

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS - UNIS-MG

ENGENHARIA CIVIL

ANA FLÁVIA COELHO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS DE PÓS REATIVOS
PRODUZIDOS COM CIMENTOS PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL E
CIMENTO PORTLAND BRANCO ESTRUTURAL**

Varginha/MG

2019

ANA FLÁVIA COELHO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS DE PÓS REATIVOS
PRODUZIDOS COM CIMENTOS PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL E
CIMENTO PORTLAND BRANCO ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro
Universitário do Sul de Minas como parte dos requisitos
para obtenção do título em bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Ivan Francklin Junior

Varginha/MG

2019

ANA FLÁVIA COELHO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DOS CONCRETOS DE PÓS REATIVOS
PRODUZIDOS COM CIMENTOS PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA INICIAL E
CIMENTO PORTLAND BRANCO ESTRUTURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro
Universitário do Sul de Minas como parte dos requisitos
para obtenção do título em bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Ivan Francklin Junior

Aprovado em / /

Prof. Ivan Francklin Junior

Prof. Nome professor

Prof. Nome professor

Dedico este trabalho a minha família, amigos e todos aqueles que contribuíram para sua realização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus colegas, professores e a minha família por terem ajudado na construção deste trabalho.

RESUMO

Com o desenvolvimento industrial, novas tecnologias vem sendo aplicadas no setor da construção civil juntamente com o aprimoramento de novos materiais e métodos construtivos visando cada vez mais o melhor desempenho das estruturas, além do aspecto arquitetônico e estético da construção. O concreto de pós reativos (CPR) apresenta elevada resistência e baixa porosidade, podendo ser considerado um concreto de ultra alto desempenho (CUAD), se atingido resistências à compressão superiores a 150MPa. Devido à ausência de agregados graúdos em sua composição, os vazios internos da mistura são eliminados, tornando-a mais homogênea e resistente. Com a utilização de materiais muito finos em sua composição, o CPR se assemelha a uma argamassa com resistência extremamente elevada, com esse fator é possível a construção de peças mais leves e esbeltas, muitas vezes comparado com as estruturas em aço. Outro fator que deve ser levado em consideração é o aspecto estético das estruturas, onde o cimento branco vem sendo amplamente utilizado nas construções mais modernas e inovadoras. Deste modo, este trabalho tem como objetivo desenvolver um estudo de dosagem do CPR com a utilização do cimento branco estrutural e cimento Portland de alta resistência inicial, afim de colaborar para o desenvolvimento de concretos de alta resistência pra fins arquitetônicos. Nesta pesquisa foram analisados as propriedades de cada material constituinte do CPR incluindo suas características granulométricas e o estudo de empacotamento das partículas, onde posteriormente foi produzido e realizado os ensaios de compressão afim de apresentar uma comparação entre o uso do CPB e o CPV ARI no CPR. Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram que o cimento branco obteve um desempenho 20% maior em relação ao cimento cinza, atingindo resistência à compressão de 99,3 Mpa aos 21 dias. Simultaneamente foi realizado um traço complementar onde foi feita a substituição da sílica ativa pelo CPB afim de garantir o aspecto branco do CPR sustentando sua utilização para fins arquitetônicos, onde foi possível observar uma redução de 26% na resistência do CPR aos 14 dias sem a incorporação da sílica ativa.

Palavras-chave: Concreto de Pós Reativos. Cimento. Cimento Branco. Dosagem. Produção. Resistência.

ABSTRACT

With the industrial development, the new technologies have been applied in the civil construction sector with the improvement of new materials and constructive methods that aim increasingly at the best performance of the structures, as well as the architectural and aesthetic aspect of the construction. The reactive powder concrete (RPC) is produced with low intensity and low porosity, and has been associated with a high performance concrete (HPC), due to the lack of grains in its composition, the internal residues of the mixture are eliminated, more homogeneous and resistant. Using a very fine material in its composition, the RPC resembles a mortar with greater intensity, which can be a construction of lighter and thinner parts, often with the use of steel plates. Another factor that is taken into account is the most modern and innovative constructions. In this way, this work had as objective a study of RPC dosage with the use of the structural physical conditioning and conditioning of high initial moisture resistance, in order to collaborate for the development of concrete with resistance to the architectural fins. In this research, they were analyzed as properties of each material constituted by the RPC, including the particle size characteristics and the section packing study, where it was later produced and performed by experimental tests after showing a comparison between the use of CPB and CPV or CPV ARI in RPC. The results selected in this research show that white cement had a performance 20% higher compared to gray cement, reaching compressive strength of 99.3 Mpa at 21 days. Simultaneously, a complementary procedure was performed, where the active silica was replaced by the CPB, ensuring the white aspect of RPC, maintaining its use for thin architectures, where it was possible a reduction of 26% in RPC resistance up to 14 days without incorporation of active silica.

Keywords: *Reactive Powder Concrete. Cement. White Cement. Dosage. Production. Resistance.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Passarela de Sherbrooke, Canadá	20
Figura 2- Estação de trem de Shawnessy	21
Figura 3 -Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 23°C.	25
Figura 4 - Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 60°C	26
Figura 5 - Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 80°C	26
Figura 6 - Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 100°C	27
Figura 7 -Resistência a compressão em função do tempo de cura térmica.....	27
Figura 8 - Comparação do Método de dosagem tradicional e método de dosagem utilizando o empacotamento	29
Figura 9 - Distribuição granulométrica segundo modelo de Furnas.....	32
Figura 10 - Distribuição granulométrica segundo modelo de Andreassen.	33
Figura 11 - Distribuição granulométrica segundo modelo de Alfred	34
Figura 12 - Relação entre porosidade e resistência a compressão.....	36
Figura 13 - Ciudad de las artes y las ciências, Valência, Espanha.	39
Figura 14 - Igreja Dives in Misericordia, Roma, na Itália.	40
Figura 15 - Ponte Irineu Bornhausen, Brusque, BR	40
Figura 16 -Vista do Museu Iberê Camargo, em Porto Alegre, BR.....	41
Figura 17 - Areia IPT utilizada pra realização do ensaio de compressão	44
Figura 18 - Materiais utilizados para realização do ensaio de compressão no cimento	45
Figura 19 – Argamassa realizada com CBP 40 e CPV ARI	45
Figura 20 - Moldes dos corpos de prova para ensaio de compressão do cimento.....	46
Figura 21- Corpos de prova em câmara úmida adaptada.....	46
Figura 22 - Ensaio de ruptura dos corpos de prova	47
Figura 23 - Frasco de Le Chatelier para ensaio de massa específica.....	48
Figura 24 - Franco de Le Chatelier com cimento e querosene.....	48
Figura 25 - Quartzitos previamente classificados e indústria.....	49
Figura 26 - Inserção das características dos materiais no software EMMA	51
Figura 27 - Determinação do modelo de cálculo e coeficiente de distribuição.....	51
Figura 28 - Determinação dos Materiais no Software EMMA	52
Figura 29 - Curva de Empacotamento EMMA	52
Figura 30 - Separação dos materiais constituintes do CPR.....	53
Figura 31 - Corpos-de-prova moldados com CPR	55
Figura 32 – Projeto 3D dispositivo aplicador de pressão.....	55
Figura 33 - Projeto Pistão AutoCAD	57
Figura 34 - Pistões de Nylon	57
Figura 35 - Dispositivo aplicador de pressão	58
Figura 36 - Aplicação da Pressão	59
Figura 37 - Corpo-de-prova em ensaio de compressão.....	60
Figura 38 – Corpos-de-prova com imperfeições na base.....	61
Figura 39 - Corpos-de-prova retificados	61
Figura 40 - Curva Granulométrica Quartzitos.....	64
Figura 41 - Curva empacotamento do CPR.....	66

Figura 42 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPV ARI aos 7 dias.....	70
Figura 43 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPV ARI aos 14 dias.....	70
Figura 44 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPV ARI aos 21 dias.....	71
Figura 45 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPB 40 aos 7 dias.....	73
Figura 46 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPB 40 aos 14 dias.....	74
Figura 47 -Gráfico força x tempo, traço 1 CPB 40 aos 21 dias.....	74
Figura 48 - Gráfico força x tempo, traço 2 CPV ARI aos 7 dias.....	77
Figura 49 - Gráfico força x tempo, traço 2 CPV ARI aos 14 dias.....	78
Figura 50 - Diferença de tonalidade entre o CPR.....	79
Figura 51 - Gráfico força x tempo, traço 2 CPB aos 7 dias	81
Figura 52 - Gráfico força x tempo, traço 2 CPB aos 14 dias	81
Figura 53- Rompimento corpos-de-prova	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem e massa).	17
Quadro 2 - Propriedades do CPR.....	35
Quadro 3 – Resultado Granulométrico	43
Quadro 4 - Propriedades Físicas e Químicas da Sílica Ativa.....	43

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1- Resistência a Compressão traço 1 com uso do CPV ARI	72
Gráfico 2 - Resistência a Compressão traço 1 com uso do CPB 40	75
Gráfico 3 - Comparação de Resistência do traço 1 do CPR com uso do CPB 40 e CPV ARI	76
Gráfico 4 - Resistência a Compressão traço 2 com uso do CPV ARI	78
Gráfico 5 - Resistência a Compressão traço 2 com uso do CPB 40 e substituição da sílica ativa.....	82
Gráfico 6 - Comparação de Resistência do traço 2 do CPR com uso do CPB 40 e CPV ARI	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação Traços de Referência.....	29
Tabela 2 - Ensaio de Granulometria dos Quartzitos #30	63
Tabela 3 - Ensaio de Granulometria dos Quartzitos #60	63
Tabela 4 - Resistência Compressão o Cimento	64
Tabela 5 - Massa Específica dos Materiais	65
Tabela 6 - Traço obtido através do software EMMA	66
Tabela 7 - Traço 1 CPR.....	67
Tabela 8- Traço 2 CPR.....	68
Tabela 9 – Consumo de material traço 1 CPV ARI.....	68
Tabela 10 - Resultado da resistência à compressão traço 1 com CPV ARI.....	69
Tabela 11 - Consumo de material traço 1 CPB 40	72
Tabela 12 - Resultado da resistência à compressão traço 1 com CPB 40.....	73
Tabela 13 - Consumo de material traço 2 CPV ARI	76
Tabela 14 - Resultado da resistência à compressão traço 2 com CPV ARI.....	77
Tabela 15 - Consumo de material traço 2 CPB 40	80
Tabela 16 - Resultado da resistência à compressão traço 2 com CPB 40.....	80

SUMÁRIO

1.2	Objetivos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Tipos de cimento Portland	16
2.2	Concreto de Ultra Alto Desempenho	18
2.3	Concreto de Pós Reativos	18
2.3.1	Propriedades do CPR	19
2.3.2	Aplicação do CPR.....	20
2.3.3	Materiais utilizados para produção do CPR e suas propriedades	21
2.3.3.1	Cimento	21
2.3.3.2	Areia Fina	22
2.3.3.3	Pó de quartzo	22
2.3.3.4	Sílica Ativa	22
2.3.3.5	Aditivos Superplastificantes.....	23
2.3.3.6	Fibras.....	23
2.3.4	Produção do CPR.....	23
2.3.4.1	Determinação da Relação Água Cimento	24
2.3.4.2	Cura Térmica	24
2.3.4.3	Pressão Confinante:	28
2.3.5	Dosagem.....	28
2.3.6	Método do Empacotamento de Partículas	29
2.3.6.1	Modelo de Furnas	31
2.3.6.2	Modelo de Andreassen.....	32
2.3.6.3	Modelo de Alfred.....	33
2.3.7	Propriedade Mecânica	34
2.3.7.1	Resistência à compressão	35
2.3.8	Homogeneidade da mistura	36
2.3.8.1	Melhoramento da Densidade da Mistura	37
2.3.8.2	Efeito do Tamanho do Agregado.....	38
2.4	Cimento Portland Branco:	38
2.4.1	Aplicação.....	39
2.4.2	Propriedades do CPB	41
3	MATERIAIS DE MÉTODOS	42
3.1	Escolha dos materiais constituintes do CPR	42

3.1.1	Cimento Portland.....	42
3.1.2	Quartzito.....	42
3.1.3	Sílica Ativa:.....	43
3.1.4	Aditivo	43
3.2	Ensaio para caracterização dos materiais	44
3.2.1	Ensaio de Resistência à Compressão do Cimento	44
3.2.2	Massa específica	47
3.2.3	Composição granulométrica quartzito	49
3.4	Estudo de dosagem dos CPR	50
3.5	Produção do CPR.....	53
3.5.1	Procedimento de mistura dos materiais	53
3.5.2	Aplicação de pressão confinante	55
3.5.3	Cura.....	59
3.6	Ensaio de resistência a compressão	60
4	RESULTADOS E DICUSSÕES	62
4.1	Primeira Etapa.....	62
4.1.1	Ensaio de composição granulométrica.....	62
4.1.2	Ensaio de Resistência à Compressão do cimento	64
4.1.3	Ensaio de Massa específica	65
4.1.4	Traço obtido pelo software.....	65
4.2	Segunda Etapa	68
4.3	Terceira Etapa	76
5	CONCLUSÃO	84
5.1	Sugestão para trabalhos futuros:	85
	REFERÊNCIAS:	86

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material construtivo extensamente utilizado, principalmente em conjunto com o aço, sendo o segundo recurso mais empregado em todo o mundo, fazendo-se inferior apenas ao consumo de água. Sua grande utilização na construção civil se dá pela abundância dos materiais que o constituem na natureza, a praticidade que pode ser moldado em qualquer forma, facilidade de aplicação e seu custo benefício.

Porém, na construção civil, estruturas em concreto são cada vez mais exigidas e muitas vezes os concretos convencionais (CC) não são capazes de suportar e atender aos requisitos estruturais solicitados. Com isso, novos concretos começaram a ser desenvolvidos, a fim de suprir as necessidades construtivas, evoluindo com novas classes de concreto, como os chamados Concreto de Alta Resistência (CAR), Concreto de Alto Desempenho (CAD) e os Concretos de Ultra Alto Desempenho (CUAD). Essa nova classe de concretos busca utilizar em sua composição minerais selecionados, aditivos e fibras que melhoram a trabalhabilidade e a ductilidade, afim de ampliar as propriedades do material, gerando concretos com maior resistência mecânica e durabilidade, se comparado aos concretos convencionais.

O CUAD, foi desenvolvido a partir dos CAD, no qual se deu origem ao Concreto de Pós Reativo (CPR), desenvolvido por meio de pesquisas realizadas na França por Pierre Richards, considerado inventor desse tipo de concreto.

O princípio de CPR é a utilização de materiais finos, sem adição de agregado graúdo, constituído apenas por partículas de tamanho inferior a 2mm, de onde vem seu nome - concreto de pós reativos, tendo a aparência de uma argamassa e não de um concreto convencional. O CPR é composto basicamente por agregado miúdo, pó de quartzo, cimento Portland, sílica ativa, aditivos superplastificantes e uma relação água/cimento (a/c) baixa, podendo ainda, ser adicionado microfibras, proporcionando ganhos de resistência a tração e flexão. Além disso, a adição de cinza volante e escórias de alto forno podem ser uma alternativa para diminuir o consumo de cimento.

Na construção civil, além das preocupações com resistência e durabilidade do concreto, o cuidado com o aspecto arquitetônico faz com que novas tecnologias sejam desenvolvidas, como a utilização do Cimento Portland Branco (CPB) para fins estruturais por exemplo. O CPB se diferencia por sua coloração e pode ser classificado em estrutural e não estrutural, possuindo resistências similares as do cimento convencional. Sua cor branca é obtida através de materiais

com baixo teor de óxido de ferro e manganês, além de condições especiais durante sua fabricação, principalmente em relação ao resfriamento e moagem do material

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um estudo sobre o CPR (concreto de pós reativos), realizando uma análise comparativa entre um CPR com uso do CPV-ARI um CPR de cor branca (produzido com CPB e agregados de cor branca).

Como objetivos específicos, citam-se:

- Selecionar agregados de quartzitos de cor branca para produção do CPR com CPB;
- Desenvolver estudos para caracterização dos matérias constituintes do CPR;
- Desenvolver um estudo de dosagem utilizando modelos numéricos de empacotamento com auxílio do software EMMA;
- Obter o traço final pra produção do CPR;
- Produzir o CPR em laboratório;
- Realizar ensaios de compressão nos dois tipos de cimentos;
- Desenvolver um estudo comparativo da viabilidade dos cimentos em estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tipos de cimento Portland

No Brasil, estudos para a fabricação do cimento Portland foram feitos aparentemente, em 1888, quando o comendador Antônio Proost Rodovalho empenhou-se em instalar uma fábrica em sua propriedade, fazenda Santo Antônio, situada em Sorocaba-SP. Várias iniciativas de fabricação de cimento Portland foram desenvolvidas nessa época, por exemplo, em 1892, por iniciativa do engenheiro Louis Felipe Alves de Nóbrega, uma pequena instalação produtora na ilha de Tiriri, na Paraíba. No entanto, o empreendimento não obteve sucesso devido a distância dos centros consumidores e a pequena escala de produção, que não conseguia competitividade com os cimentos importados da época. (PEREIRA, KLOSTER, et al., 2013)

Ainda segundo Pereira et al. (2013), o cimento Portland é composto basicamente pelo clínquer, que é uma mistura de calcário e argila, trazidos geralmente de jazidas próximas a fábrica do cimento. O clínquer tem como função principal dar a resistência mecânica que o material precisa.

As matérias primas utilizadas na fabricação de cimento devem conter Cálcio (Ca), Silício (Si), Alumínio (Al) e Ferro (Fe), pois são estes os elementos químicos que, combinados, vão produzir compostos hidráulicos ativos. (ROBERTO, 2001)

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP, 2002), existem no Brasil vários tipos de cimento Portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil são:

- Cimento Portland comum;
- Cimento Portland composto;
- Cimento Portland de alto-forno;
- Cimento Portland pozolânico.

Ainda segundo a ABCP (2002) em menor escala são consumidos, seja pela menor oferta, seja pelas características especiais de aplicação os seguintes tipos de cimento:

- Cimento Portland de alta resistência inicial;

- Cimento Portland resistente aos sulfatos;
- Cimento Portland branco;
- Cimento Portland de baixo calor de hidratação;
- Cimento para poços petrolíferos.

No Quadro 1 pode ser observado a composição dos cimentos citados acima:

Quadro 1 - Limites de composição do cimento Portland (porcentagem e massa).

Designação normalizada	Sigla	Classe de Resistência	Clínquer + sulfato de cálcio	Escória Granulada de alto-forno	Material Pozolânico	Material Carbonático	
Cimento Portland Comum	CP I	25 -32 OU 40	95 - 100	0-5			
	CP I-S		90-94	0	0	6-10	
Cimento Portland Comum com escória granulada de alto-forno	CP II-E		51-94	51-94	0	0-15	
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z		71-94	0	6-14	0-15	
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F		75-89	0	0	11-25	
Cimento Portland de alto forno	CP III		25-65	35-75	0	0-10	
Cimento Portland pozolânico	CP IV		45-85	0	15-50	0-10	
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	ARI	90-100	0	0	0-10	
Cimento Portland Branco	Estrutura I	CPB	25-32 OU 40	75-100	-	-	0-25
	Não estrutura I		-	50-74	-	-	26-50

Fonte: adaptado ABNT (2002)

2.2 Concreto de Ultra Alto Desempenho

Concretos de alto desempenho podem ser obtidos com baixas relações água/cimento (a/c), uso de aditivos e adições, elevados teores de cimento, incorporação híbrida de fibras, gerando um material de elevada densidade com baixíssima porosidade, similar a uma rocha, dando origem a um material praticamente sem defeitos internos e com elevada resistência mecânica. (CHRIST, 2014)

O CUAD é dividido em três classes, sendo o CPR o material que tem sido mais estudado e utilizado entre eles por apresentar conceitos inovadores. As primeiras classes de CUAD que surgiram foram o DSP (Densified with Small Particles ou Densificado com Partículas Pequenas) e o MDF (Macro Defect Free ou Livre de Macros Defeitos). (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011)

Segundo Aitcin (2000 apud TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011) e Biz (2001), nos anos de 1972 e 1973, foi desenvolvido um novo tipo de concreto que poderia atingir resistência à compressão de até 200MPa chamado DSP, contendo elevada porcentagem de sílica ativa e superplastificantes, incorporando o agregado com alta resistência e pequeno diâmetro. Depois Birchall et al. desenvolveram um concreto similar que atingiria resistência um pouco superior, denominado MDF, obtidos pela adição de polímeros especiais e cimento aluminoso, apresentando alta resistência a flexão. É importante ressaltar que o procedimento para obtenção do DSP, MDF e do CPR é similar, devendo ser utilizadas partículas finas, consumo elevado de adições minerais e de aditivos superplastificantes, para conseguir a menor relação a/c possível, em torno de 0,10 a 0,20, em massa.

