

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

IGOR RAFAEL BUTTIGNOL DE OLIVEIRA

**MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO COM ADIÇÕES DE VIDRO
COMINUÍDO COMO AGREGADO FINO PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO
CIVIL**

**Poços de Caldas/MG
2022**

IGOR RAFAEL BUTTIGNOL DE OLIVEIRA

MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO COM ADIÇÕES DE VIDRO
COMINUÍDO COMO AGREGADO FINO PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO
CIVIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

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

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Fabia Castro Cassanjes

Poços de Caldas/MG
2022

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Buttignol, Igor Rafael de Oliveira.

Materiais compósitos à base de cimento com adições de vidro cominuído como agregado fino para aplicação na construção civil / Igor Rafael de Oliveira Buttignol. - Poços de Caldas, MG, 2022.

107 f. : il. -

Orientador(a): Fabia Castro Cassanjes.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2022.

Bibliografia.

1. Concreto de Pós Reativos. 2. Engenharia Civil. 3. Resistência Mecânica. 4. Vidros. 5. Garrafas Long Neck. I. Cassanjes, Fabia Castro, orient. II. Título.

MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO COM ADIÇÕES DE VIDRO COMINÚIDO COMO AGREGADO FINO PARA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A Banca examinadora abaixo-assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ciência e Engenharia de Materiais.

Aprovada em: 08 de fevereiro de 2022

Profa. Dra. Fabia Castro Cassanjes
Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. José Gabriel Maluf Soler
Instituição: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli
Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Sylma Carvalho Maestrelli, Professor do Magistério Superior**, em 08/02/2022, às 17:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSÉ GABRIEL MALUF SOLER, Usuário Externo**, em 08/02/2022, às 17:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fábia Castro Cassanjes, Professor do Magistério Superior**, em 08/02/2022, às 17:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0674451** e o código CRC **9075B53B**.

Agradecimentos

Agradeço a minha família por todo incentivo dado, especialmente à minha mãe Catarina Buttignol, que em diversos momentos foi minha base, meu sustento para continuar, minha conselheira, orientadora e amiga insubstituível.

Agradeço aos meus colegas de mestrado pela ajuda em todas as etapas, teóricas e experimentais, por terem sido compreensivos e sempre dispostos a ajudar. Em destaque os meus colegas Rodrigo Cassani e Cristiano Cunha.

À Prof.^a Dr.^a Sylma Carvalho Maestrelli, que nos anos de convivência e paciência, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento científico e intelectual.

À Prof.^a Dr.^a Fabia Castro Cassanjes, pela atenção e apoio durante o período de definição e orientação.

Ao Professor Luiz Antônio dos Reis pela colaboração e pelo incentivo ao trabalho.

À Universidade Federal de Alfenas, pela oportunidade de realização do curso.

À Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, pelo apoio à realização desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

O setor da construção civil, quando comparado aos demais, é o que mais consome areia, matéria prima natural, na formulação das diversas composições cerâmicas. Devido ao aumento constante na demanda por esse material, esse recurso natural tem se tornado cada vez mais escasso; ainda, a extração de areia natural é responsável por consideráveis prejuízos ao meio ambiente. Sabe-se que a quantidade de resíduos sólidos gerados no mundo representa um grande problema no que tange o aspecto ambiental devido principalmente ao seu descarte, muitas vezes feito de maneira incorreta, como é o caso dos resíduos de vidro, despejados em lixões a céu aberto. Este trabalho teve como objetivo estudar a influência da substituição da areia natural por pó de vidro proveniente de resíduo de garrafas tipo *long neck* em formulações de concretos de pós reativos, comparando os resultados obtidos com uma formulação de referência. Para isso, foi realizada inicialmente a preparação e caracterização das matérias primas a serem utilizadas nas formulações do concreto (cimento, microssilica, pó de quartzo, areia e vidro moído), fixando-se como diâmetro máximo do agregado a ser utilizado na formulação o valor de 0,6mm e o diâmetro mínimo de 0,075mm. A técnica de fluorescência de raios X (FRX) comprovou que as garrafas do tipo *long neck* são compostas por vidros sodocálcicos convencionais; a morfologia dos agregados foi analisada por meio da Microscopia Óptica, indicando que as partículas de vidro são angulosas e lamelares, com baixo grau de esfericidade, enquanto as partículas da areia natural são subarredondadas com alto grau de esfericidade, o que influencia diretamente no empacotamento das partículas e nas propriedades mecânicas finais. Para a formulação referência (sem substituição da areia) e demais formulações contendo substituições do agregado natural (areia) por pó de vidro provenientes de resíduos de garrafas do tipo *long neck* nas frações de 12,5; 25; 50; 75 e 100%, foi fixada a relação água/cimento (a/c) em 0,3% em massa, sendo moldados e curados corpos de prova em formato cilíndrico com dimensões de 100mm de altura e 50mm de diâmetro. Ensaio físicos e mecânicos foram realizados. A formulação referência apresentou desempenho superior às demais formulações estudadas, referente a resistência à compressão, a formulação de 100% de substituição da areia por vidro foi a formulação que apresentou os melhores valores de resistência à compressão em relação as demais substituições. A resistência mecânica aos 28 dias diminuiu à medida em que a substituição de areia por vidro foi menor, as formulações com 12,5% e 25% de substituição apresentaram os menores valores de resistência mecânica. Os ensaios físicos (absorção de água e índice de vazios) mostraram que, em relação à absorção de água, o concreto com substituição de 100% obteve o melhor resultado, seguida das formulações referência e 75% de substituição e a formulação de 12,5% apresentou o menor desempenho. Em relação ao índice de vazios, os melhores resultados encontrados foram na formulação referência e nas substituições de 100% e 75% e o menor desempenho a formulação de 12,5%.

Palavras-chave: Concreto de Pós Reativos; Vidro; Engenharia Civil; Resistência Mecânica; Avaliação Microestrutural; Garrafas *Long Neck*.

ABSTRACT

The civil construction sector, when compared to the others, is the one that most consumes sand, a natural raw material, in the formulation of the various ceramic compositions. Due to the constant increase in demand for this material, this natural resource has become increasingly scarce; Furthermore, the extraction of natural sand is responsible for considerable damage to the environment. It is known that the amount of solid waste generated in the world represents a major problem regarding the environmental aspect, mainly due to its disposal, often done incorrectly, as is the case of glass waste, dumped in open dumps. This work aimed to study the influence of replacing natural sand with glass powder from waste from long neck bottles in reactive powder concrete formulations, comparing the results obtained with a reference formulation. For this, the preparation and characterization of the raw materials to be used in the concrete formulations (cement, microsilica, quartz powder, sand and ground glass) was initially carried out, setting as the maximum diameter of the aggregate to be used in the formulation the value of 0.6mm and the minimum diameter of 0.075mm. The X-ray fluorescence technique (FRX) proved that long neck bottles are composed of conventional soda-lime glasses; the morphology of the aggregates was analyzed using Optical Microscopy, indicating that the glass particles are angular and lamellar, with a low degree of sphericity, while the particles of natural sand are sub-rounded with a high degree of sphericity, which directly influences the packing of the aggregates. Particles and the final mechanical properties. For the reference formulation (without replacing the sand) and other formulations containing replacement of the natural aggregate (sand) with glass powder from waste from long neck bottles in the fractions of 12.5; 25; 50; 75 and 100%, the water/cement ratio (w/c) was set at 0.3% by mass, and specimens in a cylindrical shape with dimensions of 100mm in height and 50mm in diameter were molded and cured. Physical and mechanical tests were performed. The reference formulation presented superior performance to the other formulations studied, referring to compressive strength, the formulation of 100% replacement of sand by glass was the formulation that presented the best values of compressive strength in relation to the other substitutions. The mechanical strength at 28 days decreased as the replacement of sand by glass was lower, the formulations with 12.5% and 25% replacement showed the lowest values of mechanical strength. The physical tests (water absorption and void index) showed that, in relation to water absorption, the concrete with 100% replacement obtained the best result, followed by the reference formulations and 75% replacement and the formulation of 12.5 % showed the lowest performance. Regarding the void index, the best results were found in the reference formulation and in the 100% and 75% substitutions, and the lowest performance was in the 12.5% formulation.

Keywords: Reactive Powder Concrete; Glass; Civil Engineering; Mechanical Strength; Microstructural Evaluation; Long Neck Bottles.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama da relação entre os estados vítreo, líquido e sólido cristalino.....	20
Figura 2 - Representação bidimensional para um vidro e uma rede cristalina de sílica.....	21
Figura 3 - Ciclo de reciclagem do vidro.....	22
Figura 4 - Índice de reciclagem do vidro no país.....	24
Figura 5 - Microscopias eletrônicas de varredura das partículas de cimento e vidro.....	26
Figura 6 – Reação álcali-agregado.....	27
Figura 7 - Seção polida de um corpo-de-prova de concreto.....	30
Figura 8 - Evolução no tempo do concreto.....	32
Figura 9 - Petronas Towers Malsia e Centro Empresarial Nações Unidas.....	34
Figura 10 - Seção dos dois tipos de concreto (CAD e CPR).....	36
Figura 11 - Desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento durante a hidratação.....	40
Figura 12 - Microscopia Eletrônica de Varredura em amostra de concreto.....	41
Figura 13 - Zona de transição.....	42
Figura 14 - Partículas aglomeradas e dispersas.....	48
Figura 15 - Reação do ligante acentua as forças atrativas.....	49
Figura 16 – Dispersão de partículas.....	49
Figura 17 - Suspensão de grãos.....	50
Figura 18 - Otimização de uma mistura por meio do empacotamento de partículas.....	52
Figura 19 – Comparação entre concreto convencional e alto desempenho.....	53
Figura 20: Distribuição Granulométrica a areia utilizada retidas nas peneiras.....	56
Figura 21 - Fragmentos de vidros de garrafas long neck após trituração manual.....	61
Figura 22 - Jarro de aço inoxidável e esferas de aço forjado.....	62
Figura 23 - Moinho de Bolas utilizado.....	62
Figura 24 - Amostra de areia para o ensaio de granulometria.....	63
Figura 25 - Agitador mecânico Solotest.....	64
Figura 26 - Relação água/cimento testadas, sendo: A: a/c 0,2 e B: a/c 0,3.....	67
Figura 27 - Preparação da mistura referência do concreto de pós reativos.....	69
Figura 28 - Corpos de prova moldados em PVC.....	70
Figura 29 - Corpos de prova das amostras de concreto de pós reativos em imersão.....	71
Figura 30 - Análise visual da trabalhabilidade do concreto com relação a/c de 0,3.....	72
Figura 31 - Atuador pneumático Bel Air.....	73
Figura 32 - Corpo de prova antes (esquerda) e depois da retífica (direita).....	73
Figura 33 - Prensa hidráulica A.M.C modelo 10014.....	75
Figura 34 - Corpos de prova pós secagem em estufa.....	76
Figura 35 - Imagens (luz refletida) das amostras.....	81

Figura 36 - Padrões gráficos dos graus de esfericidade e arredondamento.....	82
Figura 37 - Imagem (luz refletida) amostra de microssílica Tecnosil.....	82
Figura 38 - Fratura nos corpos de prova aos 28 dias.....	90

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos concretos quanto à resistência mecânica	31
Tabela 2 - Compostos individuais dos óxidos do clínquer e abreviações	38
Tabela 3 - Composição do Cimento CP-V – ARI, Cauê.....	57
Tabela 4 - Propriedades Cimento CP-V – ARI, Cauê.....	57
Tabela 5 - Composição da Microssílica Tecnosil	58
Tabela 6 - Propriedades da Microssílica Tecnosil.....	58
Tabela 7 - Composição do Pó de Quartzo da Brasilminas	59
Tabela 8 - Propriedades do Superplastificante Glenium 51	60
Tabela 9 - Formulação Referência Professor Luiz dos Reis	66
Tabela 10 - Comparação da formulação referência, Professor Luiz dos Reis, com a literatura.....	67
Tabela 11 - Médias dos ensaios granulométricos do pó de vidro garrafas long neck.	77
Tabela 12 - Média dos ensaios granulométricos da areia natural.....	78
Tabela 13 - FRX das amostras de vidro tipo long neck e Litrão.....	83
Tabela 14 - Valores referência na literatura	84
Tabela 15 - Ensaio de Resistência a Compressão em Idade de 7 Dias.....	86
Tabela 16 - Ensaio de Resistência a Compressão em Idade de 14 Dias.....	86
Tabela 17 - Ensaio de Resistência a Compressão em Idade de 28 Dias.....	87
Tabela 18 - Ensaios de Absorção e Índice de vazios referente a todas as formulações	92

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

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
a/c	Relação gua/cimento
a/ag	Relação gua/aglomerante
CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
CPR	Concreto de ps reativos
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C ₂ S	Silicato dicálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₄ AF	Ferro-aluminato tetracálcico
DRX	Difratometria de raios X
F _{ck}	Resistência característica do concreto  compressão
RAA	Reação lcali-Agregado
EDS	Espectrometria por dispersão de energia
FRX	Fluorescência de raios X
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Mega Pascal
T _f	Temperatura de fusão
T _g	Temperatura de transição vítrea

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS.....	16
3	JUSTIFICATIVA	17
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1	VIDRO	18
4.2	TRANSIÇÃO VÍTREA.....	19
4.3	RESÍDUOS SÓLIDOS E RECICLAGEM DOS VIDROS	22
4.4	REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO	26
4.5	GARRAFAS DE CERVEJA <i>LONG NECK</i>	28
4.6	MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO	29
4.7	CONCRETO DE ALTA RESISTÊNCIA	32
4.8	CONCRETOS DE ALTÍSSIMO DESEMPENHO (CPR).....	34
4.9	MATERIAIS COMPONENTES	36
4.9.1	Aglomerantes	37
4.9.2	Cimento	37
4.9.3	Composição química	38
4.9.4	Relação água / cimento (a/c)	38
4.9.5	Pasta de cimento	39
4.10	HIDRATAÇÃO E MICROESTRUTURA.....	39
4.11	ZONA DE TRANSIÇÃO PASTA	41
4.12	CURA	42
4.13	DURABILIDADE	43
4.13.1	Os vazios e permeabilidade	43
4.14	AGREGADOS	44
4.14.1	Granulometria	44
4.14.2	Classificação dos Agregados	44
4.14.3	Agregado Miúdo	45
4.15	MICROSSÍLICA	45
4.16	PÓ DE QUARTZO.....	46
4.17	SUPERPLASTIFICANTE	46
4.18	PÓ DE VIDRO	47
4.19	DISPERSÃO DE PARTÍCULAS	47
4.20	TRABALHABILIDADE E CONSISTÊNCIA	50
4.21	SEPARAÇÃO DE FASES	51

4.22	EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS	51
4.22.1	Morfologia	53
4.22.2	Efeito parede e efeito de afastamento	54
5	MATERIAIS E METODOLOGIA	55
5.1	MATERIAIS	55
5.1.1	Areia	55
5.1.2	Vidro	56
5.1.3	Cimento	56
5.1.4	Microsílica	58
5.1.5	Pó de quartzo	59
5.1.6	Aditivo Superplastificante	60
5.1.7	Água de amassamento	60
5.2	OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	61
5.2.1	Processamento dos vidros de garrafas <i>long neck</i>	61
5.2.2	Granulometria	62
5.2.3	Microscopia Óptica	64
5.2.4	Fluorescência de Raios X (FRX)	64
5.2.5	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	65
5.3	PROCEDIMENTO PARA O PREPARO DAS MISTURAS	65
5.3.1	Formulação	65
5.3.2	Preparação da mistura	68
5.3.3	Corpos de Prova	69
5.3.4	Cura	71
5.4	ESTADO FRESCO	71
5.4.1	Trabalhabilidade	71
5.5	ENSAIOS MECÂNICOS ESTADO ENDURECIDO	72
5.5.1	Retificação	72
5.5.2	Ensaio de compressão	73
5.6	ENSAIOS FÍSICOS ESTADO ENDURECIDO.....	75
5.6.1	Absorção e índice de vazios	75
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
6.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	77
6.1.1	Granulometria	77
6.1.2	Microscopia Óptica	80
6.1.3	Fluorescência de Raios X (FRX)	83

6.1.4	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	84
6.2	ENSAIOS MECÂNICOS ESTADO ENDURECIDO	86
6.2.1	Ensaio Mecânica: Compressão	86
6.3	ENSAIOS FÍSICOS ESTADO ENDURECIDO	92
6.3.1	Absorção de Água e Índice de Vazios	92
7	CONCLUSÕES	95
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

O concreto vem sendo utilizado desde o Império Romano, todavia, apenas em 1756 foi alvo de estudos pelo engenheiro inglês John Smeaton o qual utilizou o concreto para ligação das pedras no farol Eddystone (DALZELL, 1977). Em 1796 foi fabricado o cimento artificial chamado "Cimento Romano" por James Parker e, em 1824, o "Cimento Portland" por Joseph Aspin. E, apenas no final do século passado, com o uso do concreto armado, é feita a incorporação deste material como importante componente das construções.

Segundo Mehta e Monteiro (2008) o cimento é um aglomerante hidráulico que, em contato com a água, produz reação exotérmica de cristalização de produtos hidratados, ganhando assim resistência mecânica e é usado como aglomerante.

Callister Jr e Rethwisch (2012), concreto é um material compósito, composto por matriz - meio aglomerante, comumente formado por cimento hidráulico e água - e elemento de reforço (agregados como brita e areia), podendo conter ainda aditivos, fibras, pigmentos e adições em benefício de propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade.

A necessidade por parte do mercado de novos produtos que apresentem propriedades cada vez melhores, tem estimulado a investigação focada na aplicação de novos materiais e a busca constante por soluções inovadoras envolvendo materiais de construção é estimulada pelo mercado visando melhorias relacionadas a desempenho, custos e prazos de execução. Nesse ínterim, inserem-se os concretos de pós reativos.

Segundo Isaia, Helene e Tutikian (2011), o concreto de pós reativos é derivado de pesquisas realizadas na França por Pierre Richards, ex-diretor científico da empresa francesa Bouygues, considerado o inventor desse tipo de concreto, em 1990, a partir do estudo de concreto de alto desempenho, desde 1982. Além disso, também houve contribuições na França, Canadá e Dinamarca por pesquisadores que estudaram e divulgaram os princípios para a produção do concreto de pós reativos (ALLENA; NEWTON, 2010)

De acordo com Bleeck (2011), a composição básica deste tipo de concreto, consiste na mistura de Cimento Portland, sílica ativa, pó-de-quartzo, agregado miúdo, água, aditivo superplastificante e eventualmente fibras metálicas. Utilizando-se de materiais finos, e da ausência de agregado graúdo conforme Copolla, Troli e Cerulli (1996), este tipo de concreto é nomeado de pós reativo, sendo a palavra pós o plural de pó, pois é a combinação de vários materiais finos e ultrafinos na sua composição.

Para obtenção desse concreto é importante garantir a homogeneidade pela eliminação dos agregados graúdos, aumentando a densidade pela otimização da distribuição

granulométrica dos grãos, assim a distribuição granulométrica dos grãos que compõem o concreto de pós reativos é estudada de modo a obter um produto com alta densidade, no qual os espaços entre as partículas maiores são preenchidos pela classe de partículas imediatamente menor e, assim sucessivamente, formando o chamado empacotamento das partículas. (VANDERLEI, 2004).

No que se refere a utilização de resíduos vidro moído proveniente de reciclagem em concretos, temos que, o Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, usando cerca de 45% de matéria-prima reciclada na forma de cacos. Parte deles foi gerado como refugo nas fábricas e parte retornou por meio da coleta seletiva. Como mostra a Abravidro — Associação Brasileira de Distribuidores e Produtores de Vidro Plano em seu site - é possível fazer o descarte do material pensando, dentre outros, em sua reciclagem. Sem a reciclagem do vidro, o material não é devolvido à cadeia produtiva (ABIVIDRO, 2014). O que implica na necessidade de extração de mais areia e demais matérias-primas. E ainda que a areia tenha custo relativamente baixo, sua retirada é prejudicial ao meio ambiente. Uma alternativa sustentável para reduzir este volume de vidros depositados em lixões seria utilizá-los na construção civil incorporados em misturas à base de cimento, tais como na produção de concretos com sucata de vidro moído em substituição à areia.

A Austrália é o país que mais utiliza vidro moído proveniente de reciclagem como agregado para produzir concreto. O material chega a ser usado em taxas de 10% a 20%, como substituto da areia, para a construção de vigas, pilares e lajes, além de elementos não-estruturantes – neste caso, em taxas que podem substituir a areia em até 50%.

A areia natural, por ser um material de grande utilização em obras de engenharia e, que segundo Silva e Miranda (2008), possuem elevada importância para fabricar um concreto de boa resistência e qualidade, contudo Almeida (2005) afirma que 90% da areia produzida no Brasil se origina da extração do leito de rios e com o passar do tempo, extrair areia natural do leito de rios se torna uma tarefa cada vez mais complexa, uma vez que as jazidas já se apresentarem escassas. Barbosa (2001), complementa que ainda se referindo ao problema da extração de areia natural retirada de leitos de rios, que a mesma é responsável pela supressão vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por consideráveis prejuízos ao meio ambiente.

Deste modo, a presente pesquisa visou minimizar os impactos ambientais oriundos do processo de extração de areia por meio da substituição desta matéria prima por vidro (de garrafas tipo *long neck*, não recicláveis) em composições a base de cimento utilizados na construção civil.

2 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito nas propriedades do concreto de pós reativos de ultra alta resistência a partir da substituição de areia natural por vidro (oriundo de garrafas tipo *long neck*), visando diminuir o impacto ambiental provocado pela extração da areia natural por meio de um estudo experimental na formulação desse material.

Para que o objetivo geral fosse alcançado, foi necessário:

- a) Dosar experimentalmente o concreto por meio do método baseado no empacotamento de partículas;
- b) Determinar o teor ideal de pó de vidro obtido a partir de vidros reciclados, finamente moídos.
- c) Definir a relação água-cimento;
- d) Determinar as características dos materiais constituintes do concreto de pós reativos;
- e) Avaliar a influência da otimização desse concreto por meio da determinação de suas propriedades no estado endurecido;
- f) Apresentar o potencial, a viabilidade técnica e econômica do material na construção civil.

3 JUSTIFICATIVA

O Concreto de Pós Reativos (CPR) é um material pouco utilizado no Brasil, sendo que se coloca como alternativa de projeto para obras da construção civil, como por exemplo: obras hidráulicas e de saneamento (VANDERLEI, 2004). Para isso, faz-se necessário o domínio da técnica de produção e aplicação, para que o mesmo apresente características mecânicas e de durabilidade compatíveis aos concretos produzidos com os materiais tradicionais (BIZ, 2001). Ainda não há um consenso em como deve ser um estudo de dosagem desse concreto, assim como os procedimentos e parâmetros de formulação.

É por esses e outros motivos que a produção do concreto vem passando por uma revolução, com novas metodologias de dosagem, adições de materiais ultrafinos, visando alavancar a construção civil, no que diz respeito a tecnologia e durabilidade.

Em um futuro muito breve projetar estruturas com concreto de resistência característica à compressão inferiores ao grupo I pela NBR 8953 (ABNT, 2015), ou seja, até 50 MPa será antieconômico, principalmente em se tratando de edifícios, pontes e viadutos de grandes vãos.

Assim, pode-se citar como principais vantagens da utilização do CPR na construção civil: redução significativa nas dimensões de pilares e vigas de edifícios altos, aumentando a área útil, principalmente, nos andares mais sobrecarregados; redução do peso próprio da estrutura e da carga nas fundações; possível redução nas taxas de armadura dos pilares e vigas; menor volume de madeiramento para fôrmas; maior rapidez na desforma, aumentando a velocidade de execução da obra; menor segregação; aumento da durabilidade das estruturas; possível redução de custos devido, principalmente, à diminuição das dimensões dos elementos estruturais; estruturas mais altas, esbeltas, de maiores vãos.

O setor da construção civil é o principal responsável pelo consumo global de recursos naturais, possuindo uma parcela significativa nos problemas relacionados ao meio ambiente. Nesse contexto, a tecnologia do concreto, pressionada pela crescente exigência do mercado, vem se aperfeiçoando nas últimas décadas. Uma das vertentes desse avanço consiste na tentativa de reduzir o teor areia natural nas misturas de concretos.

Neste trabalho, investigou-se a adição de partículas de vidro moídas, como substituição parcial e total da areia, na produção de concretos. Os ensaios executados foram realizados para avaliar a atividade do vidro moído, bem como monitorar o desempenho da resistência à compressão do concreto. Para isso, a granulometria do vidro moído foi adequada para estar na faixa da granulometria da areia, de modo a superar os limites de resistência de um concreto tradicional.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 VIDRO

Não se sabe ao certo como ocorreu a descoberta do vidro, mas há evidências de sua existência desde 4000 a.C. Citado por Pinheiro (2007), o historiador romano Plínio concedeu este achado aos antigos fenícios, tendo acontecido de forma acidental ao improvisarem fogões usando blocos de salitre e soda, para aquecer suas refeições, sendo que após algum tempo notaram que do fogo escorria uma substância brilhante que se solidificava imediatamente: o vidro.

De forma geral, acredita-se que a moldagem do vidro e sua utilização como recipientes abertos – tais como jarros e tigelas – tenha surgido no Egito em 1500 a.C., a partir de quando povos da Mesopotâmia, Síria e Grécia, entre outros, passaram também a utilizá-lo na fabricação desses objetos. A composição do material nessa época era muito parecida com a atual (a sílica, o cálcio, a cal, a barrilha e o potássio), porém de aparência opaca e arenosa, devido à falta de tecnologia para se obter um alto ponto de fusão. (PINHEIRO, 2007)

Segundo o site Jornal do Vidro (2015), a história do vidro no Brasil iniciou-se em 1637, com as invasões holandesas na então Capitania de Pernambuco. Foi neste local que foi montada por artesões uma oficina de vidro que fabricava janelas, copos e frascos. O método utilizado era o de sopro ou por prensagem. Contudo, a fábrica fechou com a saída dos holandeses do país. O vidro voltou a ser fabricado aqui somente em 1812, na Bahia, mas por problemas financeiros, burocráticos e trabalhistas essa fábrica pioneira fechou em 1825. Finalmente, em 1895, foi instalada a Vidraria Santa Marina na cidade de São Paulo, considerada a mais antiga do país e sendo até hoje uma das grandes empresas brasileiras. (PINHEIRO, 2007)

Os vidros pertencem ao grupo dos materiais cerâmicos amorfos e podem ser divididos em vários tipos. As duas principais características desses materiais são a sua transparência ótica e a relativa facilidade com a qual podem ser fabricados (CALLISTER, 2012).

