

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MATERIAL
COMPÓSITO CIMENTÍCIO AVANÇADO
À BASE DE PÓS REATIVOS**

Rafael Burin Fávero

Porto Alegre
2016

RAFAEL BURIN FÁVERO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MATERIAL
COMPÓSITO CIMENTÍCIO AVANÇADO
À BASE DE PÓS REATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em
Engenharia

Porto Alegre
2016

RAFAEL BURIN FÁVERO

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MATERIAL
COMPÓSITO CIMENTÍCIO AVANÇADO
À BASE DE PÓS REATIVOS**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Construção, e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 23 de maio de 2016.

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
PhD, University of LEEDS
Orientador

Prof. Carlos Torres Formoso
Coordenador do PPGE/C/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ana Paula Kirchheim (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Bernardo Fonseca Tutikian (UNISINOS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Prof. Mauricio Mancio (UNISINOS)
PhD pela University of California – Berkeley, USA

Dedico este trabalho aos meus Pais,

Jerônimo e Maria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pela minha família, pela minha história e pelas inúmeras oportunidades a mim ofertadas.

Agradeço especialmente aos meus Pais, Jerônimo e Maria, por seu empenho, por nunca pouparem esforços na minha educação, pela lição de vida, pelo exemplo de honestidade e retidão, pelo incentivo e pela confiança que possibilitaram a minha dedicação aos estudos para alcançar mais um objetivo.

Agradeço à minha irmã Ana Maria, sempre companheira nas horas boas e ruins, por ser minha família longe de casa, pelo carinho, pelo amor e pela dedicação ao dia-a-dia, além de aturar este autor em tantos momentos.

Agradeço à minha esposa Franciéli, por seu apoio incondicional, pelo incentivo e pela imensa ajuda na construção deste trabalho, especialmente nas horas mais difíceis. Por sempre acreditar em mim e por me dar os últimos empurrões na etapa final, além de ser uma pessoa maravilhosa, que me faz muito feliz, e de quem muito me orgulho.

Agradeço a toda a minha família de Porto Alegre, pela companhia, pelos finais de semana de relaxamento e alegria nas horas mais complicadas e pelo carinho longe da minha casa.

Agradeço ao Prof. Luiz Carlos, orientador deste trabalho, pelas suas ideias, pela confiança depositada em mim, por seu entusiasmo pela Engenharia, por sua energia e pelo apoio ao longo das muitas dificuldades e etapas de todo o processo deste trabalho que agora se conclui.

Agradeço ao Prof. Bernardo Tutikian, um grande incentivador deste trabalho e que me apresentou ao tema. Por seu apoio e estímulo desde a minha iniciação como Especialista, pelas oportunidades na carreira acadêmica e profissional e por acreditar no meu potencial, além de abrir as portas da UNISINOS para o estabelecimento de grandes parcerias científicas com a UFRGS e, em especial, com o LEME.

Agradeço aos meus colegas do LEME, em especial ao Lucas, Josué, Bruno e Diego, pelo apoio na construção deste trabalho, pelas ideias e pela ajuda na realização de tantos ensaios, especialmente nos instrumentados, assim como nas análises, seja durante o dia ou até altas horas da noite, e também ao Alexandre, Camila, Lu, Débora, Fernanda, Luiza, Morgane e Tamara, pelo apoio e pela amizade.

Agradeço aos bolsistas do LEME, em especial ao Ricardo, Victor, Michael, Ettore, Taís, Rafa, Lucas, Lívia, Gabriel e Vinícius, sempre tão prestimosos na realização de todas as tarefas necessárias ao bom andamento dos ensaios.

Agradeço aos meus amigos da UNISINOS, em especial ao Roberto Christ, pela amizade, pela parceria científica em tantos trabalhos no tema e pela ajuda na obtenção dos materiais. Agradeço também aos laboratoristas Maurício, Felipe e Rodrigo, sempre muito dispostos a ajudar na realização dos ensaios complementares e de caracterização dos materiais.

Um agradecimento também à direção do LEME e aos amigos que por lá fiz, por me acolherem como uma família e proporcionarem ótimos momentos de convivência dentro e fora do laboratório. Também agradeço aos funcionários do LEME, o Edgar, o Fontes e o seu José, por todo o apoio dispendido na realização das tarefas necessárias ao bom andamento dos ensaios e deste trabalho em si, assim como em outras atividades científicas paralelas.

Por fim, meu agradecimento especial à UFRGS, por se manter uma Universidade pública de excelência, entre as melhores do nosso país, sobrevivendo mesmo em tempos difíceis, e por propiciar as condições necessárias à realização deste e de tantos outros trabalhos.

Muito Obrigado!!

O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são.

Aristóteles

RESUMO

FÁVERO, R. B. Caracterização Mecânica de Material Compósito Cimentício Avançado à Base de Pós Reativos. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

O compósito de pós reativos é um material formado basicamente por uma argamassa de matriz cimentícia ricamente refinada em termos de granulometria e com a inclusão de fibras, como forma de reforço. Entretanto, duas características principais o definem em termos de composição: a quase ausência de armaduras em estruturas construídas com o material e o fato de dispensar o uso de agregados com diâmetro máximo superior a 1 mm, sendo constituído basicamente por pós. O CPR possui características únicas que lhe conferem resistências à compressão de seis a oito vezes superiores ao concreto convencional, e tração e flexão cerca de dez vezes maior, podendo competir diretamente com estruturas em aço. As dificuldades para sua obtenção e utilização residem no fato de ser um material que demanda grande precisão em sua dosagem e também nos custos diretos para sua produção, bem como o desconhecimento em relação ao seu desempenho. O presente estudo comparou três diferentes traços de CPR a um traço de concreto convencional de uso comum na indústria de pré-fabricados, de forma a caracterizá-lo mecanicamente e buscando viabilizar sua produção e aplicação na indústria de pré-fabricados nacional, utilizando cinza volante como alternativa de aglomerante e a hibridização de fibras. Efetuou-se também um estudo comparativo dos custos de sua obtenção em relação ao concreto convencional, levando-se em conta o desempenho mecânico. Os resultados indicam que para todos os traços estudados, em relação ao concreto convencional estabelecido como parâmetro, as principais propriedades mecânicas contemplam uma resistência à compressão até quatro vezes superior; módulo de elasticidade longitudinal 50% superior; resistência à tração na flexão até sete vezes superior e resistência à tração direta cerca de três vezes superior. Com relação aos custos, ao se considerar o seu comportamento mecânico, o CPR se mostrou mais competitivo frente ao concreto convencional, demonstrando que a sua implantação, dentro da indústria de pré-fabricados nacional, pode e deve ser explorada.

Palavras-chave: CPR; compósito; desempenho mecânico; caracterização mecânica.

ABSTRACT

FÁVERO, R. B. Mechanical Characterization of Advanced Reactive Powder Cementitious Composite Material. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Reactive powder composite is a material formed by a richly refined cementitious mortar matrix in terms of grain size and the inclusion of fibers, such as reinforcement. However, two main features define it in terms of composition: the almost absence of reinforcement steel and the use of aggregates with a maximum diameter greater than 1 mm, consisting basically by powder materials. RPC has unique characteristics which confer compressive strength six to eight times higher than conventional concrete and tensile and flexural strength about ten times higher, and may compete directly with steel structures. Difficulties in obtaining and use the material lie in the fact that it requires a great precision in the dosage and also the direct costs for its production, as well as the lack of knowledge about its performance. This study compared three different CPR mixes to a conventional concrete mix, commonly used in the precast industry, in order to characterize it mechanically and intending to disseminate its production and use in the national precast industry by using fly ash as a binder and alternative fiber hybridization. It also made a comparative study between the costs of obtaining CPR compared to conventional concrete, taking into account the mechanical performance. The results indicate that for all mixes studied in relation to conventional concrete set as a parameter, the primary mechanical properties include a compressive strength up to four times higher; longitudinal elastic modulus exceeding 50%; bending tensile strength up to seven times and resistance to direct tension about three times higher. Considering the costs compared to the mechanical behavior, CPR was found more competitive against the conventional concrete, demonstrating that its implementation within the national precast industry can and should be explored.

Key words: RPC; reactive powder; composite material; mechanical characterization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA.....	20
1.2 OBJETIVOS.....	22
1.2.1 Objetivo principal.....	23
1.2.2 Objetivos específicos.....	23
1.3 DELIMITAÇÕES.....	24
1.4 LIMITAÇÕES.....	24
1.5 DELINEAMENTO DA PESQUISA	25
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2. COMPÓSITO DE PÓS REATIVOS – CPR.....	28
2.1 DEFINIÇÃO.....	28
2.2 HISTÓRICO.....	29
2.3 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO CPR.....	31
2.4 PRINCÍPIOS BÁSICOS DO CPR	37
2.4.1 Empacotamento de partículas	38
2.4.2 Cura térmica	43
2.4.3 Aplicação de pressão confinante	45
2.5 COMPOSIÇÃO TÍPICA DO CPR.....	46
2.5.1 Cimento	46
2.5.2 Areia.....	47
2.5.3 Aglomerantes suplementares.....	47
2.5.4 Fíler	50
2.5.5 Aditivo superplastificante e modificador de viscosidade	51
2.5.6 Fibras	51
2.6 PROPRIEDADES DO CPR	54
2.6.1 Resistência mecânica	54
2.6.2 Durabilidade	57
2.6.3 Sustentabilidade.....	60
2.7 DIMENSIONAMENTO.....	61
2.8 CUSTOS.....	63
3. MATERIAIS	66
3.2 AGLOMERANTE PRINCIPAL	66
3.3 AGLOMERANTES SUPLEMENTARES	68
3.3.1 Sílica Ativa	68

3.3.2 Cinza volante	69
3.4 AGREGADOS	71
3.4.1 Areia quartzosa de rio beneficiada	72
3.4.2 Areia quartzosa industrial	73
3.4.3 Areia quartzosa natural	74
3.4.4 Brita basáltica	75
3.5 FÍLER (PÓ DE QUARTZO).....	76
3.6 ADITIVOS	77
3.6.1 Superplastificante	77
3.6.2 Modificador de viscosidade	78
3.7 FIBRAS	79
3.7.1 Fibra metálica (AÇO)	79
3.7.2 Fibra de polipropileno (PP)	80
4. MÉTODO - PROGRAMA EXPERIMENTAL	82
4.1 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS	84
4.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA	92
4.3 ENSAIOS	95
4.3.1 Ensaios no estado fresco	95
4.3.2 Ensaios no estado endurecido	95
4.3.3 Avaliações complementares	112
5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	117
5.2 VARIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE.....	117
5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CORPOS DE PROVA MOLDADOS.....	118
5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS.....	122
5.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	125
5.6 COEFICIENTE DE POISSON.....	128
5.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO – 3 PONTOS.....	130
5.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO – 4 PONTOS.....	133
5.9 TENACIDADE NA FLEXÃO – ENSAIO A TRÊS PONTOS	134
5.10 TENACIDADE NA FLEXÃO – ENSAIO A QUATRO PONTOS.....	141
5.11 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA.....	147
5.12 ANÁLISES COMPLEMENTARES	148
5.12.1 Velocidade de propagação de pulso ultrassônico - VPU	148
5.12.2 Análise de custos	152
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	160
7 CONCLUSÕES	162
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	163

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	165
--	------------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –Passarela de Sherbrooke, no Canadá [Fonte: adaptado de BLAIS e COUTURE, 1999].	31
Figura 2 –Ponte rodoviária de Mars Hill, nos EUA [Fonte: adaptado de FHWA, 2013].	32
Figura 3–Ponte/passarela Sakata-Mirai, no Japão [Fonte: adaptado de LAFARGE].	32
Figura 4–Ponte/passarela Seonyu-kyo, na Coreia do Sul [Fonte: disponível em: https://ksamedia.osu.edu/item/38198].	33
Figura 5 – Montagem das coberturas da estação de trens de Shawnessy, no Canadá, utilizando elementos de casca pré-fabricados em CPR [Fonte: adaptado de VICENZINO et al., 2005].	34
Figura 6–Estádio Jean Bouin, em Paris, na França, com elementos de cobertura e de fachada fabricados em CPR[Fonte: adaptado de LAFARGE].	35
Figura 7 – Exemplo de utilização de CPR na construção de uma escadaria residencial [Fonte: adaptado de LAFARGE].	35
Figura 8–Muro de contenção para construção de canais [Fonte: adaptado de VOO et al., 2010].	36
Figura 9–Passarela do MuCEM, na França. [Fonte: adaptado de www.mu cem.org].	36
Figura 10 - Distribuição granulométrica contínua de máxima densidade empacotamento segundo o modelo de Furnas.	40
Figura 11– Distribuições granulométricas contínuas para diferentes valores de q segundo o modelo de Andreassen.	41
Figura 12 - Exemplo de distribuição granulométrica segundo o modelo de Alfred para um q de 0,37 e parâmetros de tamanho máximo e mínimo de partículas. (adaptado de DEMAR/EEL/USP).	42
Figura 13 – Esquema de funcionamento de uma fibra metálica lisa quando mobilizada pela matriz.	53
Figura 14– Porosidade cumulativa do CPR (adaptado de Cheyrezy, 1995).	59
Figura 15 – Distribuição granulométrica do cimento utilizado.	68
Figura 16– Distribuição granulométrica da sílica ativa utilizada.	69
Figura 17 – Distribuição granulométrica da cinza volante utilizada.	70
Figura 18– Difractograma de Raios X da cinza volante utilizada.	71
Figura 19– Distribuição granulométrica da areia quartzosa de rio beneficiada utilizada nos traços de CPR.	72
Figura 20– Distribuição granulométrica da areia quartzosa industrial utilizada nos traços de CPR.	73
Figura 21 – Distribuição granulométrica da areia utilizada no traço do concreto convencional de referência.	74
Figura 22– Distribuição granulométrica da brita utilizada no traço do concreto convencional de referência.	75
Figura 23 – Distribuição granulométrica do pó de quartzo utilizado.	77
Figura 24 – Aspecto visual da fibra metálica utilizada nos traços CPR.	79
Figura 25- Método do trabalho.	83
Figura 26–Diagrama ilustrativo da divisão de traços adotada no programa experimental.	84
Figura 27– Tela do EMMA exemplificando um estudo de empacotamento.	87
Figura 28–Perfil do empacotamento utilizado nos traçosde CPR utilizando um coeficiente $q = 0,20$.	88
Figura 29– Comparativo entre os diâmetros das partículas dos materiais a serem utilizados.	89
Figura 30– Tela do EMMA exemplificando um estudo de empacotamento com a cinza volante para um $q = 0,20$.	90
Figura 31– Equipamento utilizado nas misturas dos traços de CPR.	93
Figura 32– Geometria dos corpos de prova adotados para o ensaio de compressão uniaxial.	97
Figura 33– Detalhe das fôrmas em PVC confeccionadas para os ensaios de compressão nos corpos de prova dos traços de CPR.	97
Figura 34– Detalhe das marcações e da extração dos corpos de prova nos prismas ensaiados à flexão.	98
Figura 35– Aspecto dos corpos de prova extraídos dos prismas ensaiados à flexão.	99
Figura 36–Geometria dos corpos de prova adotados no ensaio de flexão a três pontos.	100
Figura 37– Esquema de carregamento do prisma de 150x150x550 mm no ensaio de flexão a três pontos com fissura induzida por entalhe.	101
Figura 38– Detalhe do entalhe executado nos prismas para execução do ensaio de flexão a três pontos CMOD.	101
Figura 39– Execução do ensaio de flexão a três pontos CMOD com a instrumentação para medição dos deslocamentos.	102
Figura 40– Critério para a determinação da tenacidade segundo a RILEM TC 162-TDF (2002).	102
Figura 41– Esquema de carregamento do prisma de 40x40x160 mm no ensaio de flexão a três pontos.	103
Figura 42– Realização do ensaio de flexão a três pontos no prisma de 40x40x160 mm.	104
Figura 43– Geometria do corpo de prova prismático utilizado no ensaio de tração na flexão a quatro pontos.	104
Figura 44– Esquema de carregamento do ensaio de flexão a quatro pontos.	105

Figura 45– Execução do ensaio de flexão a quatro pontos com medição dos deslocamentos transversais.	105
Figura 46– Critério da JSCE SF-4 para a determinação da tenacidade na flexão [Fonte: adaptado de Figueiredo, 2005].	106
Figura 47– Geometria dos corpos de prova adotados para o ensaio de tração direta nos traços de CPR.	107
Figura 48– Corpos de prova utilizados no ensaio de tração direta dos traços de CPR.	108
Figura 49– Detalhe da execução do ensaio de tração direta.	108
Figura 50– Detalhe da execução do ensaio de compressão diametral para determinação da resistência à tração do concreto convencional.	109
Figura 51– Geometria dos corpos de prova adotados para o ensaio de módulo de elasticidade estático.	110
Figura 52– Execução do ensaio para determinação do módulo de elasticidade longitudinal e transversal à compressão utilizando um compressômetro de três anéis.	111
Figura 53 – Representação esquemática do coeficiente de Poisson.	112
Figura 54– Detalhe da execução do ensaio de VPU em um corpo de prova.	113
Figura 55– Tabela utilizada no registro das leituras de ultrassom.	114
Figura 56– Análise de variância dos resultados de resistência à compressão dos quatro traços para as cinco idades analisadas.	119
Figura 57– Resultados potenciais de resistência à compressão dos quatro traços para as cinco idades analisadas.	120
Figura 58 – Comparativo de valores máximos obtidos nas extrações em relação aos corpos de prova moldados.	124
Figura 59– Resultados do módulo de elasticidade para diferentes teorias e para os valores experimentais.	128
Figura 60 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos do traço CPR 1.	135
Figura 61 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos do traço CPR 2A.	136
Figura 62 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos do traço CPR 2B.	137
Figura 63 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos do traço CC 40.	138
Figura 64 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos compilando os melhores resultados obtidos para cada um dos traços analisados.	139
Figura 65 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos do traço CPR 1.	141
Figura 66 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos do traço CPR 2A.	142
Figura 67 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos do traço CPR 2B.	143
Figura 68 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos do traço CC 40.	144
Figura 69 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos compilando os melhores resultados obtidos para cada um dos traços analisados.	145
Figura 70 – Resultados da análise de VPU para os quatro traços.	149
Figura 71 – Resultados médios de VPU para os corpos de prova ensaiados aos 63 dias.	151
Figura 72– Custo proporcional dos constituintes de cada um dos traços analisados considerando quatro grupos principais de materiais.	154
Figura 73 – Comparativo dos custos para fabricação dos quatro traços estudados.	156
Figura 74 - Comparação entre os custos por m ³ do material e os custos do material para confeccção da viga.	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características de alguns materiais compósitos (adaptado de Mehta e Monteiro, 2014).....	28
Tabela 2 – Obras de infraestrutura na área de pontes, passarelas e barreiras de proteção construídas em CPR entre os anos de 1997 e 2013.....	34
Tabela 3– Comparativo entre vigas, de mesma capacidade resistente, utilizando diferentes materiais [Fonte: adaptado de DAURIAC, 1997].....	54
Tabela 4– Características principais do CPR200 e CPR800 [Fonte: RICHARD e CHEYREZY, 1995].....	56
Tabela 5 – Comparativo entre propriedades mecânicas do concreto convencional, concreto de alta resistência e CPR [Fonte: adaptado de DUGAT et al., 1996; GRAYBEAL, 2013].	57
Tabela 6– Composição química e características físico-químicas do cimento utilizado (dados do fabricante e de análise em laboratório).	67
Tabela 7– Composição química e características físico-químicas da sílica ativa utilizada (dados do fabricante).	69
Tabela 8– Composição química e características físico-químicas da cinza volante utilizada.	70
Tabela 9– Análise granulométrica da areia quartzosa de rio beneficiada.	72
Tabela 10– Análise granulométrica da areia quartzosa industrial.	73
Tabela 11– Análise granulométrica da areia quartzosa natural utilizada.....	74
Tabela 12– Análise granulométrica da brita utilizada.	75
Tabela 13– Composição química e características físico-químicas do pó de quartzo utilizado (dados do fabricante).....	76
Tabela 14– Características do aditivo superplastificante utilizado (dados do fabricante).	78
Tabela 15– Características do aditivo modificador de viscosidade utilizado (dados do fabricante).	78
Tabela 16– Composição química do fio máquina (dados do fabricante).....	80
Tabela 17– Características da fibra metálica utilizada (dados do fabricante).....	80
Tabela 18– Características da fibra de PP utilizada (dados do fabricante).....	81
Tabela 19– Materiais adotados no programa experimental.	85
Tabela 20– Exemplo fictício de traço de CPR com utilização de cinza volante considerada no cálculo do empacotamento (valores entre parênteses expressam a porcentagem em massa sobre o total).	90
Tabela 21– Traços unitários adotados no programa experimental.	91
Tabela 22– Resumo completo dos traços adotados no programa experimental.	92
Tabela 23– Resumo do programa experimental.	96
Tabela 24– Geometria dos corpos de prova adotados no programa experimental.	96
Tabela 25– Índices estimativos da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica. [Fonte: IAEA, 2002].....	115
Tabela 26 – Resultados do ensaio de consistência.	117
Tabela 27 – Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial para os corpos de prova moldados.....	118
Tabela 28 - Análise de variância dos resultados de resistência à compressão para os traços de CPR.....	120
Tabela 29 - Comparativo entre os resultados de resistência à compressão e o consumo de materiais utilizados entre o estudo atual e o trabalho de Christ (2014).....	121
Tabela 30 – Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial para os corpos de prova extraídos [91 dias].	123
Tabela 31 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático longitudinal e transversal.	125
Tabela 32 – Resultados calculados para o módulo de elasticidade longitudinal por diferentes expressões [GPa].	126
Tabela 33 – Coeficientes de Poisson obtidos para os quatro traços analisados.	128
Tabela 34 – Resultados experimentais para o coeficiente de Poisson em diferentes estudos sobre CPR [Fonte: extraído de FHWA, 2013].....	129
Tabela 35 – Resultados do ensaio de tração na flexão a três pontos (prisma 150x150x550mm).	130
Tabela 36 – Resultados do ensaio de tração na flexão a três pontos (prisma 40x40x160mm).	131
Tabela 37 - Comparativo entre os resultados de resistência à tração na flexão a três pontos e o consumo de materiais utilizados no trabalho de Christ (2014).....	132
Tabela 38 – Resultados do ensaio de tração na flexão à quatro pontos (prisma 100x100x400mm).....	134
Tabela 39 - Compilação dos resultados do ensaio de tração na flexão a três pontos e comparação com a respectiva resistência à compressão aos 28 dias.	140
Tabela 40 - Compilação dos resultados do ensaio de tração na flexão a quatro pontos, mostrando a tenacidade calculada e a comparação com a respectiva resistência à compressão aos 28 dias.....	146
Tabela 41 - Resultados obtidos no ensaio de tração direta e de compressão diametral.	147
Tabela 42 – Custos levantados (por kg) dos materiais utilizados no programa experimental.	152

Tabela 43–Custos por material, em R\$/m ³ , para cada um dos traços estudados.	153
Tabela 44 – Parâmetros considerados para o cálculo de uma viga fictícia.	157
Tabela 45 - Custos calculados para a viga de 5,00 m de vão para os quatro traços estudados e para o perfil em aço.	157
Tabela 46 - Comparativo entre o consumo de cimento e de sílica ativa com relação às propriedades de resistência à compressão, tração na flexão e tração direta/compressão diametral.	159

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, o concreto armado tem sido o material mais utilizado na engenharia civil para a construção de estruturas com os mais diversos fins. Em função do grande número de pesquisas que vem sendo desenvolvidas ao longo dos anos no intuito de melhor entender suas características, existem inúmeros padrões e normas bem estabelecidas, com especificações e procedimentos que tem por objetivo garantir qualidade e assegurar a segurança estrutural. No entanto, tem-se verificado que muitas estruturas em concreto armado vêm apresentando uma série de problemas de durabilidade a longo prazo, associados principalmente à corrosão, na presença de umidade, por íons cloreto, e a problemas adicionais, tais como o ataque por sulfatos, a reação álcali-agregado, entre outros. Para Chen e El-Hacha (2010), estes problemas resultam em custos elevados de manutenção e reparo, que tem o potencial para atingir a mesma escala do custo inicial de construção de tais estruturas, ou mesmo superá-las.

Para Habel (2004) os objetivos dos projetos de conservação atuais se baseiam na reabilitação ou na melhoria das estruturas existentes. A reabilitação consiste no restabelecimento do desempenho estrutural, ao passo que a melhoria significa que a resposta estrutural em termos de resistência e rigidez é reforçada, por exemplo, para sustentar cargas de tráfego mais elevadas ou para alargar as pontes para a adição de faixas de tráfego. Em ambos os casos, a durabilidade e a segurança de tais estruturas deve ser garantida.

Nesse sentido, existe atualmente um grande interesse por parte da indústria da construção e de órgãos de governo ligados, principalmente, à área de infraestrutura, no que diz respeito à construção e, sobretudo, aos custos de manutenção de estruturas de pontes e viadutos, em função da sua função vital nos sistemas viários e, muitas vezes, de sua localização remota. O último relatório plurianual da ASCE (American Society of Civil Engineers, 2013), aponta que, atualmente, uma em cada nove pontes nos EUA é considerada estruturalmente deficiente, enquanto que a média de idade das 607.380 pontes rodoviárias catalogadas daquele país é de 42 anos, sem contar aquelas consideradas obsoletas.

A FHWA (Federal Highway Administration), órgão federal de administração das rodovias norte-americanas, estima que, para eliminar tal deficiência, seria preciso investir cerca de US\$ 20,5 bilhões por ano, até 2028, ao passo que atualmente já são gastos cerca de US\$ 12,8 bilhões anuais apenas com a manutenção e a conservação de pontes rodoviárias.

Segundo Santos (2003), a maior parte das pontes rodoviárias existentes no Brasil é dos anos de 1960 e 1970, em uma época onde se experimentou um grande desenvolvimento da malha rodoviária nacional. Informações do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) apontam a existência de, aproximadamente, 7.500 pontes em rodovias federais brasileiras – que corresponde a 31,3% da malha rodoviária nacional, segundo levantamento da Confederação Nacional do Transporte – CNT (Pesquisa CNT de rodovias 2015¹), sem contar aquelas em rodovias estaduais (56,1% da malha) e municipais (12,6% da malha). No total, segundo estimativas² da Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE existem cerca de 40.000 pontes e viadutos em rodovias estaduais e federais do país, sendo que apenas 7% destas estruturas recebem algum tipo de manutenção. As entidades ligadas ao setor de transporte rodoviário no país, como a CNT, estimam que pelo menos 30% destas estruturas estejam em condições deficientes.

Esse problema vem se agravando no Brasil com o decorrer dos anos na medida em que as estruturas mais antigas começam a atingir o limite de sua vida útil, muitas delas por estarem trabalhando acima dos limites de sobrecarga para as quais foram originalmente projetadas. Soma-se a isso a falta de manutenção e de investimentos na conservação destas estruturas.

Em função dos altos custos que envolvem a manutenção da infraestrutura, existe um grande interesse em promover e realizar estudos no sentido de desenvolver materiais mais duráveis que possam substituir as estruturas atuais, garantindo uma maior vida útil e um menor impacto financeiro a longo prazo.

Por conta disso, a inovação é, sem dúvida, um importante indutor de desenvolvimento. No entanto, a indústria de materiais de construção é muitas vezes prejudicada por certas restrições, como a fragmentação industrial, o conservadorismo (mas com certas preocupações justificáveis sobre novos produtos e os riscos de responsabilidade civil), a taxa muito lenta de modificação e revisão das normas nacionais e regulamentações internacionais e, claro, a sempre presente necessidade de desempenho e de lucro a curto prazo sob pressão do mercado.

No entanto, existem muitas oportunidades a serem aproveitadas. Em edifícios e obras civis, projetistas almejam, cada vez mais, estruturas delgadas e formas sofisticadas, com superfícies mais agradáveis do ponto de vista estético, materiais mais leves, mais duráveis (elevada vida

¹ Pesquisa CNT de rodovias 2015: relatório gerencial. – Brasília: CNT : SEST : SENAT. 420 p., 2015.

² Dados apresentados durante o V Congresso Brasileiro de Pontes, em 2012.

útil) e com menores custos de manutenção. Apesar de tais limitações, uma série de inovações na tecnologia do concreto tem sido alcançadas e implementadas.

Nos últimos anos, novos métodos de construção, utilizando materiais estruturais de alto desempenho, incluindo novos tipos de concreto, têm sido investigados. As propriedades vantajosas desses materiais incluem uma elevada relação resistência/peso, resistência à compressão acima dos 150 MPa, elevadas resistências à tração e flexão, grande ductilidade, resistência à corrosão e baixíssima permeabilidade, proporcionando uma vida útil das estruturas bastante superior ao que se tem hoje com o concreto armado convencional ou protendido.

1.1 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

Neste contexto de materiais diferenciados, surge um material compósito, conhecido no Brasil pela sigla CPR, utilizada usualmente para designar o concreto de pós reativos. O termo "concreto" é utilizado em vez de "argamassa" para descrever o CPR por causa do comportamento mecânico do material ao se adicionarem as fibras de aço, que lhe conferem maior ductilidade. Entretanto, alguns pesquisadores têm contestado o fato de o material ser chamado de concreto, motivando uma discussão em torno do tema neste trabalho.

O CPR é tido como um material relativamente novo e com grande potencial de aplicação. Considerado um importante avanço tecnológico na área de materiais compósitos para aplicação na construção civil, ele combina uma série de características superiores em relação ao concreto convencional e de alto desempenho empregados atualmente. Dentre estas, podem ser destacadas:

- elevada resistência à compressão: tipicamente de 6 a 8 vezes maior do que a do concreto convencional;
- elevada resistência à flexão: 10 vezes a de um concreto convencional;
- ductilidade: capacidade de se deformar sob cargas excessivas, sem ruptura;
- estética: possibilidade de formas variadas, pequenas espessuras e acabamento superior;

- elevada vida útil: 10 a 100 vezes maior do que a do concreto convencional.

Um grande número de trabalhos foram desenvolvidos investigando as propriedades desse material, sua aplicação estrutural, ensaios de durabilidade, dimensionamento e aplicação prática, demonstrando que a sua utilização pode proporcionar uma série de alternativas de aplicação em várias áreas da construção civil. Dentre todos, podem ser destacados os estudos conduzidos por De Larrard e Sedran (1994), Collepari et al. (1995), Cheyrezy, Maret e Frouin (1995), Richard e Cheyrezy (1995), Mindess (1995), Zanni et al. (1996), Roux et al. (1996), Dauriac (1997), Blais & Couture, (1999), Aïtcin (2001), Jungwirth (2003), Steinberg e Lubbers (2003), Grunewald (2004), Habel (2004), Graybeal (2006), Aydin et al. (2012), entre outros.

O material vem sendo testado e aplicado com grande sucesso, há pelo menos 20 anos, em uma série de obras na Europa, América do Norte, Austrália e partes da Ásia, nos segmentos de pontes rodoviárias, passarelas, painéis de fachada, mobiliário urbano, como revestimento de proteção, injeção, reforço, entre outros. Contudo, não existem registros de sua aplicação comercial nos países da América do Sul, tampouco no continente africano. Hoje, mesmo as iniciativas de pesquisa originadas no Brasil, tem sido ainda incipientes frente às vantagens apresentadas pelo material em termos de desempenho estrutural e de durabilidade a longo prazo. Quando se fala de aplicação prática do material, não existe um registro sequer de estrutura erguida em CPR em solo nacional.

Comercialmente, existe hoje um produto chamado de Ductal ®, um material desenvolvido como resultado de um intensivo programa de pesquisas de três empresas francesas, a Lafarge, a Bouygues e a Rhodia, em colaboração com 10 laboratórios públicos de investigação científica sob concessão do Ministério da Investigação e Indústria da França. O produto é comercializado na Europa, América do Norte e partes da Ásia, como um pré-mix ensacado, trazendo ainda as fibras e os aditivos em separado, formando um “pacote” no qual se adiciona água na quantidade especificada. Utilizando-se de um misturador de alta energia, ou mesmo, em casos específicos, de um misturador convencional para concreto, obtém-se o material pronto para aplicação.

Em geral, as grandes obras já executadas mundo afora em CPR foram construídas utilizando-se desse produto pré-misturado em fábrica. Isso se deve, em parte, às dificuldades envolvidas no processo de obtenção da mistura e do controle granulométrico tão essencial que constitui

um CPR típico. O produto industrializado é fabricado em processo cuidadoso, garantindo bom controle de pesagem, controle da granulometria de todos os componentes da mistura e proporcionamento dos materiais, a seco, de acordo com o melhor empacotamento para cada um dos traços especificados. Hoje, são comercializados cerca de 10 traços diferentes, com especificação para aplicações diversas, que vão desde peças arquitetônicas simples, passando pelo preenchimento de juntas e união de estruturas até peças estruturais completas como painéis arquitetônicos de grandes dimensões e vigas para pontes e passarelas. Todavia, sua produção pode ser facilmente executada em ambiente industrial, como na indústria de pré-fabricados de concreto.

Contudo, um conhecimento mais aprofundado do material é de fundamental importância, uma vez que conhecendo melhor suas propriedades, podem-se executar estruturas mais esbeltas e se utilizar de peças cada vez mais leves, possibilitando a redução de custos com montagem e transporte de peças, aliado a menores espessuras e maior durabilidade. Por conta disso, existe uma série de estruturas construídas com esta tecnologia, principalmente no segmento de pontes, passarelas e painéis de fachada, mostrando a viabilidade técnica e econômica da utilização desse material.

Por conta de tudo isso, este trabalho propõe uma pequena mudança em termos de nomenclatura para o CPR, passando a chamá-lo de material compósito – argamassa de base cimentícia + fibras–, mais precisamente de **compósito de pós reativos**, mantendo a já conhecida sigla para a língua portuguesa: CPR.

Face ao acima exposto, este trabalho busca contribuir para a viabilização do uso do material em escala industrial através de sua caracterização mecânica e análise de custo de produção para uso na indústria de pré-fabricados.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e específicos e são apresentados nos próximos itens.

1.2.1 Objetivo principal

Este trabalho tem como objetivo principal caracterizar mecanicamente três diferentes traços em CPR e analisar os custos dos materiais utilizados na sua aplicação, buscando o melhor traço com características mecânicas favoráveis à sua aplicação frente ao concreto convencional.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- avaliar três traços de CPR, um de resistência convencional, um segundo traço com substituição de 30% de cimento por cinza volante m massa e o terceiro traço com incorporação do mesmo teor de cinza volante, todos eles utilizando dois teores diferentes de fibras, mantendo uma incorporação de 3% em volume, comparando-os a um traço de concreto convencional de utilização usual na indústria de pré-fabricados;
- limitar o consumo de cimento dos traços de CPR a uma faixa entre 600 e 650 kg/m³ e incorporar a cinza volante em substituição na proporção de 30% em relação ao cimento total do traço;
- atingir uma resistência, mínima à compressão de 150 MPa; resistência à tração direta de, no mínimo, 10 MPa; e resistência à tração na flexão de, no mínimo, 35 MPa;
- analisar as propriedades mecânicas, notadamente a resistência à compressão, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson, a resistência à tração na flexão e a resistência à tração direta dos três traços de CPR, juntamente com o traço de concreto convencional;
- fazer uma análise de custos baseada nos materiais utilizados na produção do CPR, considerando os custos relativos em R\$/m³ e R\$/MPa, simulando também os custos de aplicação do material para a fabricação de uma viga teórica;

1.3 DELIMITAÇÕES

Como forma de definir os parâmetros de comparação deste estudo com outros trabalhos da área, foram definidas algumas delimitações para a pesquisa, quais sejam:

- a) Cimento – decidiu-se trabalhar com um cimento do tipo CP V – alta resistência inicial, por se tratar de um cimento mais puro e facilmente encontrado no mercado;
- b) Sílica ativa – decidiu-se fixar o consumo de sílica ativa em uma faixa compreendida entre 20% e 25% do teor de cimento empregado nos traços de CPR;
- c) Cinza volante – decidiu-se pelo emprego de 30% de cinza volante (em substituição à massa de cimento no traço) para dois dos traços de CPR, baseado no trabalho de Christ(2014);
- d) Aditivo – foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilato e um aditivo modificador de viscosidade, ambos com a função de auxiliar na dispersão dos materiais finos e diminuir o consumo de água nos traços;
- e) Relação água / aglomerante – a relação a/agl. foi fixada em 0,20 para todos os traços de CPR;
- f) Adensamento – todos os corpos de prova utilizados no estudo foram adensados em uma mesa vibratória, com nenhum tipo de adensamento manual por golpes;
- g) Cura térmica – não foi feito uso de cura térmica nesse estudo;
- h) Pressão confinante – não foi feita aplicação de pressão confinante nesse estudo;
- i) Cura – uma vez moldados, os corpos de prova foram mantidos em cura úmida até a idade de cada ensaio, de acordo com a NBR 9479 (ABNT, 2006).

1.4 LIMITAÇÕES

O estudo foi baseado em trabalhos anteriores já desenvolvidos com o material, comparando o material com a utilização de fibras metálicas com uma mistura híbrida de dois tipos de fibras (metálicas e de polipropileno) e com menor impacto ambiental, pela utilização de cinza

volante em substituição parcial do cimento, além de avaliar uma série de propriedades mecânicas e de analisar seus custos de produção. Dessa forma, não foram feitos estudos de dosagem com vistas à definição dos melhores traços. Foram moldados três traços em material compósito e um traço em concreto convencional.

O trabalho limitou-se ao emprego de um único tipo de fibra metálica, com diâmetro médio de 0,2 mm e comprimento de 13 mm, tendo sido fixado um teor de 3% em volume para todos os traços testados. Também foi utilizada uma fibra de polipropileno em um dos traços como forma de compará-la juntamente com a fibra metálica, baseando-se em trabalho anterior já executado com esse tipo de hibridização (80% fibra metálica + 20% fibra de PP – em 3% de volume total).

Como limitação experimental, não foi testado tratamento térmico para a cura e nem foi testada a influência da aplicação de pressão confinante sobre o material como forma de aumentar a sua densidade.

1.5 DELINEAMENTO DA PESQUISA

As etapas deste trabalho compreenderam:

pesquisa bibliográfica: foi a etapa que deu todo o embasamento teórico aos estudos, apoiando as análises dos resultados obtidos nos ensaios e as conclusões da pesquisa desenvolvida. Também propiciou importante contato com trabalhos anteriores sobre o assunto ou relacionados à ele;

estudos preliminares: compreenderam as primeiras discussões e levantamentos acerca do assunto, a partir do que foi pesquisado na bibliografia e também dados de trabalhos anteriores. De posse destes dados é que se definiu o foco do trabalho;

definição dos experimentos: apoiado pelos estudos iniciais foram definidos os experimentos que foram realizados a fim de se obter as respostas para a questão da pesquisa;

obtenção dos materiais: compreendeu a etapa de campo, obtenção das areias, sílica ativa, cinza volante, cimento e pó de quartzo, caracterização e outras análises;

análise de resultados, etapa preliminar: compreendeu a análise dos dados obtidos com os experimentos iniciais, que determinaram a escolha das areias, o método de empacotamento, o coeficiente de empacotamento, entre outros;

execução do programa experimental: incluiu a preparação e moldagem de todos os corpos de prova para cada um dos quatro traços a partir da definição dos ensaios a serem realizados;

análise dos resultados: teve por objetivo organizar e analisar todos os resultados obtidos na primeira etapa do trabalho, com eventuais cálculos, comparação com outros trabalhos, graficação de resultados e discussão dos dados obtidos, compreendendo os diferentes ensaios mecânicos realizados bem como a análise complementar de ultrassom e os ensaios de trabalhabilidade;

levantamento dos custos: etapa que compreendeu o levantamento dos custos dos materiais utilizados em cada um dos traços. Os custos foram baseados em pesquisa de mercado e levantados durante a compra dos materiais. Esses dados serviram de base para a análise dos custos, dentro da terceira etapa do estudo;

análise final dos resultados e conclusões: foi a etapa final e conclusiva do trabalho, onde foram analisados todos os dados dos experimentos realizados juntamente com as análises complementares, elaborando-se as conclusões acerca de toda a pesquisa desenvolvida. Estas conclusões tiveram por meta responder à questão de pesquisa, confirmando ou não a viabilidade de aplicação do CPR.

1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho foi estruturado em oito capítulos. O primeiro, de Introdução, traz algumas considerações iniciais sobre a pesquisa desenvolvida, abordando o tema da utilização do CPR na indústria de pré-fabricados, principalmente no segmento de pontes e viadutos, com foco na durabilidade e na redução dos custos com manutenções futuras. O capítulo trata ainda dos objetivos do trabalho, bem como suas delimitações, limitações e o delineamento da pesquisa desenvolvida.

O capítulo 2 descreve detalhadamente o compósito de pós reativos - CPR, constituindo a revisão bibliográfica sobre o tema central da pesquisa, discorrendo um pouco sobre a história do material, as vantagens na sua utilização, as complexidades envolvidas e os precursores na sua utilização, mostrando o que já existe em termos de pesquisa e aplicação pelo mundo.

No capítulo 3 são apresentados os Materiais e a sua caracterização, detalhando o tipo de cimento, os aglomerantes suplementares, o fíler, as areias utilizadas, os aditivos e as fibras presentes no programa experimental.

O capítulo 4, por sua vez, trata em detalhes do Programa Experimental, descrevendo a estratégia experimental, os ensaios que foram propostos, os resultados dos ensaios e dos testes preliminares que foram feitos. Também é abordada a metodologia utilizada, o método de empacotamento de partículas com a utilização do software EMMA, o efeito dos aglomerantes suplementares, do emprego das fibras metálicas e a definição dos traços.

A apresentação e a discussão dos resultados gerados no programa experimental aparece no capítulo 5, detalhando todos os resultados obtidos para cada um dos ensaios propostos e comparando-os com outros trabalhos semelhantes já realizados. Também é feita a comparação dos resultados obtidos com resultados de outros trabalhos em concreto convencional.

O capítulo 6, por sua vez, contempla as considerações finais, introduzindo as conclusões do estudo realizado.

As conclusões, baseadas nos resultados obtidos no trabalho, são discutidas no capítulo 7, tecendo um panorama geral das conclusões e propondo pesquisas futuras que possam se aprofundar no tema e estabelecer novas conexões com os resultados ora obtidos.

Por fim, o capítulo 8 foi destinado às referências bibliográficas consultadas e citadas ao longo do trabalho.

2 COMPÓSITO DE PÓS REATIVOS – CPR

2.1 DEFINIÇÃO

O CPR, por suas características, vem sendo usualmente definido como um material compósito, formado basicamente por uma argamassa de matriz cimentícia, ricamente refinada em termos de granulometria, e com a inclusão de fibras como forma de reforço à tração e flexão. Entretanto, duas características principais que podem defini-lo em termos de composição são a ausência de armaduras de reforço em estruturas construídas com o material e o fato de dispensar o uso de agregados com diâmetro máximo superior a 1 mm ($D_{\text{máx}} \sim 1$ mm).

De fato, o CPR acaba sendo um material diferenciado, que empresta características do concreto reforçado com fibras – CRF, das argamassas aditivadas de alto desempenho mecânico e de outros materiais compósitos, como o ECC – engineered cementitious composites, o CRC – compact reinforced composite, o SIFCON – slurry infiltrated fibers concrete e o MSFRC – multi-scale fiber reinforced concrete. As diferenças principais entre eles estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Características de alguns materiais compósitos (adaptado de Mehta e Monteiro, 2014).

Compósito	Dosagem de fibras (por volume total de material)	Tipo de fibra utilizada
CPR	1% a 4%	aço, orgânica ou sintética
CRF	2%	aço, olefina ou carbono
ECC	2%	PP ou PVA
CRC	5% a 10% + barras de aço	aço
SIFCON	5% a 30%	aço
MSFRC	5% macro + 2% micro	aço

Na literatura internacional são encontradas várias siglas, em inglês, para definir o CPR. Eis algumas delas:

- RPC – reactive powder concrete *ou* reactive powder composite;
- HPC – high performance concrete;
- UHPC – ultra high performance concrete;

- UHPFRC – ultra high performance fiber reinforced concrete (sigla mais utilizada);
- HPFRCC –highperformance fiber reinforced cement composite (sigla sendo adotada atualmente nos novos trabalhos).

2.2 HISTÓRICO

O desenvolvimento do CPR encontra suas origens ainda na década de 30, pelo trabalho de Eugéne Freyssinet, através da aplicação de pressão ao concreto, em seu estado fresco, ainda na fase de moldagem, para melhorar sua resistência (RICHARD e CHEYREZY, 1995). Já na década de 70, uma série de estudos publicados por Odler, Brunauer (1972) e Yudenfreund (1973), investigou pastas de alta resistência com baixa relação água/aglomerante (nas faixas de 0,2 a 0,3), cuja principal característica foi a baixa porosidade, levando a altas resistências à compressão (de até 200 MPa). O aprimoramento da resistência à compressão por técnicas de prensagem a quente foi aplicado pela primeira vez por Roy (1972) e resultou em pastas de cimento de alta resistência, chegando a valores à compressão de até 680 MPa.

Com o desenvolvimento dos superplastificantes e o surgimento dos materiais pozolânicos, tais como a sílica ativa, dois tipos de materiais surgiram quase que simultaneamente na década de 1980: o MDF e o DSP. Chamado de *Macro Defect Free*, o MDF, foi desenvolvido por Alford e Birchall (1985) obtendo materiais cimentícios à base de polímero modificado. Neste caso, a matriz cimentícia foi reforçada pela adição de polímero PVA. Os resultados obtidos foram impressionantes, atingindo-se resistência à flexão, aos 28 dias, superior a 200 MPa e resistência à compressão próxima dos 650 MPa. Contudo, o material apresentava um inconveniente que acabou por deixá-lo de lado, sem vistas a uma aplicação prática: é suscetível ao contato com a água, fazendo com que suas propriedades mecânicas diminuam. Além disso, o material apresenta alta fluência (KENDALL, 1983; ALFORD, 1985). Já em 1987, Bache desenvolveu o *Densified Small Particles* – DSP, fazendo uso da interação de superplastificantes e sílica ativa para reduzir a porosidade do material e aumentar sua resistência, utilizando também agregados de alta resistência, como a bauxita calcinada e o diabásio. Dessa forma, ele preparou o terreno para o desenvolvimento do CPR moderno. Em 1994, De Larrard e Sedran investigaram a compacidade teórica da matriz dessas misturas e a otimizaram, chegando ao material que se conhece hoje (HABEL, 2004). Com o passar dos anos, outros pesquisadores passaram a atuar no tema e hoje já são documentadas resistências à

compressão, obtidas em laboratório e utilizando técnicas especiais, superiores aos 800 MPa (RICHARD e CHEYREZY, 1995).