2.3 Concreto de Pós Reativos

O CPR é uma mistura que não possui agregado graúdo em sua composição, assim, os vazios internos da estrutura são eliminados, aumentando a resistência e a homogeneidade do concreto. Constituído de materiais finos com dimensões de partículas máximas de 2mm e um fator a/c muito baixo, em torno de 0,10 a 0,20. A adição de fibras metálicas pode melhorar a resistência à tração e compressão e auxiliar na diminuição de fissuras. (PICCININI e MACHADO, 2018)

2.3.1 Propriedades do CPR

Com base em Vanderlei e Giongo (2006), para obtenção do CPR é importante seguir os seguintes princípios:

- Melhora da homogeneidade pela eliminação dos agregados graúdos;
- Melhora da densidade pela otimização da distribuição granulométrica dos grãos e/ou aplicação de pressão antes e durante o endurecimento;
- Fortalecimento da microestrutura utilizando tratamento térmico;
- Aumento da ductilidade pela incorporação de fibras de aço.

O princípio básico do CPR é eliminar os inconvenientes dos agregados graúdos como as falhas em sua microestrutura, a possível oclusão ou vazios internos e aumento da superfície do esqueleto granular. Pelo efeito da maior superfície específica, a distribuição das carga sobre os grãos é mais homogênea, reduzindo a concentração de tensões em eventuais falhas da microestrutura, aumentando assim a resistência do material. Visto que, quanto menor a dimensão dos agregados, maior é a superfície específica, a reatividade química e mais elevada a homogeneidade do material, fazendo com que os grãos não fiquem em contato uns com outros, evitando tensões de contato e possíveis falhas local. (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011)

Seus agregados ultrafinos garantem ao CPR em estado fresco uma consistência semelhante a da argamassa, mais fluida e homogênea que o concreto. Após a cura, o material torna-se extremamente compacto, e praticamente impermeável a umidade e a substancias nocivas, conseqüentemente ele é mais durável e resistente se comparado a outros tipos de concreto. A ductilidade se dá pela junção de fibras, que proporcionam a ele uma alta capacidade de deformação a tração, comparável à do ferro fundido (de 1% a 2%), tornando o uso de armadura, muitas vezes desnecessário. Além disso sua baixa relação água/cimento (em torno de 0,10 e 0,2), devido a adição superplastificantes, elimina os espaços vazios para ocorrência de variação volumétrica e torna o produto pouco poroso. (BIZ, 2001)

2.3.2 Aplicação do CPR

Segundo Vanderlei (2004), o CPR possui uma utilização bastante interessante na construção civil e é aplicado principalmente em estruturas espaciais leves, passarelas, tabuleiros de pontes, vigas, colunas, pré-fabricados de túneis ou placas de revestimentos de fachadas.

Com o melhor conhecimento das propriedades desse material, é possível executar peças cada vez mais leves, com menores dimensões e com maior durabilidade. Estruturas em que é aplicada essa tecnologia mostram a viabilidade técnica e muitas vezes econômica do CPR. (CHRIST, 2014)

Uma das primeiras e mais famosas aplicações do CPR, é a Passarela de Sherbrooke, apresentada na Figura 1, construída em 1998 no Canadá com 56m de vão.

Figura 1- Passarela de Sherbrooke, Canadá



Fonte: Revista Ciência e Tecnologia, 2006.

Outra construção utilizando o CPR é a estação de trem de Shawnessy, também no Canadá (Figura 02), onde foram construídas cascas côncavas sem a presença de armadura principal.

Figura 2- Estação de trem de Shawnessy



Fonte: Revista Ciência e Tecnologia, 2006.

2.3.3 Materiais utilizados para produção do CPR e suas propriedades

E de grande importância para o desempenho final do CPR a dosagem e a seleção dos materiais que o constituem. A produção do CPR deve ser feita preferencialmente com materiais convencionais já utilizados na construção civil, encontrados facilmente em toda região do país, com exceção das fibras metálicas, que são importadas. Convencionalmente são utilizados cimento, areia fina, pó de quartzo, sílica ativa, aditivos superplastificantes e fibras. (FÁVERO, 2016)

2.3.3.1 Cimento

De acordo com Tutikian, Isaia e Helene (2011), para a escolha do cimento, procuram-se tipos mais puros possíveis, como o CP I no Brasil, porém este tipo não é mais comercializado. A alternativa mais próxima é o CP V ARI, apesar de ser um material de finura elevada, o que necessita de uma relação água/cimento maior. Por esse motivo, deve ser feita uma análise mais detalhada das vantagens e desvantagens de cada tipo de cimento. Pode-se também considerar cimentos não tão puros e nem tão finos, como o CP II. Ainda é aconselhável a utilização de cimento com baixa quantidade de aluminato tricálcico hidratado (C_3A), componente que libera calor de hidratação de forma rápida, sendo prejudicial às propriedades do concreto com alto

consumo de cimento, como é o caso do CPR. Fehling et al 2004 apud Viapiana (2016), citam que o consumo de cimento no CPR varia entre 700Kg/m³ a 800kg/m³.

2.3.3.2 Areia Fina

Para a seleção da areia é importante se atentar para sua composição mineral, diâmetro médio das partículas, composição granulométrica, forma dos grãos e dosagem. A distribuição granulométrica deve estar preferencialmente entre 600 µm e 150 µm, optando por partículas com diâmetro médio de 250 µm e não conter material orgânico aglutinado aos grãos. Já na composição mineral da areia é mais utilizado o quartzo, por se tratar de um material mais duro e grãos mais esféricos, o que possibilita uma boa distribuição da mistura e uma ótima interface pasta/agregado. (CHRIST 2014; REGINATO 2016; RICHARD e CHEYREZY, 1995; VANDERLEI, 2004)

2.3.3.3 Pó de quartzo

O agregado de quartzo é muito utilizado devido as propriedades superiores da rocha mãe - considerado uma rocha de elevada dureza e resistência à compressão superior a maioria dos materiais utilizados para britagem. Para a produção é aconselhável a utilização de diâmetros máximos entre 5 µm a 25µm. O pó é adicionado a pasta para contribuir para o fechamento do pacote granulométrico, afim de preencher os vazios deixados pelos grãos de areia e intensificar as reações pozolânicas quando utilizado o tratamento térmico. O calor ativa novas reações pozolânicas, consumindo o hidróxido de cálcio (CaOH₂) gerado na hidratação do cimento e produzindo silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em maior quantidade. Essas reações provocam uma melhora na resistência da pasta e da zona de transição. (BIZ, 2001; TUTIKIAN, ISAIA, HELENE, 2011)

2.3.3.4 Sílica Ativa

A sílica ativa comercializada é extremamente fina com superfície específica muito elevada se comparada ao cimento, na ordem de 15000 a 20000m²/kg contra os 300 a 900m²/kg o cimento. Sua finura se torna altamente reativa provocando um significativo refinamento de

poro e a uma melhora importante na redução das microfissuras da zona de transição. (MACIEL, 2001)

Tutikian, Isaia e Helene (2001) recomendam a utilização de grandes quantidades de sílica, com um percentual próximo aos 25% de substituição do cimento, onde nessas proporções não há mais hidróxido de cálcio (das reações pozolânicas) para ser consumido, no entanto a sílica atua como micro fíler para preencher os pequenos vazios na zona de transição entre os agregados.

2.3.3.5 Aditivos Superplastificantes

De acordo com Fávero (2016) os aditivos superplastificantes são extremamente importantes para garantir a boa trabalhabilidade do CPR e permitir a adequada mistura da pasta com um baixo teor de água. Normalmente são utilizados os policarboxilatos e os éter-policarboxilatos, superplastificantes da terceira geração em teores que podem superar os 4%, sabendo que são altamente eficientes. Vanderlei (2004) recomenda a utilização de superplastificantes com de taxas de 1,5% a 2,0% do consumo de cimento, no entanto em seu estudo foi adicionado 3% do consumo total de cimento ao CPR.

2.3.3.6 Fibras

Christ (2014) explica que a incorporação das fibras faz com que o material tenha maior ductilidade e melhor capacidade de resistir a grandes deformações, visto que o CPR sem a adições de fibras é um material com elevada resistência mecânica, porém mais frágil e com uma menor resistência a tração. Sua incorporação faz com que essa fragilidade seja eliminada, pois atuam para que as fissuras não sejam prolongadas.

2.3.4 Produção do CPR

O CPR requer maiores cuidados em sua produção se comparados aos concretos convencionais, sendo de extrema importância uma execução cuidadosa, devido a sensibilidade e importância de cada material a ser adicionado a mistura (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011)

Ainda segundo Tutikian, Isaia e Helene (2011) e Vanderlei (2004), a primeira etapa é fundamental para a preservação das propriedades finais do material e consiste na mistura da matéria-prima. O tempo de mistura deve ser cuidadosamente observado para se garantir a qualidade constante do compósito. Visto que, o tempo de mistura para o CPR é maior que o concreto convencional, devido a ausência de agregados graúdo, que auxiliam na mescla e na dispersão dos componentes finos, sendo substituído pelo uso de misturador forçado. Sendo assim, a produção do CPR em caminhão betoneira torna-se inconveniente, já que a homogeneização neste tipo de misturador requer um tempo maior de rotação ou pré-mistura do material seco. Assim, atualmente a produção do CPR é feita preferencialmente em indústrias de pré-fabricados, que utilizam centrais dosadoras de concreto e possibilitam a criação de áreas para cura em altas temperaturas e equipamento para aplicação de pressão confinante.

Segundo Vanderlei (2004), para a produção do CPR deve-se primeiramente homogeneizar todos os materiais secos, fluidificar a pasta com água e aditivos químicos (dosados com grande precisão para obter uma baixa relação a/c), adicionar as fibras na pasta fluida, moldar as peças e seguir para a etapa de pós mistura (cura térmica e pressão confinante).

2.3.4.1 Determinação da Relação Água Cimento

A determinação da relação água/cimento é de extrema importância para as propriedades do CPR, principalmente durante a pega e endurecimento inicial do concreto. O cimento é bem mais reativo a água que os outros materiais constituintes da mistura e acaba impactando de forma negativa na resistência inicial do concreto e na sua permeabilidade no estado endurecido, que são fatores influenciados pelas ligações criadas durante a hidratação inicial do cimento. (CASTRO, 2007)

Autores como Castro (2007), Formagini (2005), Vanderlei (2004) e Reginato (2011) aconselham a utilização do fator a/c entre 0,16 e 0,20.

2.3.4.2 Cura Térmica

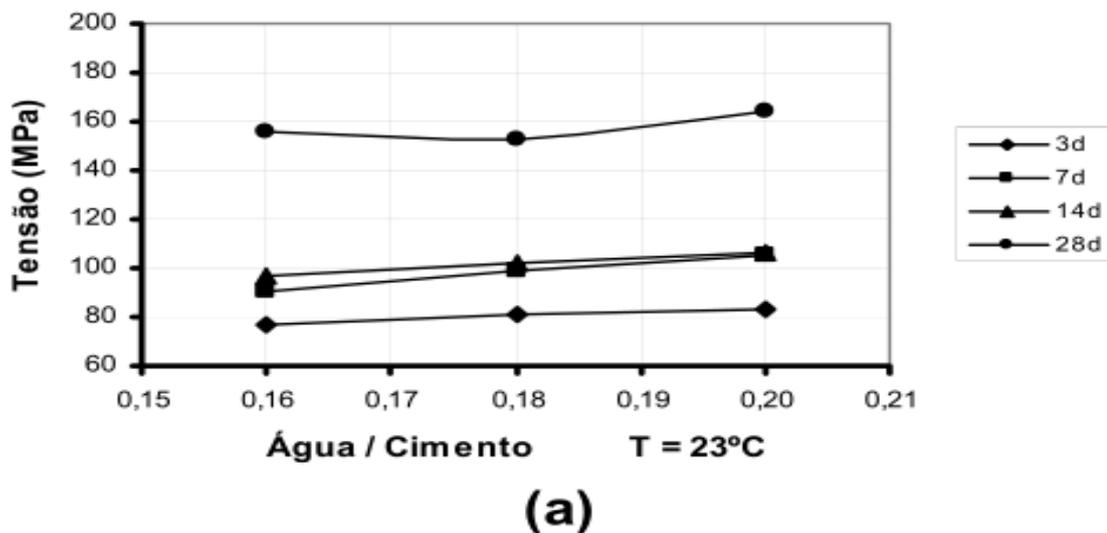
A hidratação do cimento faz com que ocorra a liberação de calor, desenvolvendo assim, reações exotérmicas – reação onde a energia é transferida de um meio interior para um meio exterior. Portanto o concreto no estado fresco produz calor durante a pega e endurecimento. A quantidade de calor gerado é proporcional a quantidade de cimento adicionado a mistura,

quanto maior a quantidade de partículas de cimento hidratado maior será o calor de hidratação e a liberação deste calor será mais rápida, o que podem gerar defeitos no CPR, devido ao seu elevado consumo de cimento. (CHRIST, 2014; VANDERLEI, 2004;)

O tratamento térmico em CPR é utilizado para favorecer as reações pozolânicas e melhorar a microestrutura granular da matriz por meio da melhor cristalização dos grão hidratados, o que tem grande influência na resistência à compressão e no módulo de elasticidade, visto que, ele auxilia em menor tempo, na obtenção de uma microestrutura mais densa, induzindo ao crescimento de cristais na matriz. Além disso há a diminuição da permeabilidade, redução satisfatória de problemas de retração por secagem e aumento na resistência à abrasão. (FÁVERO, 2016)

De acordo com ensaios realizados por Vanderlei e Giongo (2006), pode-se verificar que conforme a temperatura e cura era ampliada a resistência a compressão, desde as primeiras idades acelerava significativamente, independente da relação a/c (variando ente 0,16 e 0,20). Podendo ser observado nas Figuras 3, 4, 5 e 6.

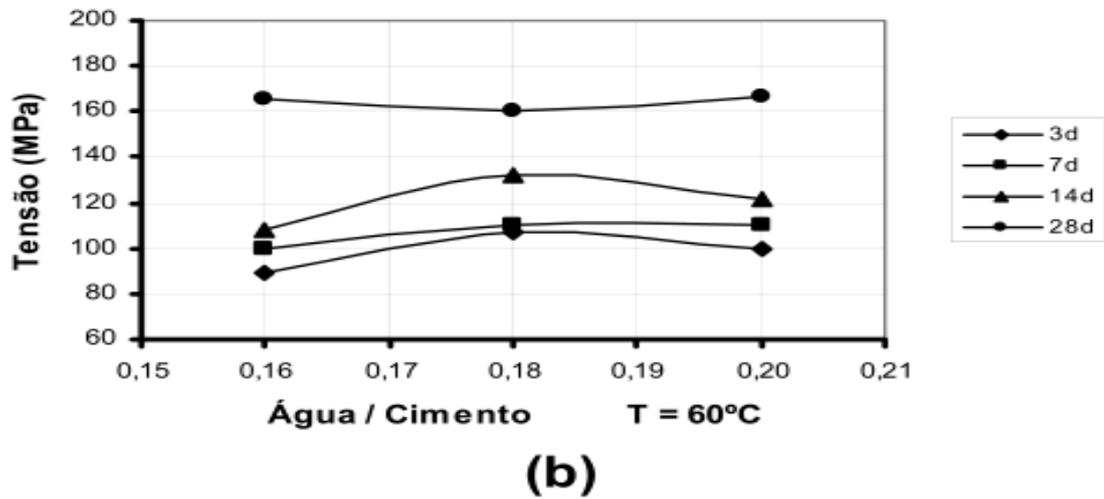
Figura 3 -Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 23°C.



(VANDERLEI e GIONGO,2006)

Na Figura 4 são apresentados os valores obtidos por Vanderlei e Giongo (2006) em corpos de prova submetidos a Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 60°C.

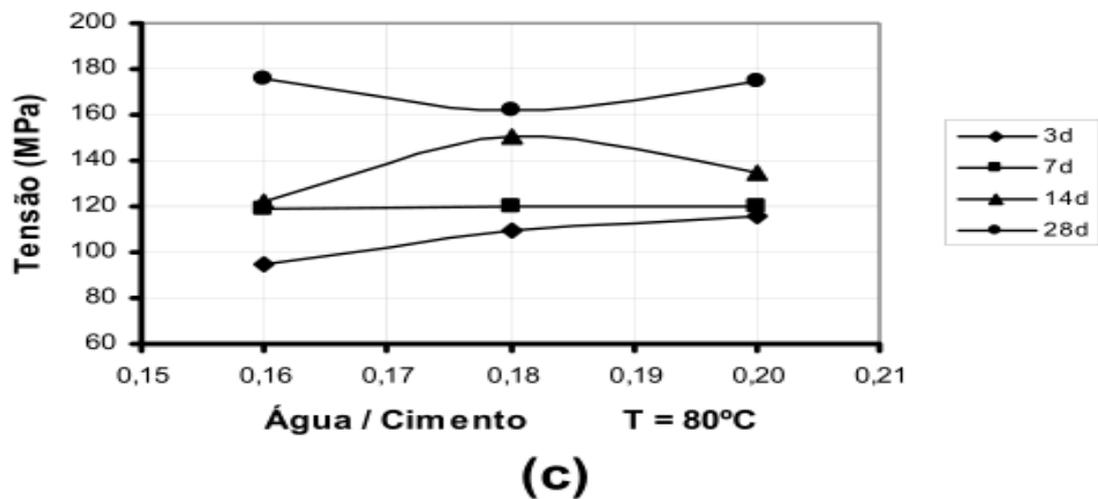
Figura 4 - Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 60°C



(VANDERLEI e GIONGO,2006)

Na Figura 5 são apresentados os valores obtidos por Vanderlei e Giongo (2006) em corpos de prova submetidos a Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 80°C.

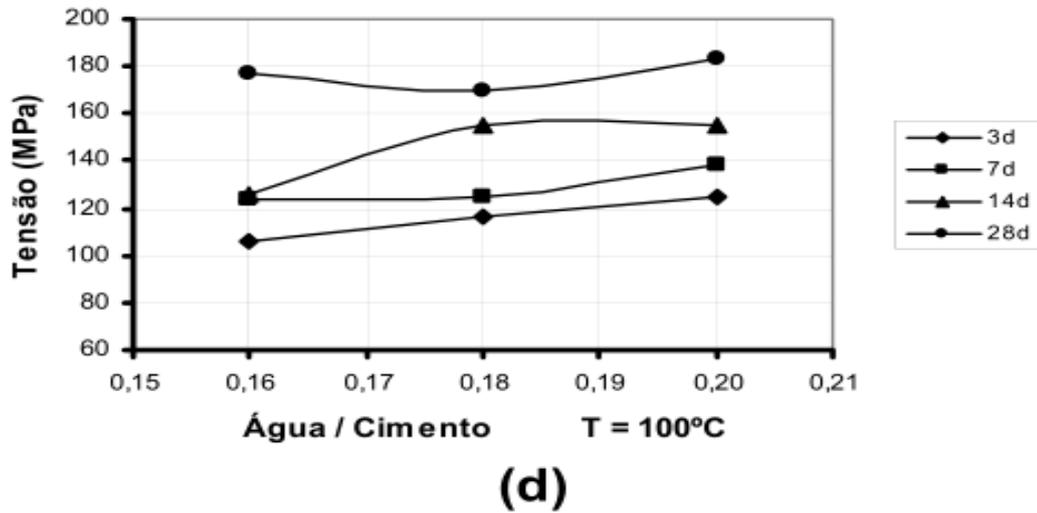
Figura 5 - Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 80°C



(VANDERLEI e GIONGO,2006)

Na Figura 6 são apresentados os valores obtidos por Vanderlei e Giongo (2006) em corpos de prova submetidos a Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 100°C.

