

Análise experimental de Concreto de Pós Reativos (CPR)

Ana Carolina Seguro Cury

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Construção no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientado por

Prof. Dr^a Eduarda Luso (IPB)

Prof. Dr^a Graça Vasconcelos (UMinho)

Prof. Dr^o Wellington Mazer (UTFPR)

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos aqueles que me apoiaram na minha caminhada acadêmica, sejam familiares, amigos ou professores, que me incentivaram a nunca desistir e sempre seguir em frente. Dedico também àqueles que, assim como eu, têm interesse na área de concretos especiais e, de alguma forma, possa contribuir com o desenvolvimento de estudos referentes ao tema.

Agradecimento

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por sua imensa generosidade depositada ao longo da minha vida. Aquele que sempre esteve ao meu lado, dando forças, me erguendo e mostrando vários motivos para continuar em frente.

Agradeço também às oportunidades que a vida me deu. Muitas inesperadas ou que em um primeiro momento não foram tão boas, mas com o tempo não tive dúvidas de que tudo que acontece tem uma razão para ser.

Obrigada aos meus orientadores, Wellington, Eduarda e Graça, que foram muito compreensivos, disponíveis e essenciais para deixar o resultado final deste trabalho ainda mais especial. Em especial ao professor Wellington que me deu tantas oportunidades, como a iniciação científica e me introduziu ao tema que se tornou este trabalho.

Aos técnicos do laboratório de materiais de construção do Instituto Politécnico de Bragança, senhor João e senhor Octávio, por tanta generosidade e prontidão, sempre me ajudando em todas as situações.

Meu eterno obrigada à toda minha família pelo apoio incondicional nas minhas decisões, em especial meus pais, Iglaci e Ubiratan, por sempre me mostrarem a importância de uma decisão bem tomada e ao meu irmão Felipe que me motiva a sempre tentar fazer o melhor que posso.

Aprendi o segredo de viver contente em toda e qualquer situação, seja bem alimentado, seja com fome, tendo muito, ou passando necessidade. Tudo posso naquele que me fortalece.

Filipenses 4:12-13

Resumo

O Concreto de Pós Reativos (CPR) é classificado como Concreto de ultra alta resistência (CUAD), pois além da elevada resistência mecânica, apresenta características de durabilidade superiores ao concreto convencional, favorecendo seu uso apesar do custo. A composição do CPR difere dos concretos convencionais por seus componentes na mistura que, além dos materiais tradicionais como cimento e areia fina, possui também sílica ativa, pó de quartzo, fibras de aço ou de polipropileno e aditivo superplastificante. O CPR se distingue também pelo seu processo de cura, que deve ser realizado por pressão em autoclave ou imerso em água a altas temperaturas. Ademais, a água de amassadura apresenta-se sempre em quantidades baixas devido ao uso do aditivo superplastificante e as partículas de areia na composição do CPR não ultrapassam 2 mm de diâmetro. Neste trabalho foram estudados inicialmente nove traços de CPR variando as quantidades de sílica ativa, areia e água nas composições para que fosse possível obter um novo traço de CPR de forma a potencializar suas características. Para este efeito, foi realizada uma análise estatística baseada nos resultados dos ensaios de compressão das nove composições seguida da regressão linear múltipla de dados para que fosse possível encontrar uma equação que otimizasse as quantidades dos materiais, melhorando assim as propriedades do novo traço em relação aos traços estudados. Para comprovar a melhora do novo traço efetuaram-se alguns ensaios de forma a comparar seu desempenho com os traços anteriores e aqueles presentes na literatura. Com base nos valores de 54 amostras, a média de resistência à compressão dos nove traços foi de 122,99 MPa e com base nestas amostras, o novo traço de CPR (nomeado CPR-F) foi originado através da equação de regressão e apresentou uma quantidade ótima de 17% de sílica ativa e fatores ideais de relações $m = 2,2$ para a areia e $n = 0,26$ para a água. Com isso, as novas amostras foram ensaiadas para verificar algumas características como o teor de ar, absorção de água por imersão e porosimetria por intrusão de mercúrio da mistura. Analisando o valor de resistência à compressão obtido pelo traço ideal (CPR-F), este apresentou-se abaixo do esperado, uma vez que a estimativa para o traço dada pela equação era de 269,7 MPa e atingiu a média de 144,64 MPa aos 28 dias. Embora a expectativa do novo traço não tenha sido alcançada, em relação aos traços anteriores, o CPR-F apresentou um incremento de resistência à compressão de 15%, quando comparado o valor médio dos nove traços iniciais.