Quanto à sua definição ao longo dos anos vários autores expõem de forma diferente, podendo citar as principais definições:

Do ponto de vista tecnológico a definição de vidro seria “vidro é um sólido, não cristalino, que apresenta o fenômeno de transição vítrea” (PAUL, 1995).

De acordo com Elliot (1989) “Vidros são materiais amorfos que não possuem ordem translacional a longo alcance (periodicidade), característica de um cristal. Os termos amorfos e sólidos não-cristalino são sinônimos nesta definição. Um vidro é um sólido que exibe uma

transição vítrea”. Zarzycki (1991) “Um vidro é um sólido não cristalino exibindo o fenômeno de transição vítrea”.

Para Varshneya (1994) “vidro é um sólido que tem a estrutura do tipo de um líquido, um sólido —não cristalino ou simplesmente um sólido amorfo, considerando a característica de amorfo como uma descrição da desordem atômica, evidenciada pela técnica de difração de difração raio-X”. Outra definição é dada por Shelby (1997) “Vidro é um sólido amorfo com ausência completa de ordem a longo alcance e periodicidade, exibindo uma região de transição vítrea”.

Atualmente a definição mais aceita é: “O vidro é um estado de não equilíbrio, não cristalino da matéria condensada, que exhibe uma transição vítrea. As estruturas dos vidros são semelhantes às dos seus líquidos super-resfriados (LSR) e relaxam espontaneamente em direção ao estado de LSR. Seu destino final, para tempos imensamente longos, é cristalizar” (ZANOTTO; MAURO, 2017).

Devido a diversificada faixa de composição química dos vidros estes apresentam uma ampla variação de propriedades mecânicas, óticas, térmicas, etc. As propriedades dos vidros, assim como de todos os outros materiais, dependem de suas características estruturais, do tipo de ligações inter atômicas, da microestrutura e dos defeitos existentes no material. A estrutura por sua vez, está condicionada a sua composição química, e também ao processo térmico de fabricação (CALLISTER, 2012).

A variação da composição resulta em diversos tipos de vidro, famílias ou grupos, e uma variedade de propriedades correspondentes. As propriedades do vidro dependem sempre da sua composição, permitindo assim um conjunto de propriedades para atender a uma aplicação específica (SANTOS, 2016).

4.2 TRANSIÇÃO VÍTREA

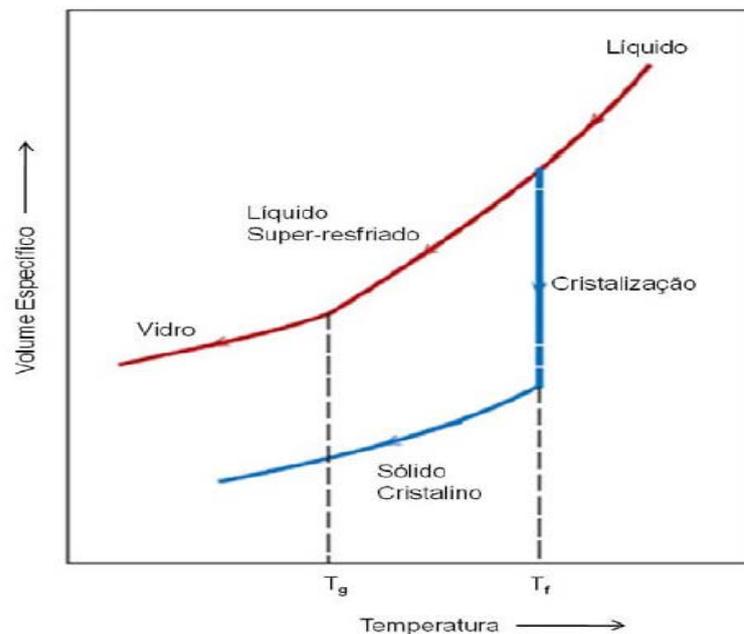
Os materiais vítreos ou não-cristalinos apresentam algumas propriedades que dependem de alterações na temperatura. Essa temperatura é conhecida por temperatura de transição vítrea (T_g), onde abaixo dessa temperatura encontramos o vidro, e acima dessa temperatura, o material é um líquido super-resfriado, e finalmente um líquido (CALLISTER, 2012).

De acordo com Alves, Gimenez e Mazali (2001), a temperatura de transição vítrea, T_g , é uma temperatura característica para os vidros, definindo a passagem do estado vítreo para o estado viscoelástico, através da chamada relaxação estrutural. Os conceitos de

estado vítreo e viscoelástico são emprestados da Reologia (estudo das propriedades associadas à fluidez).

Segundo Callister (2012), a diferença entre um sólido cristalino e não-cristalino está na dependência do volume específico em função da temperatura. A Figura 1 ilustra o contraste do volume específico versus temperatura sobre o comportamento de materiais cristalinos e não-cristalinos, onde os materiais cristalinos se solidificam na temperatura de fusão (T_f) e a temperatura de transição vítrea (T_g) é característica dos materiais não-cristalinos. Se a taxa de resfriamento é lenta, a cristalização será favorecida no ponto T_f , temperatura única de fusão que é característica dos materiais cristalinos. Portanto se a taxa de resfriamento é alta, o volume do líquido super-resfriado que se forma decresce, causando um aumento contínuo da viscosidade até a temperatura T_g , onde o líquido super-resfriado passa ao estado vítreo.

Figura 1 - Diagrama da relação entre os estados vítreo, líquido e sólido cristalino

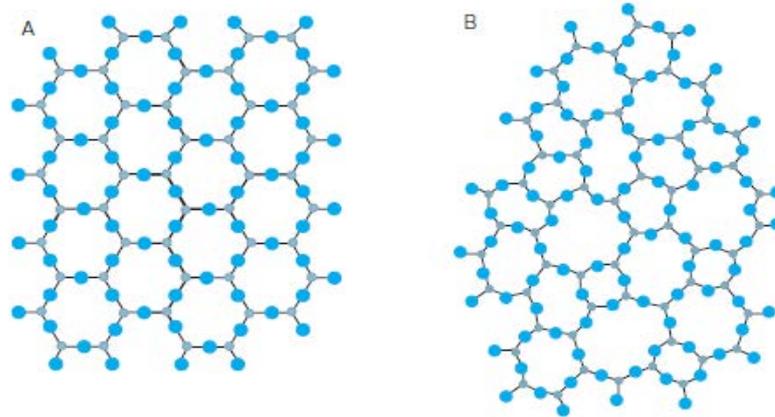


Fonte: (CALLISTER, 2012, p. 507).

De acordo com as definições anteriores o vidro formado deve apresentar caráter amorfo, ou seja, o tempo de resfriamento não pode ser suficiente para que o material cristalize, dando origem ao processo de transição vítrea. No caso de uma taxa de resfriamento suficientemente baixa, os átomos do material terão tempo suficiente para se rearranjarem em uma estrutura com ordem a longo alcance e periodicidade, reduzindo drasticamente o seu volume na temperatura de fusão, resultando em uma estrutura cristalina (BATISTA, 2018). A figura 2^a corresponde à estrutura organizada de um sólido cristalino, um arranjo ordenado tanto ao curto como a longo

alcance, e já imagem 2B, é a representação do mesmo composto, com ordem de curto alcance, mas com ausência de periodicidade, representando uma rede amorfa, tradicional de estruturas vítreas.

Figura 2 - Representação bidimensional para um vidro e uma rede cristalina de sílica



Fonte: (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001, p 16.)

Legenda: a) Arranjo cristalino.

b) Rede vítrea.

Nesse contexto, a formação de um vidro depende de diferentes fatores, conforme Zachariasen (1932) existem três classes de compostos chaves na formação vítrea, cada um com uma função específica, a primeira classe se refere aos vitrificantes, são considerados formadores vítreos, substâncias como a sílica e o dióxido de germânio por essa facilidade em formar vidro, ou seja, formadores vítreos são substâncias que participam da rede vítrea dando continuidade à rede (BATISTA, 2018). A segunda classe corresponde aos modificadores têm como objetivo quebrar a conectividade da rede, e assim, alterar as propriedades originais do vidro, a adição de modificadores reduz a temperatura fusão de um vidro, mas também aumentam sua reatividade química. Entre os principais modificadores estão: Li_2O , Na_2O , K_2O , CaO e BaO (BATISTA, 2018). A terceira e última classe de compostos corresponde aos intermediários, são aqueles que não formam vidros com facilidade por si só, mas que quando misturados aos formadores podem entrar na rede vítrea ocupando tanto a posição do formador quanto a do modificador e geralmente são adicionados na composição vítrea para melhorar determinadas propriedades. Entre os principais intermediários estão: Al_2O_3 , PbO , ZnO , CdO e TiO_2 (BATISTA, 2018).

4.3 RESÍDUOS SÓLIDOS E RECICLAGEM DOS VIDROS

A Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), define resíduo sólido como:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível [...] (BRASIL, 2010, p.3).

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

- Recuperação: Compreende a extração e remoção de substâncias indesejáveis;
- Reutilização: Compreende o processo pelo qual se faz o reuso do resíduo;
- Reciclagem: Processo que consiste no reaproveitamento do resíduo.

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

- Redução no consumo de recursos naturais não-renováveis, quando substituídos por resíduos reciclados (JOHN; AGOPYAN, 2000);
- Redução das áreas necessárias para o aterro, devido a diminuição do volume de resíduos produzidos (PINTO, 1996);
- Diminuição do processo de poluição do ar, da fauna, da flora etc. (JOHN, 2000).

O resíduo de vidro é um material que possui infinitas possibilidades de reaproveitamento e reutilização, como mostra a figura 3.

Figura 3 - Ciclo de reciclagem do vidro



Fonte: (GUIA DO VIDRO, 2009, p. 5.).

São muitos os benefícios que tais procedimentos trazem para o meio ambiente. Visto que, segundo o site Ecycle (2015), o vidro é um material que demora cerca de 5.000 anos para se decompor, a diminuição do volume de aterros sanitários nos quais compõe grande parte do material descartado – é de grande importância. Ademais, como consequência da reutilização de vidros, há uma redução no consumo de matérias-primas – que são retiradas da natureza – e também de energia, sendo que seus cacos utilizam em sua fabricação uma menor quantidade de tempo e temperatura na fusão. (RECICLOTECA, 2016)

A fabricação de uma tonelada de vidro reciclado evita a extração de uma tonelada de areia. Além disto, gasta-se menos de 32% de energia, 50% de água e evita em 20% a poluição atmosférica inerente ao processo de fabricação. (ARAÚJO, 1997, p.21)

Existe um grande leque de possibilidades para a reciclagem e reutilização do resíduo de vidro. Há estudo realizado por Reindl (1998) em que são tratadas mais de sessenta formas de reciclagem de vidro. No trabalho são apresentadas inúmeras formas de reciclagem do resíduo de vidro como por exemplo a sua utilização em substituição dos agregados para leitos de estradas, materiais abrasivos, blocos de pavimentação, ou mesmo em substituição dos agregados do concreto etc. Todas estas aplicações utilizam o resíduo de vidro moído ou triturado, sendo que as dimensões dos grãos de vidro variam conforme a sua aplicação.

No Brasil, uma das primeiras iniciativas com o objetivo de orientar o destino correto dos resíduos sólidos da construção civil e incentivar a reciclagem destes resíduos é a resolução nº307 da CONAMA. A mesma surgiu pela necessidade de reduzir os impactos ambientais causados por esses resíduos (BRASIL, 2002).

Segundo o Relatório de Sustentabilidade da Ambev (2016), para a fabricação de garrafas do tipo *long neck*, é utilizado aproximadamente 65% de material vítreo reciclado, o que reduz consideravelmente o consumo de matéria prima natural. Os materiais para reciclagem chegam de adegas, bares, supermercados e parceiros das cooperativas de reciclagem, que recebem pelo material entregue. As garrafas utilizadas no processo de reciclagem são garrafas de vidro retornáveis de 600 ml e de 1000 ml.

Segundo Ambev (2016), por utilizar elevado percentual de resíduo reciclado na fabricação das garrafas *long neck*, as mesmas têm sua composição química modificada. Tal modificação deu-se para baratear o custo de fabricação e tornar as garrafas competitivas no mercado; no entanto, o resultado compromete a resistência da embalagem e não permite o seu retorno para um segundo envase.

Segundo a PNRS, a reciclagem é um processo de transfiguração dos resíduos que envolve alterar suas propriedades físicas, químicas ou biológicas, visando a transformação em

novos produtos (BRASIL, 2010). É de suma importância a reciclagem dos resíduos sólidos a fim de preservação, conservação e diminuição do consumo dos recursos naturais não renováveis, atendendo as necessidades da sociedade sem comprometer a sobrevivência de futuras gerações (LUCAS; BENATTI, 2008).

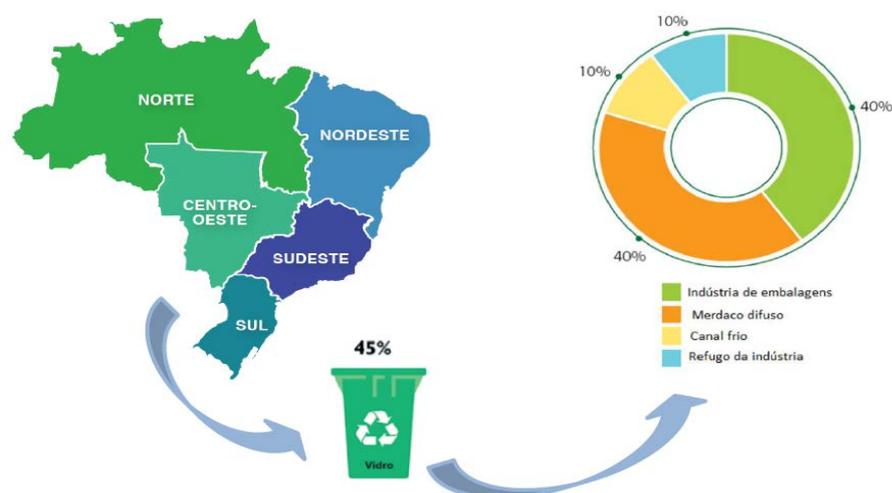
As indústrias fabricantes do vidro sempre tiveram destaque na reciclagem de seus produtos, e nos últimos anos, grandes investimentos foram feitos para estimular o retorno das embalagens de vidro descartável como matéria prima para fabricação de novos produtos. A reciclagem permite reduzir o consumo de matérias primas naturais, como areia, calcário, barrilha entre outros, e conseqüentemente reduzir também os impactos ambientais. (ABIVIDRO, 2014).

Segundo Godinho, Holanda e Silva (2005), produtos de vidro são totalmente reaproveitáveis, seja por métodos de reutilização, como o reenvasamento de garrafas, ou pela reciclagem, na produção de novos produtos. Conforme a Abividro (2014), a reutilização dos elementos vítreos consome quantidades menores de energia emitindo um volume reduzido de CO₂, contribuindo na preservação do meio ambiente.

Segundo a ABIVIDRO (2014), apenas 45% dos vidros produzidos na própria indústria são reciclados, o que equivale a cerca de 1.395 mil t/ano. Para Rosa *et al.*, o consumo per capita do vidro no Brasil é de 12 kg/hab./ano.

Pesquisas realizadas pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE) em 2013 mostram que o índice de reciclagem do vidro no país está em torno de 45%. Sendo que, 40% originários da indústria de embalagens, 40% do mercado difuso, 10% do “canal frio” (bares, restaurantes, hotéis *etc.*) e 10% do refugo da indústria, como mostra a figura 4.

Figura 4 - Índice de reciclagem do vidro no país



Fonte: (CEMPRE, 2013).

Na construção civil, a produção de concreto é como uma grande fábrica de reciclagem com potencial para absorver vários tipos de resíduos. A adição de outros resíduos no concreto, na forma de agregado fino ou grosseiro já foi estudada por vários pesquisadores. Alguns desses resíduos são adicionados com o intuito de melhorar as características mecânicas dos concretos como a sílica, misturas de materiais pozolânicos, cinzas, pó de basalto, escórias etc (BABU; PRAKASH, 1995).

Como exemplos da utilização de vidro em escala real, pode-se destacar o exemplo da Austrália que já utiliza o vidro moído oriundos do lixo em concretos para construção (CRENTSIL; BROW; TAYLOR, 2001) e ainda do estado norte-americano de Nova York que já apresenta recomendações para o uso deste material em concretos.

Os resíduos adicionados aos concretos têm o intuito de melhorar as características mecânicas dos mesmos, ou de simplesmente diminuir o volume desses resíduos nos aterros. Alguns países já utilizam essa técnica de reaproveitamento dos resíduos sólidos. Na Austrália, por exemplo, é adicionado ao concreto vidro moído proveniente do lixo como agregado fino. No Brasil, essa técnica é pouquíssima utilizada, uma vez que o aterro é uma opção barata e a matéria prima para produção do cimento é abundante (LOPEZ; AZEVEDO; BARBOSA NETO, 2005).

Utilizando resíduos como agregado, estes deixam de ter um papel apenas econômico na composição do concreto, pois podem influenciar não só na trabalhabilidade como também em suas propriedades físicas e mecânicas. Por isso, características importantes devem ser analisadas antes da utilização dos resíduos como agregado, a granulometria, a absorção de água, a resistência à tração e compressão, o módulo de elasticidade e os tipos de substâncias nocivas presentes nos materiais (METHA; MONTEIRO, 1994).

O desenvolvimento acelerado consome grande quantidade de recursos naturais e de energia, produzindo volumes elevados de resíduos (PINTO, 2003). A utilização de resíduos na produção de concreto tem um impacto extremamente positivo sobre o meio ambiente, já que diminui a utilização, e a conseqüente extração, de matérias-primas naturais que antes seriam necessárias.

Oliveira *et al.* (2000a, p. 3) afirmam que os concretos produzidos com resíduos apresentam, em geral, características diferentes dos concretos convencionais. O grau de diferença vai variar de acordo com o tipo e a qualidade do resíduo utilizado. Algumas características do concreto que podem ser modificadas pelo uso de resíduos incluem: resistência mecânica; absorção de água; porosidade e permeabilidade.

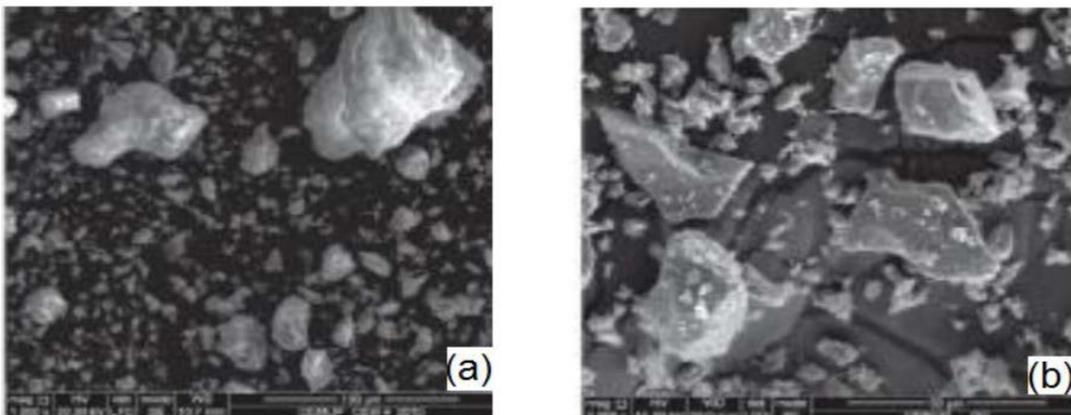
Entretanto, Mijinsbergen (2000, p. 208) comentam que o uso do vidro como agregado para concreto já foi tentado no passado, mas sem sucesso. O principal problema apontado foi a possível ocorrência da reação álcali-agregado.

4.4 REAÇÃO ÁLCALI AGREGADO

De acordo com Idir e Cyr (2012), o tamanho das partículas de vidro é um parâmetro importante que deve ser controlado, pois influencia nas principais propriedades da matriz cimentícia, já que a incorporação do vidro à essa matriz pode promover a Reação Álcali-Agregado (RAA), que provoca fissurações na matriz, influenciando o desempenho mecânico e a durabilidade.

Shi *et al.* (2015) observou que, ao moer o resíduo para equiparar sua distribuição granulométrica com a do cimento, o resíduo passou a apresentar a superfície específica maior que a do cimento, devido à maior irregularidade da partícula de vidro. Paiva (2006) e Matos e Souza (2012) também observaram essa morfologia das partículas de vidro. A Figura 5 mostra a maior irregularidade das partículas de resíduo de vidro em relação às partículas de cimento (MATOS; SOUZA, 2012).

Figura 5 - Microscopias eletrônicas de varredura das partículas de cimento e vidro



Fonte: (MATOS; SOUZA, 2012, p. 23.).

Legenda: a) Cimento – ampliação 1000x.

b) Resíduo de vidro – ampliação 2000x.

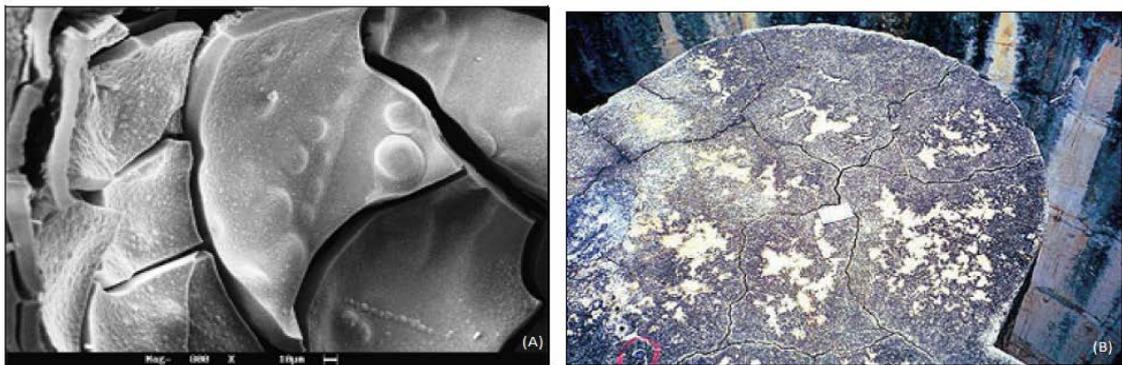
A Reação Álcali-Agregado (RAA) tem sua definição, em termos gerais, com uma reação química que ocorre na estrutura interna do concreto, onde são envolvidos os hidróxidos alcalinos provenientes do cimento e alguns minerais reativos de agregados utilizados na

confeção de concreto, tendo como resultado principal a formação de um gel que, em presença de água, expande gerando fissurações, deslocamentos até comprometimento da estrutura do concreto (HASPARYK, 2005).

Tiecher (2006, p. 44) afirma que a RAA é determinada por diversos intervenientes, sendo estes relacionados com os materiais constituintes do concreto, com as condições ambientais em que a estrutura está inserida e com os agentes inibidores da reação. Para Neville (1982, p. 150) e Petrucci (1987, p. 69), são normalmente considerados como fatores que governam o desenvolvimento da reação: o teor de álcalis no cimento; a granulometria e a porosidade superficial dos grãos reativos; a presença de água não evaporável e a permeabilidade da pasta de cimento; a ação aceleradora de ciclos de umedecimento e secagem e variações de temperatura.

A reação ocorre com a despolimerização ou a quebra da estrutura da sílica do agregado na recém-criada superfície dos produtos. Quando entram em contato com a água, os géis sílico-alcalinos expandem (figura 6A) e a pressão hidráulica desenvolvida dentro dos poros pode levar à expansão e fissuração das partículas afetadas do agregado, bem como à expansão e fissuração do concreto (figura 6B).

Figura 6 – Reação álcali-agregado



Fonte: A:(HASPARYK, 2005, p. 137), B: (ABCP, 2021)

Legenda a) Microscopia eletrônica do gel de silicato alcalino formado na RAA.

b) Estrutura de concreto atacada por RAA.

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

A utilização do vidro como componentes de compósitos cimentícios está limitada, em sua grande parte, pela possibilidade de surgimento de reação Álcali-Agregado (RAA), uma vez que a composição básica do vidro é de 70% de sílica. Além desse alto teor de sílica e em estado amorfo do vidro, é potencialmente deletéria e pode expandir em contato com o cimento (DUCMAN; MLADENOVIC, 2002).

4.5 GARRAFAS DE CERVEJA *LONG NECK*

Como discutido, o vidro apresenta diversas aplicações, dentre as quais se destaca o seu uso em embalagens. Segundo Strehlau e Popadiuk (2003), na área de bebidas (exceto água e refrigerantes) os recipientes são predominantemente deste material.

Considerando a indústria cervejeira, de acordo com os mesmos autores, o consumidor associa a qualidade do produto com o material do qual a embalagem foi feita, de forma que o acondicionamento da cerveja em garrafa de plástico é completamente recusado.

Especialmente para garrafas, o vidro é mais bem visto que os demais materiais e, principalmente para as do tipo *Long Neck*, onde o design é também considerado pelos consumidores. O mercado de embalagens neste segmento é dividido em:

- Garrafas retornáveis: garrafas de 600 ml (67 %) e barris (4 %);
- Recipientes não retornáveis: latas (26 %) e garrafas *Long Neck* (3 %)

De fato, as *long neck* não são reutilizáveis e são pouco recicladas no Brasil e no mundo. São conhecidas como embalagens “one way”, ou seja, sem chance de um segundo envase. Para competir com as latas de alumínio, a indústria mudou a sua composição química, o que impossibilita a sua reutilização.

Não receber as garrafinhas de volta significa que as empresas não garantem a logística reversa, ou seja, não se responsabilizam por esse resíduo sólido. Alguns lugares do Brasil já proíbem a comercialização das *long neck*, como Japurá no interior do Paraná e Nova Mutum, no Mato Grosso (MENOS UM LIXO, 2018).

Segundo o relatório de Cervieri Júnior (2014), nos últimos anos o Brasil se tornou o terceiro maior produtor e consumidor mundial de cerveja. Somente no ano de 2012 a produção foi de 14 bilhões de litros.

Desta forma, ainda que o envase de cerveja em garrafas *Long Neck* seja ínfimo quando comparado aos demais, essa parcela representa 420 milhões de litros, totalizando

aproximadamente 1,4 bilhões de unidades destas embalagens, o que justifica uma preocupação com sua disposição final.

Para Righi *et al.* (2012), as garrafas de vidro do tipo *long neck* tem sido um dos resíduos gerados de maior problema no mundo, devido as mesmas serem descartadas logo após o consumo, o que gera e ocupa espaço no destino final, os aterros sanitários em maior frequência.

Simões (2013) enfatizou a importância da substituição do resíduo de vidro em pó (moído) de forma parcial na produção do cimento. Sendo assim, a reutilização do pó de vidro com propriedades pozolânicas em elementos fabricados a partir do cimento não apenas permite uma correta destinação ao resíduo, que atualmente é realizada de forma incorreta, como também contribui para a redução da extração de matérias primas necessárias na composição do Cimento Portland.

