



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais
Doutorado

INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE MOLDAGEM E DE CURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO

por

CARLOS MAVIAEL DE CARVALHO

*Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal da
Paraíba para obtenção do grau de Doutor*

João Pessoa-PB
Dezembro/2019

CARLOS MAVIAEL DE CARVALHO

**INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE MOLDAGEM E DE CURA NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor.

Orientador: Professor Dr. Normando Perazzo Barbosa

João Pessoa-PB

Dezembro/2019

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C288i Carvalho, Carlos Mavíael de.

INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE MOLDAGEM E DE CURA NAS
PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO /
Carlos Mavíael de Carvalho. - João Pessoa, 2019.
134 f.

Orientação: Normando Barbosa.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. concreto; concreto de ultra alto desempenho; Pós. I.
Barbosa, Normando. II. Título.

UFPB/BC

INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE MOLDAGEM E DE CURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO

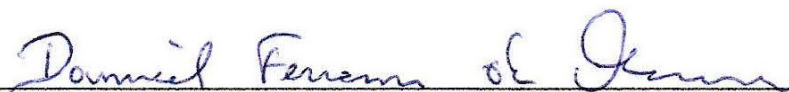
Por

Carlos Mavíael de Carvalho

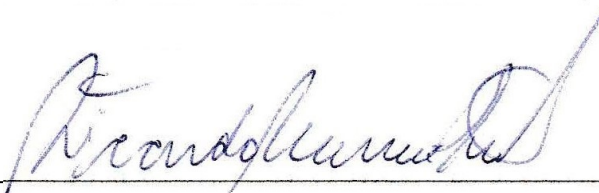


Normando Perazzo Barbosa

(Orientador)



Dannel Ferreira de Oliveria - UFPB



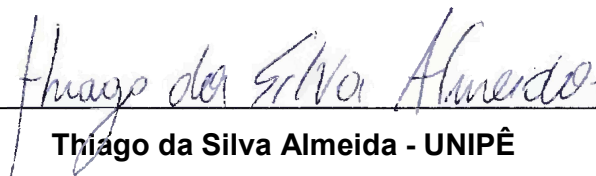
Ricardo Peixoto Suassuna Dutra - UFPB

(Examinador Interno)



Ulisses Targino Bezerra - IFPB

(Examinador Externo)



Thiago da Silva Almeida - UNIPÊ

(Examinador Externo)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela vida, pelas oportunidades, pelas bênçãos e pela família que me deu.

A minha mãe, pelo fato de nunca me abandonar e sempre aconselhar para o melhor caminho, trabalhando dobrado, sacrificando seus sonhos em favor dos meus, mainha, mãe muito obrigado por tudo.

Aos minha irmã, Anaitla, por estar presente em todos os momentos e me ajudar sempre que preciso.

A minha avó, Josefa (memória), por todo amor e carinho.

A toda minha família, especialmente aos meus sobrinhos que estão sempre presentes.

Ao meu orientador, Normando Perazzo, por toda atenção e paciência, ao decorrer desta pesquisa, e por todo ensinamento transmitido ao longo desses anos de pesquisa.

Aos professores avaliadores, Ricardo Dutra, Dannel Oliveira e Tiago Almeida, pelas contribuições apresentadas, a quem tenho grande respeito e admiração, agradeço por terem feito parte dessa história.

Agradeço a todos os meus colegas da UFPB, José Augusto, Brunna Almeida, e Adriano Felix, assim como os demais amigos do LABEME, meu muito obrigado!

Aos amigos por sempre me apoiarem, e de alguma contribuíram para a minha vitória.

Aos técnicos do laboratório de materiais e solos do Centro Universitário de João Pessoa e da UFPB, pelo auxílio na realização dos ensaios e por todo o conhecimento transmitido.

Aos professores Ulisses Targino e Heber Sivine pelas valiosas contribuições na minha vida profissional.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	iv
APRESENTAÇÃO	v
1INTRODUÇÃO	15
1.1Justificativa	17
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Introdução.....	20
2.2 Concreto de Ultra Alto Desempenho(CUAD).....	21
2.3 Aplicações do CPR.....	24
2.4 Composição, características e propriedades.....	28
2.4.1 O cimento Portland	29
2.4.2 Areia.....	32
2.4.3. Basalto	37
2.4.4 Sílica ativa.....	39
2.4.5 Aditivos.....	42
2.4.6 Microestrutura	46
2.4.7 Portlandita (CH)	49
2.4.8 Sulfoaluminatos de cálcio.....	50
2.5 Empacotamento de partículas	51
2.5.1 Determinação da densidade de empacotamento de partículas do CPR.....	52
2.5.2 Métodos para obtenção de curvas granulométricas ideais	55
2.5.3 Modelo de DeLarrard	59
2.5.4 Cura	62
2.5.5 Cura térmica.....	63
2.5.6Cura úmida.....	65
2.5.7 Cura sob pressão	66
3PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	69
3.1 Materiais	69
3.1.1 Cimento Portland	69
3.1.2 Adições minerais.....	72
3.1.3 Pó de quartzo/basalto	74

3.1.4 Aditivos.....	75
3.2 Metodologia	77
3.2.1 Estudo da pasta	78
3.2.2 Preparação do CPR	80
3.2.3 Caracterização do CPR.....	81
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
4.1 Finura blaine DO CIMENTO PORTLAND.....	85
4.2 Determinação Do Índice De Finura DO CIMENTO PORTLAND	85
4.3 Análise da distribuição granulométrica DO CIMENTO PORTLAND	86
4.5 Determinação dos tempos de pega DO CIMENTO PORTLAND.....	87
4.6 Perda ao fogo DO CIMENTO PORTLAND.....	87
4.7 Caracterização por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X (FRX) DO CIMENTO PORTLAND	88
4.8 Determinação da resistência À compressão	89
4.9 DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DOS MATERIAIS.....	90
4.10 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO	90
4.11 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO	92
4.12 RESULTADOS DE TERMOGRAVIMETRIA.....	97
4.13 Resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão	104
4.14 Permeabilidade ao ar.....	106
4.14 ÍNDICE DE VAZIOS	108
4.16 Ensaio de absorção de água por capilaridade	112

INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE MOLDAGEM E DE CURA NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO

RESUMO

Concreto de ultra alto desempenho (CUAD) também chamado de concreto de pós reativos (CPR) representa uma evolução no campo da aplicação dos materiais cimentícios à base de cimento Portland. Além dos materiais convencionais utilizados para se obter o concreto comum, os CPR exigem quantidades consideráveis de materiais muito finos e aditivos de alta eficácia para se chegar às resistências à compressão que superem os 150 MPa. Esse tipo de concreto, por ser um material mais caro e de maior complexidade para fabricação, não tendo ainda seu uso difundido pelo mundo. Tendo em vista seu potencial para confecção de pré-moldados esbeltos e mesmo peças cerâmicas para pavimento, propôs-se esta pesquisa. Foram utilizados cimento de alta resistência inicial, pó de quartzo ou pó de basalto, sílica ativa e dois tipos de aditivos. Foi utilizada a teoria de empacotamento para se chegar às diversas frações do agregado. Após intenso programa experimental conseguiu-se trabalhar com relação água/aglomerante de 0,20. Dois traços de concreto foram usados, sendo a única diferença entre eles o agregado: pó de quartzo no traço 1 e pó de basalto no traço 2. De cada traço foram preparados concretos nas quatro condições: cura em ambiente de laboratório (referência); banho a 80°C por um dia; compactação por pressão estática; e cura em autoclave. Foram feitos ensaios de caracterização dos concretos no estado fresco e endurecido, obtendo-se consistência, resistência à compressão, à tração por flexão, à tração por compressão diametral, absorção por imersão e por capilaridade, permeabilidade ao ar. A microestrutura dos concretos foi estudada através da análise térmica diferencial. Os resultados apontam para a viabilidade de se fabricar o CPR localmente, e mostram que o melhor desempenho foi obtido com a moldagem com compactação sob pressão, tendo-se chegado a valores da resistência à compressão que chegou a 169 MPa. No entanto, a cura em condições ambientais também produziu um concreto de ótimas propriedades.

Palavras-chave: concreto; concreto de ultra alto desempenho; concreto de pós reativos.

INFLUENCE OF THE MOLDING AND CURING PROCESS ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE PROPERTIES

ABSTRACT

Ultra High-Performance Concrete (UHPC) also called Reactive Powder Concrete (RPC) represents an evolution in the field of application of Portland cement-based materials. In addition to the conventional materials used to obtain common concrete, RPCs require considerable amounts of very thin materials and high-efficiency additives to achieve compressive strengths exceeding 150 MPa. This type of concrete is a more expensive and more complex material for manufacturing, not yet having its use worldwide. Given its potential for making slim precast and even ceramic floor tiles, this research was proposed. Initial high strength cement, quartz powder or basalt powder, active silica and two types of additives were used. The packaging theory was used to reach the various fractions of the aggregate. After intense experimental program it was possible to work with water / agglomerate ratio of 0.20. Two concrete mixes were used, the only difference being the aggregate: quartz powder in mix 1 and basalt powder in mix 2. From each concrete mix was prepared in the four conditions: cure in laboratory environment (reference); bath at 80°C for one day, static pressure compaction; and autoclave cure. Fresh and hardened concrete characterization tests were performed to obtain consistency, compressive strength, flexural tensile strength, diametral compression tensile strength, immersion and capillary absorption, air permeability. The microstructure of the concretes was studied through differential thermal analysis. The results point to the feasibility of making the CPR locally and show that the best performance was obtained with the compression molding, reaching values of resistance to compression that reached 169 MPa. However, curing under environmental conditions has also produced a concrete of excellent properties.

Key-words: concrete; reactive powder concrete; ultra-highperformance concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação dos volumes ocupados pelos agregados nos CBR, CAR e CUAR.	23
Figura 2 - Passarela Sonyu, Coréia do Sul.	24
Figura 3 - Ponte para pedestres na Coréia do Sul.	25
Figura 4 - Posto de Pedágio do Viaduto Millau, França.	25
Figura 5 - Torre do Sino, França.	26
Figura 6 - Estrutura do aeroporto de Haneda, Japão.	27
Figura 7 - Arranjo estrutural dos tetraedros e octaedros do quartzo.	34
Figura 8—Ângulos preferenciais de ruptura para concretos tradicionais.	36
Figura 9 - Concreto sem adições minerais (esq.) e com adições minerais (dir.).	40
Figura 10 - Reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio para formação de C-S-H adicional.	41
Figura 11 - Estruturas químicas: éter policarboxilato.	43
Figura 12 - Estruturas químicas: éter policarboxilato.	44
Figura 13 - Esquematização da zona de transição em concretos.	47
Figura 14 - Diferentes morfologias do C-S-H em CPR: (a) fibrilar (magnitude: 10.000x), (b) alveolar (magnitude: 4.500x), (c) blocos maciços (magnitude: 10.000x).	48
Figura 15 – Cristais de hidróxido de cálcio.	50
Figura 16 - Monossulfoaluminato com agulhas remanescentes de etringita.	51
Figura 17 - Gráfico típico obtido no ensaio de densidade de empacotamento de finos.	54
Figura 18 - Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento.	56
Figura 19-(A) Mistura binária sem interação. Partículas de maior dimensão dominantes; (B) Mistura binária sem interação. Partículas de menor dimensão dominantes.	60
Figura 20 - Interação entre partícula:(a) efeito de afastamento nos grãos de classe 2 provocado pela classe 3 de grãos; e (b) efeito parede, em que grãos da classe 2 são influenciados pela proximidade com grãos de classe 1.	61
Figura 21 - Efeito de afastamento exercido pelo grão classe 1 dominante	62
Figura 22 – Ciclo de cura térmica.	64

Figura 23 - Mecanismos envolvidos durante a prensagem.	67
Figura 24 – Distribuição granulométrica do pó de quartzo.	75
Figura 25 - Fluxograma dos procedimentos experimentais.	77
Figura 26 – Teste do mini-slump.	78
Figura 27–Superfície específica (Blaine) para os cimentos testados.	85
Figura 28 - Finura para as peneiras #200 e # 325.	86
Figura 29 - Resultados da perda ao fogo.	87
Figura 30 - Resultados da perda ao fogo.	88
Figura 31 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.	109
Figura 32 - Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.	109
Figura 33 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.	109
Figura 34 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.	110
Figura 35 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.	111
Figura 36 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.	111
Figura 37 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.	111
Figura 38 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.	112
Figura 39 – Influência do tipo de cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 7 dias de idade.	113
Figura 40 – Influência do tipo de cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 14 dias de idade.	113
Figura 41 – Influência do tipo de cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 28 dias de idade.	114
Figura 42 – Influência do tipo de metodologia de cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 7 dias de idade.	114
Figura 43 – Influência do tipo de metodologia cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 14 dias de idade.	115
Figura 44 – Influência do tipo de metodologia cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 28 dias de idade.	115
Figura 45 – Relação entre absorção de água por capilaridade e resistência à compressão.	116
Figura 46 – Relação ente absorção de água por capilaridade e resistência à compressão.	117
Figura 47 – Relação ente absorção de água por capilaridade e resistência à compressão.	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplos de composição de CPR típicos reportados a partir de dados levantados na literatura.	28
Tabela 2 - Compostos e abreviações individuais dos óxidos.	29
Tabela 3 – Quantidade de óxidos no clínquer de cimento.	29
Tabela 4 - Principais abreviações da indústria do cimento e seus símbolos.	30
Tabela 5 - Caracterização química do cimento Portland CP V-ARI.	70
Tabela 6 - Óxido de cálcio contido nos componentes do cimento.	71
Tabela 7 - Componentes potenciais do cimento obtidos pela equação de Bogue.	71
Tabela 8 - Massa específica do cimento.	71
Tabela 9 - Propriedades mecânicas e físicas do cimento.	72
Tabela 10 - Granulometria das partículas do cimento.	72
Tabela 11 - Características químicas da sílica ativa.	73
Tabela 12 – Superfície específica BET da sílica ativa.	74
Tabela 13 – Massa específica e diâmetro médio característico da sílica ativa.	74
Tabela 14 - Análise granulométrica do pó de quartzo.	74
Tabela 15 - Análise química do pó de quartzo.	75
Tabela 16 - Características físicas e químicas do aditivo superplastificante.	76
Tabela 17 - Determinação do teor de sólidos do aditivo.	76
Tabela 18 - Materiais usados na pesquisa.	77
Tabela 19 - Procedimento de misturadas pastas produzidas.	79
Tabela 20 - Procedimento da mistura do concreto.	82
Tabela 21 - Quantitativo da produção de corpos de prova (CPs).	82
Tabela 22 - Resultados da granulometria a laser.	86
Tabela 23 - Resultados dos tempos de início e fim de pega.	87
Tabela 24 - Resultados da composição química por FRX.	88
Tabela 25 - Valores de resistência à compressão.	89
Tabela 26 - Média dos valores de densidade.	91
Tabela 27 – Resistência à compressão aos 7 dias.	93
Tabela 28 – Resistência à compressão aos 7 dias (basalto).	93
Tabela 29 – Resistência à compressão aos 14 dias.	93
Tabela 30 – Resistência à compressão aos 14 dias.	93
Tabela 31 – Resistência à compressão aos 28 dias.	94

Tabela 32 – Resistência à compressão aos 28 dias.	94
Tabela 33 – Ganho de resistência à compressão com o tempo traço I.....	96
Tabela 34 – Ganho de resistência à compressão com o tempo traço II.....	96
Tabela 35 - Dados de produtos hidratados da amostra do traço II com 28 dias.	101
Tabela 36 - Dados de produtos hidratados da amostra do traço II com 28 dias.	101
Tabela 37 - Dados de produtos hidratados da amostra do traço II com 28 dias.	102
Tabela 38 - Dados de produtos hidratados da amostra do traço II com 28 dias.	103

APRESENTAÇÃO

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo refere-se à Introdução, onde é feita uma abordagem inicial do assunto, procura-se justificar o trabalho e apresentam-se os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo, denominado *Revisão Bibliográfica*, aborda algumas definições, conteúdos e análises elaboradas por outros pesquisadores e que servem como base e fundamentação para a realização deste trabalho. O terceiro capítulo apresenta os Materiais e a Metodologia proposta, no qual se definem os procedimentos realizados na pesquisa. O quarto capítulo apresenta a Análise dos Resultados e Discussões, e faz uma explicação detalhada dos resultados obtidos. O quinto capítulo consiste na Conclusão, onde é feita uma explanação sobre pontos importantes da pesquisa, além dos resultados obtidos nos ensaios e a análise destes e sugestões para trabalhos futuros. Ao final do trabalho, apresentam-se as Referências Bibliográficas, que trazem as publicações de onde foram retiradas informações necessárias para a elaboração do presente trabalho.

1INTRODUÇÃO

No âmbito da construção civil, a busca pelo desenvolvimento sustentável vem preocupando o setor produtivo, visto que, segundo pesquisas realizadas nos últimos anos, tal indústria é responsável por grande parte da utilização dos recursos naturais do planeta e, por consequência, pela grande geração de resíduos sólidos que poluem o meio ambiente, já que muitos destes não têm um destino adequado (BRASILEIRO *et al.*, 2015).

Dentro deste quadro, empresas e profissionais do setor se vêem na obrigação de adotar práticas que busquem minimizar tamanhos danos à natureza, para que, assim, surjam ambientes sustentáveis. Os inúmeros trabalhos acadêmicos que se utilizam desta expressão comprovam essa situação (HOPPE FILHO, 2008).

Todavia, é necessário que se adotem certas medidas para produzir tais ambientes, dentre as quais, pode-se citar a geração de materiais sustentáveis, aplicáveis ao ramo, que possam diminuir o desgaste das reservas de matéria-prima não renovável, sendo viáveis financeiramente e mantendo suas características gerais.

É fato que, na medida em que novas tecnologias são desenvolvidas, a indústria da construção civil evolui. Isso não é diferente quando se tratam de concretos, os quais, hoje, podem atingir resistências elevadíssimas, como é o caso dos Concretos de Pós Reativos (CPR).

Por mais que, na grande maioria das construções da atualidade, sejam empregados apenas concretos convencionais, os concretos especiais, como o concreto auto adensável, concreto leve e concretos de alto e ultra-alto desempenho, vêm ganhando espaço na construção civil no cenário mundial. Isto se deve às propriedades diferenciadas que eles apresentam em relação aos concretos convencionais. Redução de custos com reparos e manutenção, menor tempo de construção, redução nas manifestações patológicas em edificações, versatilidade, redução das dimensões dos elementos estruturais e do consumo de aço, maior durabilidade da estrutura e menor desperdício de material, são algumas das vantagens apresentadas pela utilização dos concretos especiais em construções.

No entanto, para que apresentem estas vantagens, a produção do concreto deve obedecer a sistemas de controle tecnológicos mais rigorosos, como a correta dosagem e seleção dos materiais, processo de lançamento e de cura adequados,

etc. Esses aspectos, juntamente com a baixa qualificação da maior parte da mão de obra da construção civil, fazem com que a utilização de concretos especiais não se aplique a qualquer tipo de obra.

Felizmente, nos últimos anos, a ideia da construção de edificações com vida útil maior vem se difundindo.

Através de estudos de formulações em concreto, foi possível melhorar as propriedades do concreto convencional. Essa ideia partiu do surgimento do Concreto de Alto Desempenho (CAD), em 1994, levando ao concreto de altíssimo desempenho estudado por de Larrard, em seu trabalho “Otimização do concreto de altíssimo desempenho com o uso de um modelo matemático” (LARRARD, 1999).

No Brasil, ele é conhecido também como Concreto de Pós Reativos (CPR), nomenclatura que se refere aos agregados ultrafinos de sua composição. Além de apresentar alta resistência, apresenta grande durabilidade devido à sua baixa permeabilidade, diferenciando-se do Concreto de Alta Resistência (CAR), que era desenvolvido apenas visando a uma maior resistência à compressão. Com a utilização do CAD, prédios mais altos puderam ser construídos, assim como estruturas com desenhos arquitetônicos mais arrojados.

Anos mais tarde, com o propósito de melhorar ainda mais as propriedades do CAD, pesquisadores desenvolveram o chamado Concreto de Ultra-Alto Desempenho (CUAD), tendo como seu principal representante o Concreto de Pós Reativos. Neste novo tipo de concreto, o agregado graúdo deixa de ser empregado, e é feita uma densificação do concreto através do uso de pós reativos, como a areia industrial, pó de quartzo e sílica ativa.

Os concretos podem se diferenciar com relação à resistência à compressão. Alguns autores definem o concreto convencional como sendo um concreto que alcança no máximo 50 MPa de resistência à compressão. Para resistências acima de 50 MPa a 120 MPa e, até mesmo, a 150 MPa, há o CAD (VANDERLEI, 2004). Para ser considerado um concreto de ultra-alto desempenho, sugere-se que sua resistência deva ultrapassar 150 MPa (TUTIKIAN *et al.*, 2015).

Para se chegar a resistências tão elevadas, o CUAD, aqui chamado de CPR, possui um processo de fabricação bastante complexo, tendo como um dos fatores determinantes uma relação água/aglomerante muito baixa, com valor por volta de 0,20. Ela é compensada pelo uso de superplastificantes, que possibilitam a mistura e o lançamento do concreto. Outro fator importante é a chamada dosagem por

empacotamento das partículas, na qual é feita a proporção dos materiais através do módulo de finura dos mesmos, preenchendo-se os espaços entre partículas maiores com materiais que apresentam partículas menores, densificando a mistura, o que a torna mais resistente e menos permeável.

A utilização do CUAD em estruturas permite redução da seção de concreto necessária para resistir aos esforços, o que reduz o peso e alivia as fundações. A utilização de microfibras de aço no CUAD propicia uma resistência à tração considerável, podendo, em alguns casos, dispensar o uso de armaduras passivas, em peças de concreto protendido (VANDERLEI, 2004).

Os ensaios térmicos podem contribuir no melhoramento das características de concretos de ultra-alto desempenho. Através deles, é possível detectar e caracterizar compostos resultantes das reações do cimento, assim como detectar variações na massa e degradação do concreto submetido a temperaturas altas. Com esses ensaios, também podem ser verificadas temperaturas de mudança de estado e cristalização dos seus compostos (HASPARYK, 2005).

O presente trabalho trata da obtenção de concretos de ultraalta resistência na tentativa de aprimorar essa tecnologia e obter novas informações sobre esse material do futuro. Para isso, o material foi caracterizado fisicamente e mecanicamente visando a simular as condições dos materiais em campo e parâmetros de dosagem, bem como foram analisados corpos de prova em relação a vários parâmetros físicos.

1.1 JUSTIFICATIVA

Novos materiais de construção precisam ser desenvolvidos devido à necessidade de diversificação de uso final, aumento da capacidade de carga e maior durabilidade. Nessa direção, encontra-se a tecnologia de concretos de pós reativos. Trata-se de um promissor material que pode ser empregado no âmbito internacional em alguns segmentos da construção civil, principalmente na indústria de pré-moldados que lidam com peças esbeltas. Ele também pode ser empregado em obras de contenções de rejeitos radioativos, hidráulicos e de saneamento, passarelas, estruturas de escadas, brises de fachadas, placas decorativas e para uso de blindagem, estruturas espaciais leves, entre outros (MALLMANN, 2013).

Os concretos de pós reativos tem motivado vários pesquisadores a investigar formas de diminuir a porosidade da matriz cimentícia para melhorar a resistência à compressão, através da compactação à quente da mistura fresca, radiações, autoclave, entre outras técnicas (ROY, GOUDA e BOBROWSKY, 1972; ROY e GOUDA, 1973; BAJZA, 1983). Esse comportamento deve-se à microestrutura compacta obtida do alto consumo de materiais cimentícios, inclusão de sílica reativa e de agregados finos apropriados (YAZICI, DENIZ e BARADAN, 2013).

Para que as características desejadas sejam desenvolvidas, deve-se atentar para o processo de cura (AİTCIN, 2000). É conhecido o efeito positivo da aplicação gradativa de pressão nas primeiras horas, que permite eliminar o excesso de água e diminuir a porosidade (NEMATZADEH e NAGHIPOUR, 2012), bem como reduzir a relação entre custo e resistência (İPEK, YILMAZ e UYSAL, 2012). De forma geral, a cura térmica pode ser conduzida em pressão atmosférica, em alta pressão ou a vapor. Existem sugestões quanto ao ciclo de cura para não eliminar o efeito positivo da resistência mecânica.

Nesse contexto, nesta tese foi avaliado o uso de pressão de compactação por prensas mecânicas para aplicar grandes pressões internas sobre o concreto. Trata-se de uma tecnologia que apresenta vantagens em relação aos custos, quando comparada a outras técnicas estudadas. Outro ponto forte são os benefícios do empacotamento e a variação de cura térmica nos CPR. Essa junção potencializa o aperfeiçoamento e o desenvolvimento de concretos de elevadas resistências.

A cura sob autoclave e por outras técnicas estão limitadas pela infraestrutura do laboratório. Sendo assim, com o intuito de contribuir com a ciência a respeito da tecnologia do concreto, em regimes de cura mais compreensíveis, este trabalho se propôs a avaliar o efeito combinado da pressão e temperatura aplicadas nos concretos, através de um equipamento simples. A eficácia dos regimes de cura foi analisada segundo ensaios de caracterização microestrutural e mecânica.

A utilização desse tipo de concreto em obras de engenharia tende a crescer cada vez mais com o conhecimento das propriedades do material. Obtendo-se maiores conhecimentos sobre o CPR, espera-se que os resultados deste trabalho possam impulsionar a utilização de concretos de altas resistências no Brasil.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral obter um traço para CPR a partir da teoria de empacotamento dos materiais e da experimentação, aplicar tal concreto com diferentes condições de cura, caracterizá-lo e avaliar o efeito da substituição do pó de quartzo por pó de basalto nas propriedades do material.

1.2.2 Objetivos específicos

- (i) Definição de traços iniciais de concretos de pós reativos em função de sua granulometria e empregando o conceito de empacotamento;
- (ii) Otimizaçãodos traços buscando melhores consistência e resistência à compressão;
- (iii) Análiseda macroestrutura e microestrutura em diferentes idades durante o período de hidratação dos concretos, através de análises térmicas,densidade e absorção de água;e
- (iv) Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral, absorção por capilaridade, massa específica, permeabilidade ao ar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo descreve alguns aspectos dos concretos de pós reativos, tais como características, propriedades, composição, bem como os diferentes tipos de cura e a base científica para as técnicas de empacotamento de partículas.

2.1 INTRODUÇÃO

O concreto de cimento Portland é uma pedra artificial, até a poucas décadas atrás, formada pela mistura adequada daquele ligante com agregados e água. Como toda pedra, apresenta as características de uma boa resistência à compressão, baixa resistência à tração e comportamento frágil, ou seja, rompe com pequenas deformações (MEHTA e MONTEIRO, 2014; NEVILLE, 2016). Comumente, sua resistência variava por volta de 15 MPa a 25 MPa, pois esse valor era suficiente para atender às solicitações das estruturas das edificações correntes. Mesmo hoje, ainda são utilizados concretos com resistência próxima de 20 MPa em numerosas aplicações.

A evolução do cálculo estrutural, juntamente com o surgimento de programas computacionais e o avanço no conhecimento sobre as propriedades do concreto e do aço, possibilitaram a criação de projetos de estruturas cada vez mais arrojados, utilizando-se o concreto armado e o concreto protendido (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Nessas estruturas, as resistências citadas para o concreto convencional já não são suficientes.

Então, para se conseguir maiores resistências, surgiram mais dois componentes para o concreto: os aditivos e as adições. Os aditivos, produtos da indústria química, geram mudanças nas propriedades do concreto fresco, entre as quais uma redução da relação água/cimento, que permite um avanço nas resistências para patamares bem maiores que os anteriores (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011).

As adições, normalmente na forma de pós finos, que atuam internamente na microestrutura do concreto, associadas com os aditivos, elevaram o patamar de resistência de forma considerável, de modo que apareceram os concretos de alta resistência (CAR), concretos de alto desempenho (CAD) e até mesmo os concretos de ultra alto desempenho (CUAD), nos quais a resistência supera os 150 MPa.

Cada vez mais são utilizados concretos com resistência à compressão elevada, para que atendam a critérios de durabilidade e também para que possibilitem a construção de formas arrojadas dos projetos arquitetônicos (FORMAGINI, 2005).

O concreto CUAD surgiu em pesquisas realizadas a partir de 1990, na França e no Canadá, e foi desenvolvido para substituir o concreto de alto desempenho (CAD) e, até mesmo, o aço, tornando-se o material de tecnologia de ponta, projetado especificamente para atender a exigências industriais e militares. Para se ter uma ideia do que representa esta revolução tecnológica, o concreto convencional atinge até 60 MPa, o CAD chega a resistências entre 60 MPa e 120 MPa, enquanto que o CUAD está em uma faixa de resistência à compressão entre 100 MPa e 800 MPa (BINA, 1999).

2.2 CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO(CUAD)

O CUAD era denominado de concreto de pós reativos (CPR), por conter larga quantidade de pós extremamente finos, sobretudo sílica ativa. Passou a ser chamado de Concreto de Ultra Alto Desempenho porque, em muitos casos, era utilizado não especificamente devido à sua resistência, mas por conta da baixa porosidade e alta durabilidade (NEVILLE, 2016).

Segundo Graybeal (2006), a classe dos concretos de ultra alta resistência (CUAR) surgiu nas últimas décadas, com propriedades superiores às das classes dos concretos convencionais e dos concretos de alta resistência (CAR). Essa superioridade refere-se à resistência à compressão, resistência à abrasão, resistência ao impacto, menor retração, maior módulo de elasticidade, menor fluência, dificuldade de penetração de agentes agressivos, etc.

Esse tipo de concreto é uma evolução do concreto de alta densidade (CAD). Porém, sua denominação pode mudar dependendo da região onde o concreto é usado, bem como o nível de resistência e a utilização das fibras ou agregados (MEEKS e CARINO, 1999; GRAYBEAL, 2006). Contudo, concorda-se que este material tem, como base, um Concreto de Pós Reativos (CPR) (GRAYBEAL, 2006; REBENTROST e WIGHT, 2008; TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011; İPEK, YILMAZ e UYSAL, 2012; PREM, BHARATKUMAR e IYER, 2013; YAZICI, DENİZ e BARADAN, 2013).

O concreto de pós reativos (CPR) é conhecido internacionalmente como *ReactivePowder Concrete* – RPC (LIU, 2012). O principal representante desse tipo de tecnologia é o da classe de concretos de ultra alta resistência (CUAR). Segundo Weldon(2010), o CPR foi desenvolvido na década de 1990 pelo cientista RichardCheyrezy,na França, fundamentado no princípio da concepção de um material com o mínimo de defeitos, obtido pelo refinamento da microestrutura.

O primeiro concreto de pós reativos foi desenvolvido no Canadá em 1990, na Universidade de Sherbrooke, pelo professor e pesquisador Pierre-Claude Aïtcin, composto somente por agregados miúdos e pós ultrafinos, daí a definição “pós”, plural de “pó” (CORSINI, 2006).

Foi o aparecimento dos aditivos superplastificantes que impulsionou os concretos de altas resistência e desempenho. Com o surgimento dos superplastificantes e hiperplastificantes, foi possível conferir uma maior fluidez ao concreto e reduzir a relação água/cimento, o que possibilita aumento da compacidade e da resistência mecânica. Esse acréscimo de resistência ocorre devido ao empacotamento das partículas da matriz e ao menor número de vazios na estrutura dos concretos no estado endurecido (AÏTCIN, 2000).

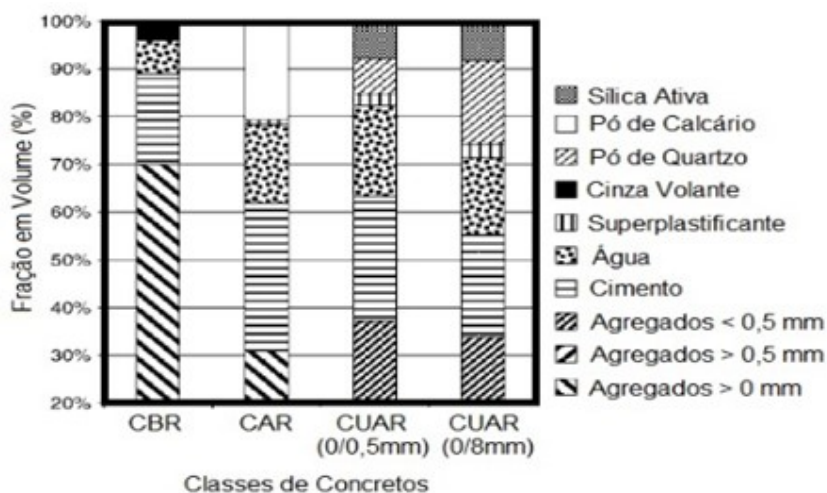
Fehling^{et al.} (2014) advertem a seriedade das partículas serem ultrafinas e extremamente reativas, o que aumenta a compacidade obtida, usando-se partículas menores que 0,3 mm, ou seja, o agregado é uma areia fina, tendo, ainda, o cimento Portland, a sílica ativa, pós de quartzo, aditivos superplasficantes e, em alguns casos, micro fibras metálicas ou poliméricas. A combinação granular é otimizada através da composição com areia fina, cimento e quartzo moído, com diâmetro entre 150 µm e 600 µm, 15 µm e 10 µm, respectivamente. A sílica ativa apresenta um diâmetro suficiente apenas para preencher os espaços vazios entre o grão de cimento e o quartzo, outro tipo de pó utilizado. As fibras de aço, quando presentes, têm um diâmetro de 0,2 mm e comprimento de 12,7 mm (GRAYBEAL, 2006).