Palavras-chave: Concreto de Pós Reativos, durabilidade, alta resistência.

Abstract

The Reactive Powder Concrete (RPC) is classified as Ultra High Performance Concrete (UHPC), because besides the high mechanical resistance, it presents characteristics of durability superior to conventional concrete, allowing its use despite the cost. The composition of RPC differs from conventional concrete by its components in the mixture which, in addition to traditional materials such as cement and fine sand, also has silica fume, quartz powder, steel or polypropylene fibers and superplasticizer additive. RPC is also distinguished by its curing process, which must be performed by pressure in an autoclave or immersed in water at high temperatures. In addition, water is always in low quantities due to the use of the superplasticizer additive and the sand particles in the RPC composition do not exceed 2 mm in diameter. In this work, nine recipes of RPC were initially studied nine traces of RPC, varying the amounts of silica fume, sand and water in the compositions in order to obtain a new recipe of RPC in order to enhance its characteristics. For that, an analysis of the compression tests of the 9 compositions followed by multiple linear regression of datas was performed in order to find an equation that optimizes the quantities of the materials, increasing the properties of the new recipe in relation to the studied recipes. To verify the improvement of the new recipe some tests were performed in order to compare its performance with the previous recipes and those present in the literature. Based on the values of 54 samples, the mean compressive strength of the nine recipes was 122.99 MPa and based on these samples, the new recipe of RPC (named CPR-F) was originated through the regression equation that presented an optimum quantity of 17% of silica fume and ideal ratio factors $m = 2.2$ for sand and $n = 0.26$ for water. With this, the new samples were tested to verify some characteristics such as air content, water absorption by immersion and porosimetry by mercury intrusion of the mixture. Analyzing the compressive strength value obtained by the ideal trace (CPR-F), it was below the expected, since the estimate for the recipe given by the equation was 269.7 MPa and reached the average of 144.64 MPa at 28 days. Although the expectation of the new recipe was not reached, in relation to the previous recipes the CPR-F had an increase in compressive strength of 15% when compared to the average value of the nine initial recipes.

Key-words: Reactive Powder Concrete, durability, high resistance.

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Traços de Concreto de Pós Reativos da literatura em massa	27
Tabela 2 - Relação entre os valores apresentados nos traços da literatura, em massa	28
Tabela 3 - Classificação e valores limite dos indicadores de durabilidade de acordo com a classe do concreto para provetes cilíndricos	30
Tabela 4 - Valores das propriedades dos materiais no estado fresco	31
Tabela 5 - Comparação das propriedades obtidas do CPR de acordo com autores distintos... 31	
Tabela 6 - Relação entre a qualidade do concreto e a velocidade de impulso de onda.....	35
Tabela 7 - Traços iniciais do delineamento experimental completo	40
Tabela 8 - Valores de resistência à compressão aos 28 dias dos provetes do estudo preliminar	42
Tabela 9 - Aditivos testados para fabrico do CPR	46
Tabela 10 - Características dos aditivos selecionados	47
Tabela 11 - Empacotamento das partículas de acordo com o modelo de Alfred	50
Tabela 12 - Valor em quilogramas das quantidades de areia em cada mistura de acordo com a peneira	50
Tabela 13 - Características do cimento CEM I 42,5 R.....	51
Tabela 14 - Propriedades da fibra de polipropileno selecionada.....	52
Tabela 15 - Propriedades FPS 120	53
Tabela 16 - Propriedades Tipo III	54
Tabela 17 - Formulação das quantidades fixas e variáveis de cada material em massa	57
Tabela 18 - Quantidades de cada material componente do CPR para produção de 1m ³ de concreto	58
Tabela 19 - Quantidades de cada material componente do CPR para produção dos provetes. 58	
Tabela 20 - Valores adimensionais para inserção na equação da regressão múltipla	68
Tabela 21 - Valores adimensionais usados para a regressão linear múltipla	68
Tabela 22 - Ensaio realizados com o novo traço de CPR.....	69
Tabela 23 - Relações entre ligante, agregado e água das misturas de CPR	76
Tabela 24 – Média dos valores obtidos dos traços de CPR antes e depois do processo de cura térmica.....	81
Tabela 25 - Variação da massa dos provetes antes e depois da cura térmica	82
Tabela 26 - Resultados do ensaio de resistência à flexão dos 9 traços estudados.....	87