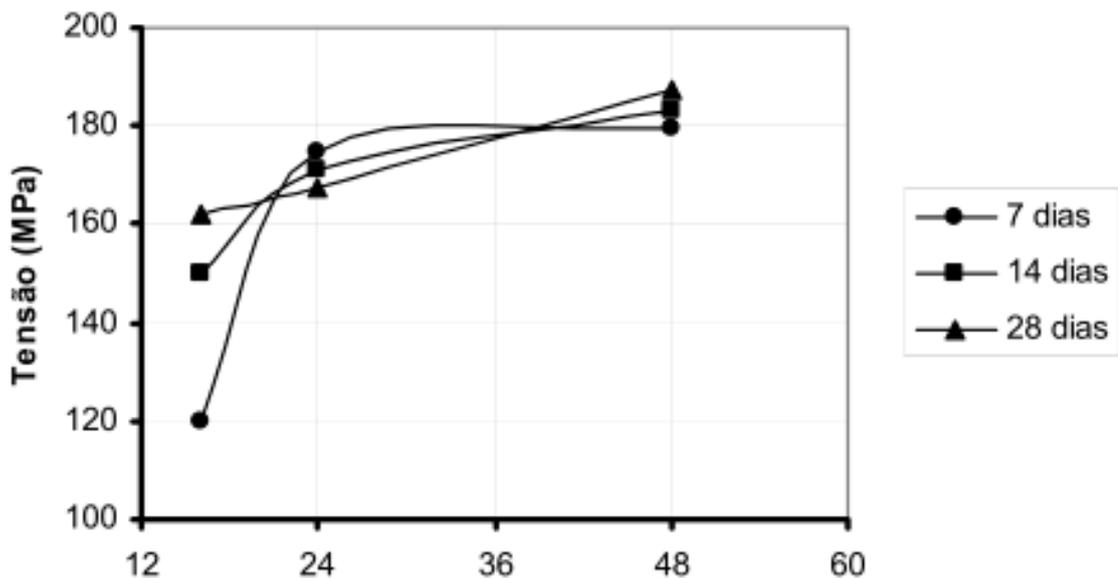
Figura 6 - Resistência à compressão com temperatura de cura térmica de 100°C



(VANDERLEI e GIONGO,2006)

O tempo de cura também é um fator a ser observado e pode ser analisado de acordo com estudos de Vanderlei e Giongo (2006). Com os ensaios realizados é possível verificar que para os concretos de pouca idade a influência do tempo de cura foi maior, obtendo um crescimento de 50% na resistência a compressão entre 16 e 48 horas, para concretos com 7 dias de idade. Já os concretos com 28 dias obtiveram um aumento de 15% na resistência à compressão, confirmando que a maior influência no tempo de cura é obtida nas primeiras idades. Esse fator pode ser observado conforme Figura 7.

Figura 7 -Resistência a compressão em função do tempo de cura térmica



(VANDERLEI e GIONGO,2006)

2.3.4.3 Pressão Confinante:

A aplicação de pressão confinante força uma diminuição do ar aprisionado e, dependendo da forma utilizada e se aplicado por alguns minutos, tende a remover o excesso de água sem permitir a passagem das partículas finas do concreto, aumentando a densidade relativa do CPR. Além disso pode haver a diminuição da porosidade causada pela retração química, se a pressão for mantida durante o endurecimento do concreto. Sua aplicação pode proporcionar uma melhor impermeabilidade, sendo de extrema importância para garantir a durabilidade do material. (CHRIST, 2014; MALLMANN, 2013)

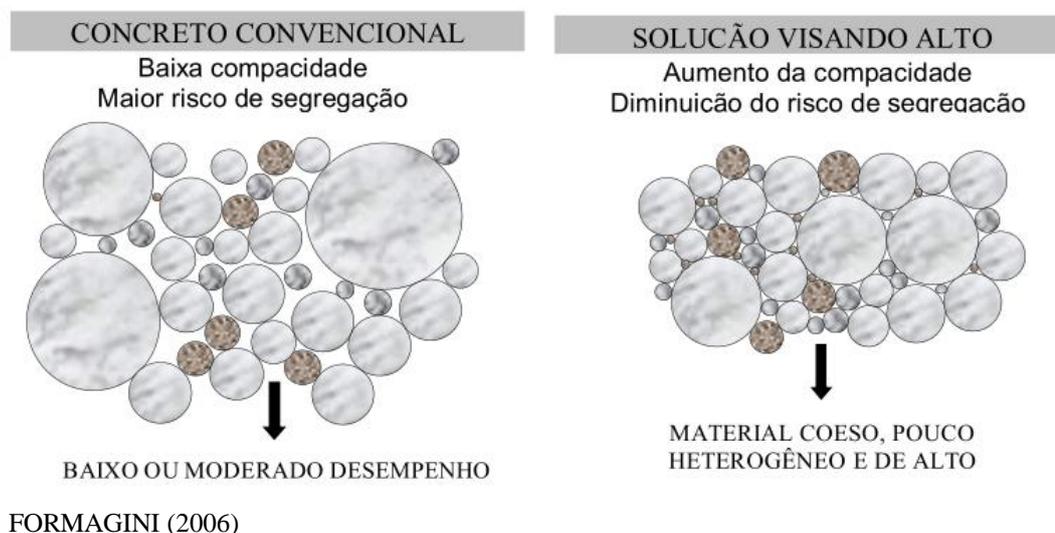
Ainda segundo Mallamann (2013), com todos os benefícios já citados com a aplicação da pressão confinante, é possível observar o aumento significativo na resistência a compressão, já a resistência a tração não possui aumento relevante.

2.3.5 Dosagem

Uma adequada dosagem dos materiais constituintes do CPR, com partículas de pequeno diâmetro, variando de 2mm a 0,5 μ m, proporcionam um compósito com o mínimo de defeitos, criando uma mistura de elevada densidade, baixa porosidade, melhor ductilidade – através da adição de fibras, boa homogeneidade e melhoramento da microestrutura – e aumento da compacidade. Esses parâmetros proporcionam ao concreto valores elevados na resistência a compressão. (VANDERLEI, 2004)

No entanto, as dosagens de concreto têm sido realizadas através de modelos empíricos, utilizando métodos convencionais em função do abatimento e da resistência à compressão obtida aos 28 dias. Os métodos existentes na literatura são limitados ao uso de poucos materiais e não possuem critérios para que se obtenha um CPR de boa qualidade. Sendo então necessário a utilização do método de empacotamento, uma ferramenta de dosagem que proporciona a seleção e otimização dos constituintes do concreto, aumentando a compacidade da mistura e diminuindo o risco de segregação, promovendo o melhor desempenho da matriz, obtendo um material mais coeso e com baixa porosidade. (FORMAGINI, 2006). Conforme pode ser analisado na Figura 8.

Figura 8 - Comparação do Método de dosagem tradicional e método de dosagem utilizando o empacotamento



A Tabela 1 apresenta uma comparação entre dosagem em traço, obtida por diversos autores e sua respectiva resistência adquirida aos 28 dias.

Tabela 1 - Comparação Traços de Referência

Autor:	FÁVERO	VANDERLEI	MALLMANN	BIZ
Cimento	1	1	1	1
Sílica ativa	0,15	0,246	0,25	0,320
Pó de quartzo	0,235	0,235	1,35	0,300
Areia	1,101	1,101	-	1,430
Superplastificante	0,03	0,030	0,043	0,010
Resistência Compressão 28 dias (Mpa)	65,89	190,7	241,42	108,500

Fonte: (adaptado de BIZ, 2001; FÁVERO, 2016; MALLMANN, 2013; VANDERLEI, 2004)

2.3.6 Método do Empacotamento de Partículas

O máximo empacotamento das partículas é um dos princípios básicos do CPR, tendo como objetivo alcançar um material com o menor volume possível de espaços vazios, obtendo uma estrutura densa e uma mistura compacta. Sendo assim, o empacotamento consiste na seleção do tamanho adequado das partículas, tendo a eliminação dos materiais maiores dentro da matriz como o primeiro passo. (FÁVERO, 2016)

O perfeito empacotamento se dá pela correta proporção e tamanho adequado dos agregados constituintes da mistura, formando uma distribuição granulométrica mais homogênea possível. (PANDOLFELLI, OLIVEIRA, *et al.*, 2000)

De acordo Vanderlei (2004), para alcançar o perfeito empacotamento deve-se obter uma matriz com 100% de densidade, ou seja, teoricamente não se utilizaria água na mistura. No entanto, há uma contradição entre a combinação do perfeito empacotamento e a boa trabalhabilidade, já que a trabalhabilidade da mistura está diretamente ligada à sua fluidez, que consiste no efeito das partículas se moverem separadas por um líquido que atua como lubrificante, tornando o empacotamento perfeito contraditório à trabalhabilidade. Logo, o aumento da densidade e a diminuição de água é o principal problema enfrentado no desenvolvimento tecnológico dos materiais a base de cimento.

Para Reginato (2011) o empacotamento das partículas divide-se em dois grupos, sendo o empacotamento real e teórico de partículas. O empacotamento real consiste em uma fração granulométrica menor que ocupe os vazios deixados pela fração granulométrica maior, no entanto esse tipo de empacotamento é aconselhável para partículas de até 2 mm. O empacotamento teórico é utilizado para partículas com granulometrias menores, inferiores a 1 mm, já que com partículas muito pequenas torna-se impraticável a utilização do empacotamento real.

Castro e Pandolfelli (2009) relatam que, no ano de 1892 Féret publicou o primeiro modelo de empacotamento de partículas em concreto, que segundo a equação apresentada a máxima resistência é obtida quando a porosidade inicial da matriz é mínima, ou seja, a densidade de empacotamento é máxima. Desde então, são propostos alguns modelos de empacotamento como ferramenta para calcular a densidade de empacotamento, otimizando as misturas granulares do concreto.

Dentre os modelos conhecidos, pode-se citar os que são frequentemente utilizados na formulação de refratários, dentro da indústria de cerâmicos: o modelo de Furnas, modelo de Andreassen e o modelo de Alfred. (FÁVERO, 2016). De acordo com Vanderlei (2004), Castro e Pandolfelli (2009), como o CPR é um material de granulometria muito fina e bastante compacta, se assemelhando muito aos compósitos cerâmicos, recomenda-se a utilização destes modelos de empacotamento para dosagem do CPR.

2.3.6.1 Modelo de Furnas

O modelo de Furnas trata-se de um método de abordagem discreto, ou seja, define a distribuição granulométrica entre malhas sucessivas de peneiras individualmente. Furnas mostrou que as proporções de diversas granulometrias presentes na mistura seguem uma projeção geométrica e dessa forma confirmou sua teoria para uma distribuição contínua com diâmetros de partículas infinitamente pequenas. (BITTENCOURT, 2008) Desenvolvendo a seguinte equação:

$$CPFT = \left(\frac{Dp^{\log.r} - Ds^{\log.r}}{Dl^{\log.r} - Ds^{\log.r}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

CPFT: porcentagem de partículas acumuladas menores que D_p ;

D_p : diâmetro da partícula em questão (mm);

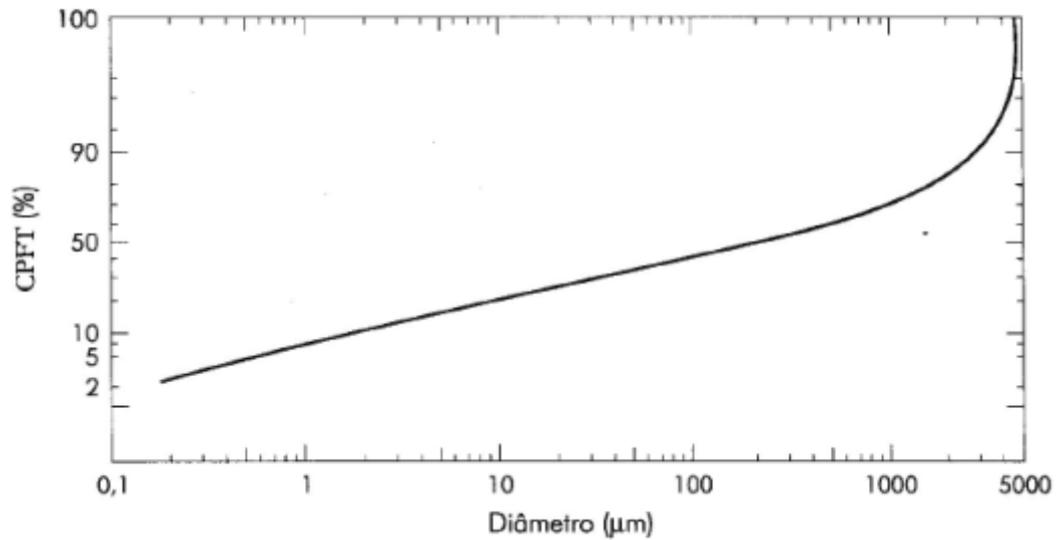
D_s : diâmetro da menor partícula (mm);

D_l : diâmetro da maior partícula (mm)

r : razão entre o volume das partículas retidas em uma malha de peneira e o volume na malha imediatamente inferior.

A Figura 9 apresenta a distribuição granulométrica para a máxima densidade de empacotamento possível segundo Furnas.

Figura 9 - Distribuição granulométrica segundo modelo de Furnas.



(FÁVERO, 2016)

2.3.6.2 Modelo de Andreassen

O modelo de Andreassen em uma distribuição real, considera todos os tamanhos de partículas, ou seja, trabalha em uma distribuição contínua. Em seu estudo definiu a distribuição de tamanhos de partícula em uma lei de potências. Essa definição partiu de uma consideração de similaridade que ele avaliou existir em torno de duas partículas com tamanhos muito diferentes. (BITTENCOURT, 2008)

Seu estudo deu origem a seguinte equação:

$$CPFT = \left(\frac{Dp}{Dl} \right)^q \times 100 \quad (2)$$

Onde:

CPFT: porcentagem de partículas acumuladas menores que Dp ;

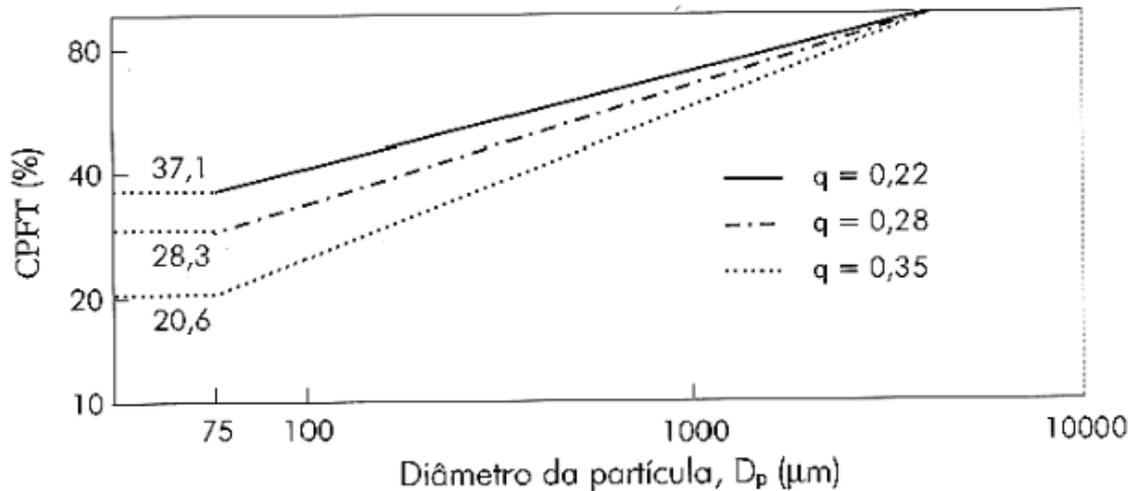
Dp : diâmetro da partícula em questão (mm);

Dl : diâmetro da maior partícula (mm);

q : módulo ou coeficiente de distribuição.

A Figura 10 apresenta a distribuição granulométrica para a máxima densidade de empacotamento possível segundo Andreassen:

Figura 10 - Distribuição granulométrica segundo modelo de Andreassen.



(FÁVERO, 2016)

2.3.6.3 Modelo de Alfred

O modelo de Alfred também conhecido como Andreassen Modificado, desenvolvido pelos pesquisadores Dinger e Funk trata-se de um aperfeiçoamento matemático dos modelos de Furnas e Andreassen, e mostra que ambos podem ser visualizados por formas distintas de se expressar a mesma coisa. Ficando comprovado que os modelos convergem matematicamente para uma mesma equação. Os autores incorporaram na equação o menor tamanho das partículas, o que pode minimizar desvios significativos no empacotamento em consideração aos outros modelos apresentados. (CHRIST, 2014; FÁVERO, 2016; VANDERLEI, 2004)

A equação desenvolvida por Dinger e Funk é apresentada a seguir:

$$CPFT = \left(\frac{D^q - D_s^q}{D_l^q - D_s^q} \right) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

CPFT: porcentagem de partículas acumuladas menores que D_p ;

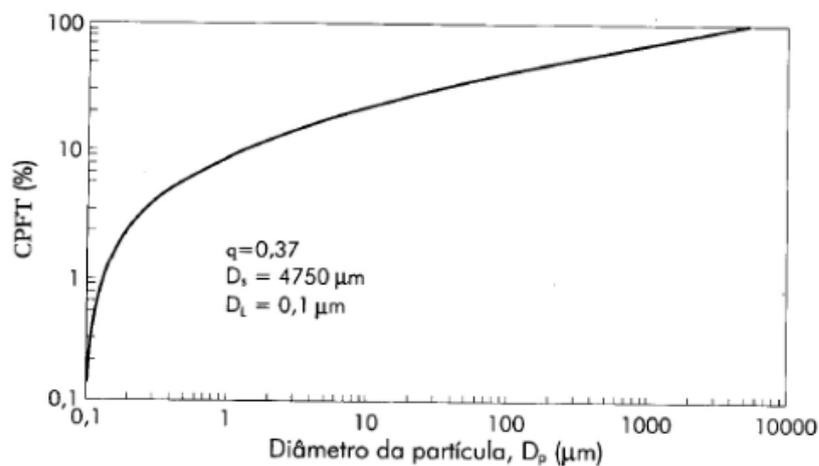
D_p : diâmetro da partícula em questão (mm);

D_s : diâmetro da menor partícula (mm);
 D_l : diâmetro da maior partícula (mm);
 q : módulo ou coeficiente de distribuição.

Dinger e Funk explicam que o coeficiente de distribuição utilizado na equação é de grande influência para o melhor empacotamento das partículas. Segundo Vaderlei (2004) eles avaliaram que quanto mais próximo ou menor de 0,37 for o valor de “ q ”, maiores serão as chances de se obter 100% de empacotamento e valores de “ q ” superiores a 0,37 implicam maior porosidade no material. Ele explica ainda que os valores de “ q ” não devem exceder 0,3 para uma boa fluidez, sendo que valores menores que 0,25 tornam a mistura auto-adensável. Quando há a diminuição do coeficiente “ q ” a quantidade de finos que influenciam na interação das partículas é aumentada, tornando a mistura mais viscosa quando adicionado água.

A Figura 11 apresenta a distribuição granulométrica para a máxima densidade de empacotamento possível segundo Alfred:

Figura 11 - Distribuição granulométrica segundo modelo de Alfred



(FÁVERO, 2016)

2.3.7 Propriedade Mecânica

Os CPR's constituem uma nova família de materiais, para os quais os respectivos campos dependem de desempenho, custo e facilidade de mistura e aplicação. Esta família inclui

dois tipos de CPR com propriedades mecânicas distintas, designados CPR 200 e CPR 800, que oferecem possibilidades de aplicação interessantes em diferentes áreas. (RICHARD e CHEYREZY, 1995). As propriedades mecânicas para os dois tipos são resumidas no Quadro 2.