Esses materiais em junção contribuem de forma significativa para o aprimoramento do empacotamento de partículas na mistura, garantindo uma microestrutura densa, praticamente isenta de poros capilares, cujo material apresenta resistência à compressão superior às das classes de concretos existentes.

Quando se produz um concreto de alta densidade, os espaços vazios são minimizados pelos princípios de aumento de homogeneização e pela ausência de

agregados graúdos, a densidade aumenta pela otimização de distribuições granulométricas e a utilização de pressão favorece uma microestrutura refinada (VANDERLEI, 2006). A Figura 1 seguinte apresenta uma típica analogia de concretos (CBR, CAR e CUAR), onde as frações são ocupadas por materiais constituintes.

Figura 1 - Comparação dos volumes ocupados pelos agregados nos CBR, CAR e CUAR.



Fonte: adaptado de Fehling *et al.* (2014).

Segundo Vanderlei (2006), a fabricação de concreto de elevada resistência produz uma matriz de maior resistência à compressão e com baixa maleabilidade. A homogeneidade e a densidade, dependendo da composição intrínseca dos materiais, são os principais atributos do CPR, os quais fomentam um aumento de resistência durante a confecção, o que possibilita aplicar cura térmica e/ou pressão. A decisão na aplicação dessas medidas deve ser avaliada para cada aplicação de CPR, de acordo com as dificuldades tecnológicas envolvidas.

Mallmann (2013) e Cheyrezy (1995) descrevem que existem duas vertentes de pesquisa para concreto CPR: a linha de pastas de polímero MDF (*Macro DefectFree*), que consistem em pastas que possuem resistência à tração muito alta, que pode extrapolar os 150 MPa, especialmente quando utilizados o cimento aluminoso a outra tecnologia; e a de concreto com matriz de granulometria compacta DSP (*Densified System Containing Ultrafine Particles*). Esse último tipo de concreto utiliza elevados teores de superplastificante e de sílica ativa, além de agregados de elevada dureza.

A *Association Française de Génie Civil* (AFGC) tem uma definição mais objetiva, proposta em seu último documento: “CUAD é um material de matriz cimentícia, com resistência à compressão característica superior a 150 MPa e inferior a 250 MPa” (AFGC, 2013). Tal desempenho deve-se à microestrutura densa obtida do alto consumo de cimento, baixa relação água/cimento e adição de sílica ativa, tudo na granulometria adequada (YAZICI, DENIZ e BARADAN, 2013).

2.3 APLICAÇÕES DO CPR

O concreto de pós reativos está sendo empregado em obras de uma maior liberdade geométrica e com desafios para resistências mecânicas, dentre elas, está a passarela de Sherbooke, no Canadá, feita pela empresa Le Groupe Teknika. É composta por uma viga inferior com 96cm de lagura e 38cm de altura, onde as armaduras passivas (um ícone do concreto armado) não foram utilizadas, pois puderam ser substituídas por fibras de aço com pequenas dimensões sem interferir na trabalhabilidade da estrutura (AITCIN e RICHARD, 1996).

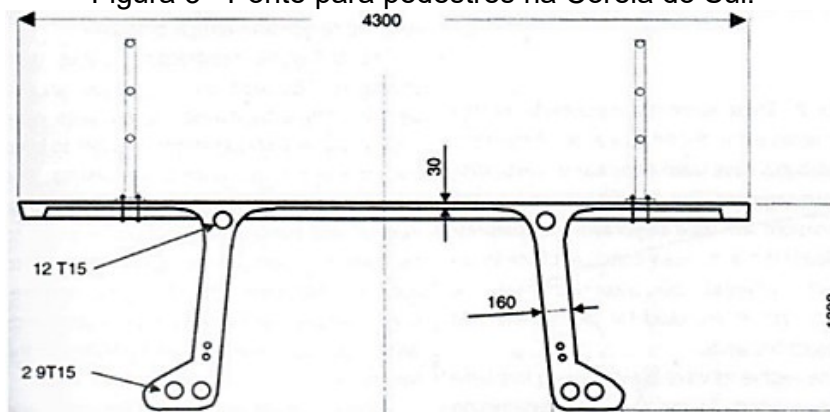
Outra obra que utilizou dos aritíficios do CPR para sua execução foi a passarela de Seul, na Coreia do Sul, inaugurada em 2002, com incríveis 120m de vão livre e apenas 3cm de tabuleiro. Na França, foi executado o Posto de Pedágio do Viaduto de Millau 100% com CPR, com 98m de comprimento e 28 m de largura, inaugurado em 2005. Em seguida, seguem as Figuras 2, 3 e 4 das respectivas estruturas (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011).

Figura 2 - Passarela Sonyu, Coréia do Sul.



Fonte: Isaia (2011).

Figura 3 - Ponte para pedestres na Coréia do Sul.



Fonte: Isaia (2011).

Figura 4 - Posto de Pedágio do Viaduto Millau, França.



Fonte: Tutikian (2011).

A reconstrução da torre para o sino em 2006 da cidade de Laval, na França, é outro exemplo da utilização de CPR. Neste caso, além do ganho da durabilidade da construção, houve a redução de cerca de 5 vezes o peso do conjunto da obra. Segue a Figura 5 de tal empreendimento (SOTO, 2014).

Figura 5 - Torre do Sino, França.



Fonte: Soto (2014).

Muitas obras estão sendo realizadas com CPR em países como França, Coréia do Sul, Canadá, Japão, Torres Petronas (Malásia), a Ponte de TsingMa (Hong Kong), o *Trump World Tower* (EUA) e a passarela de Seonyu (Coreia do Sul), segundo apresentado por Voo e Foster (2009), dentre outros. As grandes possibilidades de versatilidade para formas e dimensões são bastante atrativas para vencer os atuais desafios estruturais pelo mundo, revelando-se uma ótima alternativa (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011).

Miranda (2008) destaca que o CPR tem sido apontado em diversos outros empregos na construção civil, tais como: obras para armazenamento de rejeitos radioativos, hidráulicos e de saneamento, peças para indústrias mecânicas, de forma geral, elementos de concreto que necessitam de elevada resistência mecânica, impermeabilidade e durabilidade.

Em trabalho realizado por Torrenti (1996), destaca-se que o armazenamento de rejeitos de radioatividade é feito em contêiner de aço ou com múltiplas paredes à base de cimento, nos quais os rejeitos são imobilizados pela injeção de concreto ou graute. O trabalho baseia-se em estudo para criação Contêiner de Alta Integridade (CAI), o qual assume o papel de barreira de confinamento. O CAI requer o uso de material que exiba excelentes propriedades mecânicas, de confinamento e durabilidade. O CPR usado no estudo apresentou resultados satisfatórios quanto à permeabilidade de gás e difusão de íons radioativos.

Outro trabalho importante é o de Dowd e O'Neil (1996), que estudaram tubos e bueiros de esgoto de CPR. As vantagens observadas giraram em torno da redução do custo, agilidade na produção de peças leves para transportes, diminuição na espessura da parede, menor permeabilidade à água e maior resistência ao ataque de sulfatos e outros produtos químicos.

Resplendino (2008), na cidade de Tóquio, no Japão, no ano de 2007 verificou que diversas estruturas viárias foram fabricadas com CPR. Essa aplicação foi usada em uma das pistas de aterrissagem do aeroporto Internacional de Haneda. Foram produzidos 192 000 m² em forma de placas de CPR, que se apoiam sobre pilares de aço conforme Figura 6. O projeto precisou de dois anos de análise para ser viabilizado e as investigações iniciais consistiram basicamente em entendimento do processo de mistura dos materiais. No total do projeto, foram confeccionadas 6.139 placas de 7,8 m x 3,6m, com espessura de 135 mm. Tendo uma produção de 1.100 m³ por mês, com um total da obra de 23 mil m³ de CPR.

Figura 6 - Estrutura do aeroporto de Haneda, Japão.



Fonte: Resplendino(2012).

Segundo Resplendino (2012), a utilização dos CPR para fabricação das placas permitiu a redução dos custos da obra, pois diminuiu a armação metálica. O CPR obteve desempenho excelente e capacidade de carga de 600kN para cada eixo de uma aeronave, quase o dobro da resistência de cálculo estimado, além de apresentar baixa permeabilidade, valores baixos de carbonização e uma boa resistência aos danos causados pela cristalização de sais nos poros do concreto. Esse material possibilitou a estrutura por, no mínimo, 100 anos.

A utilização desse tipo de concreto em obras de engenharia tende a crescer cada vez mais com o conhecimento das propriedades do material. Ao obter maiores conhecimentos sobre o CPR, espera-se que os resultados deste trabalho possam impulsionar a utilização de concretos de grandes resistências no Brasil.

2.4 COMPOSIÇÃO, CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

O CPR tem uma microestrutura compacta, de modo que pode ser caracterizado por apresentar um menor número de defeitos, como poros capilares, fissuras e bicheiras. É composto, basicamente, de cimento, areia fina, sílica ativa, superplastificante e, facultativamente, fibras de aço ou fibras não-metálicas (AHLBORN, PEUSE e MISSON, 2008). Segundo Ming *et al.* (2007), os constituintes favorecem a resistência mecânica (MING *et al.*, 2007). A compacidade do CPR é alcançada através de um elevado consumo de cimento, uma baixa relação a/c e o uso de sílica ativa como adição mineral altamente reativa. A granulometria dos materiais finos componentes é, ainda, ajustada através do uso de fíllers, o que colabora ainda mais para a densificação da matriz (BRANDÃO, 2005). A Tabela 1 apresenta traços de concretos de alto desempenho encontrados na literatura.

Tabela 1 - Exemplos de composição de CPR típicos reportados a partir de dados levantados na literatura.

MATERIAL	ANDERLEI (2004)	BRANDÃO (2005)	GRAYBEAL (2006)	AHLBORN; PEUSE; MISSON, (2008)	FÁVERO (2016)	VIANA (2019)
Cimento Portland	1	1	1	1	1	1
Areia fina	1,1	1,25	1,43	1,23	2,14	1
Sílica ativa	0,24	0,15	0,33	0,26	0,22	0,25
Pó de quartzo	0,23	0,1	0,3	0,12	0,36	0,15
Aditivo superplastificante	0,02	0,02	0,04	0,02	0,034	0,02
Aditivo modificador	N.U.	N.U.	N.U.	N.U.	0,014	N.U.
Aditivo acelerador	N.U.	N.U.	0,04	N.U.	N.U.	N.U.
Fibras metálicas	N.U.	0,22	0,22	0,2	0,34	N.U.
Água	0,18	0,21	0,15	0,2	0,24	0,21

Legenda: N.U.: não utilizado.

A retirada do agregado graúdo desse tipo de concreto colabora para a compacidade e homogeneidade do CPR. O uso de umas partículas com dimensões menores produz o aumento da superfície específica do esqueleto granular. Com isso, os esforços sobre a estrutura são melhores distribuídos, evitando-se uma falha

da microestrutura, o que aumenta a resistência mecânica final do material (ISAIA *et al.*, 2011).

2.4.1 O cimento Portland

A ASTM C150, norma internacional estadunidense, define cimento Portland como um cimento hidráulico produzido pela moagem de clínqueres, constituídos essencialmente por silicatos de cálcio hidráulicos e uma pequena quantidade de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Clínqueres são nódulos de 5mm a 25 mm de diâmetro de material sinterizado, que é produzido quando uma mistura de matérias-primas de composição pré-determinada é aquecida a altas temperaturas.

As reações químicas formadas pelos componentes do cimento na transformação do clínquer são obtidas através da interação entre seus principais componentes, principalmente o calcário, sílica, alumina e óxido de ferro, formando produtos complexos. A velocidade de resfriamento desse processo acaba por influenciar o grau de cristalização desses compostos, alterando a quantidade de material amorfo (NEVILLE, 1997). Na análise química, os elementos presentes no cimento em termos de óxidos tornam difícil obter alguma conclusão com relação às propriedades do cimento. Os compostos individuais dos óxidos são expressos usando abreviações, como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2- Compostos e abreviações individuais dos óxidos.

Óxido	Abreviação
CaO	C
SiO ₂	S
Al ₂ O ₃	A
Fe ₂ O ₃	F
MgO	M
SO ₃	Š
H ₂ O	H

As quantidades de óxidos básicos presentes no clínquer de CaO, SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, de acordo com Taylor (1990), podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3– Quantidade de óxidos no clínquer de cimento.

Óxido	CaO,	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Outros
Teor (%)	67	22		35	3

Fonte: Taylor (1990).

Metha e Monteiro (2014) descrevem que existem apenas quatro compostos principais nas reações cimentícias, que são considerados em duas partes: uma de silicatos e outra de aluminatos. As partes de silicatos são formadas por duas fases bem cristalizadas, denominados de alita (C_3S – silicato tricálcico) e belita (C_2S – silicato dicálcico), C_3A (aluminato tricálcico), que é uma fase considerada intersticial, e C_4AF (ferro aluminato tetracálcico – ferrita). A estes compostos se associam abreviações e símbolos que são comumente usados pelos químicos do cimento, como apresentados na Tabela 4.

Tabela 4- Principais abreviações da indústria do cimento e seus símbolos.

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviações
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A
Ferroaluminatotetracálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O$	C_4AF

Nos cimentos Portland, existem outras fases na forma de impurezas em baixa quantidade, como exemplo: periclásio (MgO), sulfatos alcalinos e óxido de cálcio calcinado endurecido (CaO). No processo de controle de pega, é adicionado ao clínquer o sulfato de cálcio, que pode ser encontrado sob a forma de gipsita ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), hemidrato ou bassanita ($CaSO_4 \cdot \frac{1}{2}H_2O$) e anidrita ($CaSO_4$), ou uma mistura de dois ou três destes compostos.

Os compostos de silicatos não são puros e contêm óxidos secundários em pequenos teores de solução sólida, têm efeitos expressivos na estrutura dos arranjos atômicos, ou seja, nas formas cristalinas e, principalmente, nas propriedades.

Para a estimativa dos teores dos compostos químicos, é estimado que o cimento resfriado repete o mesmo equilíbrio existente à temperatura de clínquerização, que são determinados a partir das quantidades de óxidos presentes no clínquer, como se obtido uma perfeita cristalização, que é quantificada pela quantidade de óxidos presentes no clínquer.

Taylor (1990) descreve que equações Bogue determinam a composição do cimento, que podem estimular o teor inicial de composto de cimentos Portland, descritos nas Equações 1 a 4 seguintes.

$$\%C_3S = 4,071C - 7,600S - 6,718A - 1,430F - 2,850 \check{S} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\%C_2S = 2,867S - 0,7544C_3S \quad (\text{Equação 2})$$

$$\%C_3A = 2,650A - 1,692F \quad (\text{Equação 3})$$

$$\%C_4AF = 3,043F \quad (\text{Equação 4})$$

Para se produzir um concreto CPR, deve-se escolher os cimentos mais puros possíveis. Na prática, o cimento com maior teor de clínquer e gipsita é o cimento CP-I, seguido do CP V ARI. Na prática, escolhe-se o disponível na região (TUTIKIAN, 2011). No entanto, existem também tentativas promissoras na Europa e nos EUA com outros tipos de cimento, como o CEM II e CEM III, equivalentes ao CP-III e ao CP-V no Brasil (RICHARD e CHEYREZY, 1995; SIEBEL, 2003). Nesse tipo de tecnologia, o consumo de cimento no CPR é, tipicamente, mais que duas vezes superior à quantidade normalmente utilizada nos concretos convencionais. O consumo típico de cimento em traços de CPR varia entre 800 kg/m³ e 1.000 kg/m³.

Para produção de concretos CPR, a escolha do tipo de cimento exige uma indispensável verificação de quantidade de teor de aluminato tricálcico hidratado (C₃A), que pode ser em torno de 3%, mas se recomenda valores próximos a zero, pois o C₃A libera calor de hidratação de forma rápida e deletéria, podendo prejudicar as propriedades dos CUAD, que apresentam elevado consumo relativo de cimento (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011). Além disso, um baixo percentual reduz a formação de etringita. AÏTCIN (1998) recomenda que um CPR, a fim de controlar a reologia do cimento, deve conter certa quantidade de sulfatos solúveis. Esse cimento deve ser finamente moído e conter uma boa quantidade de C₃S, mas não em exagero, pois podem surgir incompatibilidades relacionadas à cinética (AÏTCIN, 2000) das reações. Como a aquisição de um cimento para fabricar CPR com essas características é difícil de ser obtido, faz-se necessário estudar detalhadamente sua composição.

A porcentagem de C₃A é um muito importante quando se usa tratamento térmico, pois os traços são bastante ricos em termos de cimentos e em processo de elaboração de concretos de CPR, os tratamentos térmicos sempre são utilizados para melhorar as propriedades. Copolla (1996) elaborou um trabalho onde relacionou variados tipos de cimentos e sílicas para verificar qual o melhor cimento para produção dos CPR. Os percentuais eram de 0%, 4% e 11% de C₃A e três tipos de sílica-branca, cinza e preta, sendo a diferença principal entre estas o teor de

carbono. Como conclusão, notou que os cimentos com 0% de C_3A obtiveram melhores resultados de compressão de 200 MPa com auxílio de tratamentos térmicos em aproximadamente três dias, já os outros percentuais não passaram de 160 MPa.

Vale ressaltar que na literatura não se tem relatos sobre a possibilidade ou não do desenvolvimento da etringita secundária pelo emprego de tratamento térmico nos CPR, bem como outros tipos de patologias.

Outro ponto forte no percentual baixo teor de C_3A é que eles produzem melhores resultados de espalhamento, e a compatibilidade entre cimentos e aditivos superplastificantes redutores de água é forte (RICHARD e CHEYREZY, 1995). O teor de C_3A no cimento influencia no efeito do aditivo superplastificante, sendo que quanto maior esse teor, menor será a eficiência do aditivo sobre o aspecto de plasticidade do concreto (COPPOLA *et al.*, 1997; COLLEPARDI *et al.*, 1998).

Quanto à finura, é algo bastante peculiar, pois nesse caso um cimento com alta finura (Blaine entre 3.500 cm^2/g e 4.000 cm^2/g , conforme Habel(2004)), pode demandar uma grande quantidade de água e não ser considerado satisfatório. Em virtude da demanda de água necessária para sua hidratação, pode acarretar no processo de mistura um consumo de água maior devido à área específica do cimento a ser hidratada, havendo uma reação inicial muito rápida com o superplastificante, o que leva a uma diminuição das propriedades de reações dos aditivos (COPPOLA *et al.*, 1997). Essa diminuição favorece um acréscimo de água na mistura que originará um aumento na relação água/aglomerante, lesando algumas propriedades, como resistência, permeabilidade e durabilidade do concreto. O desempenho final do cimento na produção de concretos de ultra resistência dependerá da maneira pela qual o comportamento reológico e o acréscimo da resistência podem ser, respectivamente, otimizados.

Biz (2001) descreve que os cimentos com alto teor de sílica seriam os mais indicados para a produção dos Concretos de Pós Reativos. Contudo, esse tipo de cimento oferece taxa lenta de endurecimento, em virtude das características reológicas e desempenho mecânico. O cimento descrito como melhor para fabricar o CPR é o cimento Portland comum sem adição.

2.4.2 Areia

A ABNT NBR 7211 fixa as características necessárias no entendimento e produção de agregados, miúdos e grãos, de origem natural, resultantes da britagem ou fragmentação das rochas. De forma generalizada, os agregados são definidos em areia ou agregado miúdo, como areia de origem natural ou resultante da britagem de rochas duráveis, ou a mistura de ambas, cujos grãos passam pela peneira ABNT de 4,800 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 0,075 mm. A mesma norma define os agregados grãos como pedregulho ou brita proveniente de rochas duráveis, ou a mistura de ambos, cujos grãos passam por uma peneira de malha quadrada com abertura nominal de 152 mm e ficam retidos na peneira ABNT de 4,8 mm. A classificação dos agregados de uma maneira adequada a seu uso na construção civil é assunto dúbio na literatura.

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e a *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) propõem uma classificação baseada na análise petrográfica das rochas e na descrição tecnológica relacionada às propriedades físicas e mecânicas das rochas. Segundo Collins e Fox (1985), a classificação de agregados deve levar em consideração as seguintes informações: a origem do material (agregados naturais ou artificiais), a classe ou nome petrográfico, além de idade da rocha, cor, granulometria e fissilidade.

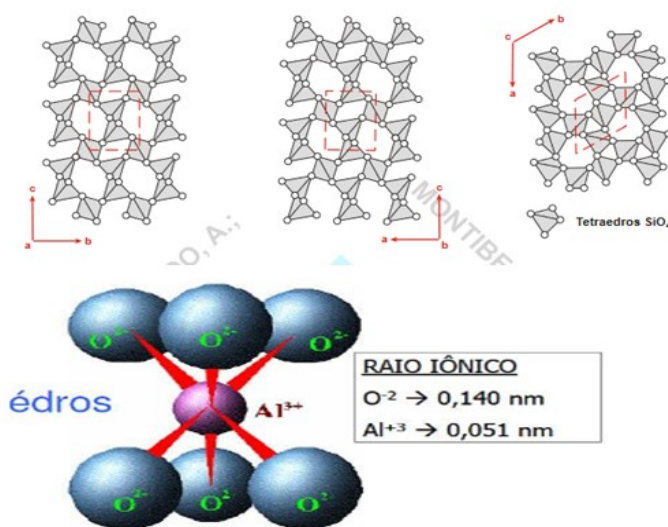
Frazão e Paraguassu (1998) e Frazão (2006) definem os agregados como materiais granulares sem forma e volume definidos, que podem ser classificados considerando a origem, a densidade e o tamanho dos fragmentos. Quanto à origem, são denominados naturais os extraídos diretamente como fragmentos, como areia e cascalho, e os artificiais são aqueles que passam por processos de fragmentação como britagem ou moagem. Os agregados leves são pedra-pomes, vermiculita, argilas, etc., os agregados pesados são barita, limonita, etc., e os agregados normais são as areias, cascalhos e pedras britadas.

As propriedades relevantes do agregado para a composição do concreto incluem porosidade, distribuição granulométrica, composição, absorção de água, resistência à compressão, forma e textura superficial, módulo de elasticidade e tipo de substâncias deletérias presentes.

Helene (1992) descreve que a composição granulométrica tem uma influência significativa sobre a propriedade dos concretos, agindo diretamente na trabalhabilidade, compactação e na relação água e cimento, que afeta diretamente a resistência mecânica do concreto.

Na produção de CPR, é comum o uso de areias extremamente finas ou beneficiadas de quartzo, pois elas influenciam diretamente nas propriedades mecânicas do concreto, os parâmetros desse tipo de material que são determinantes: composição mineral, composição granulométrica, diâmetro médio, forma das partículas, fração volumétrica na mistura. O quartzo pertence ao grupo dos tectosilicatos, constituídos por tetraedros de SiO_4 , ligados tridimensionalmente, de maneira que todos os oxigênios dos vértices dos tetraedros são compartilhados com os tetraedros vizinhos, resultando em uma estrutura fortemente unida, estável, em que a relação Si:O é 1:2 ou da substituição de Al (apresentado na Figura 7). Tem Composição: Si = 46,7%, O = 53, 3%. Usualmente, é quase puro. Não apresenta plano de clivagem, tem elevada dureza (8) e uma densidade de 2,65m que favorece uma boa compacidade nos concretos.

Figura 7 - Arranjo estrutural dos tetraedros e octaedros do quartzo.



Para se produzir um bom CPR, a areia mais indicada é a do tipo quartoza, por ser um material de elevada dureza, apresentar excelente interface pasta/agregado, aliada à boa disponibilidade e baixo custo, com tamanho de partículas limitados a um diâmetro máximo de 600 μm e mínimo de 150 μm , evitando-se valores inferiores a 150 μm .

Zanniet *al.*(1996) estudaram a colocação de areia de quartzo com diâmetro máximo de 300 μm para produção de concretos acima de 200 MPa. Segundo os mesmos autores, a colocação desse tipo de diâmetro máximo é relevada pela obtenção de menor permeabilidade do concreto, melhor mistura dos materiais no

sistema, o que favorece o não aparecimento de poros capilares ou defeitos como vazios. Mas já existem estudos em que o diâmetro máximo foi aumentado para 600µm, 2mm e até 8mm, obtendo resistências à compressão próximo a 200 MPa (BIZ,2001).

Conforme Neville (1997), na tecnologia dos CPR, as partículas de quartzo, quando muito finas, influenciam diretamente nas propriedades no estado plástico (fresco), na reologia, proporcionando excelente trabalhabilidade, que pode exigir uma demanda de água para que possa submergir a área específica dos grãos no sistema para contrabalançar a deficiência da coesão e fluidez dessas partículas. Em concreto convencional, os agregados graúdo e miúdo são os maiores componentes em volume, formando um esqueleto rígido de elementos de granulometria contínua. Isso significa que a maior parte da retração da pasta é bloqueada por esse esqueleto granular, a qual resulta em aumento da porosidade.

Tratando-se dos CPRs, o volume da pasta é pelo menos 20% maior do que os índices de vazios da areia não compactada da mistura. Deste modo, os agregados usados na fabricação do CPR não formam um esqueleto rígido, mas, sim, um conjunto de partículas aprisionadas dentro de uma matriz contínua. Isso causa um bloqueio localizado na retração da pasta, enquanto a retração global não é bloqueada pelo esqueleto rígido (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

Os concretos tradicionais, por serem constituídos por agregados graúdos, apresentam formatos lamelares de grãos, que comumente acomodam-se em uma direção preferencial, alinhando-se e podendo criar planos preferenciais de ruptura. Esse tipo de agregado também oferece maior probabilidade de acumular água, o que, por sua vez, pode levar a uma exsudação ou comprometer a zona de transição do concreto, como apresentado na Figura 8 em ângulos preferenciais.

Figura 8—Ângulos preferenciais de ruptura para concretos tradicionais.



Fonte: Guerrante (2015).

As misturas de CPR têm por objetivo formar pastas homogêneas, justificadas pela sua compacidade balanceada de elementos finos, que favorecem refinamento no esqueleto e proporcionam melhoria nas propriedades mecânicas entre pasta e agregado. Richard e Cheyrezy (1995) trabalharam com a colocação de agregados miúdos e com diâmetro de 600 μm e mínimo de 150 μm para obter menor relação matriz e pasta. Sabe-se que o agregado é o ponto fraco da matriz devido à transferência de tensões (AÏTCIN, 2000). Assim, a alternativa por partículas menores é desejável em função da maior superfície específica, que admite distribuir as tensões incidentes e diminuir o contato, evitando possíveis falhas localizadas (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011).

Helene *et al.* (2011) argumentam que a rocha de quartzo é de elevada dureza e resistência, possível de ser usada simultaneamente na forma de areia ou pó (o pó é obtido pela separação da areia de quartzo triturada), onde os grãos apresentam formatos angulares, enquanto que a areia natural tem grãos mais esféricos. Os grãos podem auxiliar no empacotamento, considerado um material inerte nas reações deletérias do concreto. Quando ativado termicamente, torna-se reativo e catalisa as reações pozolânicas (YAZICI, DENIZ e BARADAN, 2013).

Em virtude do aprimoramento da tecnologia do CPR, buscou-se, na literatura, estudar materiais com comportamento e características semelhantes em termos de finura (#325) e reações pozolânicas, desejando-se produzir resultados similares, além de servir como ferramentas de fabricação de CPR. Até o momento, não constam produção de CPR com basalto usando teoria de empacotamento.

2.4.3. Basalto

A palavra “basalto” deriva do latim tardio *basaltes*, uma variante do latim *basanites*, “pedra muito dura”. A aplicação do termo na moderna petrologia, no sentido de *basalto*, descreve uma rocha derivada de lava e com uma determinada composição mineralógica. Agricola utilizou “basalto” para descrever a rocha vulcânica negra da colina de Schloßberg. O basalto é uma rocha ígnea eruptiva de composição máfica e, por isso, rica em silicatos de magnésio e ferro e com baixo conteúdo em sílica, constituindo-se como uma das rochas mais abundantes na crosta terrestre. Devido à sua dureza e resistência à meteorização, é explorada para a produção de agregados de para concretos (BEALL e RITTLLER, 1971).

Os basaltos apresentam, em geral, uma matriz de grãos muito finos, com densidade média de 2,8 g/cm³ a 3,0 g/cm³. Geralmente, possui coloração cinza escura à preta, mas meteoriza rapidamente para castanho ou vermelho-ferrugem, devido à oxidação dos seus minerais máficos (ricos em ferro) em hematita e outros óxidos e hidróxidos de ferro.

Os basaltos são classificados em: basaltos toleíticos, basaltos alcalinos, basaltos alumínicos. Os basaltos toleíticos são ocasionados a partir de magmas resultantes da fusão parcial de peridotito, exibindo cor cinzenta escura e alta densidade. São formados por grande quantidade de sílica e, inexplicavelmente, são observados cristais de quartzo. Esses tipos de basaltos são pobres em álcalis (Na₂O e K₂O), pelo qual são designados como basaltos subalcalinos. O piroxênio é cálcico e o plagioclásio sempre é labradorita, mesmo que se aproxima à betonita. Os basaltos toleíticos são utilizados como pedras de calçada, na feitura de britas e como balastro para linhas de caminho de ferro (GONZÁLEZ, 2003).

Basaltos alcalinos (rochas escuras) encontram-se nas margens continentais ativas e nas zonas continentais estáveis, por vezes apresentam uma estrutura microlítica, são chamados também de basaltos com olivina, porque a contêm em fatura. Os basaltos alcalinos são muito pobres em sílica e ricos em alcalinos e titânia, o piroxênio é cálcico e o plagioclásio é ainda labradorita, mas se aproxima à andesina (DERCOURT e PAQUET, 1984).

Os basaltos alumínicos encontrados nos cinturões orogênicos são ricos em alumina (Al₂O₃), geralmente mais de 17%, e sua composição em sílica e em álcalis é

intermediária entre os tipos anteriores. O plagioclásio contém mais anortita (betonita) (GONZÁLEZ, 2003).

Piovezam *et al.* (2006) realizaram estudo comparando as atividades pozolânicas do filler calcário com o basalto, onde os valores encontrados de índice de atividade pozolânica (IP) para o filler calcário foi de 68,1% e basalto foi de 54,5%, ambos fora da norma atualizada. Porém, analisando os valores de resistência à compressão para os 7 dias, 28 dias e 63 dias, os valores são muito próximos, como exemplo, para 63 dias o valor encontrado de filler calcário foi de 73 MPa e o de basalto foi de 70 MPa. Justificam-se estes valores já que o filler calcário apresenta índice de atividade pozolânica com o cimento Portland superior ao do filler basalto. Além disso, a relação água/finos para o concreto com filler calcário é de 0,27 kg/kg, enquanto que o concreto com filler basalto este valor atinge 0,29 kg/kg. Nesta pesquisa, considerou-se como finos o cimento e as adições minerais.

O basalto é uma rocha reativa na presença do hidróxido de cálcio, produto de hidratação do cimento, o que provoca aumento da resistência do produto final advindas das propriedades pozolânicas do material. Dependendo da finura, o material apresenta valores consideráveis de IP para ser usado em tecnologia de CPR.

Gomes *et al.* (2003) afirmam que o estudo de concretos especiais, que utilizam alta dosagem de resíduos sólidos industriais na forma de finos, é uma contribuição positiva para o desenvolvimento sustentável. Ao utilizar-se sílica ativa, filler calcário e, principalmente, o filler de basalto em substituição ao cimento, agrega-se significativo ganho ecológico, já que estes são resíduos industriais. Dentre os resíduos industriais mais utilizados, estão o filler de calcário ou basalto, a cinza volante, a cinza de casca de arroz, a escória de alto-forno e a sílica ativa. As pesquisas apresentam bons resultados para o desenvolvimento de concretos de alta resistência (RILEM, 2014).

Guerra (2013) estudou a interferência da colocação de resíduo de basalto na confecção de concreto e constatou que os valores de resistência foram superiores ao sem adição. A reologia da pasta foi melhorada, sendo que outro fator bem considerado no trabalho é o percentual de finos, que melhorou o preenchimento dos poros que, por sua vez, acarretou em uma redução da quantidade de água absorvida pelo concreto no estado endurecido, contribuindo para a redução de permeabilidade.

2.4.4 Sílica ativa

A sílica ativa é um material cimentício suplementar usado na fabricação de CPR, também conhecida como fumo de sílica. Sua adição fornece ao sistema uma alta reatividade, proporcionando o aumento nas resistências mecânicas inicial e final, como consequência, diminuição da taxa de absorção e aumento da resistência capilar dos CPR.

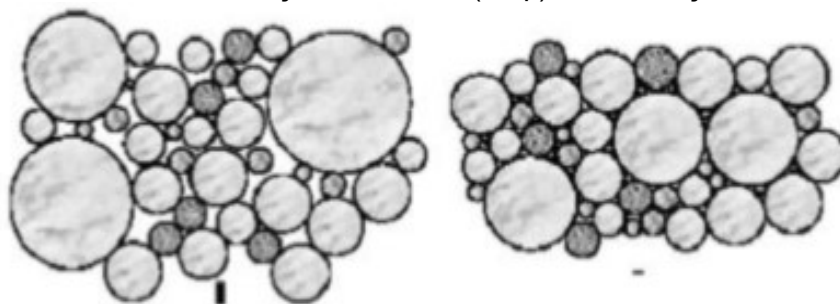
Quando as adições são adicionadas ao cimento, notam-se dois tipos de efeitos físicos: refinamento do tamanho do grão e refinamento do tamanho dos poros. O silicato de cálcio hidratado do tipo secundário, quando formado ao redor das partículas minerais, forma passivamente uma redução de vazios capilares por meio de reações químicas. Para Cincotto (2011), são materiais que, em contato com uma solução fortemente alcalina contendo íons de cálcio, reagem com a água, formando produtos de mesma natureza daqueles provenientes da hidratação do cimento Portland. A reação pode ser potencializada por temperaturas elevadas.