4.6 MATERIAIS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO

“O concreto surgiu com o desejo de se criar uma pedra artificial resistente, econômica e durável como a pedra natural, e que apresentasse como vantagem a possibilidade de ser moldada nas dimensões e nas formas desejadas” (PINHEIRO, 2007).

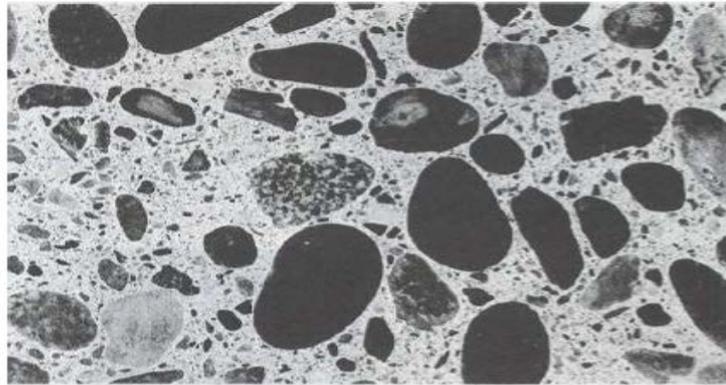
O concreto, fruto de uma tecnologia simples e uma ciência complexa (AÏTCIN, 2000).

De acordo com Callister Jr e Rethwisch (2012), o concreto convencional é um material compósito, obtido pelo endurecimento de uma mistura entre um aglomerante hidráulico (cimento Portland), um agregado miúdo (areia), um agregado graúdo (brita) e água.

Metha e Monteiro (2014) definem concreto como um material compósito que consiste, essencialmente, de um meio aglomerante no qual estão aglutinadas partículas ou fragmentos de agregados, ou seja, uma mistura homogênea de cimento, agregados miúdos e graúdos, e água, com ou sem a presença de adições e/ou aditivos químicos.

O aglomerante (usualmente o cimento Portland) em presença da água, ao ser hidratado forma uma pasta que adere aos fragmentos de agregados, formando uma mistura de fácil modelagem, possuindo resistência à compressão e formando, quando endurecida, um bloco monolítico, figura 7, que se adequa às exigências estruturais necessárias (LIMA; ROSSIGNOLO 2010).

Figura 7 - Seção polida de um corpo-de-prova de concreto



Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 19).

Hoje, estima-se que o atual consumo mundial de concreto seja da ordem de 5,5 bilhões de toneladas por ano (MEHTA; MONTEIRO, 1994). O homem não consome nenhum outro material em tal quantidade a não ser a água.

De acordo com esses autores, apesar do concreto não ser nem tão resistente ou tão tenaz quanto o aço, há algumas razões para ser o material mais largamente usado na engenharia, quais sejam:

Possui excelente resistência à água, podendo ser utilizado na construção de barragens, canais, tanques, aquedutos, pontes, túneis, pavimentos etc.;

- Pode receber armaduras de aço, aumentando suas propriedades mecânicas de acordo com as necessidades da obra;
- Pode ser moldado em várias formas e tamanhos, propiciando grande liberdade de projeto arquitetônico;
- É o material estrutural normalmente mais barato e mais facilmente disponível no canteiro de obras;
- Comparado à maioria dos outros materiais de engenharia, a produção de concreto requer consideravelmente menor consumo de energia, incluídos aí a energia para fabricação do cimento e extração e britagem dos agregados;
- Recebe grande quantidade de rejeitos industriais em substituição de parte do cimento ou agregados, diminuindo os custos e contribuindo com a conservação do meio ambiente.

Para conseguir concretos que reportem boas características e propriedades é necessária uma seleção minuciosa dos materiais constituintes e uma adequada proporcionalidade na sua produção. A proporcionalidade entre os seus componentes (dosagem) provoca diversas

modificações nas características do concreto tanto no seu estado fresco como no endurecido (SILVA JUNIOR, 2014).

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; TERZIAN, 1992).

Para (MEHTA; MONTEIRO, 2008), os concretos podem ser classificados conforme a resistência segue o designado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos concretos quanto à resistência mecânica

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

Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 2008, p. 16).

Entre os materiais de construção, o concreto é o que possui uma das mais complexas estruturas constituintes devido à diversidade de seus componentes, com diferentes características químicas, físicas, mecânicas e diversificadas possibilidades de ligações entre eles.

Possui uma particularidade incomum de as ligações entre seus compostos e eles mesmos poderem modificar-se no decorrer do tempo, alterando a estrutura e as propriedades do concreto (MONTEIRO, 1993). Com todas estas singularidades é de grande importância estudar profundamente este material quanto aos seus aspectos morfológicos, sua microestrutura e composição química.

A partir dos anos 60, ou mais especificamente dos anos 70, ocorreram vários fatores que iriam contribuir para o desenvolvimento da indústria do concreto, tais como:

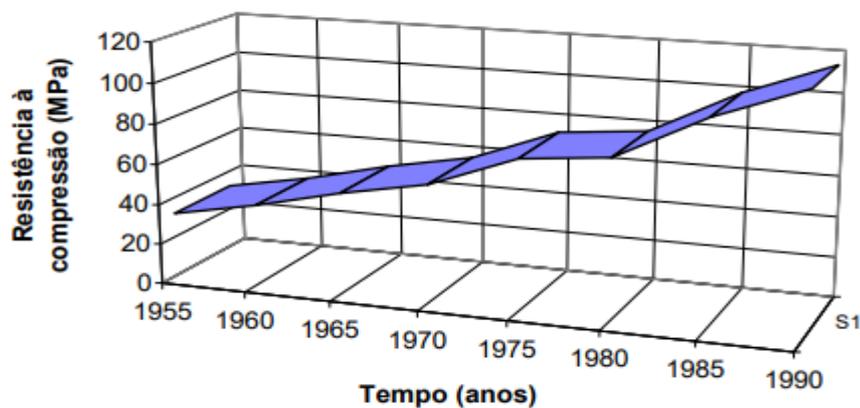
- A tecnologia alcançada pelas indústrias produtoras de cimento possibilitou a produção de cimentos com melhores características de desempenho;
- No Japão e na Alemanha, as indústrias químicas começaram a desenvolver aditivos químicos superfluidificantes, baseados em complexas moléculas orgânicas, os quais

permitiriam uma drástica redução da água de amassamento, proporcionando um grande acréscimo na resistência do concreto;

- Começaram a ocorrer pesquisas no Canadá e nos países nórdicos, com o objetivo de encontrar destino viável para o subproduto volátil das indústrias produtoras de silício e ligas de ferro-silício, denominado sílica ativa, o qual iria revolucionar a produção do concreto.

A resistência do concreto foi aumentando com o passar dos anos, como pode ser acompanhado na figura 8.

Figura 8 - Evolução no tempo do concreto



FONTE: (GONÇALVES, 2001, p. 78).

4.7 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO

Os concretos estruturais são separados por classes, e a NBR 8953 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, p. 2-3) divide os concretos estruturais em dois grupos. O grupo I, cujas resistências à compressão variam de 20 a 50 MPa, e o grupo II, cujas resistências à compressão variam de 55 a 100MPa.

Normalmente os concretos são chamados de concretos convencionais, ou usuais, e concretos de alto desempenho, ou de alta resistência, porém não há um valor que separe os dois tipos, pois o conceito de concreto convencional muda com o passar dos anos, e concretos considerados de alto desempenho hoje, amanhã poderão ser convencionais, conforme a evolução do concreto (ÄITCIN, 2000, p. 4-5).

Segundo Mehta e Monteiro (2008, p. 14), um concreto com mais de 40 MPa pode ser considerado um concreto de alta resistência.

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 (JAMKAR; RAO 2004).

O concreto de alta resistência não necessariamente é 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 (AÏTCIN, 2000).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a definição de concreto de alto desempenho pode englobar diferentes características, desenvolvidas para aplicações e ambientes específicos, tais como: facilidade de aplicação; adensamento sem segregação; resistência nas primeiras idades; resistências de longo prazo e propriedades mecânicas adequadas; baixa permeabilidade; elevada densidade; desprendimento moderado de calor de hidratação; elevada tenacidade; estabilidade volumétrica; longa vida útil em ambientes agressivos.

Aitcin *et al.*, (1996) apontam para a necessidade de melhor definir o que representa “alto desempenho”. Na visão dos autores, a durabilidade é a propriedade do concreto que melhor condiz com essa terminologia e não a resistência mecânica. A durabilidade não está interligada somente à resistência, mas sim, a outras propriedades como a baixa permeabilidade, a alta estabilidade dimensional e a alta trabalhabilidade.

Para Tutikian (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 m³, 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).

O CAD, ultimamente, tem sido empregado nos mais variados tipos de construções tais como: edificações multifamiliares, pavimentos e rodovias, reatores nucleares, reparos e recuperação de estruturas, pré-moldados, vertedouros e dissipadores de barragens (ALMEIDA, 2000). A figura 9 mostra algumas de suas aplicações.

Figura 9 - Petronas Towers Malsia e Centro Empresarial Nações Unidas



Fonte: (OLIVEIRA, 2012, p.35)

A evolução dos concretos se faz necessária, visto que as estruturas estão sendo exigidas cada vez mais, inclusive pela evolução dos cálculos estruturais. Frente a isso, os concretos seguem o mesmo caminho. Como exemplo, a evolução do concreto convencional (CC), que utilizando aditivos redutores de água e aumentado suas propriedades mecânicas, passa a ser denominado concreto de alta resistência (CAR); com o aprimoramento do CAR, obtêm-se o concreto de alto desempenho (CAD).

Os materiais utilizados na produção de CAD são praticamente os mesmos do CC, porém com algumas adições e procedimentos especiais de execução são necessários. Uma das evoluções do concreto de alto desempenho é o concreto de pós reativos (CPR) (ISAIA; HELENE; TUTIKIAN, 2011).

4.8 CONCRETOS DE ALTÍSSIMO DESEMPENHO (CPR)

O concreto de pós reativos – CPR, conhecido internacionalmente como Reactive Powder Concrete – RPC, é considerado um concreto de ultra alto desempenho, originado inicialmente na França e simultaneamente no Canadá durante a década de noventa pelos

pesquisadores Richard e Cheyrezy (1995), conforme Grass e Seidler (2010), foi desenvolvido, inicialmente, com o objetivo de suprimir algumas exigências específicas de estruturas de concreto pré-fabricado submetidos a ambientes agressivo. Posteriormente, em virtude de seu desempenho, o CPR foi estudado e projetado para atender exigências militares, também.

De acordo com Tokudome (2008), a composição básica deste tipo de concreto, consiste na mistura de Cimento Portland, sílica ativa, pó-de-quartzo, agregado miúdo, água, aditivo superplastificante e eventualmente fibras metálicas. Com as características do uso dos materiais acima, essencialmente formado por materiais finos, e a ausência de agregado graúdo conforme Toukome (2008), este tipo de concreto é nomeado de pós reativos, sendo a palavra pós o plural de pó, pois é a combinação de vários materiais finos.

O concreto de pós reativos se apresenta como um material compósito versátil e de propriedades inovadoras. Sua resistência e durabilidade são superiores à maioria dos materiais existentes, mas seu comportamento ainda exige estudos sobre seu desempenho em aplicações específicas. Somente com tal conhecimento este concreto pode ser inserido e considerado com a devida segurança em projetos de engenharia. (ISHIKAWA, 2010).

O CPR é um material que se assemelha aos vãos, alturas e resistência do aço, porém com menor custo e maior durabilidade (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011). De acordo com Vanderlei (2004, p. 8) “o CPR foi desenvolvido como alternativa ao concreto de alto desempenho (CAD) e até mesmo ao aço, tornando-se um material de alta tecnologia”.

Richard (1996), descreve que o princípio básico do concreto de pós reativos é de um material com o mínimo de defeitos, sendo eles microfissuras e poros, que permita resistir a elevadas tensões, sendo isso possível elevando a durabilidade e a capacidade resistente dos materiais empregados.

De acordo com Cheyrezy, Maret e Frouin (1995) os concretos de pós reativos seguem alguns princípios, entre os fundamentais:

- a) melhoramento da homogeneidade pela eliminação de agregados graúdos;
- b) melhoramento da compactação pela otimização da distribuição granulométrica;
- c) melhoramento da microestrutura;
- d) melhoramento da ductilidade;
- e) manter os procedimentos de mistura e moldagem o mais próximo possível das práticas existentes.

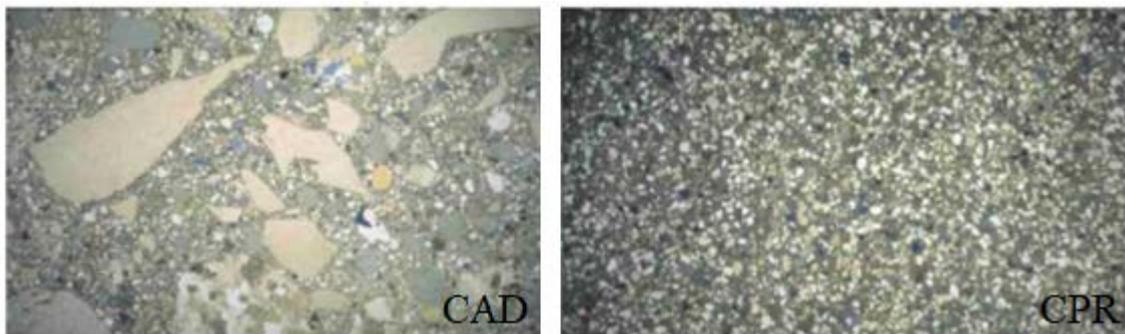
Essa mistura visa obter uma massa mais homogênea, juntamente com aumento da compacidade otimizada pela granulometria dos materiais finos, melhoria nas propriedades mecânicas entre pasta e agregado e na propriedade de ductilidade do concreto. Toda essa

preocupação está baseada em uma questão: microestrutura do concreto no que diz respeito a diminuição da espessura da zona de transição e menor porosidade na interface agregado-pasta (PAULON, 2005).

A microestrutura e a chave do desempenho do CPR, conferindo-lhe diminuta porosidade e permeabilidade (CHEYREZY; MARET; FROUIN, 1995). Comparado ao concreto clássico, observa-se uma completa mudança estrutural dos hidratos, que se traduz por uma estrutura contínua da fase aglomerante na escala microscópica.

O princípio básico do CPR é o aumento da homogeneidade da mistura, para isso os agregados graúdos são eliminados e substituídos por partículas ultra finas (VANDERLEI, 2004). Uma das principais diferenças entre o CAD e o CPR são as dimensões dos agregados. Com a eliminação do agregado graúdo a zona de transição é reduzida e aumenta a superfície do esqueleto granular. Resplendino (2006) mostra a diferença entre as proporções dos materiais empregados no CAD e no CPR. Na Figura 10 observa-se a inexistência de agregados graúdos no CPR.

Figura 10 - Seção dos dois tipos de concreto (CAD e CPR)



Fonte: (RESPLENDINO, 2006, p. 76)

Com o empacotamento das partículas é possível criar um concreto com poucos poros, o que é fundamental no aumento da resistência e um excelente parâmetro de durabilidade.

4.9 MATERIAIS COMPONENTES

“Os materiais utilizados na fabricação dos CPR possuem características próprias. Devem ser analisados e estudados separadamente para melhor compreensão do seu papel na produção do CPR [...]” (BIZ, 2001, p. 14).

4.9.1 Aglomerantes

Aglomerantes são materiais pulverulentos que se hidratam em presença de água formando uma pasta resistente capaz de aglutinar agregados, dando origem a argamassas e concretos. Os aglomerantes mais utilizados na construção civil são o cimento, cal e gesso (RIBEIRO. 2015).

4.9.2 Cimento

O aglomerante mais utilizado na construção civil é o cimento, conhecido mundialmente como cimento Portland, que é um pó fino acinzentado, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, com inúmeras propriedades e características, dentre as quais ser moldável quando misturado com água e ser capaz de desenvolver elevada resistência mecânica ao longo do tempo. A denominação do cimento Portland é decorrente da semelhança do cimento fabricado industrialmente com a pedra de Portland, calcário extraído em Dorset, na Inglaterra. (RIBEIRO. 2015).

A NBR 11172/1990 ainda define que o cimento é um aglomerante hidráulico constituído em sua maior parte por silicatos e/ou aluminatos de cálcio.

O cimento Portland é o produto resultante da moagem do clínquer, obtido pela clínquerização da mistura de proporções adequadas de calcário e argila. Nessa moagem, adiciona-se um teor mínimo de gipsita (sulfato de cálcio) para controlar o tempo de pega, ou seja, o tempo de início das reações do aglomerante com a água. Basicamente, ele é formado pela mistura íntima das seguintes fases:

- fase silicato: composta pelos silicatos tricálcico (C_3S) e dicálcico (C_2S);
- fase intersticial: composta pela fase aluminato (C_3A) e fase ferrita (C_4AF).

O clínquer dos cimentos Portland é composto de aluminatos de cálcio e silicatos de cálcio. A cristalização das quatro principais fases minerais [fases alita, belita, aluminato tricálcico e fase ferrita (ferro aluminato tetracálcico)] é uma função da composição e da finura da mistura crua (farinha), do tratamento térmico (temperatura de clínquerização) (REGOURD, 1981).

4.9.3 Composição química

Segundo Bauer (1994, p. 46-47), os constituintes fundamentais são: a cal (CaO), a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de ferro (Fe₂O₃), certa proporção de magnésia (MgO) e uma pequena porcentagem de anidro sulfúrico (SO₃). Tem-se ainda, como constituintes menores, impurezas, como o óxido de sódio (Na₂O), óxido de potássio (K₂O), óxido de titânio (TiO₂) e outras substâncias de menor importância. Os óxidos de potássio e de sódio constituem os álcalis do cimento, conforme tabela 2.

Tabela 2 - Compostos individuais dos óxidos do clínquer e abreviações

Óxido	Abreviação	Composto	Abreviação
CaO	C	3CaO.SiO ₂	C3S
SiO ₂	S	2CaO.SiO ₂	C2S
Al ₂ O ₃	A	3CaO.Al ₂ O ₃	C3A
Fe ₂ O ₃	F	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C4AF
MgO	M	4CaO.3Al ₂ O ₃ .SO ₃	C4A3S
SO ₃	S	3CaO.2SiO ₂ .3H ₂ O	S2H3
H ₂ O	H	CaSO ₄ .2H ₂ O	CSH2

Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 190)

4.9.4 Relação água / cimento (a/c)

A água deve ser empregada na quantidade suficiente para envolver os grãos e promover a hidratação do cimento.

O excesso de água no concreto resultará numa pasta mais porosa e, conseqüentemente, em menor resistência, além de menor aderência entre a pasta e o agregado, devido à exsudação.

O fator a/c é uma relação entre o peso da água e o peso do cimento, adotada para evitar excesso de água no cimento.

Conforme Neville (1982), o conteúdo real de água na pasta é função da umidade do meio e o seu papel é de grande importância, pois exerce grande influência nas propriedades da pasta. No cimento hidratado a água pode estar retida como:

a) água combinada quimicamente ou água de constituição: é a água de hidratação que se combinou com o cimento não hidratado, tornando-se parte constituinte dos compostos hidratados, não pode ser retirada por efeitos de variação de temperatura ou umidade;

b) água livre: é retida nos grandes poros do gel e capilares (água capilar) estando fora da ação das forças superficiais da fase sólida, podendo ser perdida facilmente, causando variação de volume do concreto. A água livre pode servir como meio para movimentação de substâncias agressivas no interior do concreto, e como participante de reações químicas gerando produtos expansivos que podem levar à ruptura da microestrutura pelo aparecimento de tensões quando o volume do produto criado for maior do que o possível de ser absorvido pelos vazios na microestrutura.

4.9.5 Pasta de cimento

A pasta de cimento endurecida é constituída por sólidos formados pela hidratação do cimento, vazios e água presente nos poros e nos produtos de hidratação. Os sólidos que formam a pasta de cimento hidratada são: silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos (etringita e monossulfoaluminato) e grãos de cimento não- hidratados. A pasta de cimento que envolve os grãos de areia e o agregado graúdo é chamada de matriz (MORANVILLE, 1992).

4.10 HIDRATAÇÃO E MICROESTRUTURA

De acordo com Brunauer e Copeland (1964) as reações de hidratação do cimento, como qualquer reação química, envolvem transferência de matéria, variação de energia e velocidade de evolução das reações, sendo esses os principais pontos de interesse no estudo da química do concreto.

Brunauer e Copeland (1964) descreveram a importância da hidratação do cimento Portland para a tecnologia do concreto com as seguintes palavras: “A química do concreto é essencialmente a química da reação entre o cimento Portland e a água... Em qualquer reação química os principais pontos de interesse são as transformações de matéria, as variações de energia, e a velocidade de reação. Estes três aspectos de uma reação têm grande importância prática para o usuário do cimento Portland.

O conhecimento das substâncias formadas quando o cimento Portland reage é importante, pois o cimento em si mesmo não é um material cimentante; os seus produtos da hidratação, sim, têm propriedades aglomerantes. O conhecimento da quantidade de calor liberado é importante porque o calor é algumas vezes favorável e outras vezes, é desfavorável... O conhecimento da velocidade de reação é importante, porque determina o tempo de pega e de

endurecimento. A reação inicial deve ser lenta o suficiente para permitir o lançamento do concreto na forma. Por outro lado, após o lançamento do concreto é sempre desejável um rápido endurecimento”.

Segundo Mehta e Monteiro (1994), a hidratação do cimento resulta em três compostos principais, que caracterizam a pasta endurecida:

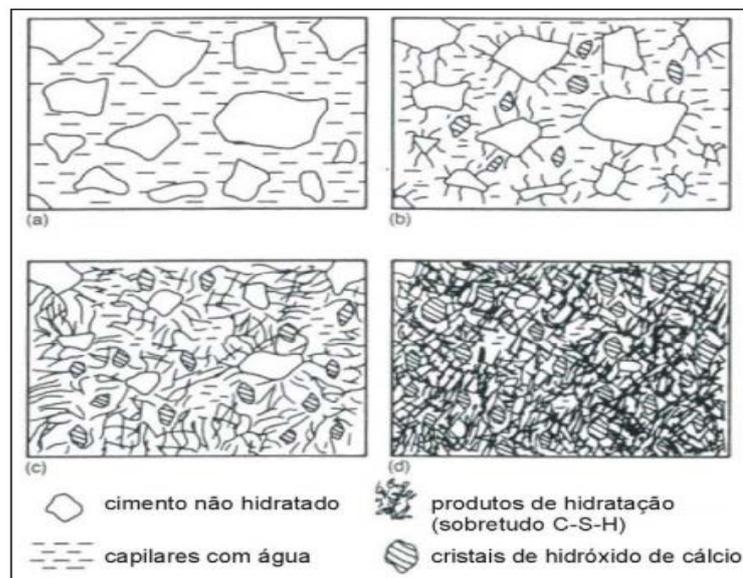
a) C-S-H (silicatos de cálcio hidratados): são cristais pequenos e fibrilares, de composição química muito variada, que representam de 50 a 60% do volume de sólidos em uma pasta de cimento Portland completamente hidratada. Estes compostos são responsáveis pela resistência da pasta endurecida a esforços mecânicos;

b) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxidos de cálcio): sua morfologia é bem definida, formando cristais prismáticos, cujo tamanho aumenta conforme também aumenta o espaço livre (aumento da relação água/cimento). Estes ocupam de 20 a 25% do volume de sólidos da pasta.

c) Sulfoaluminato de cálcio: ocupam de 15 a 20% do volume da pasta hidratada. Apresentam como principais compostos a etringita e o monossulfato de cálcio.

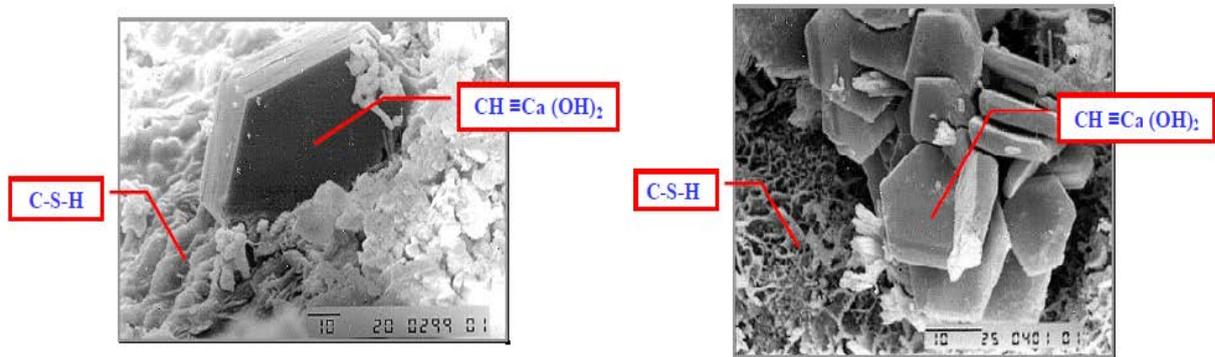
A Figura 11 mostra o desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento durante a hidratação e as Figura 12 e 13 indicam a microscopia eletrônica de varredura.

Figura 11 - Desenvolvimento da microestrutura da pasta de cimento durante a hidratação



Fonte: (MORANVILLE, 1992, p. 13)

Figura 12 - Microscopia Eletrônica de Varredura em amostra de concreto



Fonte: (VIEIRA, 1994, p. 31)

4.11 ZONA DE TRANSIÇÃO PASTA

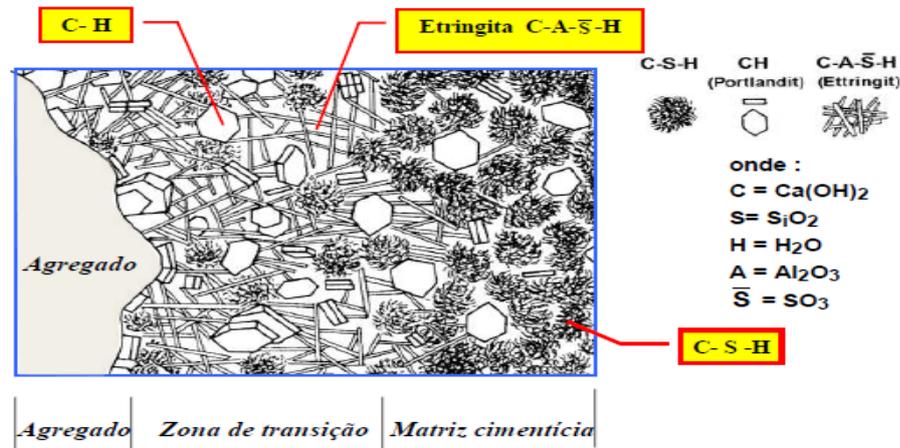
A zona de transição consiste na porção da pasta de cimento que fica entre as partículas de agregado graúdo e a matriz da pasta cimento. Apesar desta ser constituída pelos mesmos elementos que a pasta de cimento, acredita-se que a zona de transição apresenta microestrutura diferente da matriz da pasta. Portanto, é desejável tratar a zona de transição como uma fase distinta da estrutura do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Existe consenso entre os pesquisadores de que a microestrutura da região de contato entre a pasta e os agregado é diferenciada da matriz (região fora da zona de transição), apresentando as seguintes peculiaridades: nessa zona, há maior quantidade de cristais de hidróxido de cálcio e de etringita, sendo esses materiais mais bem formados e de maior tamanho; os cristais de hidróxido de cálcio estão orientados, preferencialmente, de modo que seus planos basais de clivagem sejam, aproximadamente, perpendiculares à superfície do agregado; a porosidade da interface é maior do que a da matriz.