No entanto, todas essas pastas de cimento de alta resistência e argamassas são muito frágeis. Por essa razão, a adição de fibras se tornou necessária para melhorar a ductilidade e permitir sua aplicação. Como consequência da adição de fibras, o material apresenta características bastante singulares, tanto em termos de resistência à compressão, como também à tração e flexão, passando a ganhar destaque na construção civil, principalmente na Europa e nos Estados Unidos, a partir do desenvolvimento e comercialização de misturas industriais, com aplicações baseadas na pré-fabricação para a construção de pontes e passarelas, aplicações arquitetônicas diversas e também como material de proteção no revestimento de estruturas.

Dentro desse contexto, Rossi (2002) distingue três materiais que se destacaram comercialmente para aplicação:

- o DSP, com uma adição de 5 a 10% de fibras de aço curtas (1 ~ 6 mm), comercializado sob o nome de CRC (AARUP, 2004);
- o compósito multiescala reforçado com fibras – MSFRC, usando uma mistura de fibras de aço curtas e longas, desenvolvido no LCPC na França e conhecido sob o nome de CEMTEC® (ROSSI, 1997; ROSSI, 2002).
- o chamado concreto de pós reativos, agora compósito de pós reativos – CPR, com 2,5% de fibras de aço delgadas e curtas (1 ~ 13 mm), desenvolvido pela Bouygues, Lafarge e Rhodia e comercializado sob o nome de Ductal® (RICHARD e CHEYREZY, 1995);

Contudo, considerando mais especificamente o CPR, a utilização do material em escala comercial tem sido limitada a uma resistência à compressão na faixa dos 180 – 250 MPa, explorando mais o potencial do material em relação ao seu comportamento à tração e à flexão e empregando técnicas de produção e de cura semelhantes às aquelas já dominadas e aplicadas ao concreto convencional em ambiente de fábrica. Esse passa a ser o foco de pesquisa no material para viabilizar sua aplicação em grande escala e permitir o surgimento das primeiras obras construídas inteiramente com aplicação de CPR.

O ano de 1997 é considerado o marco inicial da primeira aplicação comercial, e em grande escala, desse material no mundo. Tal fato ocorreu na cidade de Sherbrooke, no Canadá, com a construção de uma passarela para pedestres, que vence um vão livre de 60,00 m sem fazer uso de armaduras passivas. A estrutura da passarela é constituída basicamente de seis segmentos pré-fabricados de uma treliça tridimensional construída em CPR confinado dentro de tubos de aço inoxidável. Estes segmentos foram transportados até o local da obra e unidos por protensão externa em seu banzo inferior após a montagem no local definitivo. As peças foram produzidas em fábrica e submetidas a um processo combinado de pressão, que confinou o CPR dentro dos tubos, e cura térmica a vapor (90 °C) por dois dias durante a produção das peças (BLAIS e COUTURE, 1999). A construção possuía, à época, f_{ck} médio de 230 MPa, com um consumo de fibras de 190 kg/m³ (~2,5%), resistência de 7 MPa à tração direta e de 40 MPa à flexão.

2.3 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO CPR

A seguir são apresentados alguns exemplos conhecidos de aplicação do CPR em estruturas. A Figura 1 ilustra a passarela de Sherbrooke, primeira estrutura construída em CPR no mundo.

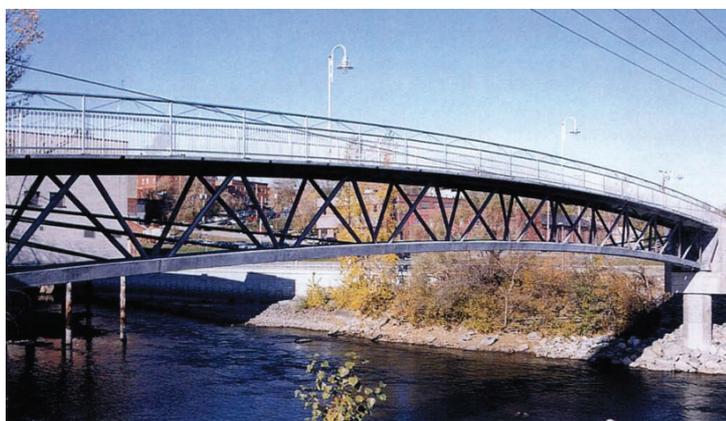


Figura 1 –Passarela de Sherbrooke, no Canadá [Fonte: adaptado de BLAIS e COUTURE, 1999].

Nos Estados Unidos, no ano de 2006, foi construída a primeira ponte em CPR em uma rodovia. Trata-se da ponte de Mars Hill, em Wapello County. A estrutura foi construída com vigas protendidas de CPR sem a utilização de armaduras de cisalhamento, vencendo um vão de cerca de 33,50 m.

A Figura 2 ilustra a ponte de Mars Hill, nos EUA.



Figura 2 –Ponte rodoviária de Mars Hill, nos EUA [Fonte: adaptado de FHWA, 2013].

Várias pontes foram construídas no Japão, começando com a ponte/passarela Sakata-Mirai (Figura 3), no ano de 2002. Esta passarela é constituída por segmentos vazados de viga caixão com pré-tensão que posteriormente foram pós-tensionados entre si para formar um único elemento com extensão total de 49,20 m.



Figura 3–Ponte/passarela Sakata-Mirai, no Japão [Fonte: adaptado de LAFARGE].

A ponte/passarela de Seonyu-kyo, construída na Coreia do Sul entre os anos de 2002 e 2004, é uma ponte em arco que vence um vão principal de 120,00 m. Foi construída a partir de seis elementos pré-fabricados com seção em forma de PI e pós-tensionados. Seu tabuleiro superior é composto por uma laje nervurada com apenas 30 mm de espessura e com pré-tensão transversal. A estrutura detém o recorde de maior vão construído em CPR no mundo, além do recorde mundial de esbeltez. A Figura 4 ilustra a passarela de Seonyu-kyo.



Figura 4–Ponte/passarela Seonyu-kyo, na Coréia do Sul
[Fonte: disponível em: <https://ksamedia.osu.edu/item/38198>].

Atualmente, são documentadas inúmeras obras construídas com o material, sendo em sua grande maioria pré-fabricadas, com aplicação na área de pontes e passarelas, revestimentos decorativos, painéis de fachada, como revestimento para pilares em zonas de atmosfera agressiva, entre outros.

Na área de infraestrutura, podem ser destacadas as obras de diversas pontes e passarelas construídas na América do Norte (Estados Unidos e Canadá), Europa (Áustria, Croácia, França, Alemanha, Itália, Holanda, Eslovênia e Suíça), Oceania (Austrália e Nova Zelândia) e Ásia (Japão, Coréia do Sul e Malásia).

Segundo levantamento feito pela FHWA (GRAYBEAL, 2013), no período entre 1997 e 2013, incluindo somente o segmento de infraestrutura, (vigas de pontes, passarelas, barreiras de proteção e juntas construtivas em CPR) foram construídas em torno de 105 estruturas no mundo.

A Tabela 2 ilustra o número de estruturas construídas em CPR por país, bem como o ano de construção da primeira delas.

Tabela 2 – Obras de infraestrutura na área de pontes, passarelas e barreiras de proteção construídas em CPR entre os anos de 1997 e 2013.

País	Número de estruturas construídas	Ano de construção da primeira estrutura
Estados Unidos	17	2006
Canadá	38	1997
Áustria	1	2010
Croácia	1	-
França	8	2001
Alemanha	5	2007
Itália	1	-
Holanda	2	2002
Eslovênia	1	2009
Suíça	4	2004
Austrália	2	2005
Nova Zelândia	2	2005
Japão	19	2002
Coréia do Sul	2	2002
Malásia	2	-
TOTAL	105	

Com relação às aplicações arquitetônicas do material, podem-se destacar a estação de trens de Shawnessy, no Canadá, utilizando elementos de casca em formas de canoplas em CPR com espessuras da ordem de 20 mm, mostrado na Figura 5.



Figura 5 – Montagem das coberturas da estação de trens de Shawnessy, no Canadá, utilizando elementos de casca pré-fabricados em CPR [Fonte: adaptado de VICENZINO et al., 2005].

A cobertura e as fachadas do estádio Jean Bouin, em Paris, na França, utilizando elementos vazados em CPR unidos por inserts metálicos aparafusados, conforme ilustra a Figura 6.



Figura 6–Estádio Jean Bouin, em Paris, na França, com elementos de cobertura e de fachada fabricados em CPR[Fonte: adaptado de LAFARGE].

Aplicações residenciais, como na construção de revestimentos, mobiliários, escadarias (Figura 7) e outras aplicações.

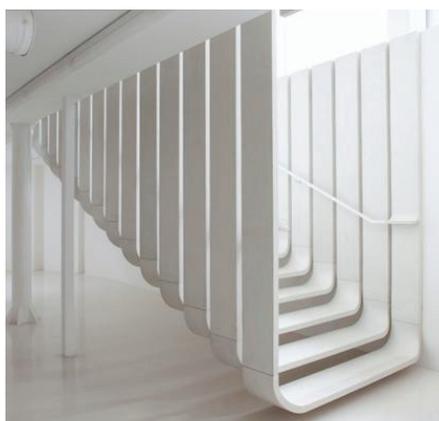


Figura 7 – Exemplo de utilização de CPR na construção de uma escadaria residencial [Fonte: adaptado de LAFARGE].

Utilização de CPR na pré-fabricação de muros de contenção, na Malásia, substituindo antigas seções em concreto convencional, conforme Figura 8.

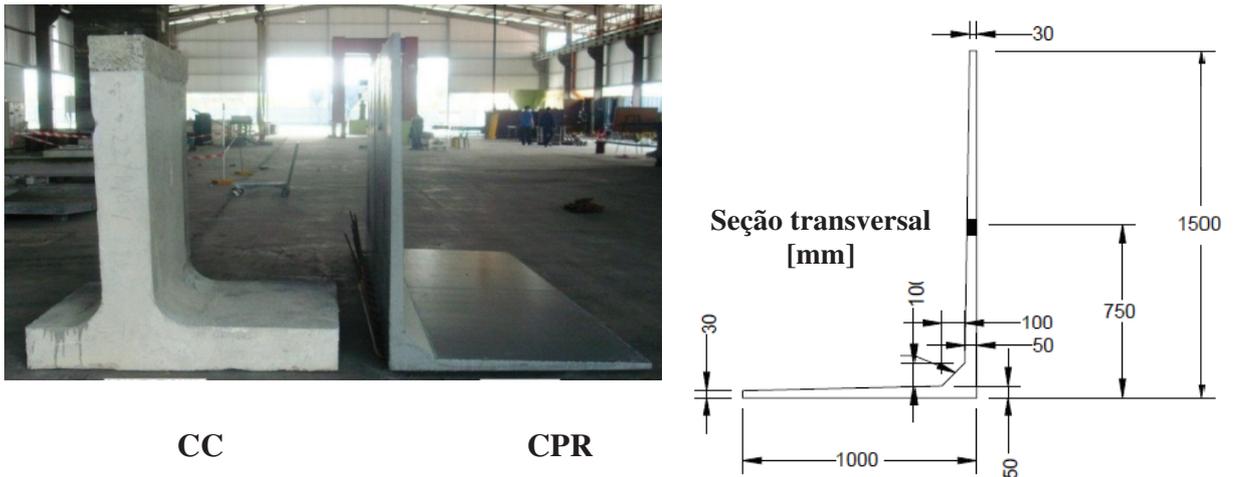


Figura 8–Muro de contenção para construção de canais [Fonte: adaptado de VOO et al., 2010].

A Figura 9 ilustra a passarela que leva ao MuCEM, o Museu das Civilizações Européia e Mediterrânea, em Marseille, na França. A passarela possui 130 m de comprimento e vence um vão livre de 115 m. Ela foi concebida e construída utilizando CPR.



Figura 9–Passarela do MuCEM, na França. [Fonte: adaptado de www.mucem.org]

2.4 PRINCÍPIOS BÁSICOS DO CPR

A ideia central em torno do CPR foi baseada no refinamento da matriz do concreto convencional de alta resistência, buscando diminuir sua heterogeneidade intrínseca, eliminando as zonas de transição na base dos agregados graúdos, limitando a porosidade da matriz, entre outros.

Tal fato levou à eliminação dos materiais mais graúdos, com granulometrias superiores (em geral $\varnothing > 1,0$ mm) e de formas mais irregulares, buscando o preenchimento dos vazios restantes utilizando apenas materiais granulares com maior finura. Isso se deu pela utilização de técnicas de empacotamento de partículas emprestadas da indústria cerâmica e a redução substancial da água presente na mistura.

Uma vez resolvida a questão da microestrutura granular, partiu-se para a inclusão de um reforço que pudesse garantir maiores resistências à tração, flexão e tenacidade ao material, e também, de alguma forma, compensar a diminuição no módulo de elasticidade causada pela ausência dos agregados maiores. Este reforço, fornecido por microfibras, possibilitou um comportamento dúctil, com grande capacidade de se deformar mesmo após a fissuração inicial. Estas características de desempenho são o resultado de melhorias nas propriedades microestruturais da matriz mineral aliadas ao controle da ligação entre a matriz e as fibras. Dessa forma, viabilizou-se a utilização do material sem a necessidade de reforços adicionais (armaduras) e em espessuras antes impossibilitadas com o concreto convencional.

Em 1995, Richard e Cheyrezy publicaram, em seus estudos sobre o material, os princípios básicos para o desenvolvimento do CPR. Eles podem ser descritos, resumidamente, como:

- reforço da homogeneidade: a homogeneidade do material é melhorada através da eliminação dos agregados graúdos (redução da heterogeneidade);
- reforço na compacidade: a densidade da matriz é aumentada através da otimização granular utilizando métodos de empacotamento de partículas;
- aumento da ductilidade pela utilização de fibras: como a matriz do CPR é muito frágil, fibras de aço ou orgânicas (de carbono ou de vidro, por exemplo) têm de ser adicionadas para se obter um melhor comportamento à flexão sob tensão.

Para complementar as melhorias na estrutura do material, também foram desenvolvidas e empregadas técnicas pós-moldagem, envolvendo a aplicação de cura térmica e de pressões confinantes. Estas técnicas são detalhadas a seguir:

2.4.1 Empacotamento de partículas

Um dos princípios básicos da tecnologia do CPR, consiste da necessidade de se obter um máximo empacotamento das partículas. O objetivo é obter o menor volume possível de espaços livres (vazios) no material final e alcançar, com isso, uma matriz altamente densificada. Dentro dessa filosofia, a eliminação das parcelas granulares maiores dentro da matriz (agregados graúdos) é o primeiro passo.

Para Ortega et al. (1997), o princípio dos métodos de empacotamento consiste basicamente na seleção de tamanhos adequados de partículas, formando uma estrutura densa visando obter uma mistura muito compacta e com o mínimo possível de vazios.

Para Vanderlei (2004), a análise da distribuição dos tamanhos das partículas que compõe o material em estudo tem se mostrado um procedimento eficiente no desenvolvimento e produção destes novos materiais, principalmente onde o objetivo é a elaboração de compostos com alta densidade.

Dessa forma, a dosagem do CPR visa criar um material com o mínimo de defeitos, ou seja, trata-se da busca pela diminuição da heterogeneidade do material, utilizando para isso partículas sólidas de diâmetros pequenos, na faixa de 0,1 μm a até, no máximo, 2 mm, o que se encaixa em alguns dos princípios propostos por Richard (1996), que preconiza:

- não utilização de agregados graúdos, diminuindo a heterogeneidade;
- otimização da distribuição granulométrica, aumentando a densidade.

Castro e Pandolfelli (2009) comentam que estes compósitos foram desenvolvidos utilizando a engenharia de microestrutura, e que por serem constituídos preferencialmente por materiais pulverulentos, e possuírem baixa relação água/aglomerante, apresentam uma elevada densidade devido à otimização do empacotamento de suas partículas constituintes. Eles comentam ainda que, no ano de 1892, Féret publicou o primeiro modelo teórico de

empacotamento de partículas em concreto. Segundo a equação apresentada por Féret, a resistência máxima é obtida quando a porosidade da matriz inicial é mínima, ou seja, quando a densidade de empacotamento é máxima. Desde então alguns modelos de empacotamento têm sido propostos como ferramentas para calcular a densidade de empacotamento das partículas e, assim, aperfeiçoar misturas granulares de concretos.

Dentre os modelos mais conhecidos, podem ser citados três deles: o modelo de Furnas, o modelo de Andreassen e o modelo de Alfred, descritos a seguir. Tais modelos são frequentemente utilizados na formulação de refratários, dentro da indústria de cerâmicos.

2.3.1.1 O modelo de empacotamento de Furnas

Segundo Henche e Mazer (2010), o modelo de Furnas é um modelo matemático utilizado para proporcionar o empacotamento das partículas e é considerado clássico pelos pesquisadores que atuam na área de compósitos cerâmicos. É um método de abordagem discreta, ou seja, avalia as integrantes da mistura individualmente. Além disso, o modelo de Furnas demonstra que as proporções dos vários tamanhos de partículas abrangidas na constituição granulométrica formam uma progressão geométrica. Para tanto, o modelo considera diâmetros de partículas infinitas, o que, na prática torna-se impossível.

A expressão matemática do modelo de Furnas é apresentada na Equação 1.

$$CPFT = \left(\frac{D_p^{\log.r} - D_s^{\log.r}}{D_L^{\log.r} - D_s^{\log.r}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

CPFT = porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p = diâmetro da partícula em questão, em mm;

D_s = diâmetro da menor partícula, em mm;

D_L = diâmetro da maior partícula, em mm;

r = razão adimensional dada pelo volume das partículas retidas em uma malha de peneira e o volume na malha imediatamente inferior

A Figura 10 traz a distribuição granulométrica para a máxima densidade de empacotamento possível segundo o modelo de Furnas.

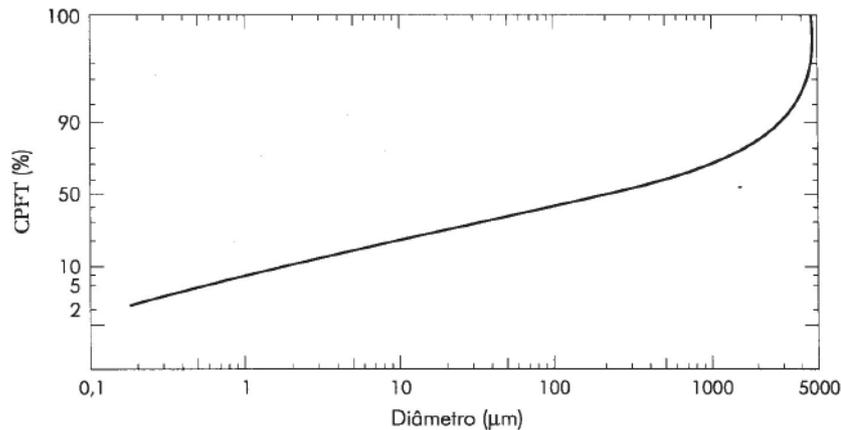


Figura 10 - Distribuição granulométrica contínua de máxima densidade empacotamento segundo o modelo de Furnas.

2.3.1.2 O modelo de empacotamento de Andreassen

O modelo de Andreassen se diferencia do modelo de Furnas pois considera na distribuição todos os tamanhos de partículas, ou seja, trabalha com uma distribuição contínua (CASTRO e PANDOLFELLI, 2009; HENCHE e MAZER, 2010).

Para Ortega et al. (1997), o modelo de Andreassen foi baseado em uma condição de similaridade entre partículas grandes e partículas menores distribuídas ao seu redor, a qual pode ser relacionada a uma série de potências. Lima (2007) também afirma que o modelo de Andreassen trata-se de uma abordagem contínua, e dentre os modelos deste tipo de abordagem, considera-o o mais consistente. Logo, para se obter o melhor empacotamento possível, o diâmetro da menor partícula deveria ser igual a zero, o que obviamente, não se verifica na prática.

A expressão matemática do modelo de Andreassen é apresentada na Equação 2.

$$CPFT = \left(\frac{D_p}{D_L} \right)^q \cdot 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- CPFT = porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;
- D_p = diâmetro da partícula em questão, em mm;
- D_L = diâmetro da maior partícula, em mm;
- q = módulo ou coeficiente de distribuição.

A Figura 11 traz a distribuição granulométrica para a máxima densidade de empacotamento possível segundo o modelo de Andreassen.

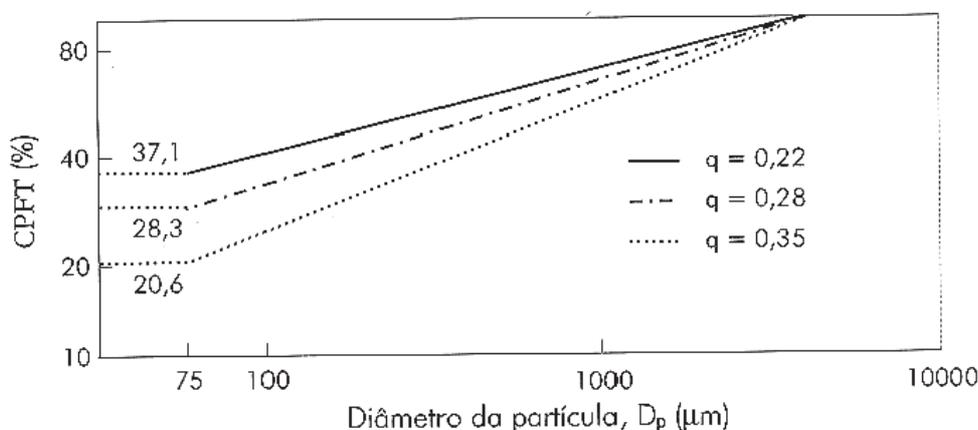


Figura 11– Distribuições granulométricas contínuas para diferentes valores de q segundo o modelo de Andreassen.

2.3.1.3 O modelo de empacotamento de Alfred (Andreassen modificado) e o coeficiente ‘ q ’

Seguindo a lógica dos modelos anteriores, os pesquisadores Dinger e Funk (1993) observaram que no modelo generalizado de Furnas, a quantidade de partículas finas de diâmetros distintos forma uma progressão geométrica. Diante desta análise, provaram que os modelos de Andreassen e de Furnas convergem matematicamente para uma mesma expressão.

Estes mesmos pesquisadores reconheceram que a inexistência de partículas infinitamente pequenas podia acarretar em desvios significativos no empacotamento de partículas previsto e, deste modo, incorporaram ao modelo de Andreassen um valor mínimo de tamanho de partícula, que é uma característica de sistemas reais, ou seja, utilizando materiais reais. Com essa inclusão, o modelo acabou ficando conhecido como modelo de Alfred, também descrito em outras bibliografias como modelo de Andreassen modificado.

A expressão matemática do modelo de Alfred é apresentada na Equação 3.

$$CPFT = \left(\frac{D^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

CPFT = porcentagem acumulada de partículas menores que D_p ;

D_p = diâmetro da partícula em questão, em mm;
 D_s = diâmetro da menor partícula, em mm;
 D_L = diâmetro da maior partícula, em mm;
 q = módulo ou coeficiente de distribuição.

Ortega et al (1997) observam que se o valor de D_s for igual a zero, a equação se reduz ao modelo de Andreassen. Os autores comentam ainda que a equação de Alfred é considerada atualmente o modelo de empacotamento de partículas mais adequado a sistemas reais.

O trabalho de Silva (2004) demonstrou, utilizando simulação numérica do modelo de Alfred, que o coeficiente de distribuição q que aperfeiçoa a distribuição granulométrica para o empacotamento máximo de partículas é $q = 0,37$.

A distribuição é demonstrada na Figura 12 para valores de $q = 0,37$, $D_s = 4750 \mu\text{m}$ e $D_L = 0,1 \mu\text{m}$.

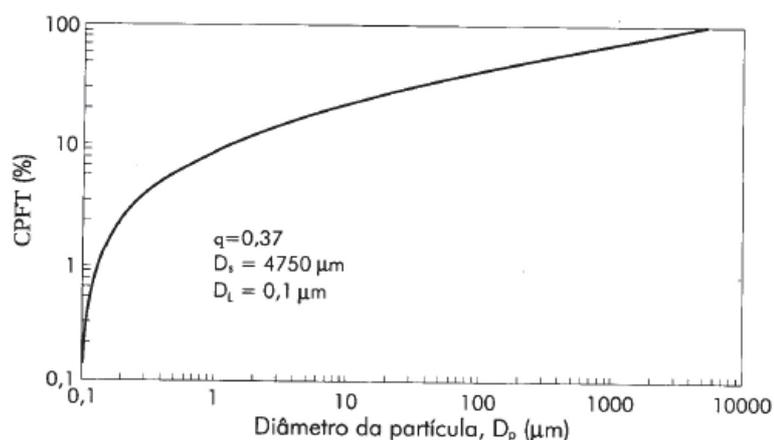


Figura 12 - Exemplo de distribuição granulométrica segundo o modelo de Alfred para um q de 0,37 e parâmetros de tamanho máximo e mínimo de partículas. (adaptado de DEMAR/EEL/USP).

No caso específico do coeficiente q , não existe uma correlação forte entre este e as propriedades reológicas de uma determinada pasta. No entanto, Vanderlei (2004) observa os seguintes pontos em seus estudos em CPR:

- quanto maiores os valores de q , mais íngreme será a inclinação da curva de empacotamento e a mistura será mais viscosa e menos trabalhável;
- para valores mais baixos de q , o conteúdo de finos será aumentado e a mistura será mais trabalhável;
- um valor de $q < 0,36$ é necessário para o empacotamento ótimo das partículas;

- uma elevada trabalhabilidade em argamassas é obtida quando $q < 0,25$;
- para o concreto autoadensável, $q = 0,28$ se mostrou mais adequado;
- para uma mistura considerada autoadensável, deve-se garantir $0,21 \leq q \leq 0,28$ a fim de se obter uma mistura fluida com adição mínima de água e utilizando materiais finos, tais como a sílica ativa.

Alguns pesquisadores indicam que o valor de q não deve exceder 0,30 para que a mistura atinja uma melhor fluidez. Segundo Vanderlei (2004), usando-se valores de $q \geq 0,30$, tem-se, em teoria, uma mistura que necessita de vibração para melhorar seu adensamento. Entretanto, para valores de $q \leq 0,25$ a mistura torna-se autoadensável. O efeito da redução do valor de q é um aumento na quantidade de finos que influencia na interação entre as partículas, formando um líquido viscoso quando misturado com água.

2.3.1.4 Modelo de empacotamento úmido

Existem ainda modelos de empacotamento que consideram a modelagem do sistema úmido, como o apresentado por Kwan et al. (2012), justificando que sistemas de materiais cimentícios necessariamente terão partículas líquidas, o que torna este método mais realista do que a abordagem seca. Segundo os autores, esse tipo de modelo permitiria medir a densidade de empacotamento de todas as partículas sólidas para uma argamassa ou concreto. Contudo, a utilização desse método é ainda experimental e bastante complexa de ser implementada.

2.4.2 Cura térmica

Apesar de muitos pesquisadores considerarem a cura térmica extremamente importante para o desenvolvimento de grandes resistências à compressão, a adoção dessa técnica não é imprescindível para a utilização do material. Uma série de trabalhos demonstrou que o CPR se beneficia significativamente dessa técnica tanto quanto maiores forem os tempos de exposição (RICHARD e CHEYREZY, 1995; ADELIN e BEHLOUL, 1996; YAZICI et al., 2009; AYDIN et al., 2010) e com início das aplicações iniciadas entre 48 e 150 horas depois da concretagem. Entretanto, isto implica, na prática, em maiores espaços disponíveis para a produção e estoque, despesas extras com a utilização de cura térmica, entre outros.

O tratamento de cura térmica tem aplicação importante na indústria de pré-fabricados de concreto, principalmente em regiões mais frias, permitindo o ciclo de produção diário da fábrica (com concretagem e saque em período entre 18h e 24h). No caso do CPR, o uso do tratamento térmico não se aplica para acelerar a sua cura com vistas ao saque das peças. A técnica é utilizada para favorecer as reações pozolânicas e melhorar a microestrutura granular da matriz. No entanto, o tratamento térmico do CPR em um ambiente controlado pode não ser sempre possível ou mesmo desejável. Por esta razão, o foco da pesquisa é na caracterização do CPR não submetido a tratamento térmico de cura.

Quando submetido ao tratamento térmico, pós-fixado geralmente em 90°C, o CPR tem suas reações pozolânicas aceleradas e a microestrutura dos hidratos modificada. O tratamento térmico tem grande influência na resistência à compressão e no módulo de elasticidade, pois favorece a obtenção de uma microestrutura mais densa em menos tempo, induzindo o crescimento dos cristais na matriz cimentícia. Além disso, diminui consideravelmente os problemas de retração por secagem, diminui a permeabilidade aos íons cloreto e aumenta a resistência à abrasão (FHWA, 2013). Curas sob temperaturas mais elevadas levaram a melhorias ligeiramente maiores nestas propriedades.

O efeito da aplicação de temperatura de cura sobre a resistência à compressão e à flexão, para diferentes tipos de agregados em CPR, foi investigado por Aydin et al. (2010). Neste estudo foram utilizados diferentes traços de CPR, sem fibras, variando o tipo de agregado-base e analisando sua forma e rugosidade. Eles concluíram que o tratamento térmico tem influência benéfica no ganho de resistência à compressão. Contudo, no que se refere à flexão, os ganhos de resistência obtidos não foram significativos em relação aos corpos de prova curados à temperatura ambiente. Para Yazici et al. (2009), processos de cura térmica utilizando autoclaves ou cura à vapor causaram uma redução na resistência à flexão em comparação com o traço referência sob cura padrão aos 28 dias. Segundo os autores, isto se dá, provavelmente, devido à diminuição da força de ligação entre a matriz e as fibras. Este comportamento é muito mais importante na cura a vapor do que por processo de autoclavagem.

2.4.3 Aplicação de pressão confinante

Como já dito anteriormente, a densidade da mistura é um fator que influencia bastante a resistência à compressão do CPR. Esse aumento da densidade pode ser feito por meio de uma boa composição granulométrica com o uso de materiais finos (DE LARRARD e SEDRAN, 1994) e também pela aplicação de pressão no concreto durante e após a concretagem (VANDERLEI e GIONGO, 2006). Essa pressão, quando aplicada, provoca a redução do ar incorporado, remove o excesso de água e também auxilia na compensação da retração química, causada pelo alto consumo de cimento e a baixa relação a/c (IPEK et al., 2011). Os mesmos pesquisadores comprovaram que a aplicação de uma pressão confinante da ordem de 25 MPa, na fase de moldagem do CPR, apresenta os melhores ganhos em relação a outros níveis de pressão aplicados. Os trabalhos de Christ (2011), Fávero e Tutikian (2013) e Christ (2014), também comprovam que a aplicação de pressões confinantes no material pode contribuir para o aumento da resistência mecânica.

Ainda, a aplicação da pressão no estado fresco propicia, como efeito secundário, a quebra dos cristais maiores, e menos resistentes, de etringita, reorganizando microscopicamente o material para formar uma nova rede de cristais menores e mais resistentes, e dessa forma, contribuindo para o aumento da resistência final. Os efeitos desse método são descritos por vários pesquisadores, como Richard e Cheyrezy (1995), Dugat et al. (1996), Ipek et al. (2011). Os mesmos autores também concluíram que a aplicação de pressão, no estado fresco, principalmente quando associada à cura térmica sob temperaturas elevadas, proporciona importantes ganhos na resistência à compressão. Os mesmos autores concluíram ainda que elevadas resistências à compressão podem ser alcançadas utilizando agregados-base de baixa resistência e de superfície lisa. Entretanto, os melhores desempenhos em termos de resistência à flexão foram obtidas com agregados-base mais resistentes e com superfícies rugosas.

Entretanto, as dificuldades e os custos em se realizar a aplicação de pressão confinante no material limitam o uso dessa técnica. Estes tratamentos são difíceis de aplicar em caso de elementos compostos e de formas mais orgânicas. Além disso, no caso de aplicações *in situ*, apresentaria grandes inconvenientes. De maneira alternativa, para estudos em laboratório, podem ser utilizadas fôrmas especiais, como as propostas por Ipek et. al (2011) e por Christ (2014). Já no caso da aplicação prática, podem ser utilizados tubos, confinando o

material internamente, como no caso da passarela de Sherbrooke, em técnica descrita por Blais e Couture (1999).

2.5 COMPOSIÇÃO TÍPICA DO CPR

Conforme já descrito, uma das características principais do CPR, e que o diferencia dos concretos convencionais, ou mesmo de alta resistência e de elevado desempenho, é a ausência de agregados graúdos em sua composição. O material é constituído basicamente por pós e possui um aspecto final bastante semelhante ao de uma argamassa fluida. Na sua produção utilizam-se usualmente: areias finas de base quartzosa, pó de quartzo e sílica ativa, combinados com cimento, água e aditivos (que podem ser superplastificantes, modificadores de viscosidade e aceleradores de pega) e, eventualmente, fazendo uso de outros materiais, como areias industriais e pozolanas como a cinza volante (esta ainda pouco explorada dentro do material). A relação água/aglomerante típica varia de 0,15 a 0,20, com 20% a 30% de sílica ativa em relação ao consumo total de cimento.

A adição de fibras ao material complementa a sua estrutura e proporciona importantes ganhos de resistência à tração e à flexão, permitindo que as estruturas em CPR, em muitos casos, dispensem o uso de armaduras de reforço.

A seguir são descritos os materiais típicos empregados na produção de CPR.

2.5.1 Cimento

O consumo de cimento no CPR é, tipicamente, mais que duas vezes superior à quantidade normalmente utilizada nos concretos convencionais. O consumo típico de cimento em traços de CPR varia entre 800 e 1000 kg/m³. Segundo Habel (2004), existe um consenso geral de que o cimento deve ter um baixo teor de álcalis, finura média (entre 3.500 e 4.000 cm²/g) e um baixo teor de C₃A, reduzindo assim a necessidade de água, a formação de etringita e o calor de hidratação.

Na maioria dos casos, é utilizado um cimento mais puro e de alta resistência inicial, do tipo CP-V ARI, no Brasil, ou CEM I 52.5R, na Europa. No entanto, existem também tentativas

promissoras na Europa e nos EUA com outros tipos de cimento, como o CEM II e CEM III, equivalentes ao CP-III e ao CP-V no Brasil (RICHARD, 1995; SIEBEL, 2003).

2.5.2 Areia

O agregado do CPR é a areia, constituindo o material de maior granulometria presente na mistura. A areia de quartzo é a mais indicada, uma vez que tem uma dureza elevada e proporciona boas interfaces de pasta-agregado. O tamanho médio das partículas é muitas vezes inferior a 1,0 mm de diâmetro, porém, existem trabalhos realizados com tamanho máximo das partículas situado entre 8,0 e 16,0 mm (RICHARD, 1995; HOLSCHEMACHER, 2003).

Pode-se aqui incluir o pó de quartzo como uma areia bastante fina, utilizada para auxiliar na composição granulométrica e na otimização do empacotamento das partículas, a fim de se obter uma elevada compactidade e, assim, uma matriz densa, permitindo uma permeabilidade bastante baixa, conforme já abordado.

2.5.3 Aglomerantes suplementares

Os aglomerantes suplementares são materiais que contém alguma forma de sílica reativa que, na presença de água e à temperatura ambiente, pode combinar com o hidróxido de cálcio – C-H livre, presente no concreto pela hidratação do C_3S e do C_2S para formar o silicato de cálcio hidratado – C-S-H, do mesmo tipo daquele que se forma durante o processo de hidratação do cimento Portland, fenômeno este conhecido como reação pozolânica (AITCIN, 2000).

Pozolanas são materiais que podem ser descritos como silicosos ou sílico-aluminosos, sem ou com pouca função aglomerante que, finamente moídos e em presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento e formam compostos hidratados que contribuem com a resistência. Além desta ação química, as pozolanas podem possuir ação física, atuando como material de enchimento (filler) e produzindo um arranjo mais eficiente na interface agregado/pasta de cimento, reduzindo a segregação e aumentando a densidade e

homogeneidade dessa zona de transição em função do ajuste dos finos (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Algumas das vantagens técnicas que podem resultar do emprego de pozolanas em concreto são as seguintes:

- redução ou inibição da reação álcali-agregado;
- aumento da resistência mecânica;
- melhora na durabilidade frente a cloretos, sulfatos e água do mar;
- redução da permeabilidade;
- diminuição do calor de hidratação.

Além disso, tem-se o benefício econômico obtido por um consumo menor de cimento, mantendo ou aumentando a resistência mecânica e melhorando a durabilidade. Pela mesma razão, uma economia de energia pode ser atingida, uma vez que os materiais pozolânicos são energeticamente mais econômicos que o clínquer do cimento. Sendo assim, o uso de pozolanas tem implicações ecológicas, contribuindo para um aproveitamento melhor dos resíduos industriais poluidores, como é caso das cinzas volantes, da sílica ativa, entre outros (OLIVEIRA e BARBOSA, 2006). Vale lembrar, no entanto, que um efeito paralelo da adição de pozolanas no concreto é o aumento da demanda de água da mistura.

Os aglomerantes suplementares (pozolanas) utilizados neste estudo são descritos a seguir.

2.4.3.1 Sílica ativa

Se comparada ao cimento Portland comum, a sílica ativa apresenta uma distribuição granulométrica duas ordens de grandeza mais fina ($10 \mu\text{m} \rightarrow 0,1 \mu\text{m}$). O material é considerado altamente pozolânico, mas por outro lado aumenta consideravelmente o consumo de água do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

O desempenho ideal da sílica ativa é atingido com teores de 25% em relação ao conteúdo de cimento no traço, e para Richard (1995) a sílica ativa desempenha três funções no CPR: ela preenche os vazios entre os grãos de cimento; melhora as características reológicas e forma

produtos de hidratação por atividade pozolânica. Assim, as resistências mecânicas são aumentadas e a microestrutura e compacidade do CPR são reforçadas. Segundo os pesquisadores, os melhores resultados são relatados com a utilização de sílica ativa proveniente da indústria de zircônio, possuindo poucas impurezas e maior finura (da ordem de 14 m²/g).

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

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

2.4.3.2 Cinza volante

A cinza é um subproduto proveniente da queima de carvão mineral para geração de calor ou de energia. A cinza volante é um resíduo sólido, finamente particulado, arrastado pelo fluxo dos gases de combustão da queima e posteriormente coletada para que não seja eliminada na atmosfera. Dentro do processo de queima de carvão mineral, a cinza volante representa cerca de 80% de toda a cinza produzida (SILVA et al., 1999).

Em geral, mais de 80% da cinza volante é composta por sílica e alumina. Por essa razão, o material é utilizado com fonte alternativa de sílica, sendo bastante utilizada na indústria do cimento e também como adição pozolânica em concretos. Assim como a sílica ativa, apesar de não ser tão reativa, a cinza volante também atua preenchendo os vazios da matriz e formando produtos de hidratação secundários por atividade pozolânica, permitindo o aumento da resistência mecânica, diminuição da porosidade e melhoria na durabilidade do material. Aliado a isso, a cinza volante apresenta um custo de 5 a 10 vezes menor do que a sílica ativa.

Com base nos resultados obtidos pelo trabalho de Christ (2014), que conduziu um estudo com vários teores de cinza volante em substituição ao cimento em traços de CPR, foi fixado o teor

de 30% de substituição de cinza volante em relação ao consumo total de cimento, em massa, dos traços de CPR com cinza volante.

Yazici et al. (2009) estudaram os efeitos da utilização de cinza volante e de escória de alto-forno como fonte alternativa de sílica no CPR em um estudo envolvendo diferentes regimes de cura. Os resultados apontaram que a utilização de cinza volante diminuiu os efeitos negativos da cura térmica sobre a resistência à flexão, melhorando o desempenho à flexão do CPR sob todos os regimes de cura. Também citaram importantes aumentos nos valores de tenacidade com a utilização de cinza volante.

Cumprе salientar que o elevado consumo de cinza volante e de sílica ativa dentro de um mesmo traço acaba levando a um percentual elevado de material não reagido dentro da matriz, sendo parte cinza e parte sílica ativa (considerando a não adição de CaO no traço, o que contribuiria para a geração de mais produtos de hidratação). Isso se dá porque ambos os materiais necessitam do hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , proveniente da hidratação do cimento, para reagir e formar os compostos hidratados secundários. Contudo, a contribuição destes materiais acaba sendo benéfica em função de atuarem parcialmente como aglomerantes suplementares, e parcialmente como material de enchimento, já que possuem uma faixa granulométrica importante dentro da curva de empacotamento do traço. Além disso, no caso de haverem fissuras na fase endurecida, os materiais não reagidos poderão atuar a partir de uma hidratação tardia, contribuindo para a “cicatrização” de pequenas fissuras dentro do material.

2.5.4 Fíler

No CPR, o pó de quartzo é o material mais utilizado como auxiliar no empacotamento dos traços, com a função de preencher os espaços vazios entre o cimento e a sílica ativa. Os trabalhos de Richard e Cheyrezy (1995) e de Zanni et al. (2006) demonstraram que o pó de quartzo possui função como fíler, no CPR, quando não submetido à tratamento térmico ou se curado termicamente a temperaturas de até 90°C. A partir desse patamar, o material adquire propriedades aglomerantes, tendo seu pico de atividade com temperaturas de cura acima de 200°C.

O pó de quartzo com tamanhos de grãos entre 5 μm e 25 μm apresenta máxima reatividade à elevadas temperaturas de cura, potencializando o desempenho mecânico do material. Os estudos de Zanni et al. (2006) demonstraram claramente o papel da temperatura no aumento das cadeias de C-S-H e na reação pozolânica do pó de quartzo em diferentes traços de CPR.

Contudo, a cura térmica foi suprimida neste estudo, uma vez que se busca a aplicação do CPR com menores custos e adaptada à realidade da indústria de pré-fabricados de concreto.

2.5.5 Aditivo superplastificante e modificador de viscosidade

Aditivos superplastificantes são essenciais para garantir trabalhabilidade ao CPR e permitir a adequada mistura de seus componentes com o seu baixo teor de água. Em geral, são utilizados superplastificantes de terceira geração, como os policarboxilatos e os éter-policarboxilatos. Também podem ser utilizados outros tipos de aditivos em complemento ao superplastificante, como os aceleradores de pega e os modificadores de viscosidade. Entretanto, o superplastificante é um componente fundamental.

São largamente utilizados em CPR, em teores que podem superar os 4%, uma vez que são altamente eficientes, mesmo para relações água/aglomerantes baixas (HOLSCHEMACHER, 2003).

2.5.6 Fibras

Como já mencionado, a adição de fibras metálicas não apresenta grandes influências na resistência à compressão, porém influencia sensivelmente no aumento das resistências à tração e flexão, auxiliando também na melhora da ductilidade do material. Ao contrário da resistência à compressão, o concreto convencional, por suas características intrínsecas, não apresenta bom desempenho quando submetido a esforços de tração e/ou de flexão. Para tanto, o CPR faz uso de fibras, que são materiais capazes de absorver e resistir a estes tipos de esforços.

Muitos pesquisadores estudaram o efeito das fibras de aço sobre as propriedades mecânicas e de durabilidade do CPR (RAPAPORT et al., 2002; STEINBERG e LUBBERS, 2003; STIEL

et al., 2004). Eles relataram que as fibras de aço têm um efeito significativo sobre o controle de abertura de fissuras, melhorando a resistência de união em elementos pré-fabricados com protensão e aumentando a resistência à compressão em função de seus efeitos de confinamento. Relataram ainda que a orientação das fibras tem um impacto substancial na resistência à flexão, e que este diminui quando as fibras estão alinhadas perpendicularmente às tensões de tração na flexão. Para eles, deve ser dada uma atenção especial durante a incorporação das fibras ao CPR de forma a assegurar a consolidação e o alinhamento das fibras.

Quando se adicionam fibras de alto módulo de elasticidade ao material, estas dificultam a propagação das fissuras. Em função da capacidade portante pós-fissuração que o compósito (fibra + matriz) apresenta, as fibras permitem uma redistribuição dos esforços no material (FIGUEIREDO, 1997; SILVA FILHO e GARCEZ, 2007). Entretanto, fibras com baixo módulo de elasticidade necessitam se deformar intensamente para garantir o mesmo nível de tensão da matriz, o que, para um dado carregamento, não oferecerá uma boa capacidade de reforço após a fissuração da matriz (SILVA FILHO e GARCEZ, 2007). Por esta razão, se empregam normalmente, em traços de CPR, fibras com elevado módulo de elasticidade.

Figueiredo (2000) explica que a recomendação para materiais compósitos é de que o comprimento das fibras seja igual ou superior a duas vezes a dimensão máxima característica do agregado da matriz. Isso significa que deve haver uma compatibilidade dimensional entre agregados e fibras de modo que estas interceptem com maior frequência a fissura que ocorre no compósito (MAIDL, 1991³ apud FIGUEIREDO, 2000). Contudo, em função das características granulométricas de seus componentes, tal recomendação não se aplica ao CPR.

Ainda segundo Bonneau et al. (2000), supõem-se que as fibras, quando adicionadas ao CPR, não modificam a estrutura granular de empacotamento do material, uma vez que o seu diâmetro (0,21 mm) está muito próximo do tamanho médio das partículas dos agregados “mais graúdos”, que são as areias (0,70 mm).

Na composição típica do CPR são utilizadas fibras de aço ou fibras orgânicas de pequenas dimensões e sem nenhum tipo de ancoragem adicional, como ganchos ou estrias, por exemplo. Segundo Naaman (2002), as fibras demandadas pelo material são definidas como “curtas, duras e resistentes”. Assim, as fibras de aço parecem ser as mais adequadas para

³ MAIDL, B. *Stahlfaserbeton*. Berlin. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1991.

utilização em CPR, apesar de alguns trabalhos com hibridização de fibras (utilizando fibras de polipropileno em conjunto com fibras metálicas) mostrarem ser este método vantajoso (CHRIST, 2014), mesmo que comercialmente tal prática não seja verificada.