Por se tratar de um material cimentício suplementar, é uma das matérias mais usadas, assim como acinza volante e escória de alto forno (CARINO, 1999). É considerado um resíduo industrial. Para Hutteret *al.* (2013), existe uma dificuldade para otimizar a dosagem, em função das modificações de composição química e distribuição das partículas, de forma geral demanda de vários experimentos para se chegar a um denominador na mistura. Além disso, ocorre uma diminuição dos impactos ambientais pela diminuição do consumo de cimento.

A sílica, quando comparada ao cimento, apresenta uma distribuição granulométrica duas ordens de grandeza inferior. É constituída por partículas esféricas de dimensões 15,0 μm a 0,3 μm . Sua ação, dentro dos CPR, provoca redução considerável dos tamanhos dos poros. O material é considerado altamente reativo, porém ocorre um aumento no consumo de água do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Além das reações químicas, na pasta cimentícia, ocorre o efeito físico, conhecido por efeito filer (Figura 9), demonstrando uma perfeita acomodação dos espaços vazios, tornando a estrutura compacta.

Figura 9 - Concreto sem adições minerais (esq.) e com adições minerais (dir.).



Fonte: Fomarmagini(2005).

Dal Molin (2005) descreve o fenômeno de nucleação das partículas minerais que ocorre na precipitação dos hidratados sobre a superfície dos grãos de filler. Segundo Yazici, Deniz e Baradan (2013), a preferência pela sílica, em concretos do topo CPR, é avaliada de maneira imprescindível para desenvolver as propriedades de ultra-alto desempenho, pois esse tipo de adição de elevada finura e pozolanicidade é o que proporciona a formação de uma matriz rígida.

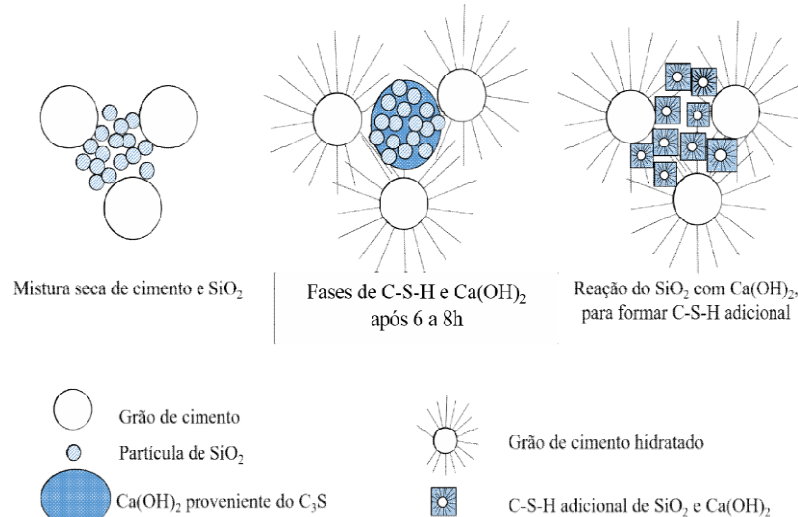
A atuação ideal da sílica ativa é atingida com teores próximos de 25% em relação ao conteúdo de cimento no traço. Para Richard e Cheyrezy(1995), a sílica ativa desempenha três funções no CPR: (i) melhora as características reológicas, (ii) forma produtos de hidratação por atividade pozolânica e(iii) preenche os vazios entre os grãos de cimento, gerando maior durabilidade. Apesar das vantagens, a escolha do tipo de sílica em CPR deve ser criteriosa, pois dependendo do modo de utilização, pode resultar uma superfície específica tão elevada a ponto de demandar maior quantidade de aditivo superplastificante para garantir a trabalhabilidade do concreto.

Para Isaia (1995), o emprego de sílica ativa no concreto oferece acréscimos de resistência mecânica, próximo de 25% a 45%. Aïtcin(2000)aconselha a dosagem no intervalo de 3% a 10% em substituição, enquanto Tutikian, Isaia e Helene (2011) sugerem uma substituição de 25%, para que ocorra a reação do tipo filer.

Para Richard e Cheyrezy (1995), uma boa proporção entre cimento e sílica encontra-se na proporção de 0,25, onde é possível o consumo de hidróxido de cálcio (portlandita) liberado pela hidratação do cimento, resultando na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Isso ocasiona menor compactidade e melhor empacotamento (RICHARD eCHEYREZY,1995). Ao reagir com a portlandita proveniente do C_3S , a sílicaativaformaumC-S-

Hadicional, melhorando o empacotamento das partículas, como é ilustrado na Figura 10 (OERTE *et al.*, 2014).

Figura 10 - Reação da sílica ativa com o hidróxido de cálcio para formação de C-S-H adicional.



Fonte: Adaptado de Strunge e Deuse (2008).

Assim, as resistências mecânicas são aumentadas e as microestruturas e a compacidade do CPR são reforçadas. Segundo os pesquisadores, os melhores resultados são relatados com a utilização de sílica ativa proveniente da indústria de zircônio, possuindo poucas impurezas e maior finura (da ordem de $14 \text{ m}^2/\text{g}$).

Os estudos de Singh *et al.* (2004) mostraram que a utilização de sílica ativa contribui para a melhoria das ligações da interface entre a pasta e as fibras, mas se limita apenas a fibras de aço ou de carbono. Desta forma, a utilização de sílica ativa pode melhorar a adesão entre as fibras e a pasta de cimento em CPR com utilização de sílica.

Dentro desse estudo, optou-se somente pelo uso de uma proporção de sílica ativa entre 20% e 25% em substituição ao cimento nos ensaios, já que no caso do CPR, a utilização de altas doses de superplastificantes possibilita a utilização de teores mais elevados. Além disso, a composição granulométrica tende a ajudar na melhora do abatimento (HERMANN *et al.*, 2016).

2.4.5 Aditivos

Segundo a NBR11768 (2011), os aditivos são produtos adicionados durante o processo de preparo do concreto, em quantidade não maior que 5% da massa de material cimentício contida no concreto, com o objetivo de modificar propriedades do concreto no estado fresco e/ ou endurecido. Abaixo, seguem as principais propriedades que os aditivos podem modificar no estado fresco e endurecido.

- (i) Consistência;
- (ii) Trabalhabilidade;
- (iii) Bombeamento;
- (iv) Resistências mecânicas; e
- (v) Durabilidade.

Como consequência, promove as seguintes melhorias:

- (i) Diminuição da permeabilidade;
- (ii) Diminuição da retração;
- (iii) Diminuição do calor de hidratação;
- (iv) Diminuição ou aumento dos tempos de pega (retardar ou acelerar); e
- (v) Diminuição da absorção de água.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), o conceito de que as propriedades do concreto, nos dois estados, fresco e endurecido, podem ser alteradas com a adição de determinados materiais às misturas de concreto tem sido responsável pelo grande crescimento da indústria de aditivos e adições para concreto nos últimos anos.

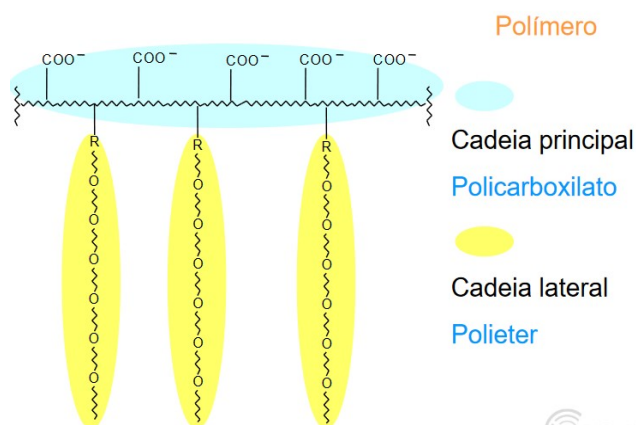
As propriedades dos aditivos variam muito pela composição química e muitos deles apresentam mais de uma função, o que torna difícil classificá-los de acordo com sua aplicação. Os aditivos podem ser divididos em dois tipos, de forma que as substâncias químicas começam a atuar no sistema cimento-água de forma rápida, o que provoca influência na tensão superficial da água e uma adsorção na superfície das partículas do cimento, o restante se quebra e afeta as reações químicas entre

os compostos da água e cimento, de forma rápida nos primeiros instantes até uma determinada quantidade de horas após a sua adição.

As adições podem provocar efeitos na reologia, que podem dificultar a trabalhabilidade ou demorar o efeito de reação. Quando formado por sais solúveis e por outro grupo funcional (agente ativo), são acrescentados ao concreto em quantidades pequenas para fins, como plasticidade, controlar o tempo de pega, incorporar ar. Ao tornar a mistura do concreto, é possível aumentar a consistência sem aumentar o consumo de água ou, mesmo, pode diminuir o consumo de água (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

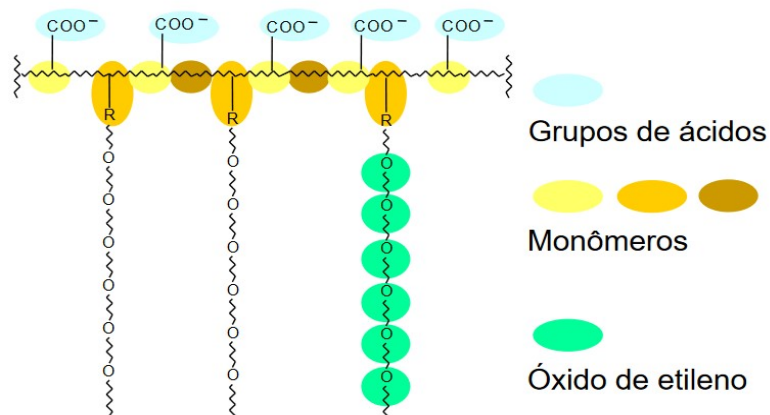
CPR é um concreto de alto desempenho que possui maior densidade devido à redução na quantidade de água de mistura, que só é consolidada pelo uso de aditivos superplastificantes (SARI e PRAT, 1999). Além de ser formado por componentes finos e ultrafinos, como as adições minerais, tem sido adicionado às misturas para garantir uma melhor compactação e preenchimento dos vazios existentes, para manter a essencial trabalhabilidade ao CPR e permitir a adequada mistura de seus componentes. Faz-se necessário o uso de aditivos modificadores de sistema, que promovem uma redução de água na proximidade de 40%. Em geral, são utilizados de terceira geração, como os policarboxilatos e os éter-policarboxilatos, com descontração das funções, conforme as Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Estruturas químicas: éter policarboxilato.



Fonte: Schmidt (2005).

Figura 12 - Estruturas químicas: éter policarboxilato.



Fonte: Schmidt (2005).

Os policarboxilatos conferem um elevado aumento de fluidez nos concretos, o que favorece a sua utilização em concretos de ultra alto desempenho, pois reduz de maneira competente a água no traço de CPR, favorecendo elevada resistência, durabilidade e trabalhabilidade (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011). Esses aditivos apresentam grande massa molecular. Suas propriedades estão ligadas aos comprimentos das cadeias e números de repetições dos meros.

Os policarboxilatos são formados por grupos químicos, denominados de carboxílicos, possuem cadeias laterais de diferentes comprimentos, sendo este um parâmetro importante para a eficiência do aditivo. A dispersão dos grãos do cimento e a estabilização da suspensão podem ser monitoradas pelo tamanho das cadeias, mudança de cadeia carbônica ou pelas ramificações. Lyra *et al.* (2010) descreveram efeitos da estrutura molecular dos superplastificantes à base de policarboxilato na fluidez das pastas do cimento Portland. Foi constatado que para uma mesma quantidade de aditivo, mais fluida é a mistura e maior tempo de pega para os que contêm o maior número de grupos sulfônicos e carboxílicos na cadeia.

Também podem ser utilizados outros tipos de aditivos em complemento ao superplastificante, como os aceleradores de pega e os modificadores de viscosidade. Entretanto, o superplastificante é um componente fundamental. São largamente utilizados em CPR, em teores que podem superar os 4%, uma vez que são altamente eficientes, mesmo para relações água/aglomerantes baixas (HOLSCHEMACHER, 2003). A utilização do aditivo à base de policarboxilatos

pode variar na proporção de 0,6 a 2% do material cimentício, conferindo o aumento de aproximadamente 25% da resistência (FRACALOSSI, 2011).

Outro ponto a ser considerado durante a seleção do aditivo é a possibilidade de incompatibilidade com o cimento Portland. Dependendo do tipo, da quantidade e reatividade das fases, bem como da solubilidade dos sulfatos, podem surgir incompatibilidades relacionadas à cinética (AÏTCIN, 2000), observadas sobre o tempo de emprego e as propriedades físicas e químicas do cimento. Fatores como a finura, o teor de carbono, álcalis e C_3A podem influenciar nos efeitos dos aditivos, sendo recomendável a compatibilidade entre esses materiais (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

Tutikian *et al.* (2015) argumentam que, para melhorar a trabalhabilidade dos CPR, se faz necessário utilizar aditivos modificadores de viscosidade (AMV's) para impedir a segregação e exsudação do concreto no estado fresco. Pode-se trocar os componentes finos do concreto, assim, a mistura terá pouquíssimas partículas adicionadas, o que provoca a diminuição da área superficial. Vale ressaltar que varia muito o tipo de adição mineral.

Esse tipo de aditivo é capaz de aumentar a coesão, a estabilidade de compostos à base de cimento em argamassas, grautes e outros tipos de derivados cimentícios. Essas melhorias são alcançadas na mistura através do aumento da viscosidade da água nos constituintes em suspensão.

De acordo com Richard e Cheyrezy (1995), a utilização do superplastificante no CPR é justificada por promover um aumento da trabalhabilidade sem mudança na composição da mistura, consequentemente há aumento da resistência e durabilidade. Existem algumas discordâncias no meio técnico entre o teor ideal de adição para fabricação de CPR. Algumas das taxas mais utilizadas são: 1,0%; 1,5% e 2,0% de adição em função do teor de cimento.

Biz (2001) fez um estudo utilizando um aditivo líquido de cor marrom, contendo 28,7% de sólidos na mistura e massa específica = $1,099 \text{ g/cm}^3$, caracterizado, no mercado, como superplastificante de terceira geração. Foram testados diversos teores sob diferentes relações de água/aglomerante, obtendo-se sucesso de compatibilidade.

Todavia, se faz necessário um estudo do percentual de sólidos presentes nos aditivos superplastificantes. Segundo Fehling *et al.* (2014), os aditivos mais eficazes

para a produção de CPR são baseados em cadeias de policarboxilatos, com a quantidade de sólidos presentes superiores a 30%.

Andrade *et al.* (2015) estudaram a influência de três diferentes tipos de cura nas propriedades do concreto sem levar em consideração o percentual de sólidos dos aditivos, obtendo resistências próximas a 110 MPa. Noda *et al.* (2017) levaram em consideração o percentual de sólidos dos aditivos, atingindo valores de 140 MPa. Por fim, deve ser avaliado o teor de sólidos e a natureza da cadeia polimérica, grupos funcionais e compatibilidade com o tipo de cimento. No geral, os aditivos adicionados em CPR são do tipo policarboxílico, com teor de sólidos entre 40% a 45% (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011).

2.4.6 Microestrutura

A maior homogeneidade do CPR deve-se à limitação do tamanho máximo das partículas. A compacidade é melhorada por uma otimização da granulometria e pela aplicação de pressão antes ou durante o endurecimento (RICHARD e CHEYREZY, 1995; AÏTCIN, 2000). Nesse tipo de concreto, é eliminado o agregado graúdo, o que diretamente reduz ou elimina a zona de transição e aumenta a compacidade do concreto, provocando a redução do esqueleto granular.

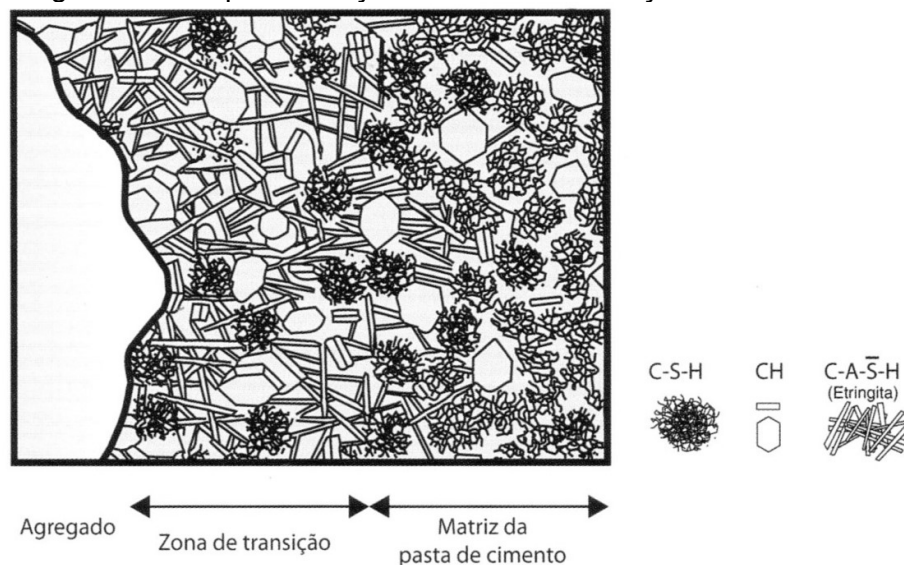
O tratamento de pressão aplicada ao material pode melhorar a microestrutura, porque permite transformar o C-S-H em uma fase mais estável, resistente e duradoura (AÏTCIN, 2000). A aplicação de temperatura e pressão favorece a cristalização dos silicatos hidratados e liberação de hidróxido de cálcio e, consequentemente, acelera suas reações com as adições pozolânicas. Richard e Cheyrezy (2015) descrevem que, em temperaturas inferiores a 200°C, forma-se a fase chamada de tobermorita. Em temperaturas superiores a 200°C, ocorre a formação de truccotita, gyrolita, xonotlita e hillebrandita, o que pode depender da relação cálcio/sílica ativa. Não se sabe ainda exatamente o porquê, mas sabe-se que há a formação de outros compostos cristalinos. Richard e Cheyrezy (2015) obtiveram resistências à compressão de 650 MPa em corpos de prova com cura térmica sob elevadas pressões.

Richard e Cheyrezy (1995) procuraram as condições ótimas de cura, partindo dos seguintes princípios:

- (i) Obtenção da porcentagem ótima de hidratos cristalinos;
- (ii) Definição de condições estequiométricas e termodinâmicas privilegiando a formação de produtos hidratados cristalinos, obtendo as melhores propriedades mecânicas; e
- (iii) Extração da quantidade máxima de água do concreto endurecido.

O CPR endurecido é constituído, basicamente, de fases hidratadas sulfoaluminatos, portlandita e principalmente C-S-H, poros e material cimentício não hidratado, sobre os quais se discorre particularidades e mudanças esperadas quando da aplicação de temperatura e ou de pressão. A Figura 13 mostra a representação da zona de transição na interfase agregado/pasta de um concreto convencional.

Figura 13 - Esquematisação da zona de transição em concretos.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Nos concretos convencionais, os agregados são os componentes dominantes em volume, formando uma estrutura granular rígida, onde boa parte da retração existente no concreto é absorvida por este arranjo. No CPR, a massa total de agregados, areia e pó de quartzo é de em torno de 30%. Assim, os agregados não apresentam este arranjo rígido e, sim, um conjunto de agregados aglomerados à uma matriz contínua (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

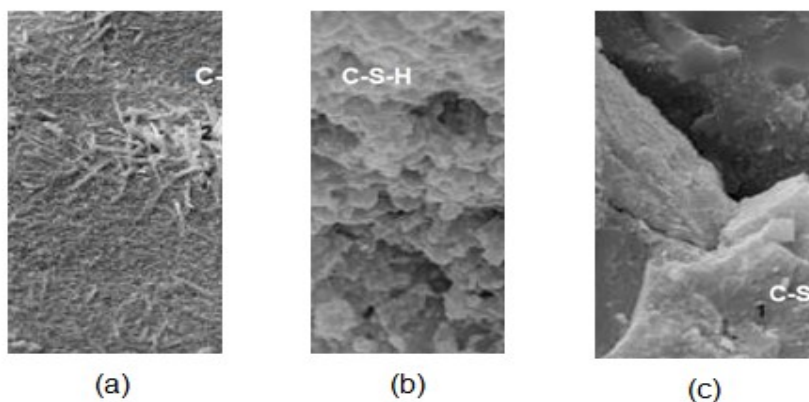
A otimização granular procura o melhor empacotamento das partículas e torna o CUAD um material praticamente sem defeitos, possibilitando a produção de

uma mistura alternativa para produção de edificações blindadas e estocagem de resíduos nucleares (YUNSHENG *et al.*, 2008).

O silicato de cálcio hidratado (C-S-H) é um gel que representa até 80% da massa total da pasta endurecida de cimento Portland (AÏTCIN, 2000), sendo, portanto, o principal responsável pelas propriedades mecânicas (BRUNAUER, 1962; MIKHAIL e OWEIMREEN, 1973; GUÉNOT-DELAHAIE, 1996; STARK, 2011). O crescimento da resistência dos CPR está ligado à otimização granular e à relação água/cimento.

O C-S-H, tradicionalmente, pertence a uma família com estrutura e composição química variáveis. Forma-se como um produto interno no grão anidro e externo nos poros antes preenchidos por água. Independentemente da distinção entre produto interno e externo, quatro morfologias de silicato de cálcio hidratado são listadas pela ciência de concretos tradicionais. O primeiro tipo está presente nas misturas com primeiras idades na forma de fibras com 2µm de dimensão. O C-S-H tipo 2 proporciona estruturas reticuladas ou alveolares, lembrando colmeias de abelha. Os terceiro e quarto tipos são observados em concretos mais velhos, com aspecto cada vez mais denso (TAYLOR, 1997). Na Figura 14, tem-se a visão dessas três diferentes morfologias do C-S-H. Essas imagens são de um CUAD com 178 dias. Os concretos foram proporcionados com fibras e uma relação água/cimento próximo de 0,18. Os três tipos de C-S-H foram encontrados sem distinção quanto à composição química.

Figura 14 - Diferentes morfologias do C-S-H em CPR: (a) fibrilar (magnitude: 10.000x), (b) alveolar (magnitude: 4.500x), (c) blocos maciços (magnitude: 10.000x).



Fonte: Vanderlei (2004).

2.4.7 Portlandita (CH)

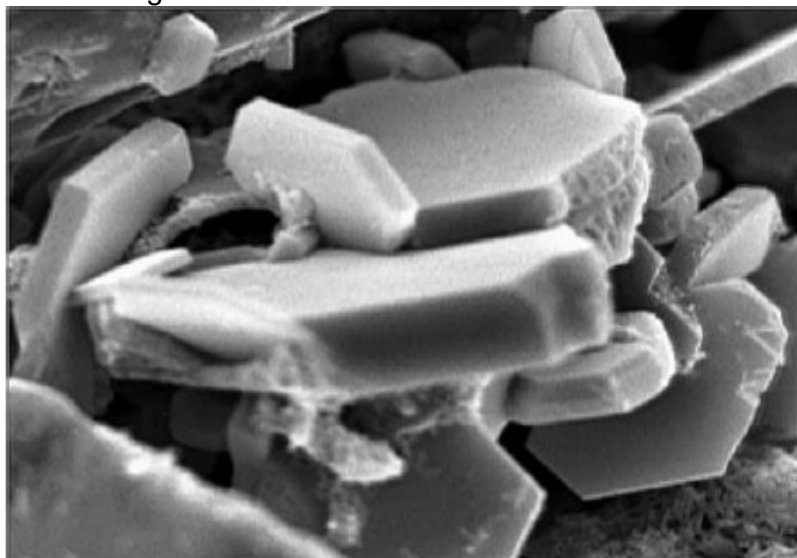
Na hidratação dos silicatos de cálcio, uma parcela de cal é liberada na forma de hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , também chamado de portlandita. Os cristais de portlandita são mais solúveis que as partículas do C-S-H e sua presença na pasta reduzem a durabilidade a águas ácidas e sulfatadas (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A hidratação dos silicatos (C_3S e C_2S) inicia-se algumas horas após o contato do cimento com a água, resultando na formação de C-S-H e C-H. As resistências inicial e final da pasta de cimento Portland são comandadas pelo C_3S , enquanto que o C_2S é responsável somente pelo aumento da resistência em idades avançadas (MOIR, 2003). Em geral, os silicatos de cálcio hidratado representam cerca de 50% a 60% do volume de sólidos em uma pasta hidratada, tendo forma de fibras pouco cristalinas a reticulados cristalinos, formando um sólido poroso com características de gel rígido, denominado de gel de tobermorita. Já o hidróxido de cálcio constitui cerca de 20% a 25% do volume da pasta hidratada, tendo morfologia definida em forma de prismas hexagonais, sendo conhecida na literatura pelo nome de mineral de portlandita (MEHTA e MONTEIRO, 2006; TAYLOR, 1990).

A portlandita (CH) é um dos principais produtos de hidratação do cimento, com a diferença que exerce menor influência na resistência, em função da sua baixa área superficial (PAULON e KIRCHHEIM, 2011) e maior contribuição no que tange à percolação da água. O Hidróxido de Cálcio tem sua morfologia definida, formando cristais prismáticos, cujo tamanho aumenta conforme também aumenta o espaço livre.

Os cristais de CH crescem nos espaços antes preenchidos com água e, em condições normais de cura, encontram-se morfologicamente como pratos hexagonais (TAYLOR, 1997), como ilustra a Figura 15. A sua formação depende de várias variáveis para crescimento: espaço, temperatura de hidratação e impurezas no sistema (PAULON e KIRCHHEIM, 2011).

Figura 15 – Cristais de hidróxido de cálcio.



Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Segundo Taylor (1997), em mistura de concretos curados a quente, os cristais crescem na forma de fibras. Amostras que foram apenas pressurizadas, sem o fornecimento externo de calor, apresentam uma microestrutura intermediária, isto é, uma estrutura mais densa que aquela observada quando a cura é normal, em água, com alguns cristais hexagonais bem definidos.

2.4.8 Sulfoaluminatos de cálcio

Quanto à hidratação da fase intersticial, a mesma acontece de forma rápida e os cristais oriundos da reação do C_3A e gesso com a água apresentam-se em poucos minutos com formato acicular de sulfoaluminatos de cálcio, conhecido como etringita ($C_6AS_3H_{32}$).

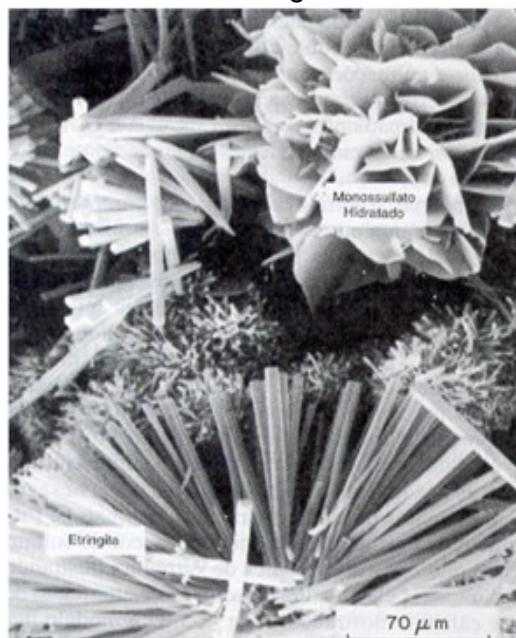
Os sulfoaluminatos de cálcio exercem um desempenho secundário no concreto, onde ocupam cerca de 20% do volume de sólido da pasta endurecida. Nos estágios iniciais da hidratação, ocorre a formação do trissulfato hidratado (AFt ou etringita) que pode se converter em monossulfoaluminato hidratado (AFm) (PAULON e KIRCHHEIM, 2011).

Entre os aluminatos, os sulfoaluminatos de cálcio hidratados contêm composição higrogranada, de precipitados, que segundo Taylor (1997), está ligado à fase AFm. Sua estrutura está relacionada ao mineral granada ($Ca_3Al_2Si_3O_{12}$), no qual há substituição por parte ou total do Si^{4+} por $4H^+$, além de ter

outros tipos substituição parcial ou total de Al^{3+} por Fe^{3+} tendo como formula $C_3A_{1-x}FxS_{3-y/2}H_y$.

A Figura 16 apresenta placas de monossulfoaluminato com agulhas remanescentes de etringita. A morfologia dos cristais de etringita depende do espaço disponível para o seu crescimento, da relação a/c. A hidratação nas primeiras horas ocorre de forma compactada (prismáticos), em média de três dias ocorre o formato de agulhas. Para concretos de altíssima resistência, quanto maior a pressão aplicada, menor o espaço disponível e, conseqüentemente, menor o tamanho dos cristais.

Figura 16 - Monossulfoaluminato com agulhas remanescentes de etringita.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

2.5 EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Para confeccionar concretos de elevadas resistências, as medidas e proporções dos materiais constituintes e as características que se desejam devem ser pré-definidas no estudo base. As particularidades e propriedades estão ligadas ao seu processo de fabricação e mistura no estado plástico.

Em trabalhos acadêmicos, existem métodos de fabricação de concretos de alta resistência (CAR), porém, não foi localizado na literatura um método específico e bem estabilizado para a fabricação de concretos de pós reativos.

Foram descritas nesse trabalho algumas diretrizes para fabricação de CPR, como eliminar os agregados graúdos na composição do concreto, melhorar a ductilidade por meio de incorporar fibras de aço, elevado consumo de cimento, uso de adições, compatibilidade dos aditivos superplastificantes.

O empacotamento de partículas é a seleção da proporção e do tamanho adequado dos materiais particulados, de forma que os vazios maiores sejam preenchidos com partículas menores, a ponto de existir maior compactidade no material (McGEARY, 1961 *apud* BARBOSA, 2008). Perante as características e propriedades indispensáveis ao CPR, devido à sua necessidade por uma microestrutura compacta e com raríssimos defeitos, é possível que os empregos de técnicas de empacotamento de partículas possam ser utilizados na fabricação de CPR. Nesse estudo, busca-se fazer uso de técnicas para aprimorar os estudos dos CPR.

Em 1892, Féret publicou o primeiro estudo sobre o empacotamento de partículas em concreto, apresentando uma equação que mostrava que quanto maior a densidade de empacotamento, maior seria sua resistência e, por consequência, menor porosidade do concreto (AIQIN *et al.*, 1997; AIQIN *et al.*, 1999; DE LARRARD e SEDRAN, 1994).

Segundo Castro *et al.* (2009), o empacotamento de partículas consiste em preencher os espaços vazios entre partículas de maior tamanho por partículas de menor tamanho. O espaço entre estas é, então, preenchido por partículas ainda menores.

2.5.1 Determinação da densidade de empacotamento de partículas do CPR

Oliveira (2000) e Fennis (2011) descrevem como densidade do empacotamento de partícula um conjunto granular de volume de sólidos em uma unidade de volume total. As características do concreto endurecido dependem principalmente da densidade e da resistência do agregado, que têm uma relação direta com a porosidade do mesmo. A forma e a textura dos agregados também afetam as características do concreto. A densidade dos agregados, usualmente determinada pelo ensaio de massa unitária, conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), é igual à diferença entre a unidade e o índice de vazios dos agregados.

Para a determinação da densidade de partículas finas, a densidade de empacotamento não é adequada de se realizar pelo método de empacotamento por via seca, sem a presença de água (método da massa unitária), pois para estas partículas a densidade de empacotamento determinada experimentalmente é muito sensível à compactação aplicada, aos efeitos da água e dos aditivos químicos, os quais não são considerados em métodos por via seca (LI e KWAN, 2014a; ANDRADE, 2015).

Partículas finas tendem a se juntar devido às forças coesivas das ligações secundárias do tipo atração de Van der Waals, formando pequenos acumulados de partículas. Quando a força do tipo peso, que atua diretamente na partícula que depende da massa e da aceleração da gravidade, for menor que essa força de atração entre as partículas, sempre haverá aglomeração dos pós (KWAN *et al.*, 2008). Sendo assim, é recomendado para empacotamento o método por via úmida, o qual está sujeito à aglomeração devido à elevada interação entre partículas. Nesse caso, a presença de água e aditivos químicos influi intensamente na ocupação de espaços destas partículas. O uso deste método permite medir a influência da água e utilizar os mesmos aditivos químicos e métodos de compactação que serão usados na produção de concretos, representando a condição real da mistura a que os materiais componentes estarão submetidos durante a produção (LI e KWAN, 2014b).