Monteiro (1985) afirma que as diferenças entre a zona de transição e a matriz da pasta, decorrem dos defeitos de superfície produzidos pelo agregado graúdo que criam um filme de água ou zonas de pasta com uma relação água/cimento, a/c , mais elevada. Verifica-se também falha de aderência entre a pasta e o agregado, podendo-se relacionar este fato aos grandes cristais formados, com superfície específica menor, o que diminui a força de adesão.

A figura 13 mostra a zona de transição entre o agregado e a pasta endurecida de cimento.

Figura 13 - Zona de transição



Fonte: (MEHTA; MONTEIRO, 1994, p. 189.)

Conforme descrição de Mehta e Monteiro (1994), a microestrutura da zona de transição é caracterizada por apresentar uma pasta mais porosa do que na matriz de pasta de cimento ou na matriz de argamassa, com uma proporção mais elevada de cristais relativamente grandes de etringita e hidróxido de cálcio.

Verifica-se também falha de aderência entre a pasta e o agregado, podendo-se relacionar este fato aos grandes cristais formados, com superfície específica menor, o que diminui a força de adesão.

A zona de transição é geralmente responsável pelo rompimento do concreto em níveis de tensão abaixo da resistência dos seus constituintes principais (agregado e argamassa), sendo considerada o elo mais fraco do conjunto. Quando o concreto é tensionado, é na zona de transição que aparecerão as primeiras microfissuras (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

O que produz a adesão entre os produtos de hidratação e a partícula de agregado são as forças de Van der Waals; portanto a resistência da zona de transição em qualquer ponto depende do volume e tamanho dos vazios presentes (MEHTA; MONTEIRO, 1994). Isto justifica o fato de o concreto apresentar resistências mais baixas nas primeiras idades.

4.12 CURA

A cura de um concreto é realizada por duas razões: para hidratar tanto quanto possível o cimento presente na mistura e para minimizar a retração (AÏTCIN, 2000). Ela deve ser iniciada logo após o lançamento do material e, só após adquirir resistência suficiente, deve-se realizar, por exemplo, seu umedecimento (LIBORI; CASTRO; SILVA, 2004).

A consideração da cura é importante, pois se há poros abertos e a cura não está sendo realizada, então poderá ocorrer uma evaporação da água livre e, ainda, uma interrupção na hidratação do material cimentício e na reação entre produtos hidratados do clínquer e as adições que compõem o cimento.

Assim, a ausência da cura ou a cura incorreta propicia uma hidratação inadequada do cimento, sem o refinamento dos poros.

4.13 DURABILIDADE

A durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries, ataques químicos, abrasão ou qualquer outro processo de deterioração, isto é, o concreto durável conservará a sua forma original, qualidade e capacidade de utilização quando exposto ao seu meio ambiente (RAVINDRARAJAH; TAM, 1985).

Para Gomes (2002) uma estrutura de concreto é durável quando ela apresenta desempenho contínuo satisfatório, para as finalidades para a qual foi projetada, isto é, que manterá sua resistência e condições normais de serviço durante a vida útil especificada ou esperada.

4.13.1 Os vazios e permeabilidade

A existência de vazios no concreto afeta de forma significativa o desempenho e a durabilidade das estruturas, seja em relação à capacidade de resistir a esforços de compressão, uma vez que somente os elementos sólidos resistem a esforços, ou pela diminuição da proteção do aço imerso no concreto, causado pela penetração de agentes agressivos, como os cloretos e sulfatos. Portanto uma baixa permeabilidade é de fundamental importância para a durabilidade do concreto. Para Neville (1997), a permeabilidade do concreto está relacionada com a sua porosidade.

Para Mehta e Monteiro (1994) permeabilidade é a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido poroso, logo esta propriedade é de fundamental importância para a ocorrência dos processos físicos e químicos na deterioração do concreto. Portanto, a permeabilidade está diretamente relacionada à sua durabilidade.

4.14 AGREGADOS

Agregado é o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos. (BAUER *et al.*, 2005).

São acrescentados ao cimento e à água para se obterem as argamassas e os concretos. Os agregados constituem aproximadamente 70% do volume total dos produtos em que são utilizados desempenhando, em consequência, um importante papel do ponto de vista do custo total dos mesmos. (RIBEIRO, 2015)

4.14.1 Granulometria

Neville (1997, p. 125) descreve que: “o tamanho do agregado usado no concreto se estende de dezenas de milímetros até partículas com seção transversal menor do que o décimo de milímetro. Em cada mistura são incorporadas partículas com diversos tamanhos, e a distribuição desses tamanhos se denomina granulometria.

Segundo Mehta e Monteiro (1994, p. 261), “agregados que não tem uma grande deficiência ou excesso de qualquer tamanho de partícula, em especial, produzem misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas”.

A NBR 7211 (ABNT, 2005:1) define areia ou agregado miúdo como areia de origem natural ou resultante do britamento de rochas estáveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,8 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075 mm. E define agregado graúdo como pedregulho ou brita proveniente de rochas estáveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8 mm.

4.14.2 Classificação dos Agregados

Segundo Falcão Bauer (1994) os agregados podem ser classificados conforme sua origem, (naturais ou industrializados), dimensão (miúdos ou graúdos) e peso específico aparente.

4.14.3 Agregado Miúdo

É considerado agregado miúdo, a areia de origem natural ou decorrente do britamento de rochas estáveis ou o conjunto de ambas, cujos grãos de maior magnitude passam no mínimo 85% as malhas da peneira ABNT 4,8 mm e ficam mantidos na peneira ABNT 0,075 μm .

A constatação das qualidades dos agregados miúdos pode ser feita através:

Granulometria: a composição granulométrica, ou seja, a proporção relativa apresentada em forma de porcentagem (%) em que se localizam os grãos de um certo agregado. Verificada pela NBR 7217.

Módulo de finura: está associado com a área superficial do agregado. Verificado pela NBR 7217.

Massa unitária: relação entre a massa total de um certo volume de agregados e esse volume, considerando-se os vazios existentes entre os grãos do agregado. Verificada pela NBR 7251.

Massa específica: relação entre a massa e o volume de cheios, ou seja, o volume dos grãos dos agregados. Verificada pela NBR 9776.

Inchamento: é a ampliação do volume de uma determinada massa de agregados, provocada pela absorção de água.

4.15 MICROSSÍLICA

A microssílica (MS) é um pó extremamente fino, constituído essencialmente de sílica amorfa de altíssima reatividade pozolânica, sendo um dos materiais mais eficientes para incorporar partículas ultrafinas, obtendo uma graduação completa para o concreto (SARTORI, 1995).

As partículas de microssílica são esféricas e com dimensões 100 a 150 vezes menores que as partículas de cimento, exercendo influência nas propriedades do concreto fresco e endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

A microssílica (SiO_2) é um subproduto da fabricação do silício metálico e das ligas de ferrosilício em fornos elétricos a temperaturas de 2000°C. A sílica ativa produz tanto efeitos químicos como físicos na microestrutura do concreto. A reação com o hidróxido de cálcio gerado na hidratação do cimento é mais rápida e pouco variável do que outras adições como pozolanas naturais ou escórias (MOLIN, 2005).

A microssílica tem dois efeitos no concreto:

Um efeito é químico: Quando se mistura à água com o cimento formam-se vários compostos, entre eles os silicatos hidratados de cálcio (C-S-H) e o hidróxido de cálcio (C-H). O C-S-H é o composto que dá resistência ao concreto. Quando se adiciona a microssílica na mistura do concreto ela reage com o C-H formando mais C-S-H, aumentando a resistência mecânica do concreto. Como o C-S-H também é mais resistente aos agentes agressivos que o C-H, a resistência química do concreto também fica aumentada.

Outro efeito é físico: Como a microssílica é 100 a 150 vezes mais fina que o cimento, ela preenche os vazios criados pela água livre na mistura cimento + água.

A impermeabilidade aumenta muito porque a microssílica reduz o número e o tamanho dos poros capilares que permitiriam a infiltração dos agentes externos agressivos ao concreto e às armaduras. Por isso as estruturas de concreto armado com microssílica são mais duráveis.

4.16 PÓ DE QUARTZO

Assim como recomendado para as areias, estudos de Helene e Tutikian (2005) indicam o quartzo para uso como fração fina no concreto, apresentando desempenho superior à maioria dos materiais disponíveis para britagem. É utilizado como *filler* para garantir uma boa compactação à mistura, inclusive nas misturas de concretos de pós reativos, que tem as funções de melhorar o empacotamento dos grãos do concreto e reagir durante o tratamento térmico possibilitando o acontecimento de reações pozolânicas complementares as reações provenientes da microssílica.

Segundo Repette (2005), este material deve estar numa faixa entre 5 e 20 μm . Logo, deve-se atentar à quantidade utilizada para não elevar a demanda total de água do concreto, devido à grande superfície específica deste material fino. O tamanho médio das partículas de pó de quartzo utilizado, segundo Vanderlei (2004, p. 47) é 10 micrômetros, portanto da mesma classe granular do cimento. Esta condição a torna passível de reagir durante o processo de cura, originando a benéfica e desejável reação pozolânica.

4.17 SUPERPLASTIFICANTE

Os superplastificantes são uma categoria especial dos aditivos redutores de água que permitem grandes reduções na quantidade da água da mistura possibilitando um aumento considerável da trabalhabilidade e um acréscimo na resistência à compressão do concreto. Aditivos plastificantes comuns podem diminuir a quantidade de água de mistura na casa de 5%

a 10%. Aditivos superplastificantes produzem reduções entre 20% e 30% (HARTMANN; HELENE, 2003; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A função dos plastificantes é na melhoria da consistência do concreto sem aumentar sua demanda de água e, conseqüentemente, melhorar suas propriedades mecânicas e sua durabilidade. Além disso, esses aditivos permitem manter a consistência da mistura quando da diminuição do volume de pasta na dosagem.

4.18 PÓ DE VIDRO

O vidro 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 $250 \text{ m}^2/\text{kg}$ têm elevada atividade pozolânica (OLIVEIRA; GOMES; SANTOS, 2012).

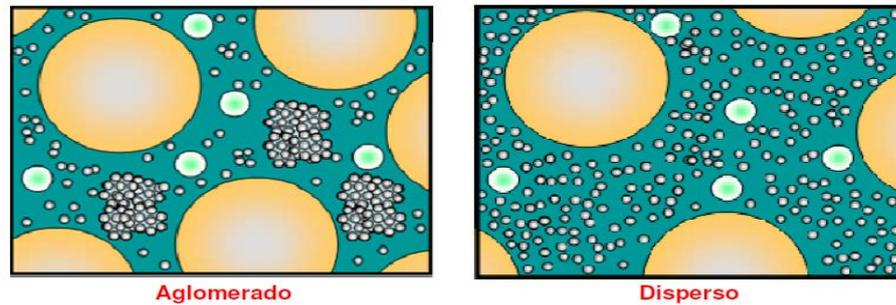
Materiais que após a moagem ficam com granulometria abaixo de $60 \mu\text{m}$ e área de superfície específica Blaine superior a $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ resultam em produtos que podem ser classificados como pozolânicos independentemente do tipo de moagem e da morfologia da partícula (CORDEIRO, 2009).

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 melhorias na resistência à compressão nos concretos (BHANDARI; TAJNE, 2013; SOROUSHIAN, 2012).

4.19 DISPERSÃO DE PARTÍCULAS

As partículas de cimento apresentam uma grande tendência à aglomeração quando entram em contato com um líquido tão polar quanto a água, devido a vários tipos de interação: forças de atração Inter partículas (forças de van der Waals), forças eletrostáticas entre posições de sítios com cargas opostas e forte interação ou ligação envolvendo as moléculas de água ou hidratos. Assumir tal estrutura aglomerada (figura 14) implica na retenção de certa quantidade da água de mistura e, com isso, na geração de uma rede aberta de canais entre as partículas. Essa rede de vazios pode aprisionar parte da água que, por essa razão, fica indisponível para hidratar a superfície das partículas de cimento e para fluidificar a mistura (MACGREGOR, 1994).

Figura 14 - Partículas aglomeradas e dispersas



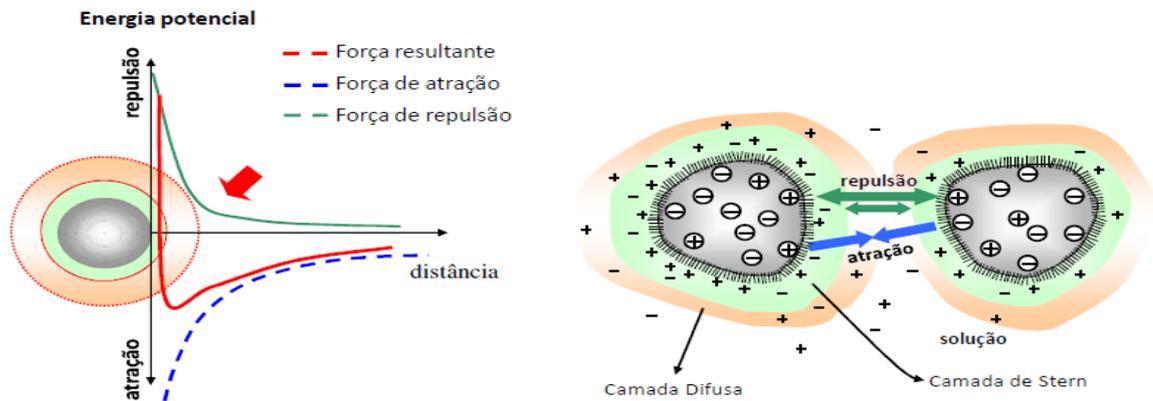
Fonte: (YANG; JENNINGS 1995, p. 70.)

A presença de finos e/ou ultrafinos resulta em forças superficiais de atração eletrostáticas e secundárias (van der Waals) que conferem coesão e pontes de adesão com superfícies. As forças de van der Waals geram atração entre os átomos de duas partículas quaisquer de cimento e, ainda, entre moléculas neutras quimicamente saturadas Ghio (1993).

As cargas das partículas na dupla camada elétrica podem ser tanto de atração como de repulsão e as interações entre elas têm origem nas cargas elétricas superficiais das partículas ao entrarem em contato com o meio aquoso (CHAPPUIS, 1991).

As forças atuantes entre as partículas de cimento compreendem as forças de van der Waals (forças de atração) e as forças de repulsão eletrostática geradas pela carga elétrica presente na superfície das partículas. Porém, com a adição de um aditivo, as forças de repulsão eletrostática são aumentadas e, com isso, forças de repulsão estérica são geradas, realçando o aumento de densidade local causado pela sobreposição de camadas de aditivo adsorvido (BOWEN, 2003). Assim, a força atuante resultante entre as partículas de cimento em coexistência com um aditivo é representada pela somatória de todas as forças presentes, isto é, pela somatória das forças de atração de van der Waals e das forças de repulsão eletrostática e estérica. Além disso, a força atuante entre as partículas de cimento depende da distância entre elas, que por sua vez está relacionada com a energia de interação entre as partículas (BOWEN, 2003), conforme figura 15.

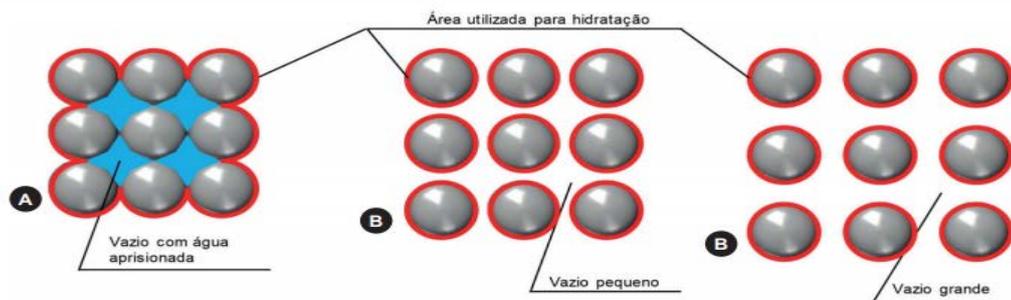
Figura 15 - Reação do ligante acentua as forças atrativas



Fonte: (BOWEN, 2003, p. 781.).

Os dispersantes modificam a superfície do cimento ao serem adsorvidos, criando uma barreira que impede a aproximação das partículas, reduzindo o atrito entre elas e a energia requerida para induzir o fluxo no sistema, conforme figura 16. Partículas isoladas perturbam menos o fluxo do que as aglomeradas (OLIVEIRA *et al.*, 2000b). Distintas eficiências de dispersão são obtidas a partir da utilização dos diferentes tipos de aditivo, e são dependentes do tipo de cimento.

Figura 16 - Dispersão de partículas



Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2000b, p. 125.)

Legenda: a) Partículas aglomeradas, capacidade de ligar a suspensão e obstrução ao fluxo.

b) Partículas desaglomeradas.

c) Partículas desaglomeradas com maior distanciamento.

4.20 TRABALHABILIDADE E CONSISTÊNCIA

O concreto de pós reativos não apresenta apenas a característica de elevada resistência mecânica, mas também boa trabalhabilidade (TUTIKIAN, 2011). A trabalhabilidade de um concreto é resultado das propriedades inerentes de seus constituintes, das proporções da mistura e das interferências física e química entre eles.

Os conceitos de consistência e trabalhabilidade surgem da necessidade de sejam explicitadas, mesmo que de maneira sensorial, as características desejáveis dos concretos durante suas etapas de mistura, transporte, lançamento, consolidação e acabamento.

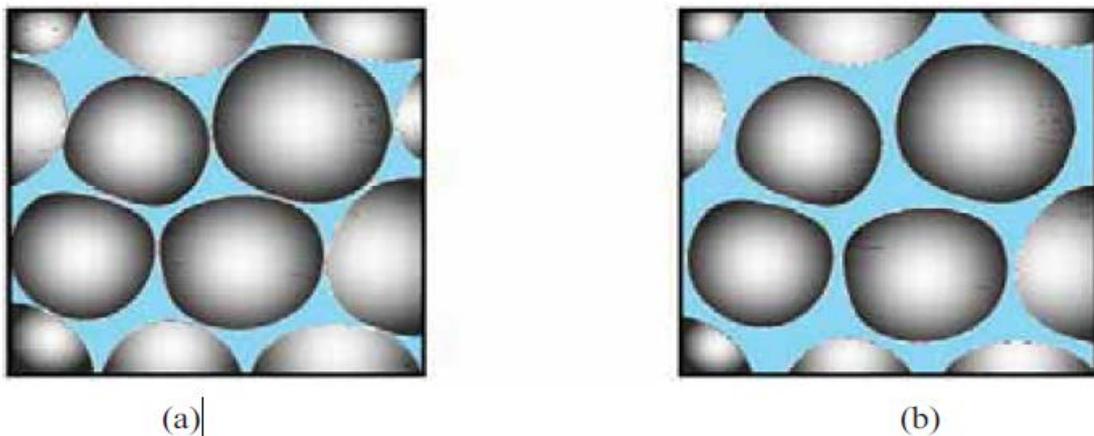
A trabalhabilidade é uma propriedade composta de pelo menos dois componentes principais: fluidez, que descreve a facilidade de mobilidade do concreto fresco; e a coesão, que descreve a resistência à exsudação ou à segregação (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Quando estes vazios são preenchidos pela água, o empacotamento do material é dito denso e praticamente não tem trabalhabilidade (Figura 17a).

À medida que a quantidade de água é incrementada, gera-se um afastamento entre os grãos, o que permite o deslizamento entre os mesmos (Figura 17b).

Ao se aplicar uma tensão de cisalhamento sobre o concreto, uma deformação irá ocorrer superando as forças de fricção e de coesão entre os grãos assim, o concreto passa a ter trabalhabilidade, que é dependente de um pequeno afastamento entre os grãos.

Figura 17 - Suspensão de grãos



Fonte: (NEVILLE, 2013, p, 448.).

Legenda: a) Sem trabalhabilidade.

b) Com trabalhabilidade.

Aïtcin (2000) subdividiram a relação água/cimento em duas partes: a primeira representa a quantidade de água necessária para a completa hidratação do cimento; e a segunda representa a quantidade de água adicional necessária para se obter uma trabalhabilidade adequada (água de trabalhabilidade). Dessa maneira, o concreto ideal deve conter água suficiente para desenvolver a resistência máxima do cimento e, ao mesmo tempo, fornece as propriedades reológicas necessárias ao seu lançamento (GRZESZCZYK; KUCHARSKA, 1990).

4.21 SEPARAÇÃO DE FASES

Os concretos e argamassas são materiais heterogêneos, multifásicos e reativos por definição. Contudo, quando o termo homogeneidade é aplicado, ele refere-se à uniformidade da distribuição das diferentes fases, e o conceito de estabilidade à manutenção da uniformidade frente às etapas de processamento (PAIVA, 2006).

Assim, a distribuição de fases uniforme (homogeneidade) obtida originalmente pode ser desestabilizada através da ocorrência de separação causada por forças relacionadas a uma ou mais etapas do processo (PETROU *et al.*, 2000).

A separação de fases ocorre em diferentes níveis de escala nos materiais de construção, de acordo com a dimensão das partículas em questão:

- pasta (μm), separação água-finos;
- argamassa (mm), separação pasta-areia;
- concreto (cm), separação argamassa-agregado graúdo.

A separação de fases altera o comportamento reológico e compromete a qualidade e/ou produtividade das etapas de transporte e aplicação, As propriedades no estado endurecido são afetadas indiretamente devido à alteração do comportamento reológico e, também, diretamente devido à própria não uniformidade na distribuição das fases após endurecimento, que gera microestrutura heterogênea e gradientes de propriedades, conseqüentemente aumentando a incidência de patologias (ROMANO *et al.*, 2009).

4.22 EMPACOTAMENTO DAS PARTÍCULAS

Conforme Castro e Pandolfelli (2009, p. 8):

Nos últimos anos, o interesse pelo empacotamento das partículas aumentou nas diferentes áreas da engenharia. Esse interesse pode ser pelo fato de que

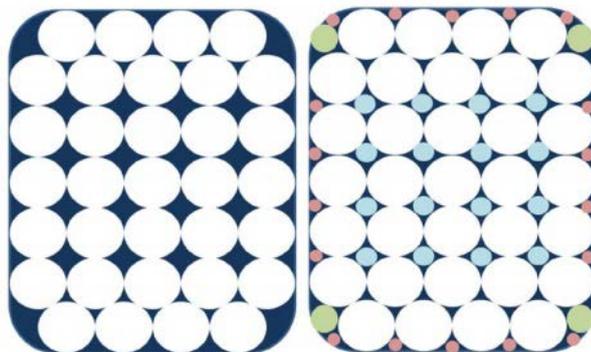
uma grande parte dos materiais naturais ou industriais com os quais lidamos diariamente são – ou contém – partículas de diferentes formas e tamanhos. Nesse campo de ação, as —partículas são consideradas como os grãos de agregados, minerais, metais ou pós químicos, solos, moléculas, poros ou rochas. Assim, o comportamento de tais materiais depende parcialmente das propriedades das partes que o compõem e parcialmente das interações entre elas.

O estudo do empacotamento de partículas pode ser definido como o problema da correta seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos por partículas menores, cujos vazios serão novamente preenchidos com partículas ainda menores e, assim, sucessivamente (OLIVEIRA *et al.*, 2000a).

A dosagem de um concreto deve visar uma distribuição otimizada das partículas que compõe o material, proporcionando uma mistura com o mínimo de vazios e com alta densidade. Para aumentar a densidade diminuem-se os espaços entre as partículas, preenchendo-os com partículas menores, procurando, assim, estabelecer um empacotamento (VANDERLEI, 2004).

A aplicação do empacotamento de partículas (Figura 18) para a otimização de materiais granulares é de suma importância, visto que, ao tornar a matriz do concreto mais densa e compacta, é possível obter produtos com baixo consumo de cimento sem comprometer o desempenho mecânico e a durabilidade do material, além de reduzir o impacto ambiental negativo da cadeia de produção do ligante, bem como a redução de custos. Assim, a modificação da formulação de dosagem de concretos é uma forma extremamente eficiente para auxiliar na produção de concretos com desempenho mecânico superior e menor consumo de cimento (CARDOSO; JOHN; PILEGGI, 2009).

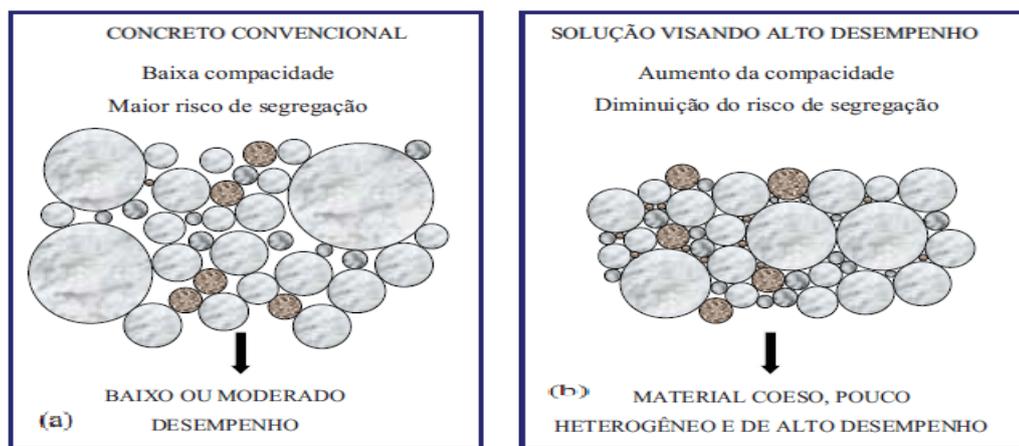
Figura 18 - Otimização de uma mistura por meio do empacotamento de partículas



Fonte: (HERMANN *et al.*, 2015, p. 82.)

