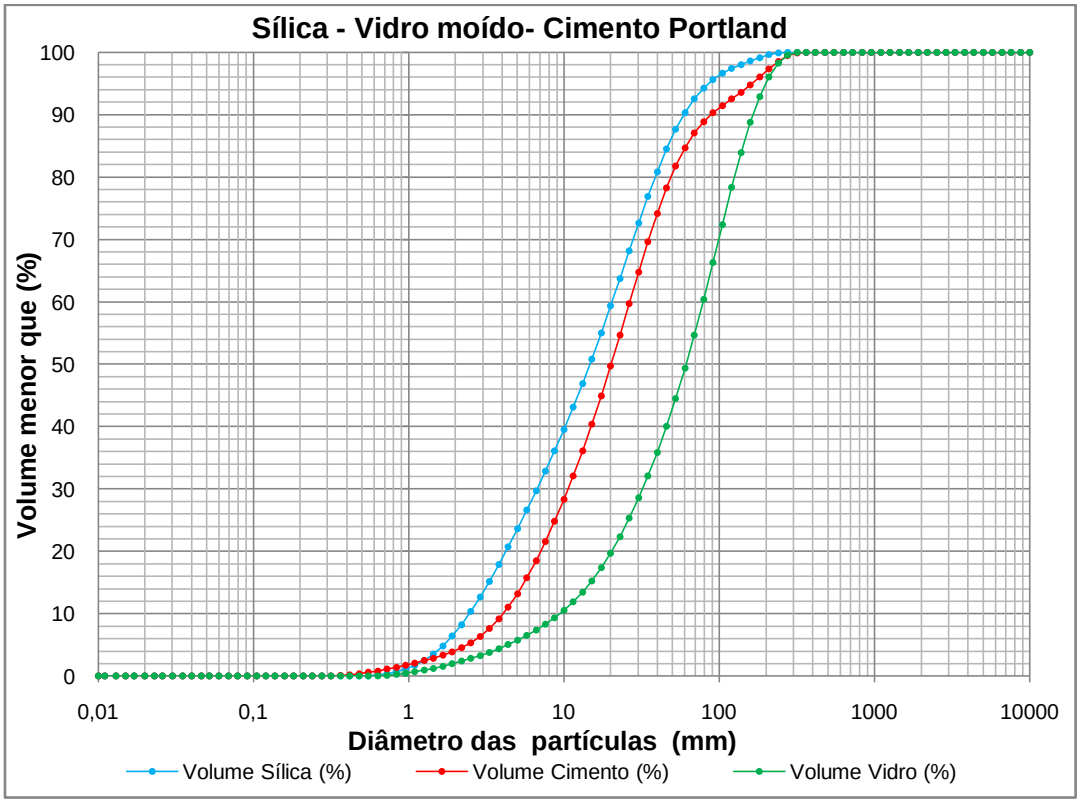


Figura 42 - Gráfico comparativo entre as composições granulométricas do pó de vidro, pó de sílica e cimento Portland.

4.7 Espectrometria de fluorescência de raios X

A utilização da técnica de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) em conjunto com a difração de raios X (DRX) representa uma poderosa combinação para identificação de espécies inorgânicas e fases em amostras complexas. Com a utilização de bancos de dados com padrões de DRX e FRX de diversos elementos existentes, a identificação rápida e quantificação de materiais inorgânicos torna-se uma rotina.

Os resultados de fluorescência de raios X (FRX) são dados na Tabela 17 para os componentes principais, e na Tabela 18, referente aos componentes minoritários ou traços.

Tabela 17 - Análises químicas (% massa) por fluorescência de raios X.

COMPONENTE	Vidro	Cimento Portland	Sílica
SiO_2	70,5	27,5	92,7
Al_2O_3	0,2	5,8	2,3
Fe_2O_3	0,5	4,2	0,6
MgO	2,4	1,2	0,2
CaO	13,5	56,6	3,2
Na_2O	12,4	<0,1	-
K_2O	<0,1	0,5	0,1
TiO_2	<0,1	0,4	0,3
SO_3	0,3	3,5	0,4
Outros	0,3	0,4	0,15
Total	~100	~100	~100

Fonte:Resultado de laboratório

Tabela 18 - Análise química por fluorescência de raios X; elementos traços.

Comp.	MnO	P_2O_5	CuO	ZnO	Cr_2O_3	ZrO_2	SrO	NiO	SnO_2	Pr_2O_3	V_2O_5
Vidro	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-
Cimento Portland	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	-	-	<0,1

Fonte: Resultado de laboratório

4.8 Caracterização química do vidro

De acordo com a Tabela 17, verifica-se que os resíduos de vidro correspondem a vidros sódico-cálcicos típicos. O principal óxido formador do vidro é o SiO_2, que na composição química corresponde a 70,5% (em massa). O alto percentual de dióxido de silício indica que o vidro apresenta resistência química relativamente elevada. Os próximos componentes em maior proporção, Na_2O (12,4%) e CaO (13,5%) são modificadores usados para, respectivamente, reduzir o ponto de fusão da sílica e estabilizar quimicamente a mistura, impedindo que o vidro composto de sílica e Na_2O seja solúvel (SMITH e HASHEMI, 2012).

A análise também constatou concentração relativamente elevada de óxido de magnésio (2,4%), que também é um óxido modificador estabilizante que também tem a função de ajustar a viscosidade do fundido durante o processo de fabricação (BEVERIDGE, DOMENÉCH e PASCUAL, 2004).

A Tabela 18 apresenta uma análise de possíveis elementos encontrados em baixa concentração, dentre os quais se destacam óxidos de cobre e cromo, que são compostos de elementos cromóforos, utilizados para conferir coloração verde ao vidro.

4.9 Caracterização química do cimento Portland

De acordo com a Tabela 17, verifica-se a presença dos componentes essenciais do cimento Portland: CaO (56,6%), SiO_2 (27,5%), Al_2O_3 (5,8%) e Fe_2O_3 (4,2%), que constituem 94,1% do total da análise de óxidos. Também são detectadas porções menores, Tabela 18, mas significativas, de óxido sulfídrico SO_3 (3,5%) e MgO (1,2%), que são adicionados após a calcinação para retardar o tempo de pega do produto (TAYLOR, 1990).

4.10 Caracterização química do pó de sílica

A Tabela 17 também apresenta a composição química do pó de sílica (microsilex) empregada na produção dos concretos estudados, onde se percebe que é composta basicamente de SiO_2 (92,7%). Para (MEHTA e MONTEIRO, 2008), quanto maior o teor de sílica, mais reativa será a pozolana em uma mistura de concreto. A sílica ativa possui ação química como material pozolânico de alta reatividade, reagindo com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) formado na hidratação do cimento. Essa reação dá origem a um composto resistente de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), semelhante ao formado pela reação do cimento.

A Figura 43 apresenta um gráfico comparativo dos componentes principais encontrados na sílica por FRX no presente trabalho e as composições apresentadas pelo fabricante. A norma C168-05 (ASTM, 2005) classifica a pozolana como silicosa desde que satisfaça os limites estabelecidos na Tabela 19.

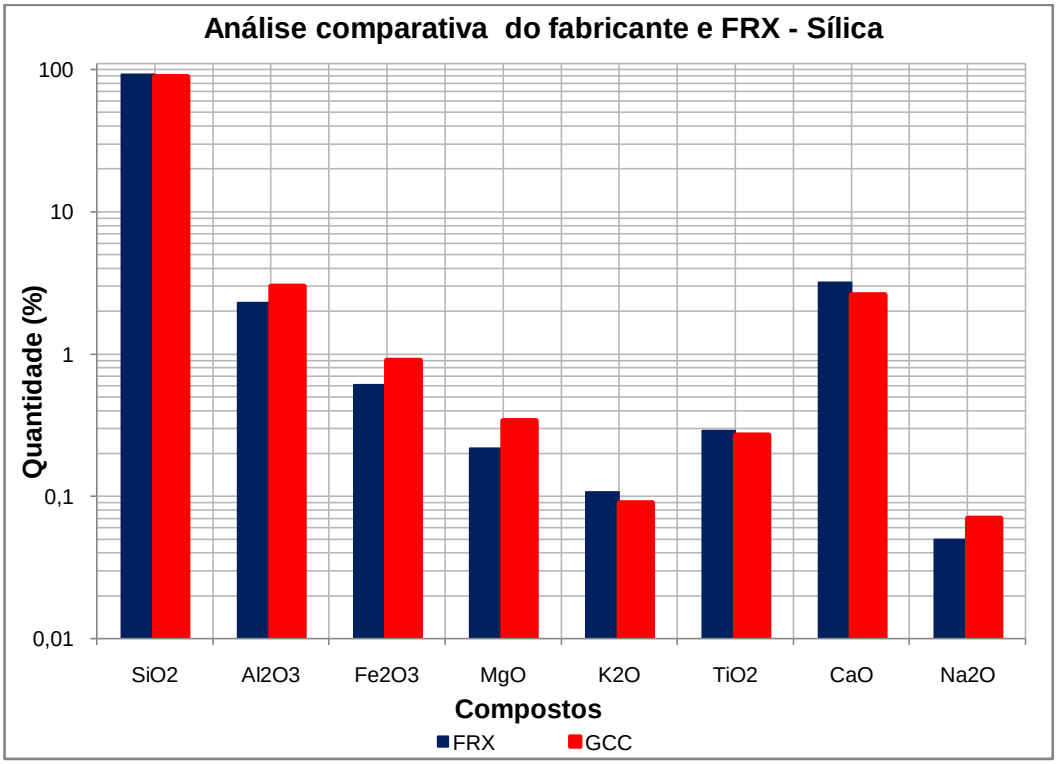


Figura 43 - Comparação entre os teores dos principais componentes do pó de sílica informados pelo fabricante, empresa GCC, e obtidos por FRX no presente trabalho.

Pozolanas como a sílica, derivadas de subprodutos, podem ter grandes variações em sua composição, enquanto resíduos de outros processos. Sua composição pode ser afetada por mudanças no processo produtivo principal, resultando em alterações em suas propriedades físico-químicas.

Tabela 19 - Classificação pela norma ASTM C618-5 como pozolana silicosa.

COMPOSIÇÃO (%)	ASTM C618-05	FRX	MICROSILEX
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	≥ 70,00	95,613	91,30
SO_3	≤ 4,00	0,435	0,14
Álcalis	≤ 1,50	< 0,100	0,05

Fonte: Resultado de laboratório

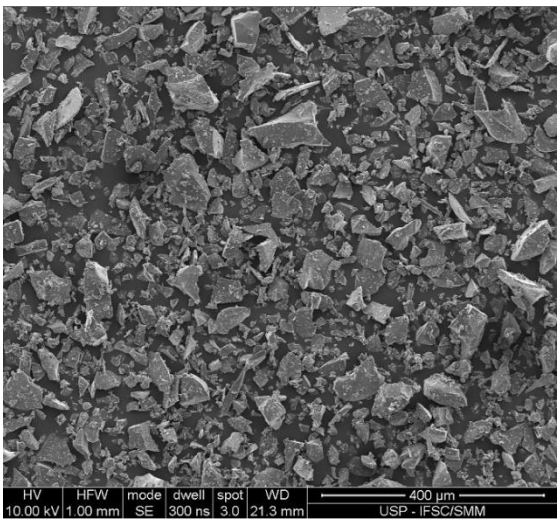
4.11 Microscopia eletrônica dos agregados finos

A Figura 44 fornece imagens de microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários das partículas de vidro, sílica e cimento Portland, realizada no Departamento de Engenharia de Materiais da USP - São Carlos. As micrografias demonstram que a maioria das partículas de vidro tem formas irregulares, muito angulares e de baixa esfericidade, com

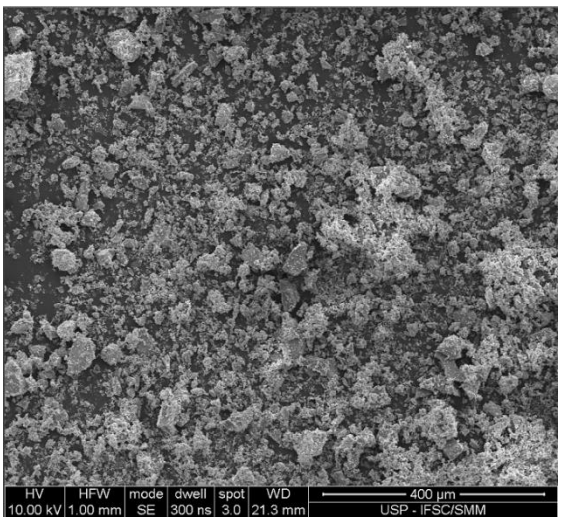
várias partículas alongadas e outras tabulares, decorrentes da natureza frágil da fratura do material e do tipo de moagem.

De acordo com (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009) as adições minerais incorporadas em uma mistura de concreto de acordo com a sua forma podem ser classificadas em três categorias morfológicas: a irregular, a esférica e a lamelar. E que o efeito da incorporação das adições minerais sobre as propriedades do concreto fresco depende principalmente da sua distribuição granulométrica e principalmente da sua forma.

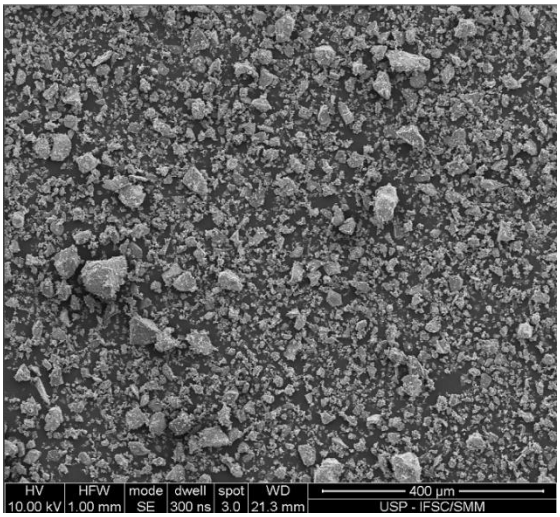
A forma de grãos é estabelecida em três escalas diferentes: a forma global, a escala das principais características da superfície e da escala de rugosidade da superfície. Cada escala reflete a forma de obtenção da partíca, o comportamento na massa de concreto com relação ao empacotamento de partículas e a resposta mecânica (CHO, DODDS e SANTAMARINA, 2007).



Pó de vidro



Microssílica



Cimento Portland

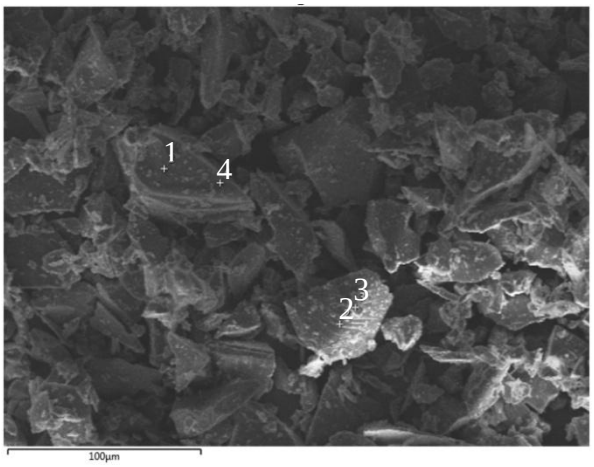
Figura 44 – Micrografias das matérias-primas.

Em comparação com o vidro, as partículas de sílica e cimento Portland se apresentam menos angulares, mais esféricas e arredondadas. Do ponto de vista da resistência final do concreto, tais partículas são preferíveis, pois promovem um melhor empacotamento, porém têm maior área superficial, o que exige uma maior quantidade de água para alcançar a mesma trabalhabilidade em concretos hidráulicos (POWERS, 1953).

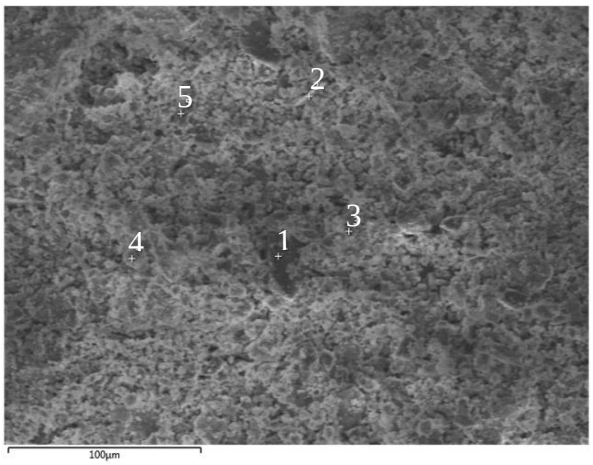
Nas micrografias da Figura 44, observa-se ainda que o vidro apresenta granulometria maior que a dos outros materiais e textura mais lisa na superfície, podendo aderir menos à pasta de cimento e em alguns casos prejudicar a resistência mecânica do concreto, principalmente nas primeiras idades.

Os vazios capilares, que são os espaços não ocupados pelo cimento ou pelos produtos de hidratação, podem ser ocupados pelas partículas de vidro e sílica, dependendo de suas granulometrias, possibilitando um maior empacotamento e aumentando a resistência em idades avançadas.

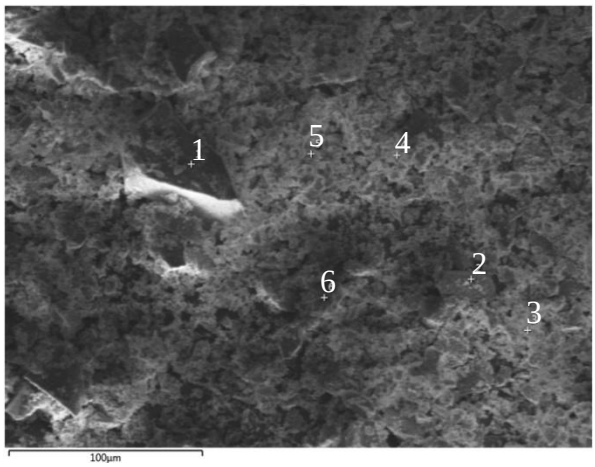
A Figura 45 apresenta imagens de MEV obtidas no Laboratório de Microscopia Eletrônica (LAMEV) da Companhia de Recursos Minerais de Belém (CPRM-BE). Análises químicas por EDS foram obtidas em pontos selecionados, indicados nas imagens.



Vidro



Sílica



Cimento Portland

Figura 45–Micrografias das matérias-primas utilizadas. As marcas numeradas indicam as posições onde foram realizadas análise por EDS.

4.12 Vidro

A Tabela 20 apresenta a composição química encontrada nos quatro pontos analisados por MEV/EDS na Companhia de Pesquisa e Recursos minerais de Belém, que apesar de ser uma técnica de análise pontual, com uma grande possibilidade de diferença entre os pontos analisados, mesmo assim, apresentou pequena discrepância na composição química, demonstrado certa homogeneidade para o lote em que a amostra foi investigada.

A Tabela 21 apresenta comparações entre os resultados de FRX, FRX normalizado e MEV/EDS, onde se pode perceber que os valores que apresentaram maiores variações foram para óxido de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO). Já era de se esperar, como decorrência do uso de técnicas diferentes, onde os aparelhos foram individualmente calibrados, além do uso de diferentes lotes de amostra.

Tabela 20 - Composições químicas do vidro MEV/EDS - CPRM - BELÉM

Componente	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média
SiO_2	73,3	71,3	71,0	74,2	72,4
Na_2O	16,2	18,3	18,6	14,4	16,9
CaO	7,9	7,6	7,2	8,8	7,9
MgO	2,6	2,8	3,2	2,6	2,8
	100	100	100	100	100

Fonte: Resultado de laboratório

Tabela 21 - Comparação entre as composições químicas principais do vidro

Componente	FRX	FRX-normalizado	MEV EDS - CPRM - BELÉM
SiO_2	70,5	71,3	72,4
Al_2O_3	0,2		
Fe_2O_3	0,5		
MgO	2,4	2,4	2,8
CaO	13,5	13,7	7,9
Na_2O	12,4	12,6	16,9
K_2O	<0,1		
TiO_2	<0,1		
SO_3	0,3		
Outros	0,3		
	~100	100	100

Fonte: Resultado de laboratório

Em comparação aos trabalhos de (OLIVEIRA, CASTRO GOMES e SANTOS, 2008), que determinaram a otimização da reação pozolânica de três diferentes tipos de vidro moído utilizando um analisador microssonda de raio X, para resíduos de vidro derivados de garrafas verdes, as principais composições encontradas foram SiO_2 72,25, CaO 12,35, Na_2O 10,54 e Al_2O_3 2,54. São valores que não diferem muito dos encontrados para esta pesquisa, apesar das matérias-primas serem outras.

4.13 Sílica

A Figura 45 mostra uma imagem em baixo aumento do pó de sílica, em uma região onde foram realizadas análises por EDS nos pontos indicados na Tabela 22. A distribuição de silício (Si) não é homogênea em todos os pontos, pois o valor 97,4% de óxido de silício (SiO_2) representa a média dos valores dos cinco pontos analisados.

A Tabela 23 mostra os resultados obtidos por MEV/EDS em comparação aos obtidos pelo fabricante e por ensaio de FRX. Os resultados são um pouco discrepantes, mais uma vez o desvio relativamente pequeno nos valores observados para cada componente pode ser atribuído ao erro experimental associado às duas técnicas (os resultados estão dentre limites de ± 2% em massa, o que é razoável). Observa-se a presença de CaO e Al_2O_3 como principais impurezas na sílica.

Tabela 22 - Composições químicas da sílica MEV/EDS - CPRM - BELÉM

Componente	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Média
SiO_2	100	97,5	95,6	95,6	98,5	97,4
CaO	0	1,2	3,0	2,8	0	1,4
Al_2O_3	0	1,3	1,4	1,6	1,5	1,2
	100	100	100	100	100	100

Fonte: Resultado de laboratório

Tabela 23 - Comparação entre as composições químicas principais da sílica

Componente	FABRICANTE	FRX	MEV EDS - CPRM - BELÉM
SiO_2	89,0	92,71	97,4
CaO	2,60	3,19	1,4
Al_2O_3	3,00	2,30	1,2
Fe_2O_3	0,90	0,61	
MgO	0,34	0,61	
K_2O	0,09	0,11	
TiO_2	0,27	0,29	
Na_2O	0,07	0,05	
	96,27	99,87	100

Fonte: Resultado de laboratório

Em comparação com a sílica ativa, os resíduos de vidro têm maior composição de CaO, e Na_2O mas menor teor de SiO_2. De acordo com a norma (ASTM, 2002), a condição necessária para que um material apresente propriedades pozolânicas é que a soma de SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 seja superior a 70% da composição da amostra examinada. De acordo com o ensaio de FRX a soma para a amostra de vidro investigada é de 83,1%, ou seja, os resíduos de vidro empregados na produção dos concretos apresentam composição química satisfatória para o objetivo inicial da pesquisa. É um tipo de vidro que pode ser classificado como pozolana.

A composição química, no entanto, não deve ser utilizada como único critério para a indicação de atividade pozolânica. O estado amorfo também é uma condição necessária, e que ficou confirmado no ensaio de DRX mostrado anteriormente.

4.14 Cimento Portland

Para a amostra de cimento foi repetida a análise por MEV, cuja imagem resultante é mostrada na Figura 46, e EDS nas áreas selecionadas, no Laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais da USP. Os resultados comparativos de FRX e os dois ensaios de EDS estão mostrados na Tabela 26.

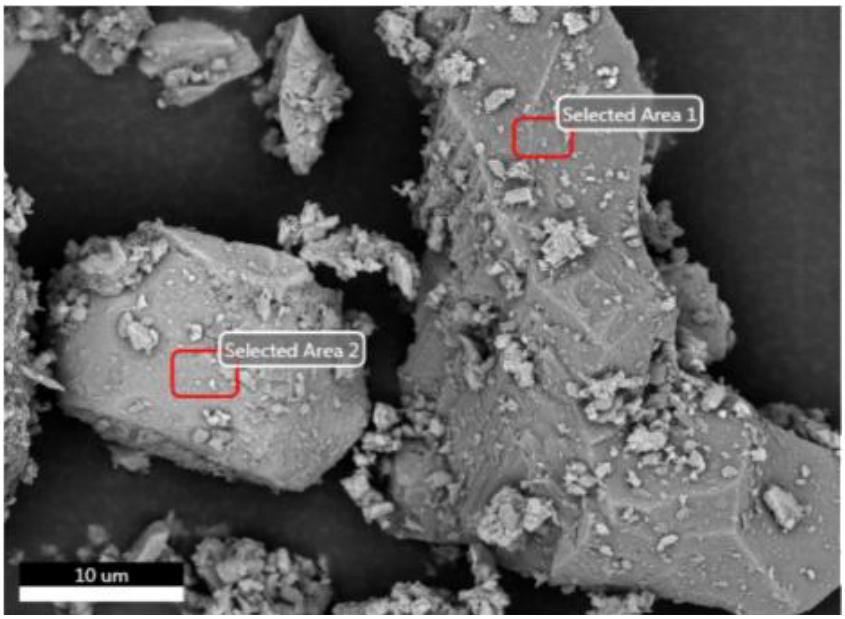


Figura 46 - Micrografia da amostra de cimento Portland MEV/EDS-USP.

A imagem da Figura 46 obtida por MEV com contraste por elétrons retroespalhados mostra uma clara diferença química entre as partículas com regiões para EDS indicadas. Nesse caso, o tom de cinza é uma indicação da maior ou menor concentração de elementos mais leves ou pesados. As regiões compostas por elementos químicos mais pesados, de maior número atômico, apresentam-se em tons de cinza mais claros, enquanto que as regiões compostas por elementos químicos mais leves, de menor número atômico, resultam em tons de cinza mais escuros.

A Tabela 24 apresenta a composição química do cimento nas regiões indicadas na Figura 44. São concentrações muito discrepantes, conforme se pode ver com valores de 1,90 e 67,9% em massa para o mesmo óxido (CaO). É um método que depende de um maior número de pontos a serem analisados, mas as maiores composições médias ainda indicaram os dois principais compostos do cimento Portland: CaO 34,9% e SiO_2 58,9%.

Tabela 24 - Composições químicas do cimento Portland MEV/EDS - USP

Componente	P1	P2	MÉDIA
CaO	1,90	67,9	34,9
SiO_2	96,5	20,8	58,6
SO_3		6,3	3,2
MgO		1,6	0,8
Al_2O_3	1,6	3,4	2,5
	100	100	100

Fonte: Resultado de laboratório

A Tabela 25 apresenta a composição química em seis pontos da Figura 43 que também apresenta valores bastante diferenciados, mas com as médias mais próximas das composições apresentadas pelo fabricante e pelo ensaio de FRX, por ter sido investigado um maior número de pontos.

Tabela 25 - Composições químicas do cimento Portland MEV/EDS - CPRM - BELÉM

Componente	P1	P2	P3	P4	P5	P6	MÉDIA
CaO	95,2	91,3	60,7	40,9	24,2	65,9	63,0
SiO_2	2,7	6,0	19,8	32,7	68,5	21,3	25,2
SO_3	0	0	8,1	4,2	2,0	2,0	2,7
MgO	0	0	5,2	4,4	0,8	0,8	1,9
Al_2O_3	2,1	2,7	3,8	13,0	4,5	5,4	5,3
K_2O	0	0	2,4	0	0	0	0,4
Fe_2O_3	0	0	0	4,8	0	4,6	1,5
	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Resultado de laboratório

As análises de EDS mostraram altas concentrações médias de óxido de cálcio (CaO) (63,0 e 34,9% em massa) na composição do cimento, o que de fato era esperado, Tabela 21. A análise química por FRX apresentou 56,6% massa CaO. No entanto, esses resultados devem ser avaliados com mais cuidado, em relação aos das amostras de vidro e sílica, pois o cimento é um material heterogêneo composto por várias fases.