O método experimental para calcular a densidade de empacotamento de partículas finas, método na condição úmida, foi proposto por cientista Wong e Kwan (2008). Este está aperfeiçoado na produção de pastas com relações água/sólidos (a/s) variadas, sendo, então, determinada a massa de um volume pré-determinado da pasta produzida. Para isso, habitualmente, se utiliza o recipiente para determinação da massa específica de argamassas. Através das Equações 5 a 7, são determinadas a relação de vazios e a concentração de sólidos de cada mistura.

$$V_s = \frac{M}{\rho_w u_w + \sum_{i=1}^n \rho_i R_i} \quad (\text{Equação 5})$$

$$u = \frac{V - V_s}{V_s} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\phi = \frac{V_s}{V} \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

VS: volume de sólidos;

M: massa de pasta que preenche o molde;

V: volume do molde;

ρ_w : massa específica da água;

u_w : relação a/s, em volume;

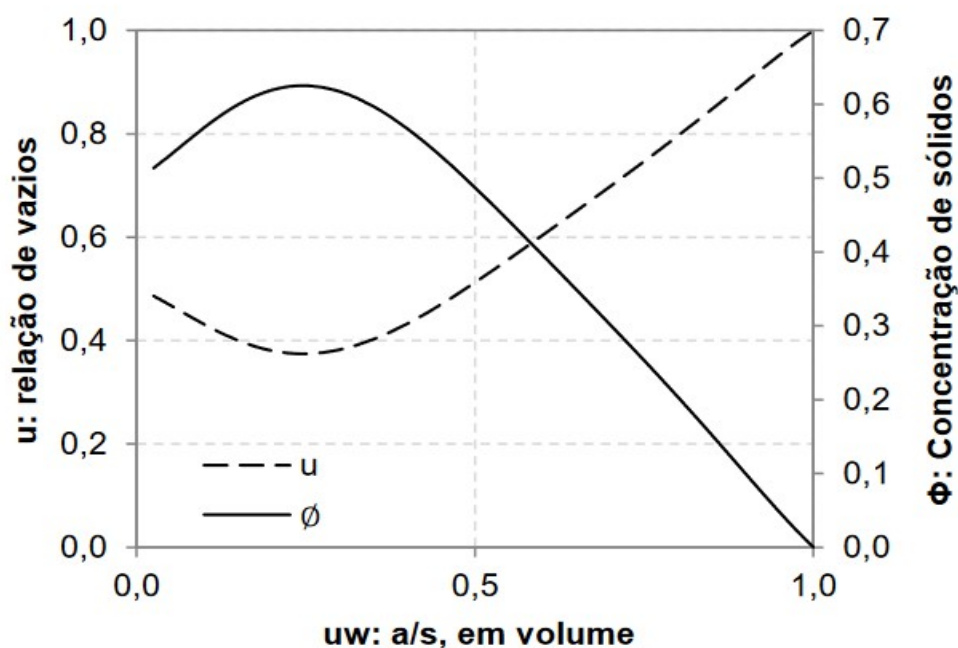
ρ_i : massa específica do material i;

R_i : volume do material i em relação ao volume total de sólidos;

u : relação de vazios; e

ϕ : concentração de sólidos.

Figura 17 - Gráfico típico obtido no ensaio de densidade de empacotamento de finos.



Fonte: Kwan(2008).

Analisando as curvas apresentadas na Figura 17, verifica-se que a máxima concentração de sólidos obtida pode ser relacionada à densidade de empacotamento de partículas na condição úmida. Além disso, neste ponto de concentração de sólidos máxima pode-se determinar qual a quantidade mínima de água necessária à mistura para que ocorra a formação de uma pasta homogênea, ou seja, como a relação a/s é elevada, logo a relação de vazios é também alta, pois as partículas sólidas estão afastadas umas das outras em razão de estarem perto da

água no sistema, portanto, a concentração de sólidos é baixa. Quando ocorre a diminuição da relação água/sólidos, as partículas são aproximadas umas das outras, de modo que a relação de vazios vai diminuindo e a concentração de sólidos vai aumentando progressivamente. Esse sistema ocorre ao alcance de um ponto crítico, onde a relação de vazios seja mínima e sólido seja máxima. Como as partículas estão repletas de água em sua volta o ar entra no seu meio. E, nesse caso, a relação a/s for igualmente diminuída, não haverá água suficiente para envolver completamente as partículas e estas estarão conectadas por pontes de ligação de água. Os pontos de tensões superficial da água, as partículas voltam então a se afastar umas das outras, diminuindo a concentração de sólidos e aumentando a relação de vazios da mistura (KLEIN, 2012; LI e KWAN, 2014b).

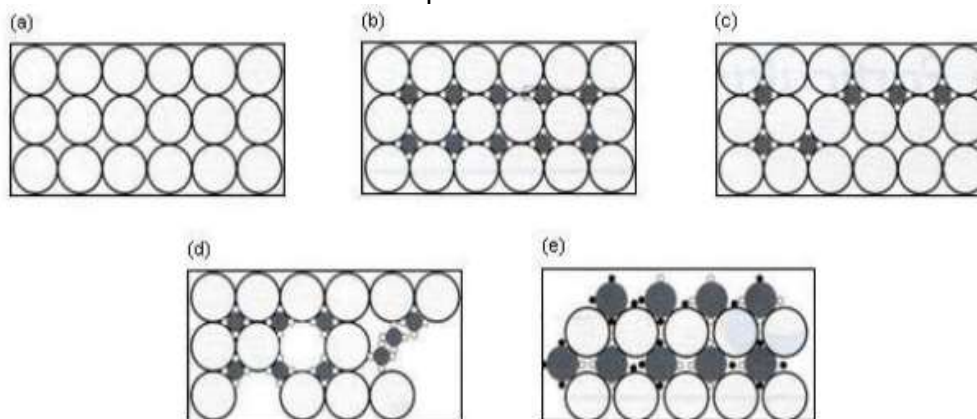
2.5.2 Métodos para obtenção de curvas granulométricas ideais

No século XX, muitos cientistas vem analisando o efeito da distribuição granulométrica sobre o empacotamento de partículas, buscando encontrar uma curva granulométrica ideal para uso em concretos.

Os modelos de empacotamento de partículas ideais se dividem em três grupos. No primeiro momento, inicialmente, os modelos geram como resposta uma distribuição granulométrica otimizada de partículas. Os modelos de Füller e Thompson, de 1907, Andreasen e Andersen, de 1930, ambos descritos por Fennis (2011), foram os primeiros modelos de empacotamento desenvolvidos. Tem-se também o modelo de Furnas (1931) e Funk e Dinger (1980), este último conhecido como modelo de Alfred.

O modelo tem como objetivo o uso de uma equação para se obter uma boa distribuição granulométrica ideal, a qual irá favorecer um baixo teor de vazios e, conseqüentemente, maior compacidade. A Figura 18 mostra a eficiência do empacotamento de partículas, influenciada pela distribuição granulométrica do sistema: (i) sistema monodisperso; (ii) máxima densidade de empacotamento teórica; (iii) deficiência de partículas dispersas; (iv) deficiência de partículas grandes; (v) distribuição inadequada de tamanhos de partículas para se obter uma boa resistência.

Figura 18 - Efeito da quantidade e do tamanho das partículas na eficiência de empacotamento.



Fonte: Oliveira *et al.* (2000).

Nos modelos apresentados por Fuller e Thompson (1907), uma equação de distribuição contínua de partículas é capaz de prever que partículas pequenas preenchem os espaços vazios entre as partículas maiores. Eles estabeleceram um coeficiente de distribuição (q) igual a 0,5 para obtenção de uma curva com o mínimo de vazios.

$$CPFT = 100. \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^q \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (%);

D é o diâmetro da partícula (μm);

D_{max} é o diâmetro da maior partícula do conjunto (μm); e

q é o coeficiente de distribuição (-).

Os pesquisadores tentaram aperfeiçoar os estudos de Fuller e Thompson (1907), como Andreasen e Andersen (1930). Eles sugeriram a mudança de um coeficiente q fixo por um coeficiente que pudesse sofrer variações, no intervalo de 0,33 e 0,50, que foram estabelecidos conforme as condições de experimentos (KUMAR e SANTHANAM, 2003 *apud* FENNIS, 2011).

Funk e Dinger (1980) demonstraram, por meio de simulações, que os valores de q menores ou iguais a 0,37 podem favorecer o empacotamento máximo de uma distribuição de partículas, enquanto que para valores maiores obtém-se sempre uma quantidade significativa de vazios.

Como apresentado na Equação (8) o modelo não apresenta um limite mínimo de tamanho de partículas, de modo que se aceita partículas infinitamente pequenas, o que não condiz com uma situação dos concretos CPR.

No aprimoramento dos modelos matemáticos, foi desenvolvida por Funk e Dinger (1980) uma distribuição granulométrica ideal dos agregados, que, a partir do modelo de Andreasen e Andersen, adicionaram um limite inferior ao conjunto de partículas, como se pode notar através da Equação 9.

$$CPFT = 100 \cdot \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right) \quad (\text{Equação 9})$$

Em que:

CPFT é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D (%);

D é o diâmetro da partícula (μm);

D_{max} é o diâmetro da maior partícula do conjunto (μm); e

q é o coeficiente de distribuição (-).

Londeiro(2016) descreve que os modelos são baseados nos fatos ao trabalhar com elevadas amplitudes de grãos, a curva apresenta alta compacidade de empacotamento, o modelo não tem restrições das partículas quanto aos formatos. Fazendo analogia dos modelos de densidade e empacotamento de forma experimental, comprovaram que a maior compactação foi alcançada no modelo de Funk e Dinger, seguido pelo modelo de Andreasen e Andersen (OLIVEIRA, 2013).

Um outro modelo de empacotamento de partículas consiste no modelo analítico, que tem como resultado o valor de densidade de empacotamento para uma distribuição granulométrica já definida. De forma geral, esses modelos de empacotamento de partículas são obtidos por equações matemáticas que pontuam como as partículas com tamanhos diferentes irão interagir geometricamente. Essas

equações dos modelos é guia para cálculos de densidade de empacotamento de misturas polidispersas, com base (FENNIS, 2011).

No modelo de Toufar, são consideradas duas classes de agregados (finos e grossos) constituídas por esferas ideal de um mesmo diâmetro. Esse modelo torna ótimo o empacotamento apenas dos agregados, é considerado que o cimento ocupará os espaços vazios (FENNIS, 2011). A determinação e otimização de empacotamento de misturas do tipo ternárias, constituída de variados tamanhos (finos, médios e grossos), é formada pelo modelo de Toufar modificado, em duas etapas.

No primeiro momento, são analisadas apenas duas classes para se obter uma mistura binária ideal e, no segundo momento, é feita uma nova simulação de empacotamento binário e efetuada entre a mistura ideal; por fim, no terceiro momento, entra a classe dos agregados. O modelo proposto por Toufar leva em consideração apenas minerais finos que estão posicionados entre as partículas grossas. Todavia, com outros experimentos, as comparações mostraram que este modelo prevê que a densidade de empacotamento de uma amostra de partículas mais grossas não aumenta quando uma pequena quantidade de partículas finas é adicionada. Essa analogia é dada porque cada partícula fina é colocada em um espaço, que limitado por quatro das partículas grossas, então foi criado um modelo de Toufar modificado para fazer as devidas correções ilusórias (FENNIS, 2011).

A Equação 10, abaixo, detalha o modelo matemático de Toufar modificado.

$$\alpha_t = \frac{1}{\frac{r_1}{\alpha_1} + \frac{r_2}{\alpha_2} - r_2 \left(\frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) * k_d * k_s} \quad (\text{Equação 10})$$

Em que:

α_t = densidade de empacotamento;

r_i = volume da partícula i; e

α_i = densidade da partícula i.

O coeficiente k_s é dado pela Equação 11:

$$k_d = \left(\frac{d_2 - d_1}{d_1 - d_2} \right) \quad (\text{Equação 11})$$

O coeficiente k_s é dado pelas Equações 12 ou 13.

$$k_s = 1 - \left[\frac{1 - 4x}{(1 - x)^4} \right] \text{ para } x < 0,4753 \quad (\text{Equação 12})$$

Ou (Equação 13)

$$k_s = \frac{0,3881x}{0,4753} \text{ para } x \geq 0,4753$$

2.5.3 Modelo de DeLarrard

Além de modelos que buscam produzir curvas granulométricas ideais, foram difundidos vários modelos analíticos, cujas equações permitem determinar a concentração de sólidos e, conseqüentemente, o índice de vazios dos conjuntos granulares. Dentre os modelos analíticos, há o modelo de De Larrard (1999). Está dentre os mais conhecidos, tendo sido escolhido para ser usado no problema de empacotamento de partículas de dosagem do concreto. Este modelo se difere dos demais métodos, pois avalia todos os materiais para a distribuição do tamanho da partícula, assim como a interação entre elas. O modelo de De Larrard (1999), chamado CPM, permite prever a densidade de empacotamento de conjuntos granulares polidispersos compostos por n classes de tamanhos de grãos. O modelo necessita de um dado de entrada para a densidade de empacotamento de cada uma das classes componentes do conjunto. Esses valores podem ser obtidos pela NBR 45 que determina a massa unitária e índice de vazios. O modelo CPM considera os efeitos de interação entre as partículas que ocorrem quando há proximidade entre grãos.

Esse modelo é dividido em dois módulos: virtual e real. O empacotamento virtual é obtido quando se organizam as partículas uma por uma correspondendo a um arranjo geométrico ideal, nesse caso, partículas cúbicas idênticas seriam

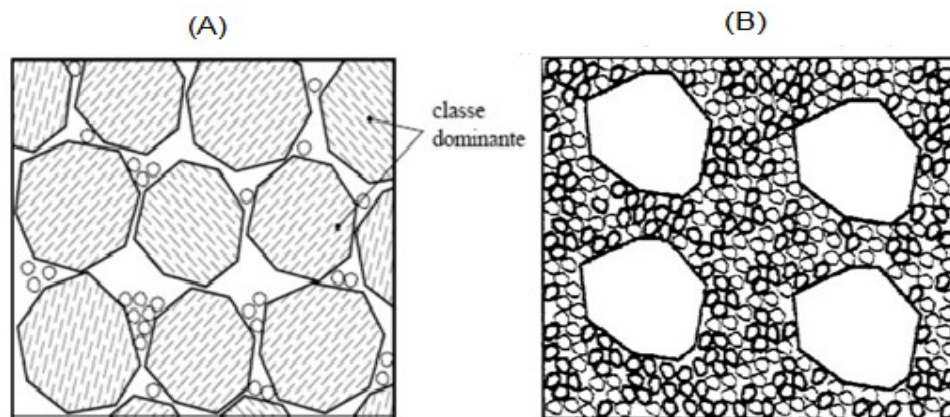
arranjadas de forma a se obter a compactação máxima de 100%, no caso de partículas esféricas, do tipo face centrada CFC que corresponde a uma compactação de 74% no sistema em questão.

Já no empacotamento real, a possibilidade de obter a compacidade máxima (virtual), por causa das unidades físicas dos materiais, de tal modo, como o procedimento do empacotamento. Desta forma, este método considera a relação entre o empacotamento virtual com o empacotamento real por meio de um parâmetro intrínseco ao procedimento real de empacotamento adotado, denominado fator de compactação. Sendo assim, a compacidade virtual é sempre superior à real.

Quando o diâmetro de uma determinada classe de partículas for maior que a dimensão dos vazios deixados pelo arranjo da classe com diâmetro imediatamente superior, ocorre um afastamento dos grãos maiores, caracterizando o efeito de afastamento. Uma outra definição bastante importante considerada é que uma classe dominante de grãos assegura a continuidade sólida do corpo granular. Sempre deve haver uma classe dominante em misturas empacotadas, caso contrário, a mistura seria constituída por uma suspensão e não um empacotamento.

Na Figura 19, abaixo, as partículas de dimensão maior são dominantes, o volume será preenchido como se os grãos menores não estivessem presentes na mistura, ou seja, se o diâmetro de uma determinada classe de partículas for maior que a dimensão dos vazios deixados pelo arranjo da classe com diâmetro imediatamente superior, ocorre um afastamento dos grãos maiores, caracterizando o efeito de repulsão.

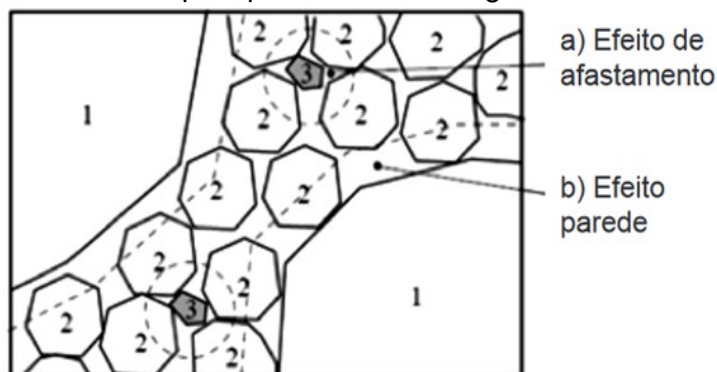
Figura 19-(A) Mistura binária sem interação. Partículas de maior dimensão dominantes; (B) Mistura binária sem interação. Partículas de menor dimensão dominantes.



Fonte: De Larrard (1999).

Na Figura 20, encontra-se também o efeito parede, que ocorre quando os diâmetros das partículas de duas classes são tão diferentes que a superfície de contato do grão mais grosso funciona como um plano ao contato com os grãos mais finos, aumentando os vazios na região próxima à superfície. Constitui-se, assim, a seguinte notação: classe 1, que consiste de partículas de maior diâmetro, e classe 2, partículas de menor diâmetro. O efeito de parede ocorrerá quando a classe 2 for dominante, e a diferença de tamanho, em relação às partículas menor e maior, for de tal magnitude que torna a superfície de contato praticamente plana.

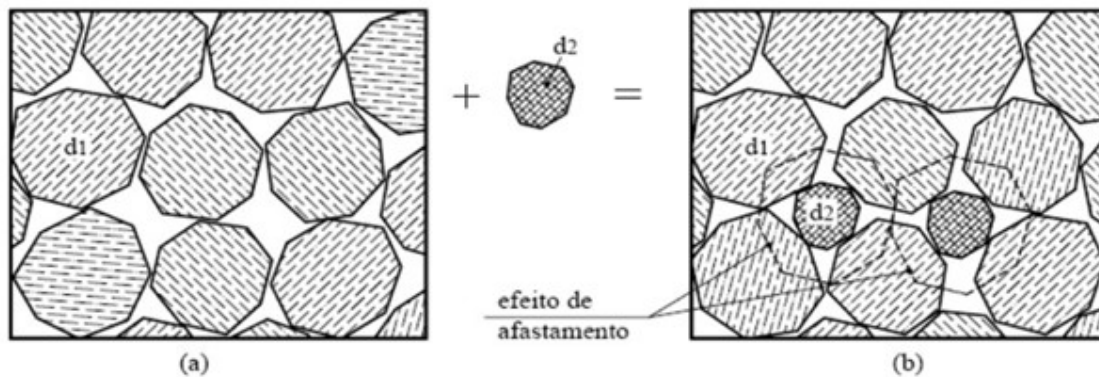
Figura 20 - Interação entre partícula: (a) efeito de afastamento nos grãos de classe 2 provocado pela classe 3 de grãos; e (b) efeito parede, em que grãos da classe 2 são influenciados pela proximidade com grãos de classe 1.



Fonte: De Larrard (1999).

Outra forma de visualizar o efeito de afastamento ocorrerá quando a classe 1 for a dominante, conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 - Efeito de afastamento exercido pelo grão classe 1 dominante



Fonte: Formagini (2005).

2.5.4 Cura

Conforme a NBR 5738 (2003), que estabelece padrões de referência para a cura do concreto, este deve ser curado submerso em água saturada de cal hidratada ou em câmara úmida, a uma temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$. Em sentido amplo, a cura é o conjunto de procedimentos que tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, que é responsável pela pega e endurecimento (NEVILLE, 1982). Segundo Mehta e Monteiro (2008) e Neville e Brooks (2013), a cura do concreto nada mais é que um conjunto de fatores que promovem a hidratação do cimento, destacando-se umidade, tempo e temperatura, onde objetiva-se desenvolver a resistência do material. No ponto de vista de Helene e Levy (2013) e Neville e Brooks (2013), as metodologias de cura, por mais complicadas que seja molhar as estruturas nas obras, inclusive por tempo insatisfatório, pode ocasionar menor durabilidade.

Para Battaginet *et al.* (2010), a perda de água pelo meio da saturação do ambiente deve ser evitada, eliminando-se a migração de água do concreto para o meio. Quando perdida essa água, ocorre o comprometimento de toda propriedade desejada do produto, pois ela é influência direta na porosidade e resistência. Porém, para que ocorra a eficiência, se faz necessário que o sistema esteja homogêneo na condição de cura do concreto.

As condições de cura são extremamente importantes e influenciam a qualidade dos concretos, principalmente em concretos com adições, que é o caso de CPR (HASSAN *et al.*, 2000), pois a cura influencia os poros e as reações pozolânicas necessitam de água para formar uma matriz rígida, devido aos novos produtos da hidratação, além de formação de uma porosidade descontínua, com uma maior proporção de capilares menores em sua estrutura. Além disso, o diâmetro médio dos poros muda em função do tempo de cura, o que pode estar pertinente com a restrição da mobilidade da água de pastas com diferentes composições. Em síntese, uma boa cura dos concretos com adição pozolânicas, os fatores como tempo e temperatura, que são intrínsecos ao processo transformação e cura, quando modificam, favorecem o comportamento mecânico dos materiais (MALLMANN, 1996).

2.5.5 Cura térmica

A cura térmica a vapor utiliza uma temperatura superior à temperatura ambiente, sendo esse aquecimento o principal foco para acelerar as reações de hidratação do cimento, tendo como principal resultado o ganho rápido de resistência, onde o concreto possa ser manuseado nas primeiras idades (SANTOS *et al.*, 2001). Porém, Kraaiet *al.*(1985) e Münchenet *al.*(2019) alertam que tal condição eleva a taxa de evaporação de água da pasta cimentícia e causa redução na efetividade de hidratação dos grãos.

Esse tipo de cura é muito utilizado nas empresas de peças pré-fabricadas, para reduzir o tempo de cura e acelerar a produção, pois se faz necessário para a redução das áreas de estocagem e permite colocar peças em serviço em um período de tempo reduzido (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

Nos trabalhos feitos por Zanni *et al.*(1996), realizados com temperaturas entre 90°C a 250°C e variações de adições (10% a 75%), indicam aumento na quantidade e no comprimento do C-S-H, atribuídos ao processo da hidratação do cimento provocada pelas taxas de temperatura e maior concentração de adições pozolânicas. Pois a velocidade de hidratação dos grãos de cimento é influenciada pelo tipo de cimento, adições pozolânicas, quantidade de água e dimensão das partículas.

Nos estudos de Barnett *et al.* (2006), o desenvolvimento da resistência à compressão, em concretos com adições curados em idades diferentes, estava pertinente com a temperatura de cura. Em idades proporções, o valor de resistência à compressão foi superior aos valores de temperaturas mais elevadas, tendo em vista que as reações pozolânicas são maiores. Após certo período de tempo, as resistências começaram a ser menores nos corpos de prova que foram curados em altas temperaturas. Esse comportamento pode ser explicado devido à formação de fases hidratadas densas em torno das partículas de cimento que não reagiram, impedindo a hidratação (ANDRADE, 2015).

O processo de cura térmica não deverá exceder a temperatura de 80°C para não causar modificações na microestrutura do concreto. Para se impedir danos às peças, deve-se seguir um ciclo de cura com forme a Figura 22 abaixo (CAMARINI, 1995).

No ciclo de cura apresentado na Figura 22, observam-se os seguintes períodos:

$T1 \rightarrow$ temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$);

$T2 \rightarrow$ temperatura máxima atingida no ciclo ($^{\circ}\text{C}$);

$t_0 \rightarrow$ período de espera (h:min). Período de tempo decorrido entre a mistura do aglomerante com a água e o início do aquecimento. Deve coincidir com o tempo de pega do concreto;

$t_1 \rightarrow$ período de elevação da temperatura (h:min). Aumento controlado da temperatura de cura (em gradiente controlado), não podendo ser superior a 20°C por hora) (NBR 9062/1985);

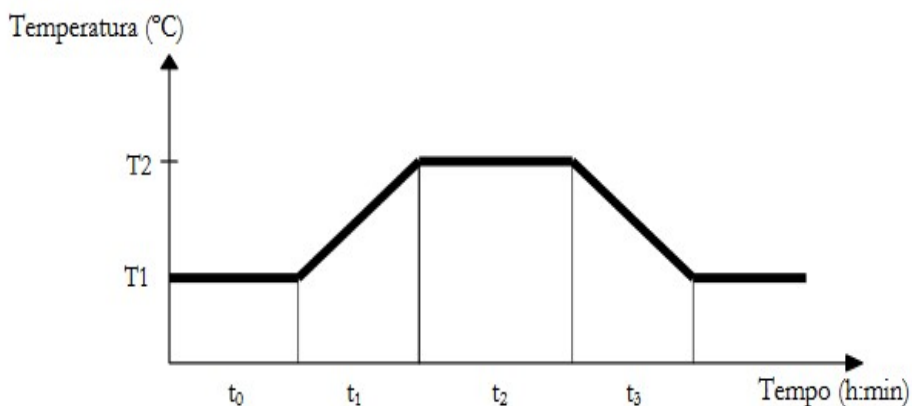
$t_2 \rightarrow$ período de manutenção da temperatura (h:min). Regime isotérmico até que se atinja a resistência desejada (definido de acordo com as necessidades de desforma e utilização);

$t_3 \rightarrow$ período de esfriamento (h:min). Diminuição controlada da temperatura das peças até a temperatura ambiente (no máximo 30°C por hora) (NBR 9062/1985);

$G1 \rightarrow$ Gradiente de aquecimento; e

$G2 \rightarrow$ Gradiente de resfriamento.

Figura 22 – Ciclo de cura térmica.



Fonte: Camarini (1995).

Quando atingida a temperatura máxima, no denominado período de manutenção do regime isotérmico 3, há um aumento da resistência mínima desejada para transporte ou operação do material (CAMARINI, 1995). Wilson (2011) descreveu que

a variável depende do tipo de aglomerante, tendo como recomendações um intervalo de 6 h a 12 h para cimentos do tipo CP V a 60°C.

No período de resfriamento, a temperatura das peças é diminuída até chegar à temperatura ambiente, é preciso prestar atenção para evitar possíveis retrações térmicas. Recomenda-se aplicar o mesmo gradiente do aquecimento, para manter a homogeneidade do ciclo (CAMARINI, 1995).

2.5.6 Cura úmida

A NBR 5738 (1994) estabelece que a cura por imersão deve utilizar o hidróxido de cálcio saturado em água. Segundo o ACI 308R-01 (2001), a água utilizada deve ser livre de impurezas e não apresentar diferença de temperatura maior que 11°C em relação à temperatura do concreto. Para Bauer (2008), a cura submersa do concreto é, sem dúvida, o método ideal, porém sua utilização é restrita e nada prática.

A cura comumente utilizada em laboratórios consiste em manter a superfície do concreto coberto com água ou totalmente imersa em água para evitar que ocorra evaporação da água presente no interior do material. A cura do concreto é uma das principais metodologias do melhoramento das propriedades mecânicas, pois a extensa área superficial está ligada à relação área/volume, sendo que as reações de hidratação do cimento estão ligadas à conservação da umidade do material cimentícios.

O processo de cura visa a garantir as reações de hidratação e evitar a retração dos concretos, de forma que o material possa desenvolver resistência razoável antes que manifestem as tensões de tração nas superfícies das peças (THOMAZ, 2005).

Tratando-se de reações pozolânicas, Carvalho(2016) estudou a adição de resíduos cerâmicos curados em tanques de cal e constatou que, quanto maior o tempo de cura, maiores valores das argamassas com resíduos cerâmicos.

Nos trabalhos de Paillere *et al.* (1991) destaca-se que o uso de sílica ativa em concretos e argamassas pode ser usada, principalmente, para reduzir sua porosidade. O objetivo da cura é manter o concreto saturado, ou mais próximo possível da saturação, até que os espaços dos concretos estejam preenchidos com água, que irá conferir matriz mais resistência.

2.5.7 Cura sob pressão

Para melhorar ainda mais a microestrutura dos concretos, pode-se aplicar pressão nos corpos de prova e acelerar o endurecimento do concreto, combinando cura úmida e pressão (TAYLOR, 1997).

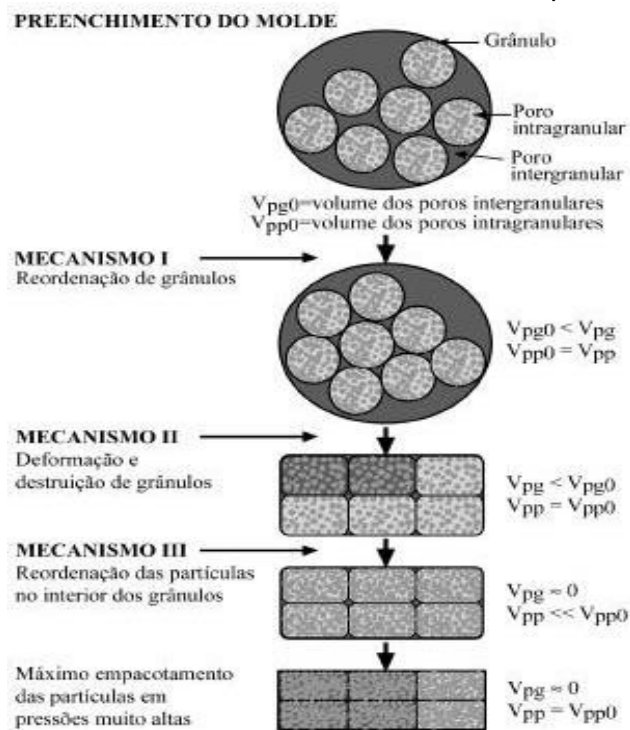
Na fase de endurecimento, a pressão aplicada, quando o concreto ainda se encontra no estado fresco, faz reduzir os vazios provocados pela água livre na pasta, proporcionando maior entrelaçamento dos hidratos produzidos nas reações, diminuindo, conseqüentemente, a espessura da zona de transição.

Nos estudos de Albaro (2000a), a pressurização do pó e o aumento da compactidade deve-se a três mecanismos/etapas, considerando a presença de poros intergranulares e intragranulares, além de partículas que compõe o grânulo (Figura 23):

1º - máxima compactação devido à reordenação dos grânulos, o que provoca uma redução do volume ocupado por poros intergranulares; e

2º - os grânulos são deformados plasticamente ou destruídos. Ao final, modifica-se o volume e tamanho dos poros intragranulares devido ao deslizamento e reordenação das partículas no interior dos grânulos, sendo que para pressões elevada ocorre a destruição total dos aglomerados (ALBARO, 2000a).

Figura 23 - Mecanismos envolvidos durante a prensagem.



Fonte: Albaro (2000a).

É muito relevante a compactação de concreto para aumentar a densidade e diminuição de vazios entre os constituintes. A aplicação de pressão no concreto fresco apresenta três efeitos favoráveis. Quando aplicada por alguns segundos, elimina as bolhas de ar aprisionadas durante a mistura, o excesso de água capilar, redução do diâmetro dos poros e da retração autógena (AÏTCIN,2000;JUSTS *et al.*, 2011; İPEK, YILMAZ e UYSAL, 2011).

Quando a aplicação ocorre durante 6 h a 12 h, acompanhada ou não de aquecimento, diminui mecanicamente a porosidade, favorecendo a obtenção de resistências elevadas em reduzido espaço de tempo (ROY, İPEK e YILMAZ, 2011). Richard e Cheyrezy (1995), Zhou e Beaudoin (2003) destacam que o aumento da densidade da matriz tem como consequência maior durabilidade e resistência à compressão. Nematzadeh e Naghipour (2012a) descrevem que há melhor elasticidade quando compactados. Já Beaudoin(2003) apresenta que a pressão é aplicada por um longo período de tempo o cimento é hidratado por vários estágios:

- (i) Nasprimeirashoras(entre8he10h), a água atinge facilmente os grãos de cimento anidro e a pressão pouco influencia o grau de hidratação;

- (ii) Entre 15h e 18h, a migração da água ocorre em menor taxa devido ao enrijecimento da matriz, contudo a aplicação de pressão induz microfissuras que permitem a movimentação da água; e
- (iii) No estágio final (20h), a pasta oferece resistência suficiente para resistir à abertura de microfissuras e o grau de hidratação.

Buscando conhecer melhor as características dos CPR atrelados ao processo de empacotamento e regime de cura nas propriedades mecânicas do concreto, busca-se conhecer a influência das modificações da microestrutura provocada pela compactação e temperatura, nos concretos no estágio endurecido por meio de caracterizações físicas, mecânicas e microestrutural. Assim sendo, acredita-se que é fundamental investigar os efeitos da aplicação de pressão combinada com uma cura térmica. Contudo, é importante deixar claro que o estudo de durabilidade não faz parte do escopo deste trabalho, nem identificar a presença ou não desta fase deletéria e expansiva.

3PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada a metodologia experimental, sendo apontados os materiais utilizados, suas caracterizações, assim como a metodologia de dosagem, tipo de cura, produção e devida caracterização dos concretos fabricados.

O programa experimental foi dividido em tres etapas:

- (i) Desenvolvimento de formulações para aperfeiçoamento das dosagens de concretos;
- (ii) Caracterização microestrutural dos traços selecionadas, densidade, absorção de água etermogravimetria; e
- (iii) Avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos endurecidos.

Antes de se passar à metodologia, convém apresentar os materiais empregados neste trabalho. Em alguns casos, não se faz a apresentação direta do material, mas procura-se justificar porque ele foi escolhido para compor o CPR.