Os estudos teóricos e experimentais, relacionados ao empacotamento de partículas geraram duas abordagens básicas, uma discreta, que considera as partículas individualmente, tendo Furnas e Westman e Hugill como expoente e outra contínua, proposta por Andreasen, que trata as partículas como distribuições contínuas (OLIVEIRA *et al.*, 2000a), além de uma equação modificada de Andreasen, ou equação de Alfred (SILVA *et al.*, 2003). A figura 19 compara a dosagem do concreto convencional comum com baixa compacidade entre as partículas aos concretos especiais apresentando o método de empacotamento de partículas.

Figura 19 - Comparação entre concreto convencional e alto desempenho



Fonte: (FORMAGINI, 2005, p. 58.)

Legenda: a) Concreto comum com baixa compacidade.

b) Concretos especiais com método de empacotamento de partículas.

4.22.1 Morfologia

As leis que determinam o empacotamento de partículas foram aplicadas para partículas de forma esférica. Quanto menos esférica for a partícula, menor será a densidade de empacotamento de uma distribuição que a contenha, pois ocorre o atrito entre as partículas a partir do contato das superfícies irregulares das mesmas. (PANDOLFELLI *et al.*, 2000).

Ao passo que a concentração de partículas irregulares aumenta, a estrutura de empacotamento é destruída e ocorre a diminuição da densidade, resultando em maior índice de vazios e, conseqüentemente, em maior porosidade. Embora se conheça a importância da forma das partículas, a consideração desse princípio é difícil de ser implementada, não estando presente na fundamentação matemática dos modelos de empacotamento (SHACKELFORD, 2008).

Na dosagem do concreto de pós reativos o empacotamento tem que ser o mais denso possível, sendo que de acordo com Castro (2009), uma série de fatores pode alterar o empacotamento de um determinado conjunto de partículas, dentre eles estão a existência de partículas com distribuições granulométricas diversas e a morfologia das partículas.

Segundo a NBR 7389-1 (ABNT, 2009), deve-se avaliar a forma do grão visualmente, ou com auxílio de lupa, e compara-se com padrões que indicam o grau de esfericidade e arredondamento. Para uma análise de um agregado em uma amostra definem-se seus eixos e se obtém a maior dimensão denominada comprimento, dimensão intermediária denominada largura e menor dimensão espessura. Os materiais incorporados a uma mistura de concreto podem ser classificados em três categorias morfológicas de acordo com sua forma: esférica, lamelar e irregular.

Segundo Tristão (1995) a forma dos grãos do agregado miúdo deve ser representada através da determinação do arredondamento e da esfericidade. O arredondamento se relaciona com o grau de curvatura dos cantos e o grau de esfericidade mostra o quanto o grão se aproxima da forma esférica.

D'Agostino (2004), define o arredondamento como o grau de abrasão de uma partícula demonstrado por quão agudas são suas bordas e cantos. E define que a esfericidade está relacionada com a forma geral da partícula, retratando a similaridade entre o comprimento da partícula, a altura e a largura.

Neville (1997), define como agregado lamelar a partícula em que a espessura é pequena em relação às outras dimensões, são aqueles achatados ou que possuem formatos de lâminas. E a forma irregular a partícula que tem as três dimensões significativamente diferentes.

4.22.2 Efeito parede e efeito de afastamento

O efeito parede ocorre quando se tem uma mistura com diâmetros de partículas de duas classes tão diferentes que a relação entre os diâmetros efetivos das partículas é tal que a superfície de contato do grão mais grosso (maior) pode ser considerada como um plano ao contato com as partículas finas, fazendo com que a região próxima à superfície das partículas maiores apresente uma porosidade maior que no restante do volume (LONDERO *et al.*, 2017).

Quando as partículas mais finas são grandes demais para se encaixarem nos vazios entre as partículas maiores, ocorre um afastamento dos grãos maiores, também provocando o aumento da porosidade e diminuição do empacotamento. Esse efeito de interação dos grãos menores sobre os maiores é denominado de efeito de afastamento (LARRARD, 1989).

5 MATERIAIS E METODOLOGIA

O presente capítulo descreve o roteiro experimental empregado, dividindo-o em três etapas principais. A primeira etapa compreendeu a escolha e caracterização dos materiais granulares utilizados na produção do concreto de pós reativos (CPR) aplicadas na pesquisa, assim como o processamento do vidro proveniente das garrafas do tipo *long neck*. São considerados materiais granulares todos os materiais secos constituintes das misturas de concreto; ou seja, cimento, agregados miúdos e adições. No presente trabalho foram utilizados como materiais granulares: Cimento, areia, pó de vidro, microssílica e pó de quartzo.

A segunda etapa consistiu em definir a formulação de referência, assim como as formulações para as substituições do agregado natural (areia) por pó de vidro provenientes de resíduos de garrafas do tipo *long neck* nas frações de 12,5; 25; 50; 75 e 100%, produção, moldagem dos corpos de prova e a cura do concreto.

Por último, cada mistura foi submetida a ensaios físicos e mecânicos para caracterização das propriedades do concreto, com o propósito de avaliar a eficiência da substituição gradual da areia pelo pó de vidro oriundos de garrafas do tipo *long neck*.

A caracterização dos materiais constituintes do concreto, dosagem e confecção dos corpos de prova utilizados na pesquisa foram realizadas no laboratório de ciências e engenharias da Universidade Federal de Alfenas-MG, Campus de Poços de Caldas.

5.1 MATERIAIS

5.1.1 Areia

A areia utilizada para a produção dos corpos de prova para ensaio foi uma areia ensacada de origem natural (grãos são mais esféricos), proveniente da região de Pirassununga, disponível no mercado e comercializada pela empresa Gato Neves materiais de construção, a mesma encontra-se de acordo com a com a NBR 7211 "Agregados para concreto - Especificação" (ABNT, 2009). Para essa pesquisa foram selecionadas a utilização das peneiras 30 (abertura de 0,6 mm), 50 (abertura de 0,3 mm), 100 (abertura de 0,15 mm), 200 (abertura de 0,075mm) na escala Mesh, como indicado na Figura 20. A utilização de areia como agregado máximo foi justificada pela obtenção de menor permeabilidade do concreto, juntamente com uma melhor homogeneização dos materiais, de modo a garantir a ausência de poros capilares e vazios no compósito.

Figura 20: Distribuição Granulométrica a areia utilizada retidas nas peneiras



Fonte: O Autor

Legenda: a) Peneira #30.

b) Peneira #50.

c) Peneira #100.

d) Fundo.

5.1.2 Vidro

O vidro utilizado para os ensaios desta pesquisa foi oriundo da coleta de garrafas de cerveja do tipo *long neck*. O propósito de adotar este material foi devido a sua elevada quantidade no meio ambiente em consequência de não possuir uma destinação final adequada. Todas as garrafas utilizadas foram selecionadas de uma mesma marca e de cor âmbar.

Inicialmente, 120 garrafas foram utilizadas para a execução desse trabalho passaram por um processo de limpeza, por meio da retirada de rótulos com imersão em água com sabão neutro para a remoção de resíduos. As garrafas, após higienização, foram previamente quebradas para posterior moagem por meio de um moinho mecânico de bolas até chegarem na granulometria da areia utilizada.

5.1.3 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento *Portland* (CP) do tipo CP V - ARI, da marca Cauê, cujas características são, de acordo com o fabricante, alta resistência inicial e alta resistência a sulfatos. De acordo com o fabricante, este cimento atende aos requisitos das normas NBR 5733 (ABNT, 1991) – Cimento *Portland* de alta resistência inicial - As Tabelas 3 e 4 apresentam a composição química e as propriedades do material.

Tabela 3 - Composição do Cimento CP-V – ARI, Cauê

Composição Química	Sigla	Método	Teor % em Massa
Dióxido de Silício	SiO ₂	NBR 9203	19,09
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	NBR 9203	4,38
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	NBR 9203	2,87
Óxido de Cálcio	CaO	NBR 9203	62,24
Óxido de Magnésio	MgO	NBR 9203	3,24
Anidrido Sulfúrico	SO ₃	NBR 9203	2,73
Óxido de Sódio	Na ₂ O	NBR 5747	0,09
Óxido de Potássio	K ₂ O	NBR 5747	0,51
Enxofre	S	NBR 5746	0,34
Flúor	F	Íons Seletivos	0,19
Resíduo Insolúvel	R.I	NBR 5744	0,77
Cal Livre	CaO(livre)	NBR 7227	1,08
Anidrido Carbônico	CO ₂	NBR 11583	1,51

Fonte: (CAUÊ, 2020)

Tabela 4 - Propriedades Cimento CP-V – ARI, Cauê

Ensaio	Resultado	Ensaio
Massa Específica (g/cm ₃)	0,9 a 1,2	NBR 6474
Superfície Blaine (cm ₂ /g)	4,419	NBR 7224
Expansibilidade (%)	0,23	NBR 11582
Resistência à Compressão (MPa)	1 dia 24,3 3 dias 39,3 7 dias 45,5 14 dias 54,4	NBR 7215
Tempo de Pega (min)	Início 186 Fim 240	NBR 11581
Índice de Finura (%)	#200 0,05 #325 0,36	NBR 12826

Fonte: (CAUÊ, 2020)

5.1.4 Microssílica

A microssílica utilizada possui coloração cinza e encontra-se na forma de pó. O material utilizado foi o da empresa Tecnosil Indústria e Comércio de Materiais de Construção LTDA. De acordo com certificado de análise do fabricante, a microssílica possui massa específica de 2,22 g/cm³, área superficial específica de 19,0 m²/g, diâmetro médio de partículas de 0,20 µm e densidade volumétrica de 0,45 g/cm³ e formato da partícula esférico. A composição química do material apresenta-se descrita na tabela 5.

Tabela 5 - Composição da Microssílica Tecnosil

Composição	Sigla	Resultado (%)
Óxido de Silício	SiO ₂	90
Óxido de Alumínio	Al ₂ O ₃	1,00
Óxido de Ferro	Fe ₂ O ₃	2,90
Óxido de Cálcio	CaO	1,10
Óxido de Magnésio	MgO	1,50
Álcalis	-	2,20
Perda ao Fogo	-	1,50
Umidade	-	0,1

Fonte: (TECNOSIL, 2019)

A sílica ativa foi adicionada na composição do CPR com objetivo de promover reações de hidratação secundária através de reações pozolânica resultante da primeira hidratação e preencher os vazios da mistura, além de diminuir a permeabilidade do concreto e aumentar a resistência ao ataque de agentes agressivos.

Tabela 6 - Propriedades da Microssílica Tecnosil

Propriedades Físicas	Resultados
Massa Específica (Kg/m ³)	2220,00
Superfície Específica (m ² /Kg)	20000,00
Diâmetro Médio (mm)	0,15

Fonte: (TECNOSIL, 2019)

5.1.5 Pó de quartzo

O material selecionado neste trabalho foi o pó de quartzo da Brasilminas, material de coloração clara, quase branca com peso específico 2,65 g/cm³, além disso ele é um material ultrafino, malha 1000, ou seja 0,00465625mm ou 4.6563µm.

O pó de quartzo foi inserido na mistura de CPR para compor a granulometria preenchendo os vazios por ser um material ultrafino e sobretudo, intensificar as reações pozolânicas da mistura, que atribuem um ganho de resistência considerável ao concreto, conforme a tabela 7.

Tabela 7 - Composição do Pó de Quartzo da Brasilminas

CARACTERÍSTICAS INFORMATIVAS		
Características Químicas Típicas – Referencial		
SiO ₂		99,66 %
Al ₂ O ₃		0,15 %
Fe ₂ O ₃		0,04 %
TiO ₂		0,10 %
Peso Específico (g/cm ³)		2,50 a 2,90
Tamanho médio de partícula (µm)		2,40 a 3,30
PROPRIEDADES CONTROLADAS		
Cor	Branca	IT BRM 19
Densidade Aparente Compactada (g/cm ³)	0,75 a 0,95	IT BRM 20
pH (solução aquosa 5%)	5,0 a 10,0	IT BRM 9
Retenção # 500 mesh (0,025 mm) (%)	Máx. 0,1	IT BRM 8
Umidade (%)	Máx. 1,0	IT BRM 10

Fonte: (BRASILMINAS, 2020)

5.1.6 Aditivo Superplastificante

Devido à grande quantidade de materiais finos, a mistura cimentícia tende a ficar seca, provocando redução na trabalhabilidade do produto desenvolvido e podendo causar o aumento do fator a/c do concreto. Assim para melhorar a fluidez do material e otimizar as propriedades mecânicas do concreto, foi feito uso de um aditivo superplastificante, o Glenium 51, este é um composto formado por uma solução aquosa a base de éter policarboxilato, cuja densidade é de 1,055 Kg/litro.

O aditivo dispersante superplastificante de 3ª geração a base de policarboxilato éter, cujo nome comercial é Glenium 51, foi doado pela Master Builder, produzido pela BASF S/A. Os polímeros de éter policarboxílico possuem largas cadeias laterais que se depositam na superfície das partículas de cimento iniciando o mecanismo de dispersão eletrostática. Com esse mecanismo, mesmo durante o início do processo de hidratação do cimento, o polímero continua atuando promovendo a dispersão das partículas. As especificações técnicas do aditivo encontram-se descritas na tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades do Superplastificante Glenium 51

Propriedades	Definição
Base química	Éter Policarboxílico
Aspecto	Líquido
Cor	Bege
pH	5 – 7
Densidade	1,067 – 1,107 g/cm ₃
Sólidos	28,5 – 31,5%
Viscosidade	< 150 cps

Fonte: BASF

5.1.7 Água de amassamento

A água utilizada nos processos realizados nesta pesquisa foi disponibilizada pela rede pública de abastecimento da cidade de Poços de Caldas-MG. Esta água está em conformidade com as recomendações da NBR/15900-09 e é considerada adequada para uso como água de amassamento para concretos e compósitos cimentícios sem necessidade de testes.

5.2 OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

5.2.1 Processamento dos vidros de garrafas *long neck*

Para transformar as garrafas do tipo *long neck* em frações menores foi necessário fazer o uso de um martelo, de forma a diminuir o tamanho do material, obtendo-se diferentes tamanhos de partículas para facilitar o processo de moagem em moinho de bolas, conforme figura 21.

Figura 21 - Fragmentos de vidros de garrafas *long neck* após trituração manual



Fonte: Do Autor

Com o intuito de se obter um produto com uma granulometria próxima à da areia utilizada, os fragmentos de vidro foram levados até o laboratório da UNIFAL-MG Campus de Poços de Caldas, onde os pedaços foram colocados em um jarro de aço inoxidável contendo esferas de aço forjado de diâmetros e massas variadas, conforme figura 22, e levados a um moinho de bolas (figura 23), marca e modelo não especificados, durante 7 minutos à 55 rpm, para a moagem do material. Este processo foi repetido por várias vezes, pois o jarro não tinha capacidade de moer todo material em uma única vez.

Figura 22 - Jarro de aço inoxidável e esferas de aço forjado



Fonte: Do Autor

Figura 23 - Moinho de Bolas utilizado



Fonte: Do Autor

5.2.2 Granulometria

Para a realização desse ensaio foi utilizada a Norma de especificação: NBR NM 248/2003 – Agregados – Determinação da composição granulométrica, a qual teve como princípio classificar a areia e o vidro proveniente das garrafas *long neck* quanto à sua composição granulométrica, construir sua curva granulométrica e determinar seu diâmetro máximo e módulo de finura.

O ensaio granulométrico teve como objetivo identificar a compatibilidade geométrica das amostras da areia natural com as do pó de vidro provenientes das garrafas do tipo *long neck* para viabilizar a substituição nas formulações assim como otimizar o empacotamento de partículas com uma distribuição mais homogênea dos materiais em todas as distribuições granulométricas.

Para a realização do ensaio utilizou-se da amostra de areia previamente seca em estufa e pó de vidro proveniente das garrafas *long neck*. Os equipamentos utilizados foram: balança Mart-e modelo ad3300 com precisão de 0,01g da massa da amostra de ensaio, peneiras Bertel da série normal, tampa e fundo das mesmas, agitador de peneiras suspenso da Solotest, escova ou pincel com cerdas macias.

Primeiramente foram coletadas duas amostras de 1000g da areia para fazer a prova e a contraprova conforme figura 24, que foram secas em estufa à 105° por 24h.

Figura 24 - Amostra de areia para o ensaio de granulometria



Fonte: Do Autor

Posteriormente, foi coletada uma amostra de 500g da areia que já havia sido seca em estufa para fazer a prova e outros 500g para fazer a contraprova. Para o pó de vidro proveniente das garrafas *long neck* não foi necessário a secagem em estufa, recolheu-se duas amostras de 500g provenientes da moagem em moinho de bolas.

Depois as peneiras foram encaixadas e organizadas em ordem crescente da base para o topo, também foram encaixados o fundo e a tampa, conforme figura 25. Em seguida elas foram agitadas por 5 minutos no agitador.

Após estes 5 minutos a peneira superior foi destacada, encaixada com o fundo avulso e a tampa e agitada manualmente por 1 minuto contínuo, por meio de movimentos laterais e circulares alternados, tanto no plano horizontal quanto no inclinado, até que a massa do material que passou para o fundo fosse inferior a 1% da massa do material retido na peneira. Este processo foi repetido para todas as outras peneiras.

Figura 25 - Agitador mecânico Solotest



Fonte: Do Autor

Ao final deste processo foi calculada a massa total do material retido em cada peneira, juntamente com a massa de material que ficou no fundo. Todo o procedimento foi repetido para a segunda amostra coletada, para a realização da contraprova.

5.2.3 Microscopia Óptica

O ensaio foi realizado no laboratório multiusuário na Universidade Federal de Alfena, Campus de Poços de Caldas-MG, foi utilizado um microscópio óptico de bancada marca Zeiss, modelo Scope A1. O ensaio teve como objetivo caracterizar morfologicamente os agregados (areia e pó de vidro) segundo sua angularidade e esfericidade, analisar como a forma e dimensão dos agregados podem interferir na resistência do concreto.

O objetivo da análise foi classificar morfologicamente as partículas de areia natural e pó de vidro provenientes das garrafas do tipo long neck, analisar a influência das formas das partículas envolvidas com a compactação do material relacionado ao empacotamento de partículas.

5.2.4 Fluorescência de Raios X (FRX)

O ensaio foi realizado no laboratório da Togni S/A Materiais Refratários, localizada na cidade de Poços de Caldas-MG no Equipamento Axios PW 4400/40 DY 1686. As pérolas para análise foram confeccionadas utilizando fundente tetraborato de Lítio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) 99,5 % e bromato de lítio (LiBr) 0,5%, utilizando-se de um cadinho de platina-ouro, onde realiza-se a

homogeneização do fundente e amostra. As pérolas foram levadas à mufla previamente aquecida a 1200°C. Foi realizada uma análise química semiquantitativa.

Foram utilizadas duas amostras, uma contendo material de garrafas de vidro consideradas descartável (*long neck*) e outro com material de garrafas do tipo retornável (litrão). Ensaio teve como objetivo classificar a qual tipo de vidro pertence as embalagens tipo *long neck* utilizadas para substituição da areia no concreto de pós reativos.

5.2.5 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As amostras de vidros do tipo long neck e Litrão foram caracterizados por DSC (Differential Scanning Calorimetry), ou Calorimetria Exploratória Diferencial. Esta técnica permite medir a diferença de energia fornecida à amostra e a um material de referência em função da temperatura, enquanto a substância em análise e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura.

As análises foram realizados no Laboratório da Universidade Federal de Alfenas-MG, Campus de Poços de Caldas. O equipamento utilizado foi da marca Netzsch, modelo STA 449F3. As análises foram feitas em atmosfera dinâmica de ar sintético, em cadinhos de alumínio com tampa perfurada com taxa de aquecimento de 20°C/min de 200 a 1200°C. O pó de vidro utilizado nesta análise foi menor que 0,075mm, com amostras do vidro do tipo Litrão contendo 18,2mg e amostra do tipo long neck contendo 14,5mg.

5.3 PROCEDIMENTO PARA O PREPARO DAS MISTURAS

5.3.1 Formulação

Para formulação dos concretos foram utilizados: cimento Portland CP-V-ARI da Cauê, areia do tipo normal brasileira de acordo com a ABNT NBR 7214:2015, microssílica, pó de quartzo, Glenium 51 do fabricante Basf S.A. e vidro moído (proveniente de garrafas do tipo *long neck*) em substituição percentual a areia.

A formulação utilizada como referência para a produção do concreto de pós reativos foi desenvolvida pelo Professor Luiz Antônio dos Reis da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais; Poços de Caldas, baseado no método de empacotamento de partículas, realizando-se também o ajuste da relação água/cimento, além do teor do aditivo superplastificante para ajuste de trabalhabilidade, conforme a tabela 09.

Tabela 9 - Formulação Referência Professor Luiz dos Reis

Formulação Referência Prof. Luiz dos Reis (em massa)		
Material	Relação em Massa	Consumo (Kg/m³)
Cimento	1	881,9733
Areia	1,019	898,7308
Vidro	-	-
Pó de Quartzo	0,164	114,6436
Microssilica	0,152	134,0599
Defloculante	0,035	30,869
Água	0,3	234,592

Fonte: (REIS, 2019)

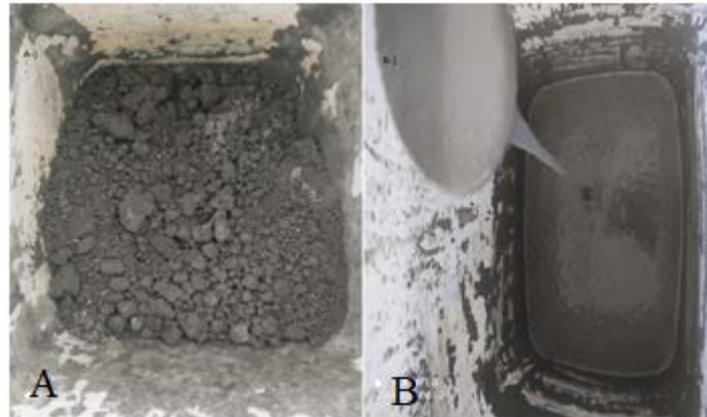
Definiu-se o do diâmetro máximo ($D_{\text{máx}}$) dos agregados fixou-se o diâmetro máximo como como 0,6mm referente a peneira número 30 na escala mesh e o diâmetro mínimo sendo o material retido até a peneira número 200 na escala mesh referente a 0,075mm. Conforme a necessidade do uso de menores diâmetros para diminuir a zona de transição e aumentar a resistência dos CPR;

Estimou-se a relação a/c (água/cimento) de acordo com a norma ABNT NBR 6118:2014 e a Classe de Agressividade Ambiental: visando a produção de um CPR sustentável, durável e de vasta aplicabilidade, o CPR foi especificado para atender a Classe de Agressividade Ambiental IV (muito forte, em ambiente industrial ou sujeito a respingos de maré). Logo, foi adotada a máxima relação água/materiais cimentícios de 0,45;

Fez-se o controle da umidade dos agregados, pois estes devem apresentar-se secos, para isso ele foram colocados em estufa por um período de 24h, evitando a diminuição na água adicionada devido à umidade dos agregados.

Ajustou-se a mistura, realizando-se dosagens experimentais analisando o teor adequado a demanda de água para garantir um índice de consistência satisfatório, inicialmente foi adotado uma relação água/cimento de 0,20 a qual não foi obtida a trabalhabilidade desejada, o processo se repetiu até que se a obtenção da fluidez desejada, o que ocorreu com uma relação água /cimento de 0,30 conforme figura 26.

Figura 26 - Relação água/cimento testadas, sendo: A: a/c 0,2 e B: a/c 0,3



Fonte: Do Autor

Para fins de comparação, a tabela 10 apresenta algumas das formulações utilizadas para fabricação do Concreto de Pós Reativos de autores que são referência neste tipo de concreto. Os valores das dosagens apresentam-se unitários com base na quantidade inicial de cimento.

Tabela 10 - Comparação da formulação referência, Professor Luiz dos Reis, com a literatura

Formulações Literatura (em massa)						
Autor	Cimento	Areia	Pó de Quartzo	Microssílica	Defloculante	Água
Referência, Luiz dos Reis	1	1,019	0,164	0,152	0,035	0,3
Richard e Cheyrezy, 1995	1	1,1	0,39	0,23	0,02	0,19
Aitcin <i>et al.</i> , 1996	1	1,432	0,298	0,326	0,027	0,28
Biz, 2001	1	1,43	0,3	0,32	0,01	0,29
Vanderlei e Giongo, 2006	1	1,101	0,235	0,246	0,02	0,216
Gusmão, 2017	1	1,01	0,241	0,252	0,03	0,19

Fonte: Do Autor

Ainda na tabela 10, pode-se observar que desde o início das pesquisas em CPR até as pesquisas mais recentes, não se chegou em um consenso de qual a quantidade ideal para cada material.

Assim foi possível observar que, apesar de ser um concreto com baixa relação a/c se comparado aos demais concretos, as formulações de CPR apresentados contêm composições com relação a/c desde 0,19 (bastante reduzida) até 0,29 (mais próxima da relação utilizada para o presente trabalho), fazendo com que este ainda não seja um fator cuja decisão de quantidade ótima seja unânime. Tal fator foi diretamente ligado à quantidade de areia e micropartículas que precisam ser hidratadas, além da combinação com o aditivo escolhido para a mistura.

As diferenças de valores entre a quantidade de areia foram bastantes expressivas, esta diferença foi considerável pois em cada uma das formulações a granulometria para a mistura foi feita de forma diferente, por vezes contendo peneiras mais grossas (acima da peneira 0,6 mm) ou mais finas (abaixo da peneira 0,150 mm) e até mesmo com métodos de empacotamento de partículas diferentes.

Foram produzidas e caracterizadas 5 formulações contendo pó de vidro moído proveniente das garrafas do tipo *long neck* contendo diferentes proporções em substituição da areia, além da formulação referência contendo apenas a areia como agregado sem adição de vidro, discriminadas a seguir:

F1 – Dosagem com 12,5% do vidro moído em substituição a areia.

F2 – Dosagem com 25% do vidro moído em substituição a areia.

F3 – Dosagem com 50% do vidro moído em substituição a areia.

F4 – Dosagem com 75% do vidro moído em substituição a areia.

F5 - Dosagem com 100% do vidro moído em substituição a areia.