Lista de Tabelas

Tabela 27 - Resultados do ensaio de resistência à compressão dos 9 traços estudados.....	88
Tabela 28 - Valores em análise dos traços de CPR estudados, em MPa.....	90
Tabela 29 - Valores de acordo com a segunda análise dos traços de CPR estudados, em MPa	90
Tabela 30 - Valores de acordo com a terceira análise dos traços de CPR estudados, em MPa	91
Tabela 31 - Dados definitivos para cálculo da regressão linear múltipla, em MPa	91
Tabela 32 - Valores dos desvios com base nos valores da média (em MPa) dos 9 traços de CPR estudados.....	92
Tabela 33 - Diferença estatística entre 36 combinações envolvendo os 9 traços de CPR	93
Tabela 34 - Valores obtidos para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk.....	94
Tabela 35 - Valores usados para equação de regressão linear múltipla	96
Tabela 36 - Valores dos parâmetros β_0 , β_1 , β_2 e β_3	97
Tabela 37 - Valores estimados para os traços de CPR estudados	97
Tabela 38 - Parâmetros empregados para uso no novo traço de CPR.....	98
Tabela 39 - Quantidades de cada material componente do novo traço de CPR para produção de 1m ³ de concreto	99
Tabela 40 - Dados para cálculo do teor de ar do CPR-F.....	100
Tabela 41 - Informações dos materiais para cálculo da massa volúmica teórica do CPR-F..	100
Tabela 42 - Informações para ensaio de absorção de água por imersão do CPR-F	101
Tabela 43 - Resultados de resistência à flexão para provetes do CPR-F	103
Tabela 44 - Resultados de resistência à compressão para provetes do CPR-F	104
Tabela 45 - Resultados encontrados para o ensaio de porosimetria de mercúrio do CPR-F .	105

Lista de Figuras

Figura 1 - Variação da resistência à compressão de acordo com a composição e método de cura.....	8
Figura 2 - Resistência à compressão de diversas amostras de CPR com base na temperatura de cura e na relação a/c em diversas idades	10
Figura 3 - Comparação entre perfis de diversos materiais submetidos a uma mesma carga ...	11
Figura 4 - Resistência à compressão de provetes com relações a/c variados e testados em diversas idades.....	13
Figura 5 - Absorção de energia das fibras de polipropileno nos teores de (a) 0% , (b)0,3%, (c)0,6%, (d)0,9% e (e)1,2%	17
Figura 6 - Preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento por sílica ativa.....	19
Figura 7 - Curva granulométrica pelo modelo de Furnas.....	22
Figura 8 - Curva granulométrica pelo modelo de Andreassen & Andersen	23
Figura 9 - Curva granulométrica pelo modelo de Alfred	24
Figura 10 - Passarela de Sherbrooke, Canadá	36
Figura 11 - Passarela de Seonyu, Coréia do Sul	37
Figura 12 - Museu MuCEM, Marselha, França	37
Figura 13 - Etapas do delineamento experimental	45
Figura 14 - Areia utilizada conforme granulometria escolhida.....	48
Figura 15 - Resistência à compressão do CEM I 42,5 R.....	51
Figura 16 - Material usado como pó de quartzo no fabrico do CPR.....	53
Figura 17 - Curva granulométrica do Pó de Quartzo (FPS 120).....	53
Figura 18 - Material usado como sílica ativa no fabrico do CPR	54
Figura 19 - Curva granulométrica da Sílica ativa (Tipo III)	55
Figura 20 - Materiais separados de acordo com cada traço	60
Figura 21 - Misturadora utilizada no processo de fabrico das misturas de CPR	61
Figura 22 - Aspecto geral da mistura de CPR.....	61
Figura 23 - Colocação da segunda camada para adensamento	61
Figura 24 - Proвете finalizado	61
Figura 25 - Preparação dos provetes para cura térmica	62
Figura 26 - Equipamento utilizado para ensaiar os provetes à flexão.....	63