Quadro 2 - Propriedades do CPR

Tipo de Tratamento	CPR 200	CPR 800
Pressurização pré-moldagem (Mpa)	nenhuma	50
Tratamento térmico (°C)	20 a 90	250 a 400
Propriedades		
Resistência à compressão (Mpa)	170a 230	490 a 810
Resistência à tração na flexão (Mpa)	30 a 60	45 a 141
Energia de Fratura (J/m ²)	20.000 a 40.000	1.200 a 20.000
Módulo de Elasticidade (GPa)	50 a 60	65 a 75

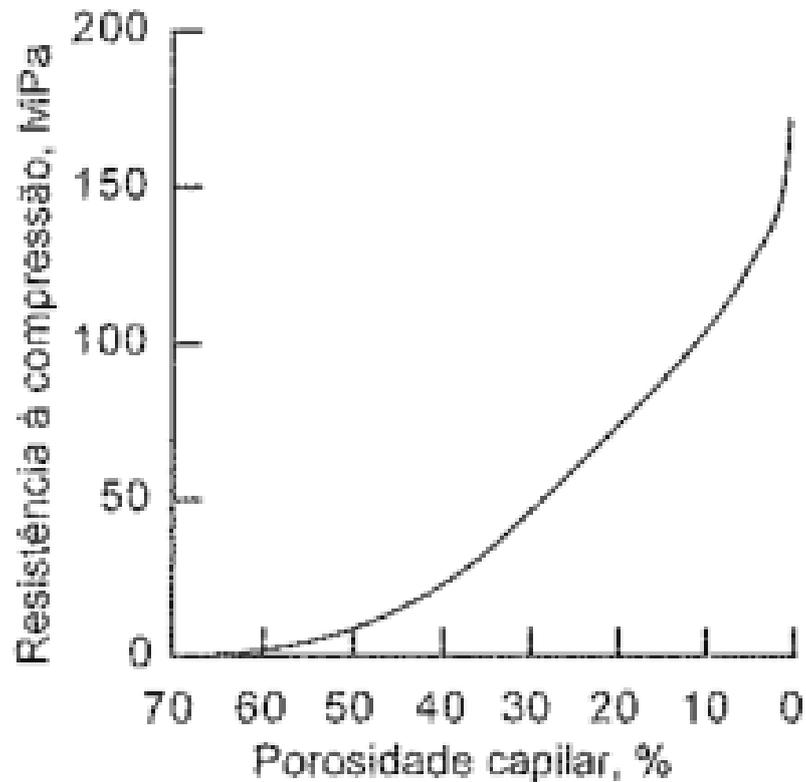
(Adaptado RICHARD e CHEYREZY, 1995)

2.3.7.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é a propriedade mecânica que avalia outras propriedades do concreto, como por exemplo, o seu tipo e qualidade. Além disso ela traz um reflexo direto de qualquer desempenho que se deseje obter em um concreto, mesmo sabendo que em determinadas situações a resistência à compressão não é a propriedade mais importante. (VANDERLEI, 2004)

De acordo com Mehta e Monteiro (2008) a resposta do concreto às tensões aplicadas está diretamente ligada à fatores que afetam sua porosidade, ou seja, do ponto de vista da resistência a relação a/c e porosidade é o fator mais importante, observando que independente de outros fatores, a porosidade da matriz reduz significativamente a resistência do concreto, como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Relação entre porosidade e resistência a compressão.



(METHA E MONTEIRO, 2008)

Richard e Cheyrezy (1995) explicam que fatores como a densidade da mistura e a aplicação de tratamento térmico são condições que influenciam bastante na resistência à compressão do CPR. Quanto a densidade da mistura, quanto mais elevada, maior será a resistência do concreto, podendo ser aumentada pela aplicação de pressão no concreto antes e durante a concretagem, provocando a redução do ar incorporado, remoção do excesso de água na mistura e compensação da retração química. O tratamento térmico auxilia na formação de cristais com o aumento da temperatura de cura, aumentando também sua resistência a compressão.

2.3.8 Homogeneidade da mistura

O princípio básico para a produção de CPR é a homogeneidade e a compacidade granular do material. A homogeneidade é obtida eliminando o agregado graúdo, restando somente agregado miúdo, fíler, cimento, adição mineral, aditivo químico e água. (TUTIKIAN, ISAIA e HELENE, 2011)

Segundo Vanderlei (2004), os problemas relativos à heterogeneidade são significativamente reduzidos no CPR pela seguinte teoria:

- A substituição dos agregados graúdos por areia fina com tamanho dos grãos não superior a 2mm. A relação entre diâmetro máximo do agregado do CPR e do CAD é:

$$\frac{\varnothing_{maxCPR}}{\varnothing_{MAXCAD}} = \frac{1}{50} a \frac{1}{30} \quad (4)$$

- São melhoradas as propriedades mecânicas da mistura. A relação entre os módulos de elasticidade do agregado (E_a) e da pasta de cimento hidratado (E_p) são:

$$CAD: \frac{E_a}{E_p} \cong 3,0 \quad CPR: \frac{E_a}{E_p} = 1,0 a 1,4 \quad (5)$$

- A zona de transição entre agregado e pasta de cimento é eliminada.
- A relação agregado/matriz é reduzida.

O procedimento de mistura dos materiais é um fator que influencia na homogeneidade da matriz, trabalhabilidade do concreto e em suas propriedades. Vanderlei 2004, recomenda que quando não houver um agitador eficiente para a mistura, faça uma pré mistura dos pós, agitando o suficiente para que seja possível homogeneizar a mistura. Na sequência deve ser adicionado água juntamente com o superplastificante, e continuar a homogeneizar até que se atinja a trabalhabilidade esperada, só então, devem ser adicionadas as fibras e continuar com a homogeneização.

2.3.8.1 Melhoramento da Densidade da Mistura

A densidade relativa influencia significativamente na resistência à compressão do CPR e é definida pela qualidade da mistura granular, quantidade de água, mistura e vibração eficiente. Essa densidade pode ser aumentada por meio de uma boa composição granulométrica, e também pela aplicação de pressão confinante antes e durante a concretagem provocando a redução de ar incorporado, remoção do excesso de água e compensação da retração química. (VANDERLEI e GIONGO, 2006)

2.3.8.2 Efeito do Tamanho do Agregado

Em concretos convencionais, os agregados formam um esqueleto rígido dentro da pasta de cimento, na aplicação de uma força de compressão, aparecem tensões de cisalhamento e tração na interface pasta/agregado, que fissuram a pasta. Sendo quanto maior for o diâmetro do agregado, maior será o tamanho da fissura. (RICHARD e CHEYREZY, 1995)

Segundo Vanderlei 2004, para o CPR, a redução no tamanho do agregado graúdo a um fator em torno de 1:50, provoca uma redução do tamanho das microfissuras de origens:

- Mecânicas (carregamento externo);
- Química (retração autógena);
- Termo - Mecânica (expansão diferenciada entre pasta e o agregado sob efeito de tratamento térmico)

2.4 Cimento Portland Branco:

O cimento Portland branco é um tipo de cimento que se diferencia dos demais pela coloração. A cor branca é conseguida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxidos de ferro e manganês e por condições especiais durante a fabricação, especialmente com relação ao resfriamento e moagem do produto. (KEIL, 1973)

As condições para a fabricação de clínquer branco e colorido são semelhantes. O calcário cru, argila ou, respectivamente, caulim, as vezes também areia, deve ser da mais alta pureza. Durante a fabricação, a aparência ou a produção de óxidos de ferro e manganês devem ser evitadas. Por esta razão, o cimento branco deve ser moído em moinhos com placas de blindagem e esferas obtidas de produtos cerâmicos. O teor de ferro do clínquer branco responde atualmente a um valor médio em Fe_2O_3 de aproximadamente 0,2 a 0,5%. (KEIL, 1973)

No Brasil o cimento Portland branco é regulamentado pela norma NBR 16697:2018, sendo classificado em dois subtipos: cimento Portland branco estrutural e cimento Portland branco não estrutural. O cimento Portland branco estrutural é aplicado em concretos brancos para fins arquitetônicos, possuindo as classes de resistência 25, 32 e 40, similares aos outros tipos de cimento, já o cimento Portland branco não estrutural não tem indicação de classe e é aplicado, por exemplo, no rejuntamento de azulejos e na fabricação de ladrilhos hidráulicos, isto é, em aplicações não estruturais. (ABCP, 2002)

Segundo a NBR 16697:2018 a brancura deve ser objeto de um controle estatístico, dentro da hipótese de uma distribuição gaussiana, assegurando-se que o valor seja superior ou igual a 78% para o cimento Portland branco estrutural e superior ou igual a 82 % para o cimento Portland branco não estrutural, com 97% de probabilidade, isto é, a probabilidade do limite inferior não ser atingido é de 3 %. Igualmente, em um controle diário durante qualquer período de seis meses consecutivos, não pode haver variação de brancura superior a 4 %.

2.4.1 Aplicação

Nos últimos vinte anos, vem se intensificando o uso do cimento Portland branco estrutural para confecção de concretos a serem usados em elementos estruturais, principalmente na Europa. Até agora, o emprego desse material tem sido concentrado em obras especiais, nas quais a cromaticidade do concreto faz com que ele possa ser empregado como elemento de composição estética. Arquitetos reconhecidos internacionalmente, como Santiago Calatrava e Richard Meyer, têm utilizado o concreto branco com esse intuito, consolidando um estilo diferenciado em seus projetos arquitetônicos. (KIRCHHEIM , PASSUELLO, *et al.*, 2018)

Como exemplo de obras desses arquitetos, pode-se citar a Ciudad de las artes y las ciencias (Figura 13), em Valência, na Espanha e a Igreja Dives in Misericordia (Figura 14), em Roma, na Itália.

Figura 13 - Ciudad de las artes y las ciências, Valência, Espanha.



(KARCHMER, 2019)

Figura 14 - Igreja Dives in Misericordia, Roma, na Itália.



(SIZA, 2016)

No Brasil, a utilização de concreto estrutural em obras de grande porte começou a ganhar destaque com a construção da ponte Irineu Bornhausen (Figura 15), construída em 2004, na cidade de Brusque, no Estado de Santa Catarina. Mais tarde, em 2008, foi inaugurada a obra de obra de maior relevância em concreto branco do país, o Museu Iberê Camargo (Figura 16), localizado na cidade de Porto Alegre. Projeto de autoria do arquiteto português Álvaro Siza, onde enfatiza o uso do concreto branco para fins estéticos. A obra foi marcada por um considerável investimento no desenvolvimento de uma tecnologia de aplicação adequada a esse novo material. (KIRCHHEIM , PASSUELLO, *et al.*, 2018)

Figura 15 - Ponte Irineu Bornhausen, Brusque, BR



(BAILONI, 2004)

Figura 16 -Vista do Museu Iberê Camargo, em Porto Alegre, BR



(SIZA, 2011)

2.4.2 Propriedades do CPB

O cimento branco é um cimento Portland e apresenta características muito parecidas com os demais tipos de cimento convencionais. Porém existem algumas diferenças que são importantes para fabricação do concreto branco, devendo ser tomadas medidas específicas para esse tipo de cimento. (FONSECA e NUNES, 1995)

Quanto às características químicas e físicas, o cimento branco possui elevados teores de aluminato tricálcico (C_3A) e em geral apresentam partículas mais finas, se comparado aos outros tipos de cimento. Consequentemente, o cimento branco age de forma sinérgica e proporciona ao concreto tempos mais curtos de início de pega. (KIRCHHEIM, PASSUELLO, *et al.*, 2018). Além disso, segundo Fonseca e Nunes (1995), o gesso utilizado em sua fabricação, necessariamente branco e quase sempre desidratado, tem uma eficiência ainda menor como retardador de pega, agravando ainda mais esse comportamento.

Simultaneamente, o desenvolvimento do calor de hidratação é mais rápido, sendo necessário ser compensado através de medidas de proteção, afim de evitar a fissuração do concreto, pelos gradientes térmicos gerados. (FONSECA e NUNES, 1995). (KIRCHHEIM, PASSUELLO, *et al.*, 2018), recomenda ainda que seja feito controle de temperatura e que evitem concretagens quando a temperatura ambiente supera $35^{\circ}C$, devendo evitar que os agregados e equipamentos da mistura fiquem expostos ao sol em dias muito quentes, para que os mesmos não apresentem temperaturas muito elevadas que estimulem a perda de água, ou colaboram para aumentar a temperatura da mistura, acelerando o calor de hidratação, caracterizando o rápido endurecimento da mistura e a perda de trabalhabilidade.

3 MATERIAIS DE MÉTODOS

A metodologia definida nesta pesquisa foi desenvolvida por meio das seguintes etapas:

- Escolha dos materiais constituintes do CPR;
- Ensaio para caracterização dos materiais;
- Estudo de dosagens por meio do software EMMA e traço final para desenvolvimento do CPR;
- Produção do CPR em laboratório;
- Ensaio de compressão;
- Comparação entre o CPR com uso do cimento CPV ARI e o CPR com uso do cimento Portland branco estrutural

3.1 Escolha dos materiais constituintes do CPR

Os materiais utilizados nos estudos, para concepção do CPR foram: Cimento Portland, quartzitos, sílica ativa e aditivo superplastificante.

3.1.1 Cimento Portland

Para a realização do estudo foram utilizados dois tipos de cimento, o convencional CPV ARI e o branco CPB 40 da marca Axton. Os cimentos foram utilizados por apresentarem boa resistência e menor teor de adições em comparação a outros cimentos presentes no mercado.

3.1.2 Quartzito

O quartzito utilizado foi fornecido pela empresa Siox, localizada na cidade de São Thomé das Letras –MG. O material possui massa específica de $2,65 \text{ g/cm}^3$ e já veio previamente classificado em indústria com as granulometrias apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Resultado Granulométrico

Mesh (Peneira)	Abertura (mm)
# 30	0,596
# 60	0,25
# 80	0,117
# 100	0,149
# 200	0,074
# 325	0,044
# 400	0,037

Fonte: O autor.

3.1.3 Sílica Ativa:

A sílica ativa utilizada é a Elkem microsíllica, fornecida pela empresa Elken, e possui as especificações presentes no Quadro 4.

Quadro 4 - Propriedades Físicas e Químicas da Sílica Ativa

Propriedades	Unidade	Valor
SiO ₂	%	≥ 85
SO ₃	%	≤ 2
Cl	%	≤ 0,3
CaO livre	%	≤ 1
Si livre	%	≤ 0,4
Área específica da superfície	m ² /g	15 ≤ 35
Índice de atividade pozolânica	%	≤ 100
Densidade Aparente	kg/m ³	200 ≤ 350

(ELKEM,2017)

3.1.4 Aditivo

O aditivo utilizado é o MasterGlenium 54, um aditivo superplantificante da terceira geração, à base de éter policarboloxilatos, recomendado para todos os tipos de cimento onde se deseja alta redução de água de amassamento, sem alteração do tempo de pega, como no caso dos concretos de alto desempenho. O aditivo possui aspecto líquido, cor branco turvo e massa específica de 1,067 g/cm³:

3.2 Ensaio para caracterização dos materiais

Os ensaios foram realizados no Laboratório do Centro Universitário do Sul de Minas – Unis-MG, afim de obter resultados para o melhor desenvolvimento de dosagem do CPR.

3.2.1 Ensaio de Resistência à Compressão do Cimento

O ensaio de resistência à compressão foi realizado para os dois tipos de cimento em estudo, CPV ARI e CPB-40, conforme a ABNT NBR 7215:2019 e ABNT NBR 7214:2015. Foram confeccionados 12 corpos-de-prova em moldes cilíndricos de dimensões 50 mm de diâmetro e 100mm de altura, sendo realizados 6 amostras de cimento branco e 6 amostras de cimento cinza CPV ARI.

Primeiramente foram separados e dosados todos os materiais utilizados para elaboração do ensaio, sendo eles: cimento, água e areia (fina, média fina, média grossa e grossa), não foi necessário a realização do ensaio de granulometria, pois foi utilizada a areia do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (Figura 17) e a mesma já possui classificação granulométrica conforme ABNT NBR 7214:2015.

Figura 17 - Areia IPT utilizada pra realização do ensaio de compressão



Fonte: o autor (2019).

Com todos os materiais dosados adequadamente (Figura 18) foi iniciado o processo de mistura mecânica dos materiais para produção da argamassa, seguindo as recomendações da ABNT NBR 7215:2019.

Figura 18 - Materiais utilizados para realização do ensaio de compressão no cimento



Fonte: o autor (2019)

A Figura 19 apresenta a argamassa obtida com os dois tipos de cimento CPB 40 (imagem à esquerda) e CPV ARI (imagem à direita).

Figura 19 – Argamassa realizada com CBP 40 e CPV ARI



Fonte: O autor (2019)

Finalizados os procedimentos para mistura mecânica do material, foi feita a moldagem dos corpos-de-prova, como apresenta a Figura 20.

Figura 20 - Moldes dos corpos de prova para ensaio de compressão do cimento



Fonte: o autor (2019).

Logo após a moldagem o material foi colocado em câmara úmida (Figura 21) adaptada para realização dos ensaios no cimento, por 24 horas.

Figura 21- Corpos de prova em câmara úmida adaptada.



Fonte: o autor (2019)

Posteriormente os corpos de prova foram desmoldados e colocados em tanque de cura com água durante 3 dias, tempo em que foi realizado a ruptura do material, como apresentado na Figura 22.

Figura 22 - Ensaio de ruptura dos corpos de prova



Fonte: o autor (2019)

3.2.2 Massa específica

O ensaio de massa específica foi realizado conforme a ABNT NBR 16605:2017 - Cimento Portland e outros materiais em pó, por meio do frasco volumétrico de Le Chatelier, em que é possível determinar o volume de material inserido pelo deslocamento do líquido.

O ensaio foi realizado em duas etapas, primeiro com o cimento branco e posteriormente com o cimento cinza.

Inicialmente foi adicionado ao frasco de Le Chatelier (Figura 23), querosene (material que não reage quimicamente com o cimento) com o auxílio de um funil de haste longa até a marca 0,45 (devendo estar entre 0 e 1).

Figura 23 - Frasco de Le Chatelier para ensaio de massa específica



Fonte: o autor (2019)

Em seguida o frasco foi transferido em posição vertical pra um balde com a água em temperatura controlada a aproximadamente 20°C, onde ficou submerso por 30 minutos para termorregulação e então retirado do balde para leitura do volume inicial $V_1=0,45$. Posteriormente foi feita a pesagem e adicionado 59,98g de cimento, com o auxílio de um funil, com o cuidado para que não ocorresse a aderência do material nas paredes do frasco. Na sequencia o frasco foi tampado e movimentado até que não houvesse mais borbulhas de ar subindo para a superfície, sendo possível então registrar a leitura do volume final da amostra $V_2= 18,95$, como é possível observar na Figura 24.

Figura 24 - Franco de Le Chatelier com cimento e querosene



Fonte: o autor (2019)

A massa específica do material pode ser calculada então, pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (6)$$

Onde:

ρ : massa específica do material (g/cm³);

m: massa do material (g);

v: volume deslocado pela massa do matéria (V₁ - V₂),(cm³).

O mesmo ensaio foi realizado pra o cimento CPV ARI e para o pó de quartzo. Vale ressaltar que para a realização do ensaio de massa específica com pó de quartzo foi utilizado água no lugar do querosene.

3.2.3 Composição granulométrica quartzito

O ensaio de composição granulométrica dos quartzitos foi realizado conforme a ABNT NM248:2003 – Agregados: Determinação da composição granulométrica, por meio do peneiramento, afim de determinar mais precisamente a granulometria dos quartzitos, para o melhor empacotamento do material.

Primeiramente foram retiradas amostras do material, que já se apresentavam em sacos separados de acordo com a granulometria classificada pela indústria (Figura 25).

Figura 25 - Quartzitos previamente classificados e indústria.