O esquema da Figura 13 ilustra o funcionamento da fibra dentro da matriz.

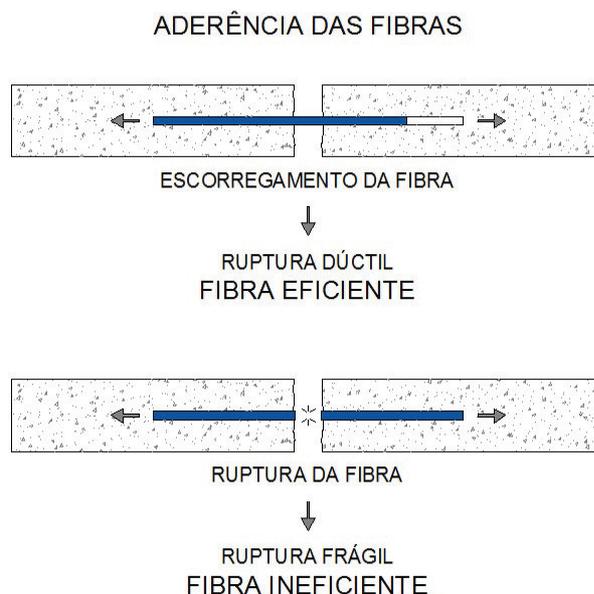


Figura 13 – Esquema de funcionamento de uma fibra metálica lisa quando mobilizada pela matriz.

Quando mobilizadas, as fibras de aço são geralmente arrancadas da matriz e, portanto, a ductilidade da fibra é menos importante do que a sua resistência em si. Rossi (2002) desenvolveu o conceito de multiescala, utilizando vários tipos de fibras, indo da lã de aço ($l_f \approx 1,0$ mm) até fibras de aço pequenas (5,0 a 15,0 mm) e utilizando depois fibras mais longas ($> 15,0$ mm). As fibras de diferentes tamanhos trabalham na escala de material para aumentar a resistência à tração e na escala estrutural para aumentar a capacidade de resistência e de deformação. Normalmente, o CPR tem conteúdo de fibras superior a 2% em volume. O teor máximo de fibras em função da razão de aspecto é limitado por fatores de processamento, tais como a trabalhabilidade da mistura (HABEL, 2004). Para Habel et al. (2006), a fase de *strain hardening* no CPR só é ativada com teores de fibra de aço, em volume, superiores a 2%.

Nas pré-misturas industrializadas de CPR, vendidas comercialmente na Europa e nos EUA, a quantidade de fibras, em volume, pode variar de 2,15% a 4,30%.

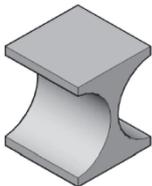
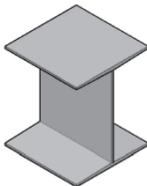
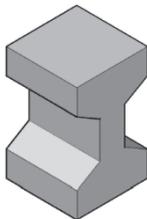
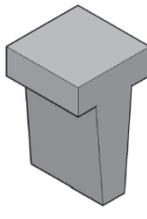
2.6 PROPRIEDADES DO CPR

2.6.1 Resistência mecânica

Para Dauriac (1997) o CPR compete diretamente com as estruturas em aço, uma vez que se beneficia de características únicas que lhe conferem resistências à compressão de seis a oito vezes maiores que o concreto convencional e tração e flexão cerca de dez vezes maior, como já comentando. Entretanto, o melhor entendimento de suas propriedades torna-se fundamental para sua melhor aplicação e aproveitamento de suas vantagens.

A Tabela 3 mostra um comparativo de diferentes seções de uma viga, para uma mesma capacidade resistente, utilizando diferentes materiais, entre eles o CPR.

Tabela 3– Comparativo entre vigas, de mesma capacidade resistente, utilizando diferentes materiais
[Fonte: adaptado de DAURIAC, 1997].

Perspectiva da seção transversal (vergalhões e cordoalhas não representados)				
Tipo de viga	viga em CPR	viga em Aço	viga em concreto protendido	viga em concreto armado convencional
Altura da seção	360 mm	360 mm	700 mm	700 mm
Peso linear	130 kg/m	110 kg/m	470 kg/m	530 kg/m

Devido à composição do material, estruturas em CPR podem atingir elevada esbeltez e rigidez, bem como elevada ductilidade, o que lhes permite absorver grandes deformações sem romper. O CPR pode também se beneficiar da aplicação de protensão, por exemplo, para vencer grandes vãos, sem fazer uso de armaduras passivas (COLLEPARDI et al. 1995). Além disso, o tamanho das peças e conseqüentemente o seu volume, são extremamente reduzidos, assim como as espessuras e seções da estrutura, trazendo ganhos estéticos e diminuindo o peso das peças sobre elementos de fundação, o que, em geral, não ocorre em obras pré-fabricadas convencionais em concreto armado. Quando se fala em pré-fabricação, o CPR pode proporcionar economia com os custos de montagem, já que possibilita a redução da

capacidade de equipamentos de içamento e de transporte, que representam, muitas vezes, empecilhos custosos à viabilidade desse sistema construtivo. Por essa razão, pode-se afirmar que o material tem enorme potencial para ser utilizado na indústria de pré-fabricados, uma vez que permite a produção de peças mais leves e esbeltas, características estas que ficavam restritas basicamente às estruturas metálicas.

Entretanto, Jungwirth (2002) comenta que para isso, faz-se necessário um estudo mais aprofundado para desenvolver projetos estruturais que se adaptem à essas características e tirem maior proveito das propriedades do material. Segundo ele, os elementos constituídos com este material devem ser mais delgados e não massivos, que são mais comumente associados a estruturas de concreto.

Em 1995, Richard e Cheyrezy publicaram um estudo sobre a composição do material e suas características, onde propuseram uma classificação do CPR em duas categorias a partir de suas propriedades mecânicas, como resistência à compressão, resistência à flexão, energia de fratura, entre outros. Denominadas de CPR200 e CPR800, estas duas categorias são resumidas a seguir:

- O CPR200 é tido como um material que pode ser usado tanto em estruturas pré-fabricadas como na concretagem *in loco*, sob condições semelhantes às dos concretos de alto desempenho ou convencionais. Pode ser utilizado na construção de estruturas protendidas sem incorporar nenhum tipo de reforço com armadura passiva. É também o material utilizado em aplicações arquitetônicas e em todas as obras construídas com CPR até o momento.
- O CPR800 é classificado como adequado para a pré-fabricação, e pode alcançar tensões de resistência à compressão superiores aos 600 MPa. Um valor de 810 MPa já foi obtido experimentalmente com uma mistura incorporando microagregados de aço. Entretanto, as aplicações do CPR800 têm se limitado a estudos específicos em laboratório, não sendo utilizado em grande escala, principalmente pelas dificuldades tecnológicas e pelos altos custos envolvidos na sua elaboração e aplicação.

A Tabela 4 traz algumas características e propriedades mecânicas destas categorias.

Tabela 4– Características principais do CPR200 e CPR800 [Fonte: RICHARD e CHEYREZY, 1995].

Característica	CPR200	CPR800
Resistência à compressão (MPa)	170 a 230	490 a 680*
		650 a 810**
Resistência à flexão (MPa)	30 a 60	45 a 140
Energia de fratura (em J/m ² ou N/m)	20.000 a 40.000	1.200 a 20.000
Módulo de elasticidade (GPa)	50 a 60	65 a 75
Aplicação de pressão confinante	não se aplica	50 MPa
Tratamento térmico	20°C a 90°C	250°C a 400°C

*com areia quartzosa

** com microagregados de aço

O CPR é caracterizado por possuir altos valores de resistência à compressão. Os valores típicos, para o CPR sem tratamento térmico, vão dos 150 aos 250 MPa, aos 28 dias.

Já no caso da resistência à tração, sabe-se que no projeto estrutural convencional de estruturas, a resistência à tração direta, do concreto convencional, é assumida, no cálculo de dimensionamento, como sendo zero. No caso do CPR, esta consideração poderá ser levada em conta, visto que o material pode proporcionar uma capacidade resistente à tração bastante superior ao concreto convencional. Isso acontece porque a resistência à tração do CPR é maior do que a do concreto convencional e o material pode exibir uma resistência/manutenção de tração contínua depois da primeira fissuração. Por essa razão, os resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão em CPR muitas vezes resultam em um valor de pico antes da primeira fissuração, assim como uma resistência pós-pico. Consequentemente, a resistência à tração assume cada vez mais importância como uma propriedade a ser considerada no projeto (HABEL, 2004).

Blais e Couture (1999) observam que o concreto convencional e o de alta resistência apresentam um comportamento ligeiramente distinto entre si quando se fala em desempenho à flexão, e que o CPR, quando submetido a diferentes níveis de tratamento, tem suas propriedades à flexão bastante melhoradas, o que possibilita uma certa classificação por tipo de tratamento. Dessa forma, o CPR com fibras e não confinado seria o de desempenho inferior, passando pelo CPR sem fibras e confinado, seguido pelo CPR com fibras e confinado, o CPR sem fibras, confinado e com aplicação de pressão confinante e por fim, o CPR com fibras, confinado e com aplicação de pressão confinante.

Outra propriedade importante do CPR é a tenacidade, definida por Figueiredo (2005) como sendo o trabalho dissipado no material durante o ensaio de flexão até um determinado nível de deslocamento. Essa propriedade é utilizada na avaliação de materiais compósitos, possuindo a desvantagem básica de depender das dimensões do corpo de prova, bem como do sistema de aplicação dos esforços. A tenacidade mede a energia mecânica necessária para levar o material à sua ruptura, indicando a quantidade de energia que um material pode absorver antes de fraturar. Os materiais cerâmicos, por exemplo, têm uma baixa tenacidade. O método prescrito pela *Japan Society of Civil Engineers* (JSCE-SF4, 1984) para a determinação da tenacidade é o mais empregado no Brasil e também é o de concepção mais simples.

Para o módulo de elasticidade, o CPR também exhibe valores maiores do que se comparado ao concreto convencional. Entretanto, esta propriedade do material não é aumentada na mesma proporção do que ocorre para a resistência à compressão. Os valores para o módulo de elasticidade típicos do CPR variam entre 45 e 65 GPa, aos 28 dias. Para o coeficiente de Poisson, foi determinado por Dugat (1996) como sendo de 0,22 a 0,24. Entretanto, trabalhos mais recentes demonstraram que ele pode variar de 0,16 até 0,24 (GRAYBEAL, 2013). Na Tabela 5 está compilado um resumo comparativo de algumas propriedades do CPR frente ao concreto convencional e o concreto de alta resistência.

Tabela 5 – Comparativo entre propriedades mecânicas do concreto convencional, concreto de alta resistência e CPR [Fonte: adaptado de DUGAT et al., 1996; GRAYBEAL, 2013].

Propriedades	Concreto convencional	Concreto de alta resistência	CPR200
Resistência à compressão	20 a 50 MPa	60 a 120 MPa	170 a 230 MPa
Resistência à flexão	4 a 8 MPa	6 a 10 MPa	30 a 60 MPa
Resistência à tração direta	2 a 4 MPa	4 a 6 MPa	6 a 15 MPa
Energia de fratura	130 J/m ²	140 J/m ²	20.000 a 40.000 J/m ²
Módulo de elasticidade	25 a 30 GPa	30 a 40 GPa	50 a 60 GPa
Coefficiente de Poisson	0,20	0,20 a 0,21	0,16 a 0,24

2.6.2 Durabilidade

Segundo a ISO 6241 (1984), a durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura, o ambiente e as condições de uso, operação e manutenção. Dessa forma, a durabilidade não pode ser encarada como uma propriedade intrínseca à estrutura ou ao material, de modo que

uma mesma estrutura pode desempenhar diferentes funções de durabilidade no tempo dependendo das condições a que é submetida.

Para Ozyldirim (2011), o desempenho do concreto relacionado com a durabilidade é geralmente avaliado por uma série de parâmetros, entre os quais as propriedades mecânicas e a permeabilidade aos gases e à água são considerados fundamentais. Aïtcin (2001) explica que para o cálculo de uma estrutura de concreto armado, normalmente se considera a resistência como o parâmetro de maior relevância. Contudo, para que uma estrutura possa ter a vida útil definida em projeto, torna-se importante garantir que a resistência do concreto seja mantida ao longo do tempo, o que leva a resistência inicial do concreto a não ser tão importante quanto a sua durabilidade.

O CPR exhibe características de durabilidade que são significativamente superiores do que aquelas normalmente associadas ao concreto convencional ou mesmo de alta resistência. Um estudo conduzido pela FHWA (GRAYBEAL, 2006) teceu algumas conclusões sobre a durabilidade do material:

- independentemente do tratamento de cura a que é submetido, o módulo dinâmico foi de pelo menos 95% do valor inicial, mesmo depois de mais de 600 ciclos de congelamento/descongelamento;
- o CPR se mostrou impermeável sob o teste da ASTM C672 (que mede a permeabilidade a agentes químicos anticongelamento) mesmo depois de passar por cerca de 200 ciclos;
- a penetração por íons cloreto, aos 28 dias, medida pela ASTM C1202, ficou abaixo de 50 Coulombs para o CPR submetido a tratamento térmico (cura à vapor) e foi de 360 Coulombs para o CPR não tratado. Aos 56 dias, os resultados para o CPR não tratado caíram para 76 Coulombs;
- o CPR foi considerado inócuo no ensaio de reação álcali-sílica.

Para Aïtcin (2003), a durabilidade de um determinado material só pode ser conhecida depois que a estrutura estiver exposta em um ambiente agressivo por longos períodos de tempo. Segundo ele, a durabilidade do CPR ainda não está comprovada, já que se trata de um

material relativamente novo. Contudo, considerando a experiência existente com concretos convencionais, é possível afirmar que o CPR apresenta uma durabilidade superior.

A permeabilidade de um concreto é uma característica bastante importante na avaliação da sua durabilidade. Uma baixa permeabilidade significa a não penetração de agentes agressivos no interior do material, fazendo com que o mesmo não seja degradado. Dessa forma, a permeabilidade pode ser um excelente parâmetro para qualificar a durabilidade de um determinado material (MEHTA, 2014).

Roux et al. (1996) mediram a porosidade acumulada de um CPR submetido a diferentes tratamentos de cura com a técnica de porosimetria por intrusão de mercúrio, que permite a medição de poros com dimensões de 6 nm a 100 μm . A porosidade cumulativa do CPR foi inferior a 9% para traços sem tratamento de calor e aplicação de pressão confinante e menos de 0,5% para CPR sujeito a estes métodos de cura.

A Figura 14 mostra um estudo de medição da porosidade do CPR, utilizando porosimetria, conduzido por Cheyrezi (1995).

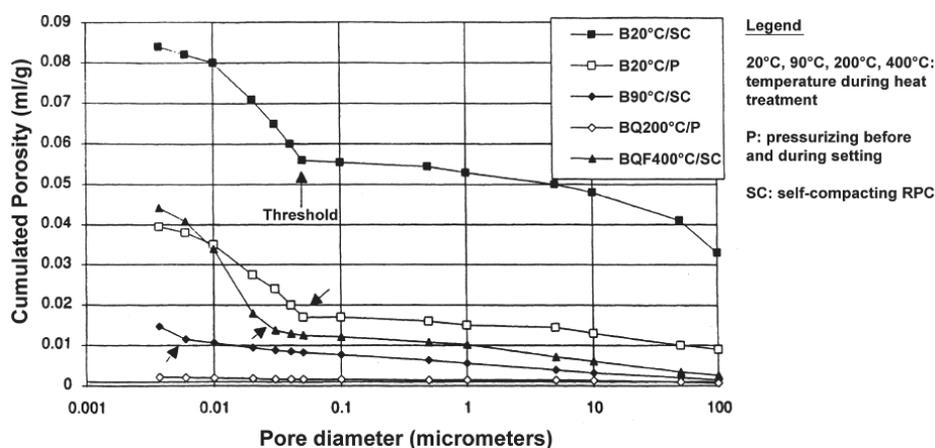


Figura 14– Porosidade cumulativa do CPR (adaptado de Cheyrezi, 1995).

Conforme a Figura 14, a porosidade do CPR consiste essencialmente de poros com diâmetro menor do que um valor limiar (marcados com as flechas). Uma redução da porosidade cumulativa corresponde a uma diminuição no valor de limiar (vide B20°C/SC, B90°C/SC). Para algumas amostras (BQ200°C/SC) o valor do limiar é tão pequeno que não pode ser detectado por intrusão de mercúrio. Nesse caso, a porosidade cumulativa é também insignificante. A ligeira inclinação que pode ser observada para a amostra BQ 200°C/P é devida à compressibilidade do mercúrio.

Em comparação, o concreto convencional tem uma porosidade acumulada entre 10 e 15%. A porosidade capilar do CPR é muito pequena ou mesmo ausente (CHEYREZY, 1995; ROUX et al., 1996).

Roux et al. (1996) também mediram a permeabilidade ao ar em amostras de CPR tratadas termicamente. O coeficiente de permeabilidade $k = 2,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ foi, segundo os pesquisadores, de 50 a 500 vezes inferior à de um concreto convencional. Os valores medidos ficaram próximos do limite de sensibilidade do método de ensaio utilizado. Algumas dessas medições de permeabilidade foram realizadas em amostras fissuradas, induzidas por ensaio de tração uniaxial, e também em amostras não fissuradas de corpos de prova de CPR.

2.6.3 Sustentabilidade

Poucos artigos foram publicados sobre a sustentabilidade do uso do CPR comparado com o número publicado sobre suas propriedades mecânicas e de durabilidade. Devido à crescente exigência de se considerar a sustentabilidade, o tema vem ganhando espaço gradativamente.

Schmidt e Jerebic (2008) informaram que a energia requerida para a produção de 1 m^3 de CPR era aproximadamente o dobro daquela utilizada para o mesmo volume de concreto convencional. No entanto, quando a energia total demandada para construir a ponte *Gaertnerplatz* utilizando tubos de aço e CPR foi comparada com a demanda de energia de uma ponte equivalente construída em concreto protendido, esse valor foi reduzido para 25%. O maior componente de energia foi para a produção do aço dos tubos. Se os tubos de aço pudessem ser substituídos por elementos feitos inteiramente de CPR, estima-se que a energia necessária cairia em cerca de 50%. Quando as contribuições de CO_2 para o efeito estufa a partir da construção foram consideradas, a combinação CPR + tubos de aço obteve o maior valor, o tubo em CPR o menor valor de contribuição e a ponte de concreto protendido foi considerada intermediária.

Nos estudos conduzidos por Sedran, Durand, e De Larrard (2009), foi considerada a hipótese de reciclagem do CPR. Segundo eles, o material poderia ser esmagado e separado em areia e fibras. A areia reciclada poderia então ser utilizada como um substituto da areia natural em concretos autoadensáveis, sem perda de fluidez e sem diminuição na resistência à compressão, segundo eles. Para Stengel e Schießl (2008) o impacto ambiental da produção do

CPR é causado principalmente pela produção das fibras de aço, pelo cimento Portland e pelos aditivos. O efeito do calor nos processos de cura térmica do CPR não foi levado em conta.

Em outro estudo conduzido por Stengel (2009), foi avaliado o ciclo de vida das estruturas de pontes executadas segundo a norma alemã DIN ISO 14040 (2006). A pesquisa concluiu que o impacto ambiental de estruturas feitas em CPR foi de até 2,5 vezes maior do que com o concreto convencional. Para os autores do estudo, o impacto ambiental pode ser diminuído através da redução da quantidade de cimento Portland, das fibras de aço e dos teores de aditivos superplastificantes.

2.7 DIMENSIONAMENTO

Um dos maiores desafios da engenharia atual reside na questão de como projetar e dimensionar estruturas com novos materiais que não se encaixam nas normas atuais, e nos seus modelos de cálculo, baseadas no concreto armado e/ou protendido. Como o CPR é um material com desempenho mecânico superior, e que não se enquadra nas normas de projeto existentes, houve um processo de criação de diretrizes de projeto por parte de vários grupos, no intuito de auxiliar os projetistas nesta tarefa. A seguir é apresentada uma lista de diretrizes e instruções criadas por alguns países, segundo levantamento feito pela FWHA (2013):

França – em março de 1999, por requisição do Comitê Técnico e Científico da Associação Francesa de Engenheiros Civis, foi dado início ao estudo para a criação de um guia de recomendações de projeto para estruturas em CPR. Em janeiro de 2002 foi publicado o “*Interim Recommendations*”, tanto em francês como em inglês.

Austrália – com o apoio da Universidade de New South Wales, foi publicado, em 1999, o “*Design Guide for RPC Prestressed Beams*”, em conformidade com o código australiano AS3600-1994. O documento traz exemplos de projeto e recomendações acerca da resistência à compressão, flexão, cisalhamento e torção, assim como dita limites de fissuração à flexão, o controle de deflexões, o desempenho ao fogo, à fadiga, as perdas por protensão e um guia sobre pontos de ancoragem.

Estados Unidos – motivado pelos trabalhos de construção de estruturas em CPR e o programa de pesquisas desenvolvido pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) em 1999, em paralelo com os trabalhos da FHWA (*Federal Highway Administration*), em 2000, o

MIT conduziu os trabalhos para a elaboração de um estudo de otimização do material para pontes rodoviárias. Fruto desse trabalho conjunto surgiu, em 2002, o CEE report R03-01, “Model-Based Optimization of Ultra-High Performance Concrete Highway Bridge Girders”. O documento apresenta um modelo de projeto baseado na matriz de um compósito elastoplástico reforçado com fibras.

Japão – em setembro de 2004, a Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis – JSCE, publicou uma prévia do “Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites With Multiple Fine Cracks – HPFRCC”. Neste documento foram incluídas recomendações para o projeto, as propriedades necessárias dos materiais constitutivos, os tipos de ensaios, os critérios de durabilidade, métodos construtivos e exemplos de pontes japonesas já construídas com o material. O material completo foi publicado em março de 2008.

Para a FWHA (2013), em seu estudo mais recente, embora mais pesquisa seja desejável, é provável que atualmente já exista informação suficiente para desenvolver um documento abordando os principais aspectos do projeto estrutural de acordo com as práticas de diversos países. Estes aspectos incluem as propriedades do material à flexão, compressão, cargas de tração, cisalhamento, protensão, estimativas aproximadas de perdas ao longo do tempo com base em dados de fluência e retração e alguns aspectos sobre detalhes de reforço e a questão da durabilidade em longo prazo. Na ausência de todos os dados, poderia se utilizar parâmetros já existentes em outras recomendações. Este conceito pode não resultar imediatamente no projeto mais econômico. Em função de vários projetos já terem sido concluídos nos Estados Unidos, Ásia e Europa, deve haver experiência suficiente disponível para identificar as disposições necessárias para especificar um guia de construção.

De acordo com Graybeal (2013), para a correta aplicação do CPR novos procedimentos de ensaio são necessários, tanto para o desenvolvimento de misturas como para o controle de qualidade do material no estado fresco e endurecido. Na maioria dos casos, estes podem ser adaptações de padrões de teste já existentes para o concreto convencional, mas modificados para as propriedades particulares do CPR. Além disso, são necessárias especificações de materiais genéricos para incentivar a introdução de materiais mais competitivos e, eventualmente, ambientalmente sustentáveis.

2.8 CUSTOS

Blais e Couture (1999) comentam que em função dos altos custos envolvidos na sua obtenção, o CPR não pode ser comparado ao concreto convencional e muito menos ser utilizado para substituir estruturas onde o concreto armado tradicional já é economicamente viável. Como já dito, suas características únicas em termos de desempenho mecânico, o situam ao mesmo nível das estruturas em aço.

O custo unitário inicial do CPR excede em muito o do concreto convencional. Conseqüentemente, sua utilização vem sendo concentrada na otimização do seu uso, reduzindo a espessura dos elementos, mudando as formas estruturais ou desenvolvendo soluções que atendam as deficiências estruturais dos materiais existentes. Em termos gerais, o material tem sua utilização baseada em elementos pré-fabricados diferenciados, como cascas, placas finas, vigas esbeltas, entre outros. Para compensar esse custo mais elevado, deve-se considerar uma análise de custos ao longo do ciclo de vida, que leva em conta a durabilidade melhorada do CPR frente ao concreto convencional. Como já discutido anteriormente, o CPR é um produto muito durável e as estruturas construídas com o material tendem a ter uma vida útil maior e requerer menos manutenção do que as estruturas construídas em concreto convencional.

Racky (2004) determinou que o consumo de energia e matéria-prima necessárias para a produção de um pilar quadrado reforçado feito de CPR eram de 74% e 58%, respectivamente, em relação às quantidades necessárias para um pilar de capacidade de carga equivalente com f_{ck} entre 40 e 50 MPa. Ele também apontou uma menor taxa de carbonatação e maior resistência à penetração de cloretos do que para o concreto convencional. Conseqüentemente, as estruturas rodoviárias feitas com CPR terão menores custos de manutenção e reparação no futuro em comparação com pontes de concreto convencional. No entanto, faltaram dados suficientes para realizar uma análise de custo de ciclo de vida realista.

Em seu relatório de junho de 2013, a FHWA (2013) atesta que Piotrowski e Schmidt realizaram uma análise de custos baseada no ciclo de vida (ACV) para dois métodos construtivos de reposição para uma ponte, em Felsberg, na Alemanha. Um dos métodos propostos consistia em uma caixa pré-moldada em CPR e depois preenchida com concreto leve. O segundo método previu a utilização de elementos da ponte construídos em concreto convencional pretendido. Embora o CPR tenha tido custos iniciais mais elevados de

implantação, os autores do estudo previram que os custos finais ao longo de um ciclo de vida de 100 anos seriam menores para a ponte construída em CPR, considerando principalmente a manutenção da estrutura.

Outro estudo realizado como intuito de se obter o perfil ambiental do material utilizou uma ACV usando as referências das ISO 14040 e 14043. Este trabalho foi conduzido num estudo independente pela ECOBILAN (DAMTOFT, et al., 2008). Para tanto, a análise incluiu a produção do CPR, a obtenção dos materiais constituintes e sua aplicação. Os seguintes fatores foram levados em conta nesta análise:

- o consumo de recursos energéticos não renováveis (petróleo, gasolina, gás nat.);
- o consumo de constituintes renováveis (cal, argila, ...);
- o consumo de água;
- as emissões de gases de efeito-estufa;
- as emissões ácidas;
- a eutrofização;
- a produção de resíduos sólidos residuais.

Com base nestes dados, um estudo interno conduzido pela Lafarge e apresentado por Damtoft et al. (2008) comparou a estrutura de uma ponte hipotética projetada utilizando uma abordagem convencional (vigas em aço com uma laje de concreto de 30 MPa) por um lado, e uma ponte construída apenas em CPR do outro. Sem entrar em detalhes sobre o estudo, foram feitas especificações equivalentes de capacidade de desempenho mecânico e de carga, verificando-se que para a abordagem em CPR, seriam necessárias apenas 65% das matérias-primas e 51% da energia primária, com 47% das emissões de CO₂ globais em relação à abordagem convencional. Previu-se também que a vida útil de serviço da ponte em CPR seria significativamente maior do que a da estrutura convencional.

Finalmente, o maior custo dos materiais que constituem o CPR implica necessariamente que ele vai ter um custo mais elevado por unidade de volume do que o concreto convencional ou mesmo de alto desempenho. Segundo a FHWA (2009), é improvável que este aumento seja compensado inteiramente através do uso de projetos estruturais mais eficientes. Em resumo,

para compensar o maior custo, deve-se levar em conta o ciclo de vida do material, com uma abordagem que considere a durabilidade melhorada do CPR frente aos demais materiais de aplicação corrente no momento.

A análise de custos efetuada neste trabalho foi baseada no desempenho mecânico/estrutural do material, comparando-o ao concreto convencional utilizado em estruturas pré-fabricadas.

3 MATERIAIS

A seleção dos materiais constituintes apresenta grande influência no desempenho final do material e a produção do CPR deve ser feita preferencialmente com materiais convencionalmente utilizados na construção civil e encontrados facilmente próximo ao local de produção, garantindo menores custos de transporte e impacto ambiental. Neste caso, à exceção das fibras e da sílica ativa, todos os materiais utilizados encontram-se dentro de um raio de 100 km da região metropolitana de Porto Alegre - RS, que concentra uma importante parcela da indústria nacional de pré-fabricados de concreto.

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados no programa experimental e sua caracterização. A escolha destes materiais está baseada em razões técnico-econômico-ambientais, leia-se:

- **técnicas:** materiais com características químicas e granulométricas adequadas para o emprego na produção de CPR;
- **econômicas:** materiais de uso corrente na construção civil, de fácil aquisição no mercado, com baixo valor de transporte (dentro do possível) e buscando custo final competitivo para implementação na indústria de pré-fabricados;
- **ambientais:** incorporação de cinza volante com conseqüente redução do consumo de cimento.

3.2 AGLOMERANTE PRINCIPAL

O aglomerante principal utilizado em todos os traços foi um cimento hidráulico, do tipo Portland, CP V-ARI, de alta resistência inicial. A utilização deste tipo de cimento se deve ao fato de ser o cimento com a menor porcentagem de adições (maior teor de clínquer) dentre os cimentos brasileiros disponíveis atualmente no mercado, uma vez que o cimento Portland comum, o CP-I, não vem sendo fabricado pela indústria nacional. Isso o torna adequado para a verificação dos efeitos dos aglomerantes suplementares no traço. Além disso, o CP-V é o cimento mais utilizado na indústria de pré-fabricados, em função do seu elevado ganho de resistência nas primeiras idades.

Todo o cimento utilizado na dosagem é proveniente de um mesmo lote de fabricação. As informações do lote, solicitadas ao fabricante, estão compiladas na Tabela 6.

Tabela 6– Composição química e características físico-químicas do cimento utilizado (dados do fabricante e de análise em laboratório).

Composição química do cimento (%)	
C ₃ S	78,37
C ₂ S	-
C ₃ A	5,47
C ₄ AF	8,79
MgO	1,94
SO ₃	3,07
CO ₂	2,45
Resíduo insolúvel	0,54
Perda ao fogo	3,76
Características físico-químicas	
diâmetro médio (µm)	9,65
área específica - Blaine (cm ² /g)	4598
aspecto físico	sólido particulado
massa específica (g/cm ³)	3,09
pH	12,0 a 14,0
Resistência à compressão (NBR 7215/96)	
1 dia	30,90 MPa
3 dias	45,50 MPa
7 dias	50,70 MPa
28 dias	55,60 MPa

O lote utilizado também se encontra dentro dos parâmetros de norma, com 92% de clínquer, 3% de sulfato de cálcio e 5% de calcário.

A análise granulométrica do cimento foi realizada no Laboratório de Materiais cerâmicos (LACER) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), e a distribuição é apresentada na

Figura 15. A análise indicou que as partículas de cimento possuem diâmetro médio de 9,65 µm.

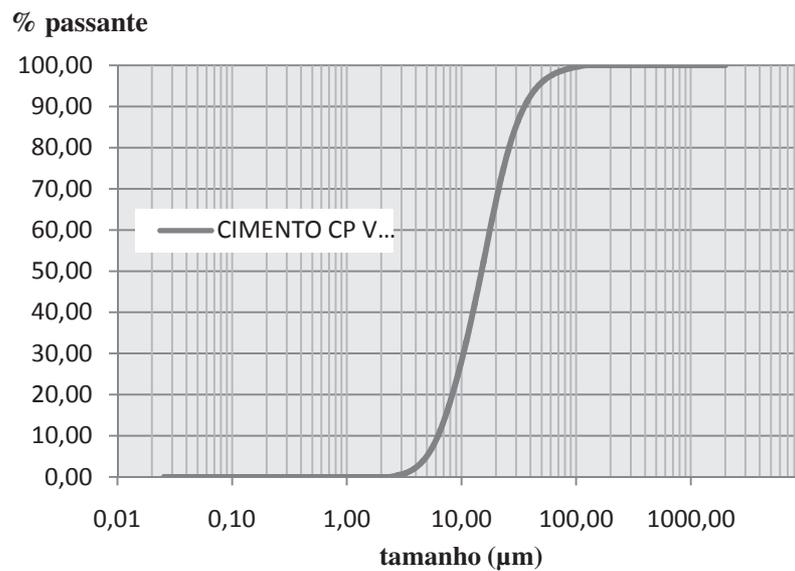


Figura 15 – Distribuição granulométrica do cimento utilizado.

3.3 AGLOMERANTES SUPLEMENTARES

Os materiais que desempenham uma função aglomerante secundária foram definidos como aglomerantes suplementares. Os aglomerantes suplementares utilizados estão descritos a seguir.

3.3.1 Sílica Ativa

A sílica ativa, também conhecida como sílica volatilizada, microssílica ou fumo de sílica condensado, é um subproduto proveniente da indústria de silício metálico e de ligas de ferro-silício, composta essencialmente por sílica amorfa. A Tabela 7 traz a composição química e algumas características físico-químicas do material utilizado.

Tabela 7– Composição química e características físico-químicas da sílica ativa utilizada (dados do fabricante).

Composição química da sílica ativa (%)	
SiO ₂ (amorfo)	≥ 85,00
SiO ₂ (cristalino)	≤ 0,50
Na ₂ O	≤ 1,50
C	≤ 6,00
Perda ao fogo	≤ 6,00
Características físico-químicas	
diâmetro médio	0,40 µm
área específica - Blaine (cm ² /g)	19000
solubilidade em água	insolúvel
aspecto físico	sólido particulado
massa específica (g/cm ³)	2,22
pH	10,0

A sílica utilizada também foi caracterizada através de granulometria a laser, realizada pelo LACER/UFRGS, conforme apresentado na Figura 16.

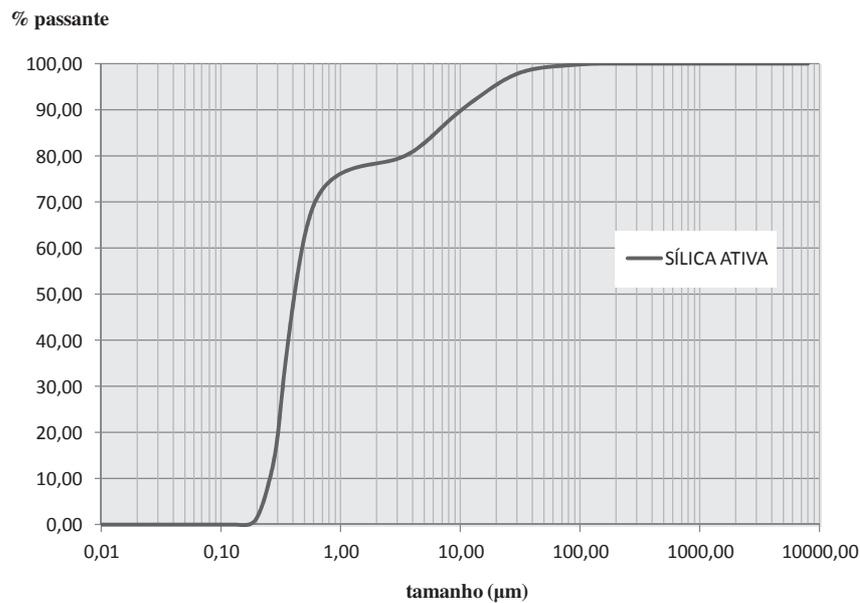


Figura 16– Distribuição granulométrica da sílica ativa utilizada.

3.3.2 Cinza volante

A cinza volante foi utilizada como aglomerante suplementar, buscando a diminuição do consumo de cimento e a melhoria das propriedades na microestrutura do material. Trata-se de

uma cinza resultante da queima de carvão mineral na planta de uma fábrica de celulose, proveniente da cidade de Guaíba – RS, na região Metropolitana de Porto Alegre – RS.

A Tabela 8 resume os dados da composição química e as características físico-químicas da cinza volante utilizada a partir de análises efetuadas em laboratório.

Tabela 8– Composição química e características físico-químicas da cinza volante utilizada.

Composição química da cinza volante (%)	
SiO ₂	69,30
Al ₂ O ₃	26,10
Fe ₂ O ₃	1,80
CaO	0,90
MgO	0,05
Na ₂ O	0,30
K ₂ O	1,40
Características físico-químicas	
diâmetro médio (µm)	23,53
aspecto físico	sólido particulado
massa específica (g/cm ³)	2,18
pH	12,4

O material também foi caracterizado por granulometria a laser, realizada no LACER-UFRGS. A Figura 17 mostra o diagrama da distribuição granulométrica do material. A análise das partículas também indicou um diâmetro máximo de 88,00 µm.

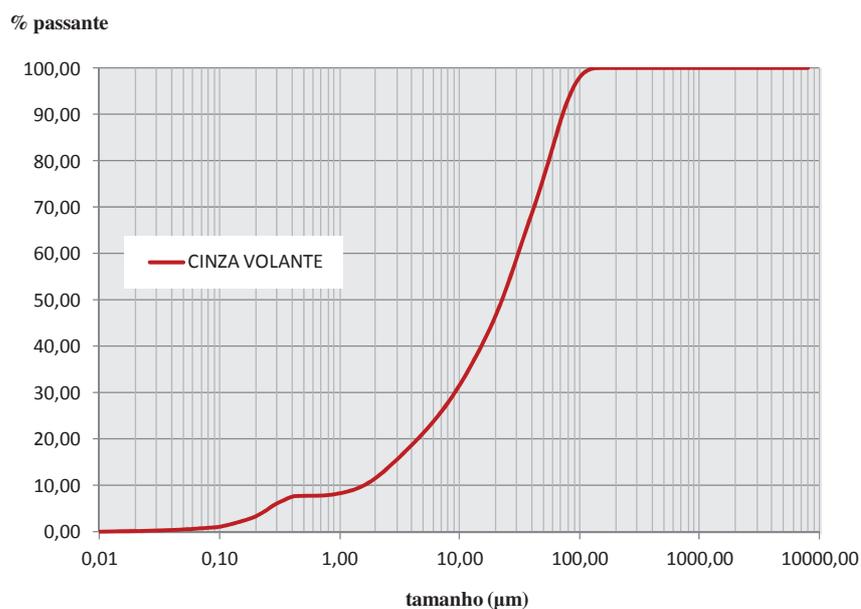


Figura 17 – Distribuição granulométrica da cinza volante utilizada.

A cinza volante também foi caracterizada através de uma análise de difratometria por Raios X. A análise foi feita no Instituto de Física da UFRGS. O difratograma obtido, apresentado na Figura 18, possui um pico amorfo, característico dos materiais pozolânicos, e compostos cristalinos identificados como quartzo e mulita.

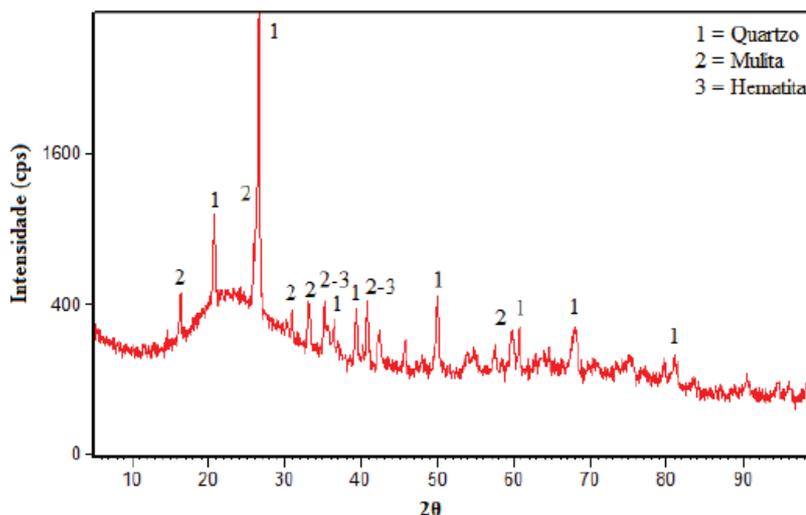


Figura 18– Difratograma de Raios X da cinza volante utilizada.

3.4 AGREGADOS

Para a composição dos traços de CPR estudados, foram utilizados dois tipos de areia, de forma a se obter um empacotamento mais uniforme em função das diferentes distribuições granulométricas das mesmas. Estas areias foram caracterizadas através de granulometria a laser e são apresentadas a seguir.

Para o traço do concreto convencional de referência, foi utilizada uma areia diferente daquelas utilizadas nos traços de CPR analisados. Além disso, também foi utilizado um agregado natural graúdo (brita).

A seguir estão apresentados os agregados utilizados neste estudo.

3.4.1 Areia quartzosa de rio beneficiada

A primeira areia utilizada nos traços de CPR analisados é proveniente da cidade de Osório – RS. É uma areia fina, quartzosa, de cor amarelada e beneficiada em processo de lavagem para retirada de impurezas. O material possui uma massa específica de $2,65 \text{ g/cm}^3$, com diâmetro máximo de $600 \mu\text{m}$. A Tabela 9 traz a análise granulométrica da areia utilizada.

Tabela 9– Análise granulométrica da areia quartzosa de rio beneficiada.

Peneira (mm)	NBR NM 248/2003	
	Retida (%)	Acumulada (%)
2,400	0,00	0,00
1,200	0,00	0,00
0,600	4,30	4,30
0,300	56,20	60,50
0,150	38,60	99,10
0,075	0,90	100,00
MF	1,64	
$D_{\text{máx.}}$	0,6 mm	

A distribuição granulométrica da areia é apresentada na Figura 19.

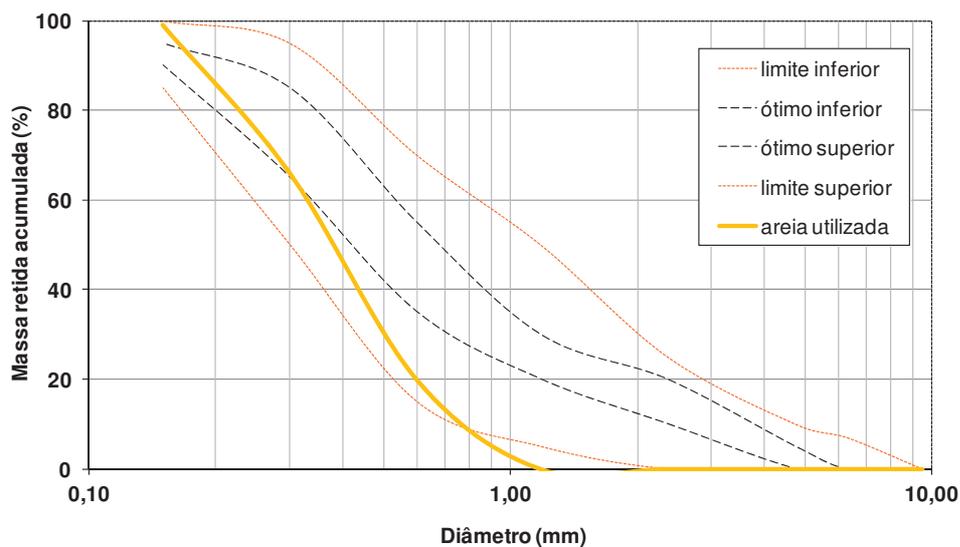


Figura 19– Distribuição granulométrica da areia quartzosa de rio beneficiada utilizada nos traços de CPR.

3.4.2 Areia quartzosa industrial

A segunda areia utilizada na composição dos traços de CPR analisados é uma areia quartzosa lavada, do tipo industrial, de cor branca, também utilizada na indústria de pré-fabricados para a produção de *Glass Reinforced Concrete* - GRC. É um material beneficiado, proveniente de extração em mina a céu aberto, possuindo um diâmetro máximo das partículas de 2400 μm e massa específica de 2,65 g/cm³. A Tabela 10 traz a análise granulométrica da areia utilizada.

Tabela 10– Análise granulométrica da areia quartzosa industrial.

Peneira (mm)	NBR NM 248/2003	
	Retida (%)	Acumulada (%)
2,400	0,00	0,00
1,200	5,70	5,70
0,600	74,90	80,60
0,300	16,00	96,60
0,150	3,40	100,00
0,075	0,00	100,00
MF	2,83	
D _{máx.}	2,4 mm	

A distribuição granulométrica dessa areia está apresentada na Figura 20.

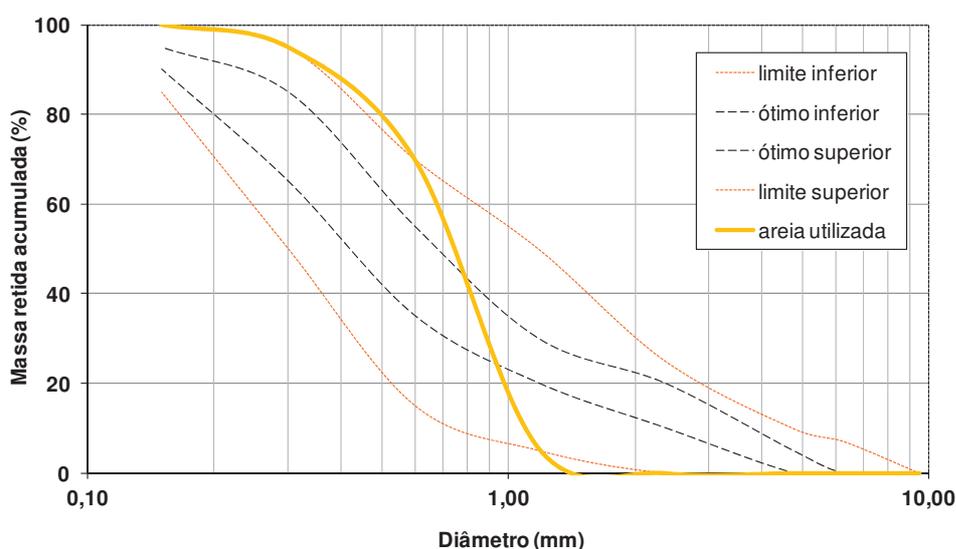


Figura 20– Distribuição granulométrica da areia quartzosa industrial utilizada nos traços de CPR.

3.4.3 Areia quartzosa natural

Na composição do traço de concreto convencional de referência, foi utilizada uma areia natural, extraída do Rio Jacuí, na região Metropolitana de Porto Alegre – RS, comumente utilizada pelas indústrias concreteiras e de pré-fabricados da região.