Tabela 26 - Comparação entre as composições químicas principais de cimento Portland

COMPONENTE	FABRICANTE	FRX	MEV EDS - CPRM - BELÉM	MEV EDS - CPRM - USP
SiO_2	28,8	27,5	25,2	58,6
Al_2O_3	5,2	5,8	5,3	2,5
Fe_2O_3	2,8	4,2	1,5	
MgO	1,9	1,2	1,9	0,8
CaO	52,7	56,6	63,0	34,9
Na_2O	<0,1	<0,1		
K_2O	0,3	0,5	0,4	
TiO_2		0,4		
SO_3	2,8	3,5	2,7	3,2
Outros	5,4	0,4		
Total	~100	~100	100	100

Fonte: Resultado de laboratório

4.15 Caracterização do cimento

As características físicas do cimento informadas pelo fabricante são apresentadas na Tabela 27. São valores que foram encontrados através de ensaios de laboratório. As resistências foram determinadas pelo valor médio de três corpos de prova. Para 7 e 28 dias, o ensaio de resistência foi repetido.

Tabela 27 - Características físicas do cimento utilizado

DESCRIÇÃO	
Tempo de início da pega (minuto)	120
Tempo de fim de pega (minuto)	150
Consistência normal (%)	27,25
Finura na peneira # 200 (%)	1,40
Massa específica (g/dm^3)	3,02
Massa unitária (g/dm^3)	1,65
Resistência à compressão 1 dia (MPa)	16,6
Resistência à compressão 3 dias (MPa)	25,0
Resistência à compressão 7 dias (MPa)	28,4
	29,7
Resistência à compressão 28 dias (MPa)	35,4
	36,7

Fonte: Os resultados de caracterização física foram obtidos em laboratório.

4.16 Agregados

A Tabela 28 apresenta os resultados de caracterização física da areia, brita e seixo determinados no Laboratório de Materiais de Construção do IFAM.

Em relação à composição granulométrica dos agregados graúdos, verificou- se que tanto a brita quanto o seixo encontram-se dentro dos padrões da NBR 7211 (ABNT, 2009). Quanto à forma dos grãos, foi possível observar por inspeção visual simples a diferença entre os dois agregados, pois o seixo apresenta-se menos irregular e mais arredondado, influenciando na trabalhabilidade das misturas de concreto, onde grãos menos arredondados e mais irregulares demandam maior quantidade de água para a mesma trabalhabilidade.

Tabela 28 - Características da areia, brita e seixo usados na produção dos concretos

Característica	Agregado miúdo		Agregado Graúdo		
	Método de ensaio	Areia	Método de ensaio	Seixo	Brita
Massa específica (kg/dm^3)	NBR 9776	2,63	NBR 9937	2,50	2,63
Massa unitária (kg/dm^3)	NBR 7251	1,59	NBR 7251	1,84	1,43
Módulo de finura	NBR 7211	2,21	NBR 7211	5,27	5,82
Diâmetro máximo (mm)	NBR 7217	1,2	NBR 7217	19	9,5
Coef.de inchamento (%)	NBR 6467	53			

Fonte: Ensaiados no Laboratório de Materiais de Construção do IFAM.

A distribuição granulométrica, definida como o conjunto dos tamanhos das partículas de uma amostra, está representada na Figura 47 e Figura 48 para a areia, a brita e o seixo utilizados, respectivamente. A Tabela 29 apresenta a granulometria da areia, onde encontra-se a massa retida de material em cada peneira, com destaque às maiores quantidades retidas nas peneiras 50 e 100 mesh.

Tabela 29 - Granulometria do agregado miúdo - areia

Peneira (mesh)	Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)	Percentagem retida (%)	Percentagem passante (%)
1/4	6,3	0,0	0,00	100,00
4	4,8	0,8	0,12	99,88
8	2,4	3,1	0,47	99,41
16	1,2	17,6	2,67	96,74
30	0,6	9,7	15,14	81,60
50	0,3	264,7	40,19	41,41
100	0,15	259,3	39,37	2,05
< 100	0,075	13,5	2,05	0,00
Total		658,7	100,00	

Fonte: Ensaiados no Laboratório de Materiais de Construção do IFAM.

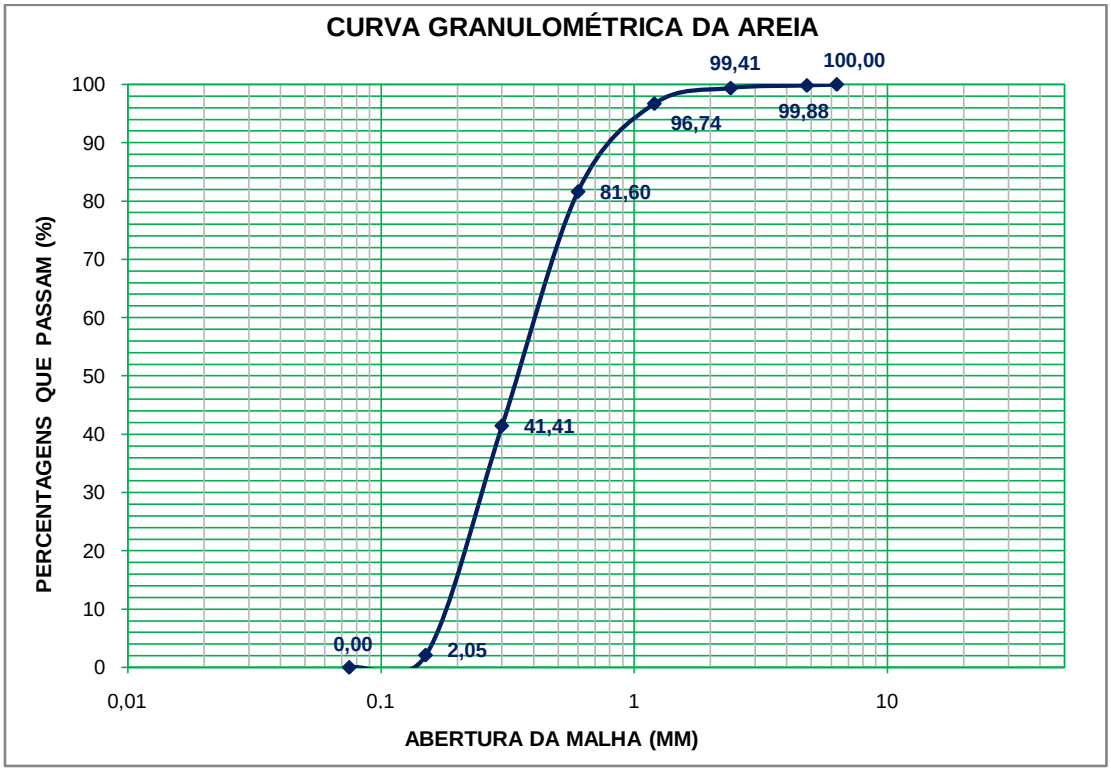


Figura 47 - Gráfico da curva granulométrica da areia.

Como se pode verificar, areia e brita apresentam granulometria mais contínua, possuindo partículas de todos os diâmetros, desde o valor máximo até o valor mínimo. Apresentam a curva granulométrica em forma de "S", mais suave e alongado na horizontal, conforme se pode verificar nas Figura 47 e Figura 48. Por outro lado, o seixo apresenta granulometria descontínua (ou distribuição mais estreita, concentrada dentre limites mais próximos), sem material retido nas peneiras de 30 à 100 mesh, Tabela 31. Nesse intervalo a curva granulométrica apresenta-se horizontal, Figura 48, mostrando que a quase totalidade dos tamanhos concentram-se entre 1 e 20 mm.

Tabela 30 - Granulometria do agregado graúdo - brita

Peneira (mesh)	Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)	Percentagem retida (%)	Percentagem passante (%)
3/4	19,0	0,0	0,00	100,00
1/2	12,5	14,7	0,95	99,05
3/8	9,5	10,5	0,68	98,38
1/4	6,3	271,8	17,52	80,86
4	4,8	360,6	23,24	57,62
8	2,4	496,6	32,00	25,62
16	1,2	165,2	10,65	14,98
30	0,6	71,7	4,62	10,36
50	0,3	49,3	3,18	7,18
100	0,15	50,5	3,25	3,92
< 100	0,075	60,9	3,92	0,00
Total		1551,8	100,00	

Fonte: Resultado de laboratório

A Figura 48 apresenta o gráfico da composição granulométrica da brita, com valores de distribuição variando de 0,075 a 9,5 mm, e com distribuição granulométrica bastante regular, conforme mostrado na Tabela 30. As curvas granulométricas dos agregados graúdos demonstram que a melhor distribuição é a da brita. Para a produção de concretos, quanto mais larga a distribuição de tamanhos de partículas de uma matéria-prima, melhor é o empacotamento da massa de concreto, diminuindo o volume de vazios.

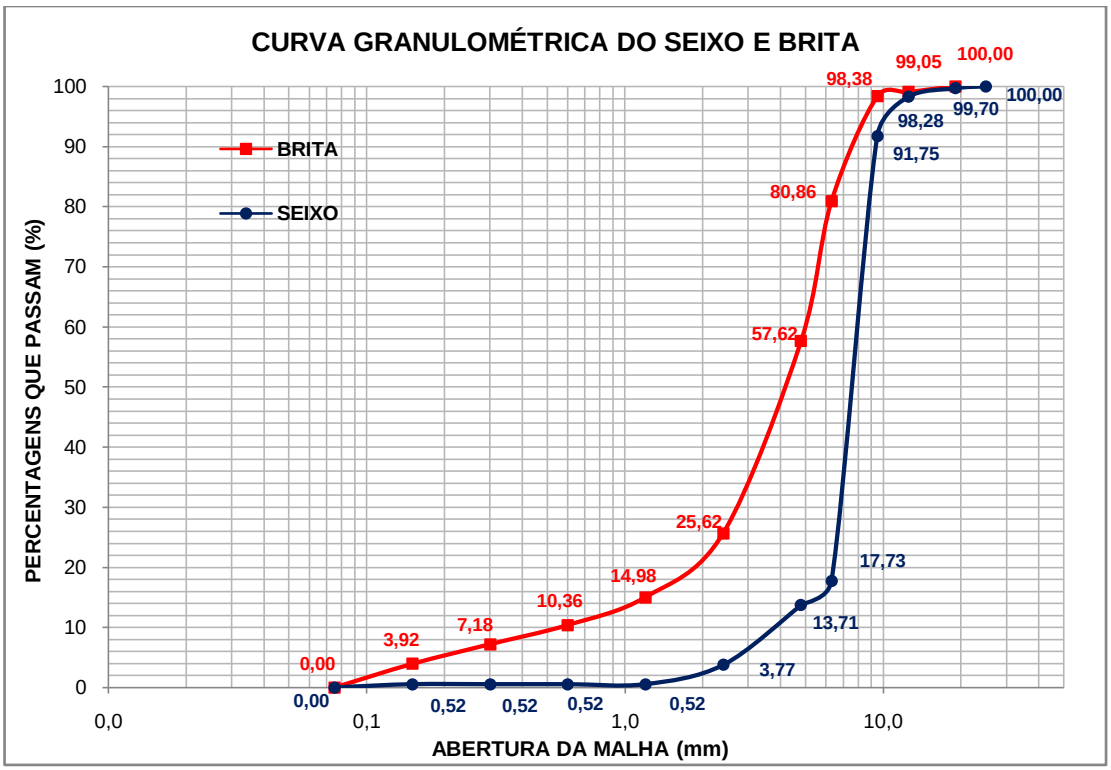


Figura 48 - Gráfico comparativo de granulometria da brita e do seixo

Tabela 31 - Granulometria do agregado graúdo - seixo

Peneira (mesh)	Abertura da malha (mm)	Massa retida (g)	Percentagem retida (%)	Percentagem passante (%)
1	25	0,00		100,00
3/4	19	12,4	0,30	99,70
1/2	12,5	59,6	1,42	98,28
3/8	9,5	274,0	6,54	91,75
1/4	6,3	310,3	74,02	17,73
4	4,8	168,4	4,02	13,71
8	2,4	416,6	9,94	3,77
16	1,2	136,5	3,26	0,52
30	0,6	0,00	0,00	0,52
50	0,3	0,00	0,00	0,52
100	0,15	0,00	0,00	0,52
<100	0,075	21,7	0,52	0,00
Total		1399,5	100,00	

Fonte: Resultado de laboratório

A granulometria ideal do agregado está relacionada a uma distribuição que apresente uma uniformidade de distribuição, que de maneira geral leva a uma considerável diminuição dos vazios do concreto, em outras palavras uma distribuição granulométrica sem descontinuidade aproxima-se mais uma curva granulométrica ideal, que de maneira geral apresenta quantidades suficientes de partículas finas para preencher completamente os espaços vazios deixados pelos agregados mais grossos. Nos concretos os aumentos das tensões médias de ruptura estão relacionados a vários fatores e entre os quais está a melhor distribuição granulométrica dos agregados.

4.17 Dosagem concreto convencional

Foram preparadas composições de concretos com diferentes agregados graúdos, seixo e brita, e diferentes resistências características do concreto à compressão (f_{ck}), de acordo com a Tabela 32. A relação água/cimento (a/c) foi ajustada para resultar em um mesmo valor de *slump* em todas as formulações.

Tabela 32 - Dosagem dos materiais usados na produção dos concretos com seixo - f_{ck} = 20 e 25 MPa

Dosagem Racional do Concreto	**Seixo**		**Brita**	
Tipo de controle	Razoável		Razoável	
Adensamento	Manual		Manual	
Umidade	Controlada		Controlada	
Dimensão Máxima (mm)	19		9,5	
Slump (mm)	100 ± 20		100 ± 20	
Teor de argamassa seca (%)	51		57	
fck (MPa)	**20**	**25**	**20**	**25**
Dosagem (massa)	1:2,02:2,90	1:1,90:2,60	1:2,42:2,58	1:1,90:2,60
Consumo de cimento (kg/m^3)	361,00	384,00	360,50	381,55
Consumo de água	180,50	192,00	191,07	202,22
Relação (a/c) (litros/kg)	0,50	0,50	0,53	0,53

Fonte: Ensaiados no Laboratório de Materiais de Construção do IFAM.

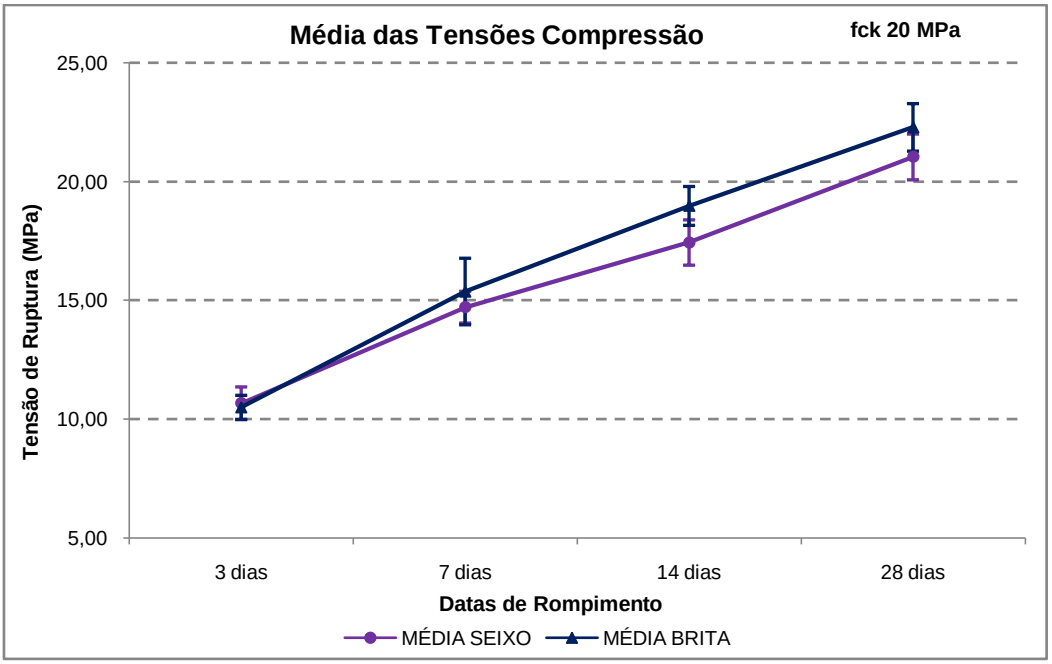
Foram estudadas formulações de concreto convencional para as duas resistências (f_{ck}) mais empregadas na cidade de Manaus, 20 e 25 MPa, conforme levantado na pesquisa de campo. Para cada uma das formulações foi produzido um concreto com brita e outro utilizando-se seixo rolado. As caracterizações mecânicas foram realizadas através dos ensaios de compressão axial e de tração por compressão diametral, cujos resultados são mostrados a seguir.

4.18 Ensaios de resistência à compressão axial

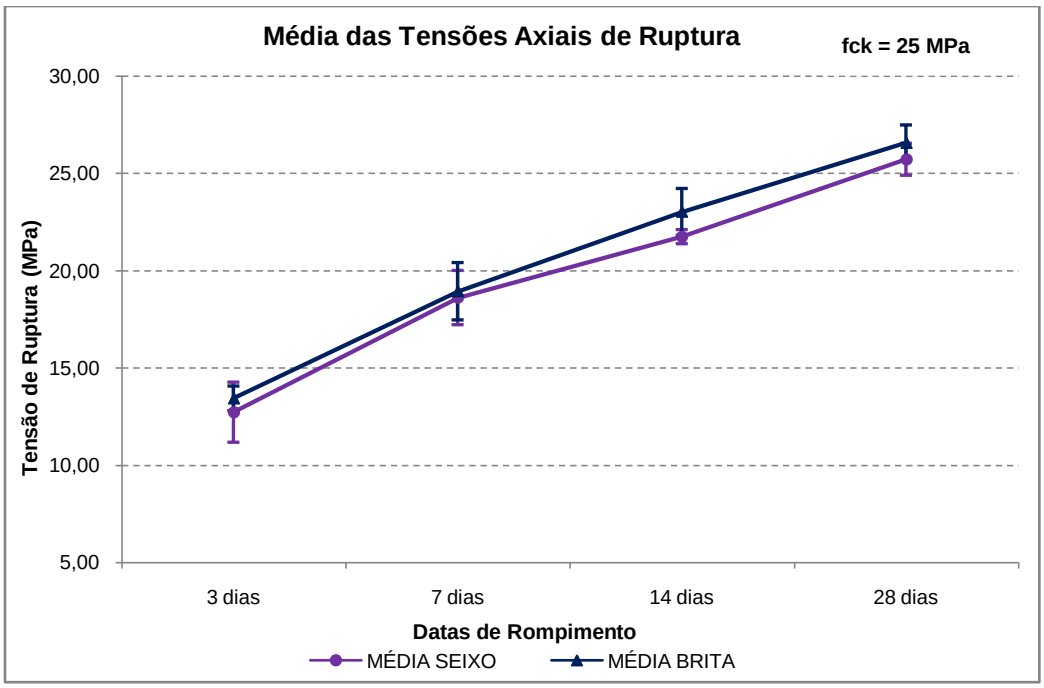
A Figura 49 apresenta a variação com a idade da resistência à ruptura em compressão axial de concretos produzidos com diferentes tipos de agregados graúdos (seixo e brita) e diferentes f_{ck} (20 e 25 MPa), seguindo os mesmos procedimentos de ensaio. Os pontos nos gráficos correspondem aos valores médios das resistências determinados a partir de quatro corpos de prova para cada data de rompimento. As barras de erro correspondem aos intervalos de confiança segundo a distribuição *t* de Student[2]. Os resultados apresentaram desvios padrões

[2] O erro experimental, *E*, foi calculado segundo o intervalo de confiança para pequenas amostras (n<30) para uma distribuição *t* de Student, de acordo com a expressão: $E = \frac{s}{\sqrt{n}} t_{95\%,n-1}$, onde s é o desvio padrão da amostra, n é o número de ensaios e $t_{95\%,n-1}$é o valor da distribuição t de Student para 95% de confiança e n-1 graus de liberdade.

relativamente baixos, encontrados no final do trabalho em Apêndice. As resistências aumentaram com a idade e alcançaram as resistências de projeto aos 28 dias.



(a)



(b)

Figura 49 – Tensões de ruptura em compressão uniaxial de concretos com diferentes f_{ck} (20 e 25 MPa), em função da idade: (a) concretos produzidos com seixo, (b) concretos produzidos com brita.

Através dos gráficos da Figura 49 verifica-se que as dosagens apresentadas na Tabela 32 apresentaram evolução da resistência à compressão axial com o aumento da idade, além de

desenvolvimento normal até a resistência de projeto. Após a comparação dos gráficos, apesar dos valores médios de resistência à compressão axial do concreto produzido com seixo serem sistematicamente menores que os do concreto produzido com brita, verifica-se que não houve diferença significativa entre as resistências dos concretos produzidos com seixo e brita.

4.19 Ensaios de resistência à tração por compressão diametral

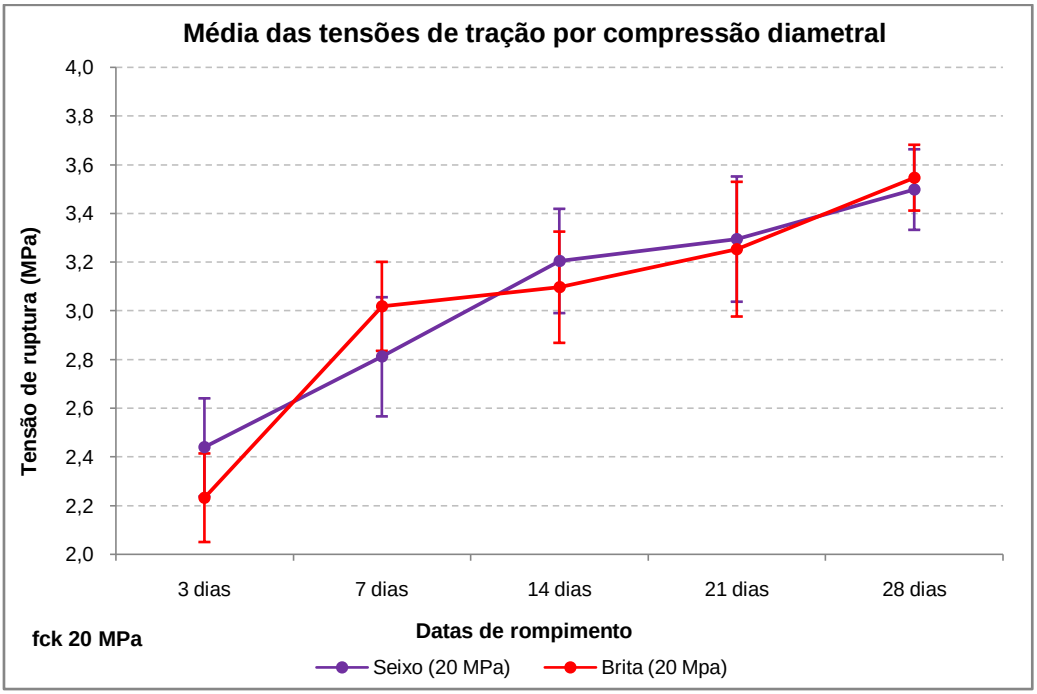
Os valores de resistência à tração por compressão diametral dos concretos preparados com seixo e brita para diferentes f_{ck} são mostrados na Figura 50. Tais valores foram em média 15% e 17% dos valores de resistência à compressão axial aos 28 dias. Em geral, os concretos produzidos com brita apresentaram resistências médias ligeiramente superiores aos obtidos com seixo, principalmente para a resistência de projeto de 25 MPa (Figura 50 b), no entanto, em nenhum dos casos a resistência à tração por compressão diametral foi significativamente diferente entre os concretos com seixo e brita. Os valores coincidem dentro dos erros experimentais, para 95% de confiança.

As variações de resistência foram mais elevadas e desuniformes nos ensaios de tração por compressão diametral, para os mesmos concretos ensaiados, quando comparados aos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial.

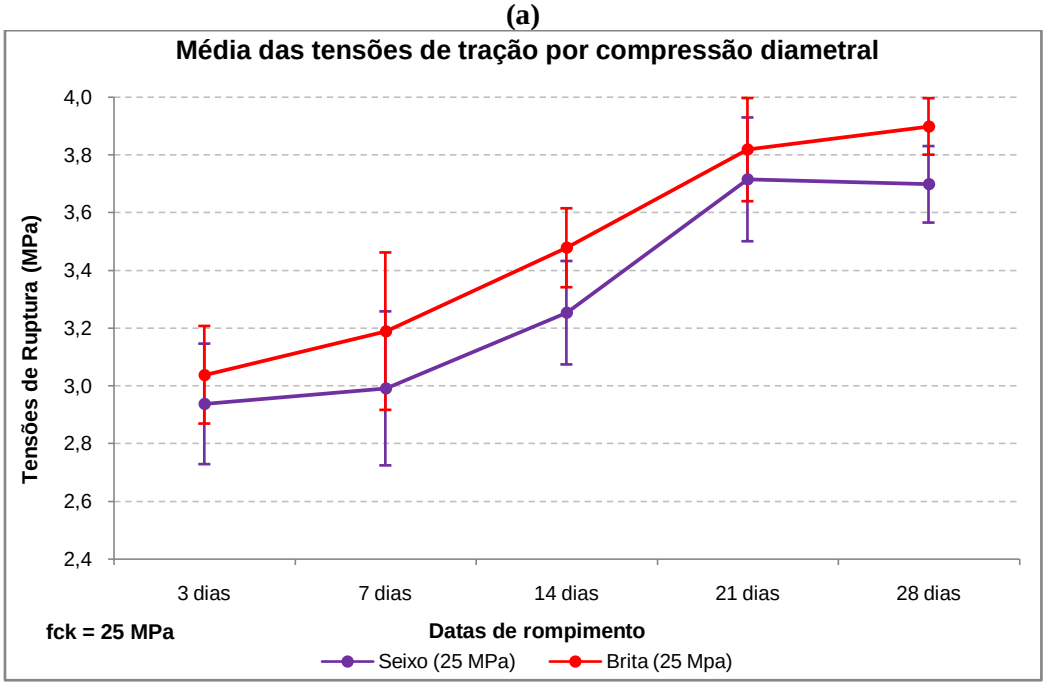
Devido à maior sensibilidade dos ensaios de tração por compressão diametral às variações microestruturais, mesmo pequenas variações de granulometria, porosidade, relação água/cimento e mudanças climáticas podem causar grandes variações nos resultados dos ensaios, tanto para os concretos produzidos com seixo quanto para os produzidos com brita. Esse fato decorre da baixa resistência aos efeitos de tração dos concretos, por serem materiais frágeis, de baixa tenacidade à fratura, aliada ao típico baixo grau de empacotamento das misturas de concreto em ambas as resistências.

Embora os resultados apresentarem grande variação quando analisados individualmente, para uma mesma idade, tanto para os concretos de f_{ck} 20 MPa, quanto os de f_{ck} 25 MPa apresentaram tendência de crescimento da resistência até os 28 dias.

Os gráficos da Figura 49 e Figura 50 mostram que as resistências à tração e à compressão dos concretos aumentam com as idades, porém não existe uma relação direta de proporcionalidade para o caso das resistências de projeto estudadas de 20 e 25 MPa, que são resistências relativamente baixas. Da mesma forma, não se pode afirmar que as mesmas características sejam encontradas em concretos de resistências maiores, com melhor grau de empacotamento.



(a)



(b)

Figura 50 – Tensões de ruptura em tração por compressão diametral, em função da idade no rompimento: (a) seixo e brita, fck = 20 MPa; (b) seixo e brita, fck = 25 MPa.