Fonte: o autor (2019)

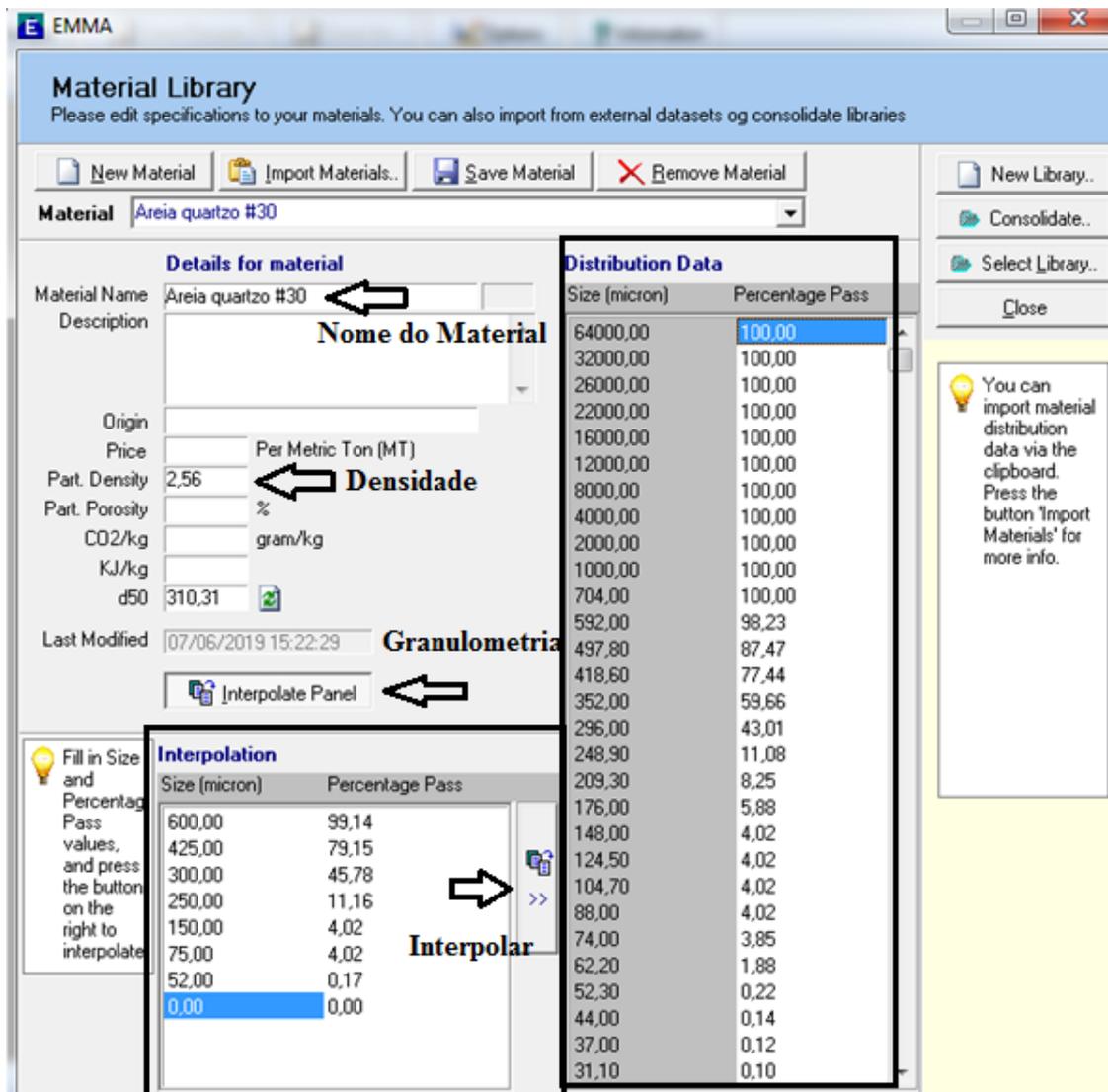
Todas as amostras foram previamente secas em estufa e separadas em frações de aproximadamente 500g para realização do peneiramento. Por se tratar de um material fino, foram eliminadas as peneiras de granulometria maior deixando apenas as peneiras abaixo de 1,18 cm, onde foram classificadas em ordem decrescente, do topo para a base, formando um grupo de peneiras. Depois de todas as peneiras devidamente posicionadas foi adicionado a amostra sobre a peneira superior e então iniciado o processo de agitação mecânica do conjunto, em seguida as peneiras foram destacadas e agitadas manualmente por 1 minuto para remover todo o material passante, que foi adicionado a peneira imediatamente inferior. Em seguida foi feita a verificação da massa total retida em cada uma das peneiras.

3.4 Estudo de dosagem dos CPR

A realização do estudo de dosagem do CPR foi feito com o auxílio do software EMMA-Elken Material Mix Analyzer. O programa desenvolvido pela Elken, baseado no Modelo de Alfred e Andreassen, é uma ferramenta desenvolvida para promover a proporção granular ótima dos materiais e oferecer o melhor empacotamento das partículas.

O primeiro passo foi inserir as características físicas de todos os materiais secos selecionados para produção do CPR, devendo ser anexado sua composição granulométrica e massa específica. Seguindo os passos apresentados na Figura 26.

Figura 26 - Inserção das características dos materiais no software EMMA



Fonte: o autor (2019)

Depois de adicionados todas as propriedades do material na biblioteca do software, foi então determinado que o método de empacotamento a ser utilizado seria o de Andreassen Modificado, sendo necessário a determinação do coeficiente de distribuição “q” e os diâmetros da maior e menor partícula, conforme Figura 27.

Figura 27 - Determinação do modelo de cálculo e coeficiente de distribuição

Calculation Model	
Selected Model:	Parameters
Modified Andreassen	q-Value 0,25
	Max. Particle Size 592
	Min. Particle Size 0,17

Fonte: o autor (2019)

Em seguida foi criada uma “nova receita” onde todos os constituintes foram adicionados e então foi inserida a quantidade de cada material (Figura 28), até que fosse possível encontrar o melhor empacotamento possível, de acordo com a curva granulométrica.

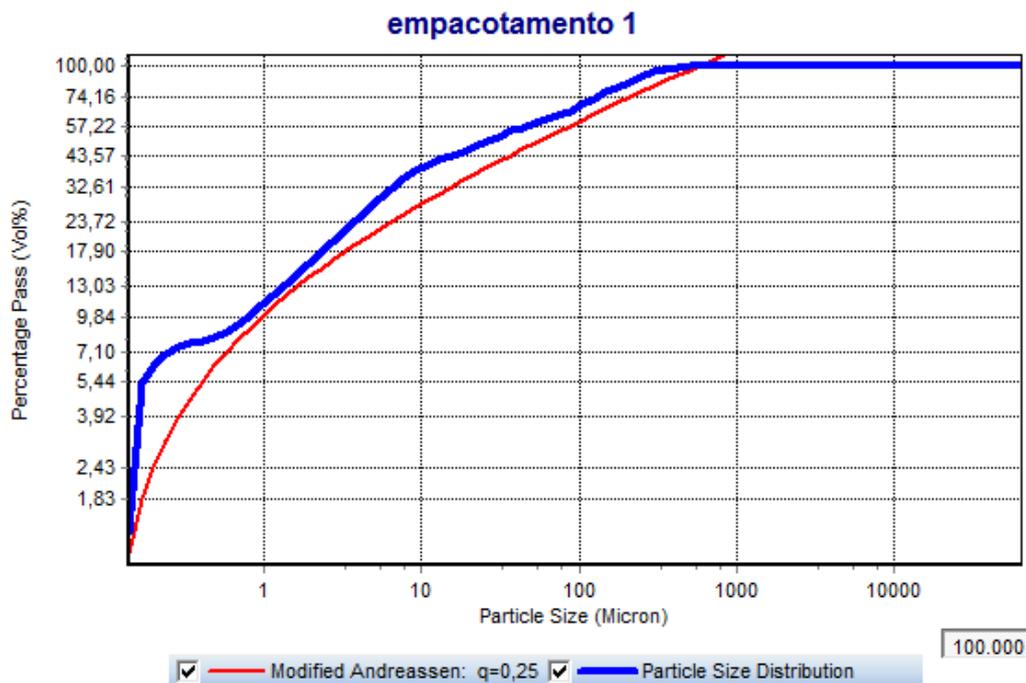
Figura 28 - Determinação dos Materiais no Software EMMA

Materials In Composition								
	Material Name	Density	Quantity	Vol %	Price	Version	CO2/kg	KJ/kg
	Areia quartzo # 60	2,65	0,00	0,00			0,00	0,00
	Areia quartzo #30	2,65	0,00	0,00			0,00	0,00
	Microsilica	2,20	0,00	0,00			100,00	0,00
	pó quartzo #400	2,65	0,00	0,00			0,00	0,00
	High strength cement	3,24	0,00	0,00			1000,00	0,00

Fonte: o autor (2019).

O máximo empacotamento é obtido quando a curva azul (curva de distribuição granulométrica dos materiais) se assemelha a curva vermelha (curva do modelo de empacotamento utilizado). Conforme Figura 29.

Figura 29 - Curva de Empacotamento EMMA



Fonte: o autor (2019).

Para a determinação da dosagem dos materiais constituintes do CPR, bastou então multiplicar os valores obtidos no traço pela quantidade de cimento que deseja ser utilizado na mistura.

3.5 Produção do CPR

3.5.1 Procedimento de mistura dos materiais

Para a realização do CPR em estudo, deve-se atentar a seu processo de mistura. Devido a grande quantidade de finos presentes no material, o cuidado para que não ocorram perdas e que o mesmo seja corretamente misturado afim de garantir uma boa homogeneidade do produto final deve ser levado em consideração.

Primeiramente todos os constituintes foram pesados separadamente (Figura 30), cimento, sílica, água, aditivo, areias e pó de quartzo seguindo suas granulometria. A quantidade de material utilizada para cada mistura, foi calculada para moldar seis corpos-de-prova, capacidade para qual foi desenvolvido o aplicador de pressão.

Figura 30 - Separação dos materiais constituintes do CPR



Fonte: o autor (2019).

Em seguida iniciou-se a mescla dos matérias. Em um recipiente foram misturados o cimento, a sílica e o pó de quartzo, em outro foi feita a mistura das areias de granulometrias distinta e o aditivo foi incorporado a água. Com todos os matérias separados verificou-se que não era possível fazer a mistura de todo material necessário para fazer os corpos-de-prova, visto que a argamassadeira não suporta o volume total dos constituintes. Sendo assim as mesclas foram novamente pesadas (depois de ocorrer a mistura do material) e divididas em três frações iguais, sendo então possível realizar o processo de produção com uma boa trabalhabilidade na argamassadeira, com a seguinte sequência:

- A mescla inicia-se com a mistura do cimento, sílica e pó de quartzo, com velocidade baixa por 30 segundos;
- Após, se acrescenta a água com o aditivo já incorporado e continua o processo de mistura em velocidade baixa por mais 3 minutos, até obter uma pasta fluida e homogênea;
- Em seguida acrescentar toda a areia e ajustar a velocidade alta por aproximadamente 5 minutos;
- Retirar todo o material aderido na borda da bacia com ajuda de uma espátula e ligar o misturador por mais 60 segundos em velocidade alta;
- Despejar o material em um recipiente limpo em que não ocorra a absorção de água;
- Realizar o mesmo processo com as outras frações de material;
- Em seguida com as três frações já devidamente prontas, junta-las ao misturador e realizar a mistura de todo o material por mais 8 minutos em velocidade alta, até que fique homogêneo e aparente boa trabalhabilidade.
- Após a mistura moldar os corpos de prova.

Os corpos-de-prova moldados podem ser observados na Figura 31.

Figura 31 - Corpos-de-prova moldados com CPR



Fonte: o autor (2019).

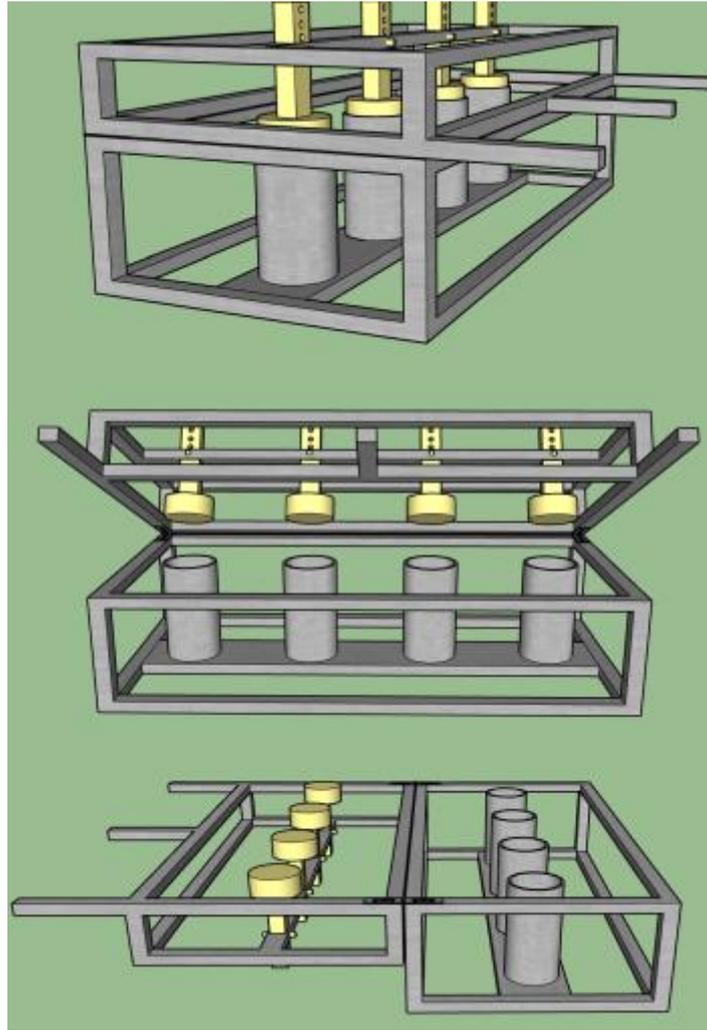
3.5.2 Aplicação de pressão confinante

Para a aplicação de pressão confinante no concreto foi necessário desenvolver um dispositivo específico para a obtenção do resultado desejado, pesando nos benéficos em que a eliminação do ar aprisionado e o excesso de água podem trazer ao concreto.

Sendo assim, foi desenvolvido um estudo sobre a correta aplicação da pressão nos corpos-de-prova, afim de eliminar apenas os inconvenientes do concreto (ar e água), por meio de uma aplicação de pressão uniforme em todos os corpos-de-prova simultaneamente.

Desta forma, foi apresentado um projeto em que a pressão é aplicada de forma manual imediatamente após o concreto ser moldado. O dispositivo consiste em uma estrutura de ferro em que os moldes cilíndricos são acoplados e recebem a pressão por meio de pistões que se encaixam aos moldes, como pode ser observado na Figura 32 em projeto realizado no software.

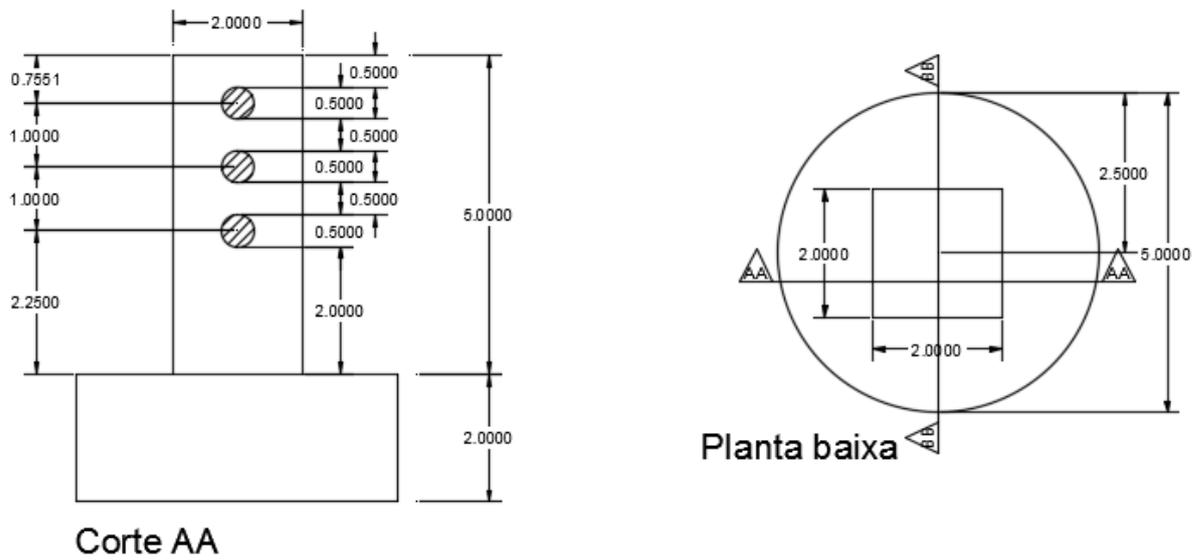
Figura 32 – Projeto 3D dispositivo aplicador de pressão



Fonte: o autor (2019)

Para a concretização do projeto foi necessário confeccionar os pistões que ficarão em contato com o concreto e serão responsáveis por transmitir a carga aplicada para os corpos-de-prova, além de permitir que o ar e a água sejam extravasados por meio do pequeno vão existente entre o pistão e o molde cilíndrico, conforme pode ser observado no projeto apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Projeto Pistão AutoCAD



Fonte: o autor (2019).

O material utilizado para fabricação dos pistões foi o nylon, por ser um material leve, resistente e de fácil confecção já que o mesmo pôde ser confeccionado na impressora 3D no laboratório de fabricação digital da própria faculdade, o Unis Maker. Sendo produzidos então 6 modelos, conforme pode ser observado na Figura 34.

Figura 34 - Pistões de Nylon



Fonte: o autor (2019).

Os moldes cilíndricos em que serão moldado os corpos de prova possuem dimensões de 50mm de diâmetro e 100mm de altura, sendo necessário então que o pistão tenha um diâmetro um pouco menor para que possa haver a saída de ar e água aprisionados no concreto. Como o nylon depois de confeccionado sofre uma pequena retração, os pistões foram produzidos no mesmo diâmetro dos moldes cilíndricos, como observado na Figura 34.

Em seguida foi produzido a base de ferro em que serão acoplados os moldes cilíndricos e os pistões para a devida aplicação de pressão no CPR. Sendo basicamente um base onde os moldes ficam acoplados e uma tampa onde os pistões serão fixados devendo possuir um encaixe perfeito em cada molde, como pode ser visto na Figura 35.

Figura 35 - Dispositivo aplicador de pressão



Fonte: o autor (2019).

A pressão é aplicada de forma manual por meio de uma alavanca e deverá ser executada até que ocorra a saída do excesso de ar e água presentes no concreto, extravasando o mínimo de material possível. A pressão deve ser mantida até os corpos-de-prova serem desmoldados, totalizando 24 horas de pressão aplicada. Na Figura 36 pode-se observar o material transbordado durante a aplicação da pressão.

Figura 36 - Aplicação da Pressão



Fonte: o autor (2019).

3.5.3 Cura

Como disposto do item 2.3.4.2, o tratamento térmico é extremamente benéfico e favorece inúmeras propriedades do concreto como por exemplo a resistência à compressão através da melhor cristalização dos grãos hidratados, sendo ainda mais eficaz se aplicado nas primeiras horas.

Sendo assim, imediatamente após o desmolde dos corpos-de-prova, deve-se iniciar o processo de cura no concreto. No presente estudo não foi possível realizar o processo de tratamento térmico, sendo assim as amostras foram imersas em água em temperatura ambiente, aproximadamente $22 \pm 2^\circ\text{C}$, onde permaneceram imersas até o dia da ruptura.

3.6 Ensaio de resistência a compressão

Para o ensaio de resistência a compressão foram utilizados os seis corpos-de-prova cilíndricos já moldados anteriormente e submetidos ao processo de aplicação de pressão. O ensaio foi realizado conforme NBR 5739:2018 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, no laboratório da empresa Crabi Materiais de Construção, conforme Figura 37.

Figura 37 - Corpo-de-prova em ensaio de compressão.



Fonte: o autor (2019).

Os corpos-de-prova foram confeccionadas em moldes com dimensões de 50mm de diâmetro e 100mm de altura. Porém há uma diminuição em sua altura devido a aplicação de pressão, em que uma pequena parcela de material é extravasado, além disso foi necessário retificar as amostras em uma marmoraria afim de eliminar as imperfeições da superfície que poderiam prejudicar os resultados obtidos no ensaio, conforme Figura 38.

Figura 38 – Corpos-de-prova com imperfeições na base



Fonte: o autor (2019).

A Figura 39, apresenta as amostras retificadas, com superfície adequada para a realização do ensaio.

Figura 39 - Corpos-de-prova retificados



Fonte: o autor (2019)

Com as perdas de altura decorrentes dos processos de produção, a relação entre altura/diâmetro (h/d) dos corpos-de-prova foi diferente de 2, sendo então necessário aplicar um fator de correção (F_c) no resultado obtido no ensaio de resistência do concreto. O fator de correção é calculado por meio da seguinte equação.

$$\frac{2}{1} = \frac{h/d}{FC} \rightarrow 2 \times FC = \frac{h}{d} \rightarrow FC = \frac{h/d}{2} \quad (7)$$

Desta forma, o valor da tensão obtido pelo ensaio de compressão deve ser multiplicado ao Fator de Correção para cada corpo-de-prova, conforme equação abaixo.

$$\sigma_{\text{final}} = Fc \times \sigma_c \quad (8)$$

4 RESULTADOS E DICUSSÕES

Os resultados e discussões apresentados, serão decorrentes dos processos de caracterização dos materiais utilizados na elaboração do CPR, produção e ensaios de resistência à compressão obtidos com os dois traços propostos, totalizando 4 concretos distintos, observando que foram produzidos compósitos com cimento cinza e cimento branco.