3.1 MATERIAIS

Os materiais usados nesta pesquisa foram:

- (i) Cimento Portland CPV ARI;
- (ii) Sílica ativa;
- (iii) Pó de quartzo;
- (iv) Pó de basalto;
- (v) Água potável;e
- (vi) Aditivos superplastificantes.

3.1.1 Cimento Portland

Foram estudadas as propriedades químicas e físicas dos cimentos Portland CPV - ARI da região Nordeste. Este cimento foi escolhido por apresentar disponibilidade comercial e receber a menor quantidade de adições. Nessas

análises, foram levados em consideração os pontos positivos, descritos pela literatura, que o cimento deve apresentar para favorecer bons resultados. O cimento que apresentou melhores resultados foi o cimento CPV da empresa Brennand Cimentos.

O cimento Portland CPV - ARI é um cimento de alta resistência inicial, que tem até 5% de adição de filler calcário.

A caracterização química está reportada na Tabela 3, com os teores de óxidos determinados pelo fabricante e pelo laboratório da UFPB.

Tabela 5- Caracterização química do cimento Portland CP V-ARI.

ÓXIDOS (%)	Fabricante	UFPB	LIMITES DA NBR 5733 (ABNT, 2018)
P.Fogo($\leq 6,5\%$)	1,24	1,26	4,5
R.I ($\leq 3,5\%$)	0,27	0,27	
SiO ₂ (%)	18,90	18,93	
Al ₂ O ₃ (%)	4,31	4,36	
Fe ₂ O ₃ (%)	2,57	2,59	
CaO (%)	62,37	62,39	
MgO (%)	2,43	2,45	6,5
SO ₃ (%)	4,09	4,06	3,5
Na ₂ O (%)	0,15	0,16	
K ₂ O (%)	1,10	1,08	
P ₂ O ₅ (%)	0,89	0,78	
CaO (livre)	3,91	n.d.	

Os componentes potenciais do cimento foram quantificados pela equação de Bogue, demonstradas nas Equações 14 a 17 seguintes.

$$\%C_3S = 4,0710CaO - 7,6024SiO_2 - 6,7187Al_2O_3 - 1,4297Fe_2O_3 - 2,852 SO_3 \quad \text{Equação 14}$$

$$\%C_2S = 2,8675 SiO_2 - 0,7544. C_3S \quad \text{Equação 15}$$

$$\%C_3A = 2,6504.Al_2O_3 - 1,6920.Fe_2O_3 \quad \text{Equação 16}$$

$$\%C_4AF = 3,0432.Fe_2O_3 \quad \text{Equação 17}$$

A partir das Equações 14 a 17 foram determinados os componentes potenciais do cimento. Foram descontados os percentuais da gipsita, *filler* e cal livre (BETIOLI, 2007; MEHTA e MONTEIRO, 2014) (Equações 18 a 20). Para o cálculo, foram adotados os teores de anidrido carbônico e cal livre do fabricante. Os resultados estão na Tabela 6.

$$\text{CaO}_{\text{gipsita}} = \frac{\text{MMCaO}}{\text{MMCO}_2} \times \text{SO}_3 = 56,08 / 80,05 \times \text{SO}_3 \quad \text{Equação 18}$$

$$\text{CaO}_{\text{filer}} = \frac{\text{MMCaO}}{\text{MMCO}_2} \times \text{CO}_2 = 56,08 / 44,01 \times \text{CO}_2 \quad \text{Equação 19}$$

$$\text{CaO}_{\text{CLINQUE}} = \text{CaO}_{\text{total}} - \text{CaO}_{\text{gipsita}} - \text{CaO}_{\text{filer}} - \text{CaO}_{\text{livre}} \quad \text{Equação 20}$$

Em que:

MM_x : massa molecular do composto x;

CaO_v : quantidade de CaO presente no material (gipsita, clínquer e filler)

Tabela 6-Óxido de cálcio contido nos componentes do cimento

Substituição	Fabricante	UFPB
CaO gesso	2,86	2,84
CaOfiller	4,98	4,98
CaOclínquer	50,63	50,61

Com o teor corrigido de CaO presente no clínquer, calcularam-se as frações em massa dos componentes potenciais do cimento anidro, indicados na Tabela 7.

Tabela 7- Componentes potenciais do cimento obtidos pela equação de Bogue.

Bogue	Brennand (2019)	UFPB (2019)
C ₃ S	18,13	17,54
C ₂ S	40,51	41,07
C ₃ A	7,07	7,17
C ₄ AF	7,82	7,88

A massa específica obtida pelo método de Le Chatelier, conforme norma NM 23 (2000), está na Tabela 8.

Tabela 8- Massa específica do cimento.

Amostra 1	3125 kg/m ³
Amostra2	3044 kg/m ³
Média	3084 kg/m ³

As especificações estabelecidas na norma NBR 5733 sobre as propriedades mecânicas e superfície específica do cimento estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9- Propriedades mecânicas e físicas do cimento.

Idades	Resistência à compressão (MPa)				Blaine (cm ² /g)	Início de pega (min)	Fim de pega (min)
	24h	3d	7d	28d			
NBR 5733	≥14	≥24	≥34	-	≥3.000	≥60	≤600

Fonte: NBR 5733 (2014).

A caracterização granulometria das partículas do cimento pelo granulômetro a laser fez-se necessário para determinação do traço. Ela foi realizada no Laboratório de Caracterização da UFPB, chegando-se aos seguintes resultados na Tabela 10.

Tabela 10- Granulometria das partículas do cimento.

Porcentagem	Diâmetro (µm)
10%	0,62
50%	4,89
90%	22,04
Diâmetro médio	8,49

Para a dispersão do cimento foi necessário realizar o ensaio via úmida, tendo sido utilizado xilol. De acordo com o ensaio, o valor do diâmetro médio das partículas é de 8,49 µm. Os valores de finura por peneirador aerodinâmico que o cimento deve cumprir, segundo a NBR 11579 (ABNT, 2014), como parâmetro de qualidade na finura, estabelece 6% como valor máximo de massa retida na peneira de 75µm de abertura, sendo que nesse ensaio o valor encontrado foi de 1% na malha.

Um ponto forte na escolha do cimento para fabricação de concretos de elevada resistência são os tempos de início e fim de pega. Os valores encontrados foram de 2 h e 50 min para início e de 3 h e 45 min para o fim de pega.

Aperda ao fogo é um ensaio peculiar na qualidade do clínquer produzido, que tem influência direta nos traços de CPR. Nesse estudo, o valor encontrado foi de 1,24%. Para os valores de resíduos insolúveis (R.I) obteve-se o valor de 0,27, que é um valor baixo e aceito em geral na literatura.

3.1.2 Adições minerais

Quanto ao uso de adições minerais, a sílica ativa foi a mais indicada para preparação das dosagens, pois além de ser um subproduto de indústrias, sendo assim excelente na linha da sustentabilidade, ela ainda possui tamanho de

partículas duas ordens de grandezas inferiores em comparação ao cimento Portland comum. A preferência pela sílica, considerada indispensável para desenvolver as propriedades de bom desempenho (AİTCIN, 2000; YAZICI, DENIZ e BARADAN, 2013), deve-se à sua elevada finura e pozalanicidade (KHAN e LYNSDALE, 2002). As partículas de sílica ativa são esféricas, vítreas e possuem um diâmetro médio menor do que $1\mu\text{m}$, além de elevada área superficial (de $15.000\text{ m}^2/\text{kg}$ a $25.000\text{ m}^2/\text{kg}$), capaz de acelerar as reações e formar uma matriz hidratada e mais densificada (WANG *et al.*, 2012). Isto porque ao reagir com a portlandita proveniente dos silicatos do cimento, a sílica ativa forma um C-S-H suplementar, melhorando o empacotamento das partículas (OERTELE *et al.*, 2013).

A adição de sílica tem suas vantagens, pois melhora as propriedades mecânicas, porém alguns cuidados têm que ser levados em consideração com relação à sua quantidade em um traço de CPR, pois, nele a quantidade de água é limitada. Então, a demanda de superplastificantes pode ser maior.

Em termos de dosagem, alguns autores recomendam alguns percentuais que serviram de base para esse trabalho. Richard e Cheyrezy (1995) dizem que para uma relação entre sílica e cimento de 0,25, é possível consumir toda portlandita resultante da hidratação, bem como obter um melhor empacotamento. Tutikian, Isaia e Helene (2011) sugerem uma substituição de 25%, para que a sílica atue também como *filler*. Entretanto Aİtcin (2000) recomenda a dosagem de 3% a 10% em substituição à massa de cimento. A sílica ativa foi fornecida pela empresa TECNOSIL. A análise por fluorescência de raios X indicou a presença de 85% de sílica, havendo também a presença de outros óxidos (Tabela 11).

Tabela 11- Características químicas da sílica ativa.

Óxidos	Teor (%)
SiO ₂	84,87
Al ₂ O ₃	<0,04
K ₂ O	2,49
Na ₂ O	1,18
Fe ₂ O ₃	2,17
TiO ₂	0,36
CaO	1,24
MgO	1,98
Mn ₂ O	1,98
P ₂ O ₅	<0,01
SO ₃	0,80
Perda ao fogo	4,00

Nas Tabelas 12 e 13 têm-se algumas propriedades físicas desse material.

Tabela 12–Superfície específica BET da sílica ativa.

Característica	Resultado
Superfície específica (B.E.T) (m ² /kg)	19.000

Tabela 13–Massa específica e diâmetro médio característico da sílica ativa.

Massa específica	2,18 g/cm ³
Diâmetro médio característico	0,40 µm

3.1.3 Pó de quartzo/basalto

No CPR, procura-se praticamente eliminar a fase zona de transição, que é o ponto fraco dos concretos convencionais. Para tanto, reduzem-se as dimensões dos agregados de maneira drástica. O agregado graúdo é eliminado e o miúdo deve ser um material resistente e o mais fino possível.

O quartzo é um material de elevada dureza e resistência à compressão, passível de ser usado no CPR. O uso de pó de quartzo é particularmente atraente, pois embora seja considerado um material inerte, torna-se reativo e catalisa as reações pozolânicas quando em granulometria muito fina e ativado termicamente (YAZICI, DENIZ e BARADAN, 2013).

O pó de quartzo utilizado neste trabalho foi proveniente da Mineração Jundu, que o comercializa com o nome Sílica Moída. A análise granulométrica está presente na Tabela 14 e a Tabela 15 apresenta os componentes químicos do pó de quartzo.

Tabela 14- Análise granulométrica do pó de quartzo.

Peneira ASTM E-11	Abertura (mm)	% retida	% retida acumulada
100	0,150	0,00	0,00
140	0,106	0,06	0,06
200	0,075	0,045	0,51
325	0,045	7,00	7,51
<325	<0,045	92,49	100,00

Fonte: Mineração Jundu.

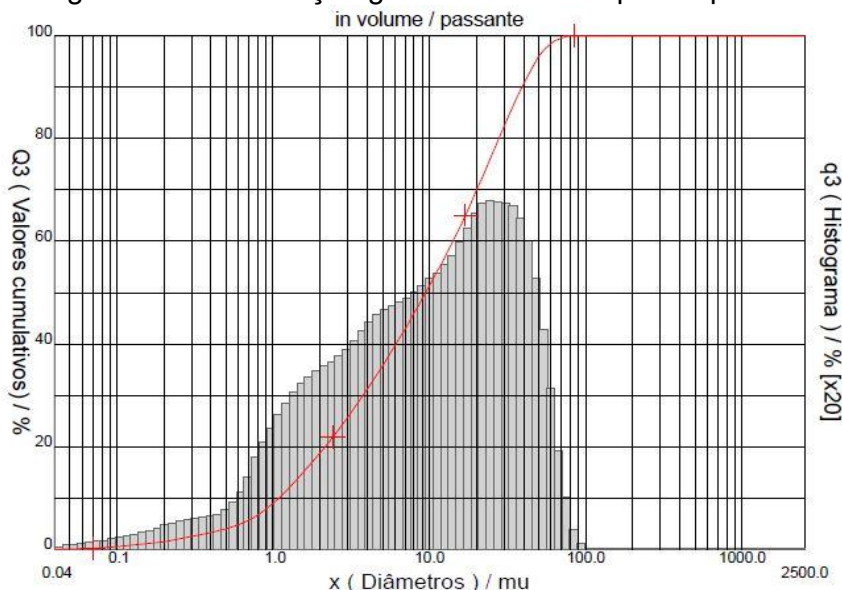
Tabela 15- Análise química do pó de quartzo.

%Fe ₂ O ₃	%Al ₂ O ₃	%TiO ₂	%P.F.	%SiO ₂
0,025	0,057	0,02	0,11	99,73

Fonte: Mineração Jundu.

O pó de quartzo tem uma massa específica igual a 2.500 kg/m³. O diâmetro médio do material foi obtido através do ensaio de granulometria a laser, sendo seu valor de 15,33 µm. Sua distribuição granulométrica está na Figura 24.

Figura 24 – Distribuição granulométrica do pó de quartzo.



O pó de basalto foi moído em laboratório, beneficiado para passar na peneira de abertura de 0,045mm (peneira 325 Mesh) e obteve-se um tamanho médio de partícula de 14,06 µm.

3.1.4 Aditivos

Foram utilizados dois aditivos.

O primeiro aditivo foi empregado para reter a água de forma eficiente. O produto foi o ADITEX AD-FLUX PCE 01, polímero sintético, hiperplastificante em pó à base de policarboxilatos, de densidade relativa 0,45 g/ml (25°C); usado como dispersante para sistemas cimentícios com a finalidade de reduzir o percentual de água em até 50%, além de melhorar a hidratação do cimento. Essas características

foram informadas pelo fabricante. A dosagem recomendada é de 0,05% a 0,60% em relação à massa de cimento.

O segundo aditivo foi um superplastificante denominado Tecflow 8000, da Grace. As características físicas e químicas, segundo o fabricante, foram compiladas na Tabela 16.

Tabela 16- Características físicas e químicas do aditivo superplastificante.

Característica	Resultado
Estado físico	líquido
Côr	alaranjado
Dosagem recomendada (%)	0,3 a 2,0
Massa específica (g/cm ³)	1,08 a 1,12

Fonte: Grace (2018).

O percentual de sólidos foi calculado de acordo com a ABNT NBR 11768-3 (2019). O ensaio consistiu na determinação da massa de resíduo seco em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$. Previamente à pesagem, o material foi esfriado em dessecador por 30 min (ABNT, 1990). Os dados de ensaios (Tabela 17) reportam a massa inicial (m_1) e final (m_2), a partir dos quais calculou-se o teor de resíduo sólido (r). O resultado encontrado no aditivo Tecflow 8000 foi um percentual de partículas sólidas superior a 47%.

Tabela 17- Determinação do teor de sólidos do aditivo.

#	m_1 (g)	m_2 (g)	r (%)
1	10,0124	4,7681	47,62
2	10,5699	4,9830	47,14
3	10,4831	4,9590	47,30
Média	10,3551	4,9033	47,35

Resumo dos tamanhos das partículas: os valores dos diâmetros médios característicos obtidos por granulometria a laser dos materiais usados na pesquisa podem ser observados na Tabela 18 abaixo. Nela, observa-se os valores correspondente aos diâmetros médios das partículas dos materiais usados na Tabela 18.

Tabela 18- Materiais usados na pesquisa.

Material	Diâmetro médio (μm)
Cimento CP V	8,49
Sílica ativa	0,20
Pó de quartzo	15,33
Pó de basalto	14,06

3.2 METODOLOGIA

Na Figura 25, apresenta-se o fluxograma que representa as etapas do programa experimental relativo aos concretos.

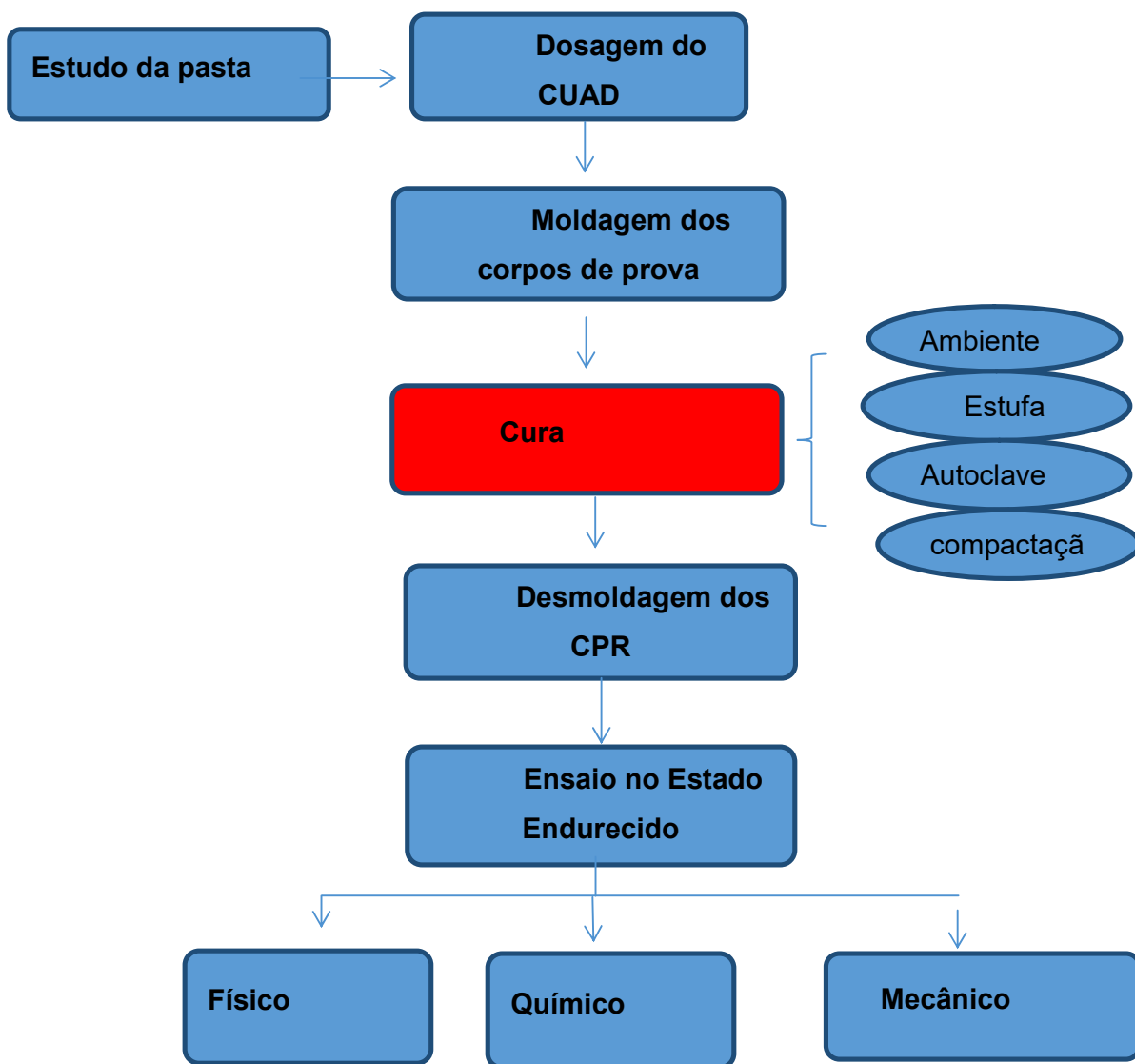


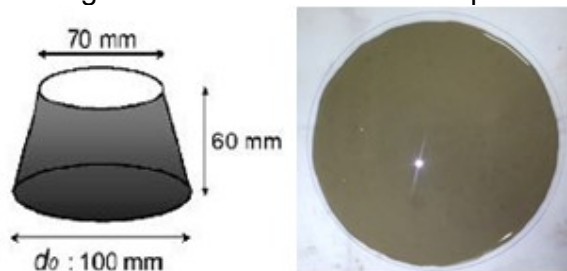
Figura 25 - Fluxograma dos procedimentos experimentais.

3.2.1 Estudo da pasta

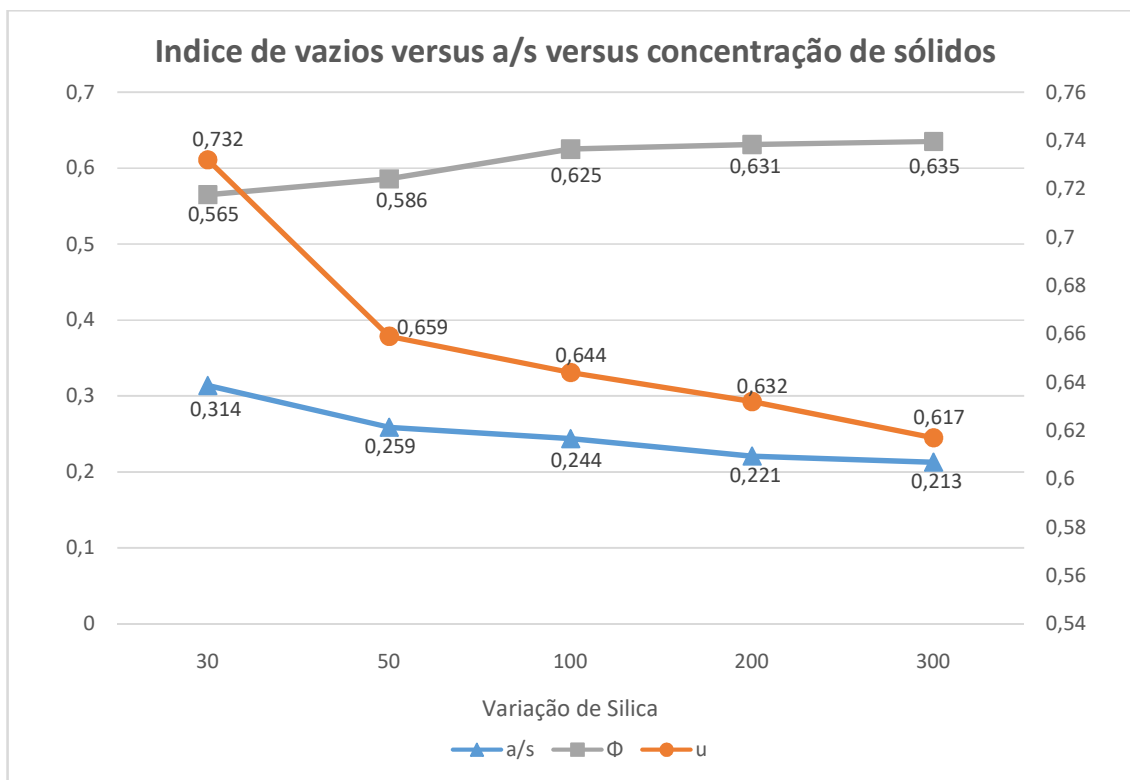
Para se obter o melhor desempenho físico e químico dos aditivos, foram realizados estudos dos pontos de saturação nas pastas correspondentes ao CPR, através do mini-slump (Figura 26). Também foram avaliadas as suas características quanto à resistência à segregação e tendência à exsudação.

Como se tratavam de dois aditivos químicos, procurou-se trabalhar com valores mínimos, de acordo com recomendações do fabricante.

Figura 26 – Teste do mini-slump.



Para a aplicação do método experimental, foram produzidas pastas com cimentos, sílica e água, variando-se a relação a/s (água/sólidos), buscando reproduzir o gráfico índice de vazão *versus* a/s *versus* concentração de sólido apresentado na Figura 27. Para a formação das curvas da Figura 27 foram estudadas 16 pastas com diferentes relações a/s . Foram usados 3%, 5%, 10% e 20% e 30% de sílica ativa em relação ao peso do cimento. Maiores teores apresentam dificuldade de mistura, em função da finura do material que tem dificuldade de se dispersar bem.

Figura 27 - Índice de vazio *versus* a/s *versus* concentração de sólido.

Os dados do Figura 27 encontram-se em anexo.

A mistura foi feita em argamassadeira durante 12 min, com pausa de 30 s após os 2 min iniciais, para remoção do material seco aderido às paredes da cuba. A ordem de colocação dos materiais na argamassadeira foi mantida constante para todas as pastas produzidas, conforme Tabela 19. Inicialmente, adicionou-se à argamassadeira 75% da água de amassamento, 40% do cimento e adições (adições minerais e aditivo químico), sendo estes materiais misturados por 3 min na velocidade baixa. O material restante foi dividido em quatro partes iguais, sendo adicionados a cada 3 min, misturando-se sempre à velocidade lenta.

Tabela 19- Procedimento de misturadas pastas produzidas.

Materiais	Velocidade de mistura
75% água + 40% cimento + 40% adições	Lenta
15% cimento + 15% adições + 6,25% água	Lenta
15% cimento + 15% adições + 6,25% água	Lenta
15% cimento + 15% adições + 6,25% água	Lenta
15% cimento + 15% adições + 6,25% água	Lenta

Fonte: Adaptado de Wong eKwan (2018).

Na metodologia adotada por Wong e Kwan (2008) para mistura de pasta, ao se adicionar o cimento e a água de uma única vez na argamassadeira, os tempos necessários para a mistura e formação de uma pasta homogênea se tornavam muito grandes, principalmente quando o experimento era realizado com uma baixa relação a/s.

Buscando melhor compreensão da pasta, buscou-se trabalhar na metodologia de Wong e Kwan (2008) mantendo-se a mistura saturada na maior parte do tempo.

Depois de todos os materiais misturados, a mistura passou por compactação para se analisar a sua densidade. No procedimento, toma-se um cilindro metálico com volume definido, sendo este preenchido por partes em 3 camadas de alturas aproximadamente iguais. Cada camada é compactada com 20 golpes. Na continuação, retira-se o excesso do material e faz-se a pesagem.

O teor de aditivo foi variado em porcentagens em cada relação água/cimento de 0,20; 0,22; 0,24; 0,26; 0,28 e 0,30. Foi obedecida a sequência padrão de argamassas e concretos convencionais, isto é, os materiais secos eram homogeneizados e receberam inicialmente a água e depois o aditivo. A mistura na argamassadeira foi feita durante 8 min, com pausa de 30 s após os 2 min iniciais, para remoção do material seco aderido às paredes da cuba.

As pastas com forte coesão, com espalhamento inferior a 115mm, e as que ficavam aderidas ao mini-cone foram descartadas. A que apresentou melhor resultado foi o percentual de 3,8% em relação à massa do cimento, sendo 3,3% do aditivo líquido e 0,5% do aditivo químico em pó. Nesses valores, conseguiu-se chegar a um espalhamento de 115mm de diâmetro.

3.2.2 Preparação do CPR

Para se chegar ao CPR, à pasta já obtida foi acrescentado o pó de quartzo ou pó de basalto. Isto prejudicou um pouco o espalhamento. Então, foi adicionado o aditivo em pó em dois momentos, no início e no final da mistura (ADITEX AD-FLUX PCE 01) para melhorar a reologia.

Na formulação dos traços de CPR, foi utilizado o modelo de empacotamento formulado por Toufare *et al.* (1976). Por se tratar de uma mistura formada por cimento, sílica ativa e pós (basalto e quartzo), ou seja, mistura binária, o modelo passou por adaptações para considerar os variados tamanhos, sendo realizadas combinações,

em que cada constituinte representa uma classe de grãos, que é representado pelo diâmetro médios das partículas.

As equações propostas pelo modelo de empacotamento de partículas foram apresentadas previamente nas Equações 8 a 13.

Essas equações limitam duas classes de grãos, onde a combinação tem como resultado as adições minerais na proporção indicada como uma única classe de tamanho de grãos sendo esta, então, combinada com o cimento.

As quantidades de materiais usados para aplicações dos modelos de distribuição estão descritas por meio da densidade de empacotamento.

3.2.3 Caracterização do CPR

Além das resistências à compressão, foram obtidas também as densidades do CPR.

A microestrutura do material foi estudada através dos ensaios descritos na sequência.

(i) TG e DSC

A termogravimetria fornece dados relevantes para o estudo da hidratação do cimento Portland, devido à decomposição térmica das substâncias presentes (DAL MOLIN, 2010).

As análises foram realizadas no Laboratório de Solidificação Rápida - LSR da UFPB, utilizando o equipamento térmico TGA/DTA – DTG – 60H da *Shimadzu*, através do método não-isotérmico de análise, com taxas de aquecimento de 5°C/min até 100°C, de modo a avaliar melhor a quantidade de água livre, 10°C/min entre 100°C e 1.000°C, atmosfera inerte de nitrogênio com fluxo de 50 ml/min e intervalo de temperatura de 25°C (temperatura ambiente) a 1.000°C, utilizando-se cadinhos de alumina.

Aproximadamente 20 mg de amostra seca e moída foi depositada no cadinho de alumina sem tampa, este foi colocado no porta-amostra do equipamento.

Os dados foram coletados e analisados no *software* do equipamento. Foram geradas curvas de TG (perda de massa) e DTG (primeira derivada da TG). Da curva de DTG, foram determinadas as

temperaturas limites das reações, a partir das quais foram identificadas as perdas de massa referentes à água não evaporável, portlandita e fases carbonáticas.

A mistura dos materiais para a produção dos CPRs foi feita em argamassa deira. A mistura segue a ordem apresentada na Tabela 20. O tempo para adicionar as partes dos materiais foi de 3 min.

Tabela 20- Procedimento da mistura do concreto.

Materiais	Velocidade de mistura
60% materiais secos +75% da água +80% aditivo	Lenta
10% materiais secos +6,25% da água +5% aditivo	Lenta
10% materiais secos +6,25% da água +5% aditivo	Lenta
10% materiais secos +6,25% da água +5% aditivo	Lenta
10% materiais secos +6,25% da água +5% aditivo	Lenta

No presente trabalho produziu-se um total de 660 corpos de prova, conforme mostram a Tabela 21 e a Figura 28 seguintes. Foram moldados corpos de prova cilíndricos de 50 mm x 100 mm para ensaio de resistência à compressão. Para o ensaio de resistência à tração na flexão, foram produzidos corpos de prova prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm e permeabilidade ao ar.

Tabela 21-Quantitativo da produção de corpos de prova (CPs).

Ensaio realizado	CPs idade	Dimensões (mm)	Idade (dias)	Pó	Cura	Quantidade decps
Resistência à compressão/Ensaio de absorção	12	50x100	7,14,28			360
Resistência à tração por compressão diametral	12	50x100	28	Quatrzo/basalto	Ambiente, Cura Banho 80°C, Compactado e aut	120
Resistência à tração na flexão	12	40x40x160	28			120
Permeabilidade ao ar/densidade	12	50x100	28			60
						660

Em síntese, os corpos de prova, quando confeccionados, foram moldados nas seguintes condições:

- (i) Normal: apenas preenchimento dos corpos de prova;
- (ii) Banho: os corpos de prova foram levados à geladeira e após 24 horas foram desmoldados e levados a um banho em água aquecida lentamente até 80°C;
- (iii) Com cura em autoclave; e
- (iv) Com aplicação de pressão de 5 MPa compactando o material.

Na última condição a pressão de compactação era aplicada ao corpo de prova no próprio molde através de um dispositivo criado no laboratório, durante o período de cerca 10h. Feito o desmolde, o corpo de prova era levado para a cura.

Após um dia, fazia-se a desmoldagem e os corpos de prova eram colocados em imersão em água saturada com cal até a data do ensaio (7 dias, 14 dias e 28 dias).

Figura 28 - Corpos de prova e ensaios: (A) Corpos de prova; (B) Ensaio de compressão axial; (C) Mecanismo para o ensaio de compressão axial; (D) Corpos de prova rompidos à compressão axial.



(A)



(B)



(C)



(D)

(ii) Ensaio de absorção de água por imersão

De acordo com a NBR 9778/05, os corpos de prova foram imersos em água após 48 horas de cura em temperatura ambiente de 25°C, aferindo-se seu peso seco antes da imersão, sendo pesados novamente 24 horas após entrarem na água. Após este período, foi possível comparar a quantidade máxima de água absorvida em cada concreto.

Com os valores obtidos na balança, foi possível calcular a absorção por imersão, através da Equação 21.

$$I(\%) = \left(\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \right) \times 100 \quad \text{Equação 21}$$

Em que:

I é o índice de absorção de água por imersão;

M_{sat} é a massa do CP saturado; e

M_s é a massa do CP seca em estufa.

(iii) Ensaio de compressão axial

Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de compressão axial após o período de cura estipulado no estudo, estando de acordo com a norma NBR 5739 (ABNT, 2018).

(iv) Ensaio da resistência à tração na flexão

Os corpos de prova prismáticos foram submetidos aos ensaios de tração na flexão após o período de cura estipulado pela norma NBR 13279 (ABNT, 2005), que especifica as dimensões dos moldes prismáticos de 40mm x 40 mm x 160mm.

A resistência à tração na flexão é calculada segundo a Equação 22:

$$R_t = 1,5 F_t \cdot L / (40^3) \quad \text{Equação 22}$$

Em que:

R_t é a resistência à tração na flexão (MPa);

F_t é a carga máxima aplicada verticalmente no centro do prisma(N); e

L é a distância entre os suportes(mm).