Esta areia não passa por nenhum processo de beneficiamento, sendo utilizada tal qual se encontra na extração. O material possui massa específica de $2,60 \text{ g/cm}^3$, com um diâmetro máximo das partículas de $2400 \text{ }\mu\text{m}$. A Tabela 11 traz a análise granulométrica da areia utilizada, realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2001).

Tabela 11– Análise granulométrica da areia quartzosa natural utilizada.

Peneira (mm)	NBR NM 248/2003	
	Retida (%)	Acumulada (%)
4,800	0,20	0,20
2,400	3,80	4,00
1,200	10,00	13,90
0,600	29,90	43,80
0,300	45,30	89,10
0,150	0,10	89,20
0,075	10,70	100,00
MF	2,40	
$D_{\text{máx.}}$	2,4 mm	

A distribuição granulométrica dessa areia é apresentada na Figura 21.

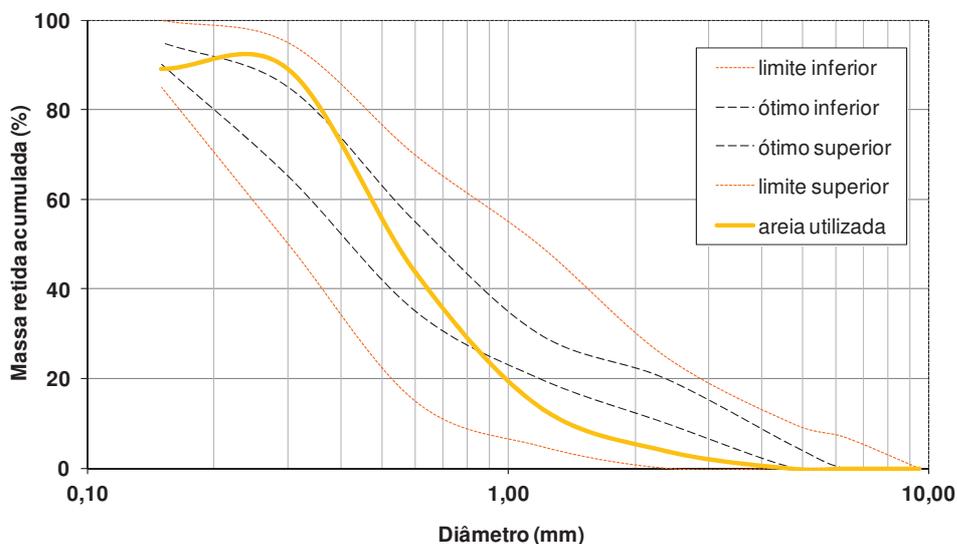


Figura 21 – Distribuição granulométrica da areia utilizada no traço do concreto convencional de referência.

3.4.4 Brita basáltica

Para a composição do traço de concreto convencional, foi utilizada uma brita basáltica com diâmetro máximo de 25 mm. O material é proveniente da região Metropolitana de Porto Alegre – RS e possui massa específica de 2,90 g/cm³. Assim como no caso da areia natural, este material é empregado pelas indústrias de pré-fabricados e usinas de concreto da região.

Para a sua utilização, o material passou por processo de lavagem para a retirada de materiais pulverulentos e outras impurezas. A Tabela 12 traz a análise granulométrica da brita utilizada, realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2001).

Tabela 12– Análise granulométrica da brita utilizada.

Peneira (mm)	NBR NM 248/2003	
	Retida (%)	Acumulada (%)
25,000	0,00	0,00
19,000	12,00	12,00
12,500	57,00	69,00
9,500	17,50	86,50
6,300	8,50	95,00
4,800	5,00	100,00
fundo	0,00	100,00
MF	6,99	
D _{máx.}	25,0 mm	

A distribuição granulométrica da brita é apresentada na Figura 22.

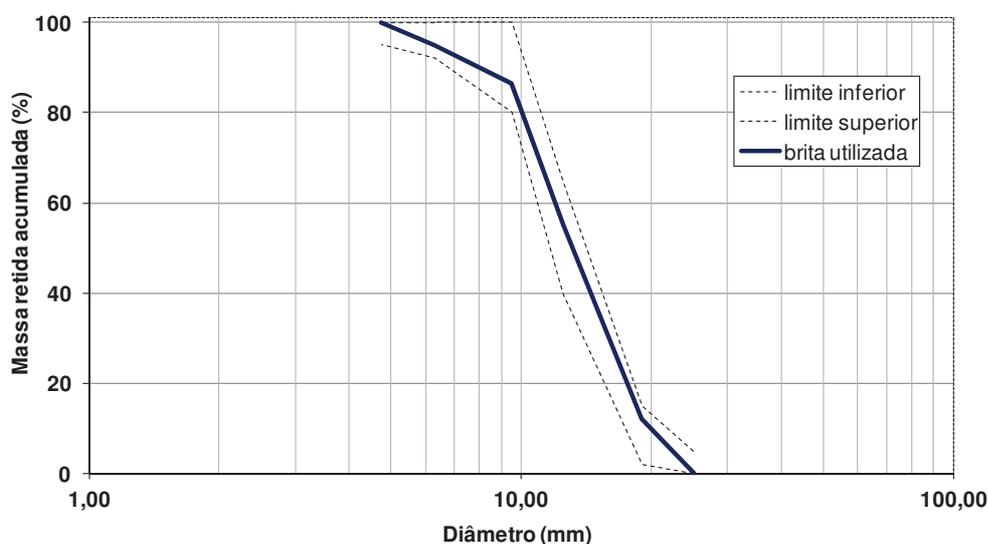


Figura 22– Distribuição granulométrica da brita utilizada no traço do concreto convencional de referência.

3.5 FÍLER (PÓ DE QUARTZO)

O pó de quartzo foi utilizado como fíler. É um pó fino, de cor branca, com alto teor de pureza, constituído por mais de 99% de dióxido de silício, em sua grande parte cristalino.

O material é obtido por processo de moagem industrial, a partir de lascas de quartzo. Uma vez moído, passa por um processo de controle de pureza e de granulometria. Segundo Lastres e Lemos (1992) e Mori et al. (2007), é originalmente utilizado como matéria-prima na indústria de tecnologia avançada para a fabricação de *silica glass*, placas fotovoltaicas, entre outros. Também é utilizado como carga na fabricação de tintas e também na composição de alguns abrasivos. A Tabela 13 apresenta a composição química e as características físico-químicas do pó de quartzo utilizado.

Tabela 13– Composição química e características físico-químicas do pó de quartzo utilizado (dados do fabricante).

Composição química do pó de quartzo (%)	
SiO ₂ (cristalino)	≥ 99,70
Al ₂ O ₃	0,07
Fe ₂ O ₃	0,05
TiO ₂	0,02
Perda ao fogo	≤ 0,16
Características físico-químicas	
diâmetro médio (µm)	11,52
granulometria	passante na peneira #200
solubilidade em água	insolúvel
aspecto físico	sólido particulado
massa específica (g/cm ³)	2,65
pH	6,0

Ele foi caracterizado por granulometria a laser, realizada pelo LACER-UFRGS. A Figura 23 mostra o diagrama da distribuição granulométrica do material. A análise das partículas indicou um diâmetro máximo de 29,19 µm.

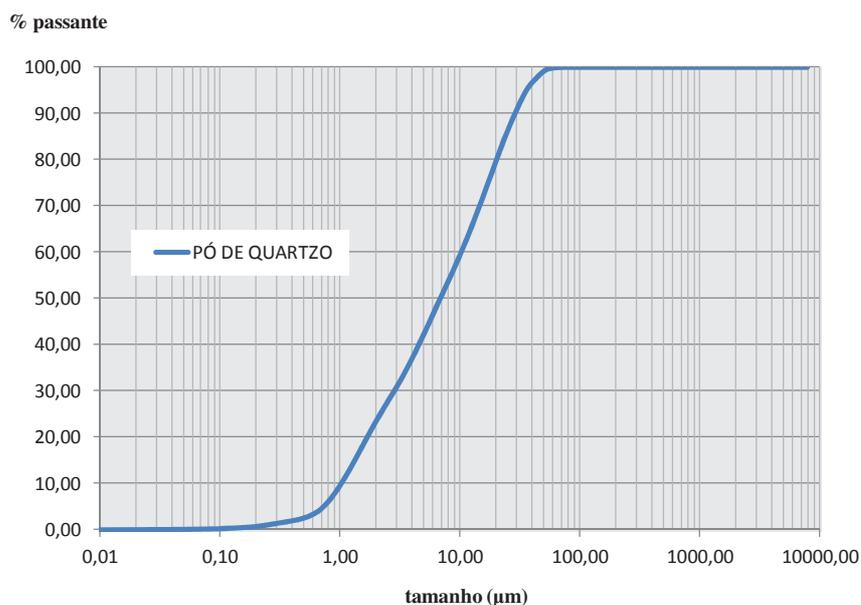


Figura 23 – Distribuição granulométrica do pó de quartzo utilizado.

3.6 ADITIVOS

Foram utilizados dois aditivos na formulação dos traços: um aditivo superplastificante de terceira geração e um aditivo modificador de viscosidade. As características dos mesmos são apresentadas a seguir.

3.6.1 Superplastificante

O aditivo superplastificante foi utilizado com o objetivo de garantir a trabalhabilidade e a dispersão dos componentes, além de proporcionar redução na quantidade de água necessária, permitindo a utilização de uma relação água/cimento baixa. O aditivo utilizado é de terceira geração e suas características técnicas estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14– Características do aditivo superplastificante utilizado (dados do fabricante).

Característica	Aditivo superplastificante de terceira geração
Composição	base policarboxilato modificado
Estado físico	líquido
Cor	castanho claro
Peso específico	1,10 ± 0,02 g/cm ³
Dosagem	0,30% a 2,00% sobre o cimento
Voláteis (% em peso)	51,0 %
Teor de sólidos	49,0 %
pH (produto puro)	5,5 ± 1,0
Solubilidade	altamente solúvel em água
Teor de cloretos	isento

3.6.2 Modificador de viscosidade

O aditivo modificador de viscosidade utilizado é um aditivo com capacidade de proporcionar alta lubricidade. É utilizado originalmente na indústria de concreto como auxiliar de bombeamento. No caso específico deste trabalho, o aditivo foi utilizado para atuar como auxiliar na manutenção da trabalhabilidade e na modificação da viscoelasticidade da mistura após a adição das fibras metálicas. Suas características técnicas estão apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15– Características do aditivo modificador de viscosidade utilizado (dados do fabricante).

Característica	Aditivo modificador de viscosidade
Composição	poliéteres hidrossolúveis
Estado físico	líquido viscoso transparente
Cor	levemente turvo
Massa específica	1,00 ± 0,02 g/cm ³
Voláteis (% em peso)	não especificado
pH (produto puro)	6,0 ± 1,0
Solubilidade	solúvel em água
Teor de cloretos	isento

3.7 FIBRAS

Foram utilizadas duas fibras diferentes no estudo: uma fibra metálica e uma fibra de polipropileno. A fibra metálica foi utilizada na composição de dois traços (com teor de 100% para 3% em volume) e também associada à fibra de polipropileno em um terceiro traço (com teor de 80% para 3% em volume, com os restantes 20% em fibra de polipropileno). As características das mesmas são apresentadas a seguir.

3.7.1 Fibra metálica (AÇO)

A fibra metálica utilizada nesta pesquisa é uma fibra de aço, com alto teor de carbono, satisfazendo a norma europeia EN 10016-2 – C72D, fabricada a partir de fios-máquina de alta resistência e, segundo o fabricante, com diâmetro e comprimento desenhados especialmente para o reforço de concretos e argamassas de resistência mecânica superior aos 100 MPa.

Neste caso específico, foi utilizada uma fibra reta, banhada a bronze, com comprimento de 13mm e diâmetro médio de 0,21 mm (OL13/.20), perfazendo dessa forma uma fibra com razão de aspecto igual a 62. Está classificada, segundo a ASTM A820 (2011), como tipo 1.

Esta fibra, apesar de ser fabricada por uma empresa que possui algumas fábricas em território nacional, não é produzida no Brasil e foi importada da China para utilização nesta pesquisa.

A Figura 24 mostra o aspecto visual da fibra utilizada.



Figura 24 – Aspecto visual da fibra metálica utilizada nos traços CPR.

A Tabela 16 mostra a composição química da matéria prima utilizada na fabricação desta fibra.

Tabela 16– Composição química do fio máquina (dados do fabricante).

Elemento	Percentual (%)
C (carbono)	0,69 – 0,76
Si (silício)	0,10 – 0,30
Mn (manganês)	0,30 – 0,60
P (fósforo)	≤ 0,025
S (enxofre)	≤ 0,025
Cr (cromo)	≤ 0,08
Al (alumínio)	≤ 0,003

A Tabela 17 traz algumas informações e características da fibra utilizada.

Tabela 17– Características da fibra metálica utilizada (dados do fabricante).

Denominação	Dramix OL13/.20
Formato	reta
Densidade (g/cm³)	7,10
Forma de agregação	solta
Comprimento (mm)	13,00
Diâmetro nominal (mm)	0,21
Razão de aspecto	62
Resistência à tração (MPa)	≥ 2750
Módulo de elasticidade (GPa)	200

3.7.2 Fibra de polipropileno (PP)

A fibra de polipropileno – PP utilizada no trabalho consiste de filamentos de polipropileno extremamente finos obtidos por processo de extrusão. São microfibras com comprimento de 6 mm e diâmetro de 12 μ m, geralmente utilizadas para reduzir a incidência de fissuras de retração plástica, atuando na concreto ainda fresco. Na fase endurecida, podem aumentar o tempo de resistência ao fogo do concreto, uma vez que se fundem e deixam pequenos espaços vazios por onde a pressão de vapor pode se dissipar.

No caso específico do CPR, as microfibras de PP foram utilizadas com o intuito de absorver as fissuras iniciais que ocorrem no material antes da ruptura. Dessa maneira, espera-se que

atuem antes das fibras metálicas serem mobilizadas, permitindo atingir uma carga de ruptura maior. A Tabela 18 traz algumas informações e características da fibra de PP utilizada.

Tabela 18– Características da fibra de PP utilizada (dados do fabricante).

Denominação	NeoFibra MF
Composição	filamentos de PP
Densidade (g/cm³)	0,91
Deformação na ruptura (%)	25
Ponto de fusão (°C)	160
Ponto de ignição (°C)	365
Forma de agregação	solta
Comprimento (mm)	6,00
Diâmetro nominal (mm)	0,0012
Área superficial (m²/kg)	366
Frequência (em 10⁶ fibras/kg)	1620

4 MÉTODO - PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental compreendeu três etapas distintas. Primeiramente, foram feitos alguns estudos preliminares com vistas a avaliar o uso de diferentes aditivos e seus teores, testar diferentes teores de fibra, avaliar métodos de empacotamento, determinar o melhor método de mistura e avaliar o uso de materiais alternativos na composição do CPR, como a cinza volante.

Uma vez definidos os traços de CPR a serem investigados e comparados a um traço de concreto convencional, a segunda etapa consistiu na execução do programa experimental definido, moldando-se uma série de corpos de prova buscando caracterizar cada um dos traços do ponto de vista mecânico, realizando diferentes ensaios para testar a resistência à compressão, a tração, a flexão, o módulo de elasticidade, entre outros, além da trabalhabilidade das misturas.

Por fim, na terceira e última etapa, foi feita a análise dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica e também uma análise de custos. Nesta análise, foram considerados os custos diretos de obtenção do material aliados ao seu desempenho mecânico, analisando os resultados obtidos nos ensaios realizados, bem como o seu desempenho estrutural, tomando-se como base uma viga teórica.

A Figura 25 apresenta um diagrama detalhando como o trabalho foi desenvolvido.

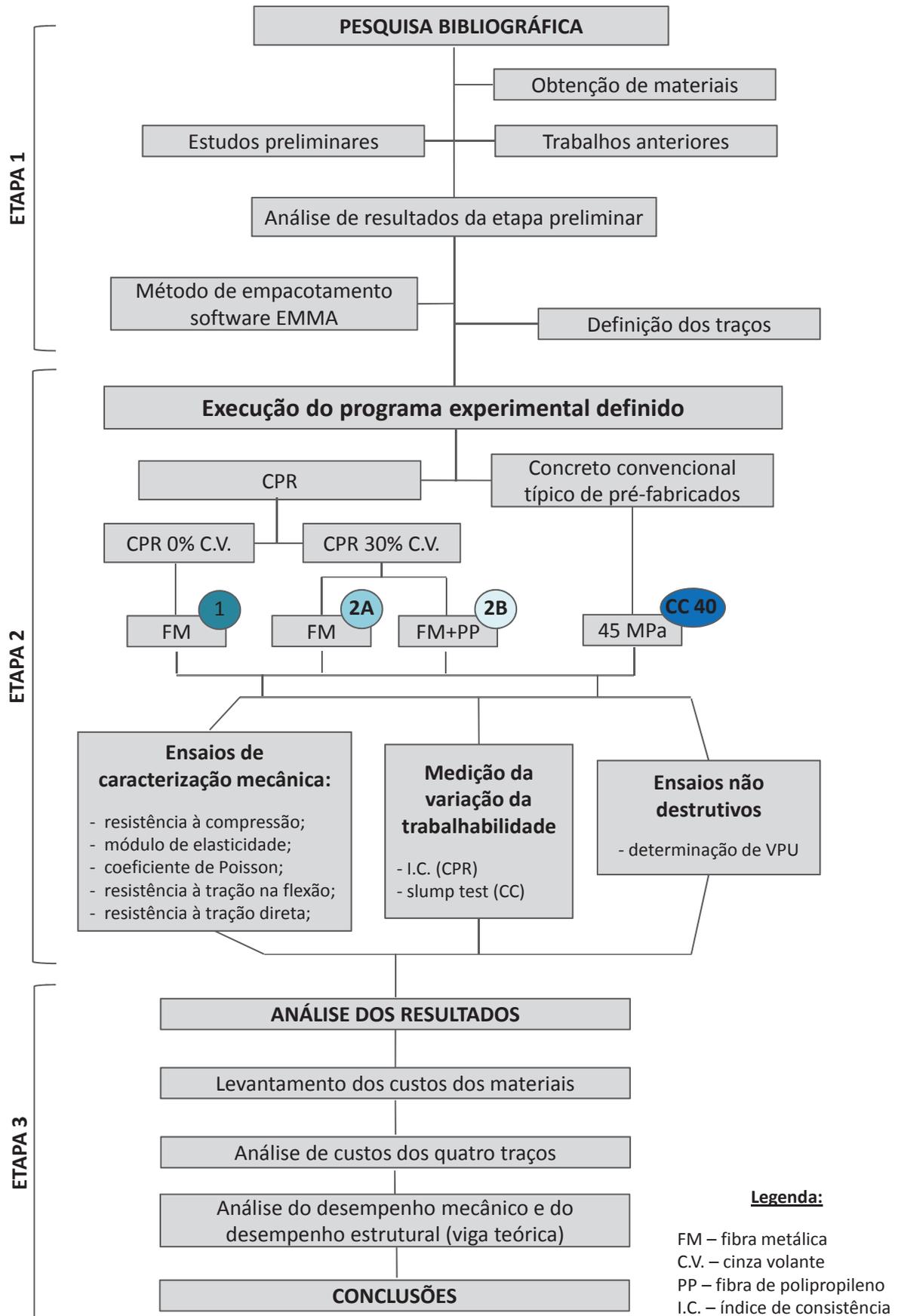


Figura 25- Método do trabalho.

4.1 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

A investigação experimental foi concentrada em quatro diferentes traços, na comparação direta entre três traços de CPR e um traço de concreto convencional, típico da indústria de pré-fabricados.

O diagrama da Figura 26 ilustra a divisão de traços adotada.

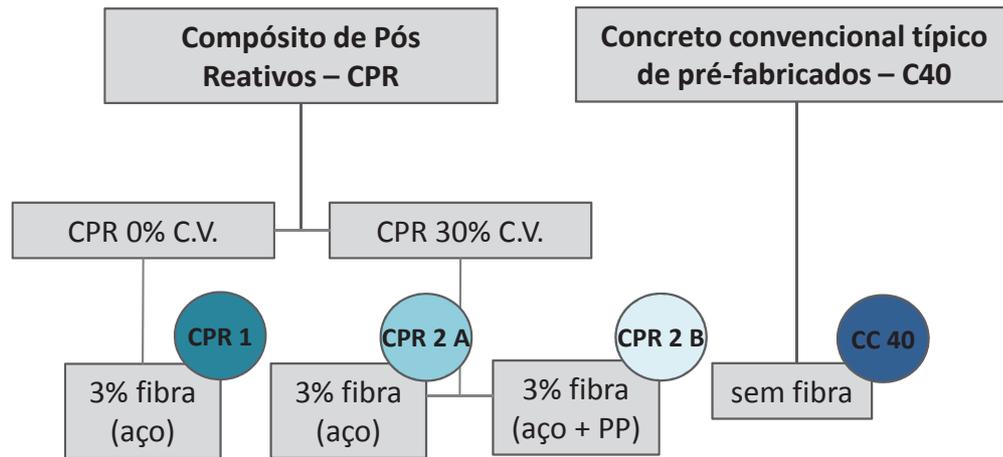


Figura 26–Diagrama ilustrativo da divisão de traços adotada no programa experimental.

Conforme o diagrama, no caso dos traços em CPR, partiu-se de um traço base, que foi subdividido nos traços CPR 1, CPR 2 A e CPR 2 B. O traço CPR 1 não incorporou cinza volante (0% C.V.) e os traços CPR 2 A e CPR 2 B tiveram incorporação de 30% de cinza volante em substituição ao cimento.

Além disso, os traços CPR 1 e CPR 2A fizeram uso de fibra metálica, na proporção de 3% em volume. No caso do traço CPR 2 B, foi feita uma hibridização, utilizando-se tanto a fibra metálica como uma fibra de polipropileno, mantendo-se os 3% em volume. Por sua vez, o traço CC 40 é um concreto convencional, de uso típico na indústria de pré-fabricados, com classe de resistência C40 (NBR 8953; ABNT 2009).

A composição dos traços em CPR pode ser dividida em três tipos de material utilizado, de acordo com a função que desempenham na matriz do CPR, podendo ser definidos como: REATIVOS, NÃO REATIVOS e de REFORÇO. A Tabela 19 ilustra a divisão dos materiais adotados nos traços em CPR.

Tabela 19– Materiais adotados no programa experimental.

Material	Função do material	Dosagem dos materiais
Cimento CP-V	reativo	Manter consumo baixo – entre 600 e 650 kg/m ³
Sílica ativa		Manter consumo fixo entre 20% e 25% da massa de cimento
Cinza volante		Um teor ⁴ fixo – 30% em substituição ao cimento
Areia 1	não reativo	Teor determinado em função do empacotamento
Areia 2		
Pó de quartzo (fíler)		
Fibra metálica Fibra de PP	reforço	Teor fixo de 3% (em relação ao volume total)

Dessa forma, dentro dos materiais reativos e que, portanto, terão papel fundamental nas reações químicas de cristalização e de ganho de resistência, tem-se um teor fixo de cimento, buscando menor impacto ambiental e custo, consumo de sílica ativa fixo em uma faixa compreendida entre 20% e 25% do teor de cimento, conforme diagrama apresentado anteriormente e um teor fixo de incorporação de cinza volante ao traço baseado em estudo anterior proposto por Christ (2014).

Dentre os materiais não reativos se inclui o pó de quartzo, em função da não aplicação de cura térmica neste estudo. Os teores de agregados e fíler foram baseados no método de empacotamento adotado, estando dessa forma atrelados às características granulométricas do conjunto e definidos pelo software adotado na composição do traço padrão.

Já para o material de reforço principal à flexão, desempenhado pelas fibras, optou-se por um teor fixo da combinação de ambas, 3% em volume, (ora apenas da fibra metálica e em um caso da combinação de ambas) amparado e justificado por inúmeros trabalhos dentro do tema, como RICHARD e CHEYREZY (1995); BLAIS e COUTURE (1999); LONG et al. (2001); FAVERO et al. (2013); CHRIST (2014) e também baseado em teores típicos de fibras adotados em traços de Ductal®. Além disso, esse teor de fibras já foi testado em um trabalho experimental conjunto entre uma construtora da região da grande Porto Alegre – RS e equipes de pesquisadores de duas instituições de ensino superior (UFRGS e UNISINOS), trabalhando com um volume aproximado de 1,5 m³ na aplicação, em escala real, em uma peça experimental, obtendo resultados mecânicos bastante satisfatórios para o material.

O referido estudo foi agraciado com o primeiro lugar na categoria de Inovação Tecnológica do SINDUSCON Premium 2013⁵, realizado pelo SINDUSCON-RS.

⁴ Teor de cinza volante baseado nos estudos do trabalho de Christ (2014).

Para o traço de concreto convencional, optou-se por um concreto classe C40, com traço tipicamente adotado na indústria de pré-fabricados, com resistência à compressão inicial, f_{cj} para desforma, de 25 a 30 MPa em 24 horas.

Como ferramenta de auxílio no processo de obtenção dos traços mais otimizados do ponto de vista da estrutura granular, foi utilizado um software, o EMMA. Sigla para *Elkem Materials Mix Analyzer*, o EMMA é um software livre, desenvolvido para projetar materiais de estrutura granular de forma otimizada, também ditos empacotados. Ele foi originalmente projetado pela *Elkem Materials* para a utilização em concretos refratários e na indústria cerâmica, mas foi estendido para cobrir partículas gerais, tais como os constituintes do concreto e, por isso, vem sendo utilizado para desenvolver misturas otimizadas de materiais cimentícios de base Portland.

O software permite calcular, a partir da inserção dos dados de distribuição granulométrica dos constituintes disponíveis e/ou desejados e da curva de empacotamento escolhida, e a partir da definição do parâmetro 'q', a melhor distribuição granulométrica para um determinado material. No cálculo, podem ser utilizados dois métodos de empacotamento, o de Andreassen ou o de Andreassen modificado, já explicados anteriormente. Cabe salientar que, por se tratar de um programa de manipulação de partículas granulares, as fibras não podem ser inseridas para consideração no cálculo do melhor empacotamento.

A Figura 27 apresenta uma tela do programa, mostrando a curva de distribuição (à direita) para um dado CPR, pelo método de Andreassen modificado, a partir da combinação das areias, do cimento, do pó de quartzo e da sílica ativa.

⁵DESENVOLVIMENTO DE ESTRUTURA INOVADORA A BASE DE CONCRETO DE PÓS REATIVOS (CPR). SINDUSCON PREMIUM, 2013. Disponível em: http://www.sinduscon-rs.com.br/premium2013/premiados_2013

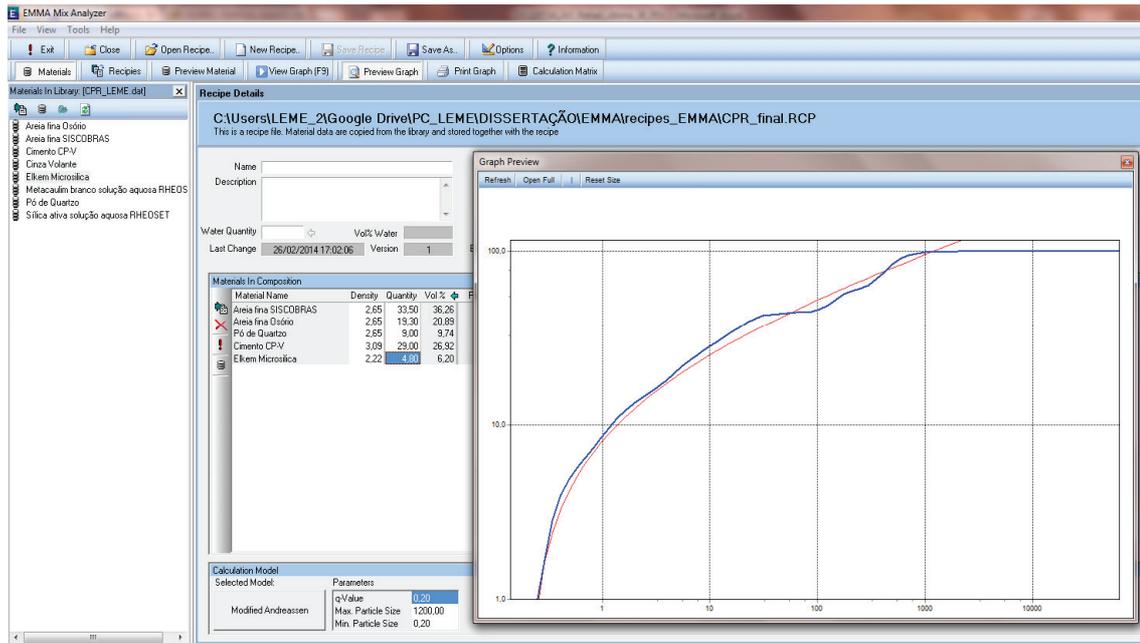


Figura 27– Tela do EMMA exemplificando um estudo de empacotamento.

Como forma de limitar todos os traços a um mesmo perfil de empacotamento, foi estipulado um coeficiente de empacotamento $q = 0,20$. Esta adoção também foi baseada nos estudos desenvolvidos por Reginato et al. (2013), com diferentes coeficientes de empacotamento em pastas de CPR sem utilização de fibras e utilizando o método de Andraessen modificado em conjunto com o software EMMA.

A Figura 28 ilustra a distribuição adotada (em vermelho) nos traços de CPR, com a adoção de $q = 0,20$ bem como a distribuição dos materiais (em azul) resultante do processo de utilização do software com os materiais disponíveis.



Figura 28–Perfil do empacotamento utilizado nos traços de CPR utilizando um coeficiente $q = 0,20$.

O traço padrão da matriz pastosa (mistura completa antes de serem adicionadas as fibras) foi elaborado com materiais locais (apresentados no capítulo 3) e otimizado através do método do empacotamento, com o uso do software EMMA, e utilizando o modelo de empacotamento de Andraessen modificado. Como já explicado, o empacotamento consiste basicamente no refinamento da matriz granular do material, ou seja, encontrar uma granulometria contínua da mistura como um todo, englobando todas as faixas granulométricas dos materiais disponíveis.

Como o CPR é um material constituído por pós muito finos, o objetivo é dispor estes “pós” de maneira que as partículas se encaixem umas nas outras e que os vazios entre elas seja o menor possível, desde o pó mais fino até o pó mais grosso presente no traço. Isso possibilita obter um material muito denso e com uma porosidade muito baixa.

As areias finas utilizadas, geralmente entre $150\mu\text{m}$ e $600\mu\text{m}$, são dimensionalmente o maior material granular. Depois dos agregados, a segunda maior das partículas é o pó de quartzo, com um diâmetro máximo de aproximadamente $12\mu\text{m}$. De tamanho semelhante é o cimento, com um diâmetro médio de $10\mu\text{m}$. A menor das partículas, a sílica ativa, apresenta um diâmetro suficientemente pequeno, de cerca de $0,20\mu\text{m}$, para preencher os espaços vazios intersticiais entre o cimento e as partículas de quartzo moído, fechando, dessa forma, o empacotamento. Adicionalmente, a cinza volante, com diâmetro máximo de $30\mu\text{m}$, é um poderoso auxiliar no empacotamento, uma vez que atua no preenchimento dos espaços vazios

entre os agregados e o pó de quartzo, além de atuar posteriormente com o refinamento da estrutura de poros em função das reações pozolânicas atuantes.

A Figura 29 ilustra um comparativo dos materiais disponíveis para compor os traços em CPR em função da granulometria variada dos mesmos, mostrando a faixa de variação entre o diâmetro médio e o diâmetro máximo de suas partículas.

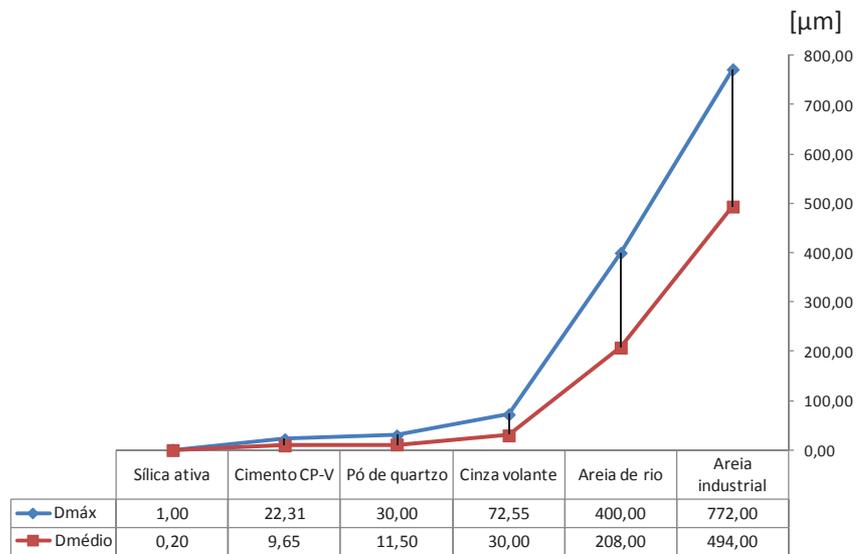


Figura 29– Comparativo entre os diâmetros das partículas dos materiais a serem utilizados.

No caso deste estudo, foi elaborado um traço padrão da matriz pastosa sem adição de cinza volante, ou seja, encontrou-se o melhor empacotamento com os materiais base de um CPR “convencional” (cimento + areias + pó de quartzo + sílica ativa) para depois, a partir deste proporcionamento, alterar as quantidades de cimento para os demais traços. Isso significa dizer que os traços com incorporação de cinza volante não apresentam, necessariamente, o melhor empacotamento granular com os materiais disponíveis. Isso se dá porque, se a cinza volante fosse inserida no programa, ela responderia por mais de 45% do material total constituinte do traço, colocando o consumo de cimento a um patamar de pouco mais de 170 kg/m³, inviabilizando um estudo em CPR que pudesse ser comparativo com o traço padrão, já que não se obteriam as resistências mínimas desejadas. Esse efeito é fruto da composição granulométrica da cinza, que engloba uma faixa granulométrica próxima da curva de empacotamento ótimo entre os tamanhos de 1 µm e 1000 µm.

A Figura 30 ilustra o perfil de empacotamento se a cinza volante fosse considerada dentro do EMMA para definição do traço.

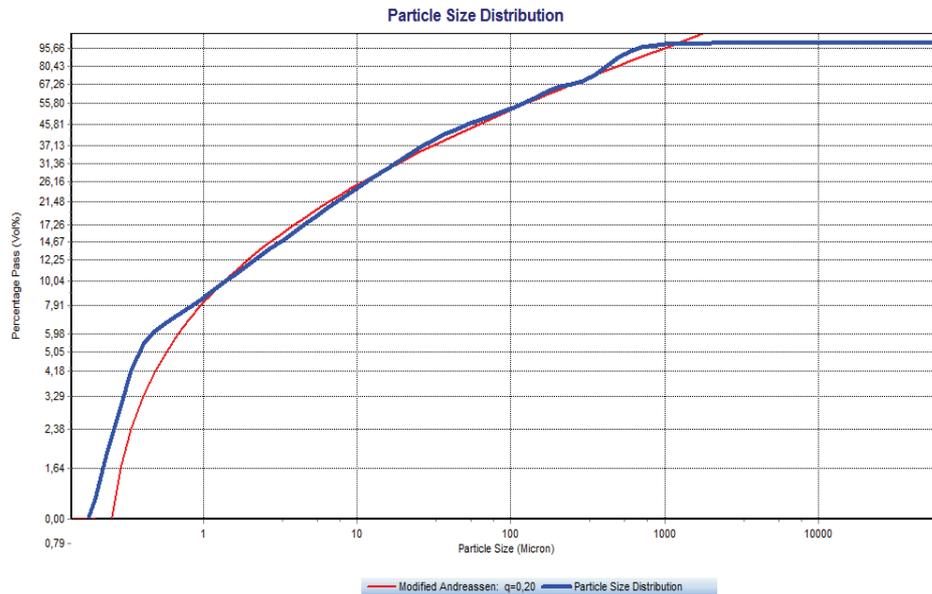


Figura 30– Tela do EMMA exemplificando um estudo de empacotamento com a cinza volante para um $q = 0,20$.

Com a utilização da cinza volante, nota-se a melhor distribuição no empacotamento entre 1 μm e 1000 μm . Contudo, como já dito acima, as proporções dos materiais são bastante afetadas, diminuindo consideravelmente o consumo de cimento com elevado consumo de cinza volante e, conseqüentemente, alterando o traço de maneira que não se pode esperar o desenvolvimento de resistências muito elevadas. Isso significa dizer que o programa serve de boa base para a definição do traço. Contudo, pelo caráter granulométrico da cinza, a mesma não pode ser considerada junto aos demais materiais constituintes. Para demonstrar a influência da cinza num estudo de empacotamento, a Tabela 20 ilustra um exemplo das proporções dos materiais que seriam obtidas para o traço ao se considerar a cinza volante no cálculo e considerando o material no empacotamento.

Tabela 20– Exemplo fictício de traço de CPR com utilização de cinza volante considerada no cálculo do empacotamento (valores entre parênteses expressam a porcentagem em massa sobre o total).

Material	traço-base CPR sem CV via EMMA	traço-base CPR com CV via EMMA
Cimento CP-V (kg/m ³)	619,2 (26,9%)	172,5 (14,2%)
Sílica ativa (kg/m ³)	142,4 (6,2%)	39,68 (3,3%)
Cinza volante (kg/m ³)	0,0 (0,0%)	574,9 (47,3%)
Pó de quartzo (kg/m ³)	224,1 (9,7%)	62,45 (5,1%)
Areia de rio beneficiada (kg/m ³)	480,5 (20,9%)	133,9 (11,0%)
Areia industrial (kg/m ³)	834,0 (36,3%)	232,4 (19,1%)

Por conta disso, optou-se por simplesmente substituir o cimento por cinza volante na proporção de 30% em massa (com base no traço de Christ, 2014), mantendo inalteradas as demais quantidades de materiais no traço, conforme será observado a seguir.

A Tabela 21 traz os traços unitários adotados no programa experimental.

Tabela 21– Traços unitários adotados no programa experimental.

Traço	cimento CP-V	sílica ativa	cinza volante	pó de quartzo	areia de rio benef.	areia industrial	areia média	brita 1
	1,00			2,020				
CPR 200 3% AÇO	0,813	0,187	0,00	0,294	0,631	1,095	-	-
CPR 30% CV 3% AÇO	0,569	0,187	0,244	0,294	0,631	1,095	-	-
CPR PP 3% AÇO+PP	0,569	0,187	0,244	0,294	0,631	1,095	-	-
Convencional C45 sem fibras	1,000	-	-	-	-	-	2,436	3,427

A Tabela 22compila um resumo dos traços adotados dentro do programa experimental.

Tabela 22– Resumo completo dos traços adotados no programa experimental.

Materiais	composição	CPR 200 3% AÇO	CPR 30% CV 3% AÇO	CPR 30% CV 3% AÇO+PP	C40 convencional
	nomenclatura	CPR 1	CPR 2 A	CPR 2 B	CC 40
Cimento CP-V (kg/m ³)		619,2 (23,2%)	433,4 (16,3%)	433,4 (16,5%)	330,0 (13,5%)
Sílica ativa (kg/m ³)		142,4 (5,3%)	142,4 (5,3%)	142,4 (5,4%)	-
Cinza volante (kg/m ³)		-	185,8 (7,0%)	185,8 (7,1%)	-
Pó de quartzo (kg/m ³)		224,1 (8,4%)	224,1 (8,4%)	224,1 (8,5%)	-
Areia de rio beneficiada (kg/m ³)		480,5 (18,0%)	480,5 (18,0%)	480,5 (18,3%)	-
Areia industrial (kg/m ³)		834,0 (31,3%)	834,0 (31,3%)	834,0 (31,7%)	-
Areia média de rio (kg/m ³)		-	-	-	804,0 (32,8%)
Agregado graúdo – brita (kg/m ³)		-	-	-	1131,0 (46,2%)
Aditivo superplastificante (%) *		2,5	2,5	2,5	0,3
Aditivo modif. de visc. (%) *		1,0	1,0	1,0	-
Aditivo superplast. (kg/m ³)		19,0	19,0	19,0	1,0
Aditivo modif. de visc. (kg/m ³)		7,6	7,6	7,6	-
Água de amassamento (kg/m ³)		143,0	143,0	143,0	184,0
Água dos aditivos (kg/m ³)		9,3	9,3	9,3	desprezada
Água total (kg/m ³)		152,3 (5,7%)	152,3 (5,7%)	152,3 (5,8%)	184,0 (7,5%)
Fibras totais (% em volume)		3,0	3,0	3,0	sem fibras
Proporção de fibra metálica		100%	100%	80%	sem fibras
Proporção de fibra de PP		0%	0%	20%	sem fibras
Fibra metálica (kg/m ³)		213,0 (8,0%)	213,0 (8,0%)	170,40 (6,5 %)	sem fibras
Fibra de PP (kg/m ³)		-	-	4,94 (0,2 %)	sem fibras
Propriedades					
Relação água/cimento **		0,25	0,35	0,35	0,45
Relação água/aglomerantes **		0,20	0,20	0,20	0,45
Rel. água/materiais secos - H(%)		5,7	5,7	5,7	7,3
Abatimento – slump (mm)		-	-	-	150
Flow table –0 golpes (mm) ***		120	130	110	-
Flow table – 30 golpes (mm) ***		190	195	180	-

(%) porcentagem em relação à massa total de materiais

* porcentagem sobre a massa total de aglomerantes

** calculado pela água total (amassamento + aditivos)

***medições efetuadas antes e após os 30 golpes

4.2 MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Para a produção dos traços de CPR, foi utilizada uma betoneira de eixo vertical ao invés de se utilizar uma betoneira convencional, de tombo, que utiliza basicamente a energia de queda do material para homogeneizar a mistura.

Isso se dá pela necessidade de imprimir uma maior energia à mistura dos materiais constituintes do CPR, já que a quantidade de água na mistura é bastante reduzida. A Figura 31 ilustra o equipamento utilizado na mistura.



Figura 31– Equipamento utilizado nas misturas dos traços de CPR.

O ciclo de moldagens foi dividido em quatro etapas, sendo cada traço moldado em quatro dias diferentes. Todos os traços foram dosados em massa e foi realizada uma única betonada (lote) para cada traço, com intuito de assegurar estatisticamente a qualidade dos resultados, respeitando a quantidade máxima de material recomendada para a betoneira e estipulada em 70 litros ou $0,07 \text{ m}^3$. Após cada procedimento de mistura foi realizado o ensaio de índice de consistência seguindo a NBR 13276 (ABNT, 2002).

A ordem de mistura dos materiais é igualmente determinante para garantir a boa qualidade do CPR. Existem vários trabalhos que relacionam uma série de recomendações para a ordem de misturas dos materiais, podendo se destacar os estudos da FHWA. No caso deste estudo, para a produção dos traços de CPR, a ordem de mistura dos materiais foi baseada na metodologia utilizada pela FHWA (2006).

A mistura se deu em dez passos, da seguinte maneira:

1. colocação de 100% dos aglomerantes (cimento, sílica ativa e cinza volante – se presente);
2. homogeneização dos materiais a seco;
3. colocação gradual de 70% da água total com 80% do aditivo superplastificante;

4. mistura até homogeneização completa e fluidificação do material;
5. colocação da areia de menor finura, aos poucos, até adicionar 100% do material;
6. colocação do pó de quartzo, aos poucos, até adicionar 100% do material;
7. colocação da areia mais grossa, aos poucos, até adicionar 100% do material;
8. colocação dos 20% restantes do aditivo superplastificante e da água, fluidificando a mistura para a entrada das fibras;
9. colocação das fibras, aos poucos, até adicionar 100% do material;
10. colocação de 100% do aditivo modificador de viscosidade, batendo até a finalização da mistura para a moldagem.

Vale ressaltar que este método permitiu uma boa homogeneização do material. Na colocação das fibras, não foram observadas formações de grumos ou de ouriços. Esse efeito pode ter se dado devido ao comprimento reduzido das fibras e também pela metodologia empregada na colocação do material, com boa trabalhabilidade da mistura.

Todos os corpos de prova moldados para o programa experimental, sejam eles cilíndricos, prismas ou halteres, foram adensados utilizando-se uma mesa vibratória. Por se tratar de um material com fibras, o CPR não pode ser adensado utilizando soquetes ou mesmo vibradores, já que essa prática pode acarretar na orientação indesejada de fibras e também em zonas sem fibras, uma vez que os espaços vazios tendem a ser preenchidos rapidamente pela pasta. Os corpos de prova de concreto convencional também foram moldados na mesa vibratória.

A cura dos corpos de prova foi realizada em câmara úmida, com temperatura controlada ($21 \pm 2^\circ\text{C}$), seguindo as especificações da NBR 9479 (ABNT, 2006). Todos os corpos de prova foram mantidos nesse ambiente de umidade saturada logo após a moldagem de forma a evitar a retração autógena devido ao alto consumo de cimento e ao alto calor de hidratação gerado no CPR. Os corpos de prova foram então desenformados 24 horas após a moldagem, conforme indicações da NBR 5738 (ABNT, 2008).

4.3 ENSAIOS

O programa experimental foi dividido em três grupos distintos de ensaios, contemplando o estado fresco, o estado endurecido e outras avaliações complementares realizadas com o intuito de melhor descrever as propriedades microestruturais do material.

A seguir são apresentados todos os ensaios executados no programa experimental.

4.3.1 Ensaios no estado fresco

Os ensaios no estado fresco buscaram determinar as características de trabalhabilidade do material no momento em que o mesmo era lançado nas formas.

4.5.1.1 Índice de consistência

O ensaio de índice de consistência, de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2002), foi realizado nos traços de CPR como forma de medir a trabalhabilidade do material no momento do lançamento. Apesar de se tratar de um ensaio próprio para determinação da trabalhabilidade de argamassas, o mesmo serviu como parâmetro de medição para o CPR. Para tanto, foram efetuadas medidas antes e depois dos 30 golpes.

4.5.1.2 Abatimento de tronco de cone – slump

O ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*) foi realizado de acordo com a NM 67 (ABNT, 1998). Trata-se de um ensaio amplamente adotado na construção civil e de fácil execução. Foi realizado para determinar a trabalhabilidade do traço de concreto convencional, já que o ensaio de índice de consistência não poderia ser aplicado.