O estudo será dividido em três etapas, sendo a primeira decorrente dos ensaios para caracterização dos materiais, a segunda etapa da produção e resultados obtidos pelo traço 1 e a terceira etapa produção e resultados obtidos pelo do traço 2.

4.1 Primeira Etapa

4.1.1 Ensaio de composição granulométrica

Os resultados obtidos por meio dos ensaio de peneiramento do quartzito de # 30 pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 - Ensaio de Granulometria dos Quartzitos #30

Peneira (mm)	Massa (g)		499,98	
	#30			
	Massa retida	% retida	% acumulada	
1180	0	0,00%	0,00%	
600	4,29	0,86%	0,86%	
425	100,73	20,15%	21,00%	
300	166,81	33,36%	54,37%	
250	173,08	34,62%	88,99%	
150	35,87	7,17%	96,16%	
75	17,18	3,44%	99,60%	
Fundo	2,04	0,41%	100,00%	

Fonte: o autor (2019).

O mesmo ensaio foi realizado para o quartzito de #60, e seus resultados podem ser observados na Tabela 3.

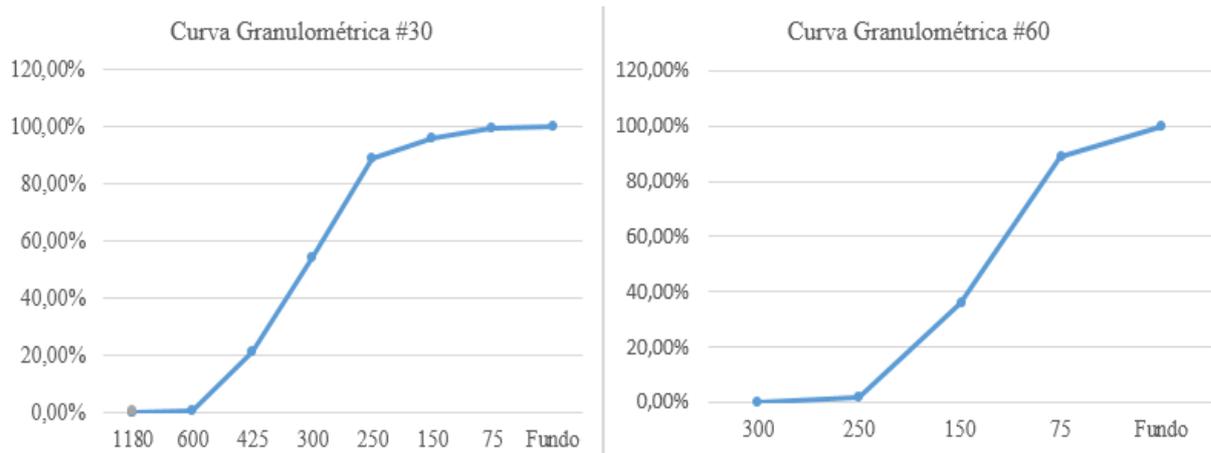
Tabela 3 - Ensaio de Granulometria dos Quartzitos #60

Peneira (mm)	Massa (g)		499,65	
	#60			
	Massa retida	% retida	% acumulada	
1180	0	0,00%	0,00%	
600	0	0,00%	0,00%	
425	0	0,00%	0,00%	
300	0	0,00%	0,00%	
250	10,12	2,00%	2,03%	
150	169,58	33,90%	35,97%	
75	266	53,20%	89,20%	
Fundo	53,95	10,80%	100,00%	

Fonte: o autor (2019).

Com os dados obtidos através do ensaio de peneiramento foi possível traçar a curva granulométrica do agregado, como analisado na Figura 40.

Figura 40 - Curva Granulométrica Quartzitos.



Fonte: o autor (2019).

Como pôde ser observado nos ensaios apresentados acima, apesar dos materiais já apresentarem sua classificação granulométrica obtida em indústria houve uma pequena variação em sua granulometria, sendo constatado que o quartzito de mesh 30 apresentam uma porcentagem de material das peneiras de mesh 30 e 60, e o quartzito de mesh 60, apresenta um material mais fino, com granulometrias das peneiras #100 e #200.

4.1.2 Ensaio de Resistência à Compressão do cimento

Os resultados apresentados na Tabela 4, são referentes ao ensaio de compressão realizado nos dois tipos de cimentos utilizados para produção do CPR.

Tabela 4 - Resistência Compressão o Cimento

Amostra	Cimento	Dias	Dimensões			Força (tf)	Tensão (MPa)
			Média Diâmetro	Média Altura	Área		
1	Branco	3	5,013	9,920	19,725	6,13	34,5368
2	Branco	3	5,014	9,991	19,735	6,62	32,8960
3	Branco	3	5,024	9,920	19,816	6,28	31,0782
4	Branco	3	5,013	9,930	19,725	6,39	35,7699
1	Cinza	3	5,020	9,997	19,782	5,56	30,5626
2	Cinza	3	5,020	9,986	19,782	5,83	28,9011
3	Cinza	3	5,005	9,958	19,662	5,48	33,3328
4	Cinza	3	5,005	9,969	19,667	5,71	29,4724

Fonte: o autor (2019)

Como disposto na tabela, o cimento branco apresenta uma resistência relativamente maior que o cimento cinza. A média resistência à compressão obtida pelo cimento branco foi de 33,57 MPa enquanto o cimento cinza obteve 30,81 MPa após 3 dias de cura.

4.1.3 Ensaio de Massa específica

Os valores de massa específica do cimento CPV ARI, CPB 40 e quartzitos podem ser observados de acordo com a Tabela 5, apresentada abaixo:

Tabela 5 - Massa Específica dos Materiais

Massa Específica dos Materiais (g/cm³)		
CPV ARI	CPB 40	Quartzito
3,09	3,24	2,65

Fonte: o autor (2019).

4.1.4 Traço obtido pelo software

Com o auxílio do software foi possível realizar o melhor empacotamento das partículas, de acordo com o modelo de Alfred descrito em 2.3.6.3. Para parâmetros de dosagem foram utilizados alguns traços como referência e podem ser observados de acordo com a Tabela 1 do item 2.3.5, servindo apenas como critério de entrada de dados, observando que não é possível a utilização do mesmo traço, visto que, as propriedades variam de acordo com a região e as características de cada material, tendo como principal influência a granulometria e densidade dos materiais utilizados.

Para determinação da curva de referência do modelo de Alfred foi necessário a determinação do coeficiente de distribuição “q”, que nesta pesquisa foi adotado como 0,25 afim de se obter uma melhor trabalhabilidade.

Algumas dificuldade foram encontras com o desenvolvimento do empacotamento, levando em consideração a finura dos grãos e a dificuldade em classifica-los adequadamente.

Através de algumas tentativas de dosagem foi possível chegar no melhor empacotamento possível de acordo com a avaliação da composição granulométrica dos materiais que serão utilizados. Conforme pode ser observado na Tabela 6.

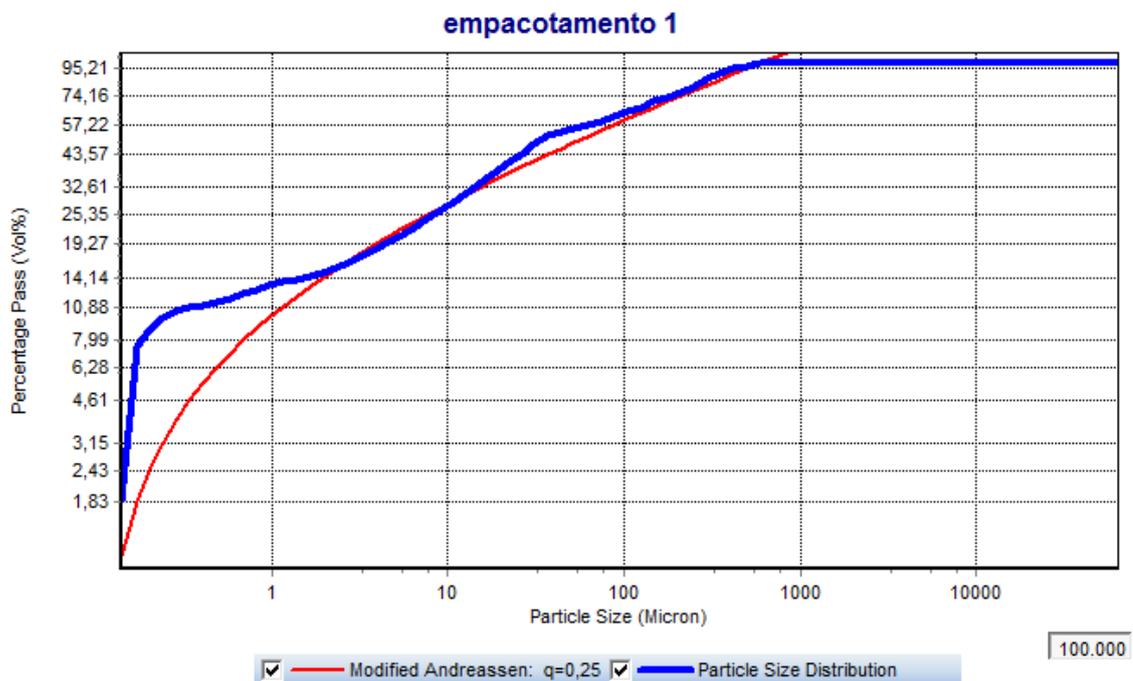
Tabela 6 - Traço obtido através do software EMMA

Material	Traço	Volume (%)
Cimento	1	33,07
Sílica ativa	0,25	11,99
Pó de quartzo	0,28	11,15
Areia #60	0,55	21,9
Areia #30	0,55	21,9

Fonte: o autor (2019).

Para fins de comparação entre os cimentos CPV ARI e CPB 40 será utilizado o mesmo traço, visto que, as diferenças de densidade entre eles é muito baixa e não alterou a curva de empacotamento (Figura 41). Vale ressaltar que o cimento branco possui uma superfície específica mais elevada além de teores mais altos de aluminato tricálcico (C_3A) em comparação ao cimento cinza, podendo ser necessário uma relação maior de água na mistura, esse fator pôde ser observado já no ensaio de resistência do cimento, onde o cimento cinza apresentou um aspecto mais fluido e mais trabalhável em comparação ao cimento branco.

Figura 41 - Curva empacotamento do CPR



Fonte: o autor (2019)

Como pode ser observado na Figura 41, as faixas entre $3\mu\text{m}$ e $600\mu\text{m}$, obtiveram um bom empacotamento, onde em grande parte a curva azul conseguiu coincidir com a curva

vermelha, tendo o empacotamento considerado ótimo. No entanto para granulometrias abaixo de 3 μm a curva se distanciou do modelo de Andreassen Modificado. Nessa faixa onde as granulometrias são muito baixas, não foi praticável a determinação do tamanho das partículas, visto que a realização de ensaio de peneiramento não é eficiente para identificação granulométrica dessas partículas.

Para a obtenção do traço final, ainda foi necessário a determinação da dosagem de aglomerante e a relação a/c. A determinação da quantidade de aglomerante a ser adicionado à mistura foi também baseada nos traços aqui utilizados como referência, sendo então considerada a taxa de 3% em relação ao consumo de cimento. A relação a/c aconselhável para a produção do CPR é de 0,16 a 0,20, sendo considerado então para o traço em estudo, 0,20.

Sendo assim, o traço final proposto para desenvolvimento do CPR, está presente na Tabela 7.

Tabela 7 - Traço 1 CPR

Material	Traço
Cimento	1
Sílica ativa	0,25
Pó de quartzo	0,28
Areia #60	0,55
Areia #30	0,55
Superplastificante	0,03
A/C	0,20

Fonte: o autor (2019).

E em seguida foi desenvolvido um novo traço, afim de se beneficiar das diferentes granulometrias de agregados disponíveis para elaboração do estudo. Sendo assim utilizou-se a teoria do empacotamento real que consiste no princípio em que as frações granulométricas menores ocupem os vazios deixados pela fração granulométrica maior. Desta forma, utilizou-se para esse traço, todas as frações granulométricas fornecidas para a realização do estudo. Como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8- Traço 2 CPR

Material	Traço
Cimento	1
Sílica ativa	0,25
Areia # 30	0,36
Areia #60	0,36
Areia #80	0,36
Pó de quartzo #100	0,36
Pó de quartzo #200	0,1
Pó de quartzo #325	0,1
Pó de quartzo #400	0,1
Superplastificante	0,03
A/C	0,20

Fonte: o autor (2019).

4.2 Segunda Etapa

A primeira análise do traço 1, apresentado na Tabela 6 do item 3.5, foi realizada com o cimento cinza. Para sua produção foi calculado o material necessário para a realização de seis corpos-de-prova obtendo as quantidades apresentadas na Tabela 9 onde é possível observar também o consumo de material em kg por m³ de concreto.

Tabela 9 – Consumo de material traço 1 CPV ARI

Material	Quantidade (kg)	Consumo material (kg/m³)
Cimento	1	849,37
Sílica ativa	0,25	212,34
Pó de quartzo	0,28	237,82
Areia #60	0,55	467,15
Areia #30	0,55	467,15
Superplastificante	0,03	25,48
Água	0,3	254,81

Fonte: o autor (2019).

Durante a produção do CPR, verificou-se que seria necessário adição de mais água, visto que a utilização da relação a/c de 0,2 não foi suficiente para realizar a mistura do material na argamassadeira e obter boa trabalhabilidade do concreto, observando que durante a produção o

misturador travava e não era possível realizar uma boa homogeneização do material. Portanto, a relação a/c foi aumentada para 0,3 obtendo assim uma boa consistência e melhor trabalhabilidade.

Para cada ensaio foram utilizados dois corpos de prova, sendo possível determinar a resistência do concreto com 7, 14 e 21 dias. Como pode ser observado na Tabela 10.

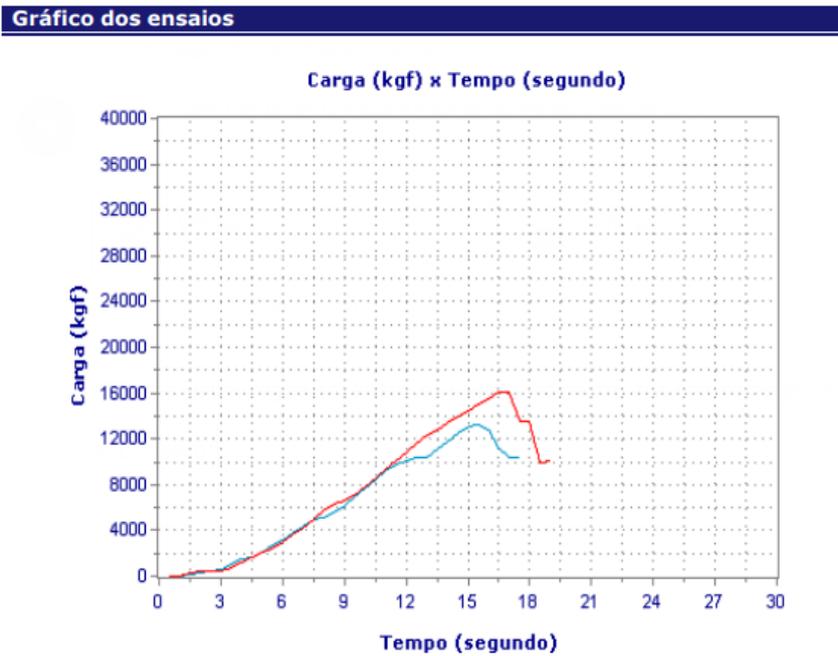
Tabela 10 - Resultado da resistência à compressão traço 1 com CPV ARI

	7 dias	14 dias	21 dias
Tensão de Ruptura (MPa)	63,5	90,7	81,9
	77,1	78,4	83,2
Média tensão de ruptura	70,3	84,6	82,6
Força de Ruptura (tf)	13,23	18,16	16,4
	16,07	15,7	16,66
Média força de ruptura	14,65	16,93	16,53

Fonte: o autor (2019)

Os ensaios de resistência a compressão foram realizados no laboratório da empresa Crabi, onde foram elaborados por meio de uma prensa elétrica que disponibiliza o gráfico dos ensaios com a relação entre força aplicada e tempo de aplicação. Como observado na Figura 42.

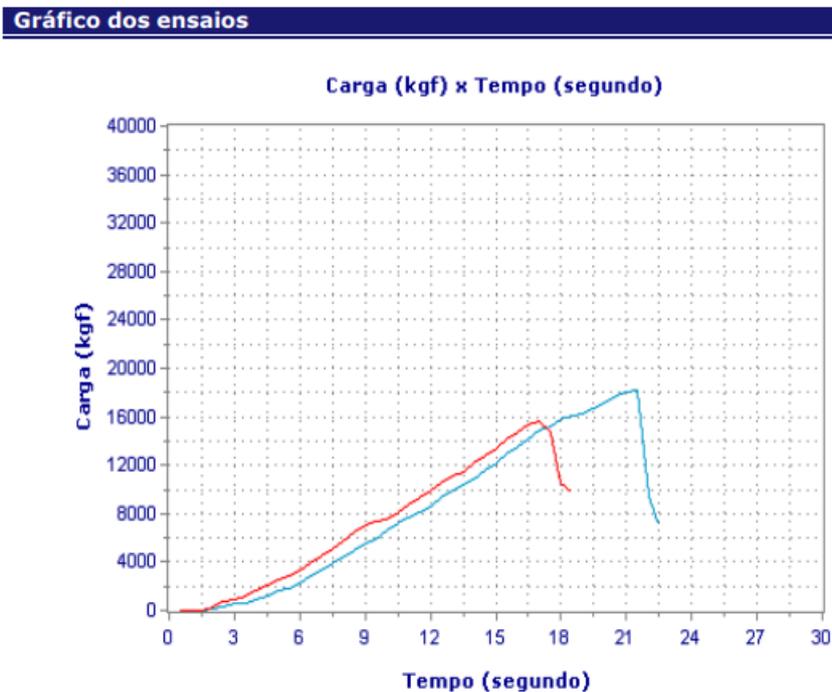
Figura 42 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPV ARI aos 7 dias



Fonte: o autor (2019)

O mesmo gráfico foi disponibilizado para o ensaio de compressão com 14 dias, conforme Figura 43.

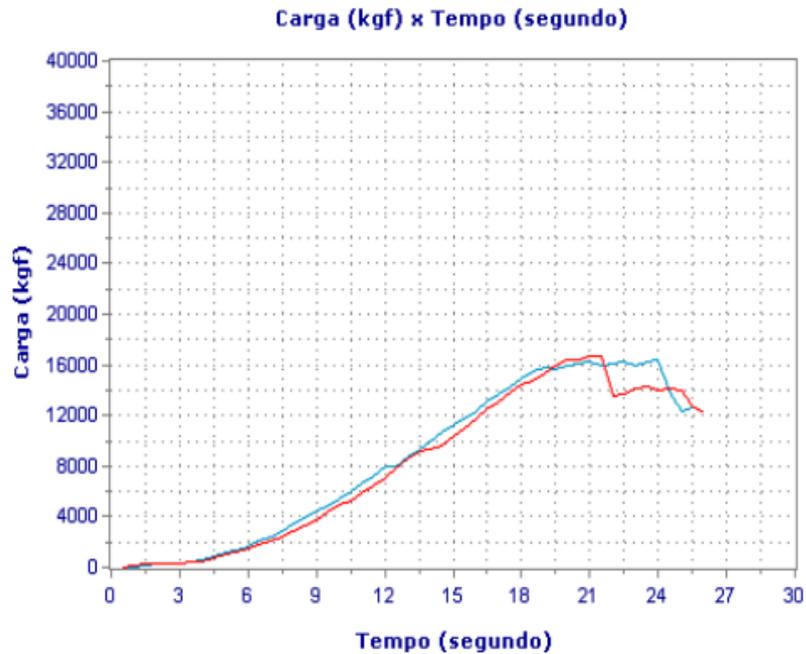
Figura 43 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPV ARI aos 14 dias



Fonte: o autor (2019).

O gráfico de carga x tempo para o CPR com 21 dias está disposto na Figura 44, apresentada a seguir.