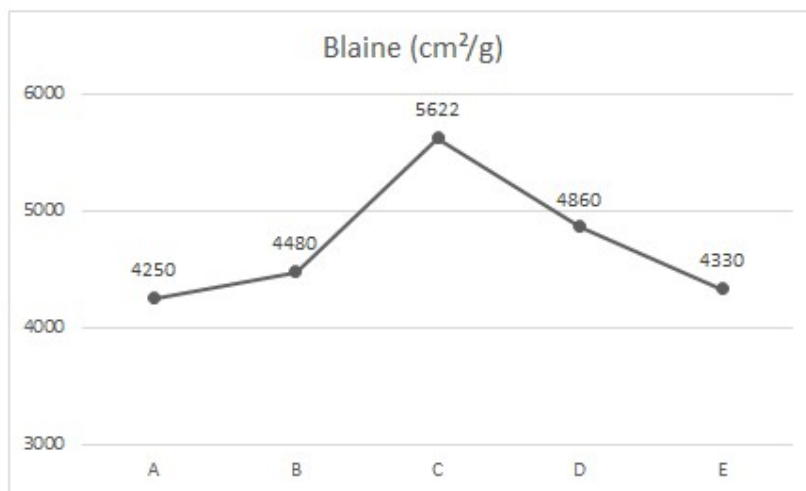
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a escolha do cimento utilizado na pesquisa, foram estudadas as características físicas, químicas e mecânicas do cimento Portland CPV-ARI, fabricadas nas proximidades de João Pessoa-PB, para saber as melhores características para as formulações de concreto de alto desempenho.

4.1 FINURA BLAINE DO CIMENTO PORTLAND

Em um primeiro momento foram realizadas caracterizações físicas de 5 cimentos por meio da determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Com base nos dados obtidos na Figura 28, pode-se avaliar que o fabricante da amostra C possui um processo de moagem cujo resultado é a produção do cimento com superfície específica de $5.622 \text{ cm}^2/\text{g}$, resultados cerca de $1.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ a mais de área em relação aos demais fabricantes. Esse resultado, associado a outros parâmetros, podem refletir, por exemplo, em maior calor de hidratação, menores tempos de pega, maior resistência final.

Figura 27—Superfície específica (Blaine) para os cimentos testados.

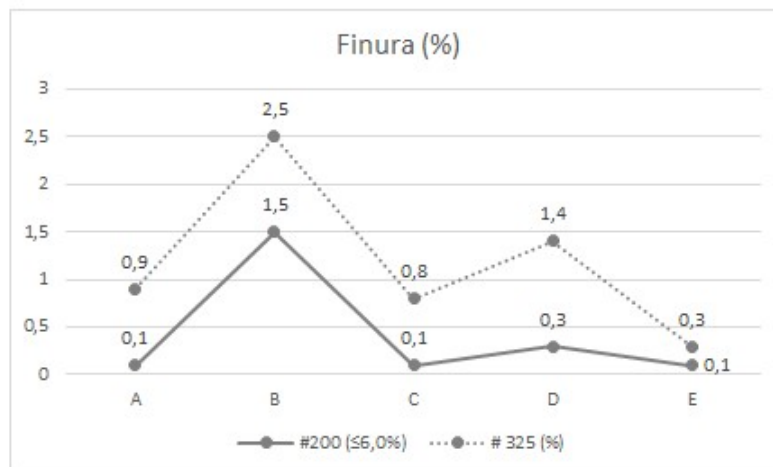


4.2 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE FINURA DO CIMENTO PORTLAND

Outro parâmetro a se considerar na finura do cimento é por meio de peneiramento na peneirade abertura de $75 \mu\text{m}$ (# 200). É estabelecido que 6%

é valor máximo tolerado para o material retido. Também pode-se considerar o que fica retido na peneira de 40 μm (# 325). Os resultados apontaram que, exceto a amostra B com 1,5% retido em 75 μm e 2,5% retido em 40 μm , todas as amostras obtiveram finura inferior a 0,3% retido em 75 μm e 1,4 retido em 40 μm . Vale salientar que, nas amostras E1, obteve-se resultado muito próximo, de 0,1% retido em 75 μm e 0,3% para 45 μm .

Figura 28 - Finura para as peneiras #200 e # 325.



4.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CIMENTO PORTLAND

Na granulometria a laser apresentada na Tabela 22, os resultados mostraram-se coerentes aos obtidos no ensaio de Blaine e finura por peneiras quando analisados os valores de diâmetro médio das partículas. É perceptível que, quando o diâmetro médio aumenta, o valor da finura Blaine diminui.

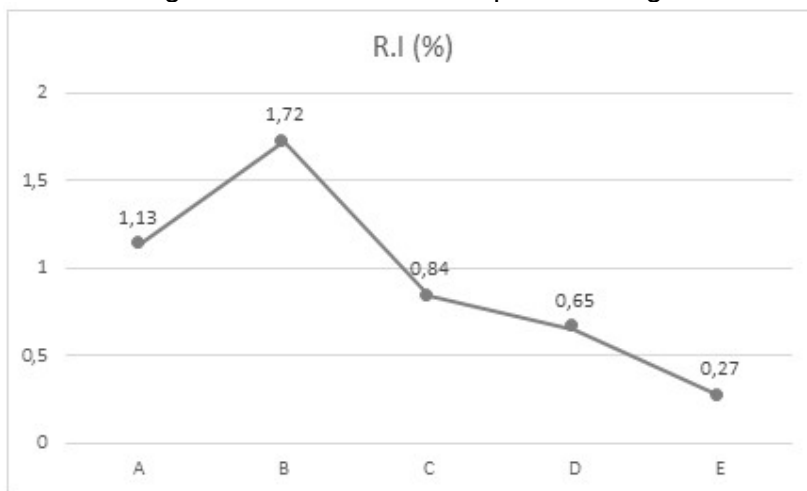
Tabela 22- Resultados da granulometria a laser.

Amostra	A	B	C	D	E
Diâmetro a 10% (μm)	0,47	0,67	0,60	0,65	0,62
Diâmetro a 50% (μm)	4,31	4,83	3,83	4,14	4,89
Diâmetro a 90% (μm)	25,98	25,33	17,35	20,14	22,04
Diâmetro Médio (μm)	9,05	9,20	6,85	7,60	8,49

4.4 RESÍDUOS INSOLÚVEIS DO CIMENTO PORTLAND

Os resultados apresentados na Figura 30 indicam que as amostras A e B não cumprem o requisito de valor inferior a 1,0% de resíduo indicado na norma NBR16697 (ABNT).

Figura 29 - Resultados da perda ao fogo.



4.5 DETERMINAÇÃO DOS TEMPOS DE PEGA DO CIMENTO PORTLAND

Os resultados dos tempos de pega são importantes informações para os usuários do produto, pois indicam o tempo de trabalhabilidade do cimento a partir do início de sua hidratação. Considerando que a natureza do material estudado é um cimento de alta resistência inicial, sugere-se que os tempos de pega sejam baixos. Todas as amostras apresentaram resultados para o intervalo entre o início e o fim da pega entre 45min e 65min (Tabela 23). Contudo, com relação à amostra B (IP 4:10; FP 5:00), podem ser considerados tempos de pega excessivos, o que pode prejudicar o manuseio do produto durante sua aplicação.

Tabela 23- Resultados dos tempos de início e fim de pega.

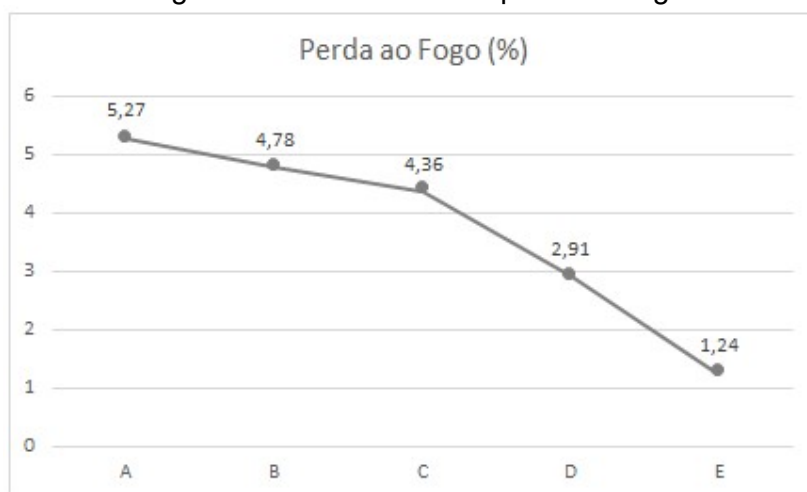
Amostra	A	B	C	D	E
I. P. (h:min)	02:10	04:10	01:55	02:15	02:50
F. P. (h:min)	03:15	05:00	02:45	03:15	03:45

4.6 PERDA AO FOGO DO CIMENTO PORTLAND

O ensaio de perda ao fogo é utilizado tanto para corrigir a composição química das amostras fundidas para análise de FRX quanto como um dos parâmetros para estimar quantidades de adições nos cimentos estudados. As variações de P.F. se devem às adições de gipsita e calcário ao clínquer. Os

resultados indicam que o fabricante da amostra E utiliza teores de gipsita e calcário inferiores aos demais, conforme a Figura 31.

Figura 30 - Resultados da perda ao fogo.



4.7 CARATERIZAÇÃO POR ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X (FRX) DO CIMENTO PORTLAND

Com relação à composição química, todas as amostras apresentaram (Tabela 24) percentuais de MgO e SO₃ conforme as normas estabelecem, enquanto que os demais teores de óxidos apresentam ser coerentes com variações decorrentes da diversidade de matérias primas utilizadas no processo de cada um dos fabricantes estudados.

Tabela 24- Resultados da composição química por FRX.

Óxidos (%)	A	B	C	D	E
SiO ₂	19,04	17,61	17,14	18,47	19,38
Al ₂ O ₃	4,63	4,15	4,11	4,67	4,96
Fe ₂ O ₃	4,01	2,85	2,32	2,96	2,78
CaO	62,30	59,78	60,64	62,55	63,81
MgO (≤6,5)	1,10	5,72	5,47	2,54	1,97
SO ₃ (≤4,5)	2,52	3,56	4,44	3,66	3,35
Na ₂ O	0,02	0,28	0,07	0,13	0,20
K ₂ O	0,75	1,02	0,89	1,33	1,19
P ₂ O ₅	0,00	0,02	0,34	0,50	0,89

4.8 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio de resistência à compressão é um dos principais parâmetros utilizados para a definição do desempenho dos cimentos em geral. Nesse estudo, foi possível uma comparação direta entre as resistências à compressão das amostras de Cimento Portland CPV-AR de 5 fábricas.

A NBR 7215 define como parâmetros mínimos de resistência os valores apresentados na Tabela 25.

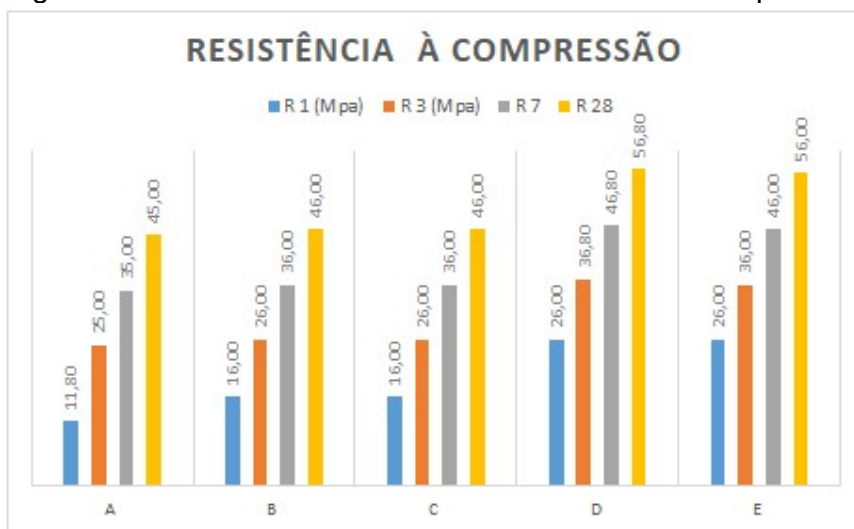
Tabela 25- Valores de resistência à compressão.

1 dia de cura	≥14MPa
3 dias de cura	≥24MPa
7 dias de cura	≥34MPa
28 dias de cura	Não há parâmetro

Fonte: NBR 7215 (2019).

Conforme pode ser visto na Figura 32, abaixo, todas as amostras conduziram a resultados conforme o esperado, exceto a “Amostra A”, que obteve resistência de 11,8MPa no ensaio de 1 dia de cura (R1), ficando fora da conformidade indicada na Tabela 26.

Figura 32 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão.



4.9 DENSIDADE DE EMPACOTAMENTO DOS MATERIAIS

Nesse ensaio, a densidade de empacotamento dos materiais usados ocorreu por meio de via úmida, baseado nos modelos de Wong e Kwan (2008). Como resultado, obtiveram-se os valores de densidade dos materiais finos, que é muito importante para desenvolver concretos de especiais.

Observa-se que, nas misturas feitas com os aglomerantes, sílica e pós e nas concentrações, as densidades de empacotamento encontradas são iguais a 0,537. As semelhanças de vazios correspondente é igual a 0,301. Para se alcançar esses valores de densidade de empacotamento e relação de vazios, foi fundamental a quantidade de água/materiais cimentícios usada na mistura no valor de 0,2, que apresenta uma boa relação água/sólidos, que corresponde 0,12.

Sendo assim, o percentual de 5% de sílica na mistura tem o melhor comportamento, apresentando melhor densidade de empacotamento e uma boa percentagem de vazios. Os resultados apresentados estão ligados à finurados materiais. De forma geral, quanto mais finos os materiais usados no empacotamento, maiores as demandas de água, o que pode acarretar uma diminuição da densidade no empacotamento. Logo, os espaços de vazios entre as partículas diminuem as características de densidade.

Depois de intensa experimentação, conforme indicado no anexo, foram obtidos dois traços: o primeiro (traço 1) com pó de quartzo, o segundo (traço 2) com pó de basalto. O traço unitário (cimento:sílica ativa: pó de quartzo ou de basalto, água-materiais cimentícios) correspondeu a: 1:0,05:0,6-0,20.

4.10 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

Para avaliar as características físicas, como massa específica e a consistência dos concretos estudados, na Tabela 26 são apresentados os resultados referentes à massa específica das misturas produzidas.

(i) Densidade

Na Tabela 26, vê-se que o CPR com pó de basalto, que sofreu compactação, apresentou a maior densidade, pouco superior a 2,50.

Tabela 26- Média dos valores de densidade.

	Ambiente	Densidade Banho 80°C	Compactação	Autoclave
Traço 1	2,352	2,388	2,501	2,340
Traço 2	2,355	2,390	2,515	2,328

A densidade foi determinada para monitorar a eficiência da compactação e sua possível evolução ao longo do tempo. Foram realizadas três medições de diâmetro e altura, para cálculo do volume, e uma de massa (ASTM, 2016a). Como pode ser visualizado na Tabela 26, os resultados de densidade foram influenciados pelo fator “pressão”, elevando-a.

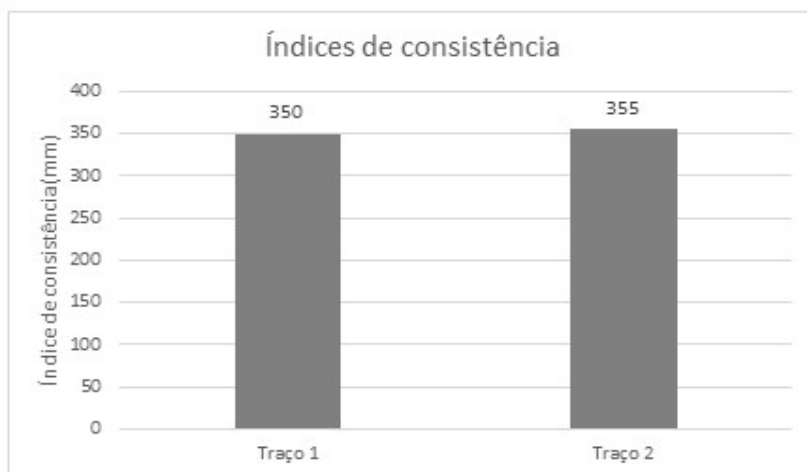
Segundo Ipeket *al.* (2011) e Justset *al.* (2011), a densidade é um parâmetro fundamental no controle experimental das misturas. De fato, medições de massa e volume em concretos de pós reativos compactados de forma mecânica com cargas próximo de 25 MPa apresentaram valores de 2,70 g/cm³ e os sem compactação atingiram 2,50 g/cm³ (IPEK *et al.*, 2011).

Ipek (2011) e Justset *al.* (2011) descrevem que nem sempre é esperado o aumento da resistência mecânica do concreto com o nível de pressão aplicado. Em alguns casos é possível que o valor de massa específica não esteja diretamente relacionado ao processo de compactação no estado fresco, devido à excentricidade do atrito e pistão com o molde que podem comprometer com bolhas e retiradas de água do sistema.

(ii) Consistência

A Figura 33 apresenta os resultados de consistência obtidos para os concretos produzidos.

Figura 33 - Índices de consistência dos concretos



Conforme apresentado na Figura 33, pode-se observar que os valores encontrados são próximos, mesmo tendo composição de pós diferente. Os aditivos usados têm uma característica muito forte de juntar as partículas, deixando os concretos no estado fresco com características elásticas. Observa-se, assim, que a redução no diâmetro de espalhamento obtido é pequena, uma diferença de 5mm.

4.11 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados particulares de resistência à compressão axial dos CPR produzidas com quartzo e basalto, são apresentados nas tabelas abaixo. Apresentam-se os resultados médios e o desvio padrão de corpos de prova, obtidos para a resistência à compressão dos com CPR.

Nas Tabelas 25 a 30, têm-se resultados de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias, para os traços I e II, segundo o método de produção.

Tabela 27– Resistência à compressão aos 7 dias.

		Traço I			
Componentes	Quant.	Resistência 7 dias (MPa)			
		Ambiente	Banho 80°C	Compactação	Autoclave
Cimento	1000				
Sílica	50				
pó de quartzo	600				
Pó de basalto	0	92	106	112	41
Aditivo p	0,5				
Aditivo I	0,3				
Água	0,2				

Tabela 28– Resistência à compressão aos 7 dias (basalto).

		Traço II			
Componentes	Quant.	Resistência 7 dias (MPa)			
		Ambiente	Térmico Banho 80°C	Compactado	Autoclave
Cimento	1000				
Sílica	50				
pó de quartzo					
Pó de basalto	600	111	118	132	49
Aditivo p	0,5				
Aditivo I	0,3				
Água	0,2				

Tabela 29– Resistência à compressão aos 14 dias.

		Traço I			
Componentes	Quant.	Resistência 14 dias (MPa)			
		Ambiente	Banho 80°C	Compactado	Autoclave
Cimento	1000				
Sílica	50				
pó de quartzo	600				
Pó de basalto	0	116	124	152	47
Aditivo p	0,5				
Aditivo I	0,3				
Água	0,2				

Tabela 30– Resistência à compressão aos 14 dias.

		Traço II			
Componentes	Quant.	Resistência 14 dias (MPa)			
		Ambiente	Banho 80°C	Compactado	Autoclave
Cimento	1000				
Sílica	50				
pó de quartzo					
Pó de basalto	600	128	129	155	51
Aditivo p	0,5				
Aditivo I	0,3				
Água	0,2				

Tabela 31– Resistência à compressão aos 28 dias.

		Traço I			
Componentes	Quant.	Resistência 28 dias (MPa)			
		Ambiente	Banho 80°C	Compactado	Autoclave
Cimento	1000				
Sílica	50				
pó de quartzo	600				
Pó de basalto	0	134	139	161	49
Aditivo p	0,5				
Aditivo I	0,3				
Água	0,2				

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 32– Resistência à compressão aos 28 dias.

		Traço II			
Componentes	Quant.	Resistência 28 dias (MPa)			
		Ambiente	Banho 80°C	Prensa M	Autoclave
Cimento	1000				
Sílica	50				
pó de quartzo					
Pó de basalto	600	140	145	169	52
Aditivo p	0,5				
Aditivo I	0,3				
Água	0,2				

Conforme mostrado nas tabelas, pode-se observar que ocorreu um aumento de resistência à compressão com a evolução das idades dos concretos, em todos os tipos de cura estudados. Em alguns casos, porém, observa-se que os valores estão próximos.

Diante dos resultados expostos nas tabelas, aos 7 dias, observou-se que a diferença entre as resistências dos concretos com quartzo e basalto em temperatura ambiente e banho (80°C) tiveram um crescimento parecido. Já para os corpos de prova compactados, os valores com basalto apresentaram melhor resistência mecânica em torno de 16% maior, um valor já próximo dos concretos de altíssima resistência (150 MPa).

Os concretos que utilizaram a autoclave não chegaram à resistência significativa, chegando no máximo a 49 MPa. Porém, a diferença de valores comparada aos outros se dá pelo fato de que ocorre uma acelerada elevação de temperatura na autoclave, o que possivelmente provoca microfissuras internas no concreto, ocasionando uma queda nos valores de resistência. Com 7 dias, já se pode perceber que a cura muito acelerada em temperaturas elevadas danifica a resistência dos concretos especiais, prejudicando seu aspecto estético, como apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Aparência dos corpos de prova em autoclave.



Observando-se os valores de resistência à compressão para 14 dias, verifica-se que os traços com basalto apresentaram maiores valores de resistência quando comparados aos de quartzo, ou seja, o agregado exerce grande influência nas propriedades mecânicas. Os corpos de prova moldados sob compactação apresentaram os melhores resultados, chegando a valores de concreto de ultra resistência.

Na visão do autor deste trabalho, no processo que usa compactação, a reação pozolânica não formou C-S-H do tipo secundário, o que provavelmente apresentaria um acréscimo de resistência mecânica final. Daí, os valores de resistência serem decorrentes do efeito *filler*, diminuído o índice de vazios dos concretos.

Para análise dos resultados, utilizou-se o desvio padrão global de todas as amostras da idade estudada (que é média de todos os desvios padrão da idade). O desvio padrão global para a idade de 7 dias é de 8,81 MPa, para 14 dias 5,24 MPa e para 28 dias 4,22 MPa. As amostras que ficaram fora do intervalo de média da idade $-1,5 \times \text{desvio padrão global}$ ou média da idade $+ 1,5 \times \text{desvio padrão global}$ foram desconsideradas.

Esses valores de resistência apresentados têm a ver com a mudança na microestrutura dos concretos através da baixa relação água/cimento e, principalmente, da incorporação de adições minerais e pós-reativos. A compactação

aproxima os grãos e os produtos de hidratação produzem um material mais compacto. A superfície da ruptura, muitas vezes, torna-se lisa por se ter grandes valores de resistência e não existirem agregados graúdos (BAALAKI *et al.*, 1991; ALCTIN e NEVILLE, 1993).

Também se pode comparar quanto foi ganho de resistência com a idade. Nas Tabelas 33 e 34 tem-se quanto da resistência aos 28 dias se tem aos 7 dias de cura.

Tabela 33– Ganho de resistência à compressão com o tempo traço I.

CP	7 dias		28 dias	
	Média (MPa)	Resistência em Relação aos 28 dias	Média (MPa)	Resistência aos 28 dias
Ambiente	92	68%	134	100%
Banho	106	76%	139	100%
compactação	112	69%	161	100%
Auto	41	83%	49	100%

Tabela 34– Ganho de resistência à compressão com o tempo traço II.

CP	7 dias		28 dias	
	Média (MPa)	Resistência em Relação aos 28 dias	Média (MPa)	Resistência aos 28 dias
ambiente	111	78%	140	100
banho	118	81%	145	100
compactação	132	78%	169	100
auto	65	94%	52	100

Os resultados de resistência à compressão dos corpos de prova compactados e não compactados, mantidos em temperatura ambiente ou em outra forma de cura, foram reportados nas tabelas e ficou evidente o efeito favorável tanto da pressão de compactação quanto da idade, que são determinantes quando comparados o ganho de resistência apresentado nas tabelas.

O aumento de resistência está relacionado a uma estrutura mais densa, devido à retirada de excesso de ar e água com o processo de compactação da mistura no estado fresco. O efeito da pressão é evidente, chegando-se a concreto com mais de 160 MPa.

Conforme Aïtcin (2000), a diferença de resistência observada dos 7 dias aos 28 dias sugere o efeito acelerador das reações químicas no desenvolvimento das propriedades, decorrente da diminuição da água disponível para hidratação, maior aproximação das partículas e consequente redução dos espaços disponíveis para aumento dos produtos hidratados, que pode levar à aceleração ou interrupção da hidratação. Contudo, este crescimento não é linear e, conforme os resultados, mesmo em idades iguais os valores dos traços 1 e 2 não são homogêneos entre si.

Sendo assim, os resultados obtidos comprovam a eficiência da compactação das pastas de cimento no estado fresco. Em um contexto de aplicação prática da técnica, parece satisfatório limitar-se à aplicação de pressões limitadas a 6 MPa, que também foi observado em Ipek et al. (2011) e Justset et al. (2013).

De maneira resumida, o que pode ter contribuído para aumentar as resistências à compressão máximas alcançadas está associado ao equipamento de compactação utilizado nesta pesquisa, o qual se restringia a uma carga de compressão sobre a pasta, em processo que exigia no mínimo 8 horas. Ressalta-se que mesmo sabendo das limitações do equipamento em questão, optou-se por utilizá-lo, pois era o único disponível e que condizia com a realidade do presente trabalho.

4.12 RESULTADOS DE TERMOGRAVIMETRIA

Com relação às curvas apresentadas, destaca-se a perda de massa (TG) e primeira derivada da perda de massa (DTG) das amostras estudadas. Da curva de DTG, foram determinadas temperaturas limites das reações, identificadas as perdas de massa, águas (não evaporável), fases carbonáticas e portlandita.

Segundo Hoppe Filho(2008) e Bagheri e Parhizkar (2012), os valores de perdas de massa foram calculados em função da massa residual, que são dados pela Equação 23.

$$FC = 100 / M_{residual} \quad \text{Equação 23}$$

Em que:

FC: fator de correção; e

M_{residual}: massa residual após perda de massa até 1.000°C (%).

Para calcular o percentual de água que não evapora, que está ligada ao grau de hidratação (BROUWERS, 2014; SCRIVENER et al., 2015), reporta-se à Equação 24.

$$GDHq(t) = mq(t) / mq^{\infty} \quad \text{Equação 24}$$

Em que:

$mq(t)$ – massa de água quimicamente combinada em um instante t ; e

mq^∞ - massa de água quimicamente combinada em uma hidratação completa

Esse equação pode conter erros, sobretudo em sistemas que tenham reações pozolânicas, uma vez que é impraticável separar a água quimicamente combinada derivada da reação das fases do cimento com a pozolana (para que tenha melhores aproximações de resultados, adota-se essa Equação 25 para melhores aferições (MADANI, BAGHERI e PARHIZKAR, 2012).

$$GDHn(t) = mn(t) / mc.mn^\infty \quad \text{Equação 25}$$

Em que:

$GDHn(t)$ – grau de hidratação;

$mn(t)$: quantidade de água não evaporável no instante t ; dada pela perda de massa até a ignição, descontando-se a água evaporável, que é liberada até 105°C.

mc : razão em massa do cimento em relação aos materiais cimentícios; e

mn^∞ : quantidade de água não evaporável para a hidratação completa do cimento.

Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2016) descrevem que, para uma perfeita hidratação, é preciso assumir os valores fixos de $GDHn(t)=0,23$. Apesar de a literatura apresentar também outros valores, o mais recorrente é o apresentado.

O teor de portlandita foi utilizado como indicador da reação pozolânica. Os resultados foram calculados nas perdas de massa na temperatura de 400°C e 550°C, usando-se a Equação 26 e o balanço de massas pela Equação 27 (RUPASINGHE *et al.*, 2017).



$$\%CaOH(t) = M_{Ca(OH)_2} / M_{H_2O} \times \Delta m_{400-500} = 78/18.m_{H_2O} = 4,11 \Delta m_{400-500}$$

$$\text{Equação 27}$$

Em que:

$\%CaOH(t)$: teor de hidróxido de cálcio no instante t (%);

$MCa(OH)_2$ e MH_2O : massa molecular do hidróxido de cálcio e água, respectivamente 74u e 18u; e

$\Delta m_{400-500}$: perda de massa de água referente à decomposição do hidróxido de cálcio, na faixa de 400°C a 500°C (%).

Os valores do teor de portlandita foram corrigidos a partir das Equações 28 e 29:



$$\%CaOH(t)' = \%Ca(OH)_2 + MCa(OH)_2/MCO_2 \times \Delta m_{500-800} = \%Ca(OH)_2 + 1,68.\Delta m_{500-800} \quad \text{Equação 29}$$

Em que:

$\%CaOH(t)'$: teor de hidróxido de cálcio corrigido (%);

MCO_2 : massa molecular do anidro carbônico, 44 u; e

$\Delta m_{500-800}$: perda de massa referente à decomposição do anidro carbônico, na faixa de 500°C a 800°C.

O teor de carbonato de cálcio foi monitorado com a carbonatação das pastas, as curvas de termogravimetria e descarbonatação da calcita são observadas entre 600°C e 800°C e são calculadas pelas Equações 30 e 31 seguintes.



$$\%CaCO_3(t) = MCaCO_3/MCO_2 \cdot \Delta m_{600-800} = 100/44 \cdot \Delta m_{600-800} = 2,27 \Delta m_{600-800} \quad \text{Equação 31}$$

Os resultados das amostras analisadas foram observadas nas temperaturas de decomposição e cada fase detectada, perda de massa em relação à massa residual, fator estequiométrico e grau de hidratação.

As Figuras 35 a 38 seguintes apresentam as curvas termogravimétricas referentes às condições de cura dos corpos de prova.

(i) Compactação

Para as Figuras 35 a 38 os parâmetros avaliados foram os seguintes:

ANE = água não evaporável;

AC = água combinada dos hidratados

CH = hidróxido de cálcio

FC = fases carbonáticas

C(CH) = carbonato proveniente do hidróxido de cálcio

Figura 35 - Curva de termogravimétrica da amostra aos 28 dias.

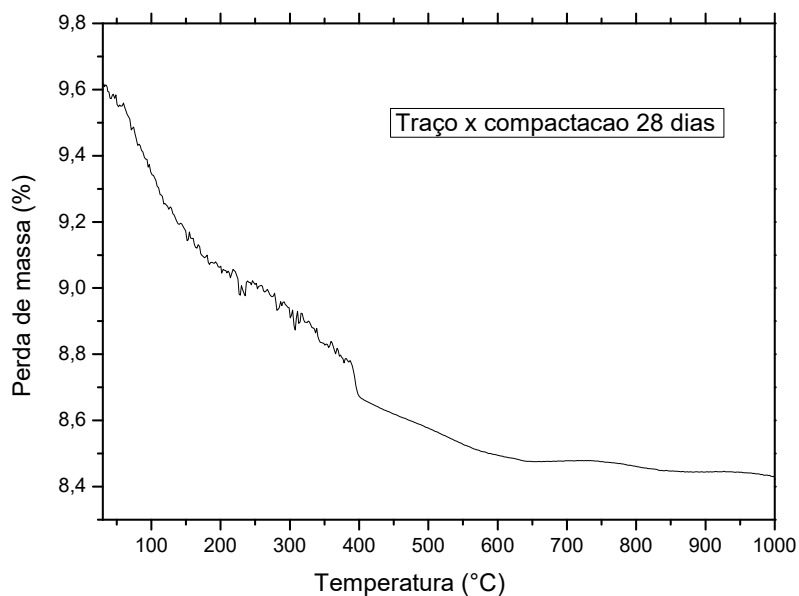


Tabela 35- Dados de produtos hidratados da amostra do traço II com 28 dias.

	ANE	AC	CH	FC	C(CH)
Temperatura decomposição (°C)		96,55	431,05	710,11	698,78
Massa da amostra (mg)			21,55		
Massa residual (mg)			17,27		
Perda de massa (mg)	3,14	3,01	0,39	0,65	0,54
Perda de massa (%)	18,38	17,59	2,3	3,61	3,29
Fator estequiométrico	1	1	4,08	2,29	1,63
Teor (%)	18,38	17,59	8,34	2,11	6,09
Grau de hidratação (%)			62,55		

(ii) Ambiente

Figura 36 - Curva de termogravimetria da amostra aos 28 dias.

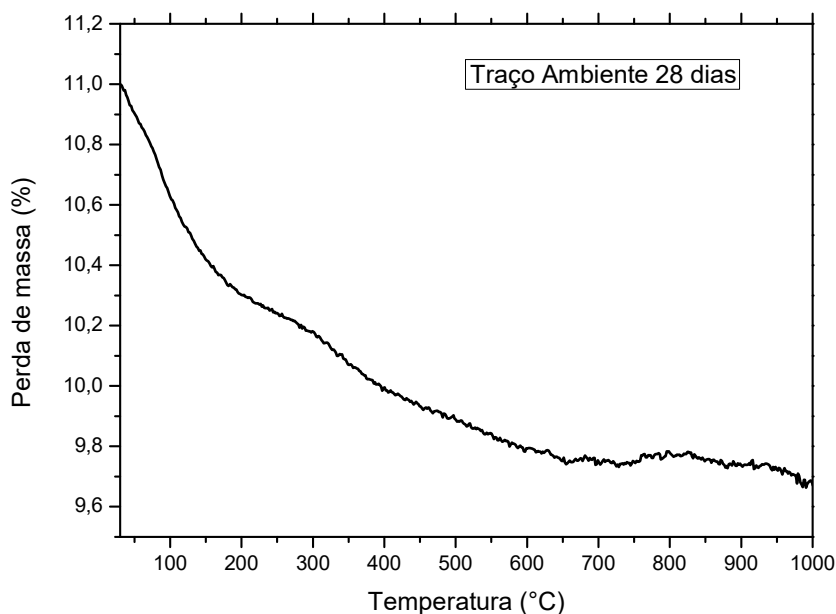


Tabela 36- Dados de produtos hidratados da amostra do traço II com 28 dias.