4.3.2 Ensaios no estado endurecido

Os ensaios no estado endurecido foram utilizados na caracterização mecânica dos diferentes traços estudados, buscando avaliar uma série de parâmetros do material, como resistência à

compressão, tração na flexão, entre outros. Para tanto, uma série de ensaios foram propostos e estes são apresentados a seguir. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais – LEME, da UFRGS.

A Tabela 23 traz um resumo do programa experimental adotado. A quantidade de corpos de prova foi limitada pelo volume útil do equipamento de mistura utilizado, tendo-se sempre um mínimo de três corpos de prova por ensaio.

Tabela 23– Resumo do programa experimental.

Ensaio	Norma ou recomendação	Quantidade de corpos de prova por traço					
		1 dia	7 dias	14 dias	28 dias	63 dias	91 dias
Compressão direta uniaxial – todos os traços	NBR 5739 (ABNT, 2007)	3	3	3	3	3	-
Compressão direta uniaxial (CP's extraídos)	NBR 7680 (ABNT, 2007)	-	-	-	-	-	12
Flexão a 3 pontos CMOD (prisma) – todos os traços	TC 162-TDF (RILEM, 2002)	-	-	-	3	-	-
Flexão a 3 pontos (prisma menor) – traços CPR	NBR 13279 (ABNT, 2005)	-	-	-	3	-	-
Flexão a 4 pontos (prisma) – todos os traços	NBR 12142 (ABNT, 2010)	-	-	-	3	-	-
Módulo de elasticidade – todos	NBR 8522 (ABNT, 2008)	-	-	-	3	-	-
Compressão diametral – apenas traço CC	NBR 7222 (ABNT, 2011)	-	-	-	3	-	-
Tração direta – traços CPR	Boshoff e Zijl (2005)	-	-	-	4	-	-

Definidos os ensaios, foram adotadas diferentes geometrias de corpos de prova, de acordo com as respectivas normas. As geometrias que foram propostas para os ensaios estão resumidas na Tabela 24.

Tabela 24– Geometria dos corpos de prova adotados no programa experimental.

Ensaio	Geometria dos corpos de prova (mm)			
	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B	CC 40
Compressão direta uniaxial	Ø75x150	Ø75x150	Ø75x150	Ø100x200
Compressão direta uniaxial (CP's extraídos)	Ø75x150	Ø75x150	Ø75x150	Ø75x150
Módulo de elasticidade longitudinal	Ø100x200	Ø100x200	Ø100x200	Ø100x200
Módulo de elasticidade transversal				
Flexão a três pontos simples	40x40x160	40x40x160	40x40x160	-
Flexão a três pontos instrumentada CMOD	150x150x550	150x150x550	150x150x550	150x150x550
Flexão a quatro pontos instrumentada	100x100x400	100x100x400	100x100x400	100x100x400
Tração direta	15x70x300	15x70x300	15x70x300	-
Tração por compressão diametral	-	-	-	Ø100x200

A seguir são apresentados e explicados todos os ensaios realizados no programa experimental.

4.5.2.1 Compressão direta uniaxial

Para os ensaios de compressão uniaxial foram moldados corpos de prova cilíndricos com duas dimensões: $\varnothing 75$ mm x 150 mm, para os traços de CPR, e $\varnothing 100$ mm x 200 mm para o traço de concreto convencional, conforme Figura 32.

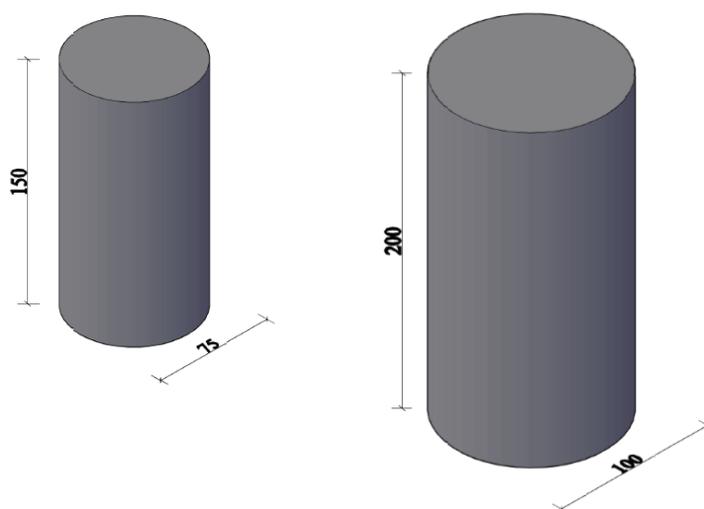


Figura 32– Geometria dos corpos de prova adotados para o ensaio de compressão uniaxial.

Para moldar os corpos de prova de CPR foram utilizadas fôrmas em PVC especialmente confeccionadas para este trabalho e apresentadas na Figura 33. Estas fôrmas são dotadas de um pequeno orifício no fundo do molde por onde se injeta ar comprimido para realizar a desforma do corpo de prova.



Figura 33– Detalhe das fôrmas em PVC confeccionadas para os ensaios de compressão nos corpos de prova dos traços de CPR.

A adoção desta geometria para os corpos de prova em CPR teve por objetivo diminuir o volume de material necessário para todos os ensaios propostos (por limitação de volume da betoneira utilizada) ao invés de utilizar o corpo de prova tradicional de $\varnothing 100 \times 200$ mm, o que obrigaria o programa experimental a ser alterado, pois não comportaria todos os corpos de prova desejados no mesmo lote de concretagem. O corpo de prova de $\varnothing 50 \times 100$ mm não foi adotado para evitar que pequenas falhas durante o adensamento, principalmente bolhas, gerassem resultados muito díspares entre si, constatação esta, fruto da experiência do laboratório com trabalhos anteriores utilizando este tipo de molde.

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados conforme a NBR 5739 (ABNT, 2007), adotando-se uma velocidade de carregamento no ensaio de 0,45 MPa/s. Para garantir o perfeito paralelismo entre as faces, todos os corpos de prova ensaiados passaram por processo de retificação e, para tanto, foi utilizada uma retífica de eixo horizontal. Também houve o cuidado de garantir que a relação h/D (altura x diâmetro do corpo de prova) fosse igual a dois para todos os exemplares.

Já com relação aos corpos de prova extraídos, para rompimento aos 91 dias da moldagem, foi utilizada uma broca diamantada de diâmetro equivalente a 75 mm, com extração em diâmetro nominal de 73 mm. As extrações foram feitas nos prismas já ensaiados anteriormente à flexão no ensaio a três pontos CMOD (apresentado a seguir no item 4.5.2.2), conforme ilustra a Figura 34.



Figura 34– Detalhe das marcações e da extração dos corpos de prova nos prismas ensaiados à flexão.

Foram extraídos quatro testemunhos por prisma, totalizando doze corpos de prova por traço moldado. A exemplo do que foi feito para os corpos de prova moldados, todos os corpos de prova extraídos também passaram por processo de retificação, aplicando-se, quando necessário, a correção para a relação h/D (altura x diâmetro do corpo de prova).

Adicionalmente, em função do efeito de broqueamento, causado pela extração dos corpos de prova a partir dos prismas, foi aplicado fator de correção de acordo com a NBR 7680-1 (ABNT, 2015). A Figura 35 ilustra alguns exemplares extraídos para o ensaio de compressão uniaxial.



Figura 35– Aspecto dos corpos de prova extraídos dos prismas ensaiados à flexão.

4.5.2.2 Tração na flexão a três pontos

Para o ensaio de tração na flexão a três pontos, foram moldados (para todos os traços estudados) corpos de prova prismáticos com dimensão de 150 mm x 150 mm x 550 mm, conforme Figura 36.

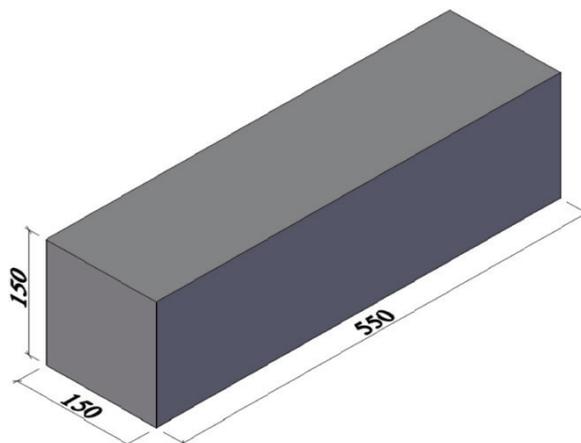


Figura 36–Geometria dos corpos de prova adotados no ensaio de flexão a três pontos.

O ensaio foi realizado conforme as recomendações da RILEM TC162-TDF (2002), tida como uma das mais promissoras normas para avaliação de materiais cimentícios reforçados com fibras (FIGUEIREDO, 2005; ANAPRE, 2009). Esta recomendação acabou dando origem à Norma Européia EN 14651 (2003).

No entanto, cabe salientar que a máquina de ensaios adotada é do tipo *open-loop*, ou seja, a taxa de aplicação da carga é definida pelo deslocamento da prensa e não pelo deslocamento do corpo de prova. Com isso, não é possível evitar as instabilidades pós-pico após o início da fissuração, gerando prejuízos à verdadeira performance do material reforçado com fibras. Entretanto, as normativas acima citadas já preveem a utilização deste tipo de equipamento na realização do ensaio. Ademais, este tipo de equipamento não está disponível na grande maioria dos laboratórios brasileiros.

A velocidade de aplicação de carga no ensaio foi regulada em 0,5 mm/min. e os prismas foram demarcados para um vão de aplicação de carga de 500mm, aplicando-se o carregamento no centro do vão com folga de 25 mm em cada apoio.

Este ensaio teve por objetivo medir a abertura de fissuras e permitir o cálculo da tenacidade do material utilizando-se a técnica conhecida por *crack mouth opening displacement-CMOD*. Para tanto, foi induzida a abertura de uma fissura efetuando-se um entalhe de 4 mm de largura e 25 mm de profundidade. O entalhe foi feito de modo que a face de moldagem do prisma permanecesse em uma das laterais do corpo de prova durante a realização do ensaio,

conforme procedimento da RILEM TC 162-TDF (2002). O esquema de carregamento do prisma, com a localização do entalhe, é apresentado na Figura 37.

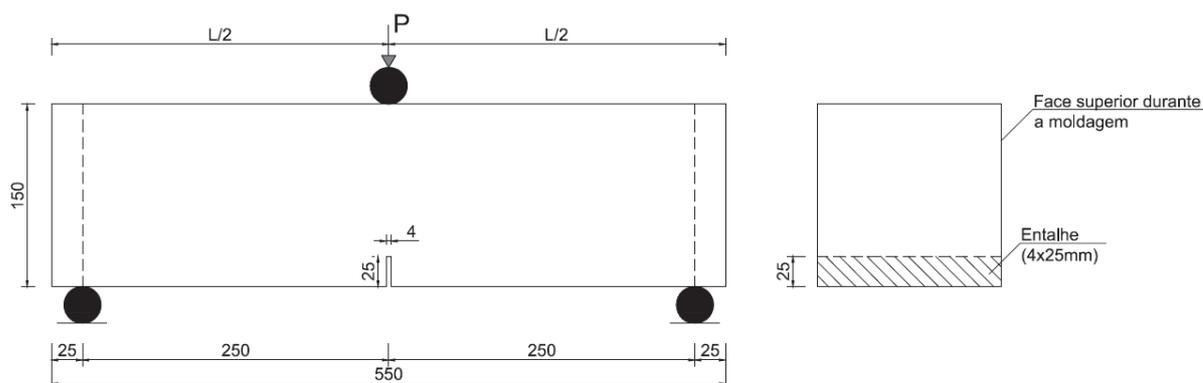


Figura 37– Esquema de carregamento do prisma de 150x150x550 mm no ensaio de flexão a três pontos com fissura induzida por entalhe.

A Figura 38 mostra o entalhe executado nos prismas para a execução do ensaio.

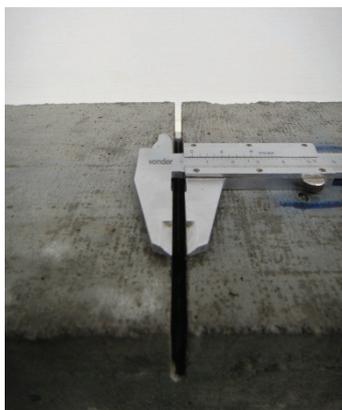


Figura 38– Detalhe do entalhe executado nos prismas para execução do ensaio de flexão a três pontos CMOD.

Os deslocamentos do corpo de prova, na medida em que a carga ia sendo aplicada, foram medidos utilizando-se dois dispositivos medidores de deslocamento (LVDT) acoplados a um “yoke”, conforme apresentado na Figura 39.



Figura 39– Execução do ensaio de flexão a três pontos CMOD com a instrumentação para medição dos deslocamentos.

Dessa forma, foram coletados os dados referentes à aplicação de carga e aos deslocamentos transversais do corpo de prova, todos com frequência de leitura de 5 Hz. Com os dados de carregamento e da deflexão medida pelos LVDT's, pode-se traçar o diagrama carga x deflexão, a partir do qual se calcula a tenacidade (representada pela área sob a curva). A Figura 40 ilustra o critério da RILEM TC-162 TDF (2002) para determinação da tenacidade.

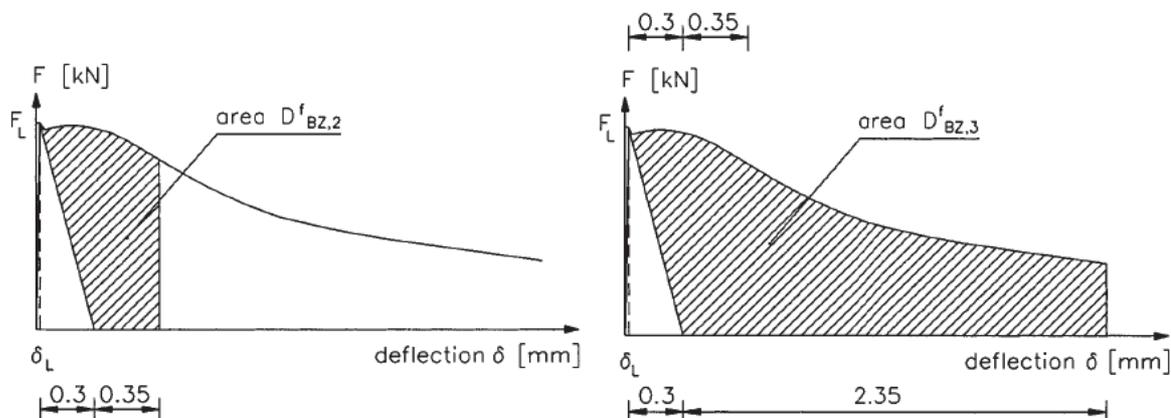


Figura 40– Critério para a determinação da tenacidade segundo a RILEM TC 162-TDF (2002).

As duas áreas sob a curva são calculadas até um limite estabelecido para a deflexão (definido pelos critérios da RILEM TC-162 TDF (2002)) e inseridas em duas expressões matemáticas que permitem calcular a tenacidade do material para duas faixas, conforme as Equações 4 e 5.

$$F_{eq,2} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,2}^f}{0,50} \right) \cdot \frac{L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (\text{Equação 4})$$

$$F_{eq,3} = \frac{3}{2} \left(\frac{D_{BZ,3}^f}{2,50} \right) \cdot \frac{L}{b \cdot h_{sp}^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

$F_{eq,2}; F_{eq,3}$ = resistência equivalente ou tenacidade, em MPa;
 $D_{BZ,2}^f; D_{BZ,3}^f$ = áreas sob o gráfico, conforme Figura 40, em N.mm;
 L = vão do corpo de prova durante o ensaio de flexão, em mm;
 b = largura do corpo de prova, em mm;
 h_{sp} = distância entre a ponta do entalhe e o topo do corpo de prova na seção transversal, em mm.

Para Figueiredo (2005), a grande vantagem desse ensaio é a sua associação a uma norma de dimensionamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço. Ele salienta que, apesar de o corte do entalhe poder causar danos localizados no corpo de prova, reduzindo o valor de carga máxima, a menor variabilidade do ensaio propicia o uso de valores característicos para o dimensionamento de certas peças, o que não ocorre para os outros ensaios.

Ainda para o ensaio de tração na flexão a três pontos, foram moldados (para os três traços em CPR) corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 mm x 40 mm x 160 mm, como forma de obter dados mais simplificados e compará-los aos resultados obtidos para os prismas maiores. Eles foram ensaiados seguindo as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005), com velocidade de aplicação de carga de 0,05 kN/s. O esquema de carregamento do prisma para a realização deste ensaio é apresentado na Figura 41.

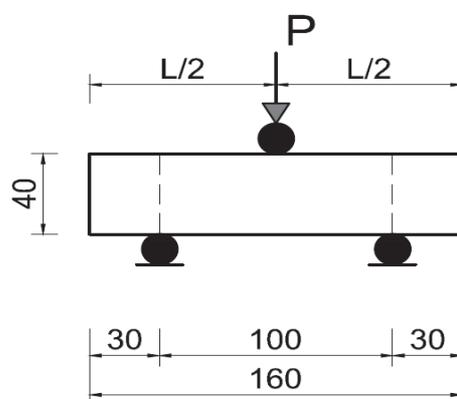


Figura 41– Esquema de carregamento do prisma de 40x40x160 mm no ensaio de flexão a três pontos.

Neste caso, não foi induzida fissura e os prismas também não foram instrumentados para medição do seu deslocamento, limitando-se o ensaio a apenas medir a tensão de ruptura (pico). Foi utilizado apenas um LVDT acoplado ao prato da prensa para controlar o desenvolvimento do ensaio.

A Figura 42 ilustra a realização do ensaio de flexão a três pontos para os prismas menores.

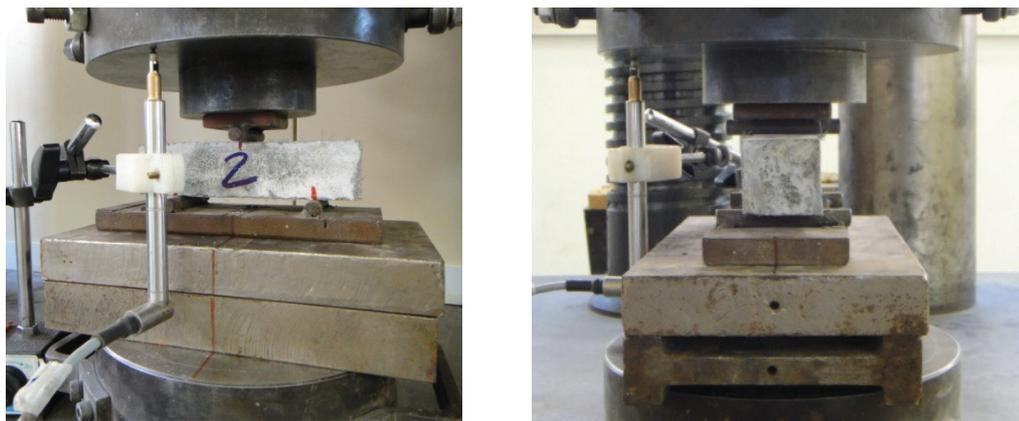


Figura 42– Realização do ensaio de flexão a três pontos no prisma de 40x40x160 mm.

4.5.2.3 Tração na flexão a quatro pontos

Para o ensaio de tração na flexão a quatro pontos, foram moldados corpos de prova prismáticos com dimensões de 100 mm x 100 mm x 400 mm, conforme Figura 43.

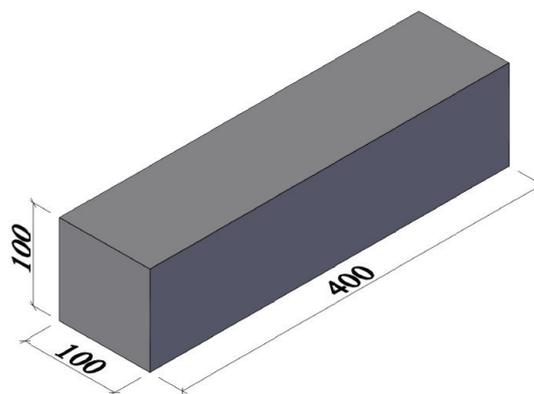


Figura 43– Geometria do corpo de prova prismático utilizado no ensaio de tração na flexão a quatro pontos.

O ensaio foi realizado conforme a NBR 12142 (ABNT, 2010) e em conformidade com a JSCE-SF4 (1984), utilizando-se uma máquina de ensaios do tipo *closed-loop*, com velocidade de aplicação de carga controlada pelo deslocamento e regulada em 0,5 mm/min. Os prismas foram demarcados para um vão de aplicação de carga de 300 mm, aplicando-se o carregamento nos terços médios do corpo de prova, com folga de 50 mm em cada um dos apoios. O esquema de carregamento dos prismas para a realização deste ensaio é apresentado na Figura 44.

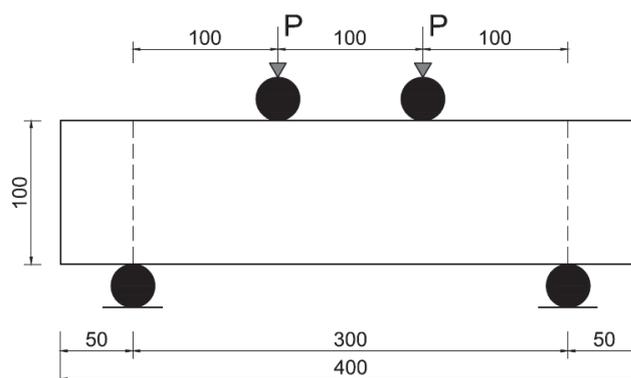


Figura 44– Esquema de carregamento do ensaio de flexão a quatro pontos.

Na execução do ensaio, são medidos os deslocamentos do corpo de prova através da utilização de dois dispositivos medidores de deslocamento (LVDT) acoplados a um “yoke”. A carga aplicada pela prensa (em kN) foi medida com frequência de 5 Hz, confrontando estas medições com as leituras da média dos deslocamentos medidos pelos LVDT’s acoplados ao “yoke”. A Figura 45 ilustra a execução do ensaio de flexão a quatro pontos com a utilização do dispositivo.

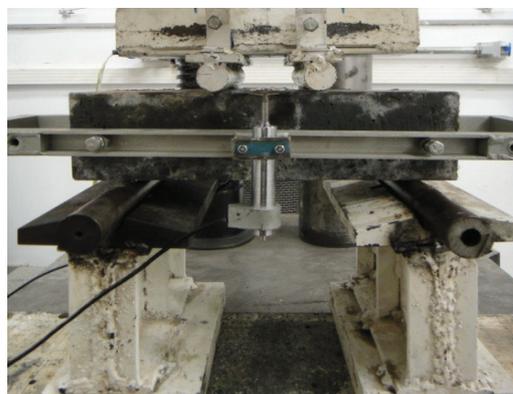


Figura 45– Execução do ensaio de flexão a quatro pontos com medição dos deslocamentos transversais.

A partir dos dados coletados no ensaio, pode-se traçar o diagrama tensão x deformação (útil para avaliação do comportamento do material) e também a curva carga x deflexão, da qual se pode obter a tenacidade à flexão do material calculando-se a área sob a curva, seguindo os critérios da norma japonesa JSCE-SF4 (1984).

A Figura 46 ilustra graficamente o cálculo da tenacidade na flexão a partir de um diagrama de carga x deflexão obtido no ensaio de tração na flexão a quatro pontos.

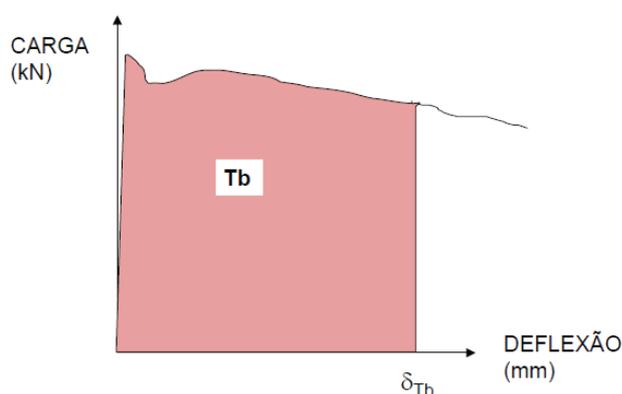


Figura 46– Critério da JSCE SF-4 para a determinação da tenacidade na flexão

[Fonte: adaptado de Figueiredo, 2005].

A norma japonesa utiliza o valor do fator de tenacidade para quantificar a tenacidade à flexão, que é obtido pela área total (T_b) até a deflexão equivalente (δ_{Tb}) a $L/150$. No caso de $L=300$ mm, a deflexão resultante é de 2 mm. Dessa forma, o valor de T_b será utilizado para se obter o fator de tenacidade FT (em MPa), a partir da expressão mostrada na Equação 6. Figueiredo (2000) explica que como a área T_b é dividida pela deflexão δ_{Tb} , isto resulta no valor médio de carga que o compósito suportou durante sua deformação.

$$FT = \frac{T_b \cdot L}{\delta_{Tb} \cdot b \cdot h^2} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

- FT = fator de tenacidade, em MPa;
- T_b = área total sob o gráfico, em N.mm;
- L = vão do corpo de prova durante o ensaio de flexão, em mm;
- δ_{Tb} = deflexão equivalente a $L/150$, em mm;
- b = largura do corpo de prova, em mm;
- h = altura do corpo de prova, em mm;

4.5.2.4 Tração direta

Para avaliar a resistência dos traços de CPR à tração direta, seguiu-se a metodologia proposta por Boshoff e Zijl (2005) com pequenas adaptações no corpo de prova. Este tipo de geometria tem sido adotada na avaliação da tração direta de materiais como o ECC (VAN MIER & VAN VLIET, 2002; LI, 2003; HASSAN & MAHMUD, 2012; WILLE et al., 2014). Para o CPR, um recente trabalho de Tran e Kim (2013) utiliza esta análise em tração direta.

Por se tratar de um material com fibras em sua composição, a avaliação da resistência à tração não pode ser feita pelo ensaio de compressão diametral, já que os resultados são prejudicados pelo efeito de “costura” proporcionado pelas fibras. Na execução deste ensaio, foi adotada uma velocidade de carregamento de 5 N/s.

Os corpos de prova utilizados possuem o formato de um haltere, e suas dimensões (em mm) são apresentadas na Figura 47.

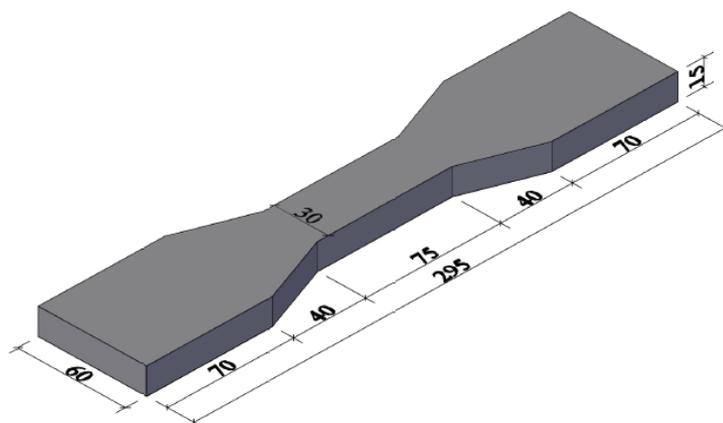


Figura 47– Geometria dos corpos de prova adotados para o ensaio de tração direta nos traços de CPR.

Este ensaio teve por objetivo medir a resistência à tração de forma direta, ou seja, tracionando o corpo de prova pelas extremidades e medindo a tensão na seção transversal de menor geometria até a ruptura. A Figura 48 ilustra alguns dos corpos de prova utilizados para a realização do ensaio de tração direta.



Figura 48– Corpos de prova utilizados no ensaio de tração direta dos traços de CPR.

Para a execução do ensaio, foram acopladas duas garras de aço que se encaixam nas extremidades de maior seção do corpo de prova, permitindo tracioná-lo de forma direta. Estas garras possuem pequenas almofadas de neoprene na região onde o corpo de prova as toca, proporcionando uma adequada distribuição de tensões durante o ensaio.

A Figura 49 ilustra a execução do ensaio de tração direta com instrumentação acoplada ao corpo de prova.



Figura 49– Detalhe da execução do ensaio de tração direta.

4.5.2.5 Tração por compressão diametral

Em função da presença dos agregados graúdos, não é possível utilizar o mesmo corpo de prova do CPR para avaliar a resistência do traço de concreto convencional à tração direta. Para tanto, seguiu-se a metodologia da NBR 7222 (ABNT, 2011) na execução do ensaio de compressão diametral, adotando-se velocidade de carregamento de 0,05 MPa/s.

Neste ensaio foram utilizados corpos de prova cilíndricos de $\varnothing 100$ mm x 200 mm. A Figura 50 ilustra a execução do ensaio de tração por compressão diametral.

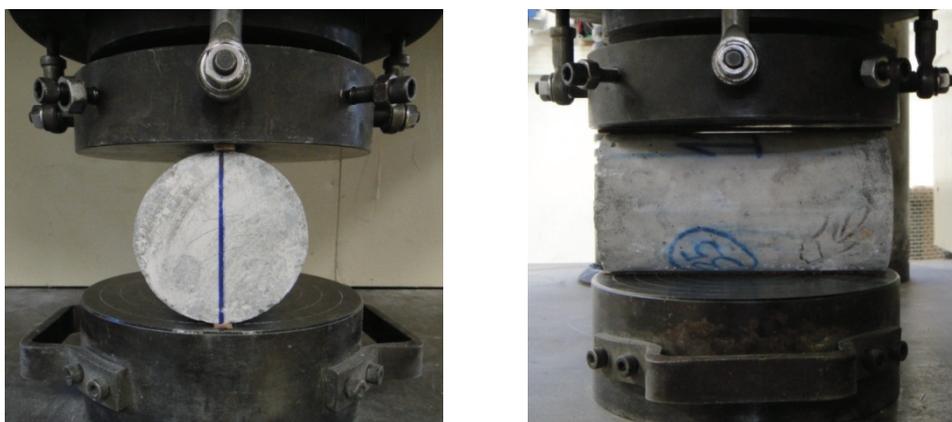


Figura 50– Detalhe da execução do ensaio de compressão diametral para determinação da resistência à tração do concreto convencional.

Cumprе salientar que conforme disposto no item 3.4 da NBR 7222 (ABNT, 2011), na ausência de dispositivos para o correto posicionamento do corpo de prova, podem-se utilizar duas pequenas tiras de madeira de 15 mm de largura por 3 mm de espessura, de modo a se obter o arranjo correto de carregamento que permite induzir o rompimento do corpo de prova na direção longitudinal.

4.5.2.6 Módulo de elasticidade estático longitudinal e transversal à compressão

Para os ensaios de módulo de elasticidade estático longitudinal e transversal à compressão, foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões: $\varnothing 100$ mm x 200 mm para todos os traços, conforme a Figura 51.

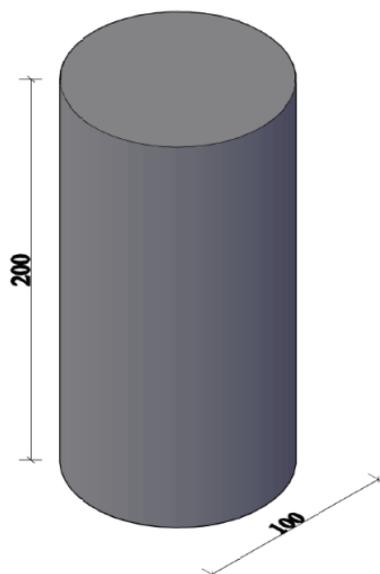


Figura 51– Geometria dos corpos de prova adotados para o ensaio de módulo de elasticidade estático.

O módulo de elasticidade pode ser definido como sendo a relação entre a tensão aplicada e a deformação instantânea reversível (MEHTA e MONTEIRO, 2014). No caso específico deste trabalho, foi adotado o módulo de deformação tangente inicial correspondente ao módulo cordal entre 0,5 MPa e 30% f_c , com valor expresso em GPa.

O ensaio foi realizado conforme determinações da NBR 8522 (ABNT, 2008) utilizando-se um compressômetro de três anéis acoplado ao corpo de prova. Este dispositivo permitiu trabalhar com três transdutores medidores de deslocamento (LVDT). Dois deles foram utilizados para medir a deformação longitudinal e um deles para medir a deformação transversal do corpo de prova. A velocidade de aplicação do carregamento foi de 0,45 MPa/s. A Figura 52 ilustra o arranjo experimental do ensaio.



Figura 52– Execução do ensaio para determinação do módulo de elasticidade longitudinal e transversal à compressão utilizando um compressômetro de três anéis.

De posse dos dados de resistência à compressão, aos 28 dias, dos corpos de prova respectivos de cada traço, determinaram-se os limites de tensão para execução do ensaio (entre 0,5 MPa e 0,30 f_c). A partir dos resultados, determinou-se o módulo de elasticidade estático longitudinal e o módulo de elasticidade estático transversal para cada um dos traços. Também foi calculado o módulo de elasticidade longitudinal por expressões propostas por outros pesquisadores, buscando estabelecer uma comparação entre os dados obtidos no estudo e o de outros trabalhos.

Além disso, de posse destes valores, calculou-se o coeficiente de Poisson, que nada mais é do que um número adimensional representado pela relação entre a deformação transversal e a deformação longitudinal do material.

A Figura 53 representa esquematicamente o coeficiente de Poisson, que é a razão entre $\Delta d/d$ (deformação transversal) e $\Delta l/l$ (deformação longitudinal) do material.

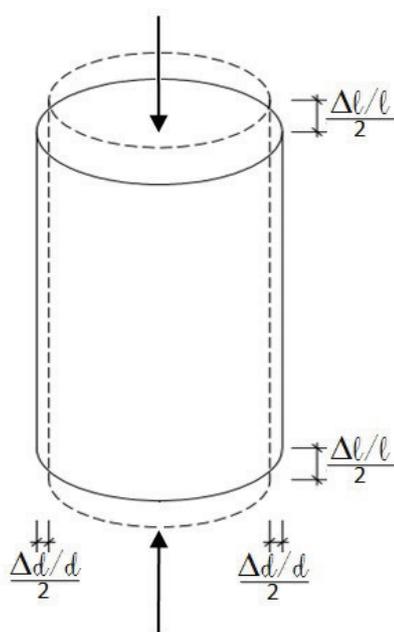


Figura 53 – Representação esquemática do coeficiente de Poisson.

4.3.3 Avaliações complementares

Como forma de corroborar os dados obtidos nos ensaios mecânicos e de durabilidade, foram propostos três ensaios complementares de avaliação dos traços.

4.3.3.1 Velocidade de propagação de pulso ultrassônico - VPU

No ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico (VPU), uma onda de ultrassom é projetada no material, sendo medida a velocidade de propagação da mesma, que vai depender da natureza do material, da sua porosidade e da presença de vazios ou de água no sistema de poros, entre outros fatores. De acordo com Lorenzi (2009), através da sua utilização, consegue-se realizar um controle das variações da compacidade do material, que pode ser associada à mudanças nas suas propriedades.

Segundo a ASTM E 114-95 (1995), o ensaio pode ser utilizado para controle da qualidade, detecção de defeitos, medição de espessuras ou caracterização dos materiais constituintes do concreto. A presença de vazios causa o retardo das ondas, em função da baixa velocidade do

som no ar. A interpretação está, portanto, baseada no fato de que o tempo de propagação dos pulsos ultrassônicos pode ser correlacionado com a densidade do material.

Uma das vantagens é que, por ser rápido e não destrutivo, o ensaio de VPU oferece a oportunidade de fazer um controle total dos elementos e os resultados desta análise podem ser usados para prognóstico da qualidade ou para correção do processo tecnológico.

Neste estudo, o ensaio de VPU foi utilizado com o objetivo de determinar as velocidades de propagação do pulso ultrassônico nos corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de compressão uniaxial em diferentes idades, buscando que houvesse uma mudança na compacidade do material na medida em que o tempo aumentava. Por ser um ensaio não destrutivo, as leituras foram efetuadas em cinco idades diferentes (1, 7, 14, 28 e 63 dias) do material, proporcionando a obtenção de uma curva VPU (compacidade) x Idade.

A Figura 54 ilustra a realização do ensaio de leitura da VPU.



Figura 54– Detalhe da execução do ensaio de VPU em um corpo de prova.

Como forma de comparar os resultados entre si, a seguinte técnica foi adotada: uma vez desmoldados, todos os corpos de prova foram retificados (para uma relação $h/D = 2$, como já dito anteriormente) e identificados com números de 1 a 15, de forma a serem rompidos em grupos de 3 corpos de prova por idade.

Dessa forma, para a idade de 1 dia, foram feitas leituras de VPU nos 15 corpos de prova disponíveis, sendo que após a leitura, os corpos de prova de 1 a 3 foram rompidos à compressão. Dessa forma, e assim sucessivamente, a cada idade do ensaio de compressão, todos os corpos de prova restantes foram sendo lidos e rompidos conforme a ordem pré-determinada.

A Figura 55 ilustra o esquema de registro das leituras que foi efetuado para todos os traços, sempre anteriormente ao ensaio de compressão.

	1 dia						
CP	tempo (μ s)						
1							
2			7 dias				
3			tempo (μ s)				
4							
5				14 dias			
6				tempo (μ s)			
7							
8					28 dias		
9					tempo (μ s)		
10							
11						63 dias	
12						tempo (μ s)	
13							
14							
15							

Figura 55– Tabela utilizada no registro das leituras de ultrassom.

Para que as leituras de VPU pudessem expressar a velocidade real para cada corpo de prova, os mesmos foram medidos após a etapa de retífica, de modo que com a sua respectiva altura (maior distância) e o tempo de propagação lido no aparelho de ultrassom (em μ s), foi possível calcular a velocidade de propagação da onda ultrassônica (em m/s) para cada corpo de prova individualmente.

Os resultados de VPU podem ser interpretados como indicadores de qualidade do concreto e alguns pesquisadores sugerem categorias para caracterizar a qualidade do concreto em função destas.

Uma das escalas de categorização mais utilizadas foi proposta pela *International Atomic Energy Agency* - IAEA, em 2002, e está reproduzida na Tabela 25.

Tabela 25– Índices estimativos da qualidade do concreto em função da velocidade de propagação da onda ultrassônica. [Fonte: IAEA, 2002].

Velocidade de propagação linear do ultrassom [m/s]	> 4500	3500 a 4500	3000 a 3500	2000 a 3000	< 2000
Qualidade do concreto	excelente	ótimo / bom	bom	regular	ruim

Tendo em vista que vários fatores podem afetar os valores obtidos em um ensaio de VPU de um determinado concreto, tais como a presença de umidade, microfissuras, entre outros, essas tabelas genéricas devem ser usadas com cautela. Contudo, as mesmas servem como um referencial útil para analisar comparativamente diferentes resultados de ensaios de VPU. Ainda assim, é importante frisar que a referida tabela foi desenvolvida para o concreto convencional, de modo que os valores de VPU medidos nas amostras de CPR deverão servir muito mais como medida comparativa entre os traços do que como uma avaliação qualitativa do material propriamente dito.

No caso específico deste estudo, a comparação entre diferentes leituras de um mesmo traço (diferentes idades) possibilita uma análise das alterações da compacidade do material ao longo do tempo. Já a comparação entre diferentes traços (para uma mesma idade ou para várias idades) possibilita avaliar as diferenças na compacidade em função da incorporação de diferentes materiais, como a sílica ativa e a cinza volante (tendência de refinamento dos poros) e as fibras (tendência a afetar as leituras da velocidade do pulso ultrassônico). Contudo, em função da presença das fibras metálicas nos traços de CPR, estas poderão influenciar a propagação do pulso ultrassônico, podendo levar a valores inferiores de VPU em relação àqueles constatados para o concreto convencional.

4.3.3.2 Análise de Custos

A análise de custos teve por objetivo fazer um comparativo entre os diferentes traços estudados, comparando os três traços de CPR com o traço de concreto convencional, evidenciando as diferenças existentes entre eles em termos de custos de produção do material, baseado no custo unitário dos materiais constituintes e dos custos das matérias primas que foram levantados durante a execução do trabalho.

Este tipo de análise possibilita uma comparação direta entre traços pelo custo R\$ / m³ e outras comparações como custo em R\$ / MPa (para diferentes propriedades mecânicas) e derivações sobre o ganho de resistência à compressão, por exemplo, a partir do consumo de cimento e de sílica ativa, representados por MPa / kg_{cimento} e MPa / kg_{sílica}.

A comparação entre traços de CPR também é útil no sentido de avaliar o impacto de determinados materiais utilizados nos traços, como a substituição, em massa, da cinza volante por cimento (entre CPR 1 e CPR 2A – mantendo demais materiais iguais) e o emprego de fibras de polipropileno (comparando CPR 2A com CPR 2B – mantendo a cinza volante em ambos).

De posse destes dados pode-se fazer uma avaliação do impacto financeiro da utilização do CPR em termos do uso de matérias primas. Contudo, cumpre ressaltar que estes custos serão obviamente superiores aos do concreto convencional, uma vez que o CPR emprega materiais especiais, como as fibras, e matérias primas selecionadas, como areia especial, sílica ativa e pó de quartzo. Entretanto, deve-se levar em conta o desempenho mecânico do material e sua durabilidade a longo prazo, ou seja, considerar os ganhos imediatos em termos de dimensões das peças a serem utilizadas e os ganhos a longo prazo em termos de manutenção da estrutura construída com o material.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A investigação experimental deste estudo foi estruturada em duas etapas, uma preliminar e outra experimental. A seguir são definidas e detalhadas todas as etapas realizadas, bem como o resultado de todos os ensaios realizados.

5.2 VARIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE

Para a medição da trabalhabilidade dos traços de CPR foi realizado o ensaio de índice de consistência, medindo-se o espalhamento da amostra antes e depois dos 30 golpes, obtendo-se duas medidas distintas como forma de verificar a variação da trabalhabilidade. Os resultados obtidos estão indicados na Tabela 26.

Tabela 26 – Resultados do ensaio de consistência.

Ensaio	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B
IC - Flow table – 0 golpes (mm)	120	130	110
IC - Flow table – 30 golpes (mm)	190	195	180

Para os traços em CPR, observa-se que os traços CPR 1 e CPR 2A apresentaram um índice de consistência bastante parecido, principalmente ao final dos 30 golpes, com ganho inexpressivo para o traço CPR 2A, mostrando que adição da cinza volante praticamente não alterou o abatimento do traço. Já no caso do traço CPR 2B, onde houve a utilização de fibra metálica juntamente com a fibra de polipropileno, o abatimento sofreu leve alteração, o que era um fenômeno esperado. Em geral, os três traços apresentaram comportamento muito similar entre si, com índices de consistência bastante baixos em decorrência da adição das fibras.

Segundo Figueiredo (2007), a adição de fibras altera as condições de consistência do concreto e, com isso, a sua trabalhabilidade. Isso decorre principalmente do fato que ao se adicionarem fibras ao material, está se adicionando também uma grande área superficial, o que acaba demandando água de molhagem. No caso das fibras de PP, a área adicionada é muito maior do que aquela dos traços onde somente a fibra metálica foi empregada.

Para o traço de concreto convencional foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone – *slump test*, resultando em um abatimento de 150 mm no momento da moldagem, o que

condiz com um abatimento empregado na indústria de pré-fabricados para um concreto que será vibrado nas formas.

5.3 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CORPOS DE PROVA MOLDADOS

Para o ensaio de resistência à compressão, os quatro traços foram ensaiados em cinco idades distintas: 1 dia; 7 dias; 14 dias; 28 dias e 63 dias, buscando estabelecer uma curva de crescimento da resistência à compressão ao longo do tempo e avaliando o efeito da utilização da cinza volante e da combinação de fibras nos traços de CPR, além de fornecer parâmetros para o concreto convencional, monitorando seu crescimento de resistência ao longo do tempo. A Tabela 27 compila todos os dados de resistência à compressão levantados durante os ensaios.

Tabela 27 – Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial para os corpos de prova moldados.

Traço	1 dia	7 dias	14 dias	28 dias	63 dias
CPR 1 (MPa)	54,6	98,7	127,3	122,9	155,1
	55,3	97,7	128,5	143,5	151,5
	59,2	98,1	132,7	139,2	134,9
Média	56,4	98,1	129,5	135,2	147,2
Desvio padrão	2,5	0,5	2,8	10,8	10,8
Coef. de variação	4,4%	0,6%	2,2%	8,0%	7,3%
Valor máximo	59,2	98,7	132,7	143,5	155,1
CPR 2 A (MPa)	43,4	89,5	111,3	140,7	177,8
	43,4	91,3	117,0	144,5	164,5
	40,8	91,0	121,1	139,1	131,4
Média	42,5	90,6	116,5	141,4	157,9
Desvio padrão	1,5	1,0	4,9	2,8	23,9
Coef. de variação	3,6%	1,0%	4,2%	2,0%	15,1%
Valor máximo	43,4	91,3	121,1	144,5	177,8
CPR 2 B (MPa)	42,3	87,6	116,5	134,0	129,4
	42,9	89,8	117,1	130,5	130,6
	41,6	85,0	117,5	132,2	136,3
Média	42,3	87,5	117,0	132,2	132,1
Desvio padrão	0,7	2,4	0,5	1,8	3,7
Coef. de variação	1,5%	2,8%	0,4%	1,3%	2,8%
Valor máximo	42,9	89,8	117,5	134,0	136,3
CC 40 (MPa)	30,5	45,7	37,1	42,5	39,5
	31,6	37,4	39,0	38,8	44,7
	31,0	33,6	39,8	44,7	42,5
Média	31,0	38,9	38,6	42,0	42,2
Desvio padrão	0,6	6,2	1,4	3,0	2,6
Coef. de variação	1,9%	16,0%	3,6%	7,0%	6,3%
Valor máximo	31,6	45,7	39,8	44,7	44,7

Analisando a Tabela 27, é possível observar que praticamente todos os resultados obtidos tiveram baixa variabilidade, com apenas dois casos onde o coeficiente de variação foi superior a 10% (grifados em vermelho), sendo observado no traço CPR 2A para o ensaio de 63 dias e para o traço CC 40 no ensaio de 7 dias. Atribui-se essa maior constância nos resultados à utilização de corpos de prova de maiores dimensões ($\varnothing 75 \times 150$ mm), diminuindo a grande variabilidade dos corpos de prova menores ($\varnothing 50 \times 100$ mm), conforme observado em trabalhos anteriores, como no de Christ (2014).