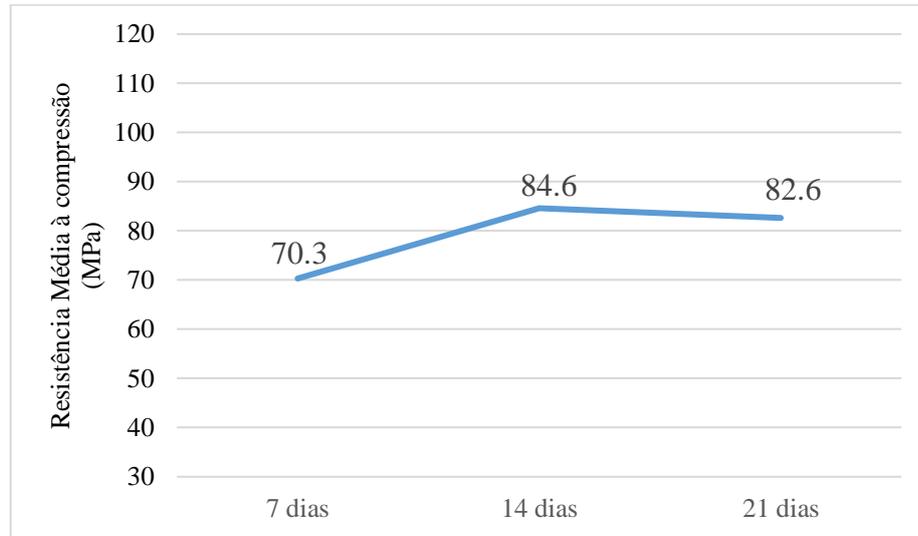
Figura 44 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPV ARI aos 21 dias



Fonte: o autor (2019).

O Gráfico 1 apresentado abaixo, descreve a resistência média apresentada pelo CPR ao longo do tempo, como é possível analisar, o aumento mais significativo de resistência acontece nos primeiros 14 dias, observando um aumento de 20% em relação ao ensaio realizado aos 7 dias, após isso, para o CPR com 21 dias pode-se notar que há uma estabilização no ganho de resistência.

Gráfico 1- Resistência a Compressão traço 1 com uso do CPV ARI



Fonte: o autor (2019).

A mesma análise foi feita para o cimento branco, onde também foi necessário aumentar a relação a/c para 0,3, verificando que não foi possível realizar a mistura e obter a boa homogeneidade do concreto. O consumo total de material pode ser observado na Tabela 11.

Tabela 11 - Consumo de material traço 1 CPB 40

Material	Quantidade (kg)	Consumo material (Kg/m³)
Cimento	1	838,70
Sílica ativa	0,25	209,67
Pó de quartzo	0,28	234,83
Areia #60	0,55	461,28
Areia #30	0,55	461,28
Superplastificante	0,03	25,16
Água	0,2	251,61

Fonte: o autor (2019).

Os resultados dos ensaios de compressão no cimento branco podem ser observados na Tabela 12.

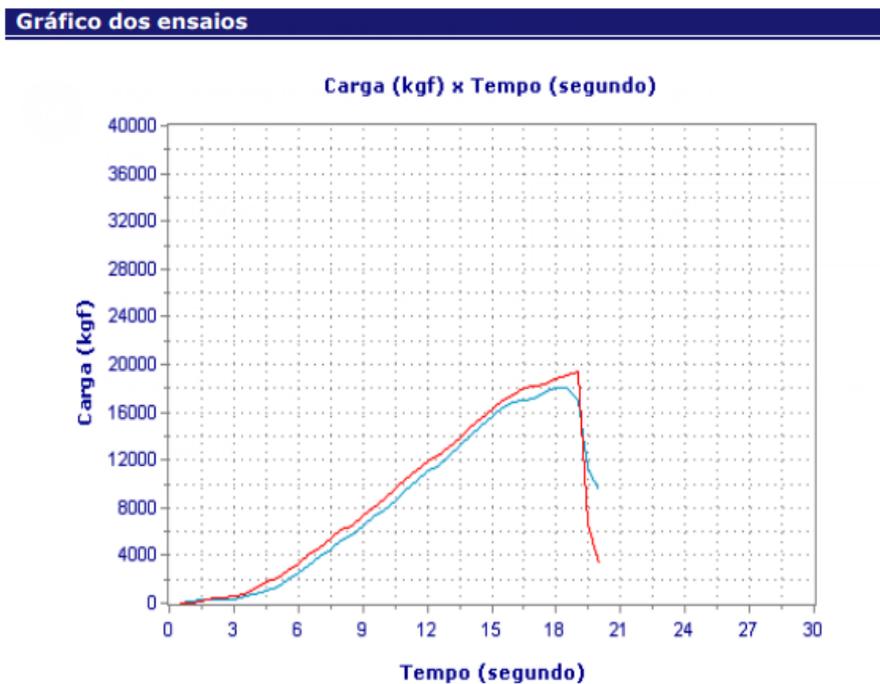
Tabela 12 - Resultado da resistência à compressão traço 1 com CPB 40

	7 dias	14 dias	21 dias
Tensão de Ruptura (MPa)	86,8	85,6	78,1
	93	73,7	120,5
Média tensão de ruptura	89,9	79,6	99,3
Força de Ruptura (tf)	18,09	17,14	15,6
	19,38	14,75	24,12
Média força de ruptura	18,735	15,945	19,87

Fonte: o autor (2019)

O gráfico do ensaio com a relação entre carga aplicada (kgf) e tempo de aplicação (segundos) para o CPB 40 com 7 dias. Pode ser analisado na Figura 45.

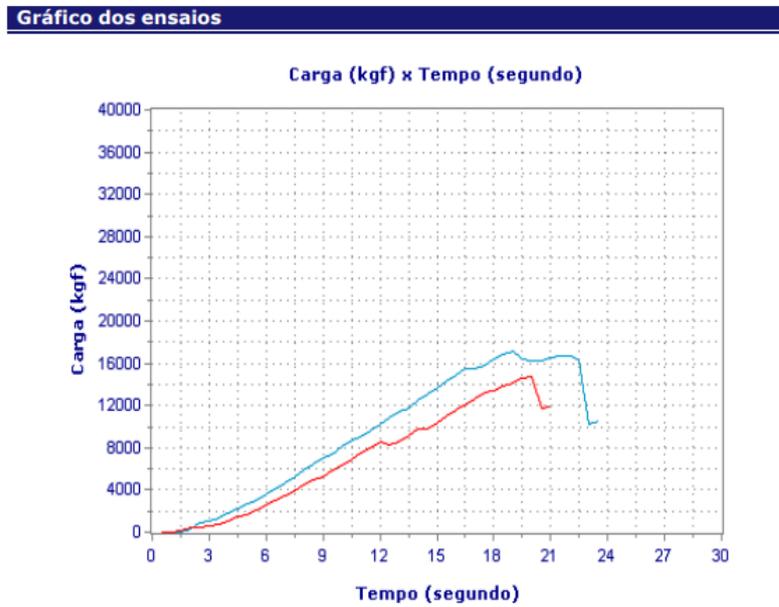
Figura 45 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPB 40 aos 7 dias



Fonte: o autor (2019).

O mesmo gráfico foi disponibilizado para o ensaio de compressão com 14 dias, conforme Figura 46.

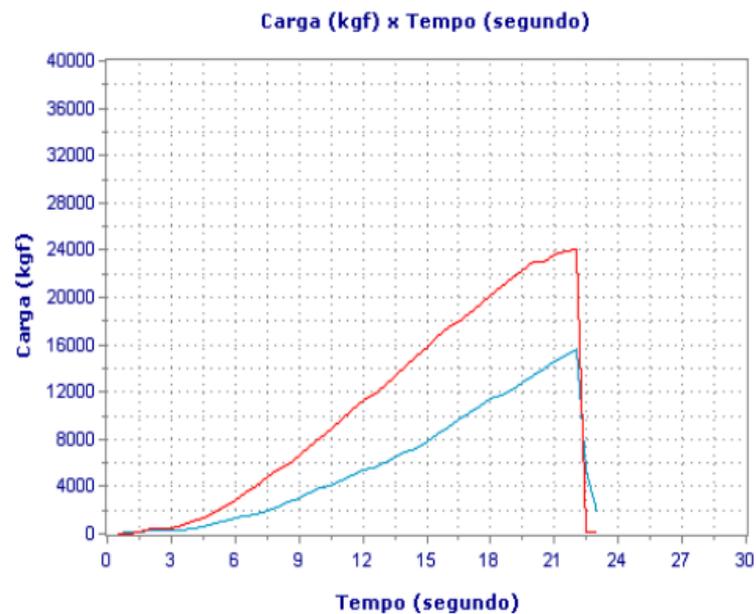
Figura 46 - Gráfico força x tempo, traço 1 CPB 40 aos 14 dias



Fonte: o autor (2019).

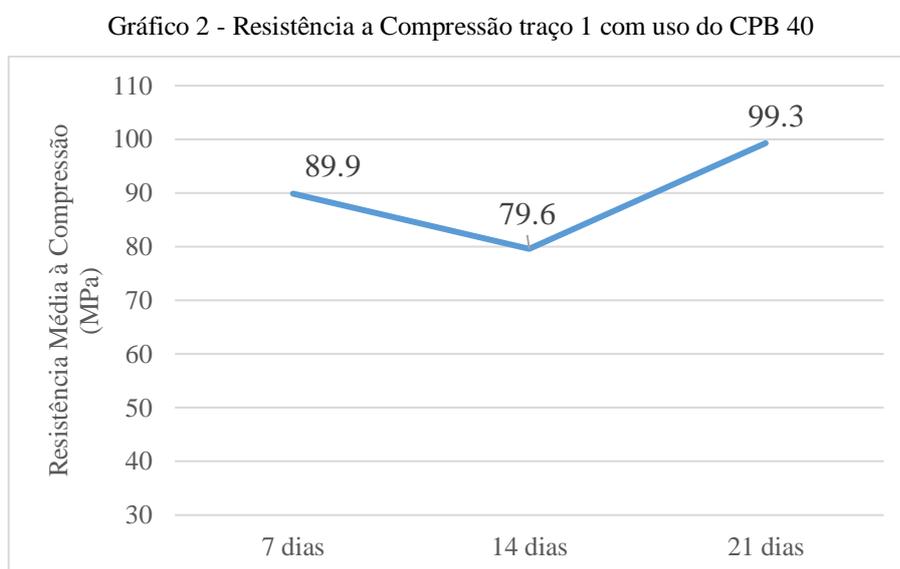
O gráfico de carga x tempo para o CPR com 21 dias está disposto na Figura 47, apresentada a seguir.

Figura 47 -Gráfico força x tempo, traço 1 CPB 40 aos 21 dias



Fonte: o autor (2019).

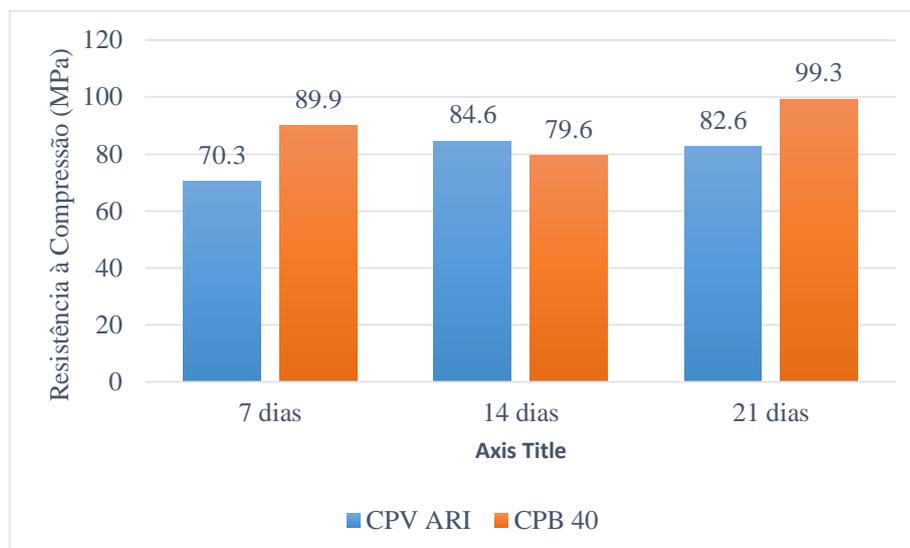
O Gráfico 2 apresenta a resistência média do CPR com CPB 40, onde pode-se notar um desempenho diferente ao apresentado anteriormente no Gráfico 1 com o uso do CPV ARI. Como pode ser analisado no gráfico, o CPR com o uso do CPB apresentou uma resistência maior aos 7 dias, um desempenho negativo aos 14 dias, havendo uma redução de 11,5% em relação ao resultado obtido aos 7 dias de idade e novamente uma evolução na resistência aos 21 dias, podendo observar um aumento de 25% de resistência em comparação aos 14 dias. Essa variação pode ser justificada pela utilização de poucos corpos-de-prova nos ensaios, observando que não foi possível a utilização de mais amostras visto que para a aplicação da pressão confinante foi possível produzir apenas seis moldes, capacidade do aplicador de pressão.



Fonte: o autor (2019).

No Gráfico 3 é possível obter uma comparação entre as resistências obtidas pelo CPR com o uso do CPV ARI e do CPB 40, concluindo que o CPR com o uso do cimento branco, obteve um melhor desempenho em comparação ao CPV ARI obtendo um desempenho 20% maior aos 21 dias em relação ao cimento branco.

Gráfico 3 - Comparação de Resistência do traço 1 do CPR com uso do CPB 40 e CPV ARI



Fonte: o autor (2019).

4.3 Terceira Etapa

Como descrito anteriormente, o segundo traço foi desenvolvido utilizando todas as granulometrias de quartzitos que foram disponibilizadas para a realização do estudo, afim de se obter um melhor empacotamento considerando a teoria do empacotamento real. A primeira análise foi realizada com o cimento cinza e a quantidade de material utilizado para moldar os 6 corpos-de-prova assim como o consumo de material por m³ de concreto estão disposto na Tabela 13.

Tabela 13 - Consumo de material traço 2 CPV ARI

Material	Quantidade (kg)	Consumo Material (kg/m ³)
Cimento	1	752,91
Sílica ativa	0,25	188,22
Areia #30	0,36	271,05
Areia #60	0,36	271,05
Areia #80	0,36	271,05
Pó de quartzo #100	0,36	272,55
Pó de quartzo #200	0,1	75,29
Pó de quartzo #325	0,1	75,29
Pó de quartzo #400	0,1	75,29
Superplastificante	0,03	22,58
Água	0,2	150,58

Fonte: o autor (2019).

Durante a produção, verificou-se também que a relação a/c de 0,20 não foi suficiente para realizar a mistura dos materiais, sendo necessário aumentar o consumo de água. Desta vez o processo de adição foi feito de forma gradativa, mudando a velocidade e ajustando a altura da bacia da armagassadeira afim de obter a melhor mistura dos matérias sem que o misturador parasse, sendo assim foi possível chegar em uma relação a/c de 0,25, um pouco menor que a relação usada anteriormente, na primeira etapa.

Para cada ensaio também foram utilizados dois corpos de prova, sendo possível para esta etapa, determinar a resistência do concreto aos 7 e 14 dias, como exposto na Tabela 14.

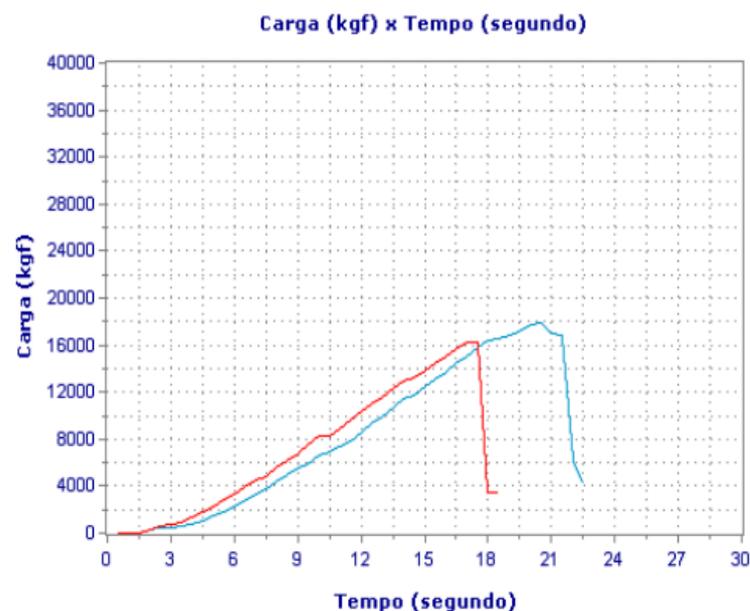
Tabela 14 - Resultado da resistência à compressão traço 2 com CPV ARI

	7 dias	14 dias
Tensão de Ruptura (MPa)	89,3	131,2
	81,2	90
Média tensão de ruptura	85,2	110,6
Força de Ruptura (tf)	17,87	26,26
	16,26	18,01
Média força de ruptura	17,06	22,13

Fonte: o autor (2019).

O gráfico do ensaio com a relação entre carga aplicada (kgf) e tempo de aplicação (segundos) para o CPV ARI com 7 dias. Pode ser analisado na Figura 48.

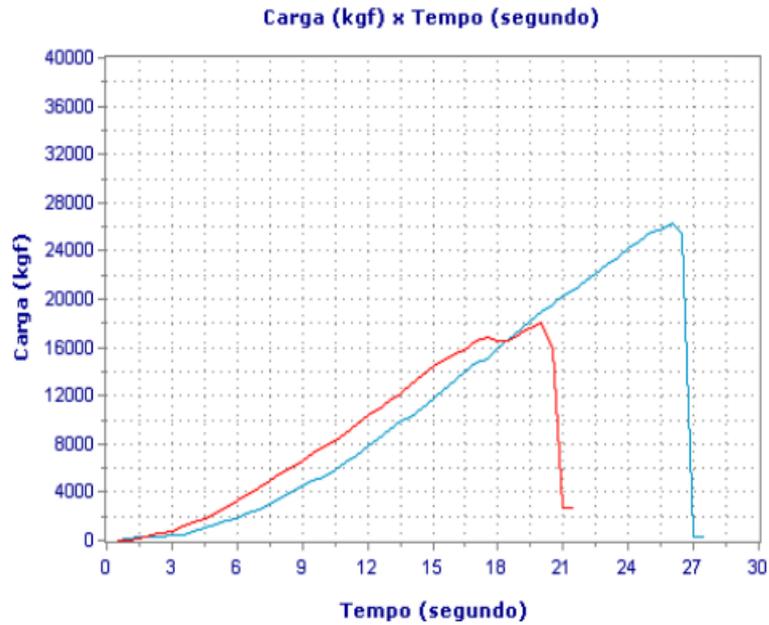
Figura 48 - Gráfico força x tempo, traço 2 CPV ARI aos 7 dias



Fonte: o autor (2019).

O mesmo gráfico pode ser observado para o cimento com 14 dias, como exposto na Figura 49.

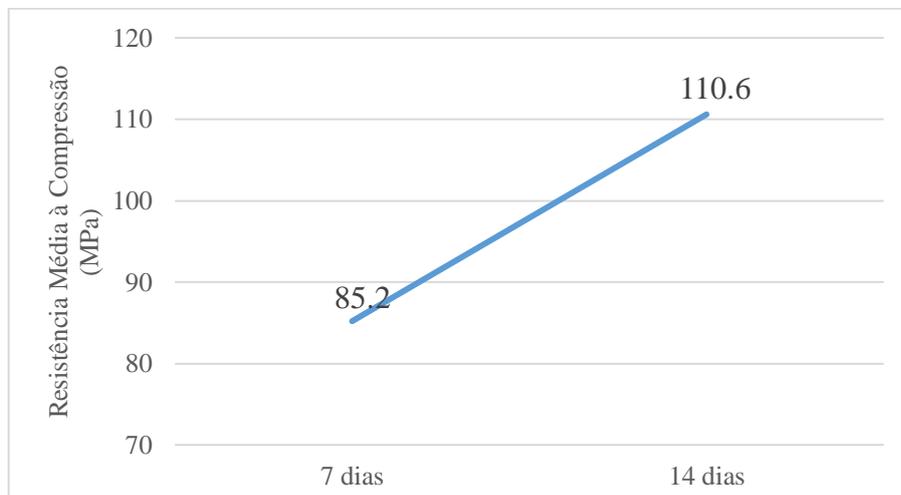
Figura 49 - Gráfico força x tempo, traço 2 CPV ARI aos 14 dias



Fonte: o autor (2019)

O Gráfico 4 apresentado abaixo, descreve a resistência média apresentada pelo CPR ao longo do tempo, no qual foi realizado somente aos 7 e 14 dias. Como pode ser analisado, para o segundo traço o CPR obteve um desempenho maior entre os 7 e 14 dias, observando um aumento de 30% em sua resistência.