Lista de Figuras

Figura 27 - Aspecto dos provetes após submetidos ao ensaio de resistência à flexão	63
Figura 28 - Equipamento utilizado para ensaiar os provetes à compressão	64
Figura 29 - Peça de auxílio no ensaio de resistência à compressão para provetes prismáticos	64
Figura 30 – Regularização do topo do recipiente para ensaio em estado fresco.....	70
Figura 31 - Aferição do peso recipiente + concreto para o novo traço de CPR.....	70
Figura 32 - Amostras imersas em água por 72 horas para ensaio de absorção por imersão	71
Figura 33 - Amostra para ensaio de absorção por imersão sendo pesado saturado	71
Figura 34 - Provetes em ebulição por 5 horas para o ensaio de absorção por imersão	72
Figura 35 - Balança hidrostática utilizada no ensaio de absorção por imersão.....	72
Figura 36 - Equipamento utilizado no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio	74
Figura 37 - Traços nos moldes em estado fresco	77
Figura 38 - Traços no estado endurecido	78
Figura 39 - Aspecto dos provetes no estado endurecido	79
Figura 40 - Provetes passados 2 dias em cura térmica à 60°C	80
Figura 41 - Provetes passados 7 dias em cura térmica à 60°C	80
Figura 42 - Provetes passados 28 dias em cura térmica à 60°C	80
Figura 43 - Aspecto final dos provetes após cura térmica	83
Figura 44 - Aspecto dos provetes de CPR após ensaio de resistência à compressão.....	89
Figura 45 - Aspecto dos provetes aos 28 dias após ensaiados à flexão	102

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Empacotamento de partículas de acordo com modelo de Alfred	49
Gráfico 2 - Quantidades dos materiais representados em percentagem.....	59
Gráfico 3 - Variação de massa dos traços de CPR.....	82
Gráfico 4 - Variação dos materiais em análise à cada traço de CPR	85
Gráfico 5 - Variação nos materiais componentes do CPR.....	86
Gráfico 6 - Dispersão dos valores obtidos no ensaio de resistência à flexão.....	87
Gráfico 7 - Curva de resistência à flexão para o novo traço de CPR.....	103
Gráfico 8 - Curva de resistência à compressão para o novo traço de CPR	105
Gráfico 9 - Porosidade por intrusão de mercúrio x Diâmetro do poro.....	106

Lista de Siglas

CPR – Concreto de Pós Reativos
CAD – Concreto de alto desempenho
CAR – Concreto de alta resistência
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR – Norma Brasileira Registrada
NP – Norma Portuguesa
a/c – Relação água / cimento
CUAD – Concreto de Ultra Alto Desempenho
ASTM – American Society for Testing and Materials
MF – Módulo de Finura
IPB – Instituto Politécnico de Bragança
UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
FAE – Formação Atrasada de Etringita
UHPC – Ultra High Performance Concrete
RPC – Reactive Powder Concrete

Lista de Abreviaturas

m – Metros
cm - Centímetros
mm – Milímetros
KPa – Quilo Pascal
MPa – Mega Pascal
GPa – Giga Pascal
kN – Quilo Newton
C₃A – Aluminato Tricálcio hidratado
C₃S – Silicato Tricálcio
Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

Lista de Símbolos

σ_p – Desvio padrão

S_x – Erro padrão

\bar{y} – Média

σ^2 – Variância

Lista de Sinônimos

Água da mistura de concreto – Água de amassadura
Argamassadeira – Misturadora
Concreto – Betão
Desmoldante – Desconfrante
Empacotamento – Compacidade
Fôrma – Cofragem
Tempo de pega – Tempo de presa