A Figura 56 ilustra graficamente uma análise estatística de variância da totalidade dos resultados de resistência à compressão dos quatro traços analisados.

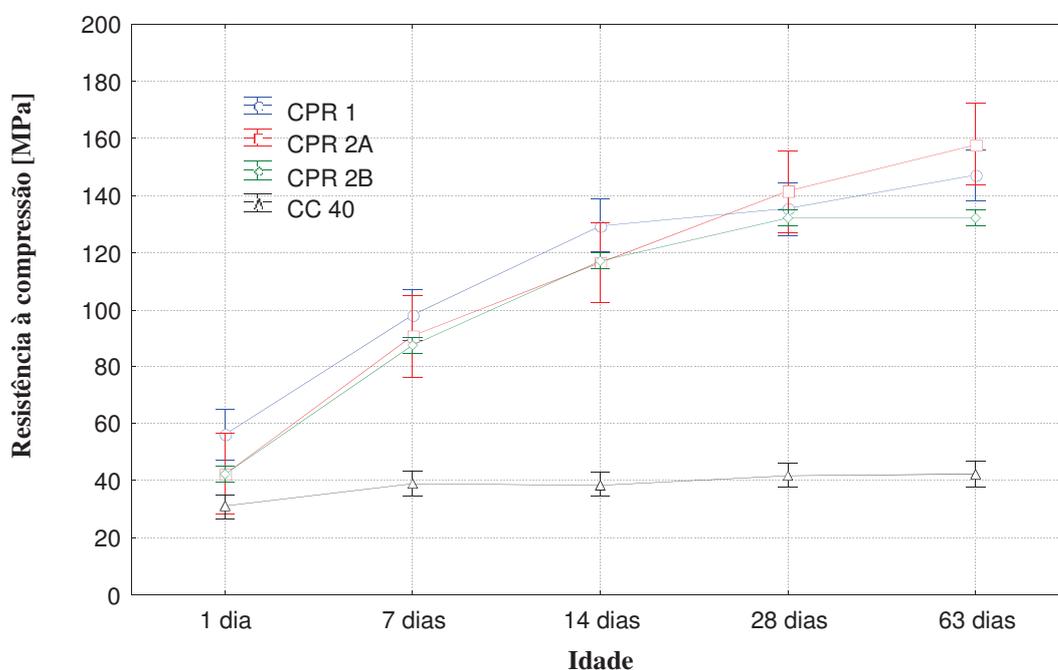


Figura 56– Análise de variância dos resultados de resistência à compressão dos quatro traços para as cinco idades analisadas.

A Figura 57 ilustra as resistências potenciais atingidas por cada um dos traços nas diferentes idades de ensaio.

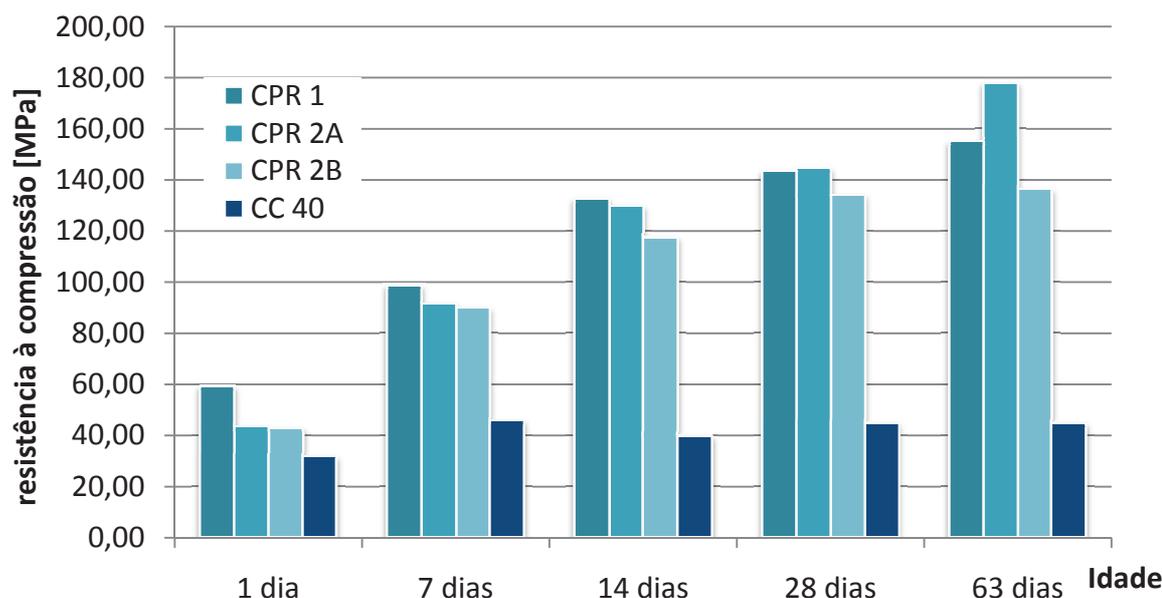


Figura 57– Resultados potenciais de resistência à compressão dos quatro traços para as cinco idades analisadas.

Analisando a Figura 57 é possível notar que todos os traços tiveram aumento nas resistências à compressão verificadas ao longo do tempo, como era esperado. Nas idades iniciais, até os 14 dias, o traço CPR 1 se destacou frente aos demais, o que pode ser justificado pelo fato de não possuir cinza volante em sua constituição. A partir dos 28 dias o traço CPR 2A apresentou maior elevação nas resistências, o que não é observado no traço CPR 2B, mesmo utilizando percentual de cinza volante idêntico ao traço CPR 2A, e nem apresentando tendência de crescimento futuro. Essas diferenças parecem estar associadas à utilização das fibras de polipropileno nesse traço, já que os demais materiais constituintes permaneceram inalterados. O traço CC 40 apresentou comportamento anômalo para a idade de 7 dias, porém apresentou crescimento de resistência condizente com o traço para as demais idades.

Fazendo-se uma análise de variância dos resultados à compressão obtidos para os três traços de CPR correlacionando-se a influência da cinza volante e da idade, tem-se o seguinte, conforme a Tabela 28:

Tabela 28 - Análise de variância dos resultados de resistência à compressão para os traços de CPR

Fonte	GDL	SQ	MQ	Teste F	Significância - p	Efeito significativo
CV	2	1270,9	635,4	8,488	0,001630	Sim
Idade	3	55532,7	18510,9	247,258	0,000000	Sim
CV x Idade	6	839,9	140,0	1,870	0,127751	Não
Erro	24	1796,8	74,9			

Onde: GDL = grau de liberdade; SQ = soma quadrada; MQ = média quadrada.

A partir dos resultados obtidos na análise, pode-se afirmar que a cinza volante teve efeito significativo na resistência à compressão, assim como a idade, o que é esperado, ou seja, existe um aumento de resistência ao longo do tempo. Contudo, analisando-se a influência combinada da cinza volante na resistência à compressão com a idade, não houve efeito significativo no crescimento da resistência.

Tal fato pode ser atribuído ao rápido consumo do hidróxido de cálcio presente a partir da hidratação do cimento, uma vez que os teores de cinza volante e de sílica ativa presentes são bastante elevados e competem pelo Ca(OH)_2 , fazendo com que haja efeito fíler do material remanescente não reagido.

Comparando ainda os resultados para o ensaio de resistência à compressão, obtidos aos 28 dias, com o trabalho de Christ (2014), tem-se o seguinte:

Tabela 29 - Comparativo entre os resultados de resistência à compressão e o consumo de materiais utilizados entre o estudo atual e o trabalho de Christ (2014)

Traço	Traço CPR 2A	Traço A100 (CHRIST, 2014)	Comparativo
Resultado potencial aos 28 dias (MPa)	144,5	172,2	↓ - 27,7 MPa (-16,1%)
Consumo de cimento (kg/m ³)	433,4	251,8	↑ + 181,6 Kg/m ³ (+72,1%)
Consumo de cinza volante (kg/m ³)	185,8	107,9	↑ + 77,9 kg/m ³ (+72,2%)
Consumo de sílica ativa (kg/m ³)	142,4	213,9	↓ - 71,5 kg/m ³ (-33,4%)
Consumo de fibra metálica (kg/m ³)	213,0	235,5	↓ - 22,5 kg/m ³ (-9,6%)
Consumo de fibra de PP (kg/m ³)	-	-	-
Traço	Traço CPR 2B	Traço A80 (CHRIST, 2014)	Comparativo
Resultado potencial aos 28 dias (MPa)	134,0	156,8	↓ - 22,8 MPa (-14,5%)
Consumo de cimento (kg/m ³)	433,4	251,8	↑ + 181,6 Kg/m ³ (+72,1%)
Consumo de cinza volante (kg/m ³)	185,8	107,9	↑ + 77,9 kg/m ³ (+72,2%)
Consumo de sílica ativa (kg/m ³)	142,4	213,9	↓ - 71,5 kg/m ³ (-33,4%)
Consumo de fibra metálica (kg/m ³)	170,4	188,4	↓ - 18,0 kg/m ³ (-9,6%)
Consumo de fibra de PP (kg/m ³)	4,94	5,46	↓ - 0,5 kg/m ³ (-9,5%)

A comparação direta entre o estudo realizado e o trabalho de Christ (2014) foi possível, pois os traços de CPR tiveram os mesmos percentuais de cinza volante (em substituição à massa de cimento) e utilização de fibras nas mesmas proporções (3% em relação ao volume total de material do traço). Contudo, os consumos de materiais tiveram grandes diferenças, já que o estudo de Christ (2014) considerou a sílica ativa na determinação do empacotamento, elevando o seu consumo em mais de 30% em relação ao utilizado neste estudo. Além do fato

de tal consumo elevar significativamente os custos para obtenção do material, conforme será visto na análise de custos, tal quantidade de sílica ativa irá resultar em uma grande porcentagem de material não reagido no traço, atuando basicamente como material inerte (efeito fíler), auxiliando no fechamento dos espaços intersticiais. Entretanto, os consumos de cimento e, por consequência, de cinza volante, foram mais de 70% superiores aos utilizados no trabalho de Christ (2014), fruto das diferentes metodologias adotadas na definição dos traços. Os resultados de resistência à compressão, por sua vez, tiveram uma redução da ordem de 15%.

Também é importante comentar, a título informativo, que os corpos de prova de CPR, quando ensaiados à compressão, não romperam de maneira brusca, como no caso de concretos de alta resistência. Tal fato é explicado pelo efeito de confinamento proporcionado pelas fibras, que mantém o material coeso, apresentando apenas fissuração, sem projeção de fragmentos do material.

5.4 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – CORPOS DE PROVA EXTRAÍDOS

Como forma de avaliar paralelamente a resistência à compressão dos traços abordados, optou-se pela extração de alguns corpos de prova, retirando-se amostras dos prismas anteriormente ensaiados à flexão, sendo que o rompimento de cada grupo de corpos de prova referentes a um traço foi efetuado aos 91 dias, possibilitando obter mais um dado relativo ao material moldado.

Para esta análise, foram extraídos quatro corpos de prova de cada um dos três prismas submetidos ao ensaio de flexão aos três pontos – CMOD, totalizando doze testemunhos por traço. Os valores obtidos no ensaio de compressão foram corrigidos para eventuais distorções da relação h/D , conforme a tabela 2 da NBR 5739 (ABNT, 2007).

Também foi levado em conta o efeito do broqueamento, aplicando-se os fatores de correção, conforme recomendação do NBR 7680-1 (ABNT, 2015). Dessa forma, a resistência obtida no ensaio de compressão dos testemunhos foi corrigida em função dos danos causados pelo broqueamento e pelas microfissuras causadas na extração.

A Tabela 30 compila os dados de resistência à compressão, já corrigidos, obtidos nos ensaios. Os testemunhos foram separados conforme sua localização no prisma, divididos em lado esquerdo (centro ou externo) e lado direito (centro ou externo).

Tabela 30 – Resultados do ensaio de resistência à compressão uniaxial para os corpos de prova extraídos [91 dias].

Traço	esquerdo externo	esquerdo centro	direito centro	direito externo
CPR 1 (MPa)	157,4	170,2	167,6	154,3
	156,0	158,7	161,3	149,3
	163,9	180,8	142,9	147,1
Média	159,1	169,9	157,3	150,2
Desvio padrão	4,2	11,0	12,8	3,7
Coef. de variação	2,6%	6,5%	8,2%	2,4%
Valor máximo	163,9	180,8	167,6	154,3
CPR 2 A (MPa)	167,3	153,3	149,3	160,5
	163,4	147,8	160,5	161,2
	168,1	173,7	176,1	171,3
Média	166,3	158,3	162,0	164,3
Desvio padrão	2,5	13,7	13,5	6,0
Coef. de variação	1,5%	8,6%	8,3%	3,7%
Valor máximo	168,1	173,7	176,1	171,3
CPR 2 B (MPa)	152,6	140,6	140,6	147,4
	136,2	126,4	147,3	154,8
	149,9	162,4	164,7	152,7
Média	146,2	143,2	150,9	151,6
Desvio padrão	8,8	18,1	12,4	3,8
Coef. de variação	6,0%	12,7%	8,2%	2,5%
Valor máximo	152,6	162,4	164,7	154,8
CC 40 (MPa)	38,8	41,1	40,5	39,9
	37,7	36,8	35,6	-
	38,8	38,7	34,6	37,7
Média	38,4	38,9	36,9	38,8
Desvio padrão	0,7	2,2	3,1	1,6
Coef. de variação	1,8%	5,5%	8,5%	4,0%
Valor máximo	38,8	41,1	40,5	39,9

A análise dos resultados mostra que os valores obtidos para os corpos de prova extraídos apresentam diferenças entre os seus pares moldados ao se considerar as diferenças entre os valores máximos obtidos em ambos os ensaios. Em teoria, considerando-se apenas a idade dos ensaios (63 dias x 91 dias), o esperado seria um pequeno aumento das resistências para as maiores idades. Entretanto, para os traços CPR 2A e CC 40, ao se considerarem os valores máximos, os resultados encontrados situam-se ligeiramente abaixo daqueles encontrados para os 63 dias.

O fato de os resultados obtidos com as extrações diferirem dos corpos de prova moldados pode estar diretamente atrelado ao fato de a matriz ensaiada já ter sido submetida anteriormente ao carregamento proveniente do ensaio de flexão. Contudo, o nível de tensões tende a ser bastante menor do que o que leva ao rompimento do material. Entretanto, pode haver influência de pequenas lesões (microfissurações) e também do deslocamento de fibras, levando a uma distorção dos valores.

A Figura 58 ilustra graficamente um comparativo entre os valores máximos obtidos para o ensaio de compressão nos corpos de prova moldados (63 dias de idade) em relação aos corpos de prova extraídos (91 dias de idade), mostrando a variação percentual entre eles.

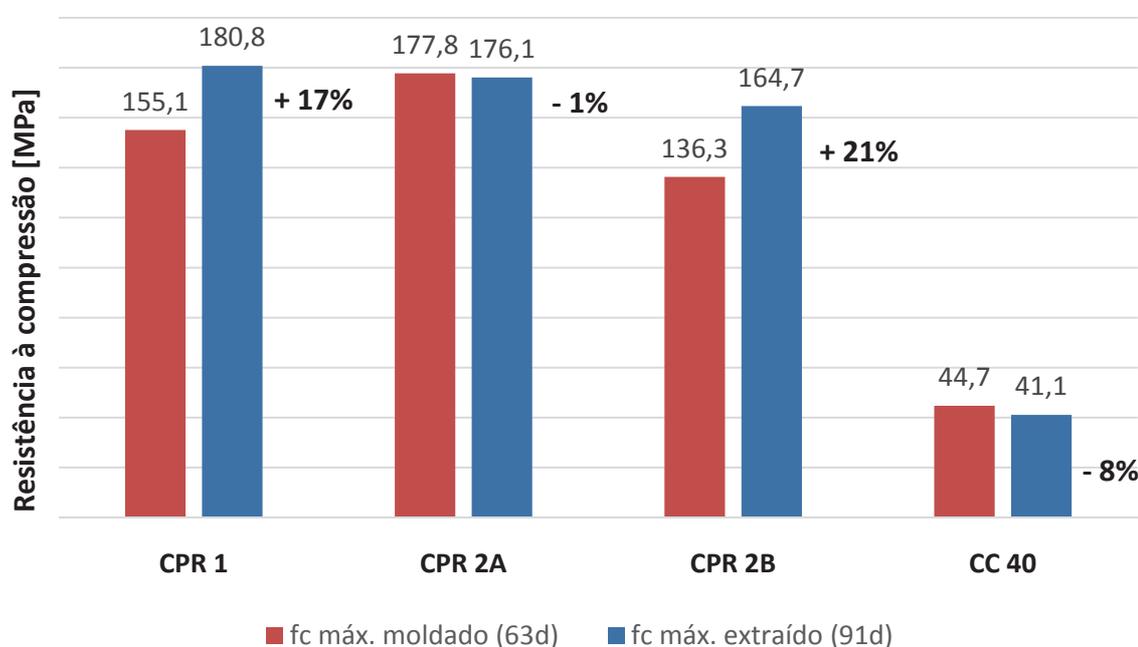


Figura 58 – Comparativo de valores máximos obtidos nas extrações em relação aos corpos de prova moldados.

Com base no gráfico, nota-se a variação existente para cada um dos traços, sendo que para os traços CPR 1 e CPR 2B, os resultados obtidos para os corpos de prova extraídos estão acima dos valores obtidos para os corpos de prova moldados. Considerando-se a diferença de idade entre os ensaios, os resultados estão dentro do esperado, mostrando crescimento da resistência ao longo do tempo. Já para os corpos de prova dos traços CPR 2A e CC 40, como já mencionado, houve uma diminuição nos valores obtidos nas extrações em relação aos corpos de prova moldados.

Levando-se em consideração possíveis distorções dos resultados, pelo fato de serem corpos de prova extraídos em relação a corpos de prova moldados em idades diferentes entre si e considerando que os lotes também tem diferença no número de testemunhos (3 moldados contra 12 extraídos), os valores aqui apresentados devem, nesse caso, ser interpretados como meramente ilustrativos.

5.5 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O ensaio para a determinação do módulo de elasticidade estático à compressão, tanto longitudinal quanto transversal, para os quatro traços, foi efetuado aos 28 dias da moldagem, utilizando corpos de prova de Ø100 x 200 mm.

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) o módulo de elasticidade deve ser obtido segundo o ensaio descrito na NBR 8522 (ABNT, 2008), sendo considerado nesta norma o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30% f_c , ou outra tensão especificada em projeto.

A partir dos dados experimentais obtidos com o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, foram determinados os limites de medição da deformação sofrida pelo corpo de prova durante o ensaio, limitando esta medição entre 0,5 MPa e 30% f_c , como já explicado anteriormente.

A Tabela 31 compila os dados obtidos no ensaio.

Tabela 31 – Resultados do ensaio de módulo de elasticidade estático longitudinal e transversal.

	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B	CC40
$E_{\text{longitudinal}}(\text{GPa})$	47,7	48,0	46,0	30,5
	48,2	48,1	44,5	31,1
	46,7	47,4	46,0	29,7
Média	47,6	47,9	45,5	30,4
Desvio padrão	0,8	0,4	0,8	0,7
Coef. de variação	1,7%	0,8%	1,9%	2,3%
Valor máximo	48,2	48,1	46,0	31,1
$E_{\text{transversal}}(\text{GPa})$	9,2	9,1	9,1	6,0
	9,4	9,0	8,5	6,5
	9,0	9,2	8,9	6,2
Média	9,2	9,1	8,8	6,2
Desvio padrão	0,2	0,1	0,3	0,3
Coef. de variação	2,1%	1,5%	3,5%	4,0%
Valor máximo	9,4	9,2	9,1	6,5

Analisando os dados da tabela é possível observar que o módulo de elasticidade longitudinal dos traços em CPR variou de 45,5 GPa, no traço CPR 2B (com dois tipos de fibra) até 47,9 GPa para o traço com incorporação de cinza volante (CPR 2A), sendo que para o traço de CPR “convencional” (CPR 1) o valor do módulo foi ligeiramente mais baixo do que este, atingindo 47,6 GPa.

Já no caso do módulo de elasticidade transversal, houve uma variação de valores entre 8,8 GPa até 9,2 GPa (~5%), sendo que o traço CPR 1 atingiu o maior valor, seguido do traço CPR 2A e do traço CPR 2B.

Para o concreto convencional os valores de módulo ficaram em 30,4 GPa para o módulo longitudinal e 6,2 GPa para o módulo transversal.

Como forma de comparar os valores obtidos experimentalmente para o módulo de elasticidade longitudinal (mais comumente utilizado que o transversal), efetuou-se o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal dos traços por três diferentes expressões matemáticas: uma proposta pelo comitê do ACI 363 (1992) – para concretos convencionais, e outras duas, de Ma et al. (2004) e de Graybeal (2007) – modeladas matematicamente utilizando dados de experimentos com CPR.

Os valores estimados por estas expressões, juntamente com o valor experimental médio obtido neste estudo, são apresentados na Tabela 32, tendo ainda mais abaixo, a estimativa do módulo de elasticidade calculado para o concreto convencional através das expressões propostas pela norma brasileira, NBR 6118 (ABNT, 2014) e também pela recomendação do ACI 318 (2005).

Tabela 32 – Resultados calculados para o módulo de elasticidade longitudinal por diferentes expressões [GPa].

Modelo	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B	CC40
ACI 363R (1992)	45,5	46,8	45,3	29,1
Ma et al. (2004)	45,3	46,3	45,1	N.A.
Graybeal (2007)	44,6	46,2	44,4	N.A.
Experimental	47,6	47,9	45,5	30,4
Média	45,8	46,8	45,1	-
Desvio padrão	1,3	0,8	0,5	-
Coef. de variação	2,8%	1,7%	1,0%	-
Máximo	47,6	47,9	45,5	30,4
NBR 6118 (2014)	65,1	67,3	64,8	37,4 (31,8)
ACI 318 (2005)	55,0	56,9	54,7	31,6

A partir destes valores, pode-se observar que as estimativas para o valor do módulo de elasticidade estão muito próximas dos valores obtidos experimentalmente para os traços em CPR, com coeficientes de variação abaixo de 3%, mostrando uma aproximação bastante boa dos resultados obtidos. Mesmo a expressão do ACI 363R (1992), para concretos convencionais, apresentou boa aproximação para os traços em CPR. Nota-se também que os valores obtidos experimentalmente foram os maiores dentre todas as estimativas e para todos os traços comparados.

No caso do traço CC40, de concreto convencional, o módulo de elasticidade não foi calculado pelas expressões de Ma et al. (2004) e de Graybeal (2007), pois estas foram propostas especificamente para traços de CPR, tendo sido feito apenas o cálculo para a expressão proposta pelo ACI 363R, com boa aproximação.

Mais abaixo, nas duas últimas linhas da tabela, estão os valores estimados calculados pelas expressões para concreto convencional propostas pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e também pelo ACI 318 (2005). Os valores são bem maiores do que aqueles obtidos experimentalmente e/ou estimados pelas demais expressões para os traços em CPR. Todavia, para o traço de concreto convencional estas expressões se mostraram mais adequadas, principalmente a do ACI 318 (2005). A expressão proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014) ficou mais acima, porém, se considerarmos 85% desse valor (que é o valor utilizado numa avaliação estrutural), chega-se a 31,8 GPa, uma aproximação bastante próxima e quase igual à do ACI 318.

Por fim, a Figura 59 ilustra graficamente um comparativo entre estes diferentes valores calculados para o módulo de elasticidade e os valores obtidos experimentalmente.

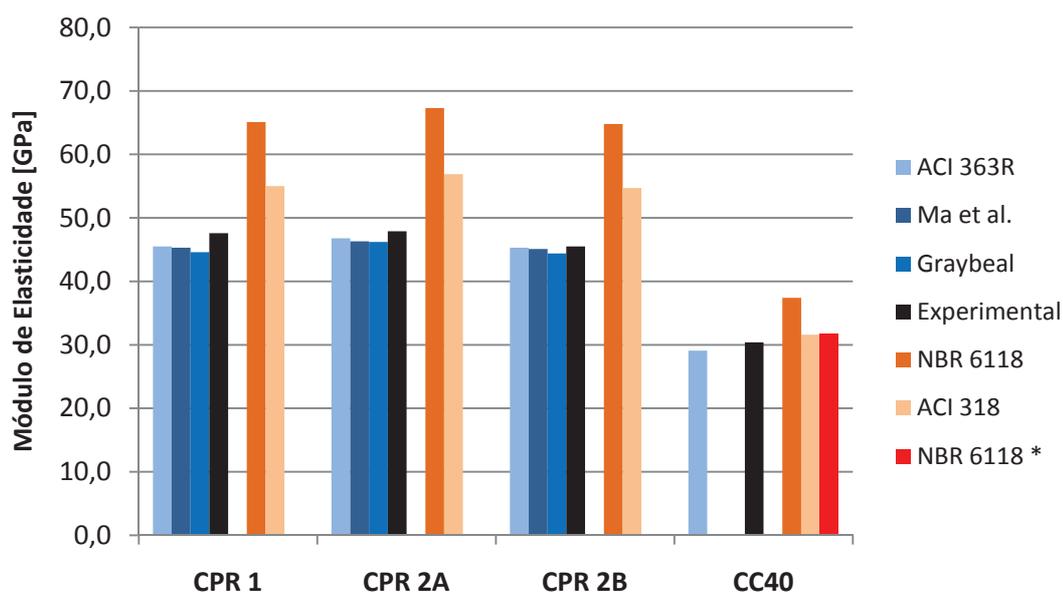


Figura 59– Resultados do módulo de elasticidade para diferentes teorias e para os valores experimentais.

5.6 COEFICIENTE DE POISSON

De posse dos dados referentes aos módulos de elasticidade longitudinal e transversal dos quatro traços estudados, procedeu-se ao cálculo do coeficiente de Poisson. A Tabela 33 compila os valores obtidos experimentalmente neste estudo.

Tabela 33 – Coeficientes de Poisson obtidos para os quatro traços analisados.

	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B	CC40
Coeficiente de Poisson (ν)	0,19	0,19	0,19	0,21

Como forma de tecer um comparativo, a Tabela 34 traz alguns resultados experimentais para o coeficiente de Poisson obtidos por diversos pesquisadores.

Tabela 34 – Resultados experimentais para o coeficiente de Poisson em diferentes estudos sobre CPR
[Fonte: extraído de FHWA, 2013].

Publicação	coef. de Poisson (ν)
BONNEAU (1997) ⁶	0,19
GRAYBEAL (2006) ⁷	0,18
AHLBORN (2008) ⁸	0,21
JOH (2008) ⁹	0,16
SIMON (2009) ¹⁰	0,20
OZYILDIRIM (2011) ¹¹	0,18

De posse destes valores, observa-se que o coeficiente de Poisson do CPR varia entre 0,16 e 0,21, com predominância entre 0,18 e 0,19.

A partir da análise dos valores obtidos experimentalmente para o coeficiente de Poisson, pode-se afirmar que os mesmos estão dentro do esperado para os traços em CPR se comparados aos resultados obtidos por trabalhos anteriores, sendo que todos os traços em CPR apresentaram o mesmo coeficiente.

No caso do traço de concreto convencional, a literatura cita o valor de 0,20 como característico desse material, o que se mostra bastante próximo dos valores obtidos experimentalmente, confirmando os ensaios realizados.

⁶BONNEAU, O. Mechanical Properties and Durability of Two Industrial Reactive Powder Concretes. *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 4, July–August 1997, pp. 286–290.

⁷GRAYBEAL, B. Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed IGirders. FHWA, U.S. Department of Transportation, Report No. FHWA-HRT-06-115, 2006.

⁸AHLBORN, T.M. Durability and Strength Characterization of Ultra-High Performance Concrete Under Variable Curing Regimes. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Kassel University Press, Kassel, Germany, 2008, pp. 197–204.

⁹JOH, C. Punching Shear Strength Estimation of UHPC Slabs. In: *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Ed., Fehling, E., Schmidt, M., and Stürwald, S., Kassel University Press, Kassel, Germany, 2008, pp. 719–726.

¹⁰SIMON, A. Les Nouvelles Recommandations AFGC sur les BFUP CHAPITRE I—Comportement et Caractéristiques Mécaniques des BFUP. In: *Proceedings of the International Workshop on Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete*. Nov. 2009, Marseille, France, AFGC/fib, Paper 6.1.2.

¹¹OZYILDIRIM, C. Evaluation of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. Virginia Center for Transportation Innovation and Research, Report No. FHWA/VCTIR 12-R1, Federal Highway Administration, McLean, VA, 2011.

5.7 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO – 3 PONTOS

Para o ensaio de resistência à tração na flexão, os quatro traços foram ensaiados aos 28 dias, buscando avaliar o comportamento tanto dos traços em CPR como do concreto convencional, comparando os resultados obtidos com relação à resistência à compressão na mesma idade.

O ensaio a três pontos teve por objetivo principal determinar a tenacidade do material através da metodologia da norma RILEM TC-162 TDF (2002).

A Tabela 35 apresenta os resultados obtidos no ensaio de flexão a três pontos para todos os corpos de prova de 150x150x550 mm.

Tabela 35 – Resultados do ensaio de tração na flexão a três pontos (prisma 150x150x550mm).

	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B	CC 40
f_{ct} 3 pts (MPa)	22,8	23,0	24,1	4,0
	26,2	24,8	22,8	4,7
	27,3	24,2	24,0	4,1
Média	25,5	24,0	23,6	4,3
Desvio padrão	2,3	0,9	0,7	0,4
Coef. de variação	9,2%	3,9%	3,1%	9,1%
Valor máximo	27,3	24,8	24,1	4,7

É possível observar que as resistências à tração na flexão dos traços em CPR é bastante próxima e que os resultados obtidos se mantiveram dentro de um coeficiente de variação inferior a 10%. Nota-se ainda que o traço CPR 2B, que possui a fibra de polipropileno na composição, apresentou valor potencial ligeiramente menor para esta propriedade, o que não é suficiente para indicar que a fibra seja ineficiente no sentido de absorver as fissuras iniciais que ocorrem no material antes da ruptura. Entende-se dessa forma, que as fibras de polipropileno não tiveram ação totalmente benéfica na melhoria das propriedades de resistência à flexão do CPR, porém, foram suficientes para garantir um nível de resistência à flexão equivalente aos traços CPR 1 e CPR 2A, mesmo com teor de fibras metálicas 20% inferior.

No caso do traço de concreto convencional, os resultados mostram a deficiência do material em absorver tais esforços, já que predomina a tração na seção do prisma, levando a uma ruptura brusca quando se atinge a tensão limite a que o concreto pode suportar. Estes dados podem ser comparados com a resistência à tração direta (apresentada a seguir), feita neste

caso por compressão diametral, evidenciando a deficiência da matriz sem fibras no sentido de absorver tais esforços.

Como forma complementar ao ensaio de flexão a três pontos, também foram ensaiados os prismas em menor escala, com dimensão de 40x40x160 mm, para os traços em CPR, já que para o concreto convencional o tamanho do prisma impossibilita a moldagem dos corpos de prova. A Tabela 36 apresenta os resultados obtidos no ensaio de flexão a três pontos com estes prismas.

Tabela 36 – Resultados do ensaio de tração na flexão a três pontos (prisma 40x40x160mm).

	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B
$f_{ct\ 3\ pts}$ (MPa)	40,6	39,7	31,8
	49,6	39,9	41,0
	39,7	51,0	39,0
Média	43,3	43,5	37,3
Desvio padrão	5,5	6,4	4,8
Coef. de variação	12,6%	14,8%	13,0%
Valor máximo	49,6	51,0	41,0

Os dados evidenciam a existência de uma relação de escala no ensaio de flexão, uma vez que os resultados obtidos com os prismas menores, de 40x40x160 mm, são superiores àqueles obtidos para os prismas de 150x150x500 mm. No entanto, é importante ressaltar que no caso deste ensaio específico, os coeficientes de variação também foram maiores do que aqueles encontrados no ensaio com os prismas maiores, mesmo sendo o arranjo do ensaio idêntico em termos de carregamento.

Isso evidencia o quanto este ensaio é falho quando se utiliza um prisma de dimensões tão discretas, cabendo aqui uma crítica à sua utilização no ensaio de flexão. Alguns trabalhos como o de Christ (2014) e o de Righi (2015) evidenciam esse problema ao apresentarem seus resultados para o referido ensaio.

Nos resultados obtidos, se verifica que o traço CPR 2B, com a incorporação das fibras de polipropileno, apresentou desempenho inferior aos demais traços quando submetido a este esforço. No caso dos traços CPR 1 e CPR 2A, houve uma inversão, com o resultado potencial maior para o CPR 2A em relação ao CPR 1.

Cabe ainda salientar mais um ponto relativo à execução deste ensaio com prismas menores. A medição do deslocamento, feita por um LVDT acoplado ao prato da prensa, conforme já mostrado na Figura 42, não fornece uma medida de deslocamento confiável para análise, visto

que o deslocamento medido não é o do corpo de prova e sim o da prensa, mascarando o resultado. Dessa forma, as curvas força x deflexão deste ensaio não foram tomadas como fonte de dados para o cálculo de outras propriedades do material.

Comparando diretamente os resultados obtidos no ensaio e o consumo de materiais no traço, com aqueles obtidos no trabalho desenvolvido por Christ (2014), que utilizou igualmente prismas de 40x40x160 mm, tem-se o seguinte, conforme a Tabela 37.

Tabela 37 - Comparativo entre os resultados de resistência à tração na flexão a três pontos e o consumo de materiais utilizados no trabalho de Christ (2014)

Traço	Traço CPR 2A	Traço A100 (CHRIST, 2014)	Comparativo	
Resultado potencial aos 28 dias (MPa)	51,0	19,3	↑	+ 31,7 MPa (+164,2%)
Consumo de cimento (kg/m ³)	433,4	251,8	↑	+ 181,6 Kg/m ³ (+72,1%)
Consumo de cinza volante (kg/m ³)	185,8	107,9	↑	+ 77,9 kg/m ³ (+72,2%)
Consumo de sílica ativa (kg/m ³)	142,4	213,9	↓	- 71,5 kg/m ³ (-33,4%)
Consumo de fibra metálica (kg/m ³)	213,0	235,5	↓	- 22,5 kg/m ³ (-9,6%)
Consumo de fibra de PP (kg/m ³)	-	-		-
Traço	Traço CPR 2B	Traço A80 (CHRIST, 2014)	Comparativo	
Resultado potencial aos 28 dias (MPa)	41,0	30,1	↑	+ 10,9 MPa (+36,2%)
Consumo de cimento (kg/m ³)	433,4	251,8	↑	+ 181,6 Kg/m ³ (+72,1%)
Consumo de cinza volante (kg/m ³)	185,8	107,9	↑	+ 77,9 kg/m ³ (+72,2%)
Consumo de sílica ativa (kg/m ³)	142,4	213,9	↓	- 71,5 kg/m ³ (-33,4%)
Consumo de fibra metálica (kg/m ³)	170,4	188,4	↓	- 18,0 kg/m ³ (-9,6%)
Consumo de fibra de PP (kg/m ³)	4,94	5,46	↓	- 0,5 kg/m ³ (-9,5%)

Analisando o desempenho do traço CPR 2A, com incorporação de 30% de cinza volante em substituição à massa de cimento e 3% de fibra metálica em volume (idem (CHRIST, 2014)), nota-se que o resultado potencial obtido no ensaio de flexão foi quase três vezes superior ao obtido no estudo de 2014, tendo consumido 2/3 da quantidade de sílica ativa e com um consumo de fibras metálicas quase 10% menor. Todavia, os consumos de cimento e de cinza volante foram cerca de 70% superiores. Entretanto, o consumo de cimento foi inferior a 450 kg/m³, levando a um CPR bastante econômico, com baixo consumo de materiais nobres (principalmente a sílica ativa) e com desempenho mecânico superior para a resistência à tração na flexão.

Com relação ao traço CPR 2B, com os mesmos teores de cinza volante e de fibras, porém substituindo-se 20% do volume de fibras metálicas por fibras de polipropileno e mantendo os

mesmos 3% no volume total do traço (fibra metálica + fibra de polipropileno), os resultados se mostraram igualmente divergentes. No entanto, a diferença na resistência à tração na flexão caiu para pouco mais de um terço, com os mesmos teores de cimento, cinza volante, sílica ativa e fibras. Mais uma vez, o traço aqui estudado se mostrou mais eficiente do ponto de vista do desempenho no ensaio, com baixo consumo de materiais nobres.

Ambos os resultados mostram a influência da aplicação do método de empacotamento ao se considerar a cinza volante fora do cálculo, alterando drasticamente a distribuição granulométrica e refletindo na densidade final da matriz, que pode contribuir para uma melhor adesão das fibras e, conseqüentemente, melhorando seu desempenho. Contudo, pode-se atribuir os valores menores obtidos no estudo de Christ (2014) pelo fato de ter havido aplicação de pressão confinante nos prismas, gerando alterações indesejadas na orientação das fibras, principalmente nas de polipropileno, em função de suas características físicas, o que pode ter influenciado no seu comportamento quando mobilizadas.

5.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO – 4 PONTOS

Para o ensaio de resistência à tração na flexão a quatro pontos, os quatro traços foram ensaiados aos 28 dias, buscando avaliar o comportamento tanto dos traços em CPR como do concreto convencional, comparando os resultados obtidos com relação à resistência à compressão na mesma idade.

O ensaio a quatro pontos teve por objetivo principal determinar a resistência à tração na flexão do material, uma vez que o ensaio de flexão a 4 pontos, por minimizar o efeito das tensões de contato e expor maior região ao momento fletor máximo, resulta em dados mais confiáveis em relação ao ensaio de flexão a 3 pontos na determinação da resistência à tração na flexão. Além disso, através desse ensaio pode-se determinar a tenacidade do material utilizando a metodologia da norma japonesa JSCE-SF4 (1984).

A Tabela 38 compila os dados de resistência à tração na flexão a quatro pontos obtidos no ensaio. No traço de concreto convencional CC40, o arranjo do ensaio apresentou falha em um dos prismas e o resultado não pôde ser mensurado.

Tabela 38 – Resultados do ensaio de tração na flexão à quatro pontos (prisma 100x100x400mm).

	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B	CC40
f_{ct} 4 pts (MPa)	27,48	20,40	23,16	4,80
	35,76	21,39	22,44	5,10
	30,12	26,91	22,80	-
Média	31,12	22,90	22,80	4,95
Desvio padrão	4,23	3,51	0,36	0,21
Coef. de variação	13,6%	15,3%	1,6%	4,3%
Valor máximo	35,76	26,91	23,16	5,10

A análise dos dados demonstra que o traço CPR 2B, com as fibras de polipropileno, apresentou uma variabilidade bastante baixa nos ensaios, o que pode ser proveniente da atuação das fibras de polipropileno. Contudo, o uso das fibras de polipropileno com o objetivo de absorver as fissuras iniciais e permitir a atuação mais tardia das fibras metálicas, com conseqüente carga de ruptura superior, acabou não se concretizando, uma vez que os valores de resistência à flexão obtidos para o traço CPR 2B encontram-se no mesmo nível daqueles obtidos para o traço CPR 2A. Isso demonstra que as fibras de polipropileno foram suficientes para garantir um nível de resistência à flexão equivalente, mesmo com teor de fibras metálicas 20% inferior.

No caso do concreto convencional, os dois resultados obtidos apresentaram coeficiente de variação abaixo de 5%, atingindo uma resistência máxima de 5,1 MPa.

5.9 TENACIDADE NA FLEXÃO – ENSAIO A TRÊS PONTOS

Para o cálculo da Tenacidade na flexão, obtida a partir do ensaio de flexão a três pontos, foi utilizada a metodologia da norma RILEM TC-162 TDF (2002).

A Figura 60, Figura 61, Figura 62, Figura 63 e a Figura 64, a seguir, trazem os diagramas força x deflexão obtidos para o ensaio de flexão a três pontos.

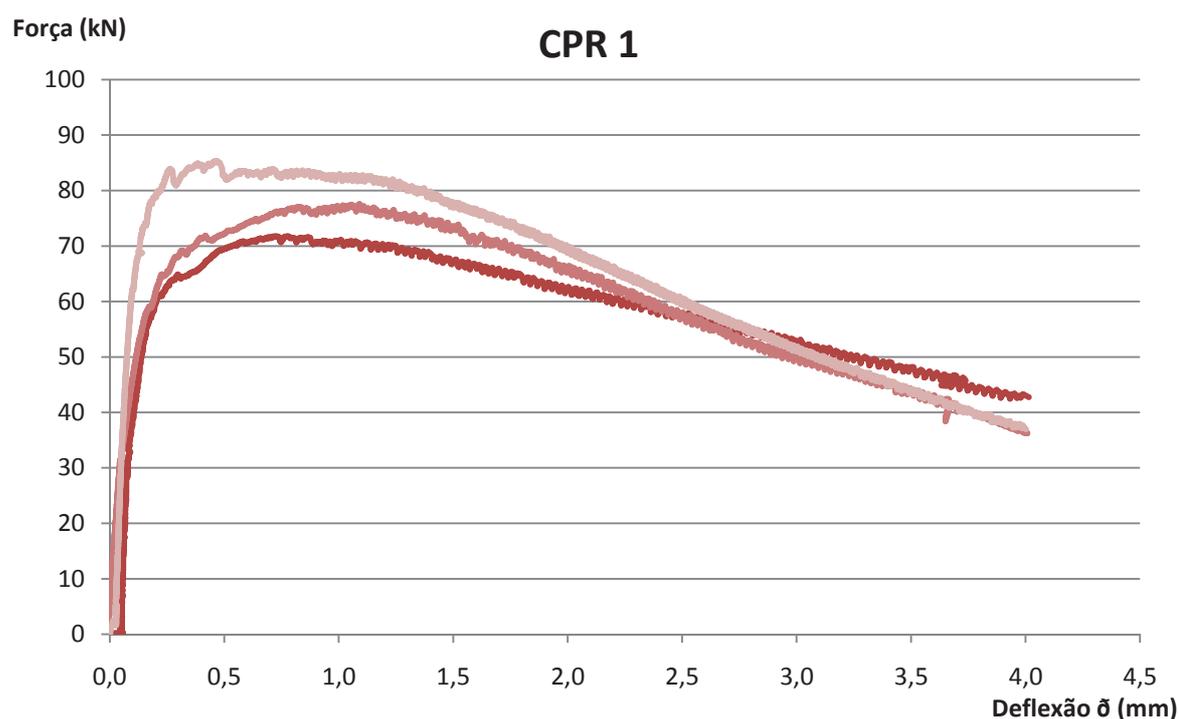


Figura 60 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos do traço CPR 1.

O traço CPR 1 apresentou pico de carga próximo dos 90 kN para um dos corpos de prova, que se sobressaiu em relação aos outros dois. Contudo, o comportamento pós-fissuração é bastante parecido entre os testemunhos, com pouca variação na fase de *strain softening* e atingindo valores muito próximos entre si para valores de deflexão entre 2,5 e 3,0 mm.

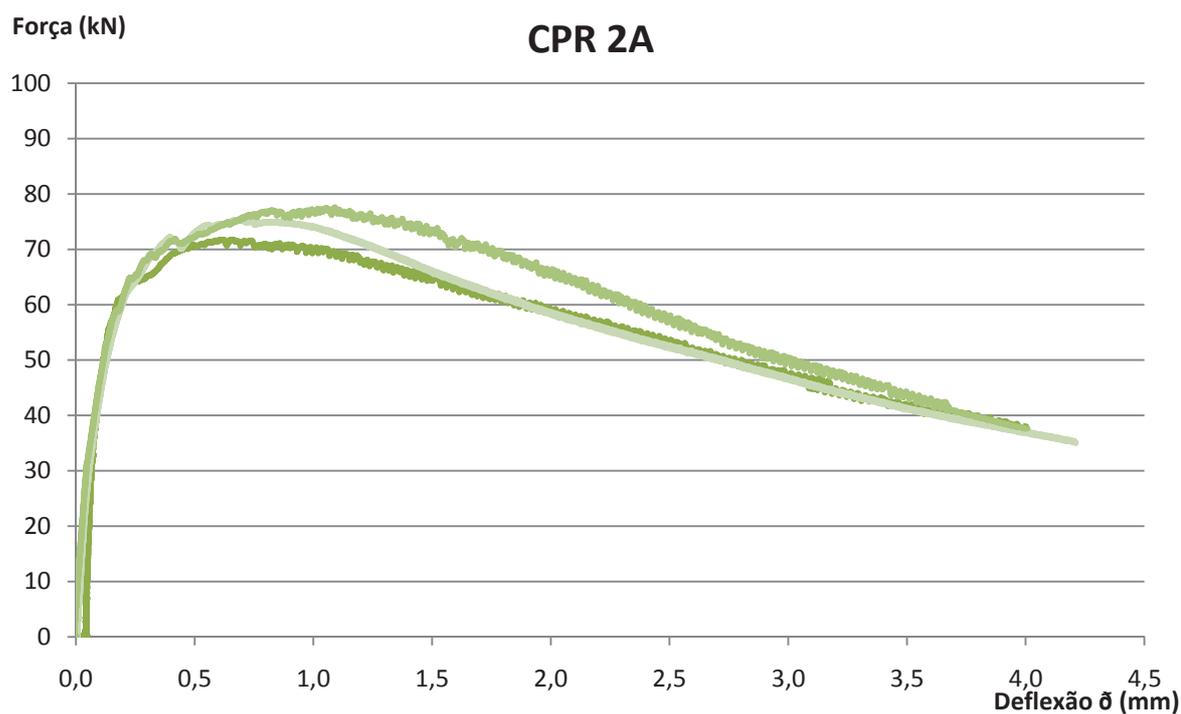


Figura 61 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos do traço CPR 2A.

O traço CPR 2A apresentou pico de carga próximo dos 80 kN, com comportamento diferente do traço CPR 1, apresentando uma fase mais alongada de *strain hardening*. O comportamento pós-fissuração dos testemunhos apresenta pouca variação na fase de *strain softening*.