4.20 Análise estatística de Weibull

Da Tabela 33 à Tabela 36, apresentam-se os valores necessários para a análise pela estatística de Weibull: i) ordenação em ordem crescente das tensões de ruptura (σ_f) obtidas por compressão diametral; ii) determinação das probabilidades de fratura (P_r) de acordo com a

Equação (5); iii) cálculo dos valores de ln(ln(1/(1-P_r))) e ln(σ_f); e iv) construção dos gráficos de ln(ln(1/(1-P_r))) em função ln (σ_f). Os resultados das quatro formulações de concreto (dois níveis de f_{ck} e dois tipos de agregado graúdo) foram submetidos a esta análise. Os gráficos ln(ln(1/(1-P_r))) versus ln(σ_f) são mostrados nas Figura 51 e Figura 52 para as resistências de projeto de 20 e 25 MPa aos 28 dias, e diferentes agregados graúdos: seixo e brita.

O módulo de Weibull (*m*) é a inclinação da reta ajustada aos pontos em um gráfico ln(ln(1/(1-P_r))) versus ln(σ_f), de acordo com a equação (7). Com a determinação do módulo de Weibull, pode-se avaliar o efeito do agregado graúdo empregado nas misturas de concreto na variabilidade dos resultados, além de seu efeito nas resistências médias alcançadas. O valor de *m* está relacionado com a dispersão dos resultados aferidos: quanto maior o valor de *m* menor a dispersão dos resultados de resistência mecânica. O módulo de Weibull permite assim avaliar a regularidade ou repetitividade da microestrutura do material, enquanto causadora da fratura do mesmo, afetando os valores de resistência mecânica e, portanto, sua confiabilidade.

Observa-se nas Figura 51 e Figura 52 que o aumento da resistência de projeto de 20 para 25 MPa elevou o módulo de Weibull nos concretos com os dois tipos de agregados (seixo: *m* aumentou de 13 para 17; brita: *m* aumentou de 16 para 24). Assim, os concretos produzidos para uma resistência de projeto de 25 MPa apresentaram menor variação de resultados.

Tabela 33 - Resultados da análise estatística de Weibull – Seixo (f_{ck} = 20MPa) – 28 dias

σ_f	P_r	$\ln(\sigma_f)$	$\ln(\ln(1/(1-P_r)))$
2,836	0,045	1,042	-3,067
3,141	0,110	1,144	-2,145
3,281	0,175	1,188	-1,646
3,284	0,240	1,189	-1,291
3,326	0,305	1,201	-1,010
3,326	0,370	1,201	-0,771
3,517	0,435	1,257	-0,560
3,539	0,500	1,2640	-0,366
3,635	0,564	1,290	-0,183
3,644	0,629	1,293	-0,006
3,670	0,694	1,300	0,171
3,673	0,759	1,301	0,354
3,771	0,824	1,327	0,554
3,877	0,889	1,355	0,790
3,956	0,954	1,375	1,128

Fonte: Resultado de laboratório

Tabela 34 - Resultados da análise estatística de Weibull – Brita (f_{ck} = 20MPa) - 28 dias

σ_f	P_r	$\ln(\sigma_f)$	$\ln(\ln(1/(1-P_r)))$
3,205	0,045	1,164	-3,067
3,281	0,110	1,188	-2,145
3,281	0,175	1,188	-1,646
3,297	0,240	1,193	-1,291
3,326	0,305	1,201	-1,010
3,450	0,370	1,238	-0,771
3,466	0,435	1,243	-0,560
3,482	0,500	1,247	-0,366
3,600	0,564	1,280	-0,183
3,730	0,629	1,316	-0,006
3,736	0,694	1,318	0,171
3,765	0,759	1,325	0,354
3,794	0,824	1,333	0,554
3,803	0,889	1,336	0,790
3,991	0,954	1,384	1,128

Fonte: Resultado de laboratório

Tabela 35 - Resultados da análise estatística de Weibull – Seixo (f_{ck} = 25MPa) - 28 dias

σ_f	P_r	$\ln(\sigma_f)$	$\ln(\ln(1/(1-P_r)))$
3,230	0,045	1,172	-3,067
3,393	0,110	1,221	-2,145
3,533	0,175	1,262	-1,646
3,542	0,240	1,264	-1,291
3,574	0,305	1,273	-1,010
3,593	0,370	1,279	-0,771
3,631	0,435	1,289	-0,560
3,635	0,500	1,290	-0,366
3,765	0,564	1,325	-0,183
3,784	0,629	1,330	-0,006
3,810	0,694	1,337	0,171
3,886	0,759	1,357	0,354
3,927	0,824	1,368	0,554
4,023	0,889	1,392	0,790
4,128	0,954	1,417	1,128

Fonte:Resultado de laboratório

Tabela 36 - Resultados da análise estatística de Weibull – Brita (f_{ck} = 25MPa) - 28 dias

σ_f	P_r	$\ln(\sigma_f)$	$\ln(\ln(1/(1-P_r)))$
3,609	0,045	1,283	-3,067
3,666	0,110	1,299	-2,145
3,698	0,175	1,307	-1,646
3,765	0,240	1,325	-1,291
3,778	0,305	1,329	-1,010
3,791	0,370	1,332	-0,771
3,813	0,435	1,338	-0,560
3,927	0,500	1,368	-0,366
3,940	0,564	1,371	-0,183
4,017	0,629	1,390	-0,006
4,039	0,694	1,396	0,171
4,087	0,759	1,407	0,354
4,099	0,824	1,410	0,554
4,103	0,889	1,411	0,790
4,131	0,954	1,418	1,128

Fonte: Resultado de laboratório

De acordo com a estatística de Weibull, as Figura 51 e Figura 52 mostram resultados de resistência mecânica com dispersões maiores para concretos com seixos e de menor resistência característica. A Tabela 37 mostra um resumo dos resultados de resistência mecânica utilizados para a estatística de Weibull, com as médias, erros experimentais para 95% de confiança e erros relativos ($E_{95\%,n-1}$/média) calculados para cada condição experimental. Observa-se que os valores dos erros relativos são relativamente baixos, comparados com cerâmicas tradicionais, que alcançam valores da ordem de 50 a 100%. Esses

dados estão de acordo com os valores de módulo de Weibull encontrados (seixo: *m* =13 e 17; brita: *m*=16 e 24, para f_{ck} de 20 e 25 MPa, respectivamente), que são relativamente altos para materiais cerâmicos. Os altos de módulos (ABNT, 2009) de Weibull apontam para uma alta previsibilidade dos resultados para concretos, como consequência da fratura iniciar sempre em defeitos relativamente grandes e reproduzíveis, tais como aqueles causados pelos agregados graúdos acrescentados às formulações. Como o objetivo nesta fase da pesquisa foi determinar o agregado que melhor se adequasse às formulações de concretos para a região de Manaus, observa-se que a brita apresenta módulos de Weibull maiores em misturas de mesma resistência característica, ou seja, apresentando resultados mais confiáveis. Pode-se também observar que o aumento das resistências de projeto de 20 MPa para 25 MPa ocasionou um aumento no módulo de Weibull.

Tabela 37–Resumo dos resultados de resistência mecânica utilizados para a estatística de Weibull.

f_{ck}	20 MPa		25 MPa	
Agregado Graúdo	**Seixo**	**Brita**	**Seixo**	**Brita**
	2,84	3,21	3,23	3,61
	3,14	3,28	3,39	3,67
	3,28	3,28	3,53	3,70
	3,28	3,30	3,54	3,77
	3,33	3,33	3,57	3,78
	3,33	3,45	3,59	3,79
	3,52	3,47	3,63	3,81
	3,54	3,48	3,64	3,93
	3,64	3,60	3,77	3,94
	3,64	3,73	3,78	4,02
	3,67	3,74	3,81	4,04
	3,67	3,77	3,89	4,09
	3,77	3,79	3,93	4,10
	3,88	3,80	4,02	4,10
	3,96	3,99	4,13	4,13
média (MPa)	**3,50**	**3,55**	**3,70**	**3,90**
Desvio padrão (MPa)	**0,30**	**0,24**	**0,24**	**0,18**
$E_{95\%,n-1}$ **(MPa)**	**0,17**	**0,14**	**0,13**	**0,10**
Erro relativo (%)	**0,15**	**0,12**	**0,12**	**0,09**

Fonte: Resultado de laboratório

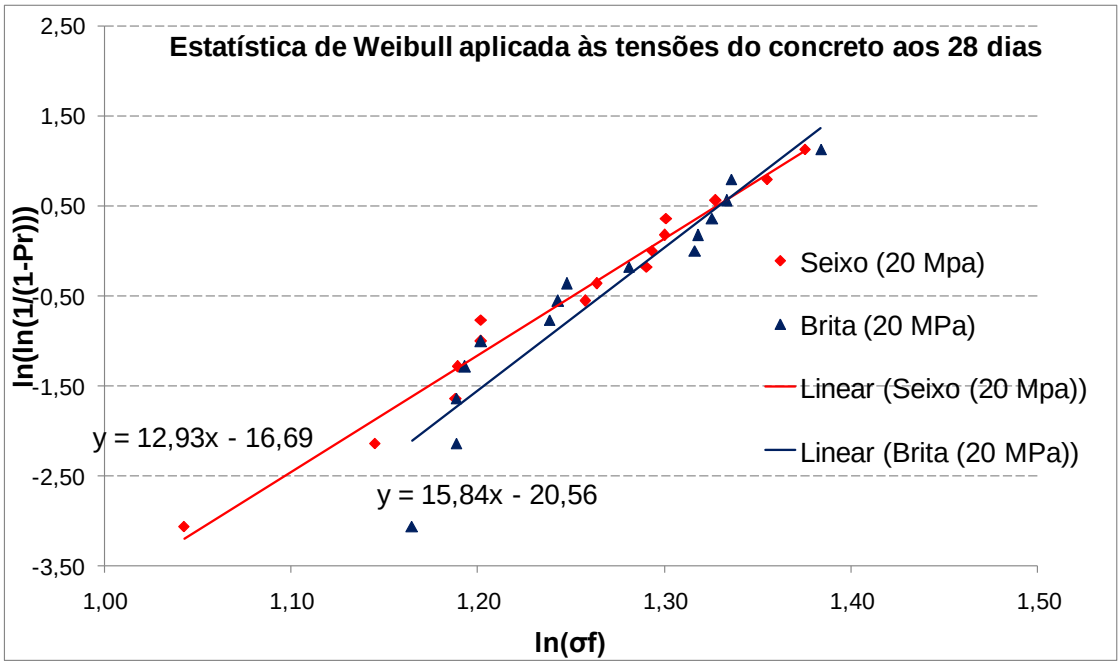


Figura 51 - Determinação das funções estatísticas do módulo de Weibull para as misturas de seixo e brita para 20 Mpa aos 28 dias

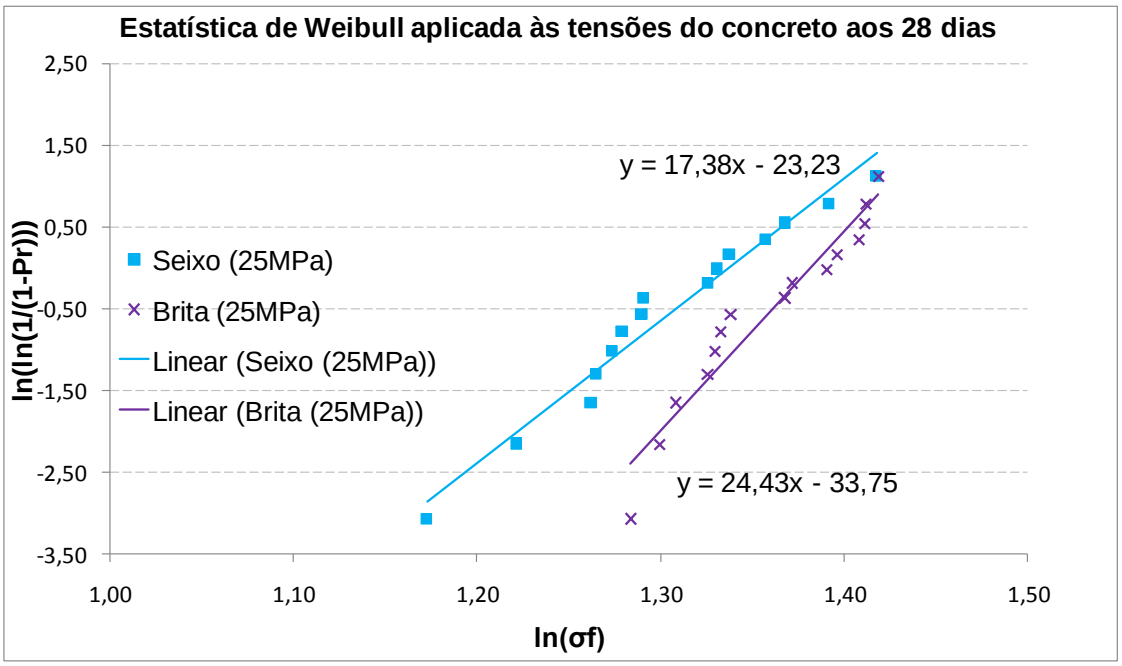


Figura 52 - Determinação das funções estatísticas do módulo de Weibull para as misturas de seixo e brita para 25 MPa aos 28 dias.

Em todos os conjuntos de experimentos, os valores de tensão são mais dispersos principalmente nas primeiras idades, a dispersão reduz com o tempo de cura, e o valor de *m* é gradativamente melhorado. O parâmetro *m* tem relação com a quantidade de cimento em todos os lotes ensaiados. Independente do agregado utilizado, *m* aumentou à medida que foi acrescentada a quantidade de cimento para que se alcançassem maiores resistências. Alguns estudiosos apresentaram resultados de testes de resistência à compressão semelhantes, mesmo

mudando-se alguns componentes da mistura (TUMIDAJSKI, FIORE, *et al.*, 2006), (XIXI e ZHIHUI, 2011).

Em comparação aos trabalhos de (TUMIDAJSKI, FIORE, *et al.*, 2006), que compararam o uso das distribuições normal e estatística de Weibull na análise da resistência à compressão em diferentes lotes de concreto comercial no Canadá, para uma mistura padrão com resistência característica de 25 MPa aos 28 dias, utilização de agregados naturais e fator (a/c) de 0,63, o valor do módulo de Weibull encontrado foi de 7,93, enquanto que para um segundo lote com tensão de 35 MPa e fator (a/c) de 0,40 o valor de *m* aumentou significativamente para 9,08.

O trabalho conduzido pelo grupo (COLMAN, TEODORO, *et al.*, 2014), onde também foi analisada a tensão de compressão axial aos 28 dias de um lote de amostras onde 63,20% dos corpos de prova se romperam a uma tensão média de 36,71 MPa, o módulo de Weibull foi igual a 11,51 quando a distribuição de resistências foi analisada aos 28 dias de moldagem.

Os diferentes componentes do concreto de cimento Portland inevitavelmente causam diferentes efeitos na resistência de um dado concreto, tornando-se necessária uma análise estatística dos resultados (GIBB e HARRISON, 2010). Para (TUMIDAJSKI, FIORE, *et al.*, 2006) e (ELGUETA, DÍAZ, *et al.*, 2007), a distribuição de Weibull pode ser aplicada aos dados de resistência à compressão dos concretos em geral e é uma representação melhor do que a distribuição normal aplicada aos dados, embora o concreto não seja um material com comportamento puramente frágil, mas semifrágil, com redistribuição dos esforços e da energia de fratura antes da ruptura. De acordo com os autores, o modelo de distribuição de Weibull é adequado e confiável quando aplicado aos dados de resistência à compressão do concreto.

No presente trabalho, essa distribuição foi utilizada na análise dos dados de resistência à tração (por compressão diametral) para a escolha do melhor material constituinte, seixo ou brita, utilizando como critério de escolha o parâmetro de fórmula *m*. Não se encontram na literatura, no melhor de nosso conhecimento, análises pela estatística de Weibull de dados para concretos ensaiados por compressão diametral. Assim, conclui-se que os valores do módulo de Weibull do presente trabalho têm a mesma ordem de grandeza dos valores para resistência à compressão axial e estão de acordo com os observados na literatura nos trabalhos de (TUMIDAJSKI, FIORE, *et al.*, 2006), (ELGUETA, DÍAZ, *et al.*, 2007) e (COLMAN, TEODORO, *et al.*, 2014).

Para o caso da presente pesquisa, o aumento da resistência característica aparentemente possibilitou uma melhor homogeneização da microestrutura, diminuindo a variação do tamanho de defeitos como trincas e poros, que funcionam como concentradores de tensões, influenciando significativamente a resistência mecânica das misturas avaliadas. Finalmente, os concretos com brita apresentaram valores ligeiramente maiores de resistência média e módulo de Weibull, e os aumentos foram mais pronunciados para f_{ck} de 25 MPa. Assim, optou-se pela brita para a formulação de concretos na próxima etapa dos trabalhos.

4.21 Concreto de alta resistência

4.22 Dosagem

Após os estudos iniciais para determinação das misturas de concreto mais adequadas para a presente pesquisa, uma dosagem padrão de referência e demais formulações com adições e/ou substituições de cimento por vidro e sílica foram estabelecidas para a continuidade dos trabalhos, visando produzir concretos de alta resistência, acima de 50 MPa a partir dos 28 dias de cura, em compressão uniaxial. As proporções de vidro e sílica em pó nas formulações estudadas são mostradas na Tabela 38. Um total de 14 séries de misturas foi preparado no laboratório, de acordo com os requisitos da NBR 8953 (2015), sendo sete para compressão axial e outras sete para tração por compressão diametral. Para cada formulação foram preparados três corpos de prova para compressão uniaxial e três corpos de prova para tração por compressão diametral. As proporções de cimento e água foram mantidas constantes, visando privilegiar a avaliação dos efeitos das combinações de aditivos minerais. Por exemplo, na produção do concreto com substituição de 10% de vidro ou 10% de sílica, as proporções de água foram mantidas constantes, mesmo que um pouco da trabalhabilidade da mistura fosse perdida. Se a quantidade de água das misturas é alterada, é mais difícil compará-las.

As quantidades dos materiais constituintes nas misturas após adições de vidro e sílica ou substituição de cimento Portland são apresentadas na Tabela 38. Nas dosagens estudadas manteve-se constante o fator água/material cimentício (*a/c*). As quantidades de aditivos superplastificantes estão expressas em relação à quantidade de material cimentício.

Tabela 38 - Dosagem dos materiais usados na produção dos concretos de alta resistência adicionados com pó de vidro e pó de sílica

SUBSTITUIÇÃO											
Mistura	Vidro (%)	Sílica (%)	Cimento (kg/m³)	Agregado miúdo (kg/m³)	Agregado graúdo (kg/m³)	Vidro (kg/m³)	Sílica (kg/m³)	Fator a/c.	Aditivos superplastificantes		
									Gleniun 51 (%)	Tecflow (%)	Recover (%)
M1	0	-	512,00	1003,52	896,00	-	-	0,36	3	3	2
M2	10	-	460,80	1003,52	896,00	51,20		0,36	3	3	2
M3	10	10	409,60	1003,52	896,00	51,20	51,20	0,36	3	3	2
M4	15	-	436,20	1003,52	896,00	76,80	-	0,36	3	3	2
M5	20	-	409,60	1003,52	896,00	102,40	-	0,36	3	3	2
ADIÇÃO											
M6	10		512,00	1003,52	896,00	51,20		0,36	3	3	2
M7	10	10	512,00	1003,52	896,00	51,20	51,20	0,36	3	3	2

Fonte: Resultado de laboratório

4.23 Consistência dos concretos

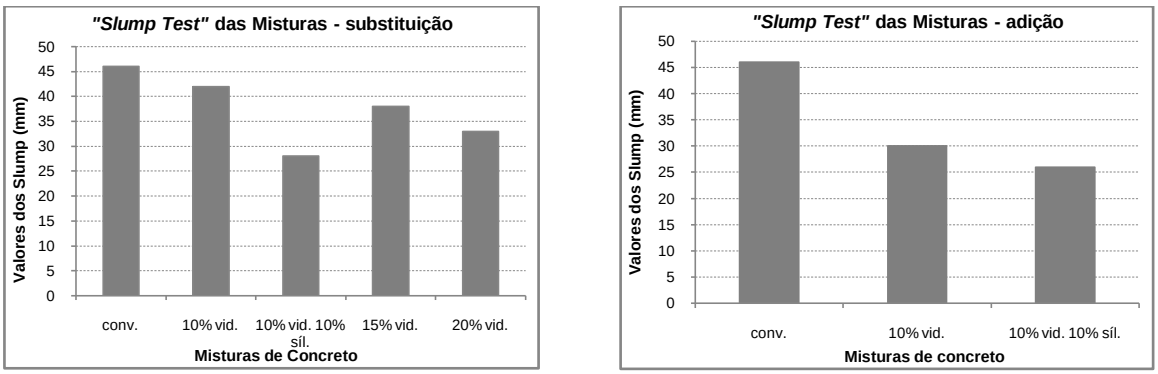
A consistência é a propriedade do concreto recém-misturado que determina a possibilidade com que ele pode ser devidamente trabalhado e moldado sem que haja segregação, e foi medida por meio do teste de queda convencional. O abatimento do concreto fresco foi medido utilizando o cone de queda, "*slump test*".

Os resultados de ensaios de consistência (*slump*) são apresentados na Figura 53. Pode-se observar que os valores de *slump* diminuem à medida que mais cimento Portland é substituído por vidro e sílica. O mesmo acontece quando tais aditivos são adicionados (ao invés de substituídos) às misturas de concreto. Os valores de *slump* para todas as misturas são apresentados na Tabela 39. A diminuição de *slump* observada está relacionada à menor hidratação das misturas que contêm pó de vidro e pó de sílica, o que resulta em menor fluidez de tais misturas, tendo em vista que foram utilizadas as mesmas relações água e aglomerante para todas as misturas.

Nos trabalhos de (VANDHIYAN, RAMKUMAR e RAMYA, 2013) e (JITENDRA e SAOJI, 2014) a substituição do cimento por pó de vidro diminui a trabalhabilidade à medida que o percentual de pó de vidro aumenta na mistura, devido ao aumento da área superficial e da forma angular das partículas de vidro.

Nos concretos a introdução de materiais finos leva a um aumento da superfície específica dos sólidos a serem hidratados, provocando um aumento no fator (a/c), porém se for mantido constante o fator, preservando-se, ainda assim, a boa trabalhabilidade da mistura, haverá um aumento da tensão média de ruptura das amostras de concreto ensaiadas.

Os trabalhos de (GUNALAAN e SERI GANIS KANAPATHY, 2013) e (NASSAR e SOROUSHIAN, 2012) demonstraram que a trabalhabilidade aumenta com o aumento de agregados de vidro às misturas de concreto quando comparadas às misturas de controle, e que há um aumento da trabalhabilidade à medida que se acrescenta o percentual de agregado de vidro. Mantendo-se os níveis da relação (a/c) há um aumento da queda nas misturas de concreto de agregados de vidro devido à superfície lisa e pela baixa absorção de água do vidro como agregado.



(a) **(b)**

Figura 53 - Resultado dos testes de consistência: (a) Misturas de substituição; (b) Misturas de adição.

Tabela 39 – Consistência de diferentes misturas para concreto.

SUBSTITUIÇÃO		
Mistura	**Consistência (mm)**	**A/C**
M_1	46	0,36
M_2	42	0,36
M_3	28	0,36
M_4	38	0,36
M_5	33	0,36
ADIÇÃO		
M_6	32	0,36
M_7	26	0,36

Fonte: Resultado de laboratório

4.24 Resistência à compressão axial

A introdução de vidro em pó em diferentes misturas de concreto de alta resistência teve como objetivo avaliar a utilização de resíduo de vidro proveniente da construção civil em

Manaus como substituto do cimento Portland nesse tipo de concreto. Como a resistência mecânica dos concretos é uma de suas propriedades mais importantes, essa parte do estudo teve por base verificar a resistência à compressão de concretos produzidos com diferentes proporções de vidro em pó. Os resultados são apresentados a seguir.

Foram estudadas formulações contendo substituições de 10, 15 e 20% em peso do cimento Portland em uma mistura de concreto por vidro em pó. Uma mistura de controle sem substituição foi produzida como referência, denominada M_1. As misturas contendo 10, 15 e 20% de substituição foram denominadas M_2, M_4 e M_5, respectivamente. Uma mistura denominada M3 foi preparada com 20% do cimento Portland substituído por 10% de vidro e 10% sílica em pó. A resistência à compressão de cada mistura foi avaliada em função do tempo de cura nas idades 7, 14, 21, 28 e 90 dias.Os resultados médios de compressão axial são listados nas Tabela 40 e Tabela 41 e mostram a variação percentual na resistência à compressão axial com adições ou substituições de cimento por vidro e sílica, em comparação com os resultados da mistura de referência, M_1.

Tabela 40 – Tensão de ruptura em compressão axial (MPa)de misturas contendo pó de vidro e sílica ativa em substituição e adição ao cimento Portland.

Mistura	Idade do corpo de prova (dia)				
	7	**14**	**21**	**28**	**90**
M_1	53	55	64	67	69
M_2	50	53	60	65	71
M_3	49	53	68	69	72
M_4	49	51	57	63	69
M_5	40	37	46	51	66
M_6	54	55	67	69	71
M_7	52	56	68	67	73

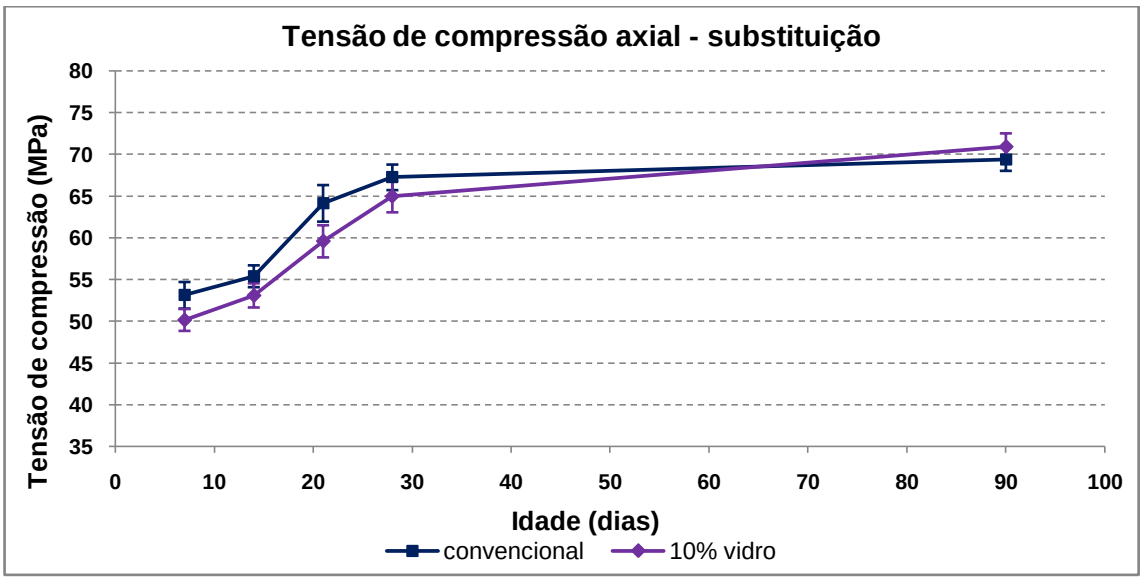
Fonte: Resultado de laboratório

Tabela 41 – Variação (%) da resistência à compressão axial de misturas contendo pó de vidro e sílica ativa em substituição e adição ao cimento Portland.