Índice

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	3
2	Estado de conhecimento do Concreto de Pós Reativos	4
2.1	A evolução do concreto	4
2.2	A gênese dos concretos de alto desempenho	4
2.3	O Concreto de Pós Reativos	8
2.3.1	Materiais necessários para fabricação do CPR	11
2.3.1.1	Aditivo.....	12
2.3.1.2	Água	12
2.3.1.3	Areia.....	13
2.3.1.4	Cimento	14
2.3.1.5	Fibras.....	15
2.3.1.6	Pó de quartzo.....	17
2.3.1.7	Sílica ativa	18
2.3.2	Dosagem do Concreto de Pós Reativos.....	19
2.3.2.1	Distribuição de dimensão de partículas (granulometria).....	20
2.3.2.2	Revisão de traços da literatura.....	25
2.3.3	Propriedades do Concreto de Pós Reativos.....	28
2.3.3.1	Propriedades relativas à resistência do CPR	29
2.3.3.2	Relativamente à durabilidade do CPR.....	32
2.3.4	Aplicações	36
3	Programa experimental	39
3.1	Estudo preliminar	39
3.2	Delineamento experimental	43
3.3	Caracterização dos materiais.....	46
3.3.1	Aditivo superplastificante	46
3.3.2	Areia	48
3.3.2.1	Granulometria esperada.....	49
3.3.3	Cimento	51
3.3.4	Fibras	52
3.3.5	Pó de quartzo	52
3.3.6	Sílica ativa	54
3.4	Estudo de quantidades e obtenção dos traços	55
3.5	Execução dos variados traços de CPR	59
3.6	Ensaio mecânicos	62
3.6.1	Ensaio de resistência à flexão.....	63
3.6.2	Ensaio de resistência à compressão.....	63
3.7	Obtenção do traço ideal	64

3.7.1	Regressão linear múltipla de dados	64
3.8	Ensaio com o traço ideal	69
3.8.1	Teor de ar e massa volúmica	69
3.8.2	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	71
3.8.3	Resistências mecânicas	73
3.8.4	Porosimetria por intrusão de mercúrio	73
4	Apresentação e análise dos resultados	75
4.1	Aspecto dos provetes	75
4.1.1	Estado fresco	75
4.1.2	Estado endurecido após desmolde.....	78
4.1.3	Estado endurecido após a cura térmica	83
4.1.4	Análise geral dos traços.....	84
4.2	Ensaio de resistência	86
4.2.1	Resistência à flexão	87
4.2.2	Resistência à compressão	88
4.3	Obtenção do novo traço de Concreto de Pós Reativos	89
4.3.1	Análise dos <i>outliers</i>	89
4.3.2	Equação ideal de Concreto de Pós Reativos	95
4.4	Traço ideal de Concreto de Pós Reativos	99
4.4.1	Ensaio	99
4.4.1.1	Teor de ar	100
4.4.1.2	Absorção de água por imersão	101
4.4.1.3	Resistência à flexão	102
4.4.1.4	Resistência à compressão	104
4.4.1.5	Porosimetria por intrusão de mercúrio	105
5	Conclusões	107
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	109

1 Introdução

Apesar de existirem diversos materiais que podem substituir o concreto como madeira, aço, plástico e bambu, ele ainda é o material mais usado na construção civil nos dias atuais pela sua eficiência, trabalhabilidade, custo, adaptação ao projeto, entre outros fatores favoráveis ao seu uso (Couto *et al.*, 2013). O concreto em geral é formado por cimento, água, agregado graúdo (brita) e agregado miúdo (areia), que podem variar em suas quantidades, além de outros materiais passíveis de serem acrescentados para agregar características específicas ao concreto conforme projeto.

O Concreto de Pós Reativos (CPR), do inglês *Reactive Powder Concrete (RPC)*, cujo traço diferencia-se do concreto convencional pela adição de componentes não convencionais em sua mistura, tais como fibras, sílica ativa, pó de quartzo e aditivos superplastificantes, oferece vantagens em relação à adição desses componentes, tendo como principais características o melhoramento da trabalhabilidade que contribui para a alta resistência. Para alguns autores como Sadrekarimi (2004), o CPR é considerado um Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) devido às suas propriedades elevadas como resistência mecânica, ductilidade e durabilidade.

Considerando os materiais utilizados na produção do CPR, o aditivo superplastificante é de grande significância para o conjunto, uma vez que os teores de água utilizados na mistura são os menores possíveis, visando a diminuição de vazios na peça e uma maior resistência ao CPR. O uso de superplastificantes confere também trabalhabilidade elevada em estado fresco, reduzindo a segregação e aumentando a fluidez do concreto. Já para o estado endurecido, a adição de superplastificantes tem por função a adequação ao tempo de pega, permitindo que as formas sejam retiradas no período desejado, além de conferir melhora significativa nas propriedades reológicas, físicas e mecânicas do concreto (Mehta e Monteiro, 2008).