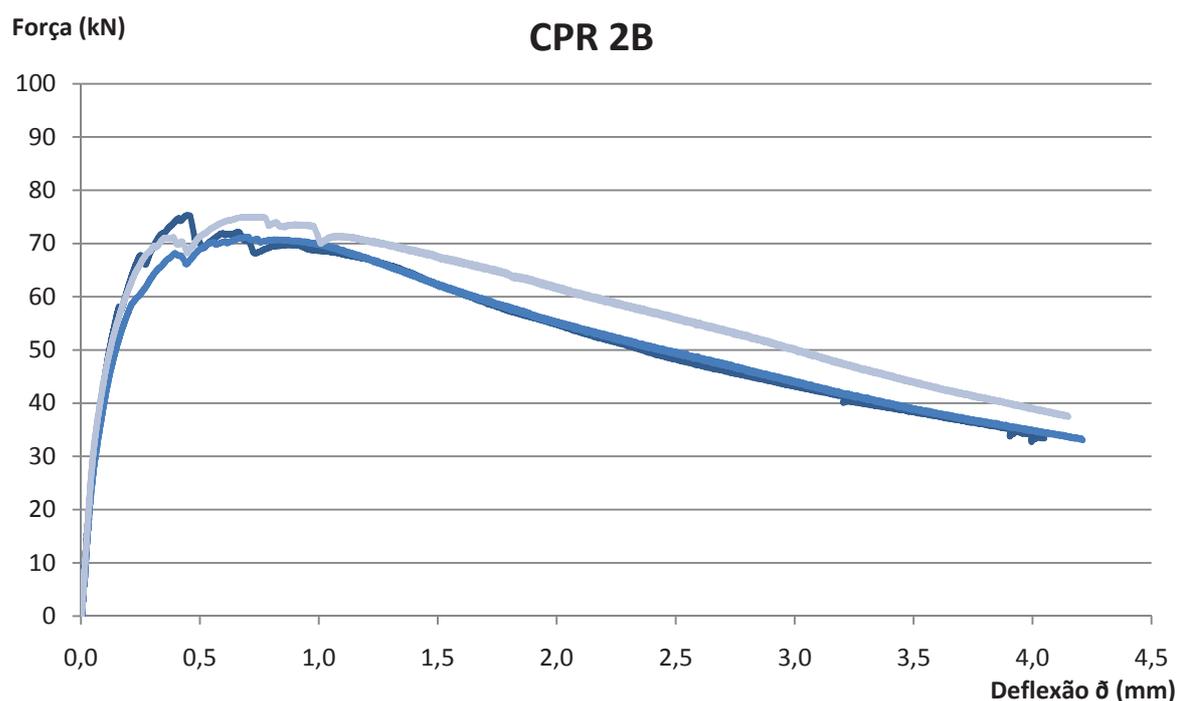


Figura 62 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos do traço CPR 2B.

O traço CPR 2B apresentou pico de carga da ordem de 75kN, ficando abaixo dos traços CPR 1 e CPR 2A, contrariando a expectativa de que a fibra de polipropileno pudesse propiciar um melhor comportamento pós-fissuração, melhorando a absorção de carga por parte da fibra metálica, que seria mobilizada em um segunda momento. A fase de *strain hardening* é bastante reduzida, com comportamento muito próximo entre os testemunhos e com pouca variação na fase de *strain softening*.

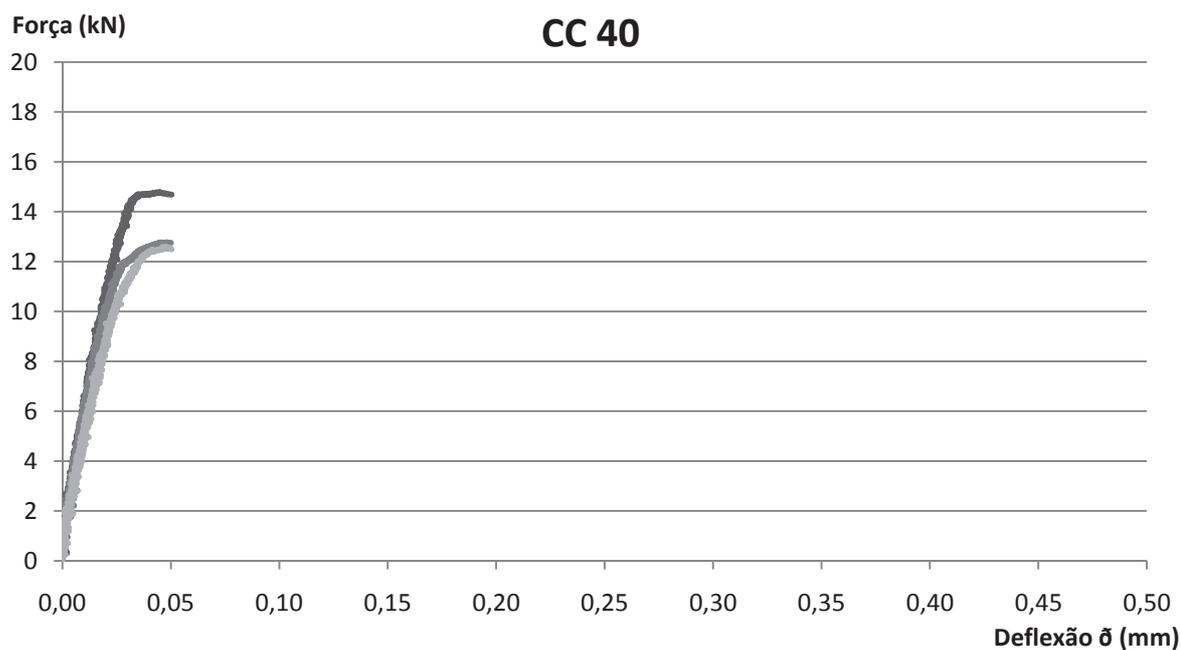


Figura 63 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos do traço CC 40.

O traço de concreto convencional CC 40 apresentou pico de carga da ordem de 15 kN, com rompimento brusco após atingimento da carga limite. Esse comportamento é bastante comum e esperado para o material, uma vez que tem comportamento frágil em razão da ausência de fibras em sua composição.

Como forma de possibilitar a comparação direta do desempenho de cada um dos traços analisados, a Figura 64 compila, em um mesmo gráfico, os valores máximos obtidos no ensaio de flexão a três pontos.

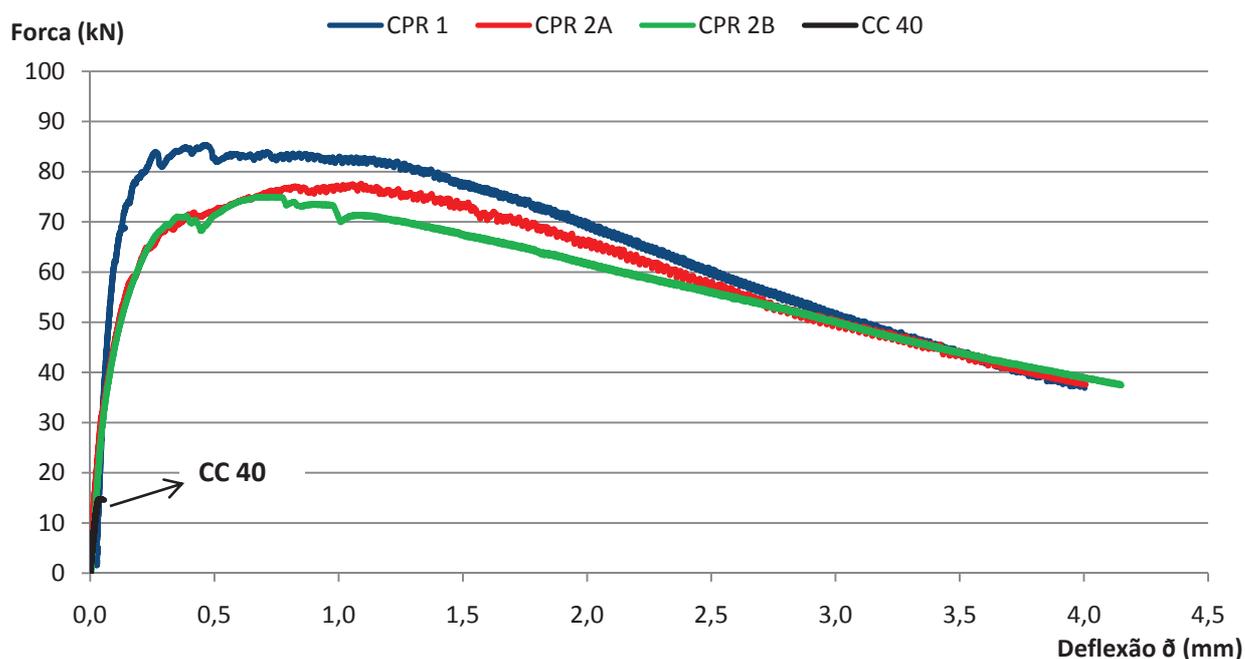


Figura 64 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a três pontos compilando os melhores resultados obtidos para cada um dos traços analisados.

Analisando o gráfico da Figura 64 nota-se que o traço CPR 1 obteve o melhor desempenho dentre todos os traços testados, com melhor comportamento na fase pós-fissuração e atingindo o maior valor de pico de carga. Na fase pós-fissuração, todos os traços de CPR apresentaram comportamento bastante parecido.

É importante salientar que o fato de o traço CPR 1 ter tido o melhor desempenho frente aos demais traços de CPR mostra que, tanto o uso da cinza volante quanto a utilização da fibra de polipropileno hibridizada com a fibra metálica, não propiciaram melhoras no desempenho do material com relação à flexão, requerendo mais estudos que possam comprovar efetivamente a eficiência dessa substituição, além de testar outras fibras, como a de PVA, por exemplo.

Contudo, deve-se levar em conta o desempenho dos traços CPR 2A e CPR 2B com relação às demais propriedades, como a resistência à compressão, por exemplo. Além disso, pesa o fato de que o uso da cinza volante permite se obter um material mais sustentável e com menor custo de fabricação. Levando-se isso em conta, deve ser feita uma análise que possa determinar qual o desempenho mínimo requerido para a flexão se as demais propriedades forem atendidas dentro de parâmetros previamente estabelecidos.

A Tabela 39 compila todos os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão a três pontos, de onde foram extraídos os gráficos que possibilitaram o cálculo das áreas $D_{BZ,2}^f$ e $D_{BZ,3}^f$ e das resistências equivalentes F_{eq} , que representam a tenacidade do material calculada para duas zonas distintas do diagrama força \times deflexão.

É importante ressaltar que em função da metodologia da RILEM TC-162 TDF (2002), não foi possível calcular a tenacidade para o traço de concreto convencional, uma vez que as áreas sob o gráfico encontram-se fora dos limites estabelecidos para o cálculo.

Tabela 39 - Compilação dos resultados do ensaio de tração na flexão a três pontos e comparação com a respectiva resistência à compressão aos 28 dias.

Traço	f_c 28 (MPa)	$f_{ct3\ pts}$ (MPa)	$F_{eq,2}$ (MPa)	$F_{eq,3}$ (MPa)
CPR 1 (MPa)	122,9	22,8	24,2	21,2
	143,5	26,2	25,0	21,8
	139,2	27,3	37,9	25,5
Média	135,2	25,5	29,0	22,8
Desvio padrão	10,8	2,3	7,7	2,3
Coef. de variação	8%	9%	26%	10%
Valor máximo	143,5	27,3	37,9	25,5
CPR 2 A (MPa)	140,7	23,0	24,6	21,1
	144,5	24,8	23,7	21,6
	139,1	24,2	23,8	23,1
Média	141,4	24,0	24,0	21,9
Desvio padrão	2,8	0,9	0,5	1,0
Coef. de variação	2%	4%	2%	5%
Valor máximo	144,5	24,8	24,6	23,1
CPR 2 B (MPa)	134,0	24,1	23,8	19,8
	130,5	22,8	22,3	19,7
	132,2	24,0	23	21,1
Média	132,2	23,6	23,0	20,2
Desvio padrão	1,8	0,7	0,8	0,8
Coef. de variação	1%	3%	3%	4%
Valor máximo	134,0	24,1	23,8	21,1

Analisando os dados da Tabela 39, observa-se que o traço CPR 1 apresentou os maiores valores de tenacidade dentre todos os demais, seguido pelos traços CPR 2A e CPR 2B, que apresentaram melhor aproximação entre $F_{eq,2}$ e $F_{eq,3}$. O traço CPR 1 apresentou coeficiente de variação de 26% para $F_{eq,2}$ em função de haver um corpo de prova com resultados superiores aos outros dois testemunhos, atingindo quase 38 MPa de tenacidade. Para os traços CPR 2A e CPR 2B os coeficientes de variação ficaram abaixo de 5%, mostrando ótima relação entre corpos de prova, com comportamentos mais próximos entre seus pares e, conseqüentemente, melhor aproximação entre si, com tenacidade calculada da ordem de 23 MPa.

5.10 TENACIDADE NA FLEXÃO – ENSAIO A QUATRO PONTOS

Para o cálculo da tenacidade na flexão, obtida a partir do ensaio de flexão a quatro pontos, foi utilizada a metodologia da norma japonesa JSCE-SF4 (1984)

A Figura 65, Figura 66, Figura 67, Figura 68 e a Figura 69, a seguir, trazem os diagramas força x deflexão obtidos para o ensaio de flexão a quatro pontos.

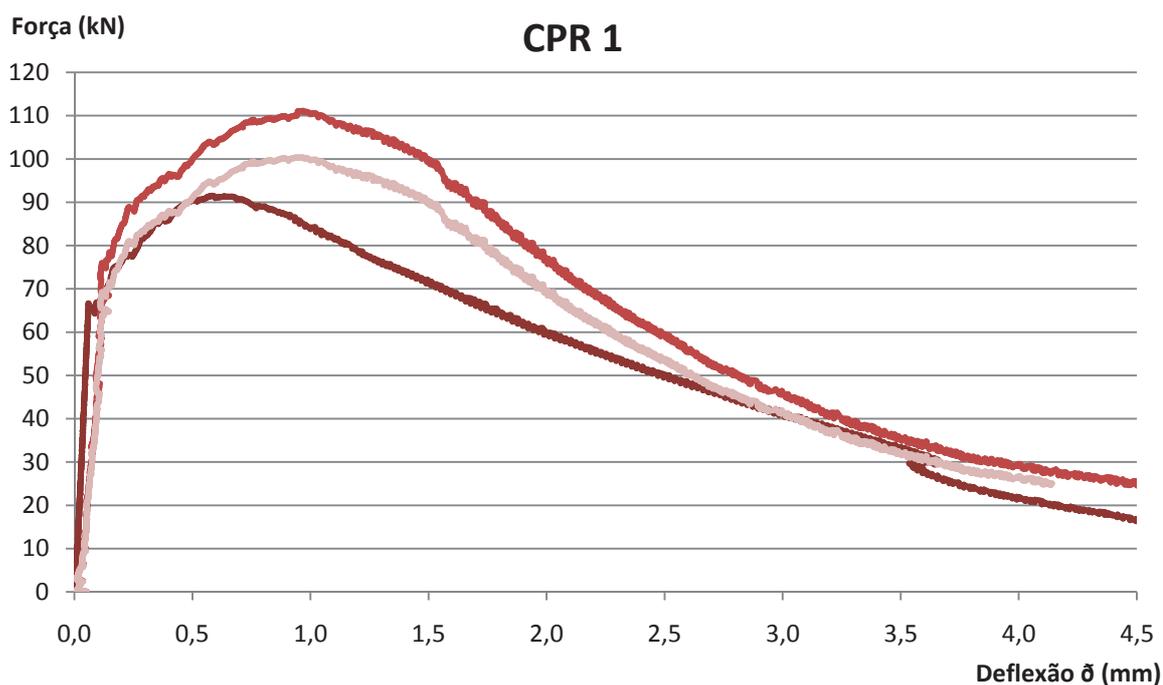


Figura 65 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos do traço CPR 1.

O traço CPR 1 apresentou pico de carga da ordem de 110 kN, porém os três corpos de prova apresentaram comportamentos distintos, com a fase de strain hardening mais alongada para os dois corpos de prova com valor de carga superior.

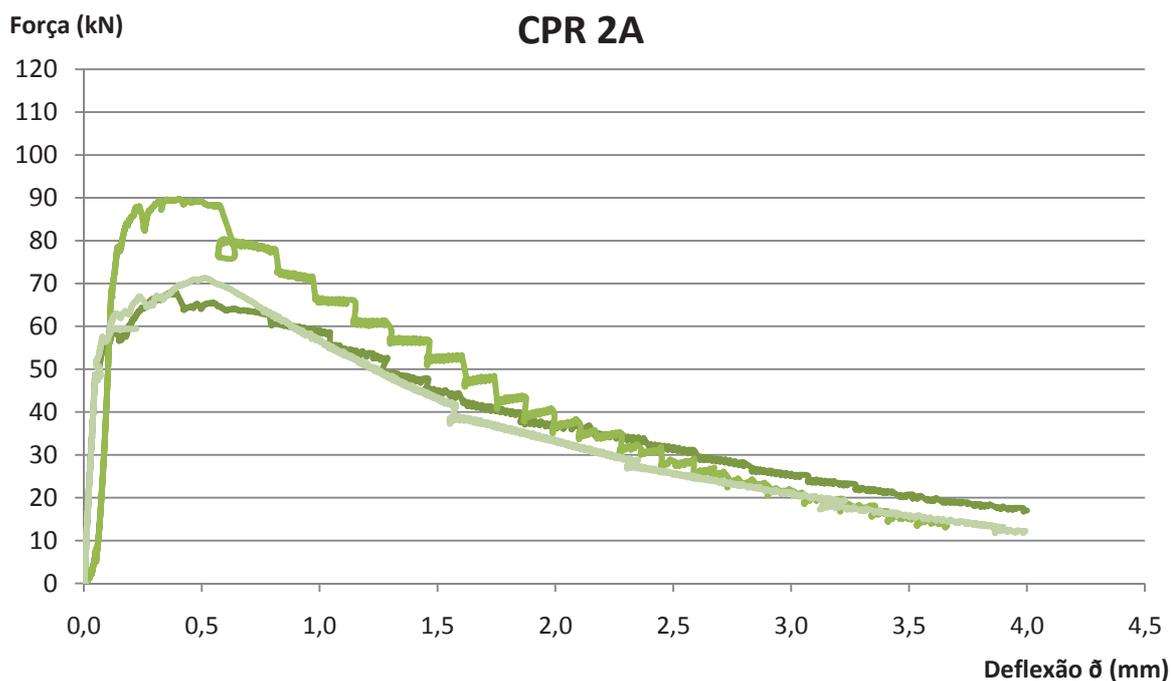


Figura 66 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos do traço CPR 2A.

O traço CPR 2A apresentou pico de carga da ordem de 90 kN para um dos corpos de prova, que se sobressaiu em relação aos outros dois. Contudo, o comportamento pós-fissuração é bastante parecido entre os testemunhos, com pouca variação na fase de strain softening. Contudo, um dos corpos de prova apresentou comportamento bastante instável, com provável deficiência nas leituras obtidas pelos sensores de deslocamento do corpo de prova, que podem ter sido ocasionadas por uma divergência na definição da frequência de leituras dos sensores que foi utilizada na realização do ensaio.

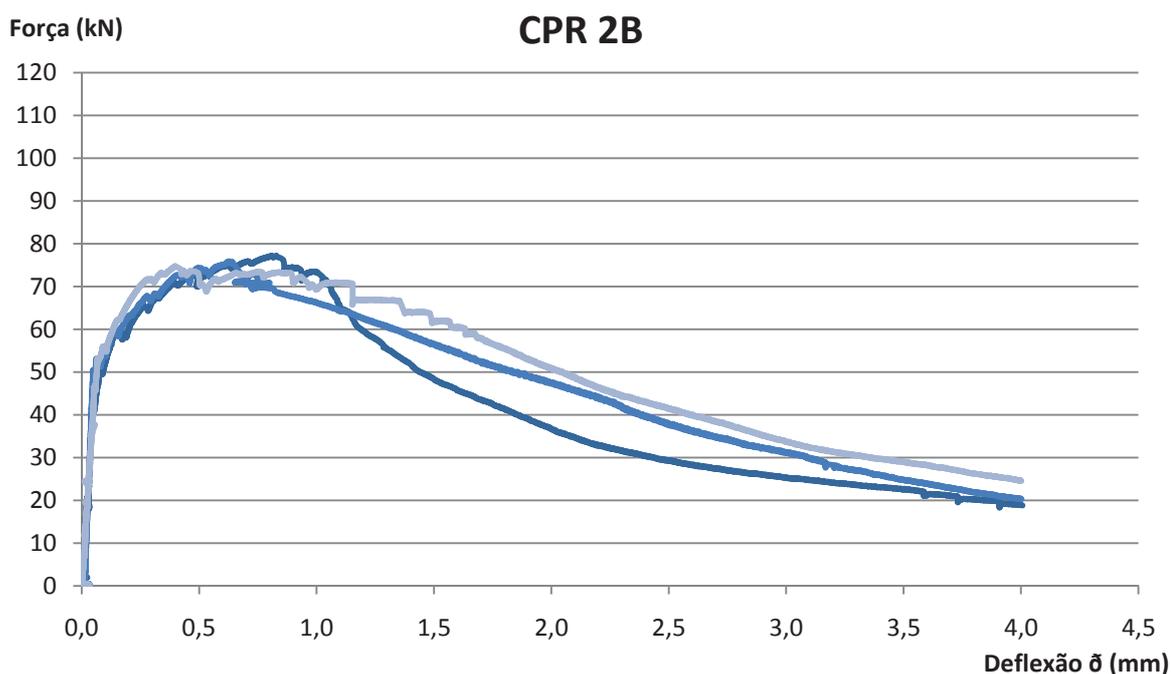


Figura 67 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos do traço CPR 2B.

O traço CPR 2B apresentou pico de carga próximo dos 76 kN, ficando abaixo dos traços CPR 1 e CPR 2A, tal como no ensaio de flexão a três pontos. Nota-se mais uma vez que o uso da fibra de polipropileno não melhorou o comportamento pós-fissuração. A fase de strain hardening é bastante reduzida, havendo perda de desempenho mais rápida que os demais traços na medida em que a deflexão vai aumentando.

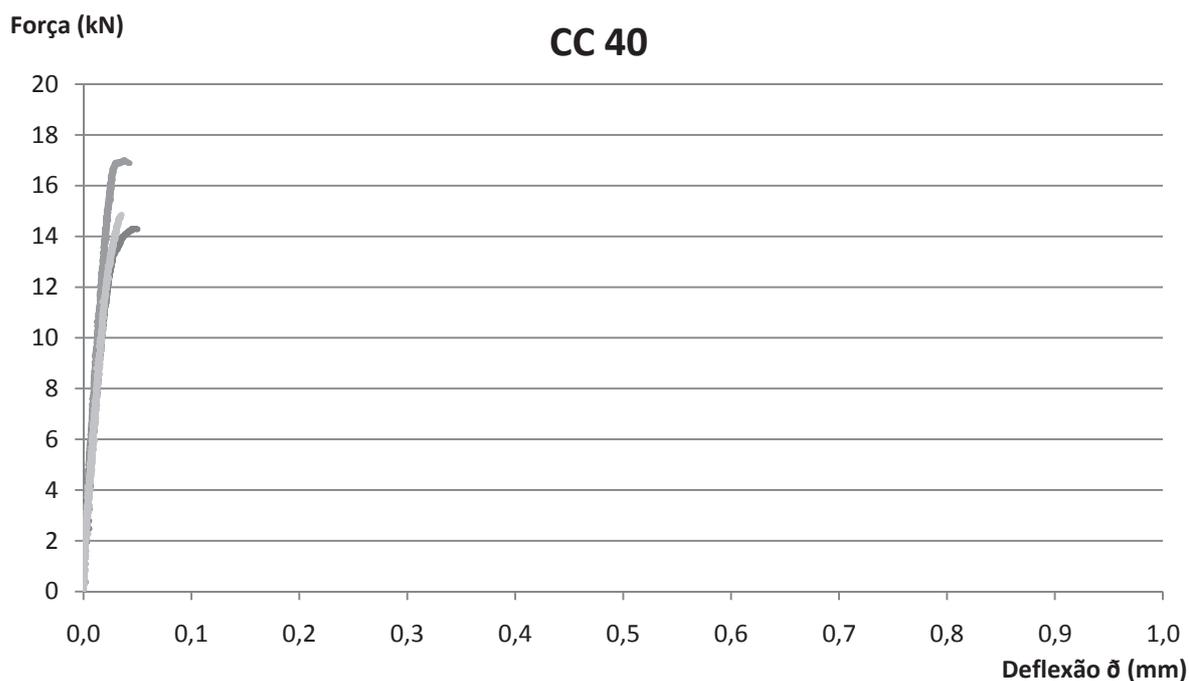


Figura 68 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos do traço CC 40.

O traço de concreto convencional CC 40 apresentou pico de carga da ordem de 17 kN, com rompimento brusco após atingimento da carga limite. Como já dito, esse comportamento é bastante comum e esperado para o material, uma vez que apresenta comportamento frágil em razão da ausência de fibras em sua composição.

Como forma de possibilitar a comparação direta do desempenho de cada um dos traços analisados, a Figura 69 compila, em um mesmo gráfico, os valores máximos obtidos no ensaio de flexão a quatro pontos.

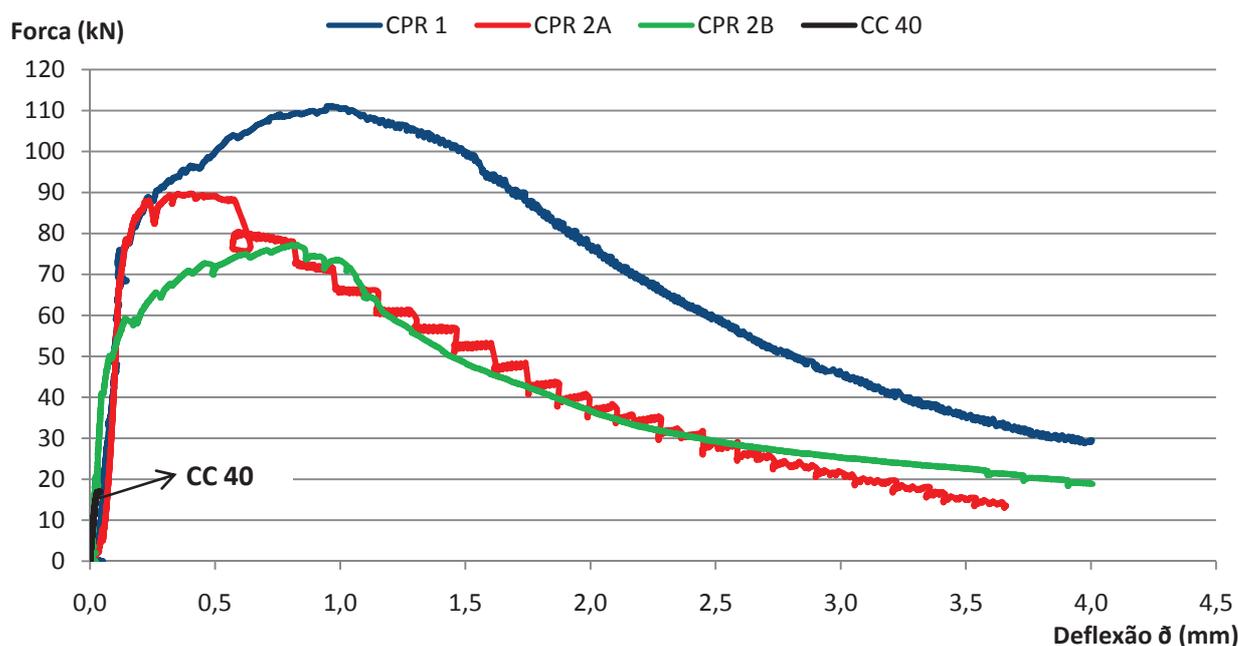


Figura 69 - Diagrama força x deflexão obtido no ensaio de flexão a quatro pontos compilando os melhores resultados obtidos para cada um dos traços analisados.

Analisando o gráfico da Figura 69 nota-se que o traço CPR 1 obteve novamente o melhor desempenho dentre todos os traços testados, atingindo maior valor de pico de carga e com fase de *strain hardening* bem definida, assim como no caso do traço CPR 2B. O traço CPR 2A apresentou comportamento bastante instável, com provável deficiência nas leituras obtidas pelos sensores de deslocamento do corpo de prova, podendo ter sido ocasionadas por divergência na frequência de leituras dos sensores que foi utilizada na realização do ensaio. Na fase pós-fissuração, os traços de CPR apresentaram comportamento bastante distinto e destoante.

Mais uma vez fica evidente que o uso da cinza volante e da fibra de polipropileno não possibilitaram melhora no desempenho à flexão do material, conforme já comentado anteriormente.

A Tabela 40 compila todos os resultados obtidos no ensaio de tração na flexão a quatro pontos, mostrando a área T_b e o fator de tenacidade FT , também conhecido como resistência equivalente à flexão, calculados pela metodologia da norma japonesa JSCE-SF4 (1984) e comparando-os à resistência à compressão obtida.

Tabela 40 - Compilação dos resultados do ensaio de tração na flexão a quatro pontos, mostrando a tenacidade calculada e a comparação com a respectiva resistência à compressão aos 28 dias.

Traço	f_c 28 (MPa)	f_{ct} 4 pts (MPa)	T_b (kN/m m ²)	FT (MPa)
CPR 1	122,9	27,5	131,8	19,8
	143,5	35,8	162,3	24,3
	139,2	30,1	139,6	20,9
Média	135,2	31,1	144,5	21,7
Desvio padrão	10,8	4,2	15,8	2,4
Coef. de variação	8%	14%	11%	11%
Valor máximo	143,5	35,8	162,3	24,3
CPR 2 A	140,7	20,4	97,8	14,7
	144,5	21,4	101,9	15,3
	139,1	26,9	127,1	19,1
Média	141,4	22,9	108,9	16,3
Desvio padrão	2,8	3,5	15,8	2,4
Coef. de variação	2%	15%	15%	15%
Valor máximo	144,5	26,9	127,1	19,1
CPR 2 B	134,0	23,2	118,1	17,7
	130,5	22,4	112,9	16,9
	132,2	22,8	114,3	17,1
Média	132,2	22,8	115,1	17,3
Desvio padrão	1,8	0,4	2,7	0,4
Coef. de variação	1%	2%	2%	2%
Valor máximo	134,0	23,2	118,1	17,7
CC 40	42,5	4,8	0,21	-
	38,8	5,1	0,08	-
	44,7	-	-	-
Média	42,0	5,0	0,14	-
Desvio padrão	3,0	0,2	0,09	-
Coef. de variação	7%	4%	65%	-
Valor máximo	44,7	5,1	0,21	-

Analisando os dados da Tabela 40, observa-se que o traço CPR 1 apresentou a maior tenacidade dentre todos os demais, atingindo um valor máximo de 24,3 MPa, seguido pelos traços CPR 2A e CPR 2B. O traço CPR 1 apresentou coeficiente de variação de 14% em função de haver um corpo de prova com resultados superiores aos outros dois testemunhos.

No caso do traço CPR 2A, em função dos problemas já relatados nas leituras, o coeficiente de variação foi ligeiramente maior, atingindo 15%. O traço CPR 2B apresentou bom comportamento e atingiu tenacidade superior ao traço CPR 2A, indicando que as fibras de polipropileno foram importantes na absorção dos esforços, uma vez que o comportamento pós-fissuração é a base do cálculo dessa propriedade.

No caso do traço de concreto convencional, em função de ser um material frágil, a metodologia da norma não permitiu uma boa aproximação, obtendo-se valores extremamente baixos de tenacidade, bastante próximos de zero, mostrando que metodologia da JSCE-SF4 (1984) parece não ser adequada para o cálculo de concreto sem fibras, já que, como já dito, o comportamento pós-fissuração do material é fundamental na determinação da sua tenacidade.

5.11 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIRETA

No cálculo da resistência à tração direta, a tensão foi calculada individualmente para cada corpo de prova a partir das medidas do ponto onde ocorreu a ruptura. Dessa forma, de posse da área da seção resistente, foi possível calcular a tensão, em MPa, resistida pelo material no ensaio.

A Tabela 41 traz os resultados obtidos no ensaio de tração direta para os traços de CPR, e no ensaio de compressão diametral, para o traço de concreto convencional.

Tabela 41 - Resultados obtidos no ensaio de tração direta e de compressão diametral.

Propriedade	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B	CC40 (compressão diametral)
Resistência à tração direta (MPa)	7,95	7,51	8,06	3,39
	8,22	9,42	7,16	3,88
	11,50	10,13	8,05	3,85
	6,42	7,92	8,09	-
Média	8,72	9,16	7,77	3,86
Desvio padrão	2,57	1,13	0,53	0,02
Coef. de variação	29,54%	12,31%	6,80%	0,61%
Valor máximo	11,50	10,13	8,09	3,88

Analisando os dados da tabela observa-se a grande variabilidade dos resultados obtidos. De fato, o ensaio utilizado para determinação da tração direta apresenta algumas falhas ao se avaliar compósitos com fibras metálicas, uma vez que a seção do corpo de prova onde se dá a concentração de tensões que gerarão a ruptura é muito pequena. Ao se moldar o testemunho, a concentração de fibras naquela seção varia muito de um corpo de prova para o outro e, além disso, a aleatoriedade da distribuição das fibras é afetada pelas dimensões da seção do corpo de prova em relação ao comprimento das fibras metálicas (30 mm de largura no corpo de prova e 13 mm de comprimento da fibra metálica), conduzindo a uma orientação e maior distribuição das fibras no sentido do esforço, levando a uma concentração de fibras que pode

ser muito grande e que acabará gerando dados mascarados. Isso fica evidenciado no caso do traço CPR 2B, onde um menor volume de fibras metálicas no traço conduziu a valores de ensaio de tração direta com menor variabilidade.

Ainda assim, o CPR possui uma resistência à tração direta bastante importante e, apesar da enorme variabilidade dos dados obtidos, os resultados superaram os 10 MPa para os traços CPR 1 e CPR 2A e atingiram valores quase três vezes superiores aos do concreto convencional. Tal característica demonstra que as fibras cumprem um importante papel, no material, proporcionando ganhos de resistência à tração que podem ser considerados no cálculo de uma estrutura a ser construída com o material.

No caso do ensaio de compressão diametral dos corpos de prova de concreto convencional, os resultados obtidos para a tração direta são, em média, da ordem de 9,2% dos resultados obtidos para a resistência média à compressão, o que está dentro do esperado para o material nessa faixa de resistência.

5.12 ANÁLISES COMPLEMENTARES

Os resultados das análises complementares contemplam o ensaio de velocidade de propagação do pulso ultrassônico – VPU, para avaliação da compacidade dos traços ao longo das diferentes idades do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova moldados; e a análise de custos para fabricação de cada um dos traços, bem como a consideração da capacidade portante de um elemento estrutural, efetuando um estudo comparativo dos custos de cada um deles.

5.12.1 Velocidade de propagação de pulso ultrassônico - VPU

A seguir são apresentados os resultados do ensaio de VPU. Cada traço foi separado em um gráfico próprio para melhorar comparar as análises.

A Figura 70 ilustra graficamente os resultados do ensaio de VPU para o traço CPR 1, confrontando a média das leituras de velocidade com a média dos resultados de resistência à compressão para cada uma das idades estipuladas (1, 7, 14, 28 e 63 dias).

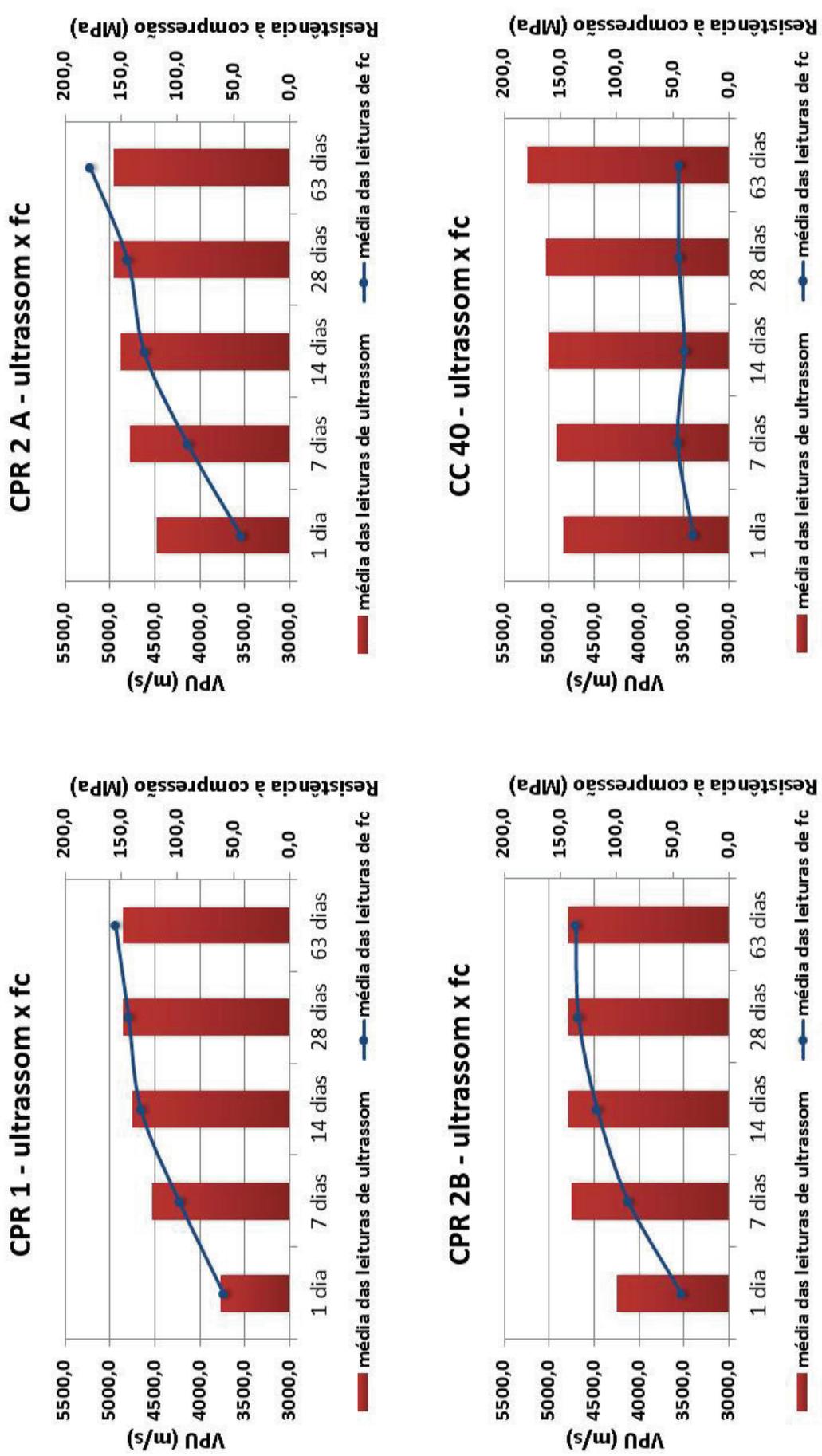


Figura 70 – Resultados da análise de VPU para os quatro traços.

Analisando os resultados apresentados, é possível notar claramente que as velocidades de propagação do pulso ultrassônico vão aumentando com o passar do tempo, à medida que a resistência à compressão do material também vai aumentando, para todos os traços analisados. Além disso, é possível afirmar que existe uma tendência de valor limite para as velocidades, atingido já aos 28 dias, à exceção do traço CC 40, onde a velocidade aos 63 dias ainda foi maior do que as apuradas anteriormente.

Considerando-se os critérios de avaliação da qualidade do concreto baseados na VPU e adotados pela IAEA (já comentados anteriormente), pode-se afirmar, com base nos resultados obtidos nas leituras, que todos os traços apresentaram qualidade boa ou ótima (VPU entre 3500 m/s e 4500 m/s) já considerando a idade de 1 dia para o material e qualidade excelente (VPU > 4500 m/s) a partir dos 7 dias para todos os traços analisados. Esses resultados podem ser interpretados como um bom indicativo de que não houve problemas de moldagem ou adensamento dos corpos de prova. Além disso, o aumento das velocidades de propagação ao longo do tempo também pode ser correlacionado com o refinamento da microestrutura do material, que vai ocorrendo com o crescimento dos cristais na medida em que o tempo vai passando.

Vale ressaltar, no entanto, que as leituras de VPU dos traços de CPR ficaram abaixo das leituras obtidas para o traço CC 40 se for considerada a idade comparativa. Mesmo que a velocidade não tenha relação direta com a resistência à compressão, ou seja, grandes velocidades não representam necessariamente maiores resistências, era de se esperar que o CPR, em função do alto grau de empacotamento e da utilização de materiais pozolânicos, apresentasse maiores velocidades de propagação em função de apresentar uma matriz mais homogênea se comparada ao concreto convencional.

Isso pode ser atribuído ao fato de que os corpos de prova de CPR utilizados nas leituras de VPU, por serem os mesmos utilizados na avaliação da resistência à compressão, possuíam as fibras inclusas na matriz, ou seja, elementos que acabaram induzindo desvios na propagação dos pulsos ultrassônicos e que podem ter contribuído para velocidades de propagação menores do que aquelas que poderiam ser obtidas ao se avaliar apenas a matriz do CPR sem nenhuma fibra e, portanto, sem interferências. Por outro lado, mesmo com a inclusão das fibras, o método de avaliação por ultrassom se mostrou bastante útil no sentido de mostrar a evolução do aumento da densidade do material ao longo do tempo.

Por fim, a Figura 71 ilustra graficamente a evolução das leituras médias (de três corpos de prova) de VPU para os corpos de prova que foram ensaiados à compressão aos 63 dias (os únicos com todas as leituras desde 1 dia até 63 dias), ou seja, mostrando a efetiva evolução do aumento da densidade ao longo do tempo para um mesmo material.

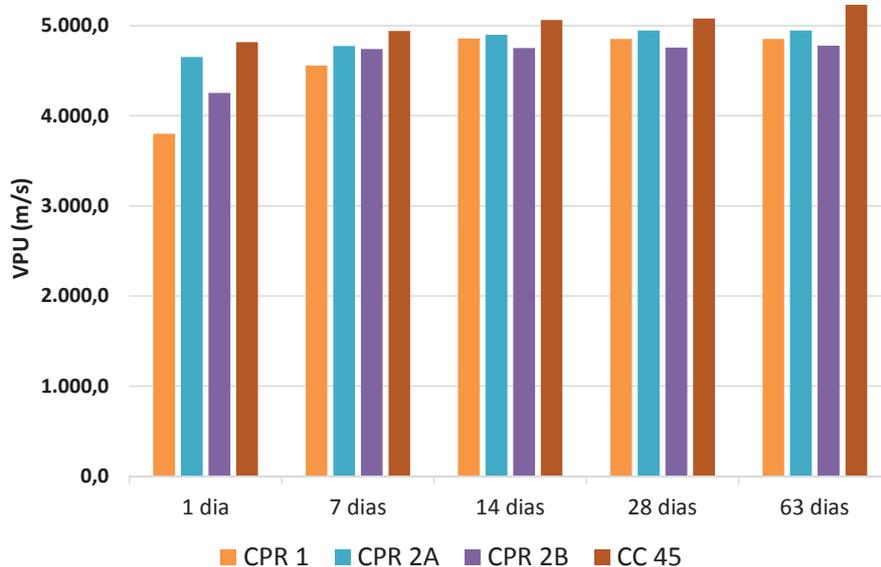


Figura 71 – Resultados médios de VPU para os corpos de prova ensaiados aos 63 dias.

Analisando o gráfico, nota-se claramente que nas primeiras idades, principalmente com 1 dia, as leituras variam bastante entre os traços, uma vez que o material está em fase inicial de formação dos produtos de hidratação. Como o cimento e os demais ligantes utilizados proporcionam rápidos ganhos de resistência inicial, aos 7 dias os traços já apresentam praticamente o comportamento que terão mais tardiamente, sendo que aos 14 dias já atingiram praticamente 100% da compacidade verificada aos 63 dias. Também é interessante verificar que os traços CPR 2A e CPR 2B, mesmo nas idades iniciais e com resistências à compressão inferiores ao traço CPR 1 nestas idades, obtiveram velocidades de propagação do pulso ultrassônico superiores (vide resultados de f_c na Figura 57) a este. Tal fato pode ser explicado pela utilização de cinza volante nestes traços. Mesmo não atingindo maior resistência, a atuação da cinza volante proporcionou uma melhora na compacidade destes traços superior àquela verificada no traço CPR 1.

É importante dizer, no caso da avaliação por ultrassom, que apesar de demonstrar que existe um aumento na compacidade do material na medida em que sua resistência

aumenta, o método não possui grande precisão nesta medida, fornecendo apenas um indicativo que pode ser interpretado como uma medida de qualidade. Parece existir uma limitação do ultrassom em medir o grau de compacidade do material a partir de determinado nível, já que após determinadas idades, os ganhos de resistência são representados por alterações microestruturais que o aparelho não consegue quantificar. Contudo, assim como na maioria dos métodos END, a utilização do ultrassom deverá estar associada a outros métodos que possam complementar as informações e permitir uma melhor interpretação dos resultados.

5.12.2 Análise de custos

A análise de custos foi feita com base em pesquisa de preços no mercado da grande Porto Alegre - RS, base março/2016, e também utilizando os custos dos materiais adquiridos para este estudo, como as fibras metálicas (importadas) e os aditivos (preço do fornecedor).

De posse dos valores levantados para cada um dos materiais constituintes de cada traço, foram calculados os custos por metro cúbico de cada traço. Vale ressaltar que estes custos se referem somente aos materiais e foram calculados com base na proporção unitária de cada traço e sem considerar outros custos, como energia elétrica, mão de obra, equipamentos para mistura, entre outros. Também é importante ressaltar que, em função da eficiência requerida, foram utilizados dois diferentes aditivos superplastificantes, um para os traços de CPR e outro para o traço de concreto convencional.

Os custos levantados para os materiais estão apresentados na Tabela 42.

Tabela 42 – Custos levantados (por kg) dos materiais utilizados no programa experimental.