	ANE	AC	CH	FC	C(CH)
Temperatura decomposição (°C)		99,69	437,535	708,18	697,78
Massa da amostra (mg)			19,02		
Massa residual (mg)			14,92		
Perda de massa (mg)	2,99	3,01	0,35	0,52	0,52
Perda de massa (%)	17,53	18,02	2,1	3,18	3,18
Fator estequiométrico	1	1	4,15	2,21	1,69
Teor (%)	17,53	18,02	6,58	1,7	5,2
Grau de hidratação (%)			59,5		

(iii) Térmico

Figura 37 - Curva de termogravimetria da amostra aos 28 dias.

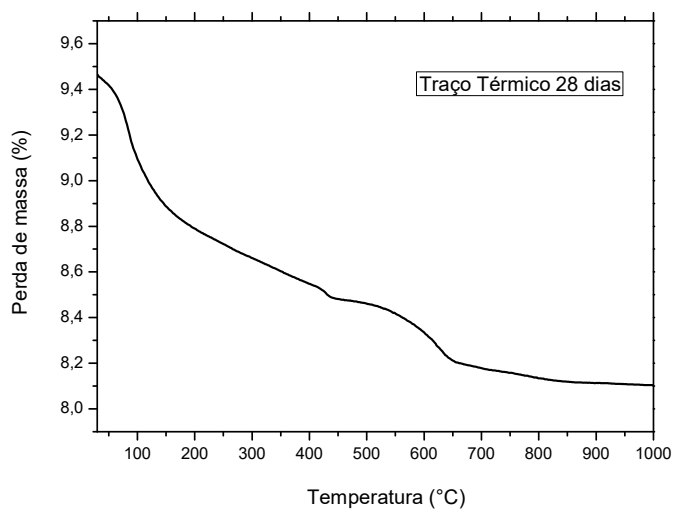


Tabela 37- Dados de produtos hidratados da amostra do traço II com 28 dias.

	ANE	AC	CH	FC	C(CH)
Temperatura decomposição (°C)		100,78	449,22	698,45	697
Massa da amostra (mg)			20,22.		
Massa residual (mg)			17,96		
Perda de massa (mg)	4,14	4,02	0,36	0,51	0,6
Perda de massa (%)	14,92	18,45	2	3,03	3,25
Fator estequiométrico	1	1	4	2,22	1,65
Teor (%)	14,88	18,45	5,05	1,94	5,52
Grau de hidratação (%)			48,44		

(iv) Autoclave

Figura 38 - Curva de termogravimetria da amostra aos 28 dias.

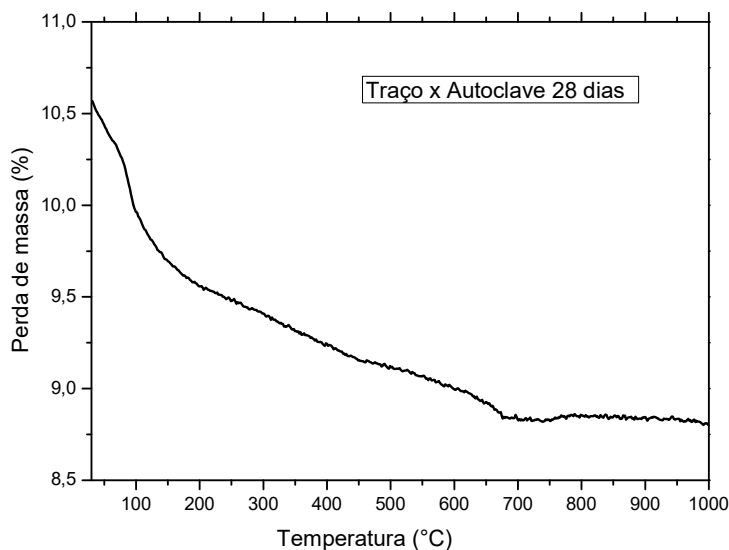


Tabela 38- Dados de produtos hidratados da amostra do traço II com 28 dias.

	ANE	AC	CH	FC	C(CH)
Temperatura decomposição (°C)		95,86	429,27	706,19	698,85
Massa da amostra (mg)			20,74		
Massa residual (mg)			17,23		
Perda de massa (mg)	2,59	2,55	0,24	0,59	0,59
Perda de massa (%)	13,84	14,22	1,49	3,48	3,54
Fator estequiométrico	1	1	4,06	2,24	1,63
Teor (%)	13,84	14,22	4,89	2,09	6
Grau de hidratação (%)			45,54		

Os resultados destacam que as amostras que passaram por compactação se obtêm menores perdas de água, porém é sabido que para que o concreto tenha bom desempenho, faz-se necessário a existência de água para reação. No entanto, há a premissa de que a hidratação se encerra quando não existe mais água disponível ou quando não existem espaços vazios para crescimentos dos grãos hidratados. No caso da compactação, ocorre uma boa redução de vazios.

Em relação à quantidade de portlandita, a temperatura e pressão características da autoclave diminuem os espaços disponíveis para o crescimento de cristais, interferindo na sua concentração. Contudo, quando foram combinados os efeitos da pressão e da temperatura. Independentemente da pressão e do tempo, a quantidade de portlandita apresentou pouca variação.

4.13 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL E TRAÇÃO NA FLEXÃO

Concretos produzidos com pó de quartzo (traço tipo 1): as Figuras 39 e 40 apresentam os resultados médios para 6 corpos de prova ensaiados à tração na flexão e à tração por compressão diametral. Os resultados individuais foram obtidos para cada tipo de procedimento adotado na idade de 28 dias. Os resultados individuais para cada corpo de prova ensaiado são apresentados no Apêndice B.

Figura 39 - Resistência à tração na flexão de concretos com quartzo.

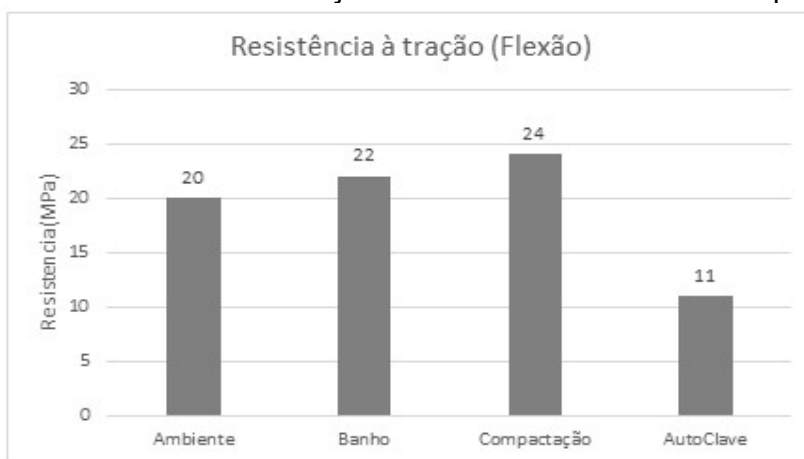
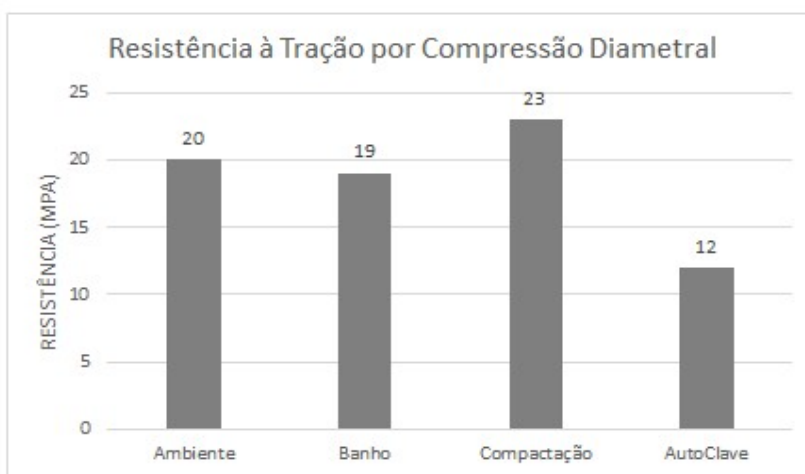


Figura 40 - Resistência à tração por compressão diametral de concretos com quartzo.



Pode-se observar que os concretos do traço 1 apresentaram valores de resistência à tração na flexão e de resistência à tração por compressão diametral muito próximos em todos os tipos de cura e método empregados. Vale ressaltar que

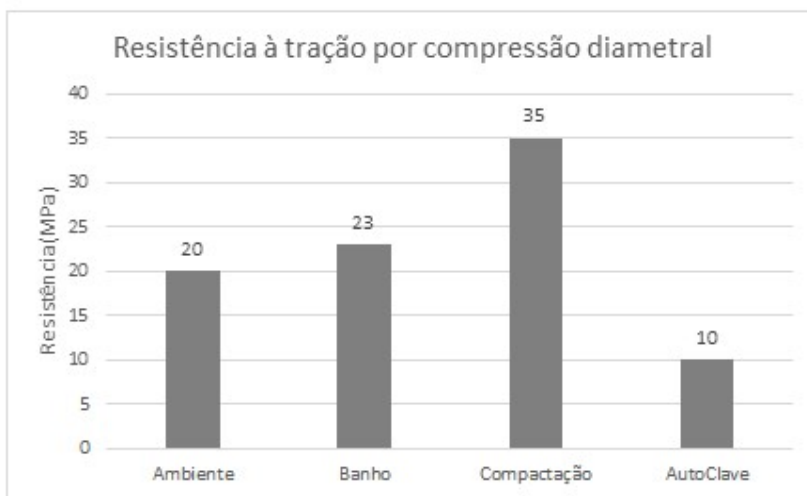
a resistência mais expressiva foi obtida nos corpos de prova onde houve compactação, obtendo-se uma resistência à flexão de 24 MPa e 25 MPa.

Para o traço tipo 2 com basalto, as Figura 41 e 42 apresentam os valores obtidos.

Figura 41 - Resistência à tração de concretos com basalto.



Figura 42 - Resistência à tração diametral de concretos com basalto.



Os valores de resistência à tração na flexão no traço 2 dos concretos de CPR, também se mostraram semelhantes ao de resistência à tração por compressão diametral. Destoa um pouco o concreto que sofreu compactação. Os concretos produzidos com pó de quartzo apresentaram resistência à tração por compressão diametral e tração na flexão semelhantes.

Por se tratar de um ensaio que envolve pressão e temperatura, a cura em autoclave tem grande possibilidade de falhas no ensaio, na moldagem ou no

adensamento. O que chama atenção é que todos os traços tinham os mesmos constituintes e a cura e tratamentos de autoclave, empregada nesta pesquisa, não colaboraram para o desenvolvimento das propriedades mecânicas dos concretos de pós reativos. Os ensaios desenvolvidos por Jacó *et al.* (2014) indicam efeitos conflitantes para o uso de autoclave para fabricação de CPR. Neles, os valores apresentados de resistências à compressão e à tração do concreto, sofreram alterações ligadas às variações na composição da matriz, na metodologia de moldagem, nas condições de produção do material e nos métodos de ensaio adotados.

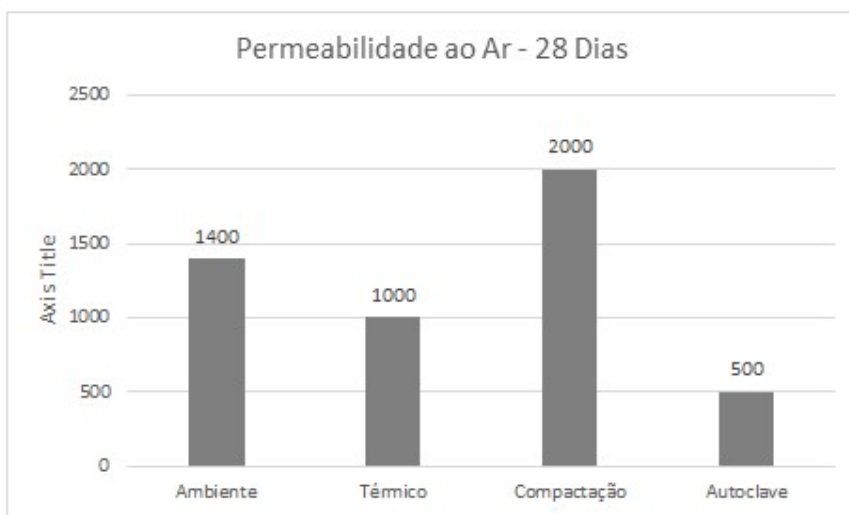
Pode-se observar que os concretos com pós de quartzo apresentaram maiores resistências quanto ao ensaio de tração na flexão, com a cura ambiente, alcançando o valor de 22 MPa e 20 MPa. Na cura térmica os valores obtidos foram iguais a 19 MPa.

4.14 PERMEABILIDADE AO AR

(i) Concretos produzidos com quartzo

Na Figura 43 tem-se os resultados obtidos da permeabilidade ao ar, medidas em segundos, dos concretos em estudo.

Figura 43 – Permeabilidade ao ar de concretos com quartzo aos 28 dias.



Pode-se constatar que todos os concretos produzidos ofereceram excelente ou boa resistência à penetração do ar, pois trabalhos realizados por Catheret

al.(1984) e Pereira(2011) abordam que para o concreto apresentar boas características o ar injetado no concreto tem que levar mais de 300 segundos para sair dos poros.

Observando-se a Figura 43, nota-se que o melhor desempenho é do concreto moldado por compactação que vai ser o menos permeável. É perceptível também um bom desempenho dos CPR na metodologia de cura ambiente, atingindo o tempo de 1.400 s, sendo mais permeável que o compactado, porém com desempenho excelente. Em terceiro lugar tem-se a cura térmica, na faixa de 1.000 s. Entre os métodos de cura, aquele por autoclave foi o menos eficiente.

Na Figura 44 abaixo, tem-se a imagem dos concretos submetidos à cura autoclavada, que começaram sua hidratação no interior do equipamento, submetidos de imediato ao calor e pressão constantes e contato com água. Isto provavelmente pode ter contribuído para que a água possa entrar de maneira rápida nos poros dos CPR, que leva à perda de massa e fissuras, bem como formação de poros.

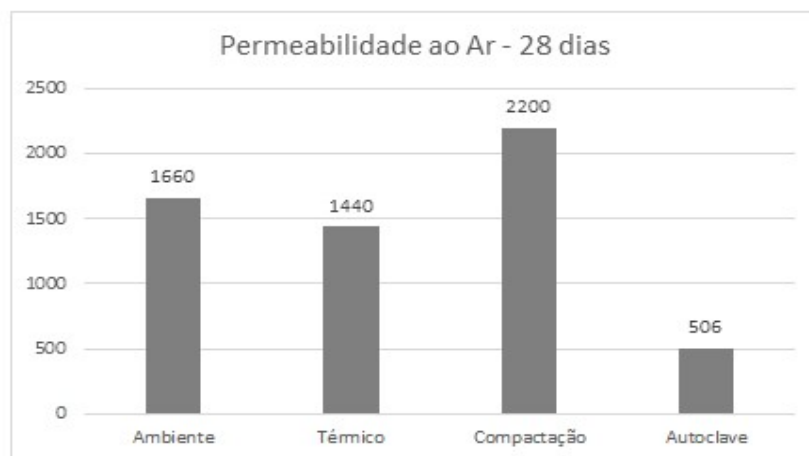
Figura 44 - Aspecto dos corpos de prova curados em autoclave.



(ii) Concretos produzidos com basalto

Os resultados permeabilidade ao ar dos concretos de CPR com pó de basalto aos 28 dias estão apresentados na Figura 45.

Figura 45 - Resultados obtidos para a permeabilidade dos CPR basalto aos 28 dias.



Verificou-se a mesma tendência do caso anterior, no qual foi usado o pó de quartzo. O concreto em que se usou o processo de compactação foi o que apresentou melhor desempenho, seguido daquele com cura ambiente.

Em todos os casos, o pó de basalto promoveu redução da permeabilidade ao ar em relação aos concretos com pó de quartzo, indicando concretos de baixa permeabilidade.

4.14 ÍNDICE DE VAZIOS

Para analisar as características dos índices da absorção de vazios dos concretos de CPR, foram estudadas as amostras nas idades 7, 14, e 28 dias, de acordo com as Figuras 46 a 53.

Como se tratam de traços com a mesma relação água/cimento e é sabido que concretos com grandes relações de água/cimento apresentam altos índices de vazios, os resultados aqui apresentados estão intrinsecamente ligados ao processo de mistura e ferramenta de cura.

Figura 31 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.

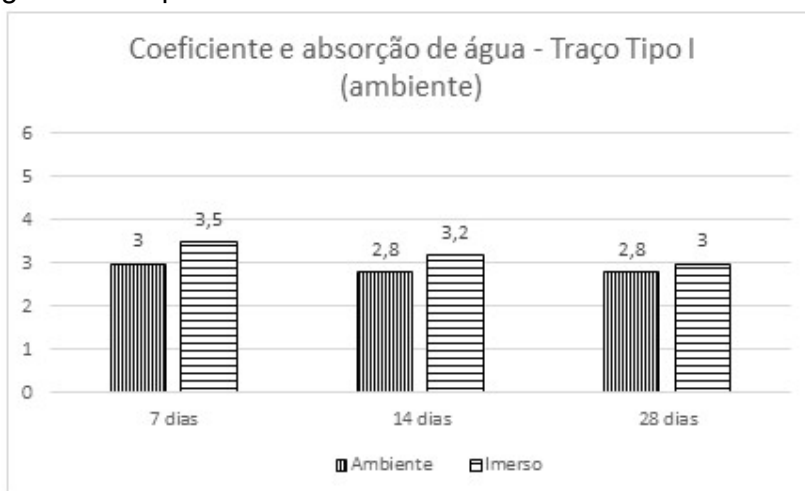


Figura 32 - Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.

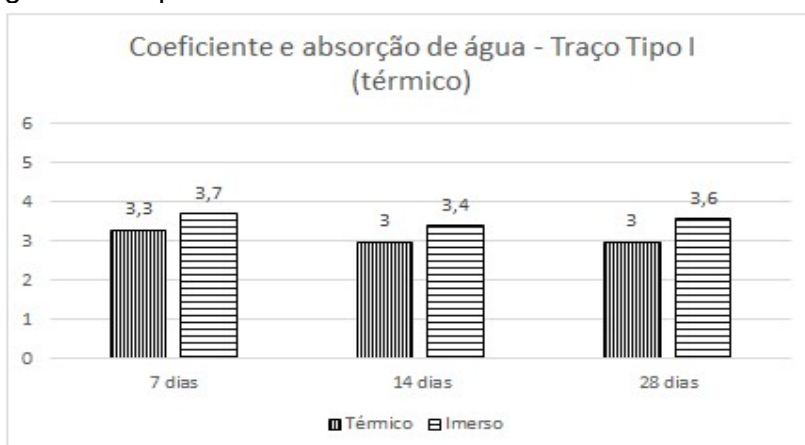


Figura 33 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.

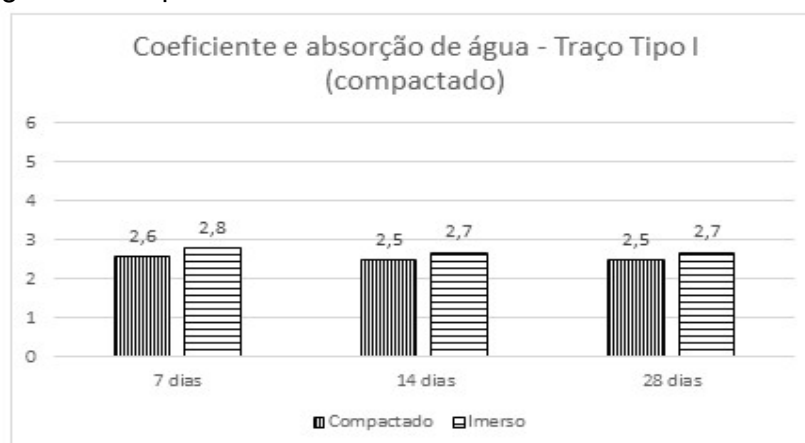
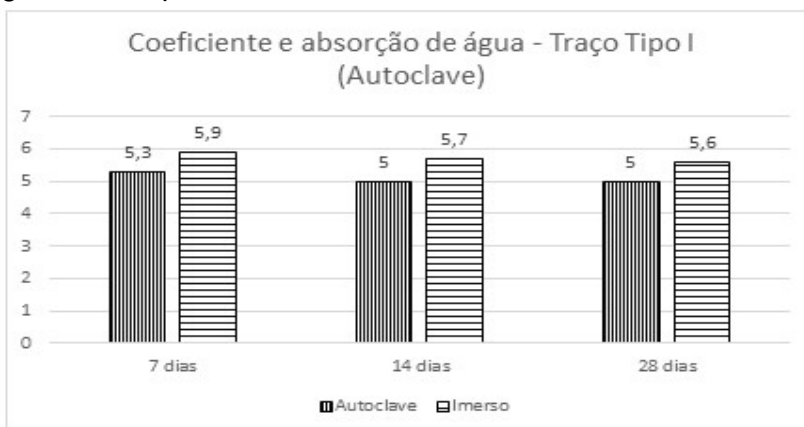


Figura 34 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.



É possível observar que nas amostras do traço tipo 1 curados no meio ambiente e nas tratadas termicamente, com o passar do tempo, o índice de vazios diminui, o que já era esperado e também está de acordo com as resistências mecânicas dos concretos que aumentam. Ao longo do tempo, os produtos de hidratação vão ocupando espaços e reduzindo o volume de vazios. A atividade pozolânica da sílica ativa também contribui para isso. A redução do índice de vazio é de 6,6% para amostra curada no meio ambiente, já na amostra com cura térmica o valor foi de 9%.

Para as amostras de autoclave (traço 1), os valores do índice de vazios são todos superiores a 5%, mostrando uma grande diferença em todas as amostras estudadas. Destaque para as amostras de compactação com valores muito baixos no índice de vazios, próximo a 2,5% e observa-se que os valores basicamente não são alterados. Mostra-se, assim, uma boa compactidade no traço estudado.

Para o traço do tipo 2 observou-se que as características de hidratação, tempo e cura ajudaram a influenciar nos valores, pois, de maneira generalizada, todos eles foram menores com o passar do tempo.

O método de compactação foi o que apresentou melhor desempenho, o que é lógico, pois a pressão a que o concreto é submetido ainda no estado fresco aproxima os grãos dos componentes da mistura, reduzindo os espaços entre eles.

Figura 35 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.

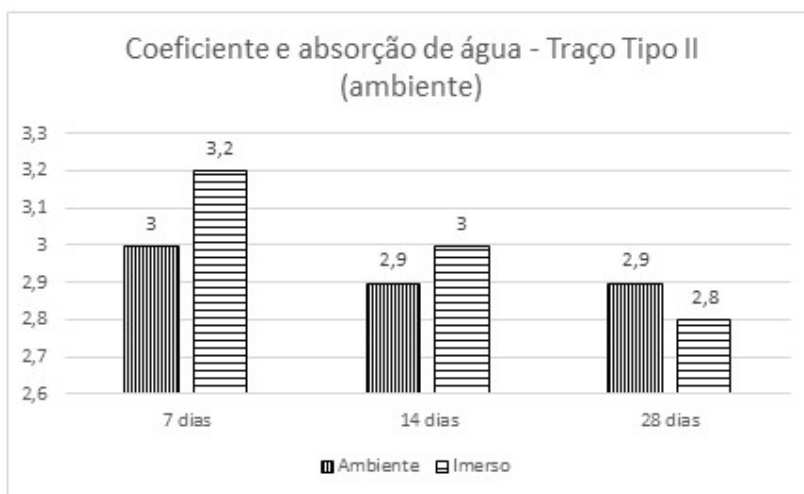


Figura 36 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.

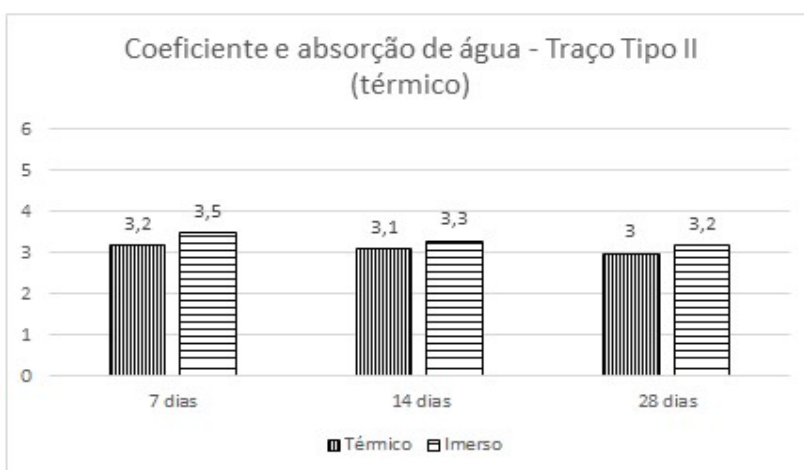


Figura 37 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.

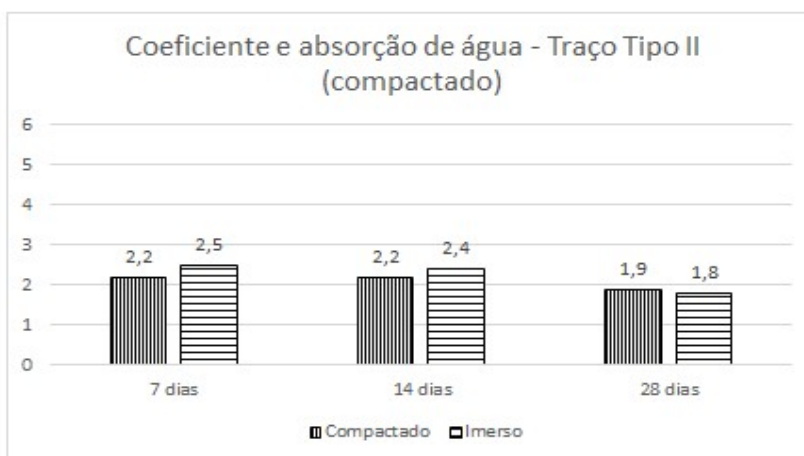
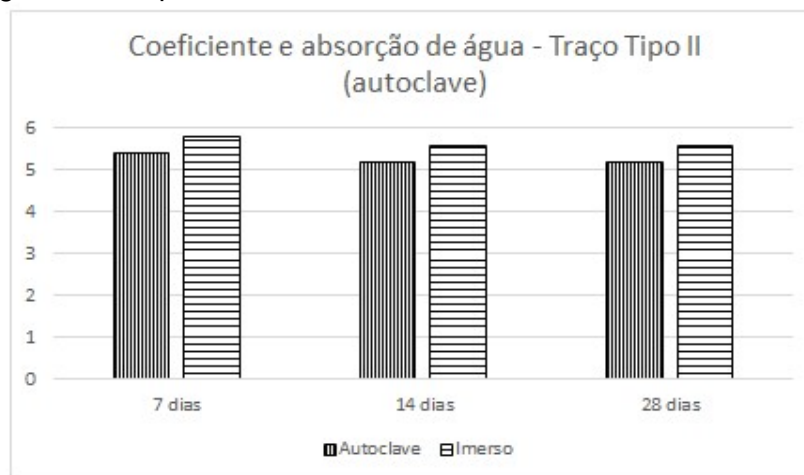


Figura 38 – Tipo de cura e idade no índice de vazios do concreto.



De forma resumida, os resultados demonstraram menores índices de vazios para concretos compactados e curados ao meio ambiente, valores que vão progressivamente reduzindo-se com o passar do tempo.

4.16 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os resultados de absorção de água por capilaridade obtidos mostraram que a idade influenciou nessa propriedade dos CPR, conforme pode ser observado nas Figura 54 a 56, nas quais se tem os coeficientes de absorção de água por capilaridade. Eles foram menores para as séries de concreto ensaiadas aos 28 dias do que para as séries ensaiadas aos 14 dias e 7 dias, o que já era esperado.

Os resultados de autoclave tiveram para todas as idades maiores absorção por capilaridade chegando a ser superiores a 4 kg/m^2 . Um destaque para as amostras simplesmente curadas ao ambiente que, sem nenhuma tecnologia, apresentou valores na casa do 1 kg/m^2 , mostrando a eficiência da dosagem. Quanto aos valores da compactação, os resultados são muito positivos, pois em todas as idades, os valores de absorção são muito baixos, mostrando o quanto o material tem característica impermeável. Comprova-se, assim, que o tipo de cura e metodologia empregada na moldagem pode influenciar na absorção de água do concreto (CAMARINI *et al.*, 1999).

O comportamento dos concretos que usaram a autoclave é justificado pelo aparecimento dos poros na superfície, que ocasiona uma força de sucção capilar em

contato com a água, preenchendo todos os vazios até que ocorra a saturação das amostras com o passar do tempo (NUNES e HELENE, 1998).

Figura 39 – Influência do tipo de cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 7 dias de idade.

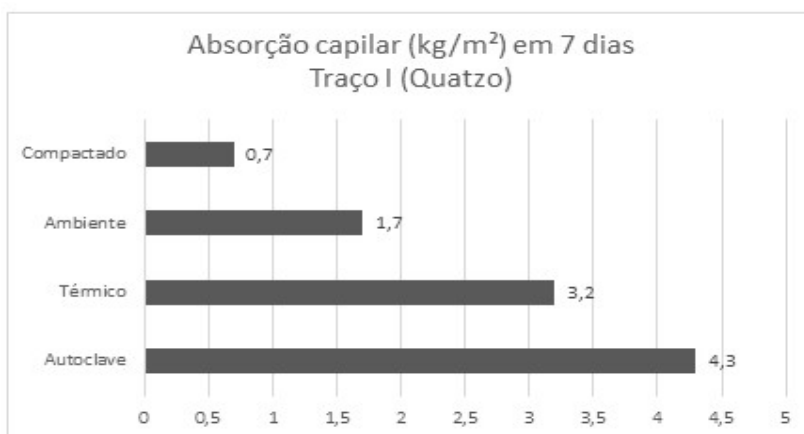


Figura 40 – Influência do tipo de cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 14 dias de idade.

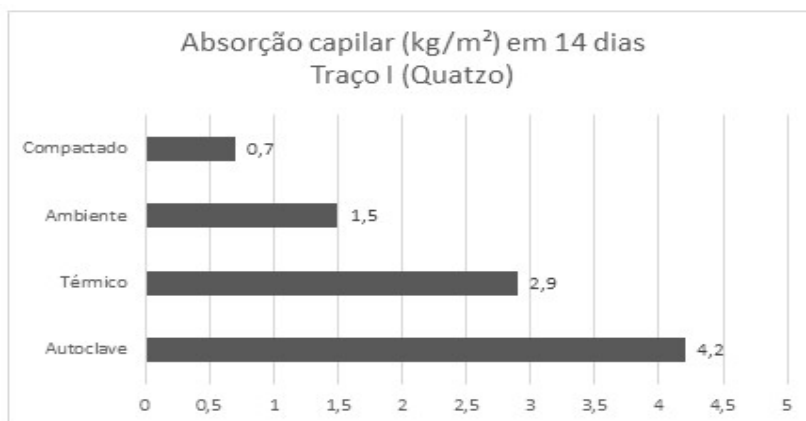
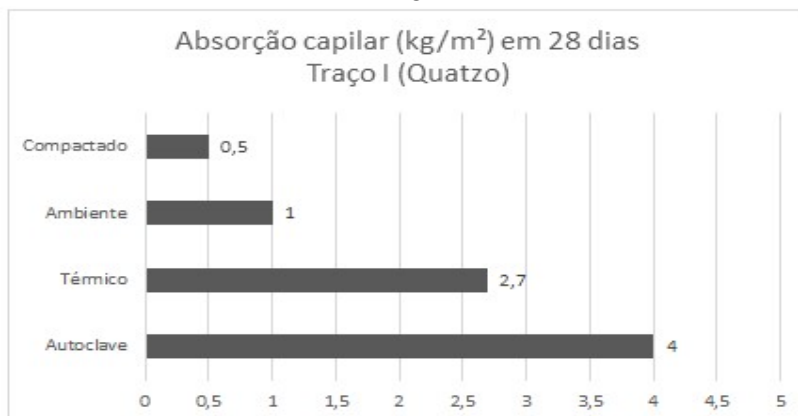


Figura 41 – Influência do tipo de cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 28 dias de idade.



Para os traços do tipo 2, os resultados obtidos foram diminuindo com o tempo. Destaca-se que a cura na autoclave com valores superiores a 4 (kg/m²), valor muito superior aos demais.

Figura 42 – Influência do tipo de metodologia de cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 7 dias de idade.