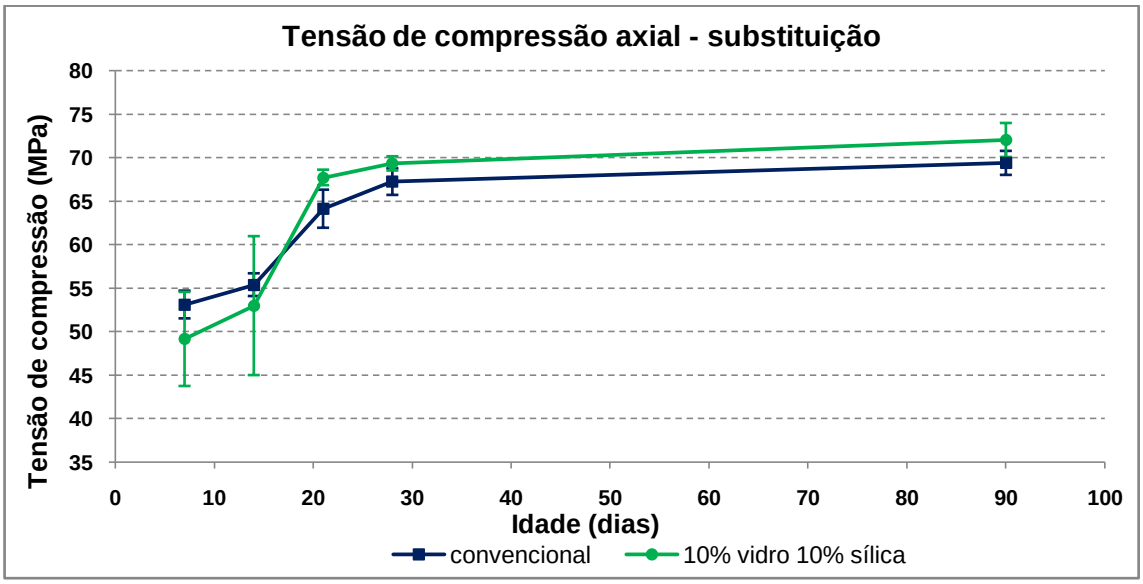
Mistura	Idade do corpo de prova (dia)				
	7	**14**	**21**	**28**	**90**
M_2	-6	-4	-7	-3	+2,2
M_3	-7	-4	+6	+3	+4
M_4	-9	-8	-11	-7	-1,1
M_5	-24	-32	-29	-24	-5
M_6	+2,4	-0,18	+4	+3	+2,2
M_7	-1,2	+1,8	+7	+0,4	+5

Fonte: Resultado de laboratório

A Figura 54 resume os resultados dos testes de resistência à compressão axial para as misturas M_2 e M_3, comparados às resistências obtidas com a mistura M_1.



(a)



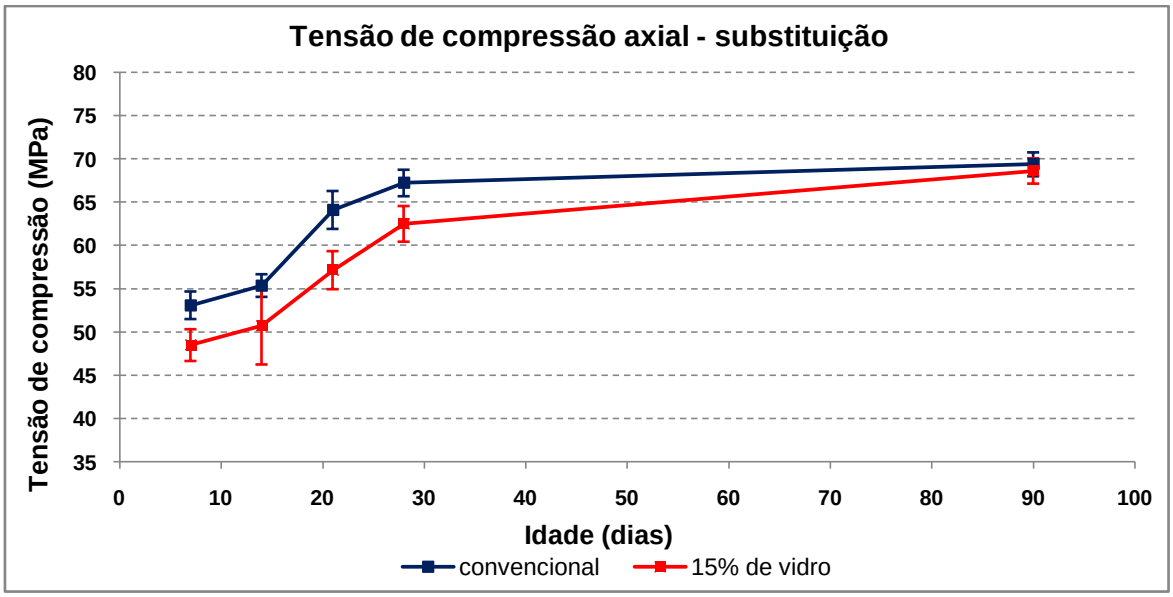
(b)

Figura 54 - Resistência à compressão axial de concretos com diferentes proporções de vidro e sílica em substituição ao cimento Portland, em função do tempo de cura. (a) misturas M_1 e M_2. (b) misturas M_1 e M_3.

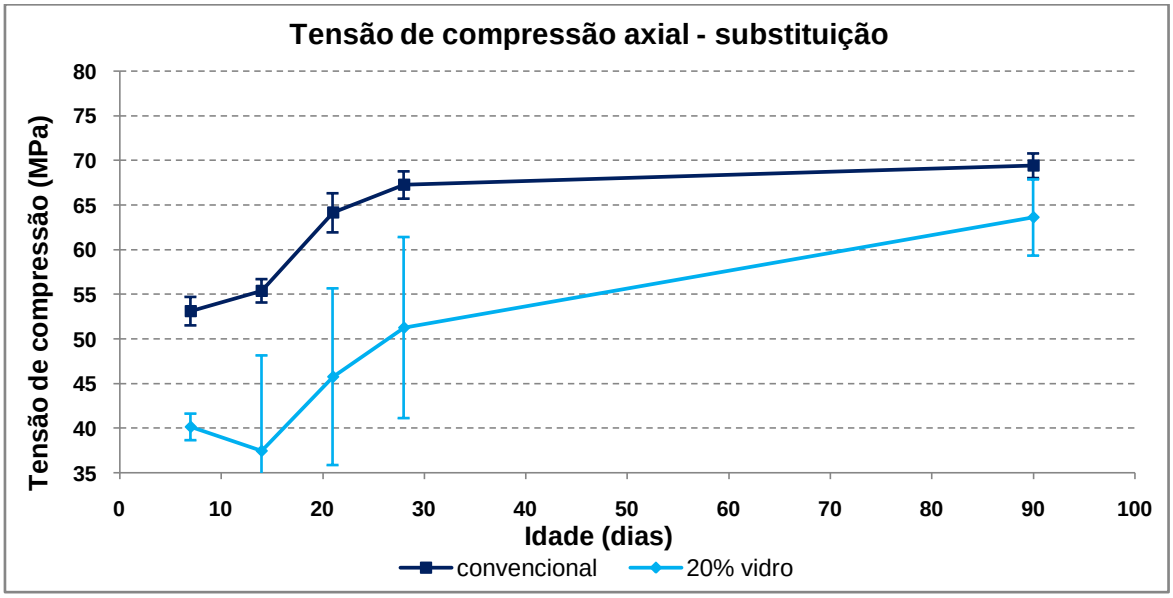
Observa-se na Figura 54 (a) que os corpos de prova produzidos com 10% de pó de vidro (M_2) apresentaram resistência média à compressão axial semelhante à da mistura de controle M_1, ou seja, em geral não foram observadas diferenças de resistência mecânica dentro dos limites de erro experimentais. Entretanto, tais concretos apresentaram resistência média à compressão axial sistematicamente menor que a dos concretos de referência M_1, nas

idades de 7, 14, 21 e 28 dias. No entanto, na idade de 90 dias a situação foi invertida, embora os valores médios não tenham apresentado diferença significativa entre si.

A mesma análise pode ser feita com os resultados de resistência à compressão axial da mistura M_3 em comparação ao concreto de referência M_1 (Figura 54 (b)). As substituições de vidro e sílica resultaram em resistências menores nas idades 7, 14 e 21 dias, no entanto foram superiores para as idades 28 e 90 dias.



(a)

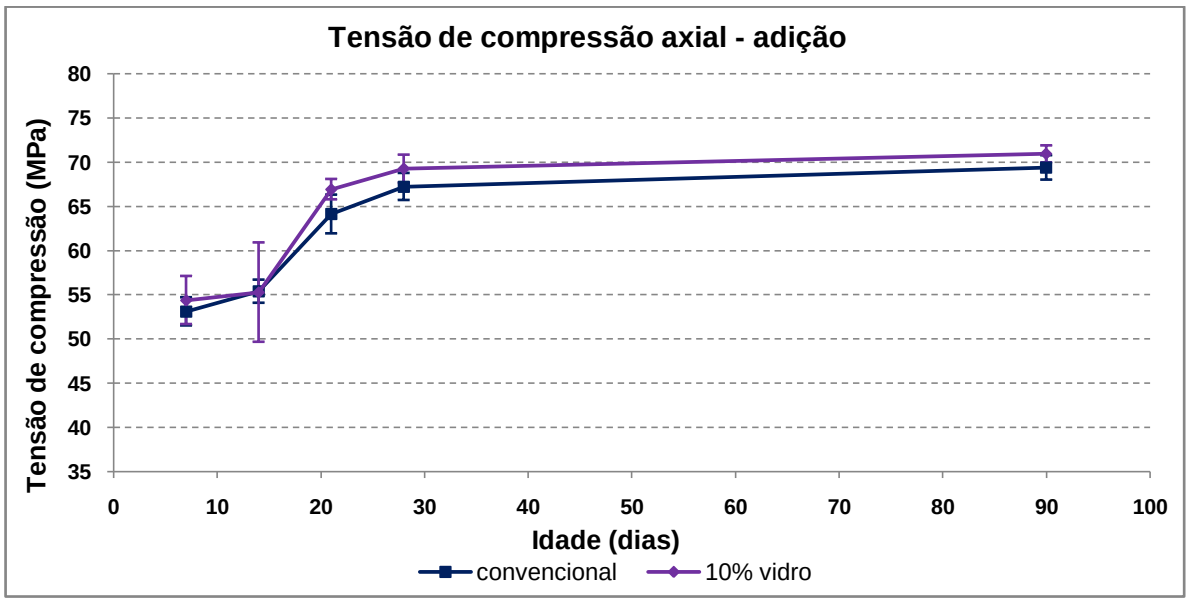


(b)

Figura 55 - Resistência à compressão axial de concretos com diferentes proporções de vidro e sílica em substituição ao cimento Portland, em função do tempo de cura: (a) misturas M_1 e M_4; (b) misturas M_1 e M_5.

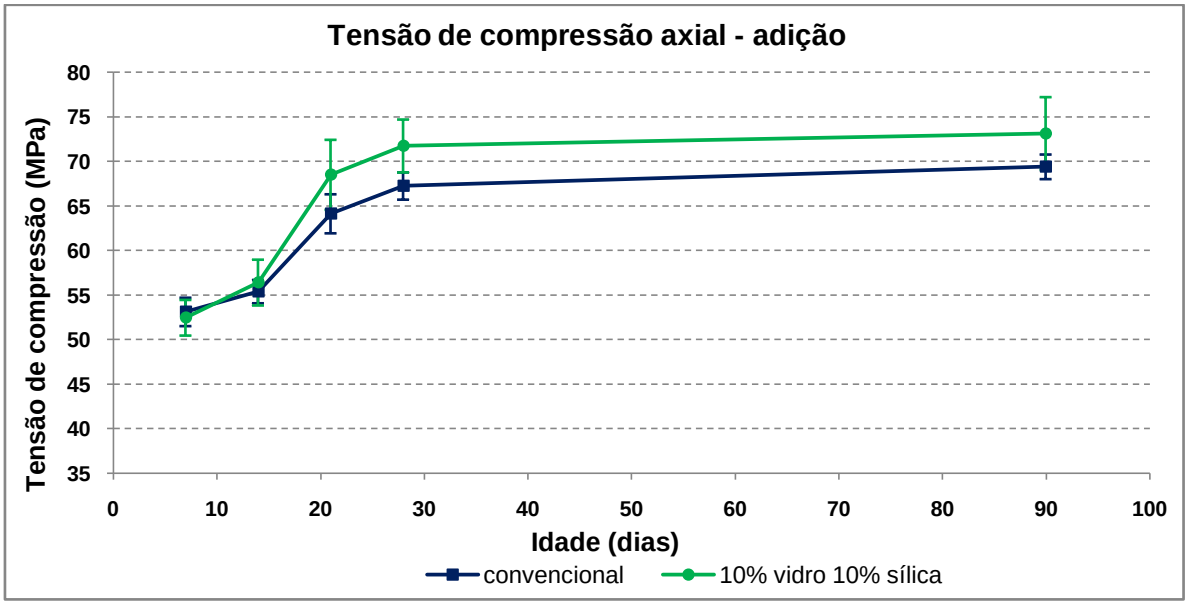
Da mesma forma, a Figura 55 compara os resultados de compressão axial para as misturas M_4 e M_5 com os do controle M_1, onde pode-se verificar para todas as idades que a resistência média das misturas com substituição foram inferiores às médias da mistura de controle. Porém, houve sensível aumento de resistência média com o aumento da idade.

Novas misturas foram preparadas a partir de adições de vidro e sílica à quantidade de cimento Portland da mistura de controle, e não em substituição, tendo como base os melhores resultados dos testes anteriores, a saber, teores de 10% vidro. Tais misturas foram denominadas M_6 (10% vidro) e M_7 (10%vidro e 10% sílica). A Figura 57 apresenta os resultados de resistência à compressão axial de corpos de prova em idades de 7 a 90 dias.



(a)

Figura 56 - Resistência à compressão axial de concretos com diferentes proporções de vidro e sílica adicionadas ao concreto além da proporção de cimento Portland, em função do tempo de cura: (a) misturas M_1 e M_6; (b) misturas M_1 e M_7.



(b)

Figura 57 - Resistência à compressão axial de concretos com diferentes proporções de vidro e sílica adicionadas ao concreto além da proporção de cimento Portland, em função do tempo de cura: (a) misturas M_1 e M_6; (b) misturas M_1 e M_7.

Verifica-se na Figura 57 um aumento dos níveis médios de resistência à compressão axial em todas as idades a partir de 14 dias, em comparação às amostras de controle. A menor resistência do concreto nas primeiras idades pode ser atribuída à menor hidratação do cimento e à menor tensão superficial do pó de vidro, que é essencial para ligação e a estruturação do concreto em estado fresco.

De acordo com (BYARS, MORALES-HERNANDEZ e YING, 2004), resíduos de vidro finamente moídos com área superficial elevada e ricos em sílica amorfa (SiO_2) reagem quimicamente com o cálcio presente no cimento para formar hidratos de silicato de cálcio, que é um produto de hidratação da pasta de cimento que eleva a resistência das misturas de concreto e argamassas, além de impedir a formação de poros principalmente ao longo das idades mais avançadas.

Para promover a atividade pozolânica do vidro nas misturas de concreto sem que ocorresse uma significativa expansão do concreto devido à reação álcali-sílica na mistura de cimento e vidro, o vidro foi moído em moinho de bolas e o pó separado por peneiramento em tamanhos inferiores a 75 µm na presente pesquisa.

Nos ensaios de (OLIVEIRA, GOMES e SANTOS, 2008) a substituição de 30% de cimento por partículas de vidro abaixo de 75 µm e adição de cinzas volantes aumentam a resistência dos concretos em 25% e 35% quando os ensaios são realizados aos 7 e 28 dias, respectivamente, sem qualquer alteração adversa na durabilidade. Nesta granulometria os

resíduos de vidro não promoveram variações significativas sobre o comprimento dos corpos de prova.

O presente trabalho demonstra através dos experimentos de compressão axial que o pó de vidro finamente moído exibe reações pozolânicas favoráveis em misturas com substituição de 10% de cimento, assim como para todas as proporções de adição estudadas.

Observa-se que as misturas M_2 e M_3 de substituição e M_6 e M_7 de adição de pó de vidro e sílica apresentaram melhores resultados de resistência à compressão axial. Tais resultados são essencialmente devidos à forma esférica e ao menor tamanho dos grãos de sílica, assim como à atividade pozolânica dos dois materiais, que causam aumento de resistência pelo maior empacotamento e aumento da densidade nos concretos, e pela maior adesão entre as fases da microestrutura com a recristalização nas idades mais avançadas, respectivamente.

A Figura 58 apresenta a variação da resistência à compressão axial aos 90 dias para misturas com diferentes proporções de vidro e sílica em substituição ou adição ao cimento Portland, tomando-se como referência a amostra de controle M_1 (0% substituição ou adição). As misturas M_4 (15% vidro) e M_5 (20% vidro) de substituição ao cimento apresentaram resistência menor que M_1, enquanto que as misturas M_2 (10% vidro) e M_3 (10% vidro e 10% sílica) de substituição, assim como as misturas M_6 (10% vidro) e M_7 (10% vidro e 10% sílica) de adição ao cimento apresentaram resistência média à compressão axial ligeiramente maior que a da amostra de referência. Observa-se também que a resistência à compressão axial diminui à medida que a proporção de pó de vidro aumenta, sem adição de sílica ativa. Destaca-se a grande variação nas barras de erro, pois para cada idade foram rompidas sempre três amostras com grande variação de resultados, mesmo tratando-se de uma mesma mistura, por tratar-se de um compósito em que a fratura depende de vários fatores, como homogeneidade da mistura, adensamento, porosidade, procedimento de produção e temperatura ambiente.

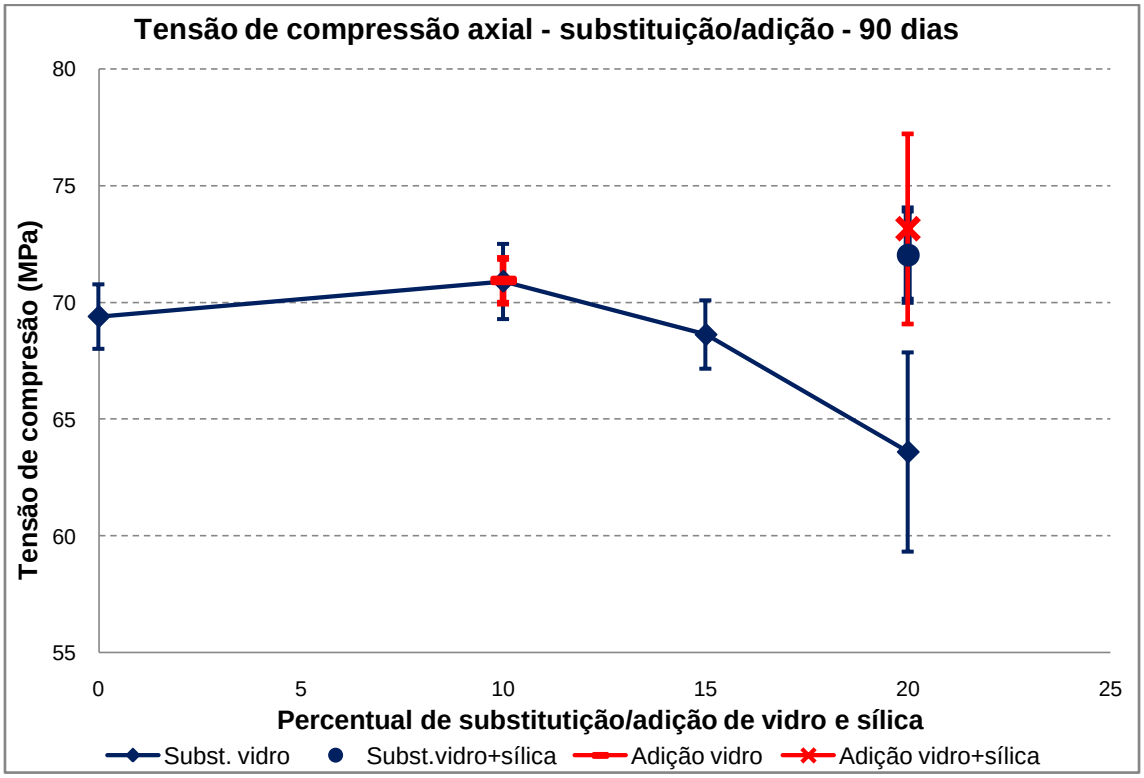


Figura 58 - Tensão de ruptura por compressão axial de concretos com diferentes níveis de adição e substituição de vidro e sílica aos 90 dias.

4.25 Resistência à tração por compressão diametral

A caracterização da resistência à tração de misturas de concreto contendo vidro é de importância especial, pois essa propriedade é a manifestação mais evidente de ocorrência da reação álcali-sílica. Em condições de alta umidade, que é o caso da cura dos corpos de prova em câmara úmida, as amostras podem expandir, principalmente em idades mais avançadas, e produzir tensões de tração no interior da estrutura de concreto. Este é o principal motivo de patologias ocasionadas por fissurações apresentadas em concretos quando vidro é utilizado em sua composição, porém a resistência à tração por compressão diametral também aumenta quando idades mais avançadas são alcançadas, sendo um indicativo de boa qualidade do material.

Os resultados médios de ruptura por compressão diametral são listados na Tabela 42. A Tabela 43 mostra a variação percentual na resistência à compressão diametral com adições ou substituições de cimento por vidro e sílica, em comparação com os resultados da mistura de referência, M_1.

Tabela 42 - Tensão de ruptura em tração por compressão diametral (MPa) de misturas contendo pó de vidro e sílica ativa em substituição e adição ao cimento Portland.

Mistura	Tensão Diametral (MPa)				
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	90 dias
M_1	5,1	5,2	5,5	5,4	6,0
M_2	4,7	4,6	5,0	5,4	6,1
M_3	4,9	5,2	5,6	5,7	6,2
M_4	4,5	4,7	5,1	5,2	5,4
M_5	4,2	4,4	4,6	4,9	5,0
M_6	5,5	5,4	5,9	6,6	6,0
M_7	5,8	6,2	6,7	6,3	7,2

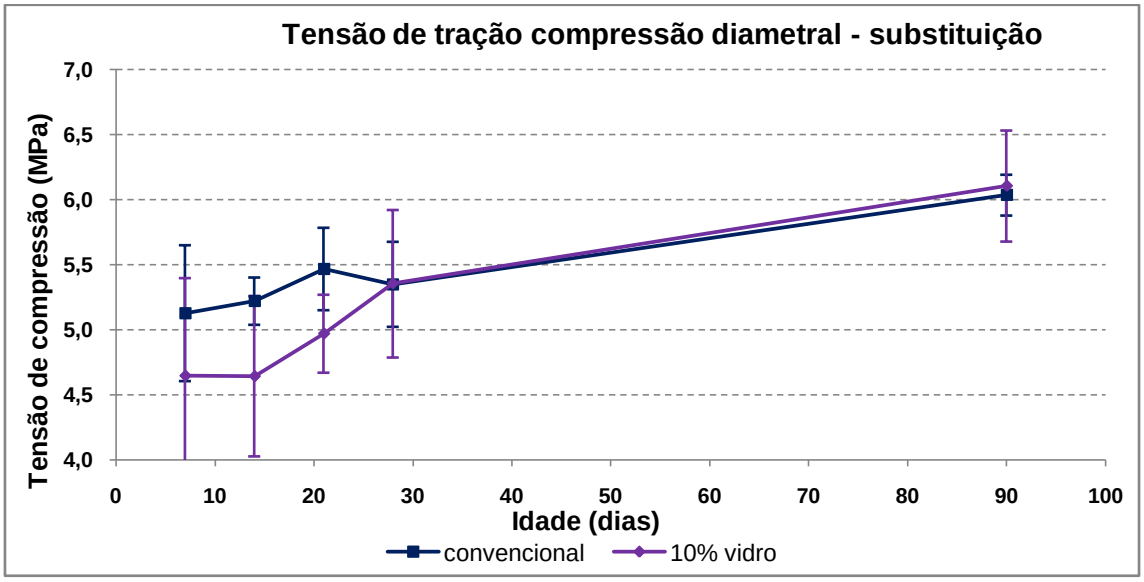
Fonte:Resultado de laboratório

Tabela 43 - Variação (%) da resistência à tração por compressão diametral de misturas contendo pó de vidro e sílica ativa em substituição e adição ao cimento Portland.

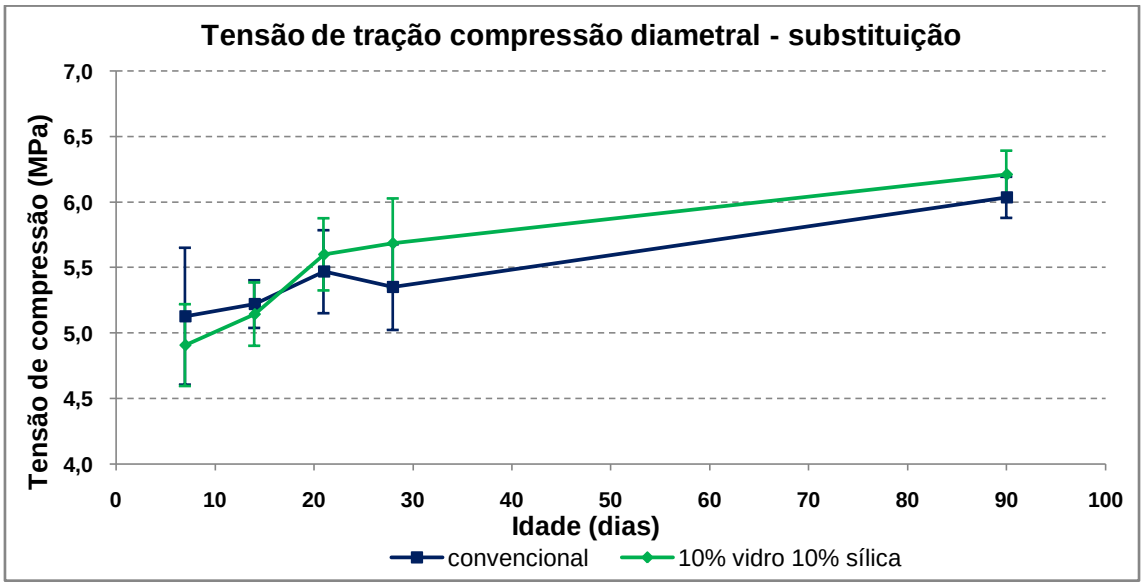
Mistura	Percentual de redução/aumento da tensão diametral (%)				
	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	90 dias
M_2	-9,4	-11,1	-9,1	0,0	+1,0
M_3	-4,3	-1,34	+2,4	+6,4	+2,8
M_4	-12,7	-10,7	-7,1	-3,7	-10,8
M_5	-18,9	-14,9	-15,2	-8,0	-16,6
M_6	+6,5	+3,3	+8,4	+22,4	-0,5
M_7	+13,8	+18,0	+23,0	+17,2	+18,4

Fonte: Resultado de laboratório

A Figura 61 mostra a variação da tensão de ruptura por compressão diametral em função do tempo de cura de misturas com diferentes proporções de vidro e sílica em pó em substituição ou adição ao cimento Portland, em comparação à mistura M_1.