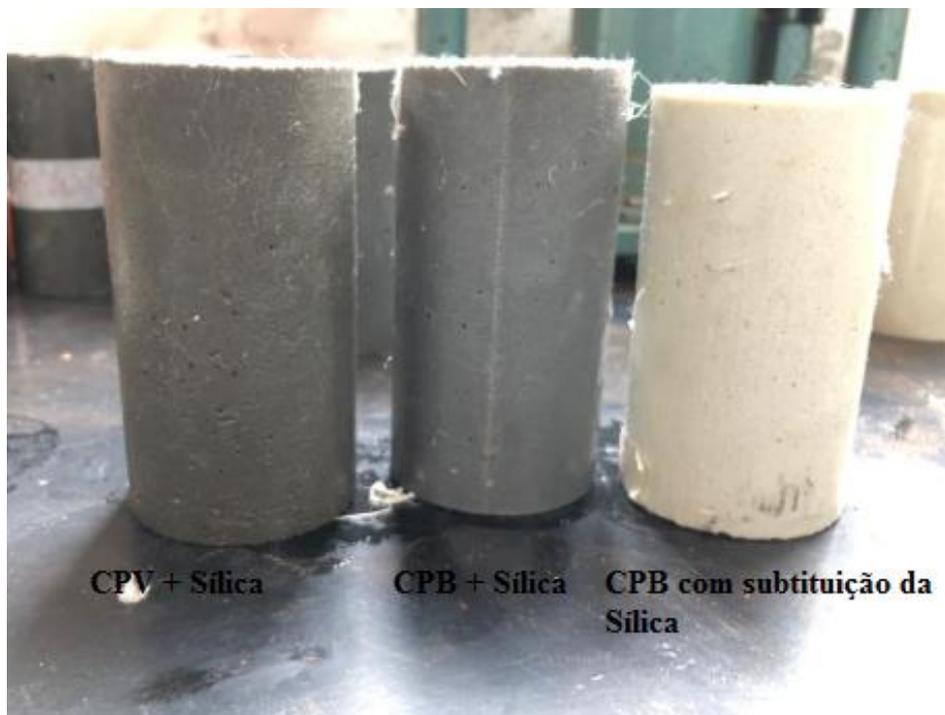
Gráfico 4 - Resistência a Compressão traço 2 com uso do CPV ARI



Fonte: o autor (2019).

Para o desenvolvimento do segundo traço com o CPB, afim de garantir a aspecto branco do concreto com o objetivo de ser utilizado para fins arquitetônicos, foi necessário então substituir a sílica ativa pelo cimento branco, que foi adicionado na mesma proporção. Visto que, com o desenvolvimento do traço 1 foi possível analisar que a sílica altera a cor do concreto, deixando-o na mesma tonalidade do cimento convencional, muitas vezes inviabilizando o seu uso, se observado o custo mais elevado do cimento branco. De acordo com a Figura 50 é possível observar que a diferença de tonalidade entre os concretos desenvolvidos.

Figura 50 - Diferença de tonalidade entre o CPR



Fonte: o autor (2019)

Desta forma o consumo de material utilizado para o desenvolvimento do CPR do cor branca é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Consumo de material traço 2 CPB 40

Material	Quantidade (kg)	Consumo Material (kg/m ³)
Cimento	1,25	964,925872
Sílica ativa	0	0
Areia #30	0,36	277,8986511
Areia #60	0,36	277,8986511
Areia #80	0,36	277,8986511
Pó de quartzo #100	0,36	277,8986511
Pó de quartzo #200	0,1	77,19406976
Pó de quartzo #325	0,1	77,19406976
Pó de quartzo #400	0,1	77,19406976
Superplastificante	0,03	23,15822093
Água	0,2	154,3881395

Fonte: o autor (2019).

Durante o desenvolvimento do concreto, devido ao consumo elevado do cimento, a relação a/c adotada inicialmente não foi suficiente para a produção do CPR, obtendo uma dificuldade maior durante a mistura se comparado ao traços produzidos anteriormente. Sendo assim, para haver uma boa homogeneização da mistura e garantir a trabalhabilidade do concreto, foi necessário aumentar o consumo de água do compósito para 0,4, uma relação a/c alta para garantir um concreto com resistência elevada, o que é esperado para concretos de alto desempenho.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados aos 7 e 14 dias, sendo utilizados dois corpos-de-prova para cada ensaio. Como observado na Tabela 16.

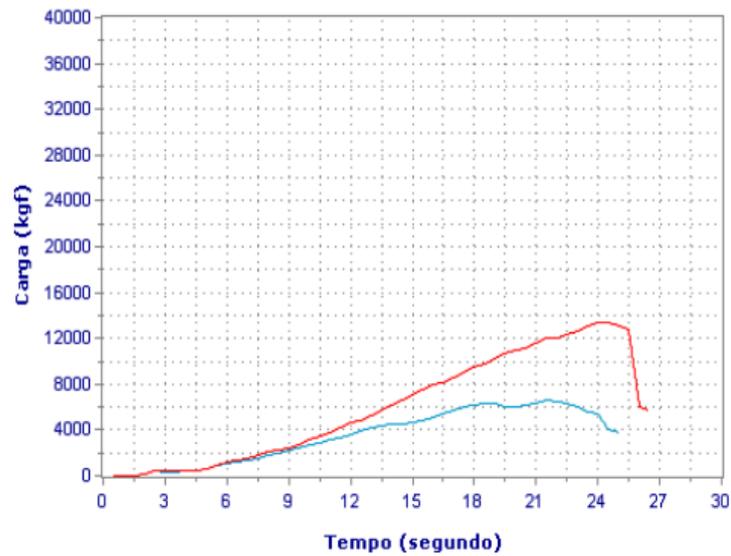
Tabela 16 - Resultado da resistência à compressão traço 2 com CPB 40

	7 dias	14 dias
Tensão de Ruptura (MPa)	32,8	83,3
	67	80,5
Média tensão de ruptura	49,9	81,9
Força de Ruptura (tf)	6,56	16,67
	13,42	16,12
Média força de ruptura	9,99	16,39

Fonte: o autor (2019).

O gráfico do ensaio com a relação entre carga aplicada (kgf) e tempo de aplicação (segundos) para o CPB ARI com 7 dias. Pode ser analisado na Figura 51.

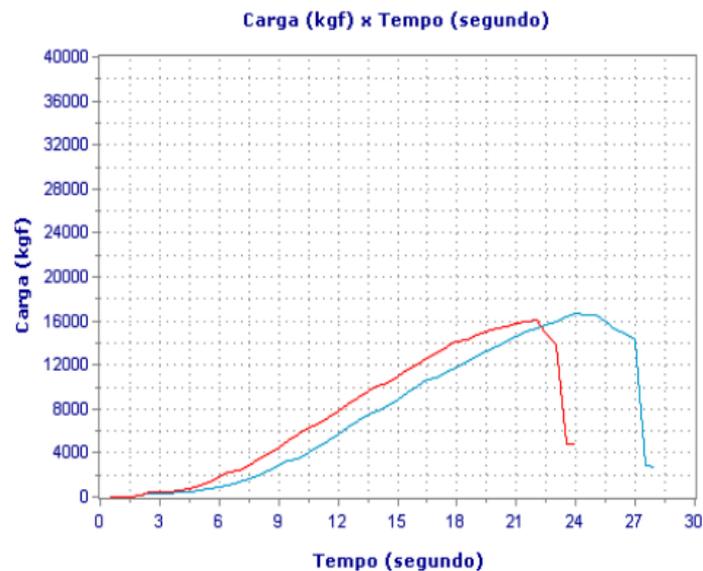
Figura 51 - Gráfico força x tempo, traço 2 CPB aos 7 dias
Carga (kgf) x Tempo (segundo)



Fonte: o autor (2019).

O mesmo gráfico pode ser observado para o cimento com 14 dias, como exposto na Figura 52.

Figura 52 - Gráfico força x tempo, traço 2 CPB aos 14 dias

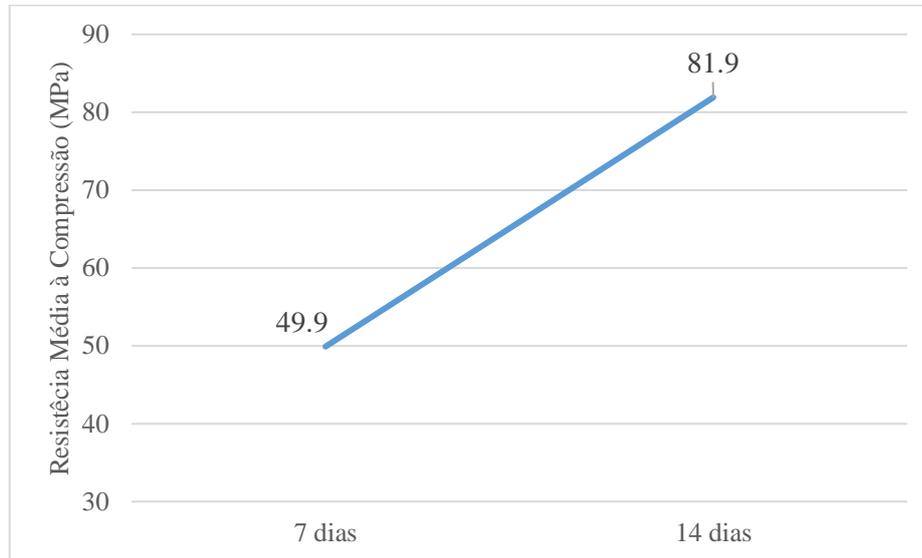


Fonte: o autor (2019).

O Gráfico 5 apresentado abaixo, descreve a resistência média apresentada pelo CPR com a substituição da sílica ativa pelo cimento branco. Como pode ser analisado, devido a remodelação do CPR houve uma diminuição considerável de sua resistência, que pode ser

justificado pela uso excessivo de água ($a/c = 0,4$) e pela substituição da sílica ativa que auxilia na microestrutura do material, acelera as reações pozolânicas e melhora a zona de transição da mistura.

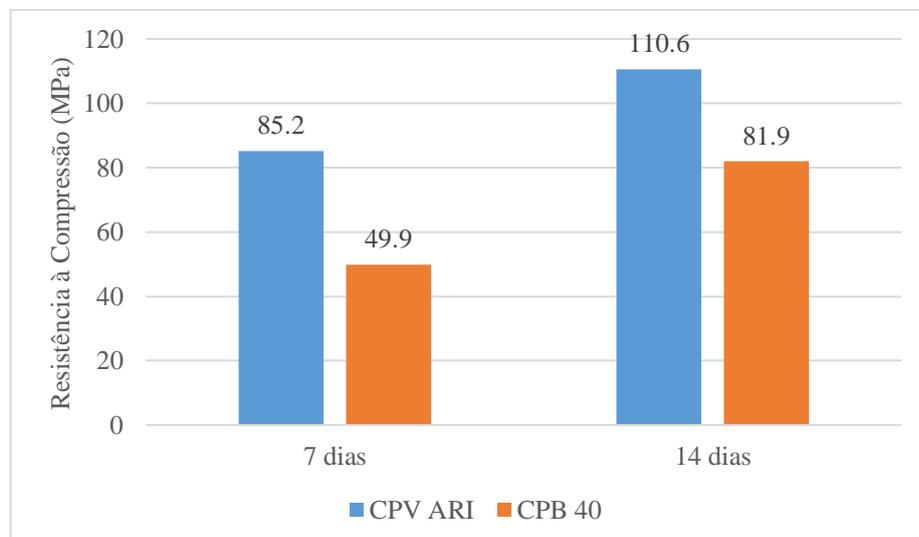
Gráfico 5 - Resistência a Compressão traço 2 com uso do CPB 40 e substituição da sílica ativa



Fonte: o autor (2019)

No Gráfico 3 é possível obter uma comparação entre as resistências obtidas pelo CPR com o uso do CPV ARI e do CPB 40, concluindo que o CPR com o uso do cimento cinza obteve um melhor desempenho em comparação ao CPB 40, considerando as desvantagem já citadas anteriormente, obtidas pela substituição da sílica ativa por cimento.

Gráfico 6 - Comparação de Resistência do traço 2 do CPR com uso do CPB 40 e CPV ARI



Fonte: o autor (2019).

A Figura apresenta a rupturas dos corpos-de-prova pelo ensaio de resistência à compressão, onde é possível observar que os mesmo obtiveram um bom empacotamento das partículas, analisando a existência de uma mistura mais homogênea, coesa e com baixa porosidade.

Figura 53- Rompimento corpos-de-prova



Fonte: o autor (2019).

5 CONCLUSÃO

Com base nas análises e resultados obtidos nesta pesquisa, juntamente com a revisão bibliográfica realizada, foi possível constatar que o concreto de pós reativos é um concreto especial de resistência elevada que possui características próprias, como sua microestrutura e propriedades dinâmicas. Porém para o melhor aproveitamento de suas propriedades é necessário uma cuidadosa avaliação de seus materiais constituintes, assim como a adequada determinação granulométrica dos agregados, onde é possível determinar o melhor empacotamento das partículas.

Sendo assim foram desenvolvidos alguns ensaios e estudos, para analisar as propriedades do cimento cinza e do cimento branco, afim de desenvolver a melhor dosagem e produção para ambos cimentos. Com base em todos os resultados obtidos neste trabalho, pode concluir, para os materiais e métodos utilizados nesta pesquisa que:

- O CPR com utilização de quartzitos em granulometrias diversas obteve um aumento de 30% em sua resistência à compressão aos 14 dias, se comparado ao traço 1 em que foram utilizados apenas as granulometrias indicadas para o CPR;
- A utilização do CPB garantiu um aumento de 20% na resistência do CPR em relação ao uso do CPV ARI;
- O uso da sílica ativa altera a cor do cimento branco, não sendo possível sua utilização quando se deseja garantir a brancura do CPR;
- A substituição da sílica ativa pelo CPB, afim de garantir o aspecto branco no concreto ocasionou uma redução de 26% na resistência à compressão;
- O consumo elevado do cimento branco necessitou de uma relação a/c maior, o que ocasionou a diminuição da resistência do CPR;
- A aplicação de pressão confinante foi de grande importância no estudo, visto que com ela foi possível a eliminação de uma parcela de ar aprisionado e excesso de água presentes no concreto;

O CPR desenvolvido neste estudo mostrou-se bastante promissor e com grande desempenho mecânico, atingindo resistências a compressão de 110,6 MPa aos 14 dias. No entanto o CPR não se enquadra a classe dos CUAD's visto que não atingiu as resistências esperadas para essa classe de concretos, com isso alguns fatores devem ser considerados, como:

- O uso de tratamento térmico é de grande importância para o desenvolvimento do CPR, e não foi possível ser aplicado. Ele que favorece as reações pozolânicas e melhora a microestrutura granular da matriz, onde é possível obter aumentos de até 50% em sua resistência a compressão nas primeiras horas;
- É importante garantir relações a/c baixas, em torno de 0,16 e 0,20, no entanto a argamassadeira disponível no laboratório não foi capaz de realizar uma boa homogeneização do material que apresenta uma compacidade elevada, sendo necessário aumentar a relação a/c para 0,3 e 0,4 para o CPR com a substituição da sílica ativa;
- A aplicação de pressão confinante foi de grande importância, no entanto, por ser uma carga baixa não foi possível garantir uma boa redução do volume de vazios além de ocorrer uma pequena perda de material.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros:

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se destacar os seguintes itens:

- Realizar ensaios mais complexos, como módulo de elasticidade, resistência a tração, trabalhabilidade, absorção de água por sucção capilar e ataque químico;
- Submeter os corpos de prova a cura térmica e analisar as diferenças de resistência;
- Utilizar a incorporação de fibras de aço;
- Realizar ensaios após os 28 dias de idade do CPR.

REFERÊNCIAS:

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. ABNT NBR 7214:2015. **Areia normal para ensaio de cimento - Especificação**, Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NM248:2003. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118:2014. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento**, Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16605:2017. **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**, Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6522:2017. **Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**, Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697:2018. **Cimento Portland - Requisitos**, Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRO DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7215:2019. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**, Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de Utilização do Cimento Portland**, São Paulo, n. 7, 2002.
- BAILONI, W. **O desafio tecnológico de concreto e aço**. Revista Técnica 89 , agosto 2004.
- BITTENCOURT, B. A. **Moldagem por compressão a frio do polietileno de ultra alto peso molecular**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.
- BIZ, C. E. **Concreto de pós reativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil**. Universidade Federal de São Carlos , São Carlos , 2009.
- CASTRO, L. A. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) - Universidade de São Paulo, São Carlos , 2007.
- CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com mistura híbrida de fibras e reduzido impacto ambiental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós graduação em Engenharia Civil , Unisinos, São Leopoldo, p. 109, 2014.

FÁVERO, R. B. **Caracterização mecânica de material compósito cimentício avançado à base de pós reativos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul., Porto Alegre, 2016.

FONSECA, A. A.; NUNES, A. **Betão Branco: fabrico, características e utilização estrutural**. In: Jornada de Betão, Portugal, 1995.

FORMAGINI, S. **Dosagem científica e caracterização mecânica de concreto de altíssimo desempenho**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós- graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Fevereiro 2005.

FORMAGINI, S. Aplicação estrutural de concretos de altíssimo desempenho reforçados com fibras de aço. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Nova Iguaçu, v. 6, n. 1, junho 2006.

KARCHMER, A. Archdaily. **ArchDaily**, 2019. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/913778/palau-de-les-arts-reina-sofia-santiago-calatrava>>. Acesso em: 9 maio 2019.

KEIL, F. **Cemento: Fabricacion, propiedades y aplicaciones**. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A, 1973.

KIRCHHEIM , A. P. et al. **Concreto: Ciência e Tecnologia** - Concreto Branco. cap. 46. ed. [S.l.]: Instituto Brasileiro de Concreto, 2018.

MACIEL, A.. **Ánalise experimental de vigas armadas de concreto de alto desempenho com diferentes tipos de fibras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) da Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

MALLMANN, P. F. **Concreto de pós reativos: adição de nanosílica**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul , Porto Alegre, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**., São Paulo: Ibracon, p. 674, 2008.

NETO, A. A. D. M.; HELENE, P. R. L. **Módulo de elasticidade: Dosagem e avaliação de modelos de previsão do módulo de elasticidade de concretos**. Ibracon, São Paulo, 2002.

PANDOLFELLI, V. et al. **Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico**. Fazendo Arte Editorial, São Paulo, 2000.

PEREIRA, A. C. et al. **CIMENTO PORTLAND**. Universidade do Estado do Mato Grosso. Sinop. 2013.

PICCININI, Â. C.; MACHADO, G. F. **Análise experimental do comportamnto do concreto de pós reativos - CPR com e sem fibras**. Revista-Técnico-Científica de Engenharia Civil / UNESC, v. 1, n. 1, Setembro 2018.

REGINATO, A. L. **Emprego do modelo teórico d empacotamento de partículas para dosagens de concreto de pós reativos e análise das propriedades mecânicas**. Universidade do Oeste de Santa Catarina , Joaçaba , 2011.

REVISTA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Aplicação estrutural de concretos de altíssimo desempenho reforçados com fibras de aço**, Rio de Janeiro, 2006.

RICHARD, ; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement an concrete research.**, v. 25, n. 7, 1995.

ROBERTO, F. A. C. **CIMENTO**. AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2001.

SIZA, Á. Archdaily. **ArchDaily**, 2011. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/01-2498/fundacao-ibere-camargo-alvaro-siza>>. Acesso em: 9 maio 2019.

SIZA, Á. Archdaily. **ArchDaily**, 2016. Disponível em: <<https://www.archdaily.com.br/br/798027/serie-de-exposicoes-e-conferencias-de-alvaro-siza-em-roma>>. Acesso em: 9 maio 2019.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de Alto e Ultra-Alto Desempenho**. Concreto: ciência e tecnologia, São Paulo, n. 1, 2011.

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

VANDERLEI, R. D.; GIONGO, J. S. **Análise experimental do concreto de pós reativos**. Dosagem e propriedade mecânicas, São Carlos , 2006.

VIAPIANA, L. G. **Influência do confinamento na resistência e ductilidade de pilares curtos de concreto de ultra alta resistência submetidos à compressão centrada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Engenharia Civil (Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2016.