5.3.2 Preparação da mistura

Nessa etapa foram realizadas duas formulações de concreto de pós reativos: o primeiro foi confeccionado como referência, ou seja, composto apenas pelas matérias primas convencionais (areia, microssílica, pó de quartzo, cimento e água) sem a adição parcial do pó de vidro provenientes das garrafas *long neck*. Essa formulação foi realizada de modo que tenha um caráter comparativo com os demais. A segunda formulação consistiu na substituição parcial de 12,5; 25; 50; 75 e 100% do agregado miúdo pelo pó de vidro das garrafas *long neck*.

Inicialmente, foram pesadas e separadas as quantidades necessárias dos materiais. Esta fase foi muito importante para o CPR, que apresenta muita sensibilidade à variação dos materiais e procedimentos na formulação.

A mistura dos materiais nas proporções indicadas iniciou-se com a pré mistura de todos os materiais secos com a ajuda de um misturador, por aproximadamente 7 minutos , alternando a rotações até a completa homogeneização, conforme figura 27.

Figura 27 - Preparação da mistura referência do concreto de pós reativos



Fonte: Do Autor

O preparo da pasta de cimento foi realizado em um misturador do tipo argamassadeira, com capacidade de vinte litros, de velocidade constante, com hélice naval e movimento rotacional. Após a homogeneização dos materiais secos, adicionou-se a água e o aditivo de forma gradativa, até se obter uma mistura com aspecto plástico e fluidez desejada, o que ocorreu em torno de aproximadamente 5 minutos.

Em seguida, para esse estudo de dosagem, foram moldados 15 corpos de prova para cada formulação, sendo eles divididos para os ensaios mecânicos e físicos do concreto.

5.3.3 Corpos de Prova

Os moldes utilizados para produção das amostras foram confeccionados em polímeros sintéticos de poli cloreto de vinila mais conhecido pelo acrônimo (PVC) conforme figura 28, que é um material rígido, inerte e não absorvente, conforme preconizado pela NBR 5738:2015 "Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto".

Moldes em formato cilíndrico com dimensões de 100mm de altura e 50mm de diâmetro respeitando o item da norma que recomenda que as amostras devem ter altura igual a duas vezes o diâmetro da base para ensaio de compressão (NBR 5738, 2015).

Figura 28 - Corpos de prova moldados em PVC



Fonte: Do Autor

A moldagem dos corpos de prova ocorreram imediatamente após o término da mistura, a pasta de cimento pronta foi vertida nesses moldes e adensadas com auxílio de uma haste metálica para eliminação das bolhas de ar. A colocação do concreto nas fôrmas foi realizada em velocidade constante, devido à grande fluidez do mesmo.

Para facilitar a futura desmoldagem, o interior dos moldes foi coberto com uma fina camada de lubrificante mineral em quantidade suficiente para possibilitar a desforma dos corpos de prova sem danos aos mesmos.

Os moldes foram vedados com filme plástico para evitar-se a percolação da pasta de cimento para fora da fôrma e perda de umidade para o ambiente.

Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e iniciou-se o processo de cura submersa à temperatura ambiente.

O adensamento do concreto é um fator essencial para garantir vida longa ao concreto, quando é bem feita, ela elimina os vazios preenchidos com ar na massa, dificultando assim a entrada de agentes agressivos no concreto que poderão corroer a armadura com o passar do tempo, outra vantagem de se realizar o adensamento de forma correta é que isso garante maior resistência mecânica ao elemento de concreto, favorecendo assim também o tempo de vida do material.

5.3.4 Cura

A cura dos corpos de prova de concreto é uma técnica que visa à hidratação das partículas de cimento, com o objetivo de diminuir os efeitos da perda prematura da água empregada na preparação da mistura. E, como consequência, minorar o surgimento de fissuras e trincas.

O processo de cura realizada para o concreto foi a cura por imersão em solução aquosa saturada com hidróxido de cálcio, a uma temperatura de 25 °C, onde os valores do pH, que ficaram entre 11 a 13, foram controlados com auxílio de um medidor da marca Nova Instruments, modelo:NI PHM, com Exatidão do pH em 0,2.

Os corpos de prova referentes a todas as formulações foram mantidos em imersão até atingirem as idades de rompimento, conforme figura 29.

Figura 29 - Corpos de prova das amostras de concreto de pós reativos em imersão



Fonte: Do Autor

5.4 ESTADO FRESCO

5.4.1 Trabalhabilidade

Levando em consideração que o concreto de pós reativos apresentou grande fluidez, coesão e alta trabalhabilidade, ou seja, um concreto muito plástico. Resultado do uso do super plastificante combinado ao alto teor de finos (cimento, microssílica e pó de quartzo) e um controle da distribuição granulométrica contínua dos agregados (areia e pó de vidro) apresentou características de um material auto adensável que pode escoar e ser moldado preenchendo cada

espaço vazio através, exclusivamente, de seu peso próprio por força gravitacional mantendo a homogeneidade da mistura sem que ocorra a segregação do material.

Portanto, tornou-se inviável a realização do teste de abatimento de cone. Sendo assim, a trabalhabilidade foi analisada visualmente e de forma tátil como mostra a figura 30. Para cada traço foram observadas as consistências e posteriormente moldados os corpos de provas cilíndricos de 5 X 10 cm.

Figura 30 - Análise visual da trabalhabilidade do concreto com relação a/c de 0,3



Fonte: Do Autor

5.5 ENSAIOS MECÂNICOS ESTADO ENDURECIDO

5.5.1 Retificação

Antes da realização dos ensaios, as amostras passaram por um processo de retificação, conforme recomendado pela NBR/5738-15 "Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto", em uma máquina de corte com atuador pneumático Bel Air, pressão máxima de 1,03 MPa, à velocidade de 400 rpm, com disco de corte e resfriamento da lâmina com água (figura 31).

Figura 31 - Atuador pneumático Bel Air



Fonte: Do Autor

Este procedimento foi necessário, particularmente para o ensaio de resistência à compressão, pois as amostras devem apresentar topos paralelos, lisos e íntegros, a fim de evitar concentrações de tensão locais nas amostras durante o ensaio, conforme figura 32.

Figura 32 - Corpo de prova antes (esquerda) e depois da retífica (direita)



Fonte: Do Autor

5.5.2 Ensaio de compressão

O ensaio foi então realizado visando analisar a influência da adição de vidro moído proveniente das garrafas *long neck* em substituição da areia natural na resistência à compressão, comparando os valores encontrados com os obtidos para o material de referência.

Os ensaios foram realizados no laboratório de concreto da Polimix, localizada na cidade de Poços de Caldas-MG, em uma prensa de concreto eletro hidráulica digital marca A.M.C, modelo 10014, com capacidade máxima de carga de 980,6 kN e controle manual de velocidade de aplicação de carga, com precisão: 0,098 kN conforme figura 33. Os corpos (3 para cada formulação e idade) foram rompidos aos 7, 14 e 28 dias contados a partir da moldagem. O valor da resistência mecânica adotada foi uma média aritmética dos valores de resistência à compressão de cada corpo de prova. O ensaio teve como objetivo analisar a segurança do material utilizando os resultados de resistência mecânica para cada uma das formulações.

O ensaio de compressão dos corpos de prova consistiu na aplicação de carga compressiva, de forma uniaxial, nos corpos de prova. Durante o ensaio, as placas comprimiram o material à uma taxa de deformação pré-determinada de 0,098 kN, onde a resposta à compressão do material foi mensurada pelas células de carga do dispositivo, conforme as placas comprimem o corpo de prova.

Nos ensaios de compressão para análise da resistência ao longo do tempo, foi monitorado apenas a força máxima aplicada pela prensa, a qual provocou a ruptura dos modelos. Para isso, o prensa utilizada para aplicação da força possuía célula de carga com dispositivo automático, que detectava o valor máximo atingido, e o registro era feito de forma digital. As deformações e carregamento aplicado foram lidos e analisados, a obtenção dos resultados de resistência à compressão foi necessário realizar os ajustes dos resultados através da Equação 1, adotando-se a metodologia padronizada pela norma brasileira ABNT NBR 5739:2009 “Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndrico”.

A resistência à compressão foi calculada através da seguinte expressão:

$$f_c = 4F / \pi D^2 \quad (1)$$

f_c - resistência à compressão, MPa;

F - carga máxima de ruptura, N;

D - diâmetro do corpo de prova, mm;

Figura 33 - Prensa hidráulica A.M.C modelo 10014



Fonte: Do Autor

5.6 ENSAIOS FÍSICOS ESTADO ENDURECIDO

5.6.1 Absorção e índice de vazios

O ensaio de absorção e índice de vazios dos corpos de prova estudados, foi realizado conforme preconiza a NBR 9778/2009 “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água e índice de vazios”.

O ensaio foi realizado no estado endurecido do concreto e, com base na norma técnica, para a realização deste ensaio foi necessário a utilização de 3 corpos de prova cilíndricos para cada para cada formulação de concreto (Figura 34) a ser analisado com dimensões de 05 cm de diâmetro e 10 cm de altura e este ensaio foi realizado aos 28 dias. Para o ensaio as amostras foram previamente secas em estufa com circulação e renovação de ar modelo SL-102 da Solab, a $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ pelo período de 72 horas e então tiveram suas massas registradas . Posteriormente os corpos de prova foram imersos em água dentro de um tonel pelo período de 72 horas. Após a etapa de secagem as amostras tiveram sua massa registrada submersos em água com auxílio de balança hidrostática, por fim cada amostra foi enxugada com pano úmido e mais uma vez

teve sua massa medida na condição saturado. Feitas as aferições das amostras, a absorção de água e o índice de vazios foram calculados.

O ensaio visou avaliar a durabilidade das amostras por meio dos resultados obtidos para cada uma das formulações.

Figura 34 - Corpos de prova pós secagem em estufa



Fonte: Do Autor

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

6.1.1 Granulometria

Em concretos, a seleção e combinação dos agregados apresentam influência dominante na qualidade do mesmo, assim as tabelas 11 e 12 mostram os resultados obtidos por meio do ensaio granulométrico da areia natural e do vidro moído proveniente das garrafas do tipo *long neck*, com suas frações delimitadas a granulometria desejada para a fabricação do concreto de pós reativos.

Tabela 11 - Médias dos ensaios granulométricos do pó de vidro garrafas *long neck*.

Médias das amostras de pó de vidro garrafas <i>long neck</i> com massa inicial de 500g		
Peneira #	% Retida	%Retido Acumulada
4	0,00	0,00
8	0,00	0,00
16	0,00	0,00
30	22,17	22,17
50	27,89	50,05
100	41,82	91,87
Fundo	8,13	100,00
Módulo de Finura		
1,64		
Diâmetro Máximo (mm)		
0,6		

Fonte: Do Autor

A partir dos resultados obtidos para os ensaios na faixa granulométrica desejada, observou-se que, no pó de vidro proveniente das garrafas *long neck* a maior fração granulométrica apresentou-se na peneira #100 com diâmetro de 0,15mm com 41,82% em massa retidos com módulo de finura de 1,64 e foi caracterizada como um material muito fino, o agregado máximo no pó de vidro (0,6mm) representou 22,17% em massa da amostra.

Tabela 12 - Média dos ensaios granulométricos da areia natural

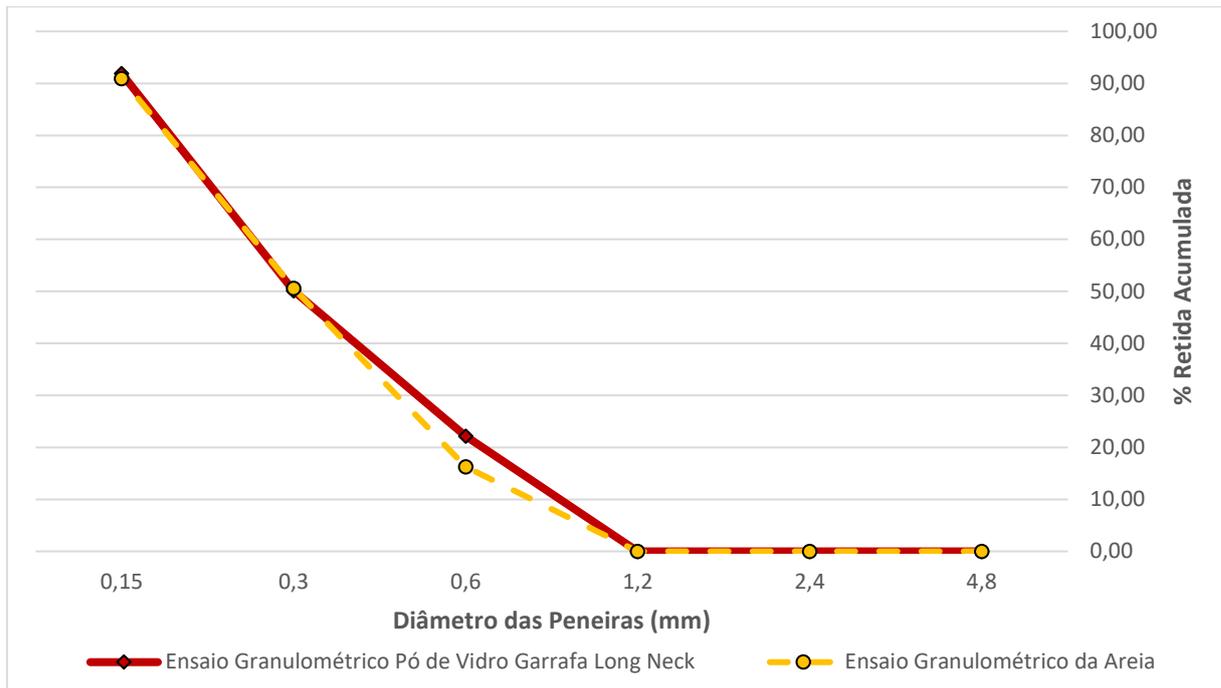
Médias das amostras da areia natural com massa inicial de 500g		
Peneira #	% Retida	%Retido Acumulada
4	0,00	0,00
8	0,00	0,00
16	0,00	0,00
30	16,24	16,24
50	34,33	50,57
100	40,35	90,92
Prato	9,09	100,00
Módulo de Finura		
1,58		
Diâmetro Máximo (mm)		
0,6		

Fonte: Do Autor

A partir dos resultados obtidos observou-se que, na areia a maior fração granulométrica apresentou-se na peneira #100 com diâmetro de 0,15mm com 40,35% em massa retidos com módulo de finura de 1,58 caracterizando-se como uma areia muito fina, o agregado máximo na areia (0,6mm) representa 16,24% em massa da amostra.

Verificou-se que, tanto a areia e o pó de vidro proveniente das garrafas *long neck* apresentam granulometria contínua, sendo a distribuição dos grãos na areia mais homogênea entre as peneiras 30 a 100 mesh, ambas possuindo partículas de todos os diâmetros, desde o valor máximo (0,6mm) até o valor mínimo (0,075mm).

O pó de vidro apresentou a curva granulométrica mais suave e alongado, conforme verificado no gráfico 1. Por outro lado, a areia, mesmo apresentando uma distribuição contínua, apresentou granulometria com distribuição mais estreita, concentrada nas peneiras inferiores, material retido nas peneiras de 50 a 100 mesh, tabela 12. Nesse intervalo a curva granulométrica apresentou-se retilíneo, gráfico 1, mostrando que a quase totalidade dos tamanhos concentram-se entre 0,15 e 0,30 mm.

Gráfico 1 - Curva granulométrica do vidro moído da garrafas *long neck* e areia natural

Fonte: Do Autor

As curvas de granulometria da areia e do pó de vidro provenientes garrafas *long neck* (gráfico 1), comparadas entre si, demonstram que os tamanhos de partículas dos diferentes pós foram relativamente próximos, sendo assim, como a diferença entre os diâmetros das faixas granulométricas não foi tão elevada, pode-se considerar a substituição parcial e total da areia por pó de vidros.

Assim a granulometria ideal do agregado foi relacionada a uma distribuição que apresentou uma uniformidade de distribuição, que de maneira geral levou a uma considerável diminuição dos vazios do concreto, em outras palavras uma distribuição granulométrica contínua na qual o tamanho das partículas aumentaram continuamente e de forma proporcional, que de maneira geral apresentou quantidades suficientes de partículas finas para preencher completamente os espaços vazios deixados pelas partículas mais grossas, pois houve interação entre elas.

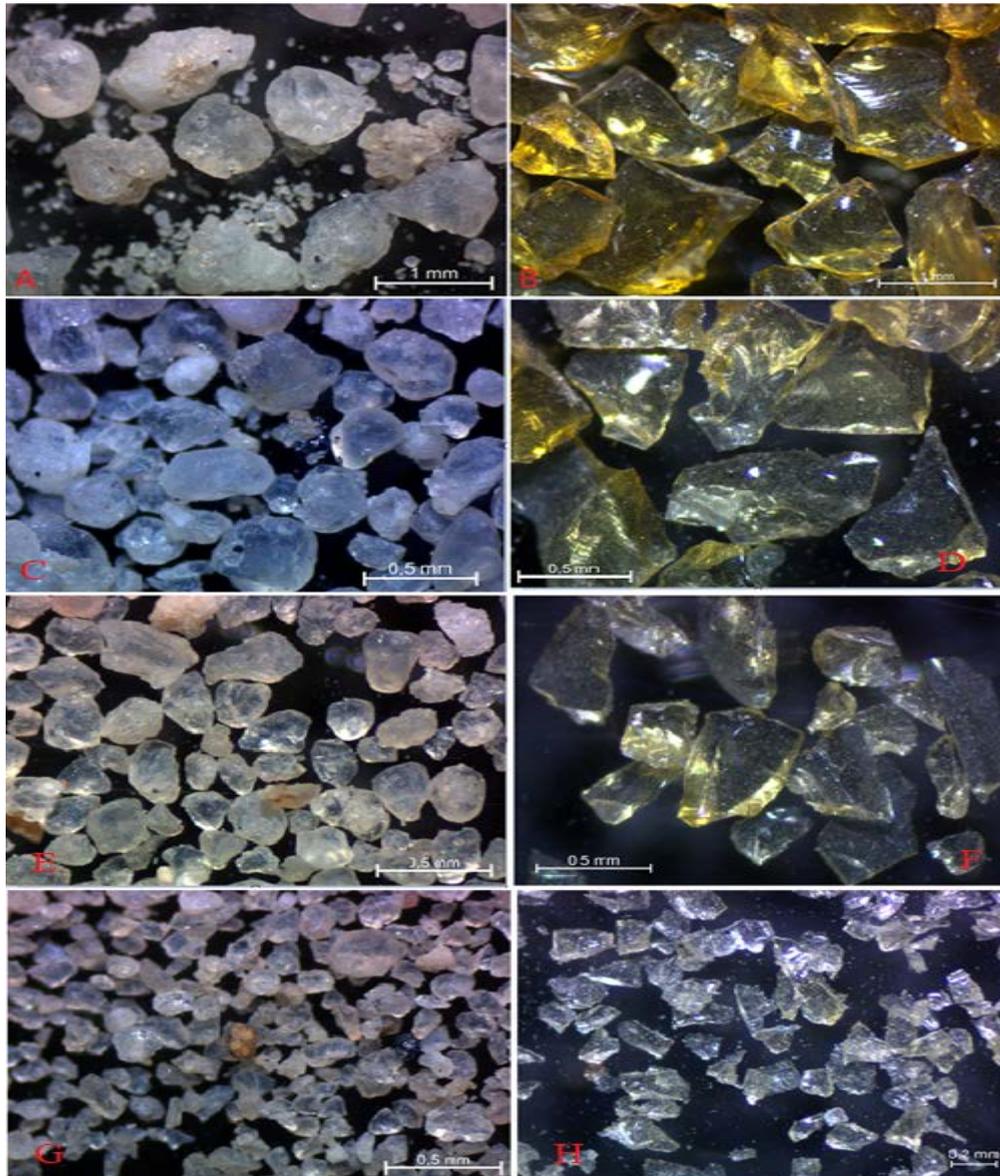
Nas amostras de concreto de pós reativos analisados, os aumentos das tensões médias de ruptura foram relacionados a vários fatores e entre os quais está a melhor distribuição granulométrica dos agregados. Isso ocorreu pelo fato da elevação da densidade de empacotamento que proporcionou o preenchimento de vazios entre partículas maiores por partículas menores, que por sua vez foram preenchidas por partículas ainda menores e assim sucessivamente.

A partir do exposto, constata-se que a distribuição granulométrica da areia e pó de vidro, obtida através de peneiramento, não foi suficiente para caracterizar suas propriedades e que foi necessário a incorporação de medidas da forma, morfologia dos grãos, para auxílio na interpretação da distribuição granulométrica da areia e do pó de vidro. Uma vez que partículas alongadas passaram por peneiras de malhas inferiores. Nestes casos, a interpretação dos resultados de curva granulométrica foram distorcida uma vez que agregados de dimensões maiores se apresentaram presentes em grupos de peneiras de malha menor.

6.1.2 Microscopia Óptica

A figura 35 mostra as imagens referentes aos ensaios de microscopia óptica dos agregados areia natural e pó de vidro proveniente das garrafas *long neck*, de acordo com a faixa granulométrica utilizada nas peneiras 30, 50, 100 e 200 na escala mesh.

Figura 35 - Imagens (luz refletida) das amostras



Fonte: Do Autor

Legenda: a) Areia #30.

b) Vidro moído #30.

c) Areia #50.

d) Vidro moído #50.

e) Areia #100.

f) Vidro moído #100.

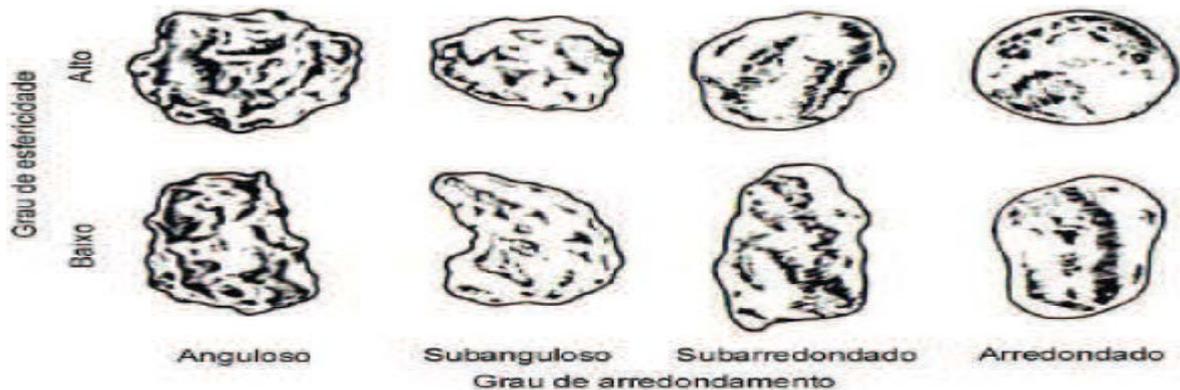
g) Areia #200.

h) Vidro moído #200.

Para os agregados miúdos, a norma brasileira NBR 7389:1992 "Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto" sugere a avaliação da forma

por meio de inspeção visual, a olho nu ou com auxílio de lupa. Segundo a referida norma, cada grão deve ser avaliado e comparado com uma tabela padrão de forma (Figura 36). Esta tabela padrão define em alto ou baixo o grau de esfericidade dos grãos.

Figura 36 - Padrões gráficos dos graus de esfericidade e arredondamento



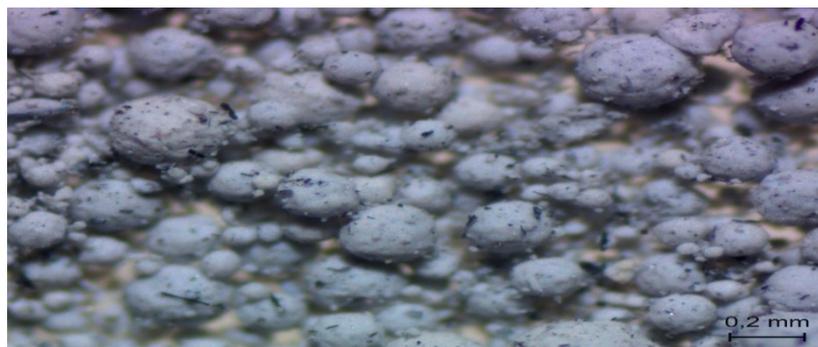
Fonte: ABNT NBR 7389:1992

Após realização da avaliação visual das imagens obtidas, dos grãos analisados em cada abertura de peneira e comparando-as com a classificação apresentada na Figura 41, conclui-se que as partículas de vidro são angulosas e lamelares com baixo grau de esfericidade, enquanto as partículas da areia natural são subarredondadas com alto grau de esfericidade.

As observações realizadas foram qualitativas, tornando-se possível observar por meio das fotos que o agregado miúdo proveniente das garrafas *long neck* apresentam a superfície dos grãos mais lisa do que os agregados miúdos de areia natural.

Também foi realizado o ensaio de microscopia nas amostras de microsílica utilizada, do fabricante Tecnosil, conforme as figuras 37, comprovando a forma arredondada com alto grau de esfericidade.

Figura 37 - Imagem (luz refletida) amostra de microsílica Tecnosil



Fonte: Do Autor

Os agregados miúdos naturais, como a areia, tendem a ser arredondados, devido ao efeito cumulativo de colisões de suas partículas. Já o processo de trituração, como utilizado do presente trabalho para moer o vidro proveniente das garrafas *long neck*, produziram partículas angulares de forma afiada. Agregados com formas mais esféricas e arredondadas, do ponto de vista da resistência final do concreto, são preferíveis, pois promovem um melhor empacotamento.

Assim, um agregado (areia ou pó de vidro) com determinada distribuição granulométrica e com determinada morfologia, dependendo da proporção em que foi introduzido ao concreto, resultou em valores de empacotamento distintos. Isso ocorreu, pois, a disposição das partículas na mistura foi de fundamental importância para um melhor empacotamento dos materiais no concreto.

6.1.3 Fluorescência de Raios X (FRX)

As composições químicas das amostras de vidro provenientes das garrafas tipo *long neck* e Litrão, obtidas via ensaio de FRX, estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - FRX das amostras de vidro tipo *long neck* e Litrão

Determinações	<i>Long Neck</i> (%)	Retornável (%)
Al ₂ O ₃	2,06	2,29
SiO ₂	70,90	69,50
TiO ₂	0,00	0,05
Fe ₂ O ₃	0,85	0,74
CaO	11,00	11,0
MgO	0,59	1,13
Na ₂ O	14,00	14,30
K ₂ O	0,28	0,69
Cr ₂ O ₃	0,03	-
P ₂ O ₅	-	0
SO ₃	0,06	0,07
CO ₂	0,30	0,13

Fonte: Do Autor

Após comparação entre as composições encontradas, observou-se que os teores da maioria dos óxidos apresentaram-se similares em todas as amostras de vidro. Verificou-se a presença predominante de SiO_2 que é o formador da rede vítrea, enquanto a presença dos óxidos Na_2O e CaO tratam-se de um típico vidro sodo-cálcico. Outros óxidos aparecerem em menores quantidades. Esses valores são bem próximos dos encontrados na literatura, tabela 14.