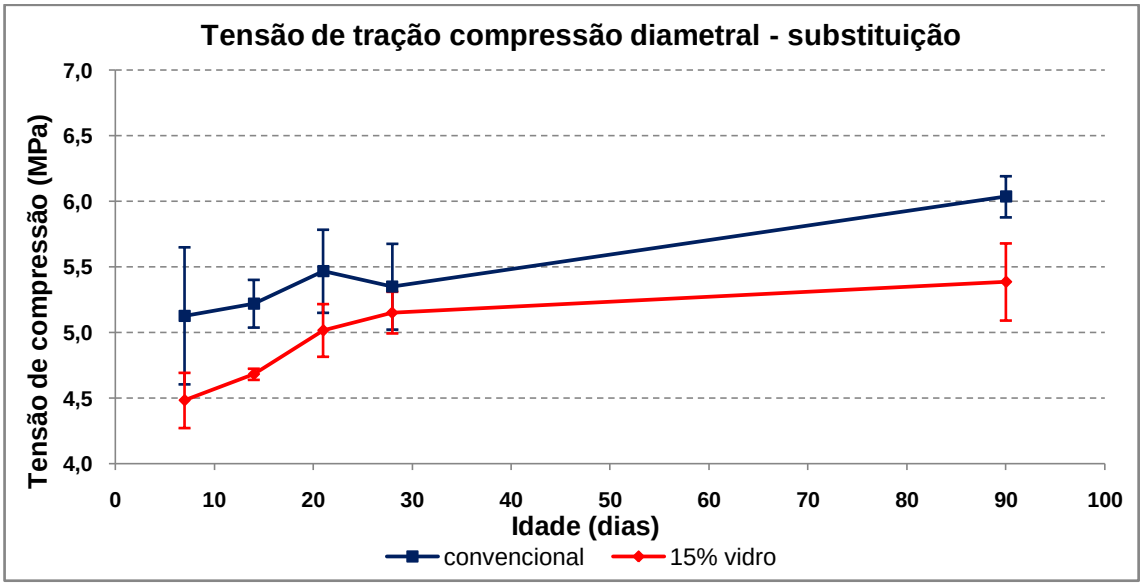


(a) M_1 x M_2

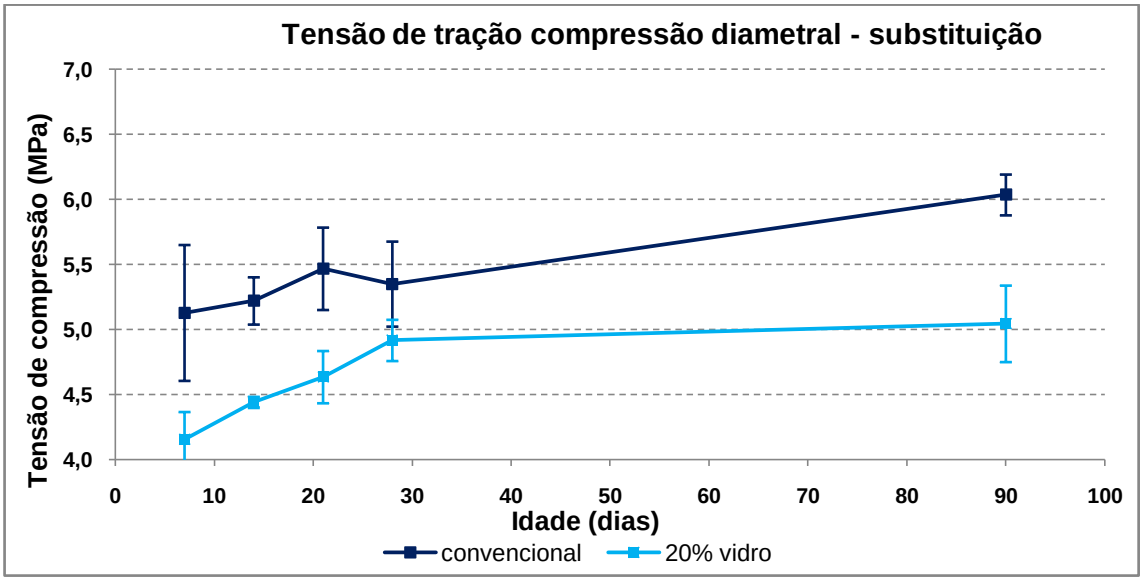


(b) M_1 x M_3

Figura 59 - Tensão de ruptura por compressão diametral de misturas com diferentes proporções de substituição e adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função de tempo de cura.

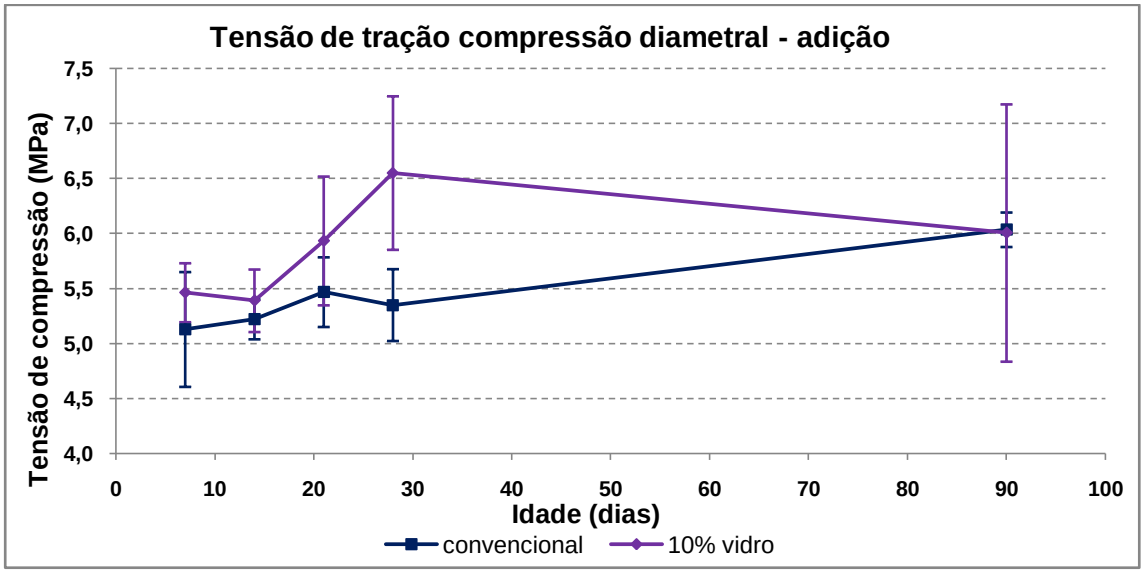


(c) M_1 x M_4

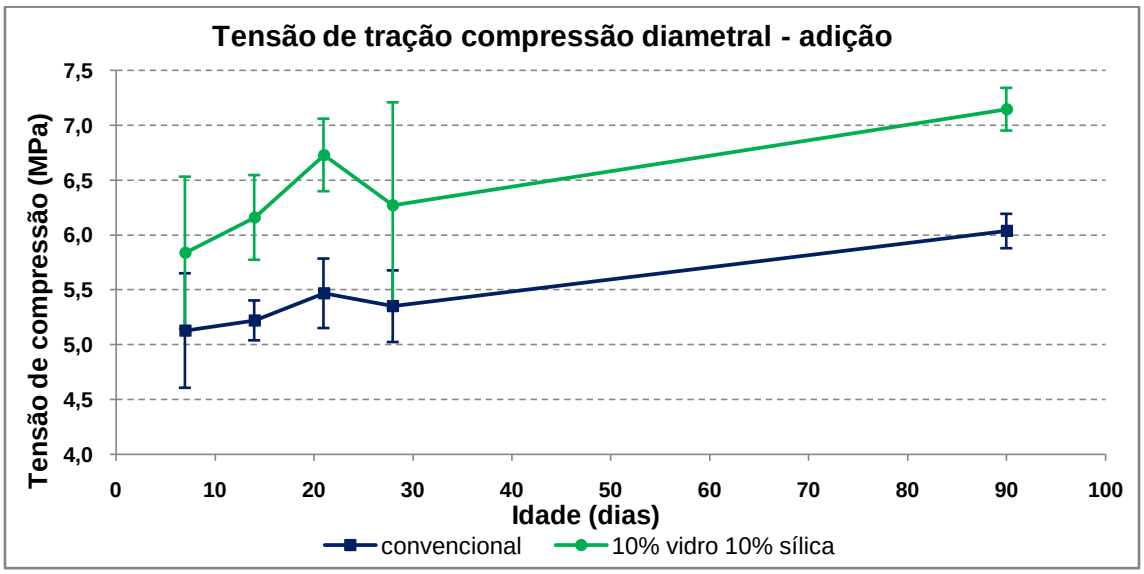


(d) M_1 x M_5

Figura 60 - Tensão de ruptura por compressão diametral de misturas com diferentes proporções de substituição e adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função de tempo de cura.



(e) M_1 x M_6



(f) M_1 x M_7

Figura 61 - Tensão de ruptura por compressão diametral de misturas com diferentes proporções de substituição e adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função de tempo de cura.

De acordo com os dados das Tabela 42 e Tabela 43 os gráficos da Figura 61, observa-se que a resistência à tração por compressão diametral é em geral maior para a mistura com 10% vidro (mistura M_2) em substituição ao cimento, em comparação à mistura de controle. Esse aprimoramento aumenta com o incremento de 10% de sílica na amostra M_3, conforme mostrado na Figura 61 (f).

De acordo com o resultado dos ensaios, o melhor valor de resistência à compressão diametral foi 7,2 MPa, obtido a partir da mistura de concreto com adição de 10% vidro e 10% sílica (M_7), que representa um aumento na resistência à tração de 18,4% em comparação com

a mistura de controle M_1, como mostrado na Tabela 43. Também se mostraram satisfatórias as misturas M_2 e M_3 em idades mais avançadas. Este comportamento é atribuído à maior adesão na microestrutura devido à reação pozolânica entre os pós de vidro e sílica finamente moídos na pasta de cimento.

Como pode ser visto na Figura 61, as misturas M_6 e M_7 são caracterizadas por uma elevação na resistência à tração ao longo de todas as idades. A adição de vidro e sílica nas misturas melhorou a resistência inicial quando comparadas as de substituição.

Pode-se considerar que o pó de vidro foi o principal componente da mistura responsável pelo atraso no aumento de resistências à tração e compressão das misturas ensaiadas. A utilização de vidro em pó afetou as propriedades do concreto em ambos os estados: fresco e endurecido, conforme mostrado anteriormente nos ensaios de consistência e agora com os de resistência.

No ensaio de tração por compressão diametral aos 90 dias, conforme mostrado na Figura 62, as substituições de cimento por vidro reduziram para as misturas com 15% e 20% de substituição, enquanto que para todas as outras misturas mostraram-se superiores. Os aumentos e diminuições de resistência mantiveram-se sistemáticos como nos ensaios de compressão axial, porém variando bastante as barras de erro.

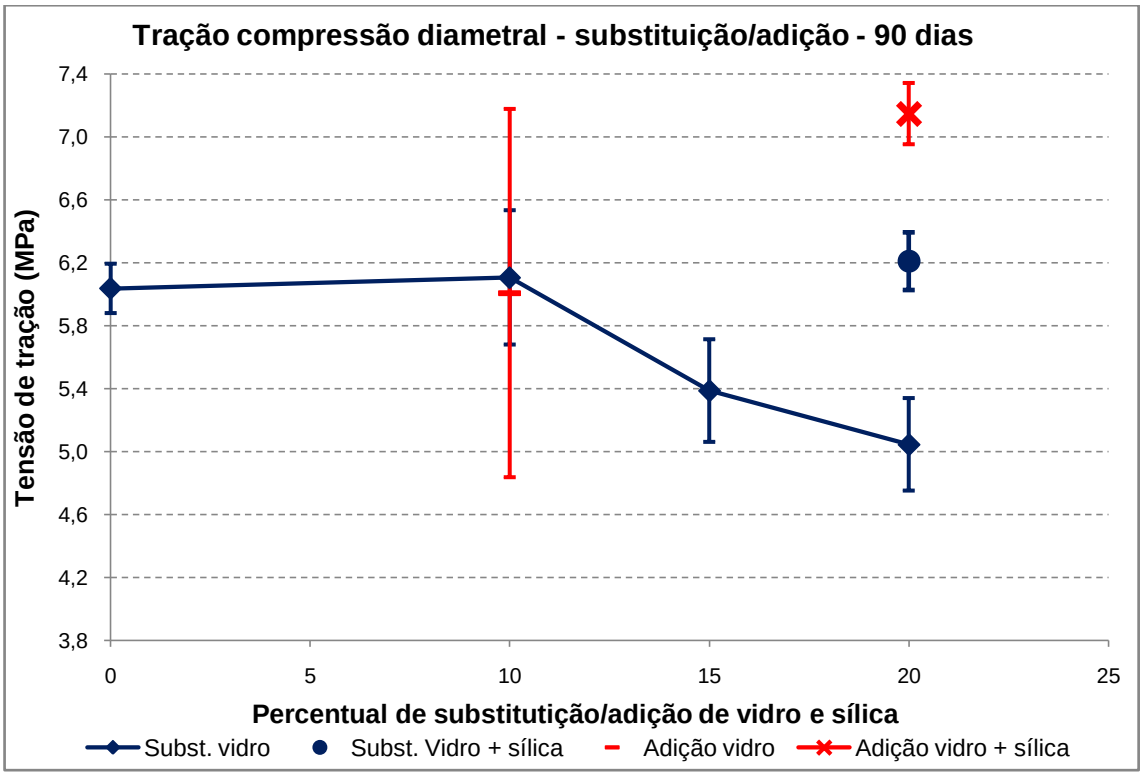


Figura 62 - Resultado dos ensaios de tensão por compressão diametral de todas as misturas aos 90 dias de rompimento.

Os resultados dos testes de compressão e tração indicam que o ganho de força no concreto contendo vidro em pó ocorre a uma taxa ligeiramente menor que em um concreto normal, mas concretos com pó de vidro têm o potencial de alcançar resistências superiores a do concreto normal para tempos mais longos de cura. A taxa mais lenta de aumento de resistência nos concretos com vidro reflete a taxa da reação pozolânica do vidro com o hidróxido de cálcio em hidratos de cimento. As vantagens em longo prazo do concreto contendo vidro podem ser atribuídas às qualidades melhoradas de ligação do hidrato de silicato de cálcio que resulta da reação pozolânica do vidro com hidróxido de cálcio, e também pelo refinamento e o bloqueio parcial dos poros capilares. Os resultados destes testes também sugerem que existe um limite máximo para o nível de substituição de cimento por pó de vidro moído, quando se deseja produzir concretos com vidro moído, com resultados favoráveis que são equivalentes ou superiores aos do concreto normal.

(TURGUT e YAHLIZADE, 2009) mostraram que a substituição do agregado miúdo natural por agregado de resíduo de vidro fino na produção de concreto ao nível de 20%, em peso, tem efeito significativo e favorável na resistência à compressão, resistência à tração e resistência à flexão em comparação com a amostra de controle, com agregado natural, devido à natureza pozolânica do resíduo de vidro, além de suprimir os efeitos da reação álcali-sílica na produção de concretos utilizados na produção de blocos de pavimentação.

(SOUNTHARARAJAN e SIVAKUMAR, 2013) substituíram 10% e 20% do cimento por vidro em pó e 0,5% e 1,5% do volume do concreto por fibras de aço em misturas de concreto. Testes mostraram maior resistência à compressão e tração para as idades de 7 e 28 dias com a composição contendo 20% de pó de vidro branco e 1,5% de fibras de aço em relação ao concreto de controle. Os autores justificaram a melhoria da resistência pela densificação da microestrutura com a incorporação de micropreenchimentos e a inclusão de pós contendo sílica reativa.

De acordo com (VIJAYAKUMAR, VISHALIN e GOVINDARAJULU, 2013) há possibilidade de utilização de resíduo de vidro como substituição parcial de cimento em concreto aos 60 dias de idade. Os resultados são satisfatórios quando analisadas tanto a resistência à tração como de compressão em comparação ao concreto convencional. Na pesquisa, os autores utilizaram tamanho de partícula de resíduo de vidro inferior a 75 μm para impedir o efeito da reação álcali-sílica. A explicação está no fato de o vidro ser um material amorfo, apresentando um elevado potencial pozolânico quando o tamanho da partícula é inferior a 75 μm.

Os resultados de (VIJAYAKUMAR, VISHALIN e GOVINDARAJULU, 2013) mostram a resistência à compressão aos 28 dias de concretos com 20%, 30% e 40% de substituição de cimento por pó de vidro com granulometria inferior a 75 μm aumenta 19,6%, 25,3% e 33,7%, respectivamente, enquanto que para uma substituição de 40% a resistência à tração aumenta 4,4%em relação ao concreto convencional.

O estudo de (AL, 2013) mostrou que a adição de vidro moído em substituição parcial à areia natural levou a uma redução nas propriedades de resistência. Para uma substituição de 50%, a resistência à compressão reduziu acentuadamente 34,53% da resistência original. Com 10% de substituição a resistência à compressão reduziu 23,75%. Comportamento semelhante, mas com menor intensidade, é observado tanto para a resistência à tração quanto à flexão das amostras testadas. Essa redução é devida ao fato da resistência das partículas de vidro moído ser menor que a do agregado natural. De maneira geral, a redução na resistência foi de 24%, 4%, e 10% em compressão, tração e flexão, respectivamente, quando uma proporção de 10% de substituição é utilizada, que para o autor são consideradas reduções relativamente baixas em valores de resistência.

Para (PALMQUIST, 2013), as superfícies lisas e planas do vidro moído proporcionam fraca ligação entre o vidro e a pasta de cimento. Como resultado a resistência à compressão do concreto com agregado de vidro é mais baixa que a do concreto produzido com agregados naturais. Outro fator que reduz a resistência à compressão é o efeito da expansão, que ocorre em concretos produzidos com resíduos de vidro.

(SIAM, 2011) estudou concretos produzidos com diferentes proporções de água/cimento: 0,4, 0,5 e 0,6, e diferentes proporções de substituição de agregados finos: 20%, 40% e 60%. A resistência à compressão aos 7 e 28 dias da mistura com 20% de pó de vidro e relação água/cimento de 0,4 foi melhorada em relação à mistura de controle e às outras substituições, porém em todas as outras substituições e relações água/cimento a resistência do concreto foi prejudicada pelo uso de resíduos de vidro fino.

4.26 Porosidade

Observa-se na Figura 63 que o grau de hidratação é pequeno em todas as misturas (primeira semana), influenciando consideravelmente a porosidade. Porém em idades mais avançadas, a partir de 14 dias, o grau de hidratação é o fator que mais influencia na melhora da porosidade em todas as misturas.

Praticamente todas as misturas com substituições ao cimento Portland apresentaram a mesma porosidade até os 49 dias, com exceção da mistura com 20% de substituição. O fato pode ser explicado considerando que nos concretos as adições minerais são usadas como materiais cimentícios. São adições que preenchem os poros, mas que dependem da quantidade incorporada, pois também alteram reações químicas que não ocorrem na mesma taxa de hidratação do cimento (AÏTCIN e NEVILLE, 2003).

Pode-se observar um melhor resultado de substituição para a mistura com 10% de vidro e 10% de sílica nos efeitos de porosidade ao longo de todo período de cura. O fato pode ser explicado pela atividade pozolânica, e ainda, entre as partículas analisadas (cimento, vidro e sílica) a partícula de sílica é a menor e mais esférica possibilitando uma maior densidade de empacotamento, diferentemente da partícula de vidro, que é maior e com superfície mais irregular.

Os melhores resultados mecânicos com vidro em substituição ao cimento foram alcançados em misturas com 10% de substituição de vidro, tanto para os esforços de compressão como de tração. As adições com vidro modificam a cinética de hidratação, principalmente nas primeiras idades, mas como a porosidade e densidade mantêm-se praticamente as mesmas ao longo das idades, o que mais influenciou foi um melhor grau de hidratação das misturas, principalmente em idades mais avançadas.

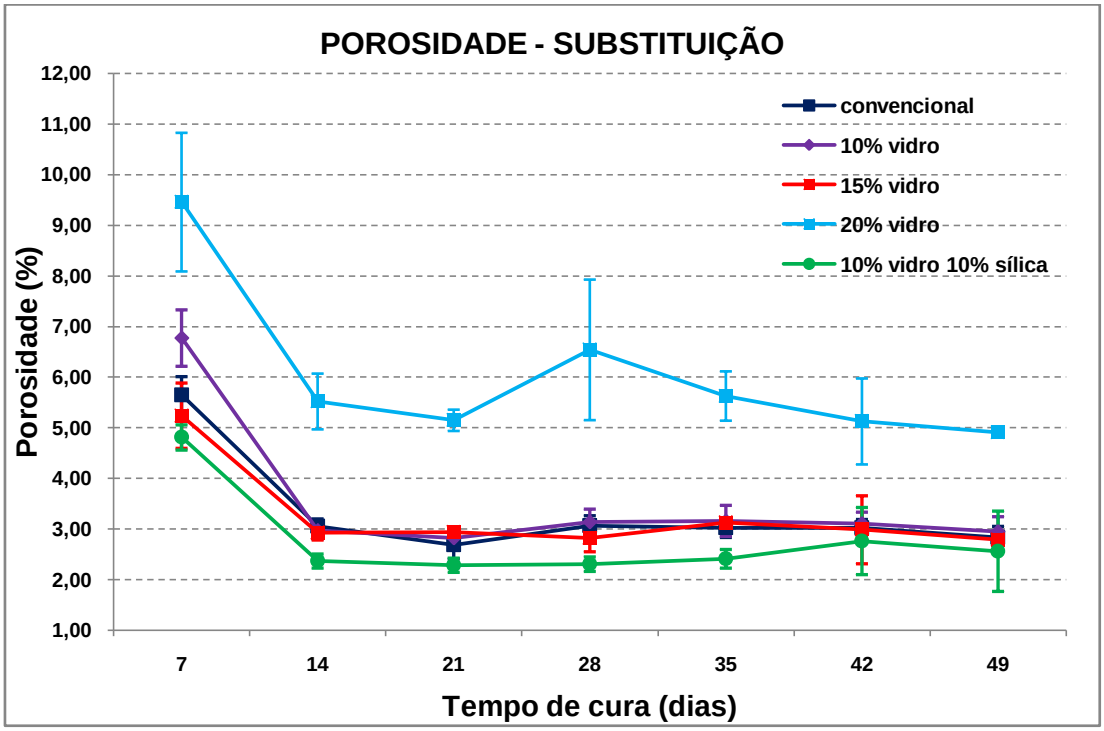


Figura 63 - Porosidade de misturas com diferentes proporções de substituição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função do tempo de cura.

A substituição de 10% vidro, com melhores resultados nos ensaios mecânicos a partir de 14 dias de cura, apresenta-se com praticamente a mesma porosidade das demais misturas de 14 a 49 dias, Figura 63. A situação pode ser explicada pelo fato do pó de vidro, embora tenha uma granulometria maior que a do cimento, pode ter modificado a estrutura física da mistura nas primeiras idades, compensada pelo efeito pozolânico nas idades mais avançadas.

No caso das misturas com adição de 10% vidro, bem como adição de10% vidro e 10% sílica, os resultados de porosidade estão apresentados na Figura 64, onde há uma diminuição sistemática da porosidade ao longo da primeira semana de cura, e alterações insignificantes nos tempos posteriores. Os melhores resultados para adição foram alcançados na mistura com 10% vidro e 10% sílica, como ocorrido nas misturas de substituição.

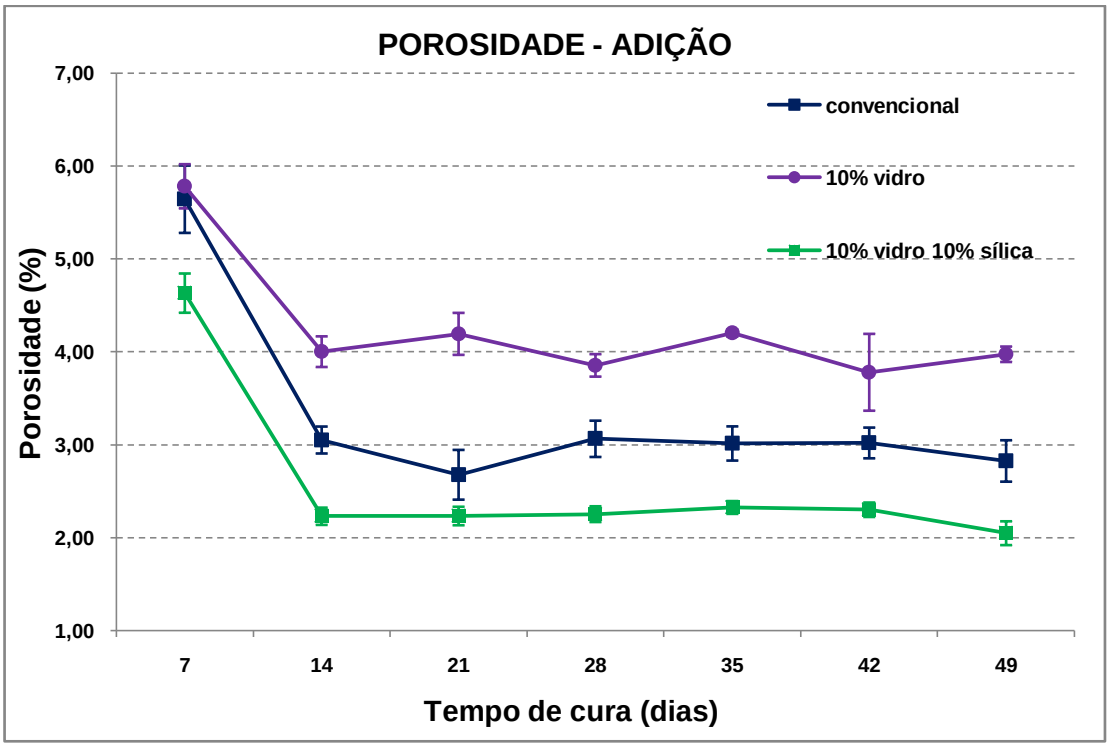


Figura 64 - Porosidade de misturas com diferentes proporções de adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função do tempo de cura.

A adição de 10% vidro resulta em porosidade sistematicamente acima das demais misturas de 14 a 49 dias, Figura 64, embora tenha apresentado a mesma resistência mecânica que o concreto convencional. A situação novamente pode ser explicada pelo fato do pó de vidro, embora com granulometria maior que a do cimento, ter efeito pozolânico em idades avançadas.

No trabalho de (NASSAR e SOROUSHIAN, 2012), que fizeram substituições parciais do cimento por vidro em pó tanto com baixa quanto com alta relação água/cimento

(a/c), houve redução da absorção de água e porosidade nas misturas experimentadas, enquanto que no trabalho de (SUNNY e POUTOS KONSTANTINOS, 2013), em suas pesquisas sobre o efeito de resíduos de vidro em pó sobre as propriedades de argamassas de cimento, a porosidade aumentou com o aumento do teor de vidro.

No estudo de (IQBAL, MUZAFAR, *et al.*, 2013) usando resíduos de vidro em substituição parcial ao agregado fino, os concretos produzidos apresentaram diminuição da absorção de água com o aumento do teor de vidro. O menor valor de absorção de água foi encontrado para a mistura de concreto com maior conteúdo de resíduo de vidro, 40%.

A absorção de água e a porosidade do concreto funcionam como indicadores da durabilidade do concreto endurecido, podendo aumentar consideravelmente o desempenho e vida útil em ambientes hostis. A diminuição da porosidade possibilita o aumento dos esforços de compressão e tração. De acordo com (NASSAR e SOROUSHIAN, 2012), a substituição parcial de cimento por resíduo de vidro moído produz um aumento na densidade do concreto, atribuído à ação pozolânica do vidro em pó, além do efeito de enchimento ocasionado pelas partículas de vidro, que possibilitam um melhor empacotamento, resultando em uma microestrutura mais impermeável e mais densa.

O aumento da massa de vidro em substituição e em adição ao cimento Portland ocasiona modificações nos efeitos de absorção e porosidade nas misturas trabalhadas, como mostrado anteriormente, mas não foram observados efeitos sensíveis na massa específica seca das misturas, como mostrado na Figura 65 e Figura 66.