Materiais	R\$ / kg
Cimento CP-V	0,35
Sílica ativa	1,48
Cinza volante	0,15
Pó de quartzo	1,00
Areia de rio beneficiada	0,09
Areia industrial	0,12
Areia média de rio	0,05

Agregado graúdo – brita	0,10
Aditivo superplastificante – CPR	13,25
Aditivo superplastificante – CC	8,00
Aditivo modif. de viscosidade	2,83
Fibra metálica	6,00
Fibra de PP	8,80

A Tabela 43 apresenta um resumo dos custos calculados por metro cúbico, por material, para os quatro traços estudados.

Tabela 43–Custos por material, em R\$/m³, para cada um dos traços estudados.

 Materiais	 CPR 1 (R\$)	 CPR 2 A (R\$)	 CPR 2 B (R\$)	 CC 40 (R\$)
Cimento CP-V	216,72	151,69	151,69	117,25
Sílica ativa	210,75	210,75	210,75	0,00
Cinza volante	0,00	27,87	27,87	0,00
Pó de quartzo	224,10	224,10	224,10	0,00
Areia de rio beneficiada	43,25	43,25	43,25	0,00
Areia industrial	100,08	100,08	100,08	0,00
Areia média de rio	0,00	0,00	0,00	40,20
Agregado graúdo – brita	0,00	0,00	0,00	113,10
Aditivo superplastificante	251,75	251,75	251,75	8,00
Aditivo modif. de viscosidade	21,51	21,51	21,51	0,00
Fibra metálica	1278,00	1278,00	1022,40	0,00
Fibra de PP	0,00	0,00	48,05	0,00
Total (/m³)	R\$ 2.346,16	R\$ 2.309,00	R\$ 2.101,44	R\$ 278,55

Analisando os dados da tabela, pode-se estabelecer uma relação de custos entre o CPR e o concreto convencional, com valores da ordem de 7,5 a 8,5 vezes maiores. Contudo, é importante observar que a fibra metálica tem um papel importante na composição do custo dos traços de CPR. Essa característica é mais bem visualizada na Figura 72, que apresenta a composição dos custos por m³ baseada em quatro grupos principais, assim divididos:

- Fibras – engloba os custos das fibras metálicas e de polipropileno;
- Aglomerantes – engloba os custos do cimento, da sílica ativa e da cinza volante;
- Agregados – engloba os custos de todas as areias e da brita, incluindo ainda o pó de quartzo;

- Aditivos – engloba os custos com os aditivos superplastificante e modificador de viscosidade;

Essa abordagem permite uma comparação direta entre os traços de CPR e o traço de concreto convencional, mostrando o impacto que cada grupo de materiais tem na composição do custo final por m³ de material. O custo da água de amassamento dos traços foi desprezado.

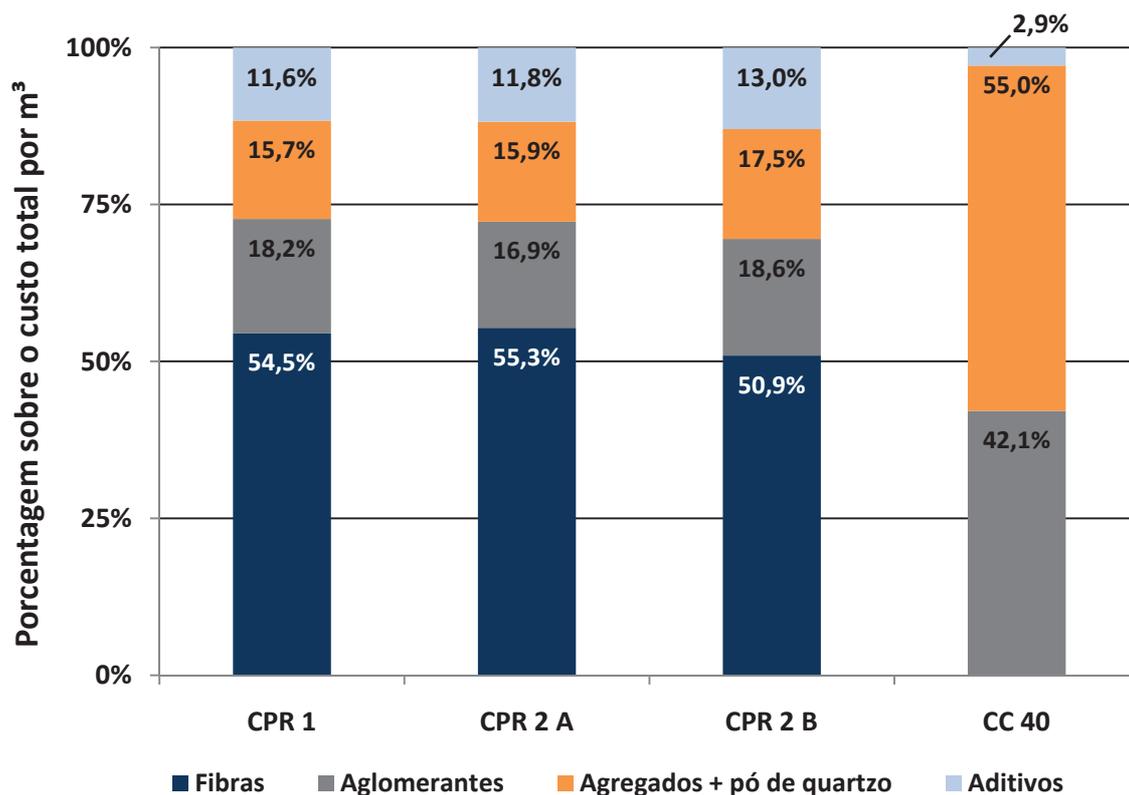


Figura 72– Custo proporcional dos constituintes de cada um dos traços analisados considerando quatro grupos principais de materiais.

Analisando os dados apresentados, e como já dito anteriormente, é evidente o impacto do custo das fibras nos traços de CPR, respondendo por praticamente 55% do custo total para o traços CPR 1 e CPR 2A e quase 51% para o traço CPR 2B, com as duas fibras, sendo que para o traço de concreto convencional são os agregados que respondem pela maior parcela dos custos, com 55% do total. No CPR, apesar do maior consumo de aglomerantes, o impacto destes no custo não chega a atingir 19% do valor total. No caso dos agregados, estes representam menos de 18% do custo do CPR, ao passo que para o concreto convencional o aglomerante responde por mais 42% do custo. Por fim, os

custos com aditivos chegam a responder por até 13% do total no CPR e por menos de 3% para o concreto convencional, sendo que para este último, este custo pode ser ainda suprimido, limitando-se o seu uso, adotando-se aditivos de menor valor ou ajustando o traço de modo que não sejam necessários.

A questão dos custos de produção do CPR reside no fato de que este utiliza materiais mais selecionados do que os comumente utilizados no concreto convencional. Contudo, mesmo se utilizando de materiais mais caros, como a sílica ativa, e maiores teores de aditivos, o que realmente impacta no custo do CPR são as fibras. Eliminá-las é bastante problemático, já que estas desempenham importante papel no material e não podem ser substituídas pelos outros materiais.

Um estudo aprofundado, visando principalmente diminuir o volume de fibras necessário pode ser conduzido, entretanto, diminuir os custos com as fibras, especialmente a metálica, pode ser concretizado a partir do desenvolvimento da cadeia produtiva desse insumo dentro do país. Hoje, em função de o CPR não ser utilizado no mercado nacional, não existe produção dessa fibra no país e os custos de importação acabam impactando demasiadamente no custo real do material. Dessa forma, desenvolvendo a indústria nacional de CPR, pode-se esperar uma redução no preço dos insumos necessários à sua produção.

A Figura 73 ilustra um comparativo dos custos finais, em R\$/m³ e R\$/MPa, para os quatro traços estudados.

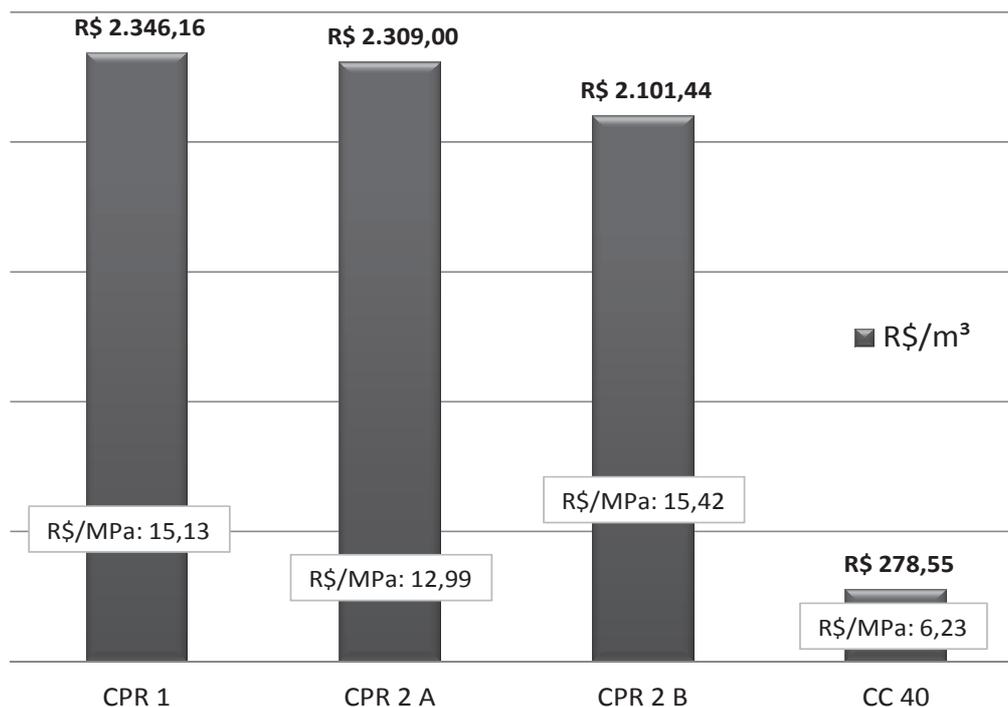


Figura 73 – Comparativo dos custos para fabricação dos quatro traços estudados.

Analisando os custos/m³ dos traços, apresentados no gráfico da Figura 73, nota-se que a diferença de valores entre os traços de CPR é pequena, sendo o traço com fibra de polipropileno (CPR 2B) ligeiramente mais barato que os demais. Contudo, frente ao traço de concreto convencional, os custos para obtenção do CPR são, obviamente, muito maiores, com uma diferença de praticamente R\$ 2.000,00, o que à primeira vista inviabilizaria a sua utilização.

Entretanto, como já apresentado ao longo do trabalho, deve-se levar em conta os custos a longo prazo quando se utiliza o CPR, considerando suas características mecânicas e principalmente as manutenções ao longo da vida útil da estrutura. A capacidade portante do material e suas propriedades diferenciadas frente à flexão e tração direta, por exemplo, permitem a redução das seções das peças estruturais, que podem contribuir para a diminuição dos volumes globais em uma determinada aplicação e, conseqüentemente, os custos para sua aplicação.

Com base nos custos obtidos e considerando-se os parâmetros do trabalho de Dauriac (1997), mostrando um comparativo entre diferentes materiais e suas respectivas seções para uma mesma capacidade resistente de uma viga e, supondo-se um vão de 5,00 m de comprimento para uma dada viga fictícia, ter-se-ia o seguinte, conforme a Tabela 44:

Tabela 44 – Parâmetros considerados para o cálculo de uma viga fictícia.

Parâmetros de dimensionamento	Viga em concreto armado	Viga em CPR	Viga em aço (perfil I)
Taxa de aço considerada (kg/m ³)	100,00	33,00	-
Vão considerado (m)	5,00	5,00	5,00
Peso linear da seção (kg/m) –(Tabela 3, pág. 56)	530,00	130,00	110,00
Altura da seção transversal (m) –(Tabela 3, pág. 56)	0,70	0,36	0,36
Custo do aço (R\$/kg)–(valores de mercado MAIO/16)	2,30	2,30	9,80
Volume calculado para a peça (m ³)	1,70	0,43	-

Para efeitos de cálculo, considerou-se que o CPR permite uma redução na taxa de aço da ordem de 2/3 daquela considerada para o concreto armado, apesar de alguns estudos, como o de Habel (2004), já terem comprovado que essa redução pode ser ainda maior ao se trabalhar a seção especificamente para os esforços a que a peça será submetida e posicionando os reforços de armadura em pontos específicos onde haja concentração destes esforços.

Utilizando-se os valores da Tabela 43 e fazendo um paralelo com o custo de mercado de um perfil metálico, tem-se, a partir do volume calculado, os custos considerados para a referida viga, apresentados na Tabela 45. Novamente foram considerados apenas os custos diretos com os materiais, sem envolver mão de obra, fôrmas, equipamentos, energia elétrica, entre outros.

Tabela 45 - Custos calculados para a viga de 5,00 m de vão para os quatro traços estudados e para o perfil em aço.

	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B	CC 40	Perfil I (aço)
Custo do material empregado	R\$ 1.008,85	R\$ 992,87	R\$ 903,62	R\$ 473,54	-
Custo do aço empregado	R\$ 32,64	R\$ 32,64	R\$ 32,64	R\$ 391,00	-
Custo total para uma viga	R\$ 1.041,49	R\$ 1.025,51	R\$ 936,26	R\$ 864,54	R\$ 5.390,00

Considerando-se os valores apresentados, a partir da capacidade portante de uma peça estrutural, fica mais evidente a importância de se considerar o comportamento mecânico do material, não se atendo apenas à análise dos custos por m³. Ao se considerar as características do material, o CPR acaba tendo um valor mais competitivo frente ao concreto convencional. No caso da viga metálica, confeccionada com o perfil de aço, a diferença acaba sendo bastante considerável.

A Figura 74 ilustra o comparativo entre os custos do material, por m³, e o custo do material para confecção da viga tomada como exemplo, apresentando também o custo da viga metálica para comparação.

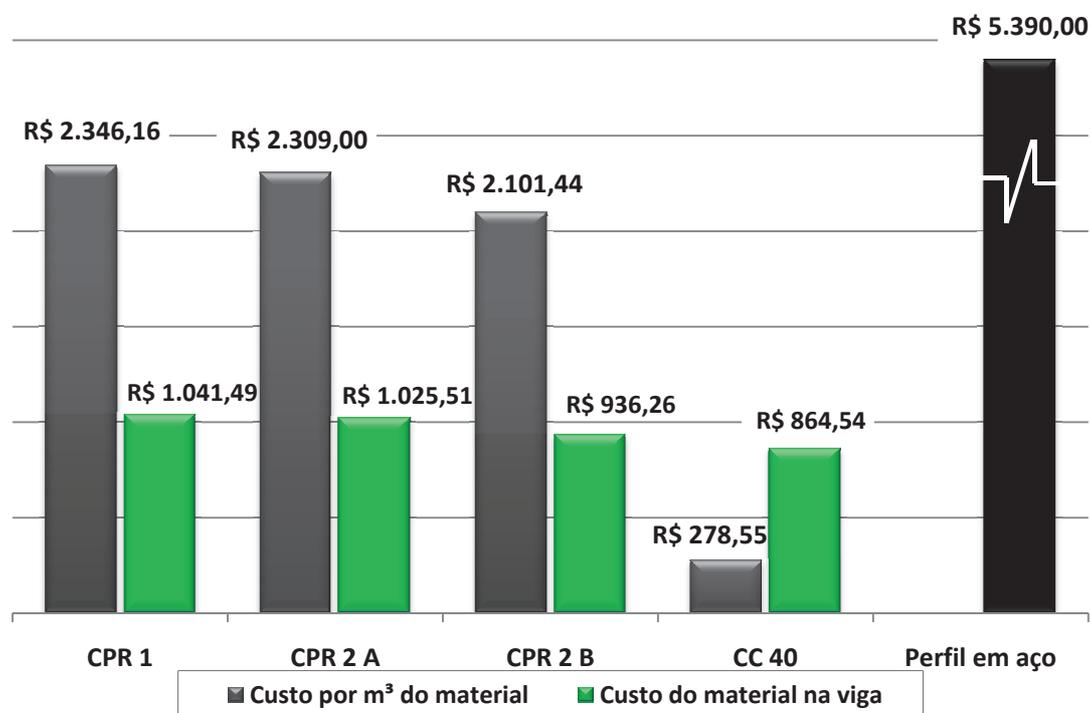


Figura 74 - Comparação entre os custos por m³ do material e os custos do material para confecção da viga.

Ainda assim, é importante ressaltar que a utilização do CPR deve ser pautada com base em critérios técnicos e econômicos que considerem a sua aplicação e o seu desempenho a longo prazo. Se apenas os valores financeiros imediatos para sua aplicação forem considerados (sem levar em conta a durabilidade superior, vida útil, entre outros), dificilmente o CPR será utilizado na construção.

Entretanto, pode-se igualmente fazer uma comparação correlacionando o consumo de aglomerantes frente aos resultados obtidos nos ensaios. Nesse sentido, a Tabela 46 traz um comparativo entre o consumo de cimento e o consumo de sílica ativa para cada um dos traços com relação aos valores máximos obtidos para as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração na flexão e resistência à tração direta/compressão diametral. Deste modo, quanto menor o consumo de material frente à propriedade, melhor a taxa de conversão do traço.

Tabela 46 - Comparativo entre o consumo de cimento e de sílica ativa com relação às propriedades de resistência à compressão, tração na flexão e tração direta/compressão diametral.

Comparativo	Propriedade	CPR 1	CPR 2A	CPR 2B	CC 40
Kg/MPa - cimento	Resistência à compressão	3,99	2,44	3,18	7,49
Kg/MPa - sílica ativa		0,92	0,80	1,04	-
Kg/MPa - cimento	Resistência à tração na flexão	17,32	16,11	18,71	65,69
Kg/MPa - sílica ativa		3,98	5,29	6,15	-
Kg/MPa - cimento	Resistência à tração direta/compressão diametral	53,84	42,78	53,57	86,34
Kg/MPa - sílica ativa		12,38	14,06	17,60	-

Os dados mostram que para todas as propriedades comparadas, o CPR apresenta uma maior taxa de conversão do consumo de cimento em resistência frente ao concreto convencional.

O traço CPR 2A se destaca por uma taxa de conversão do consumo de cimento em resistência à compressão mais de três vezes superior quando comparada ao concreto convencional. Fazendo a comparação apenas entre os traços de CPR, destacam-se os traços com uso de cinza volante (CPR 2A e 2B), que pelo fato de possuírem uma quantidade de cimento 30% menor em massa em relação ao traço CPR 1, acabam se destacando com uma taxa de conversão maior.

Com relação ao consumo de sílica ativa, como todos os traços de CPR possuem o mesmo consumo (142,4 kg/m³), pode-se fazer uma comparação direta entre os mesmos, mostrando que o traço CPR 2A possui a melhor conversão para a resistência à compressão e o traço CPR 1 a melhor conversão para a resistência à tração na flexão.

No caso da resistência à tração direta, os traços CPR 1 e CPR 2B apresentam uma taxa bastante parecida, ficando o traço CPR 1 com valor ligeiramente maior, com destaque para o traço CPR 2A, com taxa 20% superior aos seus pares. No caso do traço de concreto convencional, a taxa de conversão é mais de duas vezes inferior ao do traço CPR 2A.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa se baseou na caracterização mecânica de três diferentes traços em CPR, analisando os seus custos de aplicação e buscando estabelecer um traço com características mecânicas favoráveis à sua aplicação frente ao concreto convencional, objetivando viabilizar a produção e a aplicação desse material na indústria de pré-fabricados nacional.

A partir dos objetivos específicos que foram estabelecidos, pode-se afirmar o seguinte:

Foram estudados três traços distintos de CPR, um traço sem cinza volante e com fibras metálicas (dito CPR convencional) e dois traços com substituição de 30% da massa de cimento por cinza volante e fazendo utilização de dois teores diferentes de fibras, comparando os resultados obtidos para todos os ensaios com um traço de concreto convencional, atingindo-se um consumo de cimento máximo de 619 kg/m³ para o traço CPR 1 (sem cinza volante) e de 433 kg/m³ para os traços CPR 2A e CPR 2B (com cinza volante), reduzindo o impacto ambiental de produção do material ao se reduzir o consumo de cimento e fazer uso de cinza volante;

Para os traços de CPR, foram atingidas resistências à compressão da ordem de 155 MPa para o traço CPR 1 (sem cinza volante e com fibras metálicas), 178 MPa para o traço CPR 2A (com cinza volante e fibras metálicas) e de 136 MPa para o traço CPR 2B (com cinza volante e fibras metálicas e de polipropileno). Neste caso, o traço CPR 2B não atingiu a resistência mínima de 150 MPa que havia sido estabelecida. O uso da cinza volante se mostrou bastante adequado para o CPR ao se avaliar a resistência à compressão obtida nos ensaios;

Para a resistência à tração direta, foram atingidos 12 MPa para o traço CPR 1, 10 MPa para o traço CPR 2A e 8 MPa para o traço CPR 2B. O traço CPR 2B, com incorporação de fibras de polipropileno associadas às fibras metálicas, não atingiu a resistência mínima estabelecida, que foi de 10 MPa;

Com relação à resistência à tração na flexão, considerando os valores médios obtidos no ensaio a quatro pontos, foram atingidas resistências de 31 MPa para o traço CPR 1, e

23 MPa para os traços CPR 2A e CPR 2B. Neste caso, considerando a maior variabilidade dos resultados obtidos neste ensaio, nenhum dos traços atingiu os 35 MPa estabelecidos, apesar de o traço CPR 1 ter atingido um valor máximo próximo de 36 MPa.

Cabe ressaltar que o uso da fibra de polipropileno no traço CPR 2B não permitiu o atingimento de maiores valores de resistência, apresentando, em muitos casos, valores inferiores àqueles obtidos para os demais traços de CPR. Entretanto, apesar de a atuação das fibras de polipropileno não ter se dado como esperado, a redução de 20% no volume de fibras metálicas não gerou nenhuma perda significativa de resistência nas propriedades analisadas, o que acaba também refletindo nos custos. Em comparação ao traço CPR 2A, com a mesma composição e consumo de materiais aglomerantes e agregados miúdos, o uso das fibras de polipropileno no traço CPR 2B gerou diminuição de resistências, mesmo que mínimas, em todos os ensaios realizados. Porém, no caso da tenacidade, que leva em conta o comportamento pós-fissuração do material, o traço com as fibras de polipropileno obteve um valor médio de apenas 1 MPa abaixo do traço CPR 2A para a metodologia da RILEM TC-162 TDF (2002) e de 1 MPa acima para a metodologia da norma japonesa JSCE-SF4 (1984), indicando boa atuação das fibras de polipropileno.

Com relação às demais propriedades mecânicas analisadas, os traços de CPR estudados apresentaram comportamento condizente com aquele já observado em outros trabalhos. Analisando-se o módulo de elasticidade longitudinal, todos os traços atingiram valores superiores aos 46 GPa, estando de acordo com o módulo calculado em diversos outros estudos com o material, com especial destaque para os trabalhos conduzidos por Ma et al. (2004) e por Graybeal (2007), que estabeleceram expressões para o cálculo do módulo de elasticidade longitudinal do CPR. Para o coeficiente de Poisson, o resultado obtido para os três traços foi de 0,19, o que também se encontra dentro da faixa de outros trabalhos (que variam entre 0,16 e 0,21) e em conformidade com o coeficiente de Poisson calculado por Bonneau (1997).

7 CONCLUSÕES

Considerando-se o estudo que foi desenvolvido nesta pesquisa pode-se afirmar que o CPR possui um comportamento mecânico bastante superior ao do concreto convencional. Para todos os traços estudados, em relação ao concreto convencional estabelecido como parâmetro, os resultados obtidos para as principais propriedades mecânicas foram os seguintes:

- resistência à compressão até quatro vezes superior;
- módulo de elasticidade longitudinal 50% superior;
- resistência à tração na flexão até sete vezes superior;
- resistência à tração direta cerca de três vezes superior;

A análise de VPU não se mostrou adequada para se avaliar a compacidade do CPR em relação ao concreto convencional, uma vez que as fibras exerceram influência direta ao induzirem desvios na propagação dos pulsos ultrassônicos, contribuindo para velocidades de propagação menores do que aquelas obtidas para o concreto convencional, o que poderia ser erroneamente interpretado como um resultado inferior. Por outro lado, mesmo com a inclusão das fibras, o método de avaliação por ultrassom se mostrou bastante útil no sentido de mostrar a evolução do aumento da densidade do material ao longo do tempo. O fato de as velocidades de propagação do pulso ultrassônico terem se mantido dentro da faixa “ótimo / bom” já na idade de 1 dia, demonstra que o empacotamento do material possui um ajuste bastante satisfatório.

Com relação aos custos, a análise feita concluiu que, ao se considerar o comportamento mecânico do material, se valendo de suas propriedades superiores em relação ao concreto convencional, e não se atendo apenas à análise dos custos diretos de produção por metro cúbico do CPR, o material apresenta um valor competitivo frente ao concreto convencional.

Apesar de não ter sido feita uma análise de viabilidade econômica, pode-se afirmar que a implantação do uso do CPR no Brasil, dentro da indústria de pré-fabricados nacional, pode e deve ser explorada. O fato de as fibras metálicas, imprescindíveis ao uso do

material, representarem mais de 50% dos custos do material, sinalizam que o ponto de partida inicial deve focar na produção local destas. Ainda assim, políticas públicas de incentivo (zerando imposto de importação, por exemplo) e um maior envolvimento da comunidade científica (pesquisas com o material, trabalhos experimentais de cálculo e ensaios em escala real) que acabem fomentando o uso dessa tecnologia dentro da indústria nacional, são fundamentais. Uma vez que não são necessárias grandes adaptações em maquinários, processos produtivos e fôrmas, e nem mão de obra especializada nas fábricas, o CPR pode despontar como um material a ser explorado, tirando proveito de suas propriedades mecânicas e de suas vantagens frente ao concreto convencional armado ou protendido.

Dentro desse contexto, é fundamental que novos estudos sejam conduzidos e que novas pesquisas na área de cálculo e de projeto possam encorajar a indústria a encarar o CPR como um novo desafio.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de aprofundar os estudos no tema a partir dos resultados aqui obtidos, são dadas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- aprofundar o estudo sobre o papel das fibras de polipropileno no CPR, visto que são poucos os estudos com hibridização de fibras já realizados;
- estudar a utilização de fibras de PVA no CPR, que são muito mais resistentes e apresentam desempenho superior;
- efetuar estudos de dimensionamento teórico de peças estruturais em softwares de análise estrutural, buscando otimizar seções que possam se valer das propriedades mecânicas diferenciadas do material;
- estudar o fenômeno da fluência em peças estruturais fabricadas com CPR;
- buscar a incorporação de materiais alternativos, de menor custo, que possam substituir parte do cimento, utilizando bases não-Portland, por exemplo, e também parte da sílica necessários ao CPR, não se atendo apenas à utilização de cinza volante;

- estudar os efeitos da adição de CH para reagir com a sílica amorfa que está sobrando dentro dos traços, em função dos altos consumos verificados no CPR;
- efetuar estudos sobre emissões de CO₂ e de energia incorporada no material;
- efetuar estudos sobre a retração autógena para o material;

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AARUP, B. **CRC - A Special Fibre Reinforced Reinforced High Performance Concrete**. RILEM Symposium, Advances in Concrete Through Science and Engineering, March 22-24, Evanston, USA, March, 2004.

ADELIN, R.; BEHLOUL, M. High Ductility Beams Without Passive Reinforcement. **In:** International Symposium Of High Strength/High Performance Concrete. 1996. Paris, França. pp. 1330-1390.

AÏTCIN, P. C. **Bétons à Haute Performance**. Eyrolles, 683 pp., Paris, França, 2001.

AÏTCIN, P. C. **The Durability Characteristics of High Performance Concrete: A Review**. Cement and Concrete Composites. v. 25, N. 4-5, p. 409-420, 2003.

ALFORD N. McN.; BIRCHALL J. D. The properties and potential applications of Macro-Defect-Free Cement. **In:** Symposium on very high strength cement-based materials, Ed. by J. F. Young, Materials Research Society symposia proceedings, Vol. 42, Pittsburgh, USA, 1985, pp 265-276.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Committee 544. **Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete** (ACI 544.4R-88). Detroit. 18p. 1988.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – ASCE. **2013 Report Card for America's Infrastructure**. Disponível em: <<http://www.infrastructurereportcard.org/a/#p/bridges/overview>>. Acesso em: 30 ago. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NM 67: Concreto — Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NM 248: Agregados — Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 5738: Argamassa e concreto — Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5739:** Concreto — Ensaio de compressão de corpos cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7680:** Concreto — Extração, preparo e ensaio de testemunhos de concreto. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 8522:** Concreto — Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 9479:** Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 8953:** Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 12142:** Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 7680-1:** Concreto — Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto, Parte 1: Resistência à compressão axial. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PISOS E REVESTIMENTOS DE ALTO DESEMPENHO – ANAPRE. **Boletim Técnico nº 19**. Jul. 2009. Disponível em: <http://www.anapre.org.br/boletim_tecnico/edicao19.asp>. Acesso em: 16 abril 2014.

ASSOCIATION FRANCAISE DE GÉNIE CIVIL - AFGC. **Interim Recommendations for Ultra High Performance Fiber-Reinforced Concrete**. Paris, France: AFGC. 2002.

AYDIN, S.; YAZICI, H.; YARDIMCI, M. Y.; YIGITER, H. **Effect of Aggregate Type on Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete**. ACI Materials Journal, Vol. 107, pp. 441-449, sep. 2010.

BASTOS, P. S. S. **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1999.

BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. **Precast Prestressed Pedestrian Bridge - World's First Reactive Powder Concrete Structure**. PCI Journal. USA, p. 60-71, May/June. 1999.

BONNEAU, O.; VERNETB, C.; MORANVILLEA, M.; AITCIN, P. C. **Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete.** Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1861-1867, 2000.

BOSHOFF, W.P.; ZIJL, G. P. A. G. **Time-dependent response of ECC: characterization and modeling of creep and creep fracture.** In: International RILEM Workshop on HPCRCC in Structural Applications, Honolulu 23-26 may 2005. USA: RILEM Publications, PRO 49, 125-134.

BRUNAUER S.; SKALNY J.; ODLER I.; YUDENFREUND M. **Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity, VII. Further Remarks about Early Hydration.** Composition and Surface Area of Tobermorite Gel. Summary, Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 3, 1973, pp 279-293.

BRUNAUER S.; YUDENFREUND, M.; ODLER I.; SKALNY J. **Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity, VI. Mechanism of the Hydration Process.** Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 2, 1973, pp 129-147.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. **Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil.** Revista Cerâmica 55, 2009, p. 18-32.

CHEN, D. S. M.; EL-HACHA, R. **Flexural behaviour of hybrid FRP-UHPC girders under static loading.** Proceedings of 8th International Conference on Short and Medium Span Bridge. Niagara Falls, Canada, 2010.

CHEYREZY, M.; MARET, V.; FROUIN, L. Microstructural analysis of RPC (Reactive Powder Concrete). **Cement and Concrete Research**, out. 1995. v. 25, n. 7, p. 1491–1500. . Acesso em: 7 ago. 2013.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de Pós-Reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade do Vale do Rio dos Sinos –, São Leopoldo, 2014.

CHRIST, R.; TUTIKIAN, B. F. Desenvolvimento do concreto de pós reativos – CPR. In: 5º SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE CONCRETOS ESPECIAIS, 2012, Fortaleza. **Anais... SINCO**, 2012.

COLLEPARDI, S.; COPPOLA, L.; TROLI, R.; ZAFFARONI, P. **Influence of the Superplasticizer type on the Compressive Strength of Reactive Powder Concrete for Precast Structures.** Italia: EnCo, ca.1995.

DAMTOFT, J. S.; LUKASIK, J.; HERFORT, D.; SORRENTINO, D.; GARTNER, E. M. **Sustainable development and climate change initiatives.** Cement and Concrete Research, Vol. 38, 2008, pp 115-127.

DAURIAC, C. **Special Concrete May Give Steel Stiff Competition.** Seattle Daily Journal of Commerce.USA May. 1997.

DE LARRARD F.; SEDRAN T. **Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the Use of a Packing Model**. Cement and Concrete Research, Vol. 24, No. 6, June, 1994, pp 997-1009.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: **DIN ISO 14040**— Environmental Management Systems—General Guidelines on Principles, Systems and Support Techniques, ISO 14040, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006.

DINGER, D. R.; FUNK, J. E. **Particle packing, part I – fundamentals of particle packing monodisperse spheres**. Interceram., 41, ,1992, p. 10-14.

FÁVERO, R. B.; TUTIKIAN, B. F. **Contribuição para o estudo de Concreto de Pós Reativos com aplicação de diferentes níveis de pressão confinante no estado fresco**. Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho. Portugal, v. 45, p. 37-49, jan. 2013.

FÁVERO, R. B.; REGINATO, L. A.; CHIES, J. A.; SIMONETTI, C.; SILVA FILHO, L. C. P. Análise do Comportamento Mecânico do Concreto de Pós Reativos Utilizando Fibras Metálicas Provenientes de Pneus Inservíveis. In:55° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2013, Gramado. **Anais...** CBC55, 2013.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I-Girders**. Publication no.FHWA-HRT-06-115. McLean, VA: FHWA. 2006.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION - FHWA. **Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community**. Publication no. FHWA-HRT-13-060. McLean, VA: FHWA. 2013.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. In: Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Construção Civil. EPUSP. São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. 1ed. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 2, p. 1195-1225.

FIGUEIREDO, A. D. **Parâmetros de Controle e Dosagem do Concreto Projetado com Fibras de Aço**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 342 p. São Paulo, 1997.

GRASS, L.; SEIDLER, N. Avaliação da resistência à compressão de concretos dosados com pós-reativos. In: 52° CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2010, Fortaleza. **Anais...** IBRACON, 2010.

GRAYBEAL, B. **Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete**. Federal Highway Administration, Report No.FHWA-HRT-06-103, August 2006, 186 pp.

GRUNEWALD, S. *Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete*. Delft: Delft University of Technology, The Netherlands, 2004. Doctoral Thesis.

HABEL, K. **Structural Behaviour Of Elements Combining Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concretes (UHPFRC) And Reinforced Concrete**. 2004. 222 f. Faculté Environnement Naturel, Architectural Et Construit - Institut de Structures: École Polytechnique Fédérale De Lausanne. Lausanne, Suíça.

HABEL, K.; VIVIANI, M.; DENARIÉ, E.; BRÜHWILER, E. **Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)**. Cement and Concrete Research, No. 36, 2006, pp 1362-1370.

HARTMANN, J. L.; GRAYBEAL, B. A. **Testing of Ultra-High Performance Concrete Girders**. PCI Journal, V. 47, No. 1 (January–February): pp. 148–149. 2002.

HASSAN, A.M.T.; JONES, S. W.; MAHMUD, G. H. **Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)**. Construction and Building Materials, No. 37, 2012, pp. 874-882.

HENCHE, D.; MAZER, W. **Efeito da distribuição granulométrica sobre o empacotamento de partículas e sob a trabalhabilidade do concreto de pós-reativos**. In: 52º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. CD-ROM, Fortaleza, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 6241: Performance standards in building— Principles for their preparation and factors to be considered**. 1984 (revista e aprovada em 2010).

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS - JSCE. **Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Structures**. (draft), JSCE Guideline for Concrete No. 9. Tokyo, Japan: JSCE. 2006.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS – JSCE. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE. Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete. N° 3 June 1984. p.58-61.

JUNGWIRTH, J. **Under Spanned Bridge Structures in Reactive Powder Concrete**. Swiss Federal Institute of Technology. Suíça, p. 1-6, ca.2003.

KENDALL K., HOWARD A. J., BIRCHALL J. D. **The relation between porosity, microstructure and strength, and the approach to advanced cement-based materials**. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A 310, London, England, 1983, pp 139-153.

KWAN, A. K. H.; LI, L. G.; FUNG, W. W. S. **Wet packing of blended fine and coarse aggregate**. Materials and Structures. RILEM. No 45, 2012, pp. 817-828.

LASTRES, H. M. M.; LEMOS, C. R., **Novos materiais: desafio e oportunidade. Parte 3 quartzo e silício.** Rio de Janeiro: INT, 1992.

LI, V. C. **On Engineered Cementitious Composites (ECC) – A Review of the Material and Its Applications.** Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 3, Nov, 2003, pp 215-230.

LONG, G.; WANG, X.; YOUJUN, X. **Very-high-performance concrete with ultrafine powders.** Cement and Concrete Research. Vol. 32, pp. 601-605. 2001.

LORENZI, A. **Aplicação de redes neurais artificiais para estimativa da resistência à compressão do concreto a partir da velocidade de propagação do pulso ultrassônico.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MA, J.; DEHN, F.; TUE, N. V.; ORGASS, M.; SCHMIDT, D. Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates. **In:** Proceedings of the International Symposium on Ultra-High Performance Concrete. Germany, 2004, pp. 205-212.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.**São Paulo: IBRACON, 2014.

MINDESS, S. Fibre reinforced concrete: challenges and prospects. **In:** Second University-Industry Workshop on Fiber Reinforced Concrete and Other Advanced Materials. Toronto, Canada, 1995. Proceedings. p.1-12.

MORI, V.; SANTOS, R. L. C.; SOBRAL, L. G. S. **Metalurgia do silício: processos de obtenção e impactos ambientais.** – Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007:it. 42p. (Série Tecnologia Ambiental, 41).

NAAMAN A. E. Toughness, ductility, surface energy and deflection-hardening FRC composites. **In:** Proceedings of the JCI international Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation (DFRCC-02), Takayama, Japan, October, 2002, pp 33-57.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 1982.

ODLER I., HAGYMASSY J., BODOR E. E., YUDENFREUND M., BRUNAUER S. **Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity, IV. Surface Area and Pore Structure.** Cement and Concrete Research, Vol. 2, No. 5, 1972, pp. 577-589.

ODLER I., YUDENFREUND M., SKALNY J., BRUNAUER S. **Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity, III. Degree of Hydration. Expansion of Paste, Total Porosity.** Cement and Concrete Research, Vol. 2, No. 4, 1972, pp 463-480.

ORTEGA, F. S.; Pileggi, R. G.; SEPÚLVEDA, P.; PANDOLFELLI, V. C. **Influência dos Modelos de Alfred e de Andreasen Sobre a Microestrutura e Densidade a**

Verde de Compactos Cerâmicos Obtidos por Colagem ou Prensagem. Revista Cerâmica 43, 1997, p. 283-284.

OZYILDIRIM, C. **Evaluation of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete.** Contract report n.73677, Virginia Center for Transportation/Innovation and Research, August, 2011.

QUININO, U. C. M.; RODRIGUES, R. A.; BITTENCOURT, E.; SILVA FILHO, L. C. P. Investigação Experimental De Parâmetros Fractomecânicos Em Concreto Simples - Modo I. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2009, Bento Gonçalves. **Anais...** CBC49, 2009.

RACKY, P. **Cost-Effectiveness and Sustainability of UHPC.** Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Ed., Schmidt, M., Fehling, E., and Geisenhanslüke, C., Kassel University Press, Kassel, Germany, 2004, pp. 797–805.

RAPAPORT, J.; ALDEA, C. M.; SHAH, S. P.; ANKENMAN, B.; KARR, A. F. **Permeability of Cracked Steel Fiber-Reinforced Concrete.** Technical report no. 115. Research Triangle Park, NC: National Institute of Statistical Sciences. 2002.

REGINATO, L. A.; FÁVERO, R. B.; CHRIST, R.; TUTIKIAN, B. F.; SILVA FILHO, L. C. P. Dosagem de concreto de pós reativos: avaliação da influência do coeficiente de distribuição q no modelo de empacotamento de partículas proposto por Alfred. In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 2013, Gramado. **Anais...** CBC55, 2013.

RICHARD, P. Reactive Powder Concrete: A new ultra-high-strength cementitious material. In: International Symposium Of High Strength/High Performance Concrete. 1996. Paris, França. pp. 1343-1349.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. **Composition of Reactive Powder Concretes.** Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511, 1995.

RIGHI, D. P. **Caracterização do Comportamento de Compósitos Cimentícios de Elevada Capacidade de Deformação com a Utilização de Fibras de Polipropileno e Cinza de Casca de Arroz.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

RILEM TC 162 – TDF: **Test and design methods for steel fibre reinforced concrete – Bending Test** (final recommendation). Materials and Structures, Vol. 35, nov., 2002, pp 579-582.

ROSSI, P. **High Performance Multimodal Fiber Reinforced Cement Composites (HPMFRCC): The LCPC Experience,** ACI Materials Journal, Vol. 94, No. 6, November - December, 1997, pp 478-483.

ROSSI, P. Development of new cement composite material for construction, *Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*. **In:** Proceedings of the International Conference, University of Dundee, Ed. by R. K. Dhir, P. C. Hewlett and L. J. Csetenyi, Dundee, Scotland, September, 2002, pp 17-29.

ROUX N., ANDRADE C., SANJUAN M. A. **Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes**. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 8, No. 1, February, 1996., pp1-6.

ROY D. M., GOUDA G. R., BOBROWSKY A. **Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques**. *Cement and Concrete Research*, Vol. 2, No. 3, 1972, pp 349-366.

SANTOS, M. F. **Contribuição ao estudo do efeito de combinação de veículos de carga sobre pontes rodoviárias de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.152 p.

SCHMIDT, M.; JEREBIC D. UHPC: Basis for Sustainable Structures—The Gaertnerplatz Bridge in Kassel. **In:** Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Ed., Fehling, E., Schmidt, M., and Stürwald. S., Kassel University Press, Kassel, Germany, 2008, pp. 619–625.

SEDRAN, T.; DURAND, C.; DE LARRARD, F. An Example of UHPFRC Recycling. **In:** Proceedings of the International Workshop on Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete – Designing and Building with UHPFRC: State of the Art Development, 17–19 November 2009, Marseille, France.

SILVA FILHO, L. C. P.; GARCEZ, M. R. Compósitos de Engenharia de Matriz Polimérica. **In:** Geraldo Cechella Isaia. (Org.). *Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais*. 1ed. São Paulo: Ipsis Gráfica e Editora, 2007, v. 2, p. 1423-1464.

SILVA, N. I. W.; CALARGE, L. M.; CHIES, F.; MALLMAN, J. E.; ZWONOK, O. **Caracterização de cinzas volantes para aproveitamento cerâmico**. *Cerâmica*, Vol. 45, No 296, nov/dez., 1999.

SINGH, S.; SHUKLA, A.; BROWN, R. **Pullout behaviour of polypropylene fibers from cementitious matrix**. *Cement and Concrete Research*, No. 34, 2004, 1919-1925.

STEINBERG, E.; LUBBERS, A. Bond of Prestressing Strands in UHPC. **In:** Proceedings of International Symposium on High Performance Concrete, Orlando, Florida, Oct. 2003

STENGEL, T. Sustainability Aspects of Traffic Bridges Made From UHPFRC—State-of-the-Art and Challenges for Concrete Technology. **In:** Proceedings of the International Workshop on Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete – Designing and Building with UHPFRC: State of the Art Development, 17–19 November 2009, Marseille, France, AFGC/fib, Paper 6.2.4.

STENGEL, T.; SCHIEßL, P. **Sustainable Concrete With UHPC—From Life Cycle Inventory Data Collection to Environmental Impact Assessment**. Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Ed., Fehling, E., Schmidt, M., and Stürwald, S., Kassel University Press, Kassel, Germany, 2008, pp. 461–468.

STIEL, T.; KARIHALOO, B.; FEHLING, E. Effect of Casting Direction on the Mechanical Properties of CARDIFRC. **In:** Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance of High Performance Concrete, Kassel, Germany, Sep, pp. 481–493. 2004.

TRAN, T. K.; KIM, D. J. **Investigating direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites at high strain rates**. Cement and Concrete Research, No. 50, 2013, pp 62-73.

TUTIKIAN, B. F.; ISAIA, G. C.; HELENE, P. **Concreto de alto e ultra-alto desempenho**. In: Concreto: Ciência e Tecnologia. Capítulo 36. São Paulo: IBRACON, 2011

VAN MIER, J. G. M.; VAN VLIET, M. R. A. **Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art**. Engineering Fracture Mechanics, No. 69, 2002, pp. 235-247.

VANDERLEI, R. D. **Análise Experimental do Concreto de Pós Reativos: Dosagem e Propriedades Mecânicas**. São Carlos: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas).

VANDERLEI, R. D.; GIONGO, J. S. **Análise Experimental do Concreto de Pós Reativos: Dosagem e Propriedades Mecânicas**. Caderno de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade de São Carlos, USP, São Paulo, v. 8, n. 33, p. 115-148, 2006.

VICENZINO, E.; CULHAM, G.; PERRY, V. H.; ZAKARIASEN, D.; CHOW, T. S. **First Use of UHPFRC in Thin Precast Concrete Roof Shell for Canadian LRT Station**. PCI Journal, sept./oct. 2005.

VOO, Y. L.; NEMATOLLAHI, B.; SAID, A. B. B. M.; GOPAL, B. A.; YEE, T. S. **Application Of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete – The Malaysia Perspective**. International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology. Vol 3, Issue 1, 2012.

WILLE, K.; EL-TAWIL, S.; NAAMAN, A. E. **Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under direct tensile loading**. Cement and Concrete Composites, No. 48, 2014, pp. 53-66.

YAZICI, H.; YARDMICI, M. Y.; AYDIN, S.; KARABULUT, A. S. **Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Containing Mineral Admixtures Under Different Curing Regimes.** Construction and Building Materials, No. 23, 2009, pp. 1223-1231.

YUDENFREUND M., HANNA K, M., SKALNY J., ODLER I., BRUNAUER S. **Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity, V. Compressive Strength.** Cement and Concrete Research, Vol. 2, No. 6, 1972, pp 731-743.

YUDENFREUND M., ODLER I., BRUNAUER S. **Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity, I. Materials and Experimental Methods.** Cement and Concrete Research, Vol. 2, No. 3, May, 1972, pp 313-330.

YUDENFREUND M., SKALNY J., MIKHAIL R. S., BRUNAUER S. **Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity, II. Exploratory Studies. Dimensional Changes.** Cement and Concrete Research, Vol. 2, No. 3, May, 1972, pp 331-348.

ZANNI, H.; CHEYREZY, M.; MARET, V.; PHILIPPOT, S.; NIETO, P. *Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using Si NMR.* Cement and Concrete Research, Vol. 26, pp. 93-100, 1996.