Tabela 14 - Valores referência na literatura

Autor	SiO_2	Na_2O	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	Fe_2O_3	SO_2
Fernandes (1999)	70	5,3	8,1	-	-	-	-	-
Akerman (2000)	72	12,5	11	2	1,5	1	0,3	-
Shelby (2005)	74	13	11	1,5	0,2	0,3	0,4	0,2

Fonte: Do Autor

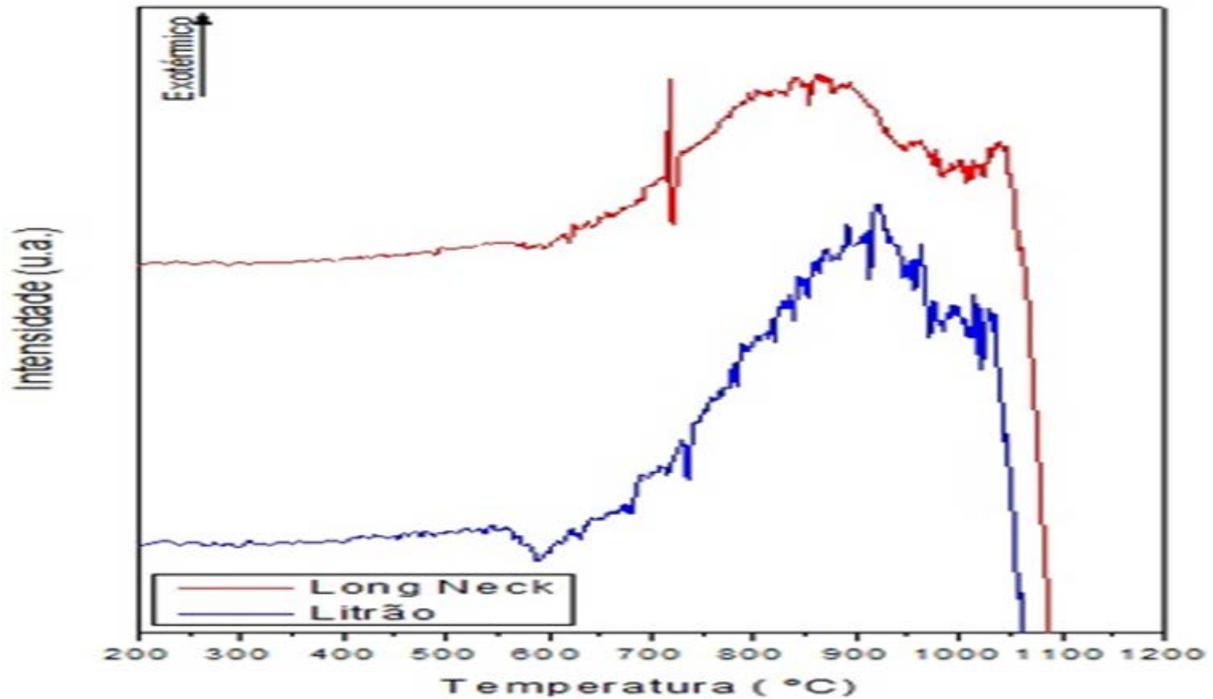
Os componentes vitrificantes, ou formadores de rede vítrea, são os óxidos passíveis de se transformar em vidros, no caso da referente amostra, temos o SiO_2 . Referente aos fundentes, no caso referente a amostra, temos o Na_2O . Quanto aos estabilizantes, outro tipo de modificadores de rede, na amostra tem-se o CaO .

Já a coloração âmbar, muito empregada em embalagens, foi conferida pelo óxido de enxofre combinado ao óxido de ferro. No caso de embalagens de bebidas o vidro marrom ou âmbar desempenha um papel fundamental na preservação do conteúdo dos mesmos, que seria danificado pela passagem de radiações ultravioletas.

6.1.4 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Através das amostras de vidro provenientes da garrafa tipo *long neck* e Litrão, foi possível a obtenção das curvas DSC que estão apresentadas no gráfico 2. Analisando as curvas obtidas foi possível determinar as temperaturas características de cada amostra.

Gráfico 2 - Ensaio DSC das amostras de vidros provenientes das garrafas tipo long neck e Litrão



Fonte: Do Autor

Para a amostra *long neck* (gráfico 2 em vermelho), observa-se uma mudança na linha base, que ocorre em 560°C, referente à temperatura de transição vítrea (T_g). Logo após a ocorrência de T_g , inicia-se a formação de um pico de cristalização do vidro, que se apresenta alargado, sendo que a temperaturas do pico de cristalização (T_p) ocorre em 860°C. Mas podemos deduzir que há a formação de outro pico de cristalização, a temperatura de início de cristalização (T_c) ocorreu em torno de 1150°C, mas não foi possível observar totalmente o pico de cristalização devido às limitações do aparelho, o limite da temperatura foi 1100°C.

Ao analisarmos a amostra da garrafa tipo Litrão no gráfico 2, (curva azul), podemos observar um comportamento similar à amostra descrita anteriormente. A T_g ocorreu aproximadamente na mesma temperatura: 550°C. Também é possível a identificação de um pico de cristalização logo após a T_g , apesar deste apresentar o mesmo formato, ele encontra-se um pouco mais fino e seu pico de cristalização apresenta-se deslocado para a direita, resultando em uma T_g um pouco superior: 940°C. Com isso pode-se dizer que não houve grande diferenças nas curvas DSC das amostras analisadas, ambas apresentam composições vítreas parecidas. E provavelmente não há uma pureza em seus reagentes de partida, levando em consideração a curva de cristalização obtida.

6.2 ENSAIOS MECÂNICOS ESTADO ENDURECIDO

6.2.1 Ensaio Mecânica: Compressão

Para o ensaio de compressão foram utilizados 3 corpos de prova cilíndricos 100mmx50mm para cada uma das formulações para rompimento nas datas pré determinadas de 7, 14 e 28 dias, sendo o resultado para cada uma das datas a média entre a ruptura das 3 amostras. em todas as formulações ocorreu um aumento gradativo da resistência mecânica decorrente da hidratação do cimento e a formação de silicato de cálcio hidratado.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão e a evolução das resistências em 7, 14 e 28 dias apresentam-se nas tabelas 15 a 17 a seguir.

Tabela 15 - Ensaio de Resistência a Compressão em Idade de 7 Dias

Ensaio de Resistência a Compressão em Idade de 7 Dias						
Corpo de Prova	Ref. (MPa)	12,5 (MPa)	25% (MPa)	50% (MPa)	75% (MPa)	100% (MPa)
Amostra 01	90,15	64,17	66,56	71,21	72,82	77,88
Amostra 02	89,85	65,43	65,04	69,88	74,07	76,69
Amostra 03	91,69	65,68	65,63	71,07	73,9	76,85
Média	90,56	65,09	65,74	70,72	73,60	77,14
Desvio Padrão	0,99	0,81	0,77	0,73	0,68	0,65

Fonte: Do Autor

Tabela 16 - Ensaio de Resistência a Compressão em Idade de 14 Dias

Ensaio de Resistência a Compressão em Idade de 14 Dias						
Corpo de Prova	Ref. (MPa)	12,5 (MPa)	25% (MPa)	50% (MPa)	75% (MPa)	100% (MPa)
Amostra 01	101,41	72,09	74,79	80,1	81,92	86,67
Amostra 02	101,04	73,26	72,87	78,62	84,25	84,29
Amostra 03	103,14	73,81	73,64	79,95	83,21	85,45
Média	101,86	73,05	73,77	79,56	83,13	85,47
Desvio Padrão	1,12	0,88	0,97	0,81	1,17	1,19

Fonte: Do Autor

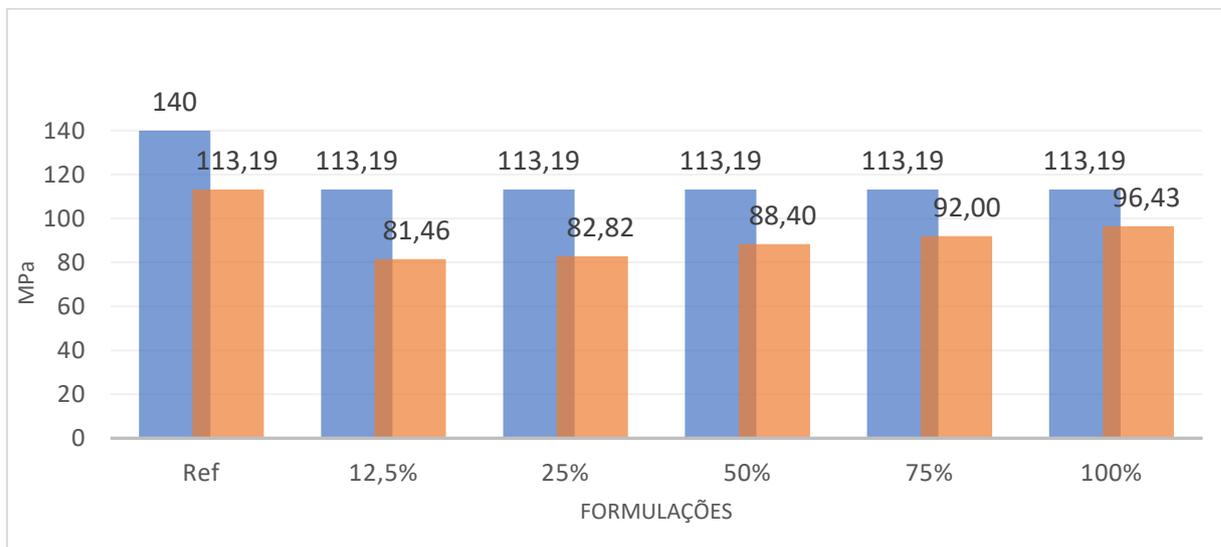
Tabela 17 - Ensaio de Resistência a Compressão em Idade de 28 Dias

Ensaio de Resistência a Compressão em Idade de 28 Dias						
Corpo de Prova	Ref. (MPa)	12,5 (MPa)	25% (MPa)	50% (MPa)	75% (MPa)	100% (MPa)
Amostra 01	112,68	80,22	83,66	89,01	91,03	97,35
Amostra 02	112,27	81,79	81,92	87,36	92,59	95,87
Amostra 03	114,61	82,36	82,88	88,84	92,38	96,06
Média	113,19	81,46	82,82	88,40	92,00	96,43
Desvio Padrão	1,25	1,11	0,87	0,91	0,85	0,81

Fonte: Do Autor

A partir da formulação experimental era esperado uma resistência mecânica a compressão de 140 MPa aos 28 dias para a formulação referência, ao qual foi obtido o valor de 113,19 MPa, 19,15% menor do que o previsto, conforme o gráfico 3.

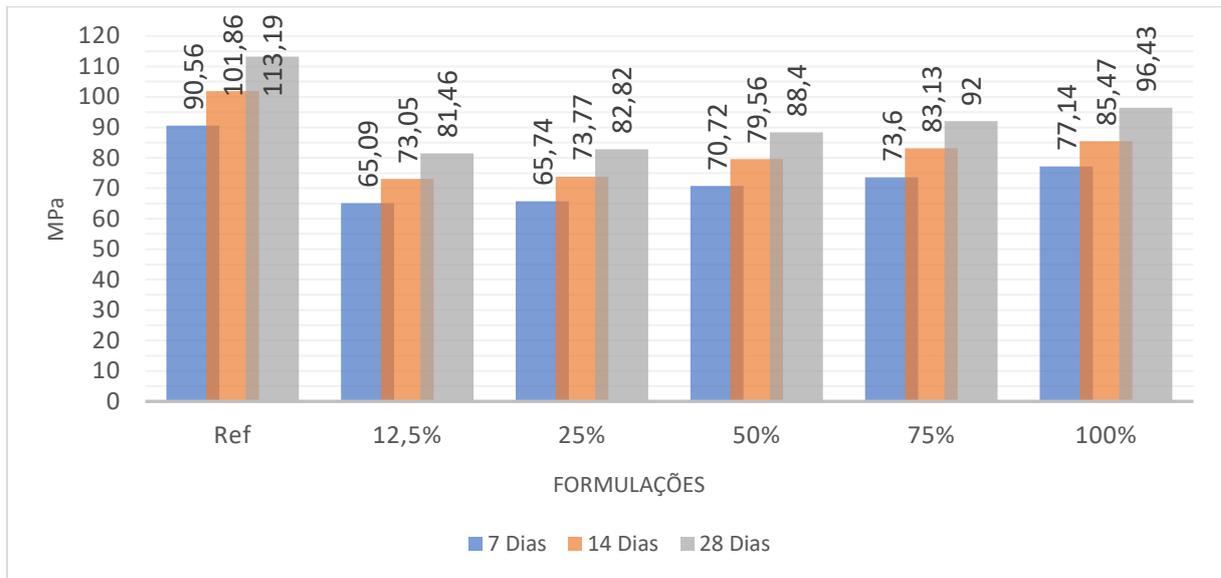
Gráfico 3 - Comparativo da Resistência Mecânica Média aos 28 dias



Fonte: Do Autor

Analisando as tabelas 15 a 17 e o gráfico 4, observou-se que a formulação referência apresentou desempenho superior às demais formulações estudadas, referente a resistência à compressão, com um valor médio de $113,19 \pm 1,25$ MPa aos 28 dias.

Gráfico 4 - Resistência Média Por Idade de Rompimento



Fonte: Do Autor

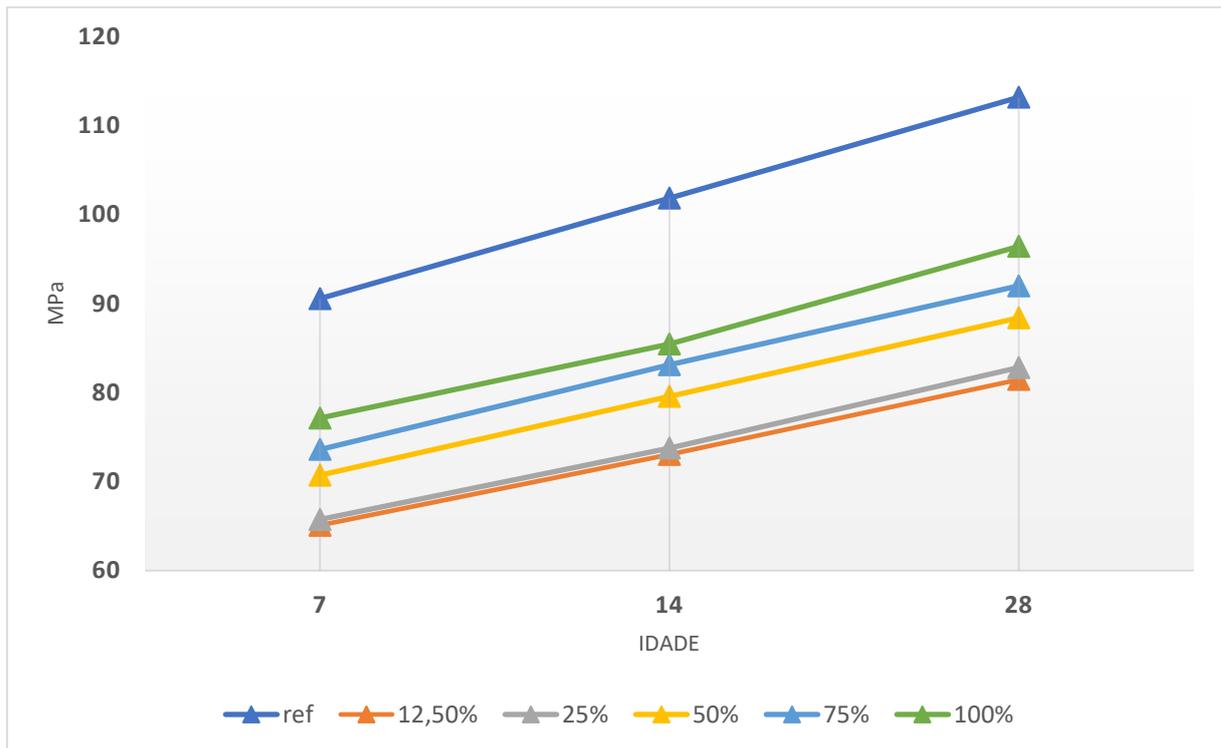
A formulação de 100% de substituição da areia por vidro moído proveniente de garrafas *long neck* foi a formulação que apresentou os melhores valores de resistência à compressão em relação as demais substituições atingindo 85% do valor da composição de referência, com um valor de $96,43 \pm 0,81$ MPa. A resistência mecânica aos 28 dias diminuiu à medida em que a substituição de areia por vidro foi menor. As formulações com 12,5% e 25% de substituição apresentaram os menores valores de resistência mecânica (cerca de 72% da resistência mecânica da formulação de referência), sendo muito semelhantes estatisticamente.

De forma geral, observou-se que o aumento do teor de reciclados miúdos (pó de vidro) teve um acréscimo percentual da resistência à compressão. Esse acréscimo de resistência mecânica (com o aumento do teor de pó de vidro em substituição a areia) ocorreu devido a presença de frações granulométricas que, quando dividiram-se em minúsculas frações, passaram a apresentar atividade pozolânica, ou seja, o resíduo de vidro quando em contato com a água, passou a reagir quimicamente com hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentícias. Essa reação pozolânica mostrou-se eficiente para preenchimento de espaços vazios, melhorando assim, a resistência e impermeabilidade do concreto.

No que se refere a formulação referência, nas resistências à compressão, a morfologia dos grãos da areia natural foi responsável pelas maiores resistências mecânicas dos corpos de prova confeccionados. A maior resistência mecânica se deu pelo maior empacotamento dos grãos e pela maior adesão entre as fases da microestrutura, gerando um concreto com menores quantidades de vazios e conseqüentemente com maior densidade de massa.

Em relação a evolução na resistência mecânica de todas as formulações por idade (7, 14 e 28 dias), conforme gráfico 5, se deu pelo fato que quando o concreto foi carregado nas primeiras idades, as microfissuras tenderam a se propagar mais facilmente nas áreas mais porosas, em direção a outras áreas, seguindo caminhos preferenciais de ruptura. Porém, com o tempo, esses vazios foram preenchidos com produtos de hidratação e tornaram-se uma área menos porosa e mais resistente.

Gráfico 5 - Evolução Por Idade da Resistência



Fonte: Do Autor

Em geral, a resistência do concreto aumentou com a idade enquanto as partículas não hidratadas de cimento continuaram a formar produtos de hidratação o que ocasionou a uma diminuição do volume total de poros, em virtude da hidratação das partículas de cimento, que ocorreram ao longo do tempo, a resistência à compressão dos concreto aumentou com a idade. Os cristais de hidróxido de cálcio e de silicato de cálcio começaram a preencher os espaços vazios antes ocupados pela água de hidratação.

Pode-se dizer que a resistência à compressão do concreto foi uma das propriedades mais importantes na avaliação do desempenho a resistência mecânica do concreto de pós reativos, pois é o principal parâmetro que o engenheiro utiliza na avaliação da capacidade de resistir esforços sem que haja ruptura e, geralmente, adotada por ocasião do dimensionamento da estrutura. A resistência de um concreto está relacionada com a sua estrutura interna e está diretamente ligada com a

segurança estrutural. Sendo assim de fundamental importância na avaliação da substituição do agregado natural (areia) por resíduo de vidro moído proveniente das garrafas tipo *long neck*.

Após realizado o ensaio de compressão, o impacto causado nos corpos de prova pela força aplicada durante o ensaio de resistência foi possível constatar a ruptura por cisalhamento dos corpos de prova apresentados nas figuras 38.

Figura 38 - Fratura nos corpos de prova aos 28 dias



Fonte: Do Autor

Legenda: a) Formulação referência.

b) Com substituição de 12,5% de vidro.

c) Com substituição de 25% de vidro.

d) Com substituição de 12,5% de vidro.

e) Com substituição de 12,5% de vidro.

f) Com substituição de 12,5% de vidro.

Por causa da alta intensidade de tensão atingida durante os ensaios, alguns modelos se romperam de forma brusca lançando estilhaços de concreto ao seu redor, características de um material frágil com baixa ductilidade.

Por causa da heterogeneidade do concreto e do estado de tensões a que foi submetido, observa-se que o perfil da fissura geralmente não é reto. As microfissuras se propagaram criando uma zona de propagação de fratura.

Com base nestas premissas, observou-se que os valores inferiores de resistência, encontrados entre a formulação experimental e o resultado obtido para o corpo de prova referência foram influenciados por alguns possíveis problemas na fase de preparação, como na moldagem, onde os corpos de prova foram moldados com golpes. Porém, o material tinha consistência mole e, por isso, não permitia golpes firmes, sendo levemente adensado. Assim, resultando em uma má compactação do material nos moldes, permitindo uma maior quantidade de vazios na mistura. Acredita-se que o ideal seria adotar a moldagem dos corpos de prova, em mesa vibratória, para proporcionar melhor compactação e maior homogeneização do material, contribuindo, assim, para diminuir a disparidade entre os resultados encontrados.

Quanto a preparação da mistura que foi feita por argamassadeira manual em alta rotação por um período de tempo curto, notou-se que o ideal seria um processo por argamassadeira com hélices helicoidais do tipo planetária em baixa rotação por um período de tempo mais longo.

O aumento no consumo de água pode ser explicado pela alta finura e maior área específica dos materiais utilizado a serem hidratados, o que levou a uma reação inicial muito rápida com o superplastificante, comprometendo sua eficiência, pois o acréscimo de água a mistura causou um aumento na relação água/cimento, prejudicando as propriedades de resistência mecânica do concreto.

A forma dos grãos também influenciou na resistência mecânica e no empacotamento dos CPR, sendo que a resistência mecânica foi maior na formulação referência contendo agregados de forma mais arredondadas e esféricas, onde a substituição do agregado resultou em diferenças no concreto de pós reativos no estado endurecido. Nas resistências à compressão, a forma do grão da areia natural, foi responsável pela maior resistências mecânicas dos concretos confeccionadas. A maior resistência mecânica se deu pelo maior empacotamento dos grãos, pois gerou um concreto com menores quantidades de vazios e conseqüentemente com maior densidade de massa.

6.3 ENSAIOS FÍSICOS ESTADO ENDURECIDO

6.3.1 Absorção de Água e Índice de Vazios

Como pela estrutura de poros, penetram, se difundem, ou percolam todos os agentes agressivos do meio ambiente, foi de suma importância analisar a absorção de um concreto de pós reativos no estudo de durabilidade. Considerou-se que o ensaio de absorção por imersão caracterizou melhor a estrutura dos poros, uma vez que permitiu avaliar a quantidade total de água absorvida conforme os dados fornecidos pela tabela 18.

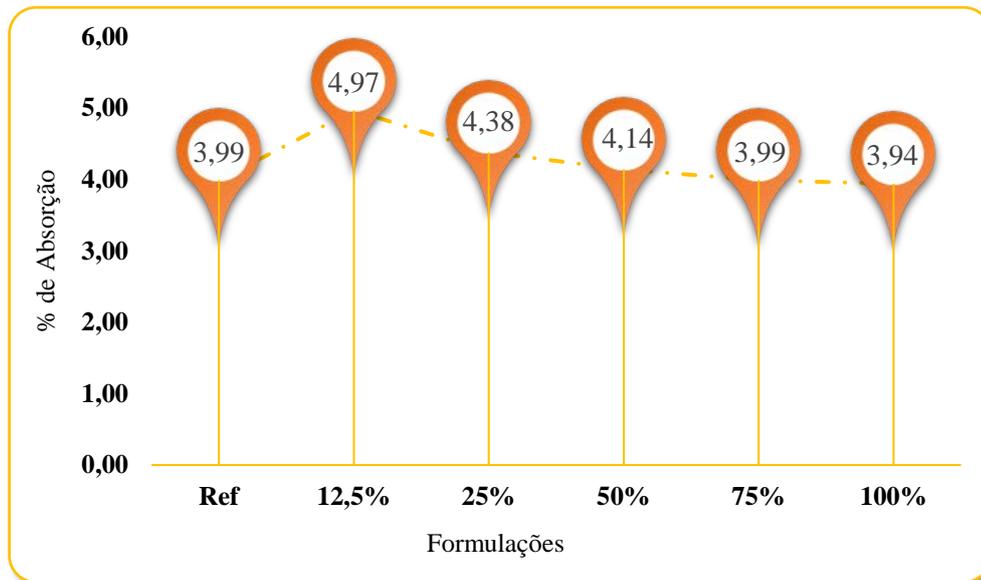
Tabela 18 - Ensaio de Absorção e Índice de vazios referente a todas as formulações

Ensaio de Absorção e Índice de vazios			
Formulação	Massa Seca Ms, Kg (Média)	Massa imersa Mi, Kg (Média)	Massa Úmida Msat, Kg (Média)
Referência	0,3594	0,2117	0,3737
Substituição de 12,5%	0,3511	0,2085	0,3685
Substituição de 25%	0,3498	0,2076	0,3651
Substituição de 50%	0,3391	0,2053	0,3532
Substituição de 75%	0,3275	0,2017	0,3406
Substituição de 100%	0,3257	0,2008	0,3385

Fonte: Do autor

O ensaio físico mostrou que, em relação a absorção de água (gráfico 6), o concreto com substituição de 100% (da areia natural por vidro moído das garrafas *long neck*) obteve o melhor resultado com 3,94% de absorção de água, seguida das formulações referência e 75% ambas com valores estatisticamente iguais de absorção de 3,99% e a formulação de 12,5% apresentou o menor desempenho ao ensaio com 4,97% de absorção.