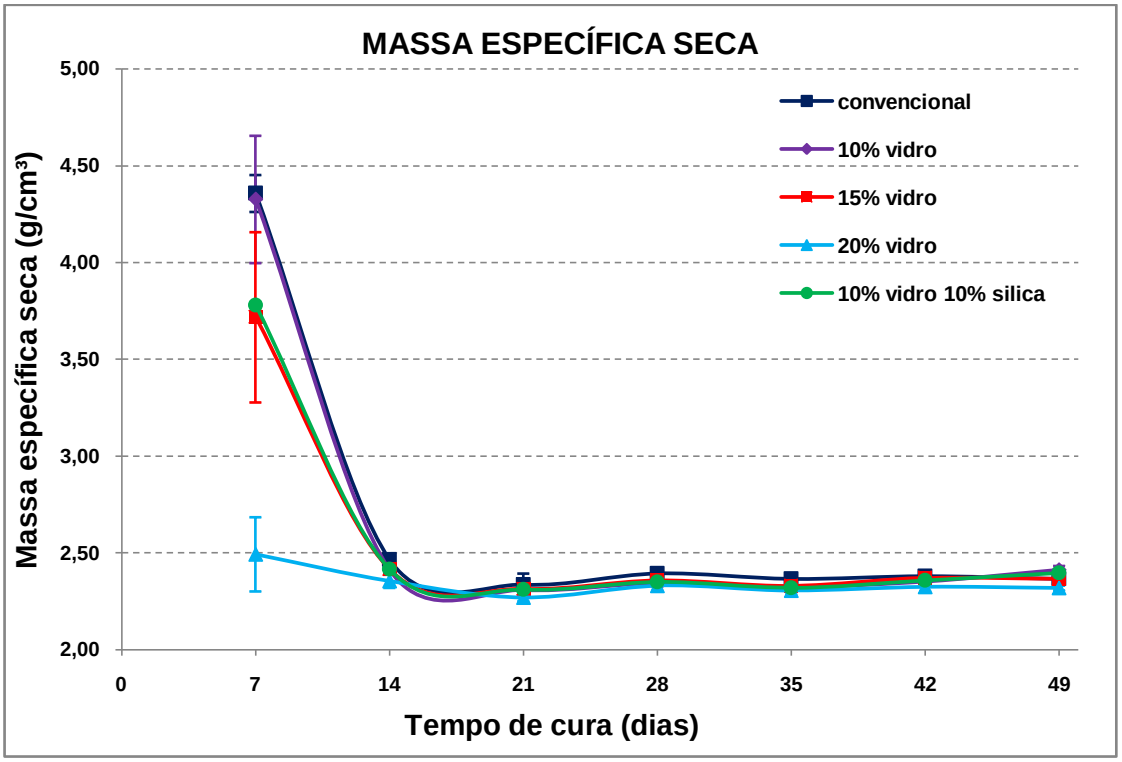


Figura 65 - Massa específica de misturas com diferentes proporções de substituição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função do tempo de cura.

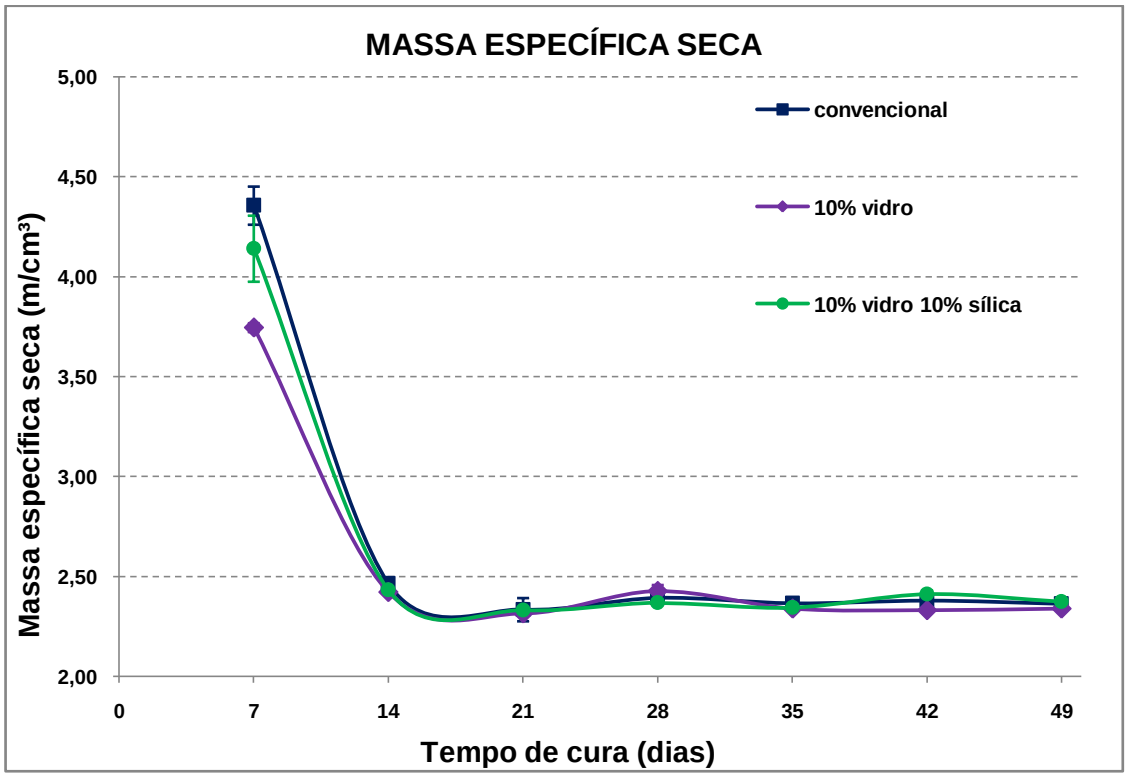


Figura 66 - Massa específica de misturas com diferentes proporções de adição de vidro e sílica em pó ao cimento Portland, em função do tempo de cura.

4.27 Microscopia eletrônica de varredura das amostras fraturadas

A Figura 67 mostra a microestrutura de uma mistura de concreto ensaiada com 10% de pó de vidro em substituição ao cimento Portland.

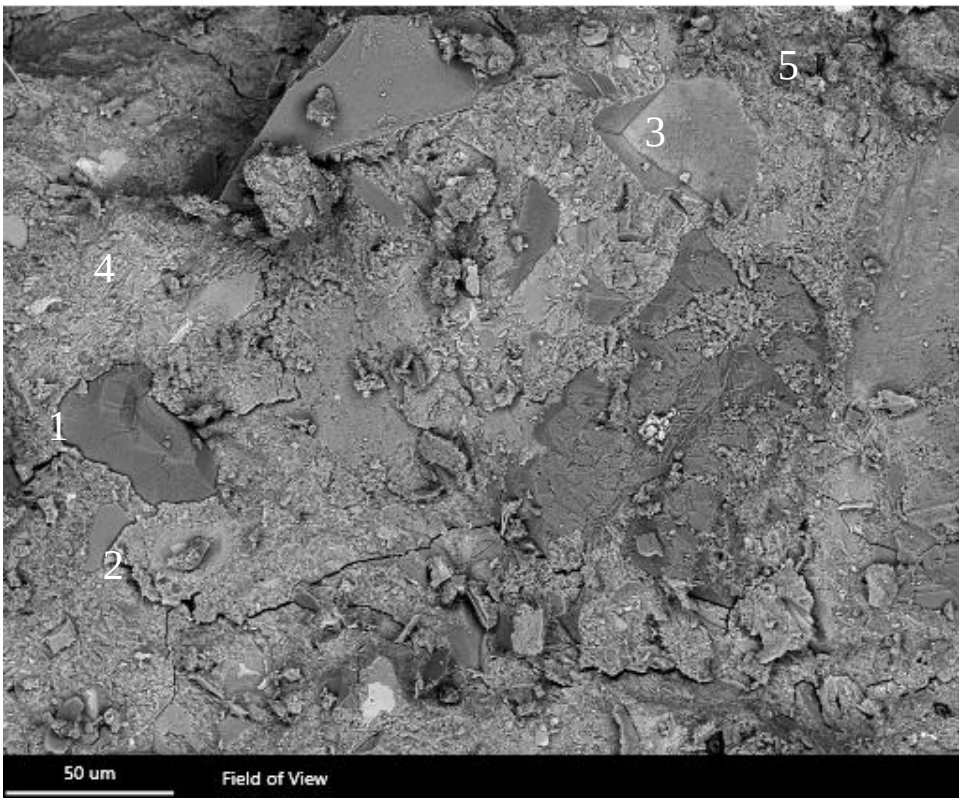


Figura 67 - Imagem da microestrutura de concreto com 10% de pó de vidro e 90 dias de cura.

Percebe-se que a superfície da mistura é bastante porosa, muito heterogênea e complexa. Na microestrutura identifica-se regiões formadas por cimento e partículas de agregado, Figura 67 (1), que possuem aspectos diferentes, pois são fases com características multifásicas. A partícula de agregado granítico pode conter vários minerais, além de vazios e microfissuras, enquanto que a matriz de cimento também possui distribuição heterogênea de fases, sujeitas a modificações ao longo do tempo, devidas ao processo contínuo da hidratação.

A chamada zona de transição é a porção da pasta cimentícia em contato com o agregado graúdo. É a região com maior porosidade e heterogeneidade em uma mistura de concreto, em decorrência do filme de água que se forma ao redor do agregado, e que cria planos preferenciais de ruptura, microfissurações, pequenos acréscimos de volume e acúmulo de umidade, sendo considerada o elo fraco do conjunto. Na Figura 67 (2), as linhas preferenciais de desagregação podem estar mais acentuadas, porque a preparação das amostras fraturadas para observação em microscópio eletrônico é realizada por secagem em alto vácuo, além da amostra já ter sido submetida a ensaio prévio de resistência mecânica.

Quando o concreto é carregado nas primeiras idades, as microfissuras tendem a se propagar mais facilmente da zona de transição, área mais porosa, em direção a outras áreas, seguindo caminhos preferenciais de ruptura. Porém, com o tempo, essa zona pode ser preenchida com produtos de hidratação e tornar-se uma área menos porosa e mais resistente. Por causa da heterogeneidade do concreto e do estado de tensões a que é submetido, o perfil da fissura geralmente não é reto. As microfissuras se propagam criando o que se chama de zona de propagação de fratura. Uma maneira de aumentar a resistência do concreto é melhorar a resistência da zona de transição (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

A baixa resistência da zona de transição em concretos muito porosos impede a transferência eficiente de carga entre a argamassa e o agregado graúdo. Mas, devido aos cuidados tomados na produção dos concretos de alta resistência, como diminuição de água e escolha do tipo e dimensão dos agregados, é de se esperar que a microestrutura de concretos de alta resistência seja mais densa, resistente e menos permeável, tendo-se um concreto durável. Pode-se dizer que a forma e dimensão dos agregados podem interferir na resistência do concreto de forma indireta por arrancamento, e de forma direta por fratura do agregado. Pode-se verificar que na microestrutura analisada não há arrancamento, mas sim fratura do agregado, comprovando-se uma boa aderência e transferência de carga entre as fases argamassa e agregado, Figura 67 (3).

Através da teoria do elo mais fraco de Weibull, as diferenças microestruturais da pasta de cimento hidratada na zona de transição desempenham um papel importante na resistência do concreto, pois quando o concreto é submetido a uma determinada tensão, as fissuras começam a se desenvolver na zona de transição, região onde se encontram os maiores defeitos. Através da micrografia da Figura 67 (5), pode-se verificar a presença de vários poros que facilitam a propagação de trincas. Em geral, a resistência do concreto aumenta com a idade enquanto as partículas não hidratadas de cimento continuam a formar produtos de hidratação que tendem a diminuir o volume total de poros. Alguns vazios das superfícies fraturadas de concreto ficam mais evidentes após passarem por ensaios mecânicos e preparação das amostras para análise da microestrutura por processos de secagem em estufa e secagem à vácuo.

A Figura 68 detalha a matriz cimentícia para a mistura com 10% de pó de vidro com 7 dias de hidratação. A microestrutura é constituída por diferentes tipos de compostos hidratados de cimento, sendo os mais importantes os silicatos hidratados C-S-H. Nas primeiras idades, tais silicatos podem adquirir morfologia fibrosa, chamada de etringita, resultado da interação de o cálcio, sulfato, aluminato e íons hidroxila, havendo a formação de

cristais aciculares de trissulfoaluminato de cálcio, que se cristaliza na forma de agulhas, Figura 68 (1), (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Os cristais prismáticos de hidróxido de cálcio e cristais de silicato de cálcio começam a preencher os espaços vazios antes ocupados pela água de hidratação. Dependendo da proporção de alumina-sulfato do cimento Portland, a etringita torna-se instável e decompõe-se para formar o monossulfato hidratado em forma de placas, conforme indicado na Figura 68 (2). A matriz de cimento é uma região que apresenta muitos poros e sua microestrutura está em constante alteração, conforme ocorre o processo de hidratação do cimento Figura 68 (3).

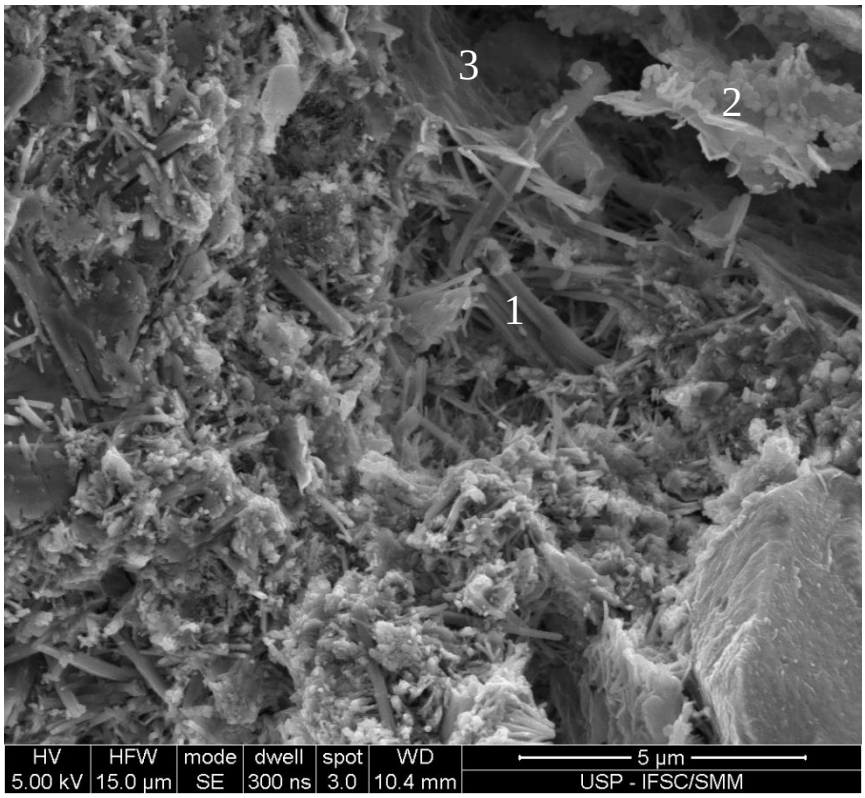


Figura 68 - Imagem da mistura de concreto aos 7 dias com 10% vidro

Nas Figura 69 e Figura 70 as micrografias das superfícies fraturadas das misturas de concreto convencional e concreto com 10% de pó de vidro em substituição ao cimento Portland apresentam praticamente as mesmas características visuais. As duas matrizes de cimento são bastante semelhantes quanto ao nível de porosidade, que está fortemente relacionado com a resistência da mistura. Também apresentam a zona de transição, que é a porção da pasta de cimento em contato com o agregado, sem grandes alterações. Esta é uma zona que varia muito em função do componente da pasta e das características do agregado, mas as duas microestruturas analisadas são visualmente semelhantes. A fase agregado em concretos convencionais não afeta significativamente sua resistência mecânica, mas no

presente caso de concretos de alta resistência, podem influenciar os resultados, pois como a massa cimentícia apresenta-se mais resistente que dos concretos convencionais, nas duas microestruturas os agregados apresentam-se como elementos fundamentais.

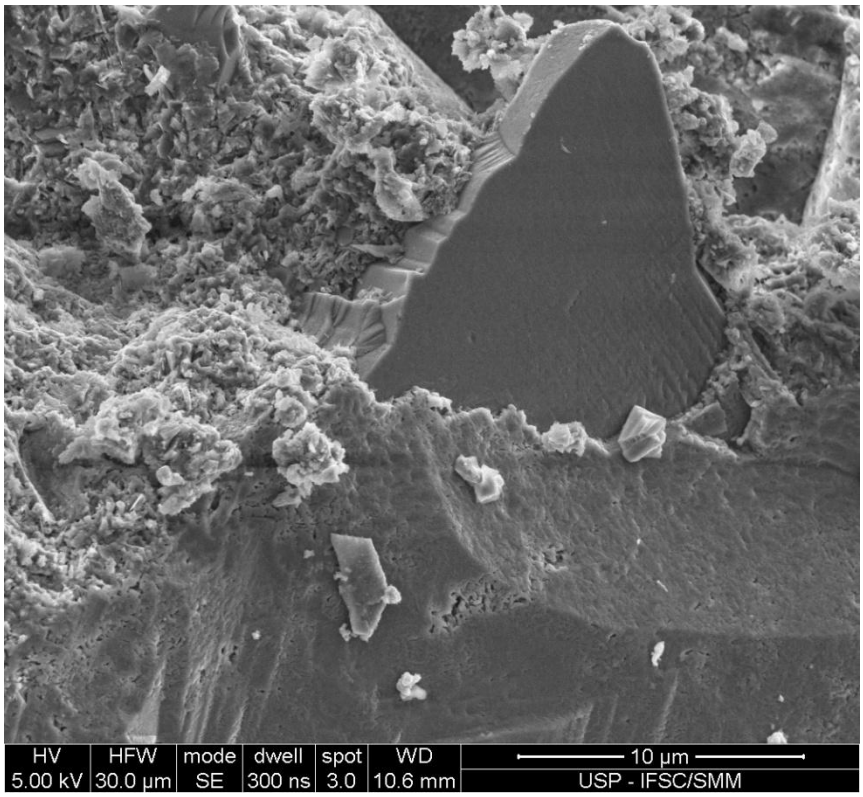


Figura 69 - Microestrutura do concreto com substituição de 10% de pó vidro e 90 dias de cura

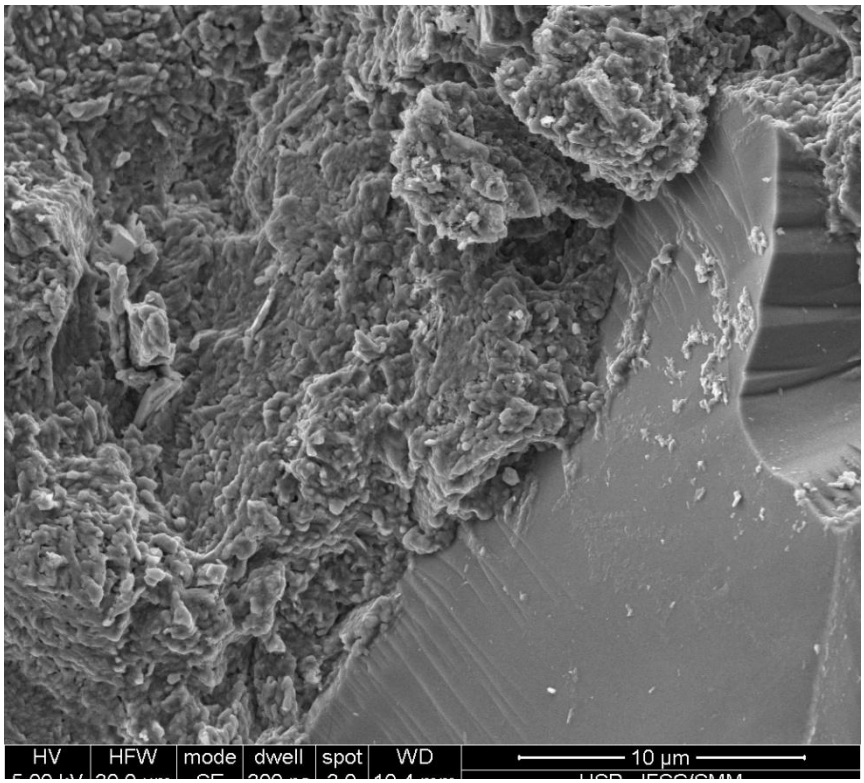
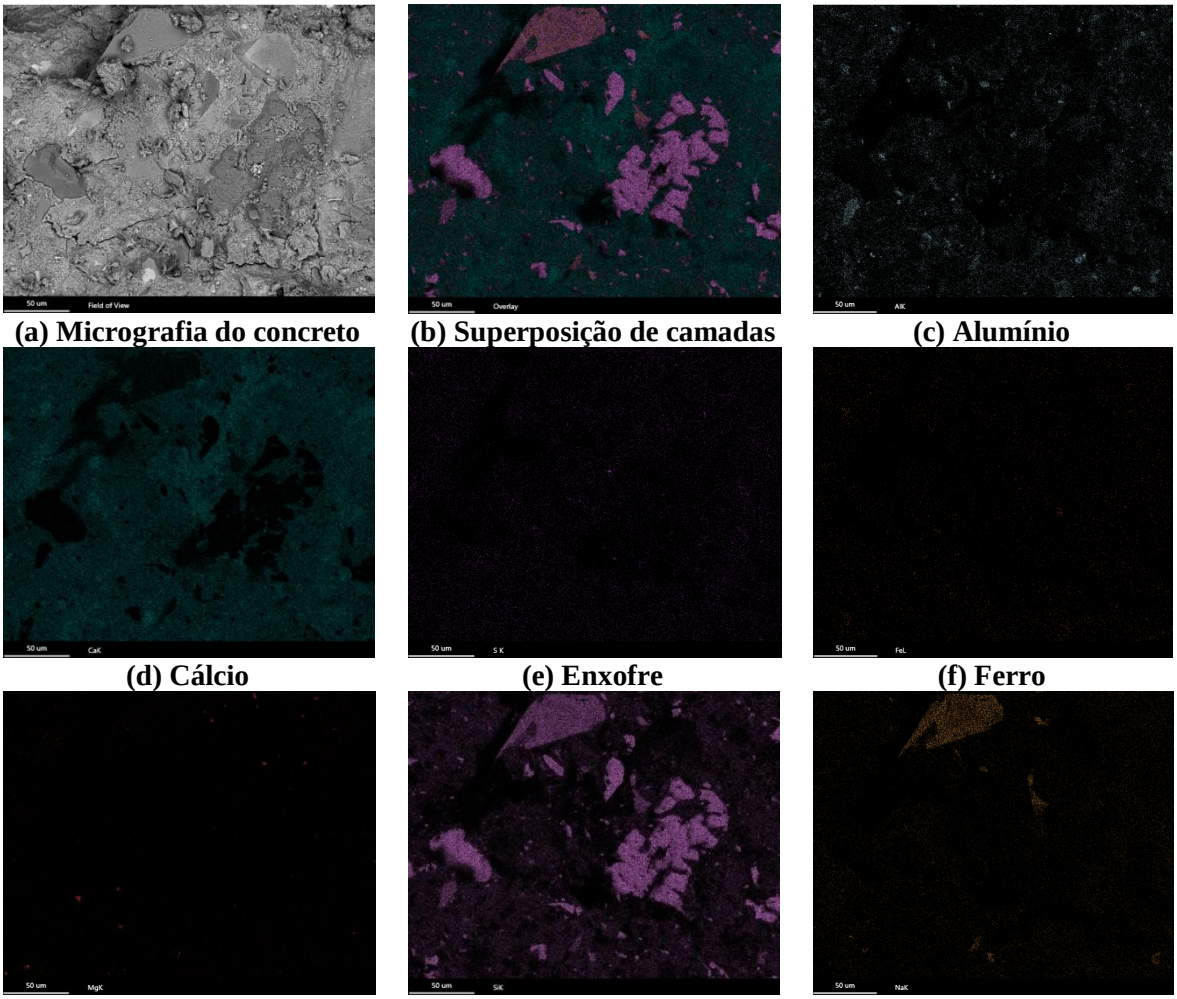


Figura 70 - Microestrutura de concreto convencional com 90 dias de cura

O mapeamento químico dos elementos distribuídos na superfície fraturada com 10% de vidro em substituição ao cimento, obtido via MEV-EDS, é mostrado na Figura 71. Vale destacar que essa é uma análise semiquantitativa e que pode haver imprecisão no método por analisar uma área restrita da amostra, havendo um erro de escala quando comparado à representatividade de um todo. Seria necessário fazer a análise de várias amostras, mas a análise química por fluorescência de raios-X já foi apresentada anteriormente, não sendo considerada aqui uma análise quantitativa precisa.

A Figura 73 apresenta o mapeamento químico de elementos individualizados na microestrutura fraturada do concreto com substituição de 10% vidro e 90 dias de cura, onde procurou-se separar o sódio dos outros elementos, e através da comparação entre a micrografia da imagem SE com a mesma imagem por elemento químico individual em que fosse possível localizar uma partícula de vidro, conforme mostrado em detalhe nas Figura 72 e Figura 73.



(a) Micrografia do concreto **(b) Superposição de camadas** **(c) Alumínio**

(d) Cálcio **(e) Enxofre** **(f) Ferro**

(g) Magnésio **(h) Sílica** **(i) Sódio**

Figura 71 - Mapeamento químico da superfície fraturada da mistura de concreto com 10% de substituição de pó de vidro. Onde: (a) apresenta a micrografia da superfície fraturada; (b) a sobreposição dos elementos químicos; e (c), (d), (e), (f), (g), (h) e (i) o mapeamento individual dos elementos alumínio, cálcio, enxofre, ferro, magnésio, sílica e sódio, respectivamente.

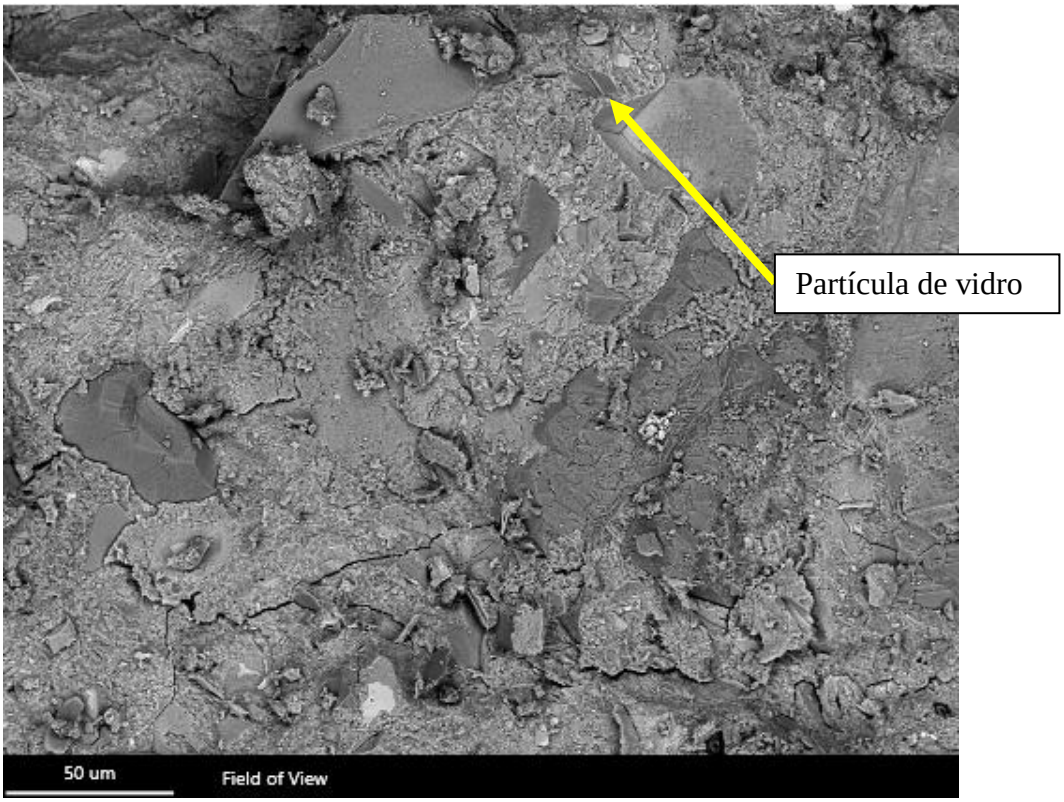


Figura 72 - Imagem da microestrutura de concreto com 10% de pó de vidro e 90 dias de cura.