A areia usada para fabricação do CPR possui um diâmetro reduzido (de até 2 mm) e, com seu uso controlado em variados tamanhos, deve conter uma granulometria ideal e módulo de finura ótimo para que o mínimo de espaços vazios se encontre na mistura, causando assim um empacotamento de partículas ideal atrelado a uma aderência maior entre o cimento e o agregado, proporcionando maior homogeneidade à mistura (Richard *et al.*, 1995).

Comparando o CPR com os demais concretos de acordo com o traço e componentes da mistura, o Concreto de Pós Reativos possui vários fatores a serem analisados, principalmente a faixa granulométrica a ser selecionada. Tal informação é de bastante relevância, pois com uma curva granulométrica ideal, o concreto tem uma menor quantidade de vazios em sua composição (Silva *et al.*, 2004). A ideia do uso de agregados miúdos é fazer com que as partículas maiores de areia fiquem circundadas por partículas de tamanho inferior, para que haja maior compactação na mistura.

O CPR é desenvolvido, além de outras aplicações, para fins estruturais cujas exigências em função da resistência de projeto sejam maiores do que aquelas usadas em construções convencionais (Vanderlei, 2004). Este tipo de concreto é mais utilizado para lajes, pontes e outras estruturas bastante solicitadas, oferecendo a possibilidade de estruturas mais esbeltas e com vãos livres maiores, se comparado ao concreto convencional. Também pode ser aplicado em reparos e reformas.

Infelizmente a literatura brasileira e portuguesa é escassa a respeito do tema. Construções que poderiam se beneficiar com o uso do CPR, em sua grande maioria, costumam utilizar materiais e métodos convencionais, dada a falta de estudos significativos para a inserção desse material na construção civil. A literatura estrangeira aponta alguns estudos com referência no CPR, mas ainda assim é relativamente escassa.

Nenhuma literatura encontrada discorre sobre a dosagem ideal do traço de CPR, levando em conta sua trabalhabilidade e propriedades mecânicas a fim de evitar desperdícios na sua produção e tentar encontrar o equilíbrio nos componentes de sua mistura. Isto porque obras de construção civil em geral perdem aproximadamente 8% dos materiais previstos para sua execução, de acordo com estudo desenvolvido na Universidade de São Paulo (Matias, 2018). Este percentual poderia ser reduzido se as quantidades de materiais fossem ajustadas para oferecer o máximo de seu aproveitamento.

Esta pesquisa prevê a otimização no traço dos Concretos de Pós Reativos através de um delineamento experimental, para que a combinação entre os componentes da mistura tenha o máximo proveito com o mínimo de desperdícios, otimizando as reações internas que ocorrem na mistura, assim como as reações pozolânicas, com base na quantidade adequada de cada material na composição do CPR. Prevê ainda a análise dos parâmetros mecânicos do novo traço otimizado, se condizem com os valores presentes na literatura-base e com o esperado de acordo com as novas quantidades.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é comparar, através da variação nas quantidades dos materiais utilizados nos traços de Concreto de Pós Reativos, suas proporções ideais em uma mistura aprimorada, através de uma equação para otimizar as características do traço de CPR.

Assim, apresentam-se para este trabalho os seguintes objetivos específicos, para que o objetivo geral seja atingido:

- Avaliar a diferença de valores de resistência à compressão axial para cada traço de CPR desenvolvido e qual deles oferece um desempenho superior neste ensaio;
- Avaliar a significância da variação de resistência entre as amostras;
- Estabelecer um traço de CPR ideal através da regressão linear múltipla dos dados de resistência à compressão;
- Avaliar os valores obtidos em ensaios para o novo traço de CPR e comparar com os demais traços deste trabalho e da literatura.

2 Estado de conhecimento do Concreto de Pós Reativos

Para que seja possível o entendimento deste trabalho, deve-se ter em mente algumas definições e métodos relativos ao CPR.