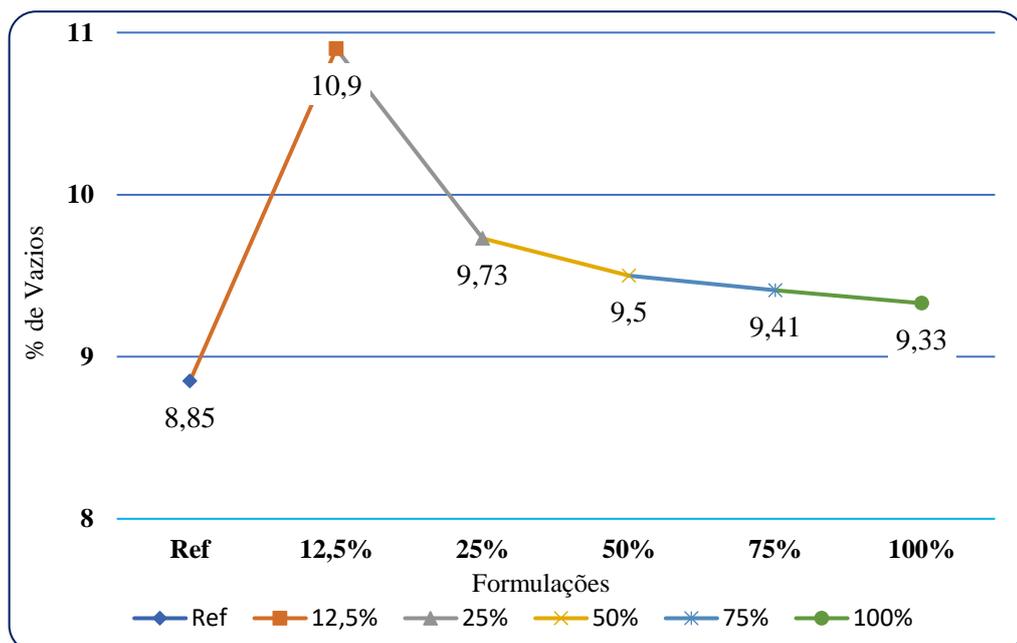
Gráfico 6 - Ensaio Absorção de Água referente a todas as formulações



Fonte: Do Autor

Em relação ao índice de vazios, gráfico 7, os melhores resultados encontrados foram na formulação referência com 8,85% de vazios e nas substituições de 100% e 75% apresentando valores de 9,33% e 9,41% de vazios respectivamente e o menor desempenho a formulação de 12,5% com o valor de 10,9% de vazios.

Gráfico 7 - Ensaio Índice de Vazios referente a todas as formulações.



Fonte: Do Autor

Observou-se um decréscimo nos valores referentes ao índice de vazios à medida que a proporção de substituição de vidro moído por areia aumentou, o comportamento do volume de vazios da composição em função da relação entre as partículas se deu à medida que aumentou a porcentagem de finos na composição, em um primeiro estágio, o volume de vazios diminuiu, pois os finos preencheram os vazios dos grãos mais grossos. No entanto, quando atingiram certo limite, os finos começaram a interferir na acomodação dos grãos mais grossos e o efeito de afastamento foi preponderante, elevando o índice de vazios (gráfico 7). Quanto mais vazios na composição granulométrica, menor foi o empacotamento dos grãos.

Assim, foi possível a constatação que, o ensaio de índice de vazios relacionou-se diretamente com os resultados de resistência mecânica das formulações, pois observou-se que a porosidade exerce influência negativa sobre a resistência a compressão, uma vez que os poros reduziram a área da seção transversal e atuaram como concentradores de tensão uma vez que facilitaram o início das fissuras e, com isso, uma possível fratura. A distribuição de tamanhos de poros e a porosidade total alteraram as propriedades mecânicas do concreto, pois com a diminuição da porosidade possibilitou o aumento dos esforços de compressão.

O estudo da absorção de água e a porosidade do concreto funcionaram como indicadores da durabilidade do concreto endurecido que é definida como a sua capacidade de resistir à ação das intempéries e ataques químicos, pois a água permeia os poros do concreto, levando com ela substâncias que podem produzir a deterioração do concreto ou, no caso de íons de cloreto, corrosão do reforço de aço.

Os valores de índice de vazios e absorção de água encontram-se dentro da normalidade para argamassas ou concretos de granulometria reduzida, como é o caso do CPR. Para o valor de índice de vazios, as formulações apresentaram-se dentro do esperado quando comparado a estudos relativos à concretos como o de Silva (2006), que apresentou valores de índice de vazios para concretos em suas amostras de até 16% em absorção de água e 10% em índices de vazios nas misturas.

A origem dos vazios no interior das amostras foi provocado por um possível problema com a velocidade de mistura dos materiais no misturador, visto que, para se atingir a homogeneização e fluidificação da mistura foi necessária empregar a velocidade mais alta.

7 CONCLUSÕES

O presente estudo teve por objetivo avaliar o comportamento do concreto de pós reativos com substituição parcial e total da areia natural por resíduo de vidro proveniente das garrafas tipo *long neck*, tanto no que se refere às propriedades mecânicas como físicas.

Para os ensaios de caracterização das matérias primas usadas como agregado no concreto de pós reativos (areia natural e pó de vidro proveniente de garrafas do tipo *long neck*), observou-se que as partículas dos grãos possuem compatibilidade geométrica e que a substituição do agregado natural (areia) por pó de vidro foi viável e em todas as frações de substituições, pois tanto a areia e o pó de vidro apresentam granulometria contínua, compatibilidade geométrica e similaridade química.

Considerando-se que a eficiência do concreto está no atendimento dos propósitos que venham a suprir as necessidades do mercado, no que se referem às suas características físicas, mecânicas e socioeconômicas, a adição do pó de vidro provenientes das garrafas tipo *long neck*, como agregado para o concreto, não demonstrou ganho de resistência. Para os ensaios mecânicos de compressão, a formulação referência apresentou desempenho superior às demais formulações estudadas, referente a resistência à compressão, com um valor médio de $113,19 \pm 1,25$ MPa aos 28 dias. A formulação com 100% de substituição da areia por vidro foi a formulação que apresentou os melhores valores de resistência à compressão em relação às demais substituições, atingindo 85% do valor da composição de referência, com um valor de $96,43 \pm 0,81$ MPa. A resistência mecânica aos 28 dias diminuiu à medida em que a substituição de areia por vidro foi menor. As formulações com 12,5% e 25% de substituição apresentaram os menores valores de resistência mecânica (cerca de 72% da resistência mecânica da formulação de referência), sendo muito semelhantes estatisticamente.

Os ensaios físicos (absorção de água e índice de vazios) mostraram que, em relação ao índice de vazios, o concreto referência obteve o melhor resultado (8,85%) seguido das formulações com 100% e 75% com 9,33% e 9,41%, respectivamente. A formulação de 12,5% apresentou o menor desempenho com 10,9%. Em relação à absorção de água, os melhores resultados encontrados foram para a formulação referência e nas substituições de 100% e 75%, apresentando valores estatisticamente iguais de 3,99%. O menor desempenho foi o da formulação de 12,5% com o valor de 4,97%.

Os ensaios físicos e mecânicos mostraram que a substituição de areia pelo vidro moído nas proporções analisadas, de uma maneira geral, pode ser uma opção viável na construção civil. Assim tornando-se uma possibilidade para que este tipo de resíduo tenha uma destinação

mais sustentável. Mas a utilização desse material ainda exige estudos sobre seu desempenho em aplicações específicas, por meio de normas para especificações técnicas referentes a segurança e durabilidade como, por exemplo, a relação água e cimento, a espessura do cobrimento da armadura, dimensões mínimas para elementos estruturais e a abertura máxima de fissura. Somente com tal conhecimento este concreto pode ser inserido e considerado com a devida segurança em projetos de engenharia.

Foi possível a identificação das temperaturas características de ambas amostras vítreas. Essas temperaturas se apresentaram parecidas, levando à dedução que a composição química desses vidros é parecida.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Partindo-se da ideia inicial deste projeto, com finalidade o aperfeiçoamento deste trabalho, sugere-se como trabalhos futuros:

Realização de ensaios complementares como ensaio de compressão com idades de 1 e 3 dias, ensaio de flexão, tração, microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Realização de novas formulações com adição de vidro em relação a massa de cimento, analisar a melhor faixa granulométrica para essa substituição, assim como a variação do tipo de cimento.

Estudo da diferença de quantidades de aditivo para cada uma das formulações, variando sua percentagem na mistura, para analisar o ganho ou perda de resistência devido a quantidade de aditivo nas misturas e atingir o menor percentual de água na mistura para que tenha boa trabalhabilidade;

Estudo da interferência da temperatura com cura térmica para as formulações apresentadas, avaliando o incremento ou não de resistência proporcionado apenas pela variação na temperatura de cura dos corpos de prova;

O aumento no número de corpos de prova para ensaio de compressão, a fim de aumentar a precisão dos resultados por meio de uma maior amostragem, deixando o valor com uma maior significância estatística.

Utilização de matérias na escala nano, como, por exemplo, a nanossílica provenientes do processo de sol gel.

REFERÊNCIAS

- AITCIN, P. C.; BONNEAU, O.; POULIN, C.; DUGAT, J.; RICHARD. **Reactive powder concretes: from theory to practice**. Concrete International. v. 18, n. 4, p. 47-49, Apr. 1996.
- AITCIN, P. **Cements of yesterday and today: Concrete of tomorrow**. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 9, p. 1349-59, 2000.
- AKERMAN, M. **Natureza Estrutura e Propriedades do Vidro**, CETEV (Centro Técnico de Elaboração do Vidro), 2000.
- ALLENA, S., NEWTON, C. M. . **Ultra High Strength Concrete Mixtures Using Local Materials**. Trabalho apresentado no 2010 Concrete Sustainability Conference, Dubai, 2010.
- ALMEIDA, I. **Concretos de Alto Desempenho**. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005. V2, Cap. 38, p. 1159-1193.
- ALMEIDA, S. L. M. **Aproveitamento de rejeitos de pedreiras de Santo Antônio de Pádua – RJ para produção de brita e areia**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia/Construção Civil) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ALVES, O. L.; GIMENEZ, I. F.; MAZALI, I. O. Vidros. **Cadernos temáticos-química nova na escola**, 2001.
- AMBEV – **Relatório de Sustentabilidade**, São Paulo, 2016. Disponível em: https://www.ambev.com.br/conteudo/uploads/2017/05/Ambev_Relat%C3%B3rio_Sustentabilidade_2016.pdf . Acesso em: 31 mai. 2021.
- ARAÚJO, E. B. Vidro: uma breve história, técnicas de caracterização e aplicações na tecnologia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Carlos - Sp, v. 19, n. 3, p.325-329, 03 set. 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Aplicações do Cimento**. São Paulo, 2019. Disponível em: < <https://abcp.org.br/cimento/aplicacoes-documento/>>. Acesso em: 20 jun. 2021. São Paulo: ABCP, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768: Aditivos químicos para concretos de cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7212: Execução de concreto dosado em central – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26: Agregados – Amostragem**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 30: Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 33: Concreto – Amostragem de concreto fresco**. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **A química de fazer vidro**. 2014. Disponível em <<http://www.abividro.org.br/videoexplicativo/a-quimica-do-fazer-vidro>>. Acesso em: 12 Abril, 2021. São Paulo: ABIVIDRO, 2014.

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

BARBOSA, M. T. G. **Avaliação do comportamento da aderência em concretos de diferentes classes de resistência**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 203 p. 2001

BASF. **Ficha Técnica do Produto**. São Paulo, 2019. Disponível em <<https://cdn.ntcbrasil.com.br/wp-content/uploads/glenium-51-basf-especificacao-completa.pdf/>>. Acesso em: 11 jun. 2021.

BATISTA, G. **Incoporação de nanopartículas de niobato de lantânio em vidro telurito para obtenção de vitrocerâmica funcional**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, 2018.

BAUER, E. *et al.* Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais[...]** Florianópolis: ANTAC,2005. p. 95- 105. 2005.

BAUER, L.A. **Materiais de construção**. 5.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 2v. 935p. 1994.

BHANDARI, P. S; TAJNE, K.M. Ese of Waste glass in cement mortar. **Internacional Journal of Civil and Structural Engineering**, 2013.

BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2001.

BLEECK, T. **Particle packing; an effective approach to optimized design of ultra-high strength and self-compacting concretes**. University of New South Wales at the Australian Defence Force Academy. Final Thesis Report. 17 p. 2011.

BOWEN, P. **Electrostatic repulsion between particles in cement suspensions: domain of validity of linearized Poisson-Boltzmann equation for nonideal electrolytes**, Cem. Concr. Res. 33, 6. p. 781-791. 2003.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 307: Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para gestão dos resíduos da construção civil. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 17 jul. 2002. nº 136.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm. Acesso em: 19 mar.2021.

BRASILMINAS. **Utilização do Quartzo na Construção**. Guarulhos, 2020. Disponível em <<https://brasilminas.net/produto/quartzo/>>. Acesso em: 11 jun. 2021.

BRUNAUER, S. and COPELAND, L. E. The chemistry of concrete. **Journal American Chemical Society**. p. 309. 1964

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

CALLISTER, W. Jr.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, n. 39, p. 748 - 753, 2009.

CASTRO, A. ; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos – SP. 15 p. 2009.

CEMPRE, Compromisso Empresarial Para Reciclagem. **Aliança formada por empresas e associações submete à análise do Ministério do Meio Ambiente modelo sustentável de logística reversa de embalagens**. 2013. Disponível em: <http://cempre.tecnologia.ws/ci_2013-0102_desafios.php>. Acesso em: 20 Maio, 2021.

CHAPPUIS, J. Rheological measurements with cement pastes in viscosimeters: a comprehensive approach. In: **Rheology of Fresh Cement and Concrete**, 1991. London. p. 3-13. 1991.

CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). **Cement and Concrete Research**, out. 1995. v. 25, n. 7, p. 1491–1500. Acesso em: 7 ago. 2021.

CIMENTOS CAUÊ. **Cimento Cauê Estrutura**. São Paulo, 2020. Disponível em: <<https://brasil.intercement.com/produto/cimento-caue-estrutura/>>. Acesso em: 11 jun. 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 307/2002**. Legislação. Brasília, Distrito Federal, Brasil: DOU nº 136, de 17 de julho de 2002, Seção 1, p. 95-96.

COPOLLA, L. TROLI, R. CERULLI, T. *et al.* **The influence of materials on the performance of reactive powder concrete**. In: International Congress on HighPerformance Concrete, Performance and Quality of Concrete Structures, 1996, June, Florianópolis: Brasil. Florianópolis: High Performance Concrete, p.502-513. 1996.

CORDEIRO, L. N. P. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 2009.

CRENTSIL, K. S; BROWN, T.; TAYLOR, A. **Recycled glass as sand peplacement in premix concrete**. In: **Eco-Recycled Australia and CSIRO** - Guide Specification. Austrália. 2001.

D'AGOSTINO, L. Z. **Uso de finos de pedra no processo de argamassa de assentamento**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia/Construção Civil) – Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

DALZELL, W.R. **Arquitetura: O Brasil Conhecimento em Cores**. 2. ed. Rio de Janeiro: Melhoramentos, 1977.

DUCMAN, V., MLADENOVIC, A. **Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali – silica reactivity**. **Cement and Concrete Research**, Volume 32, Issue 2, Pages 223–226. February 2002.

ECYCLE. **Todos os tipos de vidros são recicláveis?** (2015). Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/tipos-de-vidro/>> Acesso em: 05 nov. 2016

ELLIOT, S.R. **Physics of Amorphous Materials**. Essex: Longman, 1989.

FERNANDES, M. H. V. **Introdução à Ciência e Tecnologia do Vidro**. Universidade Aberta, 1ª Edição, Lisboa. 1999.

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

FORMAGINI, S. **Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro 2005.

- GHIO, V.A. **The rheology of fresh concrete and its effect on the shotcrete process**. 1993. 193p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade da Califórnia, Berkeley. 1993.
- GODINHO, K. O.; HOLANDA, J. N. F.; SILVA, A. G. P. da. Obtenção e avaliação de propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos à base de argila e vidros reciclados. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 320, Dez. 2005.
- GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. 2002, 139p. Tese (Doutorado), Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.
- GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto: um novo material para dosagens estruturais**. 2001. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
- GRASS, Lincoln; SEIDLER, Nelson. Avaliação da resistência à compressão de concretos dosados com pós-reativos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 52º, 2010, Fortaleza. **Anais[...]** IBRACON, 2010.
- GRZESZCZYK, G.; KUCHARSKA, L. Hydrative reactivity of cement and rheological properties of fresh cement pastes. **Cement and Concret Research**, v. 20, n. 2, p. 165-174, Mar. 1990.
- GUSMÃO, A. C. **Utilização do concreto de pós reativos como material de reparo – ênfase na resistência de aderência**. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2017.
- HARTMANN, C.T.; HELENE, P.R.L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilato destinado a concretos de cimento Portland**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2003.
- HASPARYK, N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali agregado e caracterização avançada do gel exsudado**. 2005. 326 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo. PINI; Brasília, DF : SENAI, 1992.
- HERMANN, A.; LANGARO, E. A.; LOPES, S. H.; KLEIN, N. S. **Empacotamento de partículas de cimento e sílica ativa em pastas pelo uso de modelo analítico**. **Ibracon**. ISSN 1983-4195. 2015.
- IDIR, R.; CYR, M. A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**. pg. 1309-1312. 2012.
- ISAIA, G.C. HELENE, P. R. L. TUTIKIAN, B.F. **Concreto de alto e ultra alto desempenho. Concreto: ciência e tecnologia**. 1 ed. São Paulo. IBRACON, p. 1283- 1325. v.2. 2011.

ISHIKAWA, P. H. **Concreto de Alto Desempenho com Areia Artificial**. Boletim Técnico da FATEC. São Paulo, 2010.

JAMKAR, S. S.; RAO, C. B. K. Index of Aggregate Particle and Texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning. **Cement and Concrete Research**, Tarrytown, US, v.34, n. 11, p. 2021-2027, 2004.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: Contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2000.

JOHN, Vanderley M; AGOPYAN, Vahan. **Reciclagem de Resíduos da Construção**. Seminário Reciclagem de resíduos sólidos domiciliares. São Paulo, 2000

JORNAL DO VIDRO. **História do vidro no Brasil**. Rio de Janeiro 2015. Disponível em: <<https://www.jornaldovidro.com.br/single-post/2015/10/20/Hist%C3%B3ria-do-Vidro-no-Brasil-parte-1/>> . Acesso em 24 out. 2021.

LARRARD, F. Ultrafine particles for the making of very high strength concretes. **Ciment and Concrete Research**. v. 19, p. 161-172, 1989.

LIMA, S. A; ROSSIGNOLO, J. A. **Estudo das características químicas e físicas da cinza da casca de castanha de caju para uso em materiais cimentícios**. Acta Scientiarum Technology, 2010.

LONDERO, C.; LENZ, L. A; SANTOS, Í. M. R.; KLEIN, N. S. Determinação da densidade de empacotamento de sistemas granulares compostos a partir da areia normal do IPT: comparação entre modelos de otimização de distribuição granulométrica e composições aleatórias. **Cerâmica**, n. 63, p. 22-33, 2017.

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**, n. 51, p. 318 – 324, 2005.

LUCAS, D.; BENATTI, C. T. **Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil**. Universidade do Vale do Taquari – UNIVATES, 2008.

MACGREGOR, J. G. Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't. **Concrete International**, v. 16, n. 5, p. 45-52, 1994.

MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glasspowder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 36, 2012. p. 205-215.

MEDEIROS, M. H.; ANDRADE, J. J.; HELENE, P. **Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto**. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. G.C. ISAIA. 1. ed. São Paulo, IBRACON, 2011.

MEHTA K. P.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto Estrutura, Propriedades e Materiais**, São Paulo. PINI, 574 p. 1994.

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

MENOS UM LIXO. **Reciclável x Reciclado, Embalagens Longa Vida.** São Paulo 2018 disponível em: <<https://www.menoslixo.com.br/posts/reciclavel-x-reciclado-embalagens-longa-vida/>>. Acesso em: 26 Jan. 2021.

MIJNSBERGEN, J.; The Delftse Zoom Housing Project **Use of recycled materials as aggregates in the construction industry-** v2 publ. 3 e 4. Bruxelas ETN Recycling in construction, Março Setembro 2000.

MOLIN, D. C. C. D. **Adições Minerais para Concreto Estrutural.** São Paulo: Editora IBRACON, V1. Cap. 12, p. 346-373. 2005.

MONTEIRO, P. J. M. **Caracterização da microestrutura do concreto: fases e interfaces; aspectos de durabilidade e de microfissuração.** São Paulo, 1993a. 138p. Tese de Professor Livre Docente do Departamento de Engenharia de Construção Civil da USP. 1993.

MORANVILLE, M. **Microstructure of high performance concrete.** Berkeley, California, 153p. University of California, Berkeley. 1992.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** Editora Pini, 2 ed., São Paulo: 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: PINI, 734p. 1982.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, I. R. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas - princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazenda Arte Editorial, 224 p. 2000a.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico.** Ed. Fazenda Arte, S. Paulo, 224 p. ISBN 85-86425-15. 2000b.

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**, p. 197 – 203. 2012.

PAIVA, H. *et al.* Effects of a water-retaining agent on the rheological behavior of a single-coat render mortar. **Cement and Concrete Research**, n. 36, p. 1257 - 1262, 2006.

PANDOLFELLI, V. C. et al., **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico.** São Paulo: Fazenda Arte, 195p. 2000.

PAUL, A. **Chemistry of Glasses.** 2. ed. Londres: Chapman and Hall, 1995.

PAULON V.A. **A Microestrutura do Concreto Convencional.** In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** São Paulo: IBRACON, 2v. p. 583-604. 2005.

PETROU, M. F. et al. A unique experimental method for monitoring aggregate settlement in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 809-816, May. 2000.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 11. ed. Rio de Janeiro: Globo, 307p. 1987.

PINHEIRO, F. C. . **Evolução do uso do vidro como material de construção civil**. 2007. 64 f. Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco, Itatiba, 2007.

PINTO, R.O. **Contribuição ao estudo de métodos de dosagem para concreto de alto desempenho (CAD) empregando materiais da região de Goiânia**. Goiânia: UFG, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

PINTO, T. P. **Reciclagem de resíduos da construção urbana no Brasil**. In *Reciclagem de Resíduos como Materiais de Construção Civil*. São Paulo, 1996.

RAVINDRARAJAH, R.S.; TAM, T.C. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. **Magazine of Concrete Research**. v. 37 n. 130, p.29-38. March 1985.

RECICLOTECA. **Vidro: história, composição, tipos, produção e reciclagem** (2016). Disponível em: <https://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/vidro/>. Acesso em: 06 jun. 2021.

REGOURD, M. 32-RCA. Résistance chimique du béton. **Matériaux et Constructions**, Paris, v.14, n.80, p.130-137, mars/avr. 1981.

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

REPETTE, W. L. Concretos de Última Geração: Presente e Futuro. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: IBRACON, Cap 49, 2005.

RESPLENDINO, J. **Les bétons fibrés ultra performants (BFUP). Perspectives offertes vis-à-vis de la pérennité et la maintenance des ouvrages**. In: *Colloques sur les Ouvrages d'Art*, Toulouse, 2006.

RIBEIRO, A. O. **Estudo de resíduo da lapidação de vidro para incorporação em argamassas de cimento Portland**. 2015. 86 f. Dissertação. (PósGraduação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, set. 2015.

RICHARD, P. CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. In: **Cement and Concrete Research**, vol. 25, n. 07, p.1501-1511. Oct, 1995.

RIGHI, D., KÖHLER, L., TABARELLI, A.; KIRCHHOF, L.; LIMA, R. . **Análise de concretos produzidos com vidro moído quando submetidos à elevadas temperaturas**. Jornadas Sul Americanas de Engenharia Estrutura. 2012.

ROMANO, R. C. O. et al. **Impacto do tipo de misturador e do tempo de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 109–118, 2009.

SANTOS, D. P. **Influência do resíduo de vidro nas propriedades de uma argamassa colante**. 135f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro. 2016.

SARTORI, F. R. **Concreto de alto desempenho com microsilica**. 163 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Rio Grande do Sul. 1995.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 556 p. 2008.

SHELBY, J. E. Introduction to Glass Science and Technology, 2nd Edition - Paperback, **Royal Society of Chemistry**, 2005.

SHELBY, J.E. **Introduction to glass science and technology**. New York: The royal society of chemistry, p.1-244. 1997.

SHI, C. *et al.* A review on ultra-high-performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, Changsha - China, v. 101, p. 741–751, 2015.

SILVA JÚNIOR, F. A. **Avaliação do efeito da adição de resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formulação de compósitos cimentícios**. 2014. 183 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SILVA, C. *et al.* O. **Análise crítica dos requisitos e critérios de qualidade da argamassa colante**, São Paulo, pg.45-61. 2003.

SILVA, E. F.; VASCONCELOS, P. H. C. O. Efeito do Tipo de Superplastificante e sua Dosagem na Fluidade de Pastas de Cimento Para Concreto de Alto Desempenho. In: 44° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Belo Horizonte, 2002. **Anais[...]** Minas Gerais: IBRACON, 2002.

SILVA, N. G. da. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SILVA, P. C. G; MIRANDA, L. F. R. Análise da influência do controle granulométrico nas características físicas e mecânicas de agregados reciclados para pavimentação. In: ENTAC – ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2008, Fortaleza, Ceará. **Anais...12**, 10 p. Fortaleza, Ceará. 2008.

SIMÕES, L. J. ; **Estudo da aplicação de resíduo de vidro laminado na produção de concreto**. 2013. 142 f. Dissertação (Pós-Graduação) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SOROUSHIAN, P. Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. **Construction and Building Materials**, Volume 29, Pages 368-377. 2012.

STREHLAU, V. I.; POPADIUK, S. **Avaliação da composição e da funcionalidade da embalagem de cerveja, segundo o envolvimento do consumidor**. Revista de Ciências da Administração, Florianópolis, v. 5, n. 10, p. 15, jul/dez 2003.

TECNOSIL. **Concreto com o uso de Sílica Ativa**. Itupeva, 2019. Disponível em: <<https://www.tecnosilbr.com.br/silica-ativa/>>. Acesso em: 11 jun. 2021.

TIECHER, F. B. **Reação álcali-agregado: Avaliação do comportamento de agregados do sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TOKUDOME, N. . Concreto de alto desempenho já é passado. **Massa Cinzenta – Itambé**, 2008. Disponível em: <<https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/concreto-de-alto-desempenho-ja-e-passado/>> . Acesso em: 28 fev. 2021.

TRISTÃO, F. A. **Influência da distribuição granulométrica da areia nas propriedades das argamassas de revestimento**. 219f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VANDERLEI, Romel D.; GIONGO, José S. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 8, n. 33, p. 115-148, 2006.

VARSHNEYA., A.K. **Fundamentals of Inorganic Glasses**. London: Academic Press, 1994.

VIEIRA, F. M. P. **Estudo do comportamento da aderência da barras de aço no concreto de alta resistência com adição de microsilica**. Porto Alegre, 108p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - CPGEC/UFRGS. 1994.

YANG, M.; JENNINGS, H. M. **Influences of mixing methods on the microstructure and rheological behavior of cement paste**. Advanced Cement Based Materials, v. 2, n. 2, p. 70–78, mar. 1995.

ZACHARIASEN, W. H. The atomic arrangement in glass. **Journal of The American Chemical Society**. Chicago, Illinois, p. 3841-3851. 05 out. 1932.

ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. C. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 2017.

ZARZYCKI, J. **Glasses and the Vitreous State**. New York: Port Chester Melbourne, 1991.