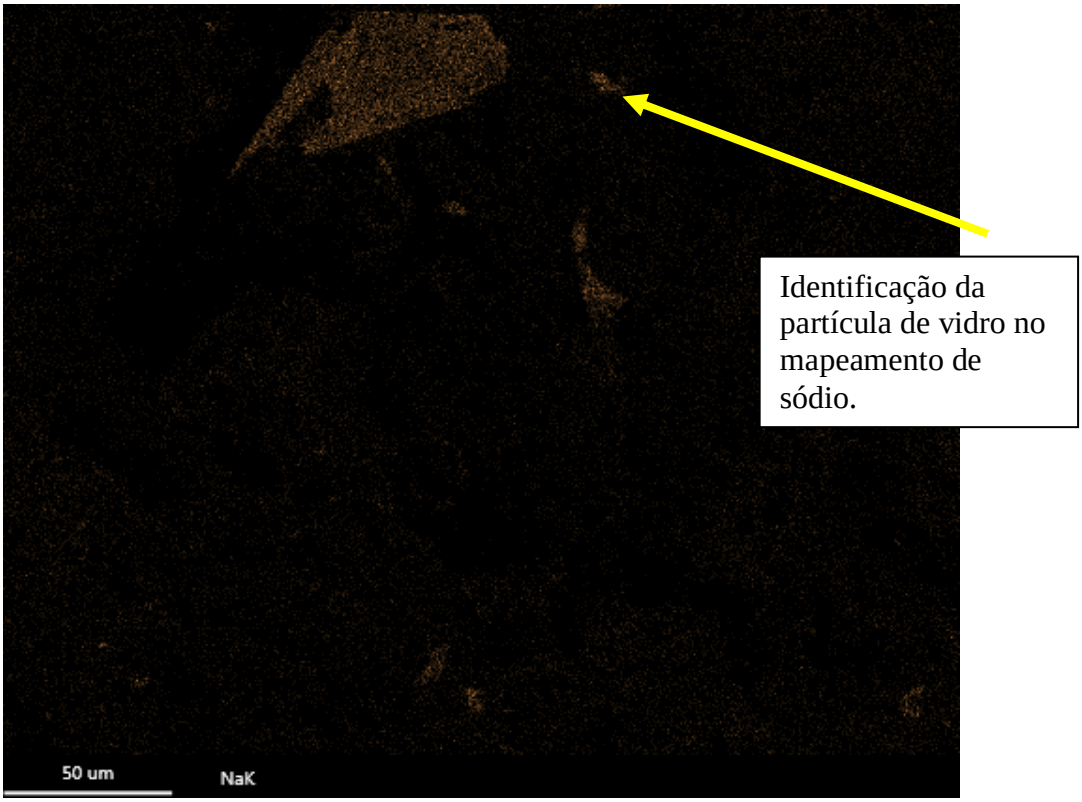


Figura 73 - Mapeamento químico para o elemento sódio.

A Figura 74 apresenta a imagem ampliada da partícula de vidro encontrada, enquanto a Figura 75 apresenta uma nova sobreposição dos elementos químicos e a composição química individual para o sódio, ficando ainda mais evidente a presença desse elemento. Pode-se observar uma distribuição bem acentuada, mas pouco homogênea de tal elemento por toda a superfície da amostra. Verifica-se que as microanálises realizadas na amostra foram úteis no sentido de se identificar a partícula de vidro na massa cimentícia.

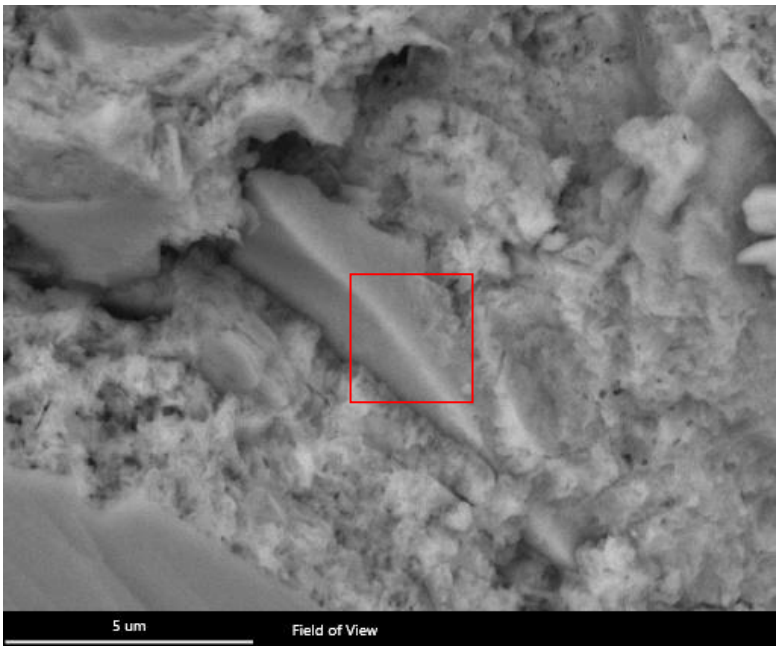
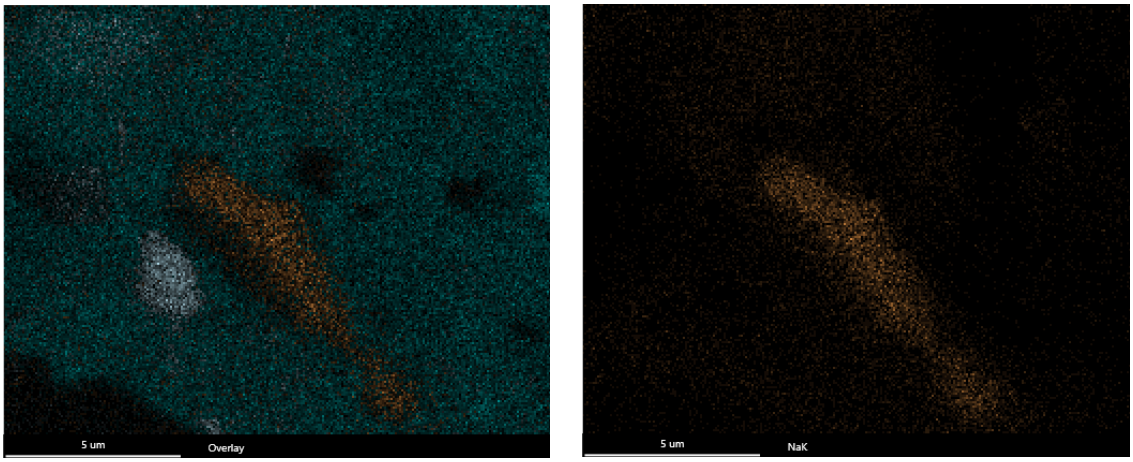


Figura 74 - Imagem da partícula de vidro



(a) Sobreposição de camadas **(b) Sódio**

Figura 75 - Mapeamento químico (a) sobreposição de elementos; (b)mapeamento químico individual.

A Figura 74 apresenta a partícula de vidro ainda não totalmente integrada à pasta cimentícia, apresentando poros na interface com a partícula de vidro. Vale destacar que a técnica de preparação da amostra facilita a sua desidratação por passar por dois processos de

secagem, sendo um por estufa e o outro por alto vácuo no equipamento de metalização, porém partículas menores, levemente distribuídas e mostradas na Figura 73 aos 90 dias de cura, devem estar totalmente integradas à pasta de cimento. A Figura 76 apresenta um melhor detalhe da partícula de vidro e a pasta hidratada de cimento, revelando pequenos pontos de integração.

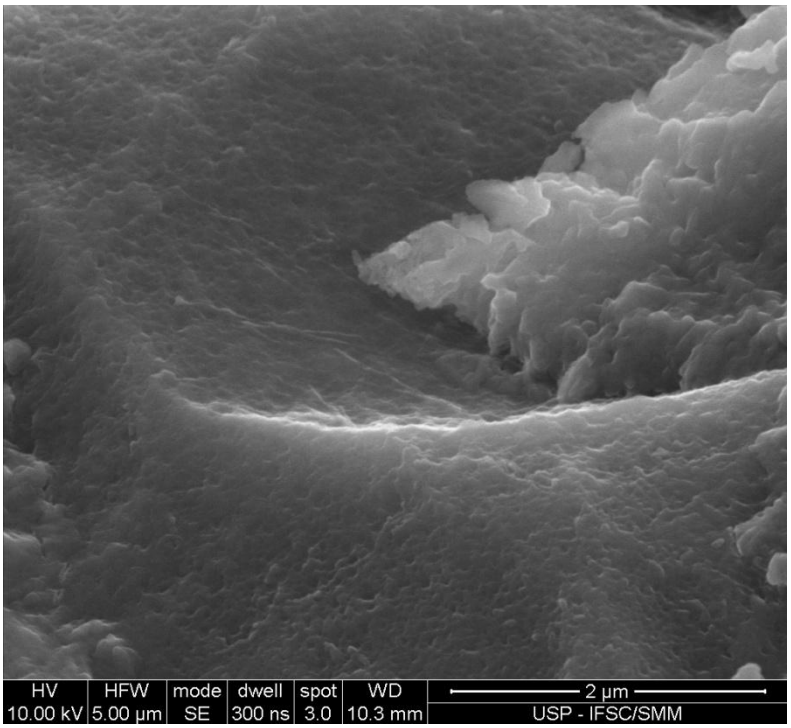


Figura 76 - Detalhe da reação da partícula de vidro e massa de hidratação do cimento.

Naturalmente o procedimento deve ser repetido várias vezes numa mesma amostra em regiões diferentes do corpo de prova, tanto nas idades iniciais como em idades mais avançadas, dentro de um único lote de amostras, para que sejam feitas comparações e análises mais conclusivas. Apesar das evidências iniciais, pode-se dizer que os resultados de microscopia eletrônica deram indicações para o aumento das resistências dos ensaios mecânicos de compressão axial e tração por compressão diametral para as misturas de concreto produzidas com pó de vidro em substituição ao cimento em idades mais avançadas.

5 Conclusões

Na presente pesquisa, a análise pela estatística de Weibull foi utilizada como objetivo de comparar o efeito de diferentes agregados graúdos na resistência mecânica de formulações de concretos para a região de Manaus. A brita granítica apresentou módulo de Weibull maior que do seixo de rio em misturas produzidas com a mesma resistência característica (20 e 25 MPa), ou seja, apresentou resultados mais confiáveis. O aumento das resistências de projeto de 20 MPa para 25 MPa também ocasionou um acréscimo no módulo de Weibull.

As resistências médias à compressão axial e à tração por compressão diametral de corpos de prova de concretos convencionais produzidos com seixos foram sistematicamente menores que as dos concretos produzidos com britas, mas não houve diferença significativa entre as mesmas.

O seixo como agregado produziu melhor trabalhabilidade em misturas de concreto convencionais, por exibirem granulometria descontínua e textura lisa, mas, por se ligarem de forma mais fraca com a pasta de cimento, apresentaram resistências ligeiramente menores em todas as idades nos ensaios mecânicos de compressão axial e tração por compressão diametral.

No caso de concretos de alta resistência, à medida que mais cimento Portland é substituído/adicionado por vidro e sílica, menor é o *slump* da mistura. Tal diminuição é justificada pela menor hidratação das misturas que contêm pó de vidro e pó de sílica, o que resulta em menor fluidez de tais misturas, tendo em vista que foram utilizadas as mesmas relações água e aglomerante para todas as misturas.

Misturas de concreto contendo 10% vidro, assim como 10% vidro e 10% sílica em substituição ou adição ao cimento Portland, apresentaram melhores resultados de resistência à compressão axial e tração por compressão diametral. As substituições/adições de vidro e sílica resultaram em resistências menores nas idades iniciais, mas melhora expressiva entre 28 e 90 dias na maioria dos casos. Tais resultados são essencialmente devidos à forma esférica e ao menor tamanho dos grãos de sílica, assim como à atividade pozolânica dos dois materiais, que causam aumento de resistência pelo maior empacotamento e aumento da densidade nos concretos.

Os ensaios de compressão e tração por compressão diametral indicaram que o ganho de resistência nos concretos contendo vidro em pó ocorre a uma taxa ligeiramente menor que em um concreto normal, mas concretos com pó de vidro têm potencial de alcançar resistências superiores às do concreto normal para tempos de cura mais longos. A taxa mais lenta de

aumento de resistência nos concretos contendo vidro reflete a taxa da reação pozolânica do vidro com o hidróxido de cálcio em hidratos de cimento. As vantagens em longo prazo do concreto contendo vidro podem ser atribuídas às melhores qualidades de ligação do silicato de cálcio hidratado que resulta da reação pozolânica do vidro com hidróxido de cálcio, e também pelo refinamento e o bloqueio parcial dos poros capilares.

Houve grande variação no erro dos resultados dos ensaios mecânicos dos concretos de alta resistência, resultado do pequeno número de corpos de prova ensaiados. Para cada idade foram rompidos sempre três corpos de prova, com grande variação de resultados. Mesmo tratando-se de uma mesma formulação, por se tratar de um compósito frágil em que a fratura depende de vários fatores, como homogeneidade da mistura, adensamento, porosidade, procedimento de produção e temperatura ambiente, tal variação é esperada.

Os ensaios de porosidade apresentaram resultados significativamente diferentes para todas as misturas analisadas nas idades iniciais, que podem ser justificados pelo menor grau de hidratação na primeira semana. Porém, a partir de 14 dias a porosidade manteve-se praticamente a mesma para todas as misturas. O aumento da resistência mecânica de concretos com adição de vidro e sílica pode então ser explicado pelo fato de que, apesar do pó de vidro ter granulometria mais grossa que a do cimento, podendo ter modificado a estrutura física das misturas nas primeiras idades, tal efeito é compensado pela reação pozolânica nas idades mais avançadas.

Não houve diferença sensível entre as microestruturas das superfícies fraturadas de concreto convencional e com 10% de vidro, analisadas por microscopia eletrônica. A porosidade e a aparência da zona de transição em ambas foram semelhantes.

Para utilização de resíduos de vidro comercial em formulações de concreto, o tamanho da partícula é de grande importância. Dados reproduzidos no presente trabalho mostraram que quando pó de sílica nanométrica e forma esférica é adicionado a misturas de concreto juntamente com vidro em pó, a resistência mecânica resultante é semelhante ou superior à do concreto convencional, sem vidro. Os resultados mostram que há grande potencial de utilização de resíduos de vidro em concretos e argamassas em substituição/adição ao cimento Portland.

6 Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Cimento Portland. **http://www.abcp.org.br**. ABCP, 28 agosto, 2013. Acesso em: 29 dez. 2015.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária**. NBR 7251, Rio de Janeiro, 1982. 3p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. A**rgamassa e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica.** NBR 9778. Rio de Janeiro, 29 09 2009. 4p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica**. NBR 6474, Rio de Janeiro, 1984. 4p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados - Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo**. NBR 9939, Rio de Janeiro, 1987. 2p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman**. NBR 9776, Rio de Janeiro, 1987. 3p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. NBR 7215, Rio de Janeiro, 1996. 8p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. NBR 7217, Rio de Janeiro, 1997. 3p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimentodo tronco de cone**. NBR NM 67, Rio de Janeiro, 1998. 8p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. NBR NM 248, Rio de Janeiro, 2003. 6p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. NBR 5738, Rio de Janeiro, 2015. 9p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. NBR NM 45, 2006. 8p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto - Ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. NBR 5739, Rio de Janeiro, 2007. 9p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. Agregado graúdo - **Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. NM 53:2009, Rio de Janeiro, 2009. 8p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Agregados para concreto**. NBR 7211, Rio de Janeiro, 2009. 9p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Aditivos para concreto de cimento Portland**. NBR EB - 11768, Rio de Janeiro, 2011. 19p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. NBR 7222, Rio de Janeiro, 2011. 5p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência**. NBR 8953, Rio de Janeiro, 2015. 3p.

American Concrete Institute. **State of the art report on higt strength concrete**. 363R-92 Formington Hills, Detroit, Michigan, 1992. 55p.

AGOSTINI, L. R. S. **Pilares de concreto de alta resistência.** Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1992.

AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. G. **Superplasticizers: How they work and wly they occasionally don't.** Concrete International, 1994. p. 45-52.

AÏTCIN, P. C.; NEVILLE, A. **High-performace concrete demystified**. New York: Concrete International, 1993.

AÏTCIN, P. C.; NEVILLE, A. **How the water-cement ratio affects concrete strength**. Concr. Int., ago. 2003. p 51-58.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São paulo: PINI, 2000.

AKERMAN, M. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro.** CETEV, novembro 2000. p. 1-37.

AL, Z. A. M. A. **Mechanical Properties and Behavior of Sustainable Concrete**. Journal of Engineering and Development, Baghdad, Iraq, 2013.

ALMEIDA, A. F. **Estudo da influência das adições de sílica ativa e copolímero estireno acrílico nas propriedades de argamassas para assentamento de pocelanato.** Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

ALVES, A. S. **Efeitos físicos e químicos de misturas pozolâmicas na carbonatação e penetrabilidade à água em concreto de alto desempenho.** Disertação de Mestrado. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2000.

ALVES, O. L.; GIMENEZ, I. D. F.; MAZALI, Í. O. **Vidros. Cardernos Temáticos - Química Nova na Escola**, Campinas, Fevereiro 2001. p. 9 - 20.

ARAÚJO, E. B. D. **Vidro: uma breve história. técnicas de caracterização e aplicações na tecnologia**. Revista Brasileira de Ensino de Física, São carlos, setembro 1997. p. 325 - 329.

ARMELIN, H.; ISAIA, G. C. **Influência dos aditivos na hidratação das pastas de cimento Portland.** In: Seminário apresentado ao curso de pós-graduação em engenharia da construção civil. São Paulo: [s.n.], 1991.

ASTM. C618-02. **Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete**, West Conshohocken, 2002. 3p.

American Society for Testing and Materials. **Standard Terminology Relating to Thermal Insulation.** ASTM C168-05, West Conshohocken, 2005.

American Society for Testing and Materials. **Standard Specification for Portland Cement**. C 150, West Conshohocken, 2015.

American Society for Testing and Materials. **Specification for Chemical Admixtures for Concrete.** C 494, West Conshohochen, PA, 2015. www.astm.org.

BAHORIA, B.V; PARBAT, D.K.; NAGANAIK, P.B.; WAGHE, U.P. **Comprehensive literature review on use of waste product in concrete**. International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, april 2013.

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: Livroes Técnicos e Científicos, v. I, 2005.

BAYATI, Z. A. M. A. A. **Mechanical Properties and Behavior of Sustainable Concrete**. Journal of Engineering and Development, 2013. 15p.

BEVERIDGE, P.; DOMENÉCH, I.; PASCUAL, E. **O vidro. Técnicas de trabalho de forno**. Tradução de Marisa Costa. Lisboa: Estampa, v. 1ª, 2004.

BHANDARI, P. S.; TAJNE, K. M. **Use of waste glass in cement mortar**. International Journal of Civil and Structural Engineering, 2013.

BURGOS-MONTES, O.; PALACIOS, M.; RIVILLA, P.; PUERTAS, F. O. **Compatibility between superplasticizer admixtures and cements with mineral additions**. Construction and Building Materials, 2012. p. 300 – 309.

BYARS, E. A.; MORALES-HERNANDEZ, B.; YING, Z. H. **Waste glass as concrete aggregate and pozzolan - laboratory and industrial projects**. Concrete, Jan. 2004. p. 41 – 44.

BYE, G. C. **Portland Cement Composition Production and Properties**. ISBN 0-08-039965-2. ed. New York: [s.n.], 1983. 149 p.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução Sergio Murilo Stamile Soares. [S.l.]: LTC, 2008.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Cerâmica, S. Carlos, 2009. p.18 - 32.

Civil Engineering Research Foundation - CERF/ASCE. **High-performance construction materials and systems: an essential program for America and its infrastructure**. Technical Report, Washington, 1993.

CHEESEMAN, C. **Production of sintered light weight aggregate using waste ash and other industrial residues**, Belgium, 2011.

CHEN, C.; HUANG, R; WU, JK; YANG, C. **Waste e-glass particles used in cementitious mixtures**. Cement & Concrete Composites, 2006. p. 449-456.

CHO, G. C.; DODDS, J.; SANTAMARINA, J. C. **Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness and Strength - Natural and Crushed Sands**. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, November 2007. p.591 – 602.

Confedração Nacional do Ramo Químico. **Panorama do setor de vidro**, 2015. 26p.

COLLEPARDI, M. **Superplasticizers and Air-Entraining Agents State of the Art and Future Needs, Concrete Technology: Past Present, and Future**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 1994. p. 399 - 416.

COLMAN, J. M.; TEODORO, P. E.; NEIVOCK, M. P.; RIVA, G. S.; Formagini, S. **Comparação entre distribuição normal e de Weibull para análise da resistência à compressão do concreto.** Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 18 maio 2014. p. 10 - 15.

CORDEIRO, G. C. **Utilização de cinzas ultrafinas do bagaço de cana-de-açucar e de casca de arroz como aditivos minerais em concreto**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006. p. 445.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBARN, E. M. R. **Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars**. Cement and Concret Composites, 31 maio 2008. p. 410 - 418.

CORDEIRO, G. C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L. M.; FAIRBARN, E. M. R. **Ultrafine Grinding of Sugar Cane Bagasse ash for Application as Pozzolanic Admixture in Concrete**. Cem Con Res, 2009. p. 110 – 115.

CORINALDESI, V.; GNAPPI, G.; MORICONI, G.; MONTENERO, A. Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars. **Waste Management**, jan. 2005. p. 197 – 201.

ELGUETA, M.; DÍAZ, G.; ZAMORANO, S.; KITTL, P. On the use of the Weibull and the normal cumulative probability models in structural design. **Materials & Design**, 2007. p. 2496 – 2499.

DOREMUS, R. H. **Glass Science**. New York: John Wiley & Sons, 1973.

FEDERICO, L. M.; CHIDIAC, S. E. **Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete - critical review of treatment methods**. Cement & Concrete Composites, 04 fev. 2009. p. 606 - 610.

FIRJAN. **Quanto custa o gás natural para a indústria no Brasil? Estudos para o desenvolvimento do Estado do Rio de Janeiro**. Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro, 2011. 33p.

FOSTER, W. S. **High-performance concrete-stretching the paradigm.** Concrete International. 10. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 16, 1994.

G.VIJAYAKUMAR; VISHALINY, H.; D., G. Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, February 2013.

GARTNER, E. **Industrially interesting approaches to "low-CO_2" cements**. Cement and Concrete Research, 2004. p. 1489 - 1498.

GOLDMAN, A. **The influence of microfillers on enhancement of concrete strength**. Cement and Concrete Research, 1993. p. 962 - 972.

GUNALAAN, V.; SERI GANIS KANAPATHY, P. Performance of Using Waste Glass Powder In Concrete As Replacement Of Cement. **American Journal of Engineering Research**, 2013.

HELENE, P. R. L. **Concreto de elevado desempenho**. São Paulo: ABCP, 1997.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle de Concreto**. Brasília DF: SENAI, 1992.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. **Use of Waste Glass as Powder and Aggregate in Cement-Based Materials**. SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environement Infrastructures in Developing Countries, ENSET Oran (Algeria), 2009.

IQBAL, M. M.; MUZAFAR, B.; SAJAD, A; TABISH, T.; UMAR, C. **Study of Concrete Involving Use of Waste Glass as Partial Replacement of Fine Aggregates**. Journal of Engineering, 7 july 2013.

ISAIA, G. C. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, v. I, 2005.

ISAIA, G. C. **Princípio de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, v. 1, 2007.

JITENDRA, B. J.; SAOJI, A. C. **Experimental investigation of waste glass powder as the partial replacement of cement in concrete production**. Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2014.

JOB, T. **Utilization of quarry powder as a substitute for the river sand in concrete.** Journal of Structural Engineering, january 2006. p. 401 - 407.

JOHNSTON, C. D. **Waste Glass as Coarse Aggregate for Concrete**. Journal of Testing and Evaluation, London, 1974. p. 344 - 350.

JOLICOEUR, C. *et al.* **Progress in Understanding the Functional Properties of Superplasticizer in Fresh Concrete**, 1994. p. 63 - 88.

MELO JUNIOR, A. S.. **Análise quantitativa do material particulado na região de Campinas através das técnicas de microfluorescência de raios X e reflexão total usando radiação síncroton.** Tese de Doutorado. Unicamp. Campinas. 2007.

KADRI, E.; AGGOUN, S.; SCHUTTER, G. **Interaction between C_3A, silica fume and naphthalene sulphonate superplasticiser in high performance concrete**. Constr. Build Mater, 2009. p. 3124 – 3128.

KHATIB, J. M.; NEGIM, E.M.; SOHL, H.S.; CHILESHE, N. **Glass Powder Utilisation in Concrete Production**. European Journal of Applied Sciences, 2012. p. 173 - 176.

L.M.FEDERIO; CHIDIAC, S. E. **Waste glass as a supplementary cementitious material in concrete - Critical review of treatment methods**. Cement and Concrtet Composites, 2001.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, R. **Mineral admixtures in mortars — effect of inert materials on short-term hydration**. Cement and Concrete Research, 2003. p. 1939 – 1947.

LEÁS. **Chemistry of cement and concrete**. 4ª. ed. New York: In: Hewkett Peter C, 1998.

LÓPEZ, D. A. R.; DE AZEVEDO, C. A. P.; BARBOSA NETO, E. **Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino**. Cerâmica 51, 2005. p. 318 - 324.

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

MAILVAGANAM, P. N. **Factors influencing slump loss in flowing concrete**. In: International symposium on superplasticizers in concrete. Detroit: American Concrete Institute, Ottawa, Canadá, 1979. p. 389 - 403.

MAILVAGANAM, P. N. **Factors influencing slump loss in flowing concrete**. In: International Symposium on Superplasticizers in Cncrete. Detroit: American Concrete Institute, Ottawa, Canadá, 1979. p. 389-403. (ACI Special Publication, 62).

MALHOTRA, V. M. "**Innovative Applications of Superplasticizers in Concrete - A Review," Advances in Concrete Science and Technology**, Rome, October 1997. p. 271 - 314.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MALIER, Y. **The french national project "new ways for concret" - objectives and methodology.** in: MALIER, Y. High performance concrete - from material to structure. London: [s.n.], 1992.

MANSO, E. A. **Analise granulométrica dos solos de Brasília pelo granulômetro a laser.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília 1999, p. 113.

MAZLOOM, M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; BROOKS, J. J. **Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete**. Cement & Concrete Composites, 2004. p. 347 – 357.

MEHTA, P. K. **Greening of the concrete industry for sustainable development**. Concrete International, 2002. p. 23 - 28.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutra, Propriedades e Materiais**. Tradução de Nicole Pagan Hasparyk; Paulo Helene e Vladimir Antonio Paulon. 3ª. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 674 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª Edição. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials. Advances in concrete tecnology program**. [S.l.]: CENMET, v. I, 1996.

MEYER, C. **The greening of the concrete industry**. Cement and Concrete Composites, New York, 04 january 2009. p. 601 - 605.

MOLIN, D. C. C. D. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica.** Tese de Doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1995.