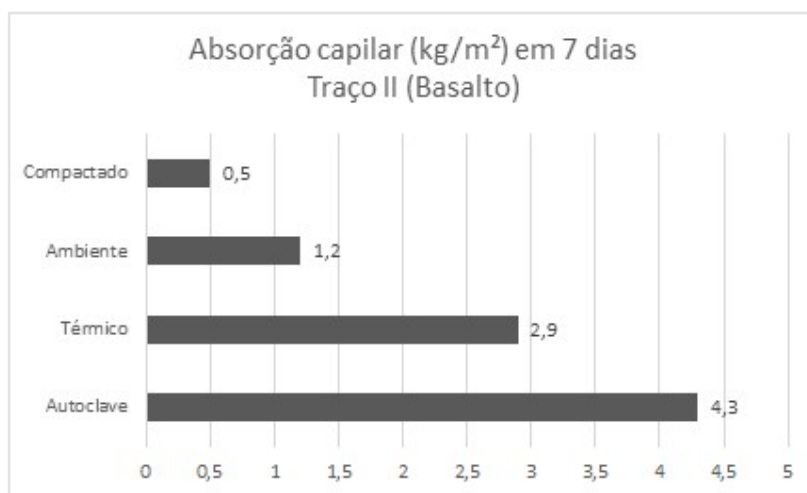


Figura 43 – Influência do tipo de metodologia cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 14 dias de idade.

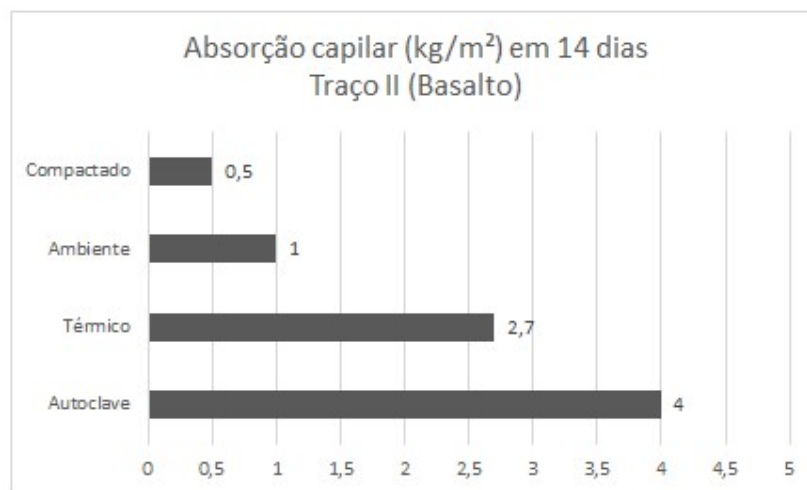
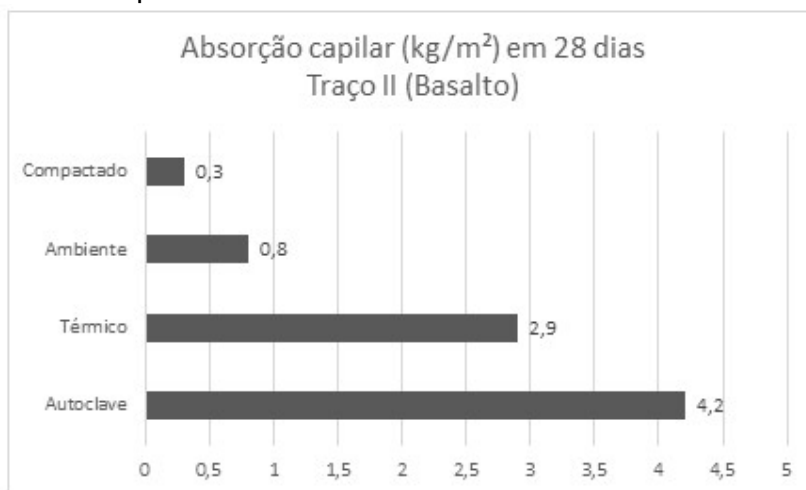


Figura 44 – Influência do tipo de metodologia cura, idade na absorção de água por capilaridade do concreto aos 28 dias de idade.



Comparando-se os dois traços, observa-se que no comportamento da cura ambiente e por compactação, o traço 2 teve uma redução aos 28 dias em relação ao traço 1 no total de 80% e 60% na absorção por capilaridade. Pode-se concluir também que em ambos os traços a cura por autoclave tem um aumento de vazios que corresponde à maior absorção de água.

Relação entre absorção de água por capilaridade e a resistência à compressão

A relação entre absorção de água por capilaridade e resistência à compressão do concreto (Figuras 56, 57 e 58) apresentaram uma tendência

coerente com apresentada na literatura (MEHTA e MONTEIRO, 2008; ARRUDA *et al.*, 2018), onde concretos com maiores resistências à compressão tendem a apresentar menores valores de absorção de água por capilaridade. Porém, com tantas variáveis envolvidas, não se consegue uma expressão matemática correlacionando a porosidade com a resistência à compressão.

Figura 45 – Relação entre absorção de água por capilaridade e resistência à compressão.

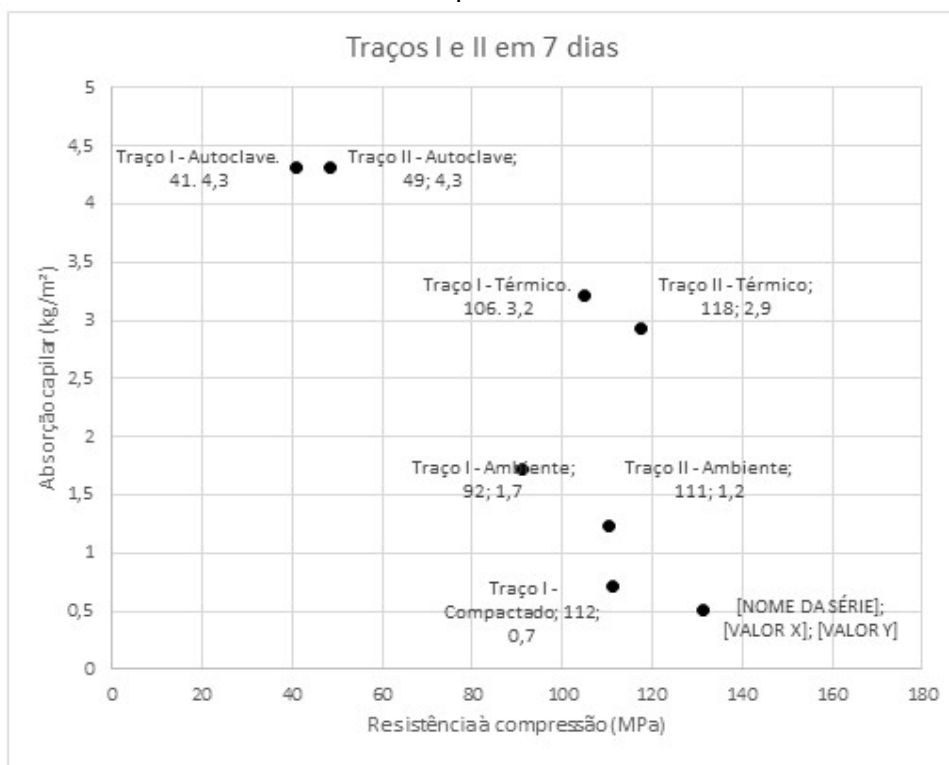


Figura 46 – Relação ente absorção de água por capilaridade e resistência à compressão.

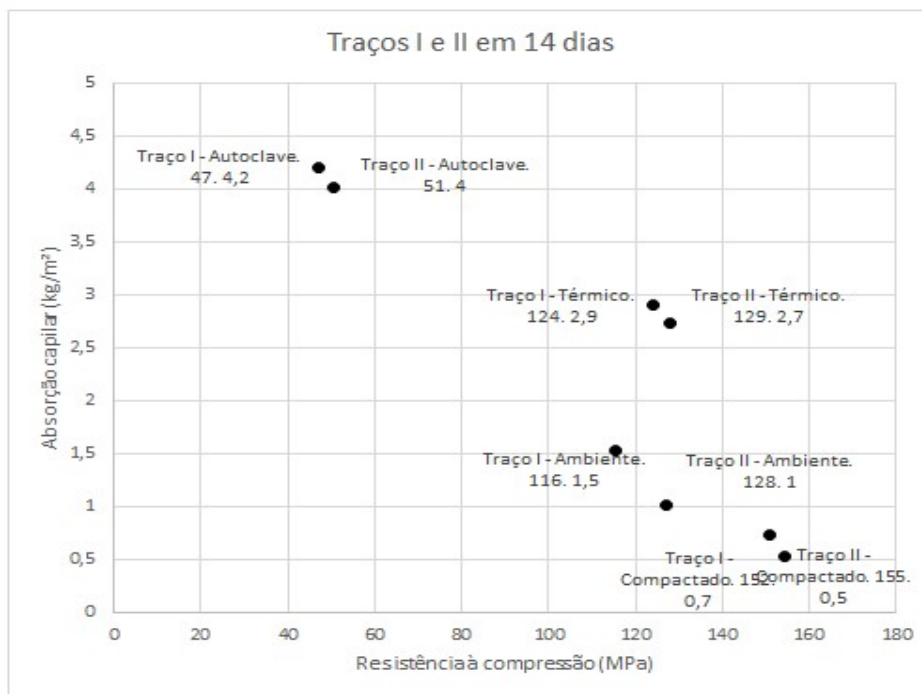
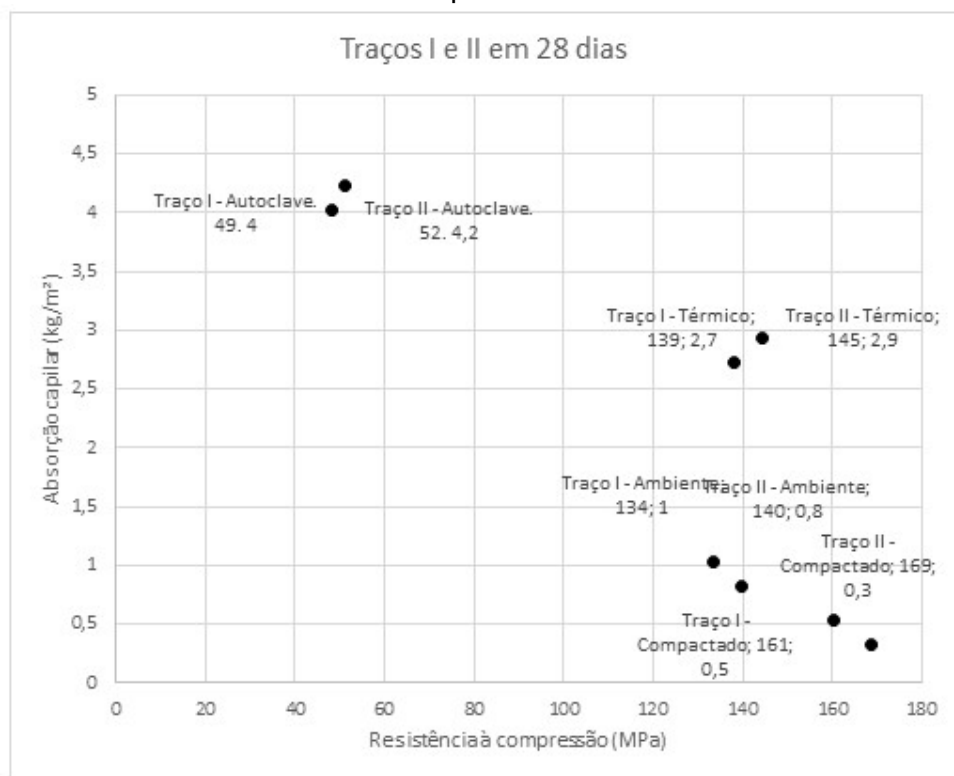


Figura 47 – Relação ente absorção de água por capilaridade e resistência à compressão.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

O modelo de empacotamento usado na pesquisa permitiu determinação de um traço conveniente para fabricação de CPR, sendo usadas as porcentagens de 5% sílica ativa em massa e 60% de pó de quartzo ou basalto, em volume.

Nos traços de CPR o consumo de cimento é elevado, acima de 1.000 kg/m^3 , necessário para se ter uma elevada resistência mecânica.

Os ensaios de análise térmica diferencial mostraram a presença de portlandita em todos os casos, significando que a quantidade de sílica incorporada nas misturas foi insuficiente para consumi-la.

O processo de cura empregado nos concretos de pós reativos fabricados modificou suas propriedades físicas e mecânicas.

O processo de cura e de moldagem dos corpos de prova que conduziu às melhores propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido foi a que usou uma compactação estática, impondo ao corpo de prova no estado fresco uma pressão aproximada de 5 MPa mantida constante por 8 horas. Seguiu-se a cura ao ambiente.

Os corpos de prova de CPR colocados na autoclave logo após a moldagem foram os que apresentaram desempenho inferior a todos os outros. Provavelmente o contato deles com a água no equipamento pode ter permitido sua entrada no interior do CPR provocando aparecimento de poros e fissuras no material. Observou-se que havia perda de massa e pequenas partículas de concreto caíam na autoclave. O acabamento dos corpos de prova também ficava comprometido.

Neste trabalho, na cura por autoclave os resultados apresentaram-se abaixo do esperado, o que é contraditório com a maior parte da literatura. Esse tipo de cura envolve pressão e temperatura o que aparentemente deveria promover aumento de resistência mecânica, todavia isto aqui não ocorreu.

A máxima resistência à compressão obtida no processo que usou a compactação estática foi de 169 MPa enquanto quando se usou a autoclave chegou-se só a 47 MPa.

Os concretos com cura ambiente, que é a mais prática para aplicações no campo, chegaram a ter 150 MPa de resistência à compressão e cerca de 20 MPa na

tração em flexão, o que indica tratar-se de um material de alto desempenho. Isto também é comprovado pela baixa permeabilidade ao ar e pelas baixas absorções de água.

Nos ensaios realizados, pode-se verificar que, em geral, os concretos de menor porosidade conduziam a maiores resistências.

De uma maneira geral, a substituição do pó de quartzo por pó de basalto conduziu a um melhor desempenho dos concretos CPR.

Finalmente este trabalho mostrou que é possível obter-se concretos de altíssimo desempenho localmente.

5.2 SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DAS PESQUISAS

Sugerem-se alguns temas a serem estudados em futuras pesquisas:

- (i) Testar outras formas de se submeter o concreto à cura em autoclave;
- (ii) Analisar a influência de fibras/microfibras nas propriedades dos concretos de pós reativos; e
- (iii) Estudar dosagem dos concretos de pós reativos por meio das curvas granulométricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10908:Aditivos para argamassa e concreto: Ensaios de uniformidade. Rio de Janeiro, p. 7. 1990.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, p. 5. 1991.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, p. 8. 1996.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto: ensaio de compressão de corpos-de- prova cilíndricos. Rio de Janeiro, p. 9, 2007.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais: Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, p. 3, 2015.

AIQIN, W., CHENGZHI, Z., NINGSHENG, Z. "Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement", Cement and Concrete Research, v. 27, n. 5, pp. 685-695, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11768: aditivos para concreto de cimento Portland. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: 2005.

AHLBORN, T. M.; PEUSE, E. J. P.; MISSON, D. L. Highperformance-concrete for Michigan Bridges - Material Performane - Phase I. Michigan Department of Transportation. Construction and Technology Division. Lansing, p. 190. 2008.

AFGC.Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes: Recommendations. [S.l.], p. 357. 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 517.2R: Accelerated curing of concrete at atmospheric pressure: State of the art. ACI Committee 517. Farmington Hills, p. 20. 1980.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 308R-01: Guide to curing concrete. Farmington Hills, p. 31. 2001.

AITCIN, P. C. Concreto de alto desempenho. São Paulo: Pini, 2000.

AITCIN, P. C.; RICHARD, P. The Pedestrian/bikeway bridge of sherbrooke. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 4. 1996. Paris, France. p. 1399-1406. Paris. 1996.

ALARCON-RUIZ, L. et al. The use of thermal analysis in assessing the effect of temperature on a cement paste. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 609-613, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1679: Standard practice for measuring hydration kinetics of hydraulic cementitious mixtures using isothermal calorimetry. West Conshohocken, p. 15. 2014.

AZEVEDO, N. H. Incorporação de nanobastões de carbeto de silício em matrizes cimentícias. 2015. 109 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

BAHAFID, S. *et al.* Effect of the hydration temperature on the microstructure of Class G cement: C-S-H composition and density. Cement and Concrete Research, v. 95, p. 270-281, 2017.

BAJZA, A. Structure of compacted cement pastes. Cement and Concrete Research, v. 13, p. 239-245, 1983.

BAALBAKI *et al.* "Influence of coarse aggregate on elastic proprieties of high performance concrete". ACI Materials Journal, v. 88, n. 5, pp. 499-503, 1991.

Beall, G. H.; Ritter, H.; Bull.American CeramicSociety.1971, 55, 579.

BETIOLI, A. M. Influência dos polímeros MHEC e EVA na hidratação e comportamento reológico de pastas de cimento Portland. 2007. 211 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

BONNEAU, O. *et al.* Mechanicalpropertiesanddurabilityoftwo industrial reactivepowder concretes. ACI MaterialsJournal, 94, p.286-290, 1997.

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

BRANDÃO, J. H. Análise experimental e numérica de cascas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras. 2005, 128 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

BRUNAUER, S. Tobermorite gel - The heart of concrete.American Scientist, 50, 1962. 210-229.

CASTRO A. L. de; PANDOLFELLI V. C. Revisão: conceito de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de argamassas especiais aplicados na construção civil. Cerâmica No. 55. pp. 18 – 32, 2009.

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

COPPOLA, L.; TROLI, R.; BORSOI, A.; *et al.* Influence of superplasticizer type on the compressive strength of reactive powder mortars. In: Fifth CANMETIACI SP-173, 1997, Rome: Italy. Proceedings ... Rome: Chemical Admixtures, 1997, SP-173-27, p.537-557.

CERVERA, M. *et al.* Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena. Computers and Structures, v. 80, p.1511-1521, 2002.

CHEN, M. *et al.* Investigation on the formation of tobermorite in calcium silicate board and its influence factors under autoclaved curing. Construction and Building Materials, v. 143, p. 280-288, 2017.

CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete). In: Cement and Concrete Research, vol. 25, nº 7, oct, 1995, p.1491-1500.

CORSINI, R. Inovações Ultrafinas. Técnica, PINI, São Paulo, 2006.

DERCOURT; PAQUET, - KIM, B. G.; AİTCIN, P. C. Importance of Adequate Soluble Alkali Content to Ensure Cement/Superplasticizer Compatibility. Cement and Concrete Research, v. 29, n. 1, p. 71-78, 1984.

DE LARRARD, F. A method for proportioning high-strength concrete mixtures. Cement, concrete and aggregates, 1999.

FENNIS, S. A. A. M. Design of ecological concrete by particle packing optimization. TU Delft, Delft University of Technology, 2011.

FEHLING, E. *et al.* Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples. John Wiley & Sons, 2014.

FORMAGINI, S. Dosagem Científica e Caracterização Mecânica de Concretos de Altíssimo Desempenho. Rio de Janeiro, 2005. 259 f. Tese (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FRAZÃO, Ely Borges; PARAGUASSU, Antenor Braga. Materiais rochosos para construção. In: Geologia de engenharia[S.l: s.n.], 1998

GUÉNOT-DELAHAIE, I. Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage du béton. Tese (Doutorado). École Nationale des Ponts et Chaussées. French, p. 165 f. 1996.

GONZÁLEZ, 2003, C., VIOLINI, D., ZAPPITELLI, J., ZERBINO R., "High strength concretes incorporating different coarse aggregates", ACI Materials Journal, v. 89, n. 3, pp. 292 - 246, 2003

GOWRIPALAN, N.; GILBERT, I. R. Design guidelines for Ductal prestressed concrete beams. New South Wales: The University of New South Wales, 2000.

GRACE. Tecflow - Aditivo superplastificante para concreto. 2015. Disponível em: https://gcpat.com/construction/pt-br/Documents/TEC-FLOW_2015.pdf. Acesso em: 09 ago. 2016.

GRAYBEAL, B. Material Property Characterization of Ultra-high Performance Concrete. Report No. FHWA-HRT-06e103, FHWA, U.S. Department of Transportation, 2006.

GUDMUNDSSON, G.; OLAFSSON, H. Alkali-silica reactions and silica fume - 20 years of experience in Iceland. Cement and Concrete Research, v. 29, p. 1289- 1297, 1999.

GUERRANTE, I. F. Estudo teórico e experimental da junção de concretos de diferentes resistências por meio de adesivo epóxi., Tese de D.Sc, Faculdade de Engenharia da UFF, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2013

HELMİ, M. et al. Effectsof high-pressure/temperaturecuringonreactivepowder concrete microstructureformation. *ConstructionandBuildingMaterials*, v. 105, p. 554-562, 2016.

HIGGINSON, E. C. Effectofsteamcuringontheimportantpropertiesof concrete. *Journalofthe American Concrete Institute*, p. 281- 298, 1961.

HOLSCHEMACHER, K. Hardened material properties of self-compacting concrete. *Journal of civil engineering and management*, v.X, n.4, 261-266, 2003

HOPPE FILHO, J. Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto. 2008. 247 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

IPEK, M. et al. Effectofpre-setting pressureapplied to mechanicalbehavioursofreactivepowder concrete during setting phase. *ConstructionandBuildingMaterials*, v. 25, p. 61-68, 2011.

IPEK, M. et al. Effectofpre-setting pressureapplied to mechanical behaviorsofreactivepowder concrete during setting phase. *ConstructionandBuildingMaterials*, v. 25, p. 61-68, 2011.

IPEK, M.; YILMAZ, K.; UYSAL, M. The effect of pre-setting pressure applied flexural strength and fracture toughness of reactive powder concrete during the setting phase. *ConstructionandBuildingMaterials*, v. 26, p. 459-465, 2012.

JAPANESE SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. Recommendationsfor Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks. *Concrete Engineering Series*, v. 82, 2008.

JULIANI, L. M. Avaliação das propriedades mecânicas do concreto de lajes alveolares pré-fabricadas utilizando ensaios não destrutivos. 2014. 195 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas

- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

JUSTS, J. *et al.* Ultra high performance concrete hardening under pressure. In: INTERNATIONAL CONFERENCE CIVIL ENGINEERING'11, 3, Jelgava, 2011. Proceedings [...]. Jelgava: Latvia University of Agriculture, 2011. p. 38-43.

JUSTS, J. *et al.* Microstructural investigation of ultra-high performance concrete obtained by pressure application within the first 24 hours of hardening. Construction Science, v. 14, p. 50-57, 2013.

KADA-BENAMEUR, H.; WIRQUIN, E.; DUTHOIT, B. Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry. Cement and Concrete Research, v. 30, p. 301-305, 2000.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste: a miniature slump test. Concrete and Aggregates, v. 2, n. 2, p. 95-102, 1980.

KANTRO, D. L. Influence of water-reducing admixtures on properties of cement paste - A miniature slump test. Cement, Concrete and Aggregates, p. 95-102, 1980.

KJELSEN, K. O.; DETWILLER, R. J. Reaction kinetics of Portland cement mortar hydrated at different temperatures. Cement and Concrete Research, v. 22, p. 112-120, 1992.

KOSMATKA, S. H.; WILSON, M. L. Design and control of concrete mixtures. 15th ed. Skokie: Portland Cement Association, 2011.

KLEIN, N.S. El rol físico del agua en mezclas de cemento Portland, Barcelona, 2012, Tese (doutorado) – Universitat Politècnica de Catalunya, 247 p.

KRAKOWIAK, K. J. *et al.* Nano-chemo-mechanical signature of conventional oil-well cement systems: effects of elevated temperature and curing time. *Cement and Concrete Research*, p. 103-121, 2015.

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

Londeiro (2016). DOSAGEM DE CONCRETO ECOLÓGICO COM BASE EM EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS, Tese (2016).

Levi, Repete. Pastas de ultra-alto desempenho submetidas a cura sob pressão. 2017.

LIN, F. Modeling of hydration kinetics and shrinkage of Portland cement paste. 2006. 170 p. Tese (Doutorado) - Columbia University, Nova Iorque, 2006.

LIN, F.; MEYER, C. Hydration kinetics modeling of Portland cement considering the effects of curing temperature and applied pressure. *Cement and Concrete Research*, v. 39, p. 255-265, 2009.

MALLMANN, J. Estabilização pozolânica de cinzas volante e pesada com cal dolomítica hidratada e areia, curadas pelos processos de autoclavagem e câmara à temperatura constante - Dissertação de mestrado – Engenharia Civil – UFRGS – Porto Alegre – 2013.

MA, H.; LI, Z. Realistic pore structure of Portland cement paste: experimental study and numerical simulation. *Computers and Concrete*, 11, n. 4, p. 317-336, 2013.

MADANI, H.; BAGHERI, A.; PARHIZKAR, T. The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 42, p. 1563-1570, 2012.

MEEKS, K. W.; CARINO, N. J. Curing of High-Performance Concrete: report of the state-of-the-art. BuildingandFireResearchLaboratory.NationalInstituteof Standards and Technology. U.S. Gaithersburg: Departmentof Commerce, 1999.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedade e materiais. 2ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782 p.

MELO NETO, A. A. D. Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada. 2002. 253 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil e Urbana, São Paulo, 2002.

MELO, A. B. Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland. 2000. 296 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

MENDES, T. M. Efeito da nanossilica em matrizes cimentícias de ultra alta resistência. 2016. 113 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MIKHAIL, R. S. *et al.* Ettringiteformation in compressedexpansivecement pastes. Cementand Concrete Research, v. 11, 665-673, 1981.

MIKHAIL, R. S.; OWEIMREEN, G. A. Surfaceareaandporestructureofcompressedlow-porositycement pastes.Cementand Concrete Research, v. 3, 561-573, 1973.

MIRANDA, C.R. Pastas de cimento de alta compacidade para poços de petróleo – Processo de formulação, propriedades reológicas, resistência mecânica e química. Tese de Doutorado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

MITCHELL, D. R. G.; HINCZAK, I.; RAY, R. A. Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 28, 1571-1584, 1998.

MOELLER, A. Use of UHPC in offshore wind turbine foundations. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE*, 2., Kessel, 2008. Proceedings [...]. Kessel, 2008. p. 863-869.

MURTHY, A. R.; IYER, N. R.; PRASAD, B. K. R. Evaluation of mechanical properties for high strength and ultra high strength concretes. *Advances in Concrete Construction*, v. 1, p. 341-358, 2013.

NEMATZADEH, M.; NAGHIPOUR, M. Compressive strength and modulus of elasticity of freshly compressed concrete. *Construction and Building Materials*, v. 34, p. 476-485, 2012a.

NEMATZADEH, M.; NAGHIPOUR, M. Compressive fresh concrete technique and the effect of excess of water content on physical-mechanical properties of compressed concrete. *Materials and Design*, v. 37, p. 256-267, 2012b.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NÖLDGEN, M. *et al.* Properties of ultra high performance concrete (UHPC) in tension at high strain rates. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE AND CONCRETE STRUCTURES*, Toledo, 2013. Proceedings [...]. Toledo, 2013. p. 1-13.

OERTEL, T. *et al.* Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 58, p. 121-130, 2014.

O'NEIL, E.; DOWD, W. High-performance pipe products fabricated with reactive powder concrete. In: *The Materials Engineering Conference*, 1996. Proceedings, v. 2, 1996, p. 1321-1330

PANE, I.; HANSEN, W. Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 1155-1164, 2005.

PARAMESHWAR, N. H.; YARAGAL, S. C. Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, n. 154, p. 72-87, 2017.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. Nanoestrutura e microestrutura do concreto endurecido. In: ISAIA, G. C. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1.ed. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 16, p. 585-614.

PERFORMANCE CONCRETE, 2., Kessel, 2008. *Proceedings [...]*. Kessel, 2008, p. 19-30.

POOLE, J. L. *et al.* Methods for calculating activation energy for Portland cement. *ACI Materials Journal*, 104, n. 1, p. 303-311, 2007.

PRADO, D. M.; HAACH, G. Análise experimental e numérica de vigas de concreto armado reforçadas ao cisalhamento com laminados de CFRP. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, São Carlos, v. 15, n. 65, p. 57-60, 2013.

PREM, P. R.; BHARATKUMAR, B. H.; IYER, N. R. Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete. *Sādhanā*, v. 38, n. 6, p. 1421-1431, 2013.

QUARCIONI, V. A. Influência da cal hidratada nas idades iniciais da hidratação do cimento Portland - Estudo em pasta. 2008. 172 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 2008.

RAMACHANDRAN, V. S. Thermal analysis. In: RAMACHANDRAN, V. S. *et al.* *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. William Andrew, 2002.

REBENTROST, M.; WIGHT, G. Experience and applicationsof ultra-high performance concrete in Asia. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH

RESPLENDINO, J. First recommendations for Ultra-High- Performance Concretes and examples of application. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, Kassel, 2004. Proceedings [...]. Kassel, 2004. p. 79-90.

RESPLENDINO, J. Ultra-High Performance Concretes – recent realizations and research program on UHPFRC bridges in France. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 2., 2008. Proceedings [...]. 2008. p. 31-43.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. Cement and Concrete Research, v. 25, p. 1501-1511 1995.

RILEM TC 119-TCE. Recommendations of TC 119-TCE: Avoidance of thermal cracking in concrete at early ages. Materials and Structures, v. 30, 451-464, 1997.

ROCHA, A. A. Influência da pressão e temperatura de cura e da adição de NaCl e KCl no comportamento de pastas para cimentação de poços de petróleo. 2015. 211 p. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro, 2015.

ROSSEN, J. E.; LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K. L. Composition of C-S-H in pastes with increasing levels of silica fume addition. Cement and Concrete Research, v. 75, p. 14-22, 2015.

ROSSIGNOLO, J. A. Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos - dosagem, produção, propriedades e microestrutura. 2013, 211 p. Tese (de Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos e Instituto de Química de São Carlos - Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

ROY, D. M.; GOUDA, G. R. High strength generation in cement pastes. *Cement and Concrete Research*, v. 3, p. 807-820, 1973.

ROY, D. M.; GOUDA, G. R.; BOBROWSKY, A. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques. *Cement and Concrete Research*, 2, p. 349-366, 1972.

RUPASINGHE, M. *et al.* Investigation of strength and hydration characteristics in nano-silica incorporated cement paste. *Cement and Concrete Composites*, p. 17-30. 2017.

SALUM, P. D. L. Efeito da elevação de temperatura sobre a resistência à compressão de concretos massa com diferentes teores de cinza volante. 2016. 164 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Florianópolis, 2016.

SIEBEL, E. Reconstruction of concrete roads using recycled sand as aggregate. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONCRETE ROADS*, 8., 1998, Lisbon. *Proceedings*. Lisbon: AIPCR-PIARC, CEMBUREAU, ATIC, Sept. 1990, p. 121-126.

SOTO, N. T. Avaliação das propriedades do concreto de pós reativos: um estudo de durabilidade. 2014. 58 p. Monografia (Especialização em Patologias das Construções) – Universidade Tecnológica do Paraná. Curitiba, 2014.

STARK, J. Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis. *Cement and Concrete Research*, 41, 2011. 666-678.

Schmidt, BIRKLAND, H. W. "Connections in precast concrete construction", *ACI Journal*, v.63, n.3, march 2005, pp.345-368.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. 2ed. London: Thomas Telford, 1999. 459 p.

TORRENTI, J. M.; MATTE, V.; MARET, V.; RICHET, C. High integrity containers for interim storage of nuclear wastes using reactive powder concrete. In: International Symposium of high Strength/high performance concrete, 4, 1996, p. 1407-1413.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra desempenho. In: ISAIA, G. C. Concreto: ciência e tecnologia. 1ed. São Paulo: Ibracon, 2015.

TUTIKIAN, B.F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto de alto e ultra-altodesempenho. In: TUTIKIAN, B.F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. Concreto: ciência e tecnologia. Ibracon, cap. 36, p. 1-44.2011.

VANDERLEI, R. D. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. 2004. 196 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - USP, São Carlos, 2004.

VOO, Y. L., FOSTER, S. J., GILBERT, R. I. Shear strength of fiber reinforced reactive powder concrete prestressed girders without stirrups. Journal of Advanced Concrete Technology, 4(1), 2006, p 123-13.

Yazıcı H, BARADAN. The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures. Build Environ 2013;42:2083–9.

YUNSHENG JIANG. Concrete Mixture Proportioning with Water-Reducing Admixtures to Enhance Durability: a quantitative model. Cement and Concrete Composites, v. 20, n. 2/3, p. 113-119, 2008.

ANEXO

Dados da Figura 27

Consumo (em massa)					
Pastas	1	2	3	4	5
Materiais	Consumo (kg/m ³)				
Cimento	1000	1000	1000	1000	1000
silica	30	50	100	200	300
Po	600	600	600	600	600
Plastificante	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Água	200	200	200	200	200
Total	1830,8	1850,8	1900,8	2000,8	2100,8
a/c	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Consumo (em volume)					
Materiais	Consumo (m ³ /m ³)				
Cimento + pó	0,523	0,565	0,583	0,602	0,613
Plastificante	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Água	0,4	0,4	0,4	0,4	4
Total	0,958	1	1,02	1,037	1,049
a/c+ P	0,7648	0,7	0,68	0,66	0,65
Produção:	0,958				
Materiais	Produção de 1 litro de pasta (kg/1 l)				
Cimento	1000	1000	1000	1000	1000
silica	30	50	100	200	300
Po	600	600	600	600	600
Plastificante	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Água	200	200	200	200	200
Total	1830,8	1850,8	1900,8	2000,8	2100,8
a/c	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
a/s	0,314	0,259	0,244	0,221	0,213
M (kg)	0,84	0,839	0,838	0,835	0,83
V (m ³)	0	0	0	0	0
Vc (m ³)	0	0	0	0	0
u	0,732	0,659	0,644	0,632	0,617
Φ	0,565	0,586	0,625	0,631	0,635