2.1 A evolução do concreto

O concreto por definição é a mistura de água, areia, brita e cimento, podendo variar com a adição de outros materiais, como a introdução de varões de aço para formar o concreto armado, por exemplo. Também pode ser considerado um material plástico que é moldado de maneira a adquirir o formato esperado antes de começar a endurecer, ganhando resistência para resistir aos esforços solicitantes necessários especificados em projeto.

Como aponta Kaefer (1998), em 12.000 a.C. foi datada em Israel uma reação entre calcário e argila xistosa que formam o cimento natural e este seria o primeiro cimento que o Homem utilizaria em suas construções, iniciando neste marco o estudo dos materiais usados nas construções com o passar do tempo. Após construções com pedras e barro, os gregos, em 800 a.C. empregaram o uso das argamassas de cal, pois notaram que os materiais anteriores resistiam menos que a argamassa, mas apenas entre 300 a.C. e 476 d.C. que o concreto começa a ser utilizado, em muros e edificações, constatando que agregando materiais maiores junto à argamassa, esta tinha algumas propriedades melhoradas. Na época, existem registros de que foram usados aditivos incorporadores de ar à mistura nomeadamente gordura, leite e sangue animal. Devido à ruralização que ocorreu na Europa ao longo da idade média, a pesquisa do concreto estagnou por este período e retornou apenas no século XIX.

A evolução do concreto (Pedroso, 2009) vem ocorrendo por mais de 50 séculos, mas o concreto que se conhece hoje só começou a ser utilizado a partir do ano de 1824, quando John Aspdin patenteou o cimento portland na Inglaterra.

2.2 A gênese dos concretos de alto desempenho

Os concretos especiais estão presentes no dia-a-dia em grandes obras ou em reparos de estruturas, mas há mais de 9000 anos já existem evidências do uso de concretos de alta resistência (CAR), como é o caso de alguns pisos pavimentados em Israel (Silva, 1995). O

CAR, como é conhecido hoje, teve seu início na Noruega, na década de 1950 para uso em obras que necessitavam de um material com baixa permeabilidade e alta resistência, por exemplo construções marítimas e túneis, como aponta Baccin (1998). O conceito de alta resistência vem se atualizando com o tempo, uma vez que, quando os CAR's foram introduzidos no mercado, concretos com mais de 30 MPa já eram considerados como tal, ainda de acordo com Baccin (1998). Para chegar aos altos valores de resistência, os construtores da década de 70 indicam que foram feitas misturas de concreto com uma relação a/c baixa e o emprego de uma quantidade maior de água para a cura.

Apenas na década de 80 os aditivos superplastificantes começaram a ser utilizados, assim como a micro sílica. Com a junção destes dois materiais nas misturas de concreto, valores de resistência na ordem dos 100 MPa começaram a ser facilmente atingidos. Na década de 80, na Europa, descobriu-se que quando o CAR é submetido à altas temperaturas, como em situações de incêndio, pode ocorrer o deslocamento do material ou até mesmo explodir. Esse fenômeno foi observado após alguns túneis entrarem em chamas e o material acabar sucumbindo. Este efeito também chamado “*spalling*” acontece devido à água livre não-reagente na mistura do concreto que acaba se transformando em vapor devido à alta temperatura em que se encontra, mas por conta da sua baixa porosidade, o vapor faz com que a pressão interna aumente e ocorra tal efeito, já que o vapor está enclausurado na peça.

Com as necessidades construtivas se alterando e exigindo cada vez mais dos materiais, pesquisadores começaram a estudar formas de incrementar o concreto para que ele atingisse novos patamares em termos construtivos, de resistência e durabilidade, e assim originaram-se os concretos de alto desempenho (CAD).

O termo concreto de alto desempenho foi usado pela primeira vez por Aïtcin e Mehta (1990), trazendo suas diferenças para os concretos de alta resistência e concretos comuns, pois os CAD's além de oferecerem uma alta resistência, possuem outras vantagens como elevada durabilidade e trabalhabilidade. Em comparação ao concreto de alta resistência, o concreto de alto desempenho visa melhores resultados globais, não apenas de resistência, mas também de durabilidade, porosidade, trabalhabilidade, entre outros.