MOLIN, D. C. C. D.; KULAKOWSKI, M. P.; VIEIRA, M. P. **Aprimoramento do emprego da sílica ativa SILMIX em cimento e concreto, e verificação de desempenho dos cimentos Eldorado**. Relatório técnico de pesquisa do Projeto de Convênio UFRGS/FLE e Camargo Corrêa Iindustrial, Porto Alegre, 1997.

MONTANO, P. F.; BASTOS, H. B. **A indústria de vidro plano: conjuntura atual e perspectivas**. Vidros Planos - BNDES, 2014. p. 265 - 290.

MORAN, M. R. **Concentração de poder em cadeias produtivas: um estudo de caso sobre a indústria do vidro float no Brasil**. São Paulo: OTB, 2008.

NAGATAKI, S. **Present State of Superplasticizers in Japan, Fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete**. American Concrete Institute, Farmington Hills. Mich, 1988.

NAIK, T. R. **Sustainability of cement and concrete industries**. Proceedings of the International Conference on Achieving Sustainability in Construction, 2005. p. 141 - 150.

NAIR, D.; FRAAIJ, A.; KLAASSEN, A. K.; KENTGENS, A. P. M. G. **A structural investigation relating to the pozzolanic activity of rice husk ashes**. Cement and Concrete Research., 38, 2008. p. 861 - 869.

NASSAR, R.-U.-D.; SOROUSHIAN, P. **Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement**. Construction and Building Materials, United States, 2012. p. 368 – 377.

NEVILE, A. M. **Propriedades do Concreto.** Tradução Salvador E. Giammusso. 2ª. ed. São Paulo: PINI, 1997.

NSGGROUP. **The flat glass industry**. NSG, Tóquio, 2011. 66p.

OGAWA, K.; UCHIKAWA, H.; TAKEMOTO, K.; YASUI, I. **The mechanism of the hydration in the system C_3S pozzolanas**. Cement and Concrete Research, 1980. p. 683 - 696.

OLIVEIRA, L. A. P.; GOMES, J. P. C.; SANTOS, P. M. S. **The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components**. Construction and Building Materials, 2012. p. 197 – 203.

OLIVEIRA, L. A. P. D.; GOMES, J. P.; SANTOS, P. **Mechanical and Durability Properties of concrete with Ground waste Glass Sand**. International conference on durability of Building Materials and components, Turkey, 2008.

PALMQUIST, S. **Compressive behavior of concrete with recycled aggregates**. Ph.D. Thesis, 2013.

PANDOLFELLI, V. C. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas**. São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

PARK, S. B.; LEE, B. C.; KIM, J. H. **Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate**. Cement and Concrete Research, 2004.

PASQUEL, C. E. **Tópicos del tecnologia del concreto**. 2ª. ed. Cochabamba: Serrano, 1996.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento portland**. 14ª. ed. São Paulo: Globo, 2005.

PMGIRS. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade de Manaus**, Manaus, 2015. 80p.

POWERS, M. C. **Comparison chart for visual estimation of roundness**. Jour. Sed. Pet., 1953. p. 117 - 119.

PRICE, B. **Advanced Concrete Technology**. Boston: Newman J and Choo B. S. Amsterdam, 2003.

ROJAS, M. I. S. D.; RIVERAS, J.; FRÍAS, M. **Influence of the microsilica state on pozzolanic reaction rate**. Cement and Concrete Research, 1999. p. 945 - 949.

ROSA, S. E. S.; COSENZA, J. P.; BARROSO, D. V. **Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil**. Biblioteca digital - BNDES, 2007. p. 102 - 137.

ROSKOVIC, R.; BJEGOVIC, D. **Role of mineral Additions in reducing CO_2 emission**. Cement and Concrete Research, 2005. p. 974 - 978.

SANCHES, E. **Aspectos gerais e reológicos do concreto de alta resistência.** in: Reunião do Instituto Brasileiro do Concreto. São paulo: IBRACON, 1997.

SATA, V.; JATURAPITAKKUL, C.; KIATTIKOMOL, K. **Influence of pozzolan from various by-product materials on mechanical properties of high-strength concrete.** Construction and Building Materials, 2007. p. 1589 – 1598.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. **Studies on concrete containing ground waste glass**. Cem. Conc. Res., 2000. p. 91 - 100.

SIAM, A. A. **Properties of Concrete Mixes with Waste Glass**. Degree of Master of Science in Civil Engineering, 2011.

SMITH, W.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência de materiais**. Tradução de Necesio Gomes Costa; Ricardo Dias Martins de Carvalho e Misian de Loudes Noronha Motta Melo. Porto Alegre: AMGH Ltda, v. 5ª, 2012.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2008. 42p.

SNIC. http://www.snic.org.br. **Sindicato Nacional da Indústria de Cimento**, 2013. Acesso em: 30 dez. 2015.

SNIC. Sindicato Nacional da Indústria do Cimento, 2013. 39p.

SOROUSHIAN, P. **Towards broad use of recycled glass concret on mnu campus**. Tese de doutorado, Michigan State University, 2012.

SOUNTHARARAJAN, V. M.; SIVAKUMAR, A. **Matrix Densification of Glass Powder Substituted Steel Fibre Reinforced Concrete.** World Applied Sciences Journal, Tamil Nadu, India, 26 jan. 2013. p.68 - 74.

SOUZA, P. S. L. **Verificação da influência do uso do metacaulin de alta reatividade nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência**. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

SUNNY, O. N.; POUTOS KONSTANTINOS, I. **The Influence of Waste Glass Powder Fineness on the Properties of Cement Mortars.** International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management, 2013.

TANAKA, Y.; MATSUO, S.; OHTA, A.; UEDA, M. O. **A New admixture for high-performance concrete**, 1996. p.291-300.

TOPCU, I. B.; CANBAZ, M. **Properties of concrete containing waste glass.** Cement and Concrete Research, Fev. 2004.

TOPÇU, I.; BOGA, A.; BILIR, T. **Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3**. Waste Management, 2007. p. 878 – 884.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. London: Academic Press, 1990.

TOUTANJI, H. A.; EL-KORCHI, T. **The influence of silica fume on the compressive strength of cement paste and mortar**. Cement and Concrete Research, 1995. p.1591 - 1601.

TUMIDAJSKI, P. J.; FIORE, L.; KHODABOCUS, T.; LACHEMI, M.; PARI, R. **Comparison of Weibull and normal distributions for concrete compressive strengths**. NRC Research PressWeb, Canadá, 19 December 2006.

TURGUT, P.; YAHLIZADE, E. S. **Research into Concrete Blocks with Waste Glass**. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering, 2009. 7p.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho**. In: ISAIA, G. C. Concreto: Ciência e Tecnologia. São Paulo: [s.n.], 2011. Cap. 36.

UCHIKAWA, H. **Hidration of cement and structure formation and properties of cement paste in the presence of organic adimixture, conference in tribute Michele Moranville Regourd**. Concrete Canada, Faculty of Applied Science, University of Sherbrooke, Québec, Canada, 1996. 55p.

VANDHIYAN, R.; RAMKUMAR, K.; RAMYA, R. **Experimental Study On Replacement Of Cement By Glass Powder**. International Journal of Engineering Research and Technology, 2013.

VIJAYAKUMAR, G.; VISHALIN, H.; GOVINDARAJULU, D. **Studies on Glass Powder as Partial Replacement of Cement in Concrete Production**. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, India, February 2013.

VLACK, S. R. F. **A classe dos tectossilicatos: guia geral da teoria e exercício.** Revista do Instituto de Geociências, Série Didática, n. v USP, São Paulo, 2002. p. 46.

XIXI, H.; ZHIHUI, X. **Experimental Study on Statistical Parameters of Concrete Strenght Based on Weibull Probability Distribuition**. Key Engineering Materials, Switzerland, 19 abr. 2011. p 224 - 232.

XU, A.; SHAYAM, A. **Value – added utilization of waste glass in concrete**. Cement and concrete research, 2004.

YONEZAWA, T. **The Contribution of Fluidity Improving TechTechnology to the Widespread Use of High-Strength Concrete, Concrete in the Service of Mankind -**

Radical Concrete Technology. editors: R. K. Dhir and P.C. Hewlett, E & FN Spon, 1996. p 525 - 542.

ZACHARIASEN, W. H. **The atomic arrangement in glass.** Journal Chemical Society, New York, 1932. p. 3841 - 3855.

ZARZYCKI, J. **Glasses and vitreous state**. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.

7 Apêndices

CARGA DE RUPTURA DO SEIXO (KN)					
AMOSTRAS	**IDADES DE ENSAIO**				
	3 DIAS	**7 DIAS**	**14 DIAS**	**21 DIAS**	**28 DIAS**
AM01-20	86,30	88,50	87,30	88,40	89,10
AM02-20	92,10	63,30	85,40	80,20	103,09
AM03-20	81,40	77,00	98,60	95,30	104,50
AM04-20	58,60	90,60	97,70	88,10	104,50
AM05-20	60,20	77,20	105,40	104,20	111,20
AM06-20	70,40	73,50	93,90	98,80	114,50
AM07-20	95,90	109,70	117,60	120,30	103,20
AM08-20	90,50	110,30	129,00	108,00	114,20
AM09-20	72,20	79,90	110,40	110,60	110,50
AM10-20	79,20	98,30	89,20	116,40	987,0
AM11-20	70,20	88,70	105,40	123,70	118,50
AM12-20	65,20	107,40	108,70	129,70	124,30
AM13-20	69,20	95,40	97,40	95,50	115,30
AM14-20	80,60	84,50	95,40	89,30	121,80
AM15-20	78,10	81,00	89,30	104,50	115,40

CARGA DE RUPTURA DO SEIXO (KN)					
AMOSTRAS	**IDADES DE ENSAIO**				
	3 DIAS	**7 DIAS**	**14 DIAS**	**21 DIAS**	**28 DIAS**
AM01-25	93,00	100,10	107,10	120,70	118,90
AM02-25	97,00	104,40	104,70	119,90	123,40
AM03-25	91,90	105,90	74,60	134,50	111,00
AM04-25	95,10	55,70	103,20	91,40	126,40
AM05-25	84,10	100,90	106,90	119,80	114,20
AM06-25	89,20	87,00	96,10	113,50	111,30
AM07-25	62,40	80,90	108,50	135,20	112,90
AM08-25	104,50	110,60	106,40	117,30	106,60
AM09-25	98,60	93,50	99,80	103,50	101,50
AM10-25	81,40	82,90	100,40	104,60	112,30
AM11-25	91,50	94,90	107,90	123,50	118,30
AM12-25	82,10	81,10	86,80	128,60	129,70
AM13-25	93,40	109,80	104,90	116,20	122,10
AM14-25	104,40	112,50	109,30	119,50	119,70
AM15-25	75,40	89,20	116,30	102,30	114,10

CARGA DE RUPTURA DA BRITA (KN)					
AMOSTRAS	**IDADES DE ENSAIO**				
	3 DIAS	**7 DIAS**	**14 DIAS**	**21 DIAS**	**28 DIAS**
AM01-20	72,00	90,50	75,20	87,10	103,10
AM02-20	78,70	94,00	91,50	95,60	103,10
AM03-20	82,90	99,30	79,30	82,10	104,50
AM04-20	61,90	116,80	116,00	111,80	118,30
AM05-20	65,90	104,40	107,60	118,60	119,20
AM06-20	72,40	89,90	104,90	126,60	125,40
AM07-20	79,80	106,60	99,90	118,80	117,40
AM08-20	56,60	94,10	100,50	106,50	108,90
AM09-20	82,30	102,90	109,20	101,30	113,10
AM10-20	85,30	101,80	11330	114,90	108,40
AM11-20	76,20	86,40	109,10	105,40	119,50
AM12-20	63,20	91,10	97,10	116,40	117,20
AM13-20	60,20	81,10	87,70	79,80	103,60
AM14-20	59,70	79,80	82,70	83,10	100,70
AM15-20	55,60	84,20	85,90	85,50	109,40

CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	**IDADES DE ENSAIO**				
	3 DIAS	**7 DIAS**	**14 DIAS**	**21 DIAS**	**28 DIAS**
AM01-25	105,90	102,30	102,90	136,20	128,90
AM02-25	98,90	98,40	117,10	124,50	126,90
AM03-25	86,00	61,50	113,30	115,80	118,30
AM04-25	79,00	115,10	103,50	109,40	113,40
AM05-25	89,20	68,10	107,50	106,70	118,70
AM06-25	90,20	108,90	95,70	117,60	119,10
AM07-25	103,30	95,90	114,60	132,70	119,80
AM08-25	105,40	115,80	119,30	124,80	123,40
AM09-25	85,00	106,30	107,40	122,30	128,40
AM10-25	88,70	101,20	119,30	135,80	128,80
AM11-25	104,80	104,70	113,70	125,70	126,20
AM12-25	109,60	110,10	100,10	116,70	123,80
AM13-25	95,30	101,40	118,50	117,50	116,20
AM14-25	86,90	109,20	104,10	106,30	129,80
AM15-25	103,40	103,90	101,90	107,10	115,20

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO CONVENCIONAL					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	429,50	445,40	503,50	528,70	548,50
AM02	413,70	431,20	488,50	538,40	552,40
AM03	408,20	428,50	518,90	517,20	534,20

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO 10% DE PÓ DE VIDRO					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	404,40	428,50	481,00	508,50	545,00
AM02	387,80	409,80	468,40	497,70	567,20
AM03	389,60	412,80	454,30	523,70	558,30

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO 10% DE PÓ DE VIDRO E 10% DE SÍLICA					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	404,50	441,90	524,80	549,60	566,60
AM02	410,70	352,50	536,10	538,40	578,80
AM03	342,80	454,00	534,80	545,70	551,70

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO 15% DE PÓ DE VIDRO					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	371,20	388,80	437,50	507,50	528,10
AM02	395,40	373,60	443,20	483,20	548,20
AM03	376,40	433,40	466,30	482,30	540,70

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO 20 % DE PÓ DE VIDRO					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	304,60	349,30	427,10	324,50	532,10
AM02	325,20	323,30	361,50	422,60	474,30
AM03	316,10	209,40	289,80	461,00	492,10

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM ADIÇÃO 10% DE PÓ DE VIDRO					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	419,60	441,50	523,40	532,40	564,30
AM02	413,30	469,10	519,10	544,60	555,70
AM03	448,70	392,10	534,60	554,50	551,20

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM ADIÇÃO 10% DE PÓ DE VIDRO E 10% DE SÍLICA					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	426,70	429,40	514,80	563,20	568,40
AM02	410,20	436,40	568,00	542,90	549,80
AM03	399,10	463,20	531,20	584,10	605,30

COMPRESSÃO DIAMETRAL - CONCRETO CONVENCIONAL					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	161,10	158,40	179,50	169,40	194,40
AM02	175,60	168,20	173,60	176,40	185,90
AM03	146,60	165,40	162,20	158,40	188,50

COMPRESSÃO DIAMETRAL - CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO 10% DE PÓ DE VIDRO					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	161,20	126,70	149,60	150,30	205,20
AM02	154,50	151,30	153,30	179,90	187,50
AM03	122,20	159,60	165,50	174,40	182,70

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO 10% DE PÓ DE VIDRO E 10% DE SÍLICA					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	IDADES DE ENSAIO				
	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS	90 DIAS
AM01	152,90	161,20	184,50	189,50	199,30
AM02	146,20	168,50	173,50	172,20	196,40
AM03	163,40	155,10	169,80	174,20	189,40

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO 15% DE PÓ DE VIDRO					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	**IDADES DE ENSAIO**				
	7 DIAS	**14 DIAS**	**21 DIAS**	**28 DIAS**	**90 DIAS**
AM01	144,80	156,80	152,50	159,20	165,60
AM02	136,90	138,50	158,80	157,70	179,50
AM03	140,80	146,00	161,50	168,70	162,50

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM SUBSTITUIÇÃO 20 % DE PÓ DE VIDRO					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	**IDADES DE ENSAIO**				
	7 DIAS	**14 DIAS**	**21 DIAS**	**28 DIAS**	**90 DIAS**
AM01	129,10	138,50	148,20	159,20	167,30
AM02	137,00	140,80	139,20	153,70	151,20
AM03	125,60	139,20	149,40	150,50	156,90

COMPRESSÃO DIAMETRAL - CONCRETO COM ADIÇÃO 10% DE PÓ DE VIDRO					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	**IDADES DE ENSAIO**				
	7 DIAS	**14 DIAS**	**21 DIAS**	**28 DIAS**	**90 DIAS**
AM01	164,20	178,40	187,10	202,30	195,80
AM02	179,10	164,20	169,80	188,40	217,00
AM03	171,50	165,30	202,30	226,70	153,20

COMPRESSÃO AXIAL - CONCRETO COM ADIÇÃO 10% DE PÓ DE VIDRO E 10% DE SÍLICA					
CARGA DE RUPTURA DO BRITA (KN)					
AMOSTRAS	**IDADES DE ENSAIO**				
	7 DIAS	**14 DIAS**	**21 DIAS**	**28 DIAS**	**90 DIAS**
AM01	205,40	181,20	203,80	172,10	218,70
AM02	169,70	198,40	221,60	194,70	229,40
AM03	175,10	200,90	208,80	224,10	225,40

POROSIDADE - 7 D I A S			
DOSAGEM	**MASSA ÚMIDA (g)**	**MASSA SECA (g)**	**MASSA IMERSA (g)**
CONVENCIONAL (M1)	3772,10	3723,80	2900,00
	3743,00	3690,90	2880,00
	3781,10	3737,50	2940,00
	3767,50	3718,70	2930,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO (M2)	3706,30	3644,70	2860,00
	3757,30	3702,20	2860,00
	3705,90	3651,30	2950,00
	3719,90	3662,60	2830,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO E 10% DE SÍLICA (M3)	3721,70	3674,10	2710,00
	3715,80	3672,80	2760,00
	3680,20	3632,20	2730,00
	3706,90	3659,30	2750,00
SUBSTITUIÇÃO - 15% DE VIDRO (M4)	3717,30	3668,20	2700,00
	3761,50	3708,50	2610,00
	3761,40	3710,00	2820,00
	3719,60	3667,50	2860,00
SUBSTITUIÇÃO - 20% DE VIDRO (M5)	3688,70	3574,30	2160,00
	3675,20	3535,70	2370,00
	3703,10	3557,90	2180,00
	3704,30	3567,30	2350,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO (M6)	3731,00	3647,50	2290,00
	3744,40	3656,50	2280,00
	3717,50	3637,60	2250,00
	3717,60	3631,60	2260,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO 10% DE SÍLICA (M7)	3747,70	3701,90	2810,00
	3719,90	3678,20	2840,00
	3727,40	3689,20	2880,00
	3742,30	3702,50	2840,00

POROSIDADE - 14 D I A S			
DOSAGEM	**MASSA ÚMIDA (g)**	**MASSA SECA (g)**	**MASSA IMERSA (g)**
CONVENCIONAL (M1)	3775,30	3729,80	2250,00
	3747,80	3700,30	2250,00
	3786,70	3743,30	2280,00
	3774,20	3726,00	2260,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO (M2)	3708,80	3663,50	2200,00
	3760,80	3718,00	2210,00
	3709,00	3664,20	2190,00
	3723,70	3675,20	2200,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO E 10 DE SÍLICA (M3)	3723,60	3687,10	2200,00
	3716,10	3682,10	2180,00
	3681,60	3646,90	2180,00
	3708,50	3669,80	2190,00
SUBSTITUIÇÃO - 15% DE VIDRO (M4)	3721,00	3677,90	2200,00
	3765,40	3722,40	2220,00
	3766,00	3720,00	2220,00
	3723,90	3677,00	2210,00
SUBSTITUIÇÃO - 20% DE VIDRO (M5)	3688,50	3612,90	2160,00
	3725,40	3627,30	2150,00
	3703,40	3623,90	2180,00
	3692,30	3605,80	2170,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO (M6)	3734,90	3676,40	2220,00
	3749,30	3686,60	2230,00
	3723,60	3664,80	2200,00
	3724,80	3662,00	2220,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO 10% DE SÍLICA (M7)	3748,60	3713,30	2230,00
	3721,30	3688,90	2200,00
	3729,80	3696,70	2210,00
	3744,30	3709,20	2220,00

POROSIDADE - 21 D I A S			
DOSAGEM	**MASSA ÚMIDA (g)**	**MASSA SECA (g)**	**MASSA IMERSA (g)**
CONVENCIONAL (M1)	3776,20	3734,00	2200,00
	3749,60	3702,40	2180,00
	3787,80	3748,80	2120,00
	3775,00	3732,50	2200,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO (M2)	3710,90	3661,90	2130,00
	3762,80	3721,00	2160,00
	3713,90	3668,60	2120,00
	3725,00	3681,10	2120,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO E 10 DE SÍLICA (M3)	3726,00	3688,20	2130,00
	3718,30	3684,90	2120,00
	3689,80	3651,70	2110,00
	3712,10	3676,00	2120,00
SUBSTITUIÇÃO - 15% DE VIDRO (M4)	3724,00	3675,50	2130,00
	3768,10	3721,40	2160,00
	3767,80	3720,70	2160,00
	3725,80	3680,30	2140,00
SUBSTITUIÇÃO - 20% DE VIDRO (M5)	3696,50	3617,40	2100,00
	3712,40	3625,70	2110,00
	3710,90	3628,20	2130,00
	3695,40	3615,30	2090,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO (M6)	3740,70	3677,70	2150,00
	3759,50	3693,00	2170,00
	3732,90	3667,50	2150,00
	3734,70	3663,20	2150,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO 10% DE SÍLICA (M7)	3751,10	3713,10	2160,00
	3723,90	3689,10	2140,00
	3732,10	3697,50	2150,00
	3746,30	3711,60	2150,00

POROSIDADE - 28 D I A S			
DOSAGEM	**MASSA ÚMIDA (g)**	**MASSA SECA (g)**	**MASSA IMERSA (g)**
CONVENCIONAL (M1)	3779,1	3732,8	2210,00
	3751,6	3703,2	2220,00
	3789,9	3745,3	2230,00
	3777,2	3725,5	2210,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO (M2)	3714,8	3664,4	2170,00
	3766,7	3721	2170,00
	3713,2	3666,1	2140,00
	3728,8	3674,9	2160,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO E 10 DE SÍLICA (M3)	3728,3	3691,7	2160,00
	3721,7	3687,8	2150,00
	3687,5	3652,9	2140,00
	3714,5	3675,2	2140,00
SUBSTITUIÇÃO - 15% DE VIDRO (M4)	3724,2	3678,1	2160,00
	3768,7	3722,5	2190,00
	3768,5	3720,6	2180,00
	3714,5	3677,3	2170,00
SUBSTITUIÇÃO - 20% DE VIDRO (M5)	3735,50	3625,00	2170,00
	3715,10	3635,30	2150,00
	3709,30	3621,80	2180,00
	3755,40	3625,90	2190,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO (M6)	3737,90	3683,00	2270,00
	3755,50	3700,20	2300,00
	3730,20	3675,30	2310,00
	3730,60	3672,60	2290,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO 10% DE SÍLICA (M7)	3752,4	3715,1	2180,00
	3724,6	3690,7	2170,00
	3732,5	3698,1	2170,00
	3747,2	3711,6	2180,00

POROSIDADE - 35 D I A S			
DOSAGEM	**MASSA ÚMIDA (g)**	**MASSA SECA (g)**	**MASSA IMERSA (g)**
CONVENCIONAL (M1)	3782,50	3734,10	2200,00
	3754,50	3707,00	2180,00
	3790,60	3747,10	2220,00
	3778,80	3727,90	2200,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO (M2)	3720,00	3667,60	2140,00
	3770,20	3725,40	2170,00
	3717,60	3669,90	2140,00
	3733,20	3677,70	2150,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO E 10 DE SÍLICA (M3)	3734,90	3696,00	2130,00
	3727,80	3692,80	2150,00
	3692,90	3656,10	2120,00
	3721,90	3679,50	2130,00
SUBSTITUIÇÃO - 15% DE VIDRO (M4)	3729,00	3680,30	2160,00
	3773,60	3724,60	2170,00
	3772,00	3722,00	2170,00
	3731,60	3680,30	2150,00
SUBSTITUIÇÃO - 20% DE VIDRO (M5)	3711,70	3623,70	2140,00
	3725,90	3645,12	2160,00
	3725,50	3640,00	2150,00
	3715,40	3615,20	2130,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO (M6)	3748,00	3681,40	2170,00
	3763,00	3696,10	2180,00
	3737,60	3672,60	2170,00
	3735,70	3669,50	2170,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO 10% DE SÍLICA (M7)	3756,10	3718,00	2180,00
	3728,80	3692,80	2150,00
	3736,00	3700,30	2160,00
	3751,00	3713,60	2160,00

POROSIDADE - 42 D I A S			
DOSAGEM	**MASSA ÚMIDA (g)**	**MASSA SECA (g)**	**MASSA IMERSA (g)**
CONVENCIONAL (M1)	3783,50	3736,40	2200,00
	3755,70	3708,20	2200,00
	3791,60	3747,70	2240,00
	3780,00	3728,90	2200,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO (M2)	3719,40	3669,10	2160,00
	3771,30	3726,40	2210,00
	3717,50	3671,00	2140,00
	3732,80	3679,80	2160,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO E 10 DE SÍLICA (M3)	3735,20	3698,10	2180,00
	3728,80	3694,90	2160,00
	3720,10	3676,30	2160,00
	3742,70	3684,60	2170,00
SUBSTITUIÇÃO - 15% DE VIDRO (M4)	3728,30	3681,80	2200,00
	3772,20	3725,70	2200,00
	3731,60	3698,10	2160,00
	3771,50	3711,30	2190,00
SUBSTITUIÇÃO - 20% DE VIDRO (M5)	3727,00	3640,20	2140,00
	3746,30	3685,10	2160,00
	3741,80	3651,00	2180,00
	3725,60	3642,30	2170,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO (M6)	3755,40	3694,80	2160,00
	3754,70	3703,80	2170,00
	3744,50	3683,10	2170,00
	3749,20	3682,50	2170,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO 10% DE SÍLICA (M7)	3755,20	3717,60	2200,00
	3728,20	3694,10	2210,00
	3735,60	3701,20	2210,00
	3749,90	3714,30	2200,00

POROSIDADE - 49 D I A S			
DOSAGEM	**MASSA ÚMIDA (g)**	**MASSA SECA (g)**	**MASSA IMERSA (g)**
CONVENCIONAL (M1)	3786,60	3738,50	2190,00
	3757,90	3711,50	2190,00
	3792,20	3752,80	2220,00
	3782,20	3737,30	2200,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO (M2)	3724,60	3673,50	2200,00
	3772,40	3731,20	2240,00
	3720,40	3678,60	2200,00
	3736,10	3689,70	2190,00
SUBSTITUIÇÃO - 10% DE VIDRO E 10 DE SÍLICA (M3)	3735,30	3701,20	2210,00
	3728,30	3698,40	2200,00
	3721,00	3662,40	2160,00
	3722,50	3687,10	2180,00
SUBSTITUIÇÃO - 15% DE VIDRO (M4)	3730,20	3685,20	2160,00
	3773,10	3729,80	2200,00
	3772,60	3729,10	2190,00
	3732,40	3689,20	2190,00
SUBSTITUIÇÃO - 20% DE VIDRO (M5)	3723,80	3648,20	2140,00
	3742,70	3665,30	2160,00
	3737,60	3659,50	2170,00
	3719,40	3641,40	2150,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO (M6)	3760,90	3699,10	2180,00
	3776,60	3711,60	2190,00
	3751,50	3689,00	2180,00
	3749,00	3687,00	2170,00
ADIÇÃO - 10% DE VIDRO 10% DE SÍLICA (M7)	3754,90	3719,90	2190,00
	3728,50	3697,80	2160,00
	3735,40	3705,10	2190,00
	3749,90	3717,70	2180,00