Segundo os pesquisadores do programa de pesquisa em alta performance de concretos *Strategic Highway* (Zia *et al.*, 1991), o concreto de alto desempenho pode ser definido em termos da resistência, da durabilidade e da relação água/cimento, da seguinte forma:

- Com base na resistência à compressão:

- Nas primeiras 4 horas deve-se atingir no mínimo 17,5 MPa;
- Nas primeiras 24 horas, deve-se atingir o mínimo de 35 MPa;
- Aos 28 dias, deve-se atingir o valor de 70 MPa.
- Com base na durabilidade, após submetido à 300 ciclos de congelamento e descongelamento, deve-se apresentar um fator de durabilidade superior à 80%.
- Com base na relação água/cimento, esta deve manter-se inferior à 0,35.

Como aponta o estudo desenvolvido por Baccin (1998), o CAD apresenta diversas vantagens em seu uso, tais quais baixa porosidade e permeabilidade, baixas deformações, sejam instantâneas (retração, deformação imediata) ou diferidas como a fluência. Apresenta também elevada resistência ao desgaste ou abrasão, permite a utilização de métodos convencionais de mistura, moldagem, adensamento e cura, grande fluidez na moldagem e altas resistências nas primeiras idades. Permite ainda a diminuição das dimensões dos elementos estruturais, menor volume de concreto e menor superfície de formas, diminuição das cargas nas fundações, ausência de exsudação e excelente aderência a concretos já endurecidos.

Assim como o concreto de alto desempenho foi um avanço ao concreto comum e ao concreto de alta resistência, o Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) é um avanço em relação ao CAD. Como mostra Aïtcin (2008), dentre os variados tipos de CUAD, os principais são *DSP (Densified with Small Particles)*, *MDF (Macro Defect Free)* e o *RPC (Reactive Powder Concrete)* ou ainda, Concreto de Pós Reativos. O Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) foi desenvolvido nas últimas três décadas e patenteado de acordo com as dosagens oferecidas por cada empresa. No caso do CPR, ele é derivado de pesquisas realizadas na França por Pierre Richards, ex-diretor científico da empresa francesa Bouygues e hoje é patenteado pela empresa com nome comercial Ductal®.

O grande diferencial do Concreto de Ultra Alto Desempenho em relação aos seus antecessores é a ausência de agregados graúdos em sua composição. Nele, apenas agregados com diâmetro inferior a 2 mm compõem a mistura de concreto. O motivo para tal ação é evitar que existam vazios indesejáveis na mistura. Com partículas mais finas, é possível fazer um empacotamento perfeito para que todas as partículas maiores sejam circundadas de partículas menores, fazendo assim que não existam espaços indesejados entre as partículas na mistura, obedecendo o limite de tamanho da composição. Além disso, a partir do CUAD iniciaram-se diversos estudos sobre a aplicação de tratamentos de cura envolvendo pressão e temperatura nos concretos. Tal medida, após amplamente estudada e testada, proporciona ao concreto

ganhos de resistência como nunca antes obtidos e outras propriedades que favorecem seu desempenho e durabilidade.

O objetivo da aplicação de pressão nas peças de CUAD é diminuir, ou até eliminar, os vazios na mistura. As pressões em autoclave podem ser aplicadas de 20 MPa até 50 MPa a partir de 6 horas após o início da moldagem. De acordo com Cheyrezy (1999), a aplicação de pressão possui três efeitos favoráveis ao concreto:

- Redução do ar aprisionado, onde a aplicação de pressão pode rapidamente e de forma fácil eliminar / reduzir consideravelmente o número de bolhas de ar na estrutura;
- Remoção da água em excesso, onde aplicando uma pressão de 50 MPa por 0,5 horas em uma peça de diâmetro de 7 cm, a quantidade de água que pode ser eliminada é de 20% a 25% da quantidade de água total da mistura, gerando um aumento de 2% na densidade de compactação da peça;
- Compensação da retração química, no qual, se a pressão aplicada for mantida durante as primeiras 6 a 12 horas do concreto no molde, parte da porosidade que aparece na amostra como resultado do encolhimento químico pode ser eliminado, graças ao aparecimento de microfissuras na amostra que vão se curando à medida que a amostra endurece. Tal processo gera um aumento de 6% da densidade de compactação da peça, a qual está diretamente ligada à resistência à compressão da amostra.

Já para o processo de cura térmica, recomenda-se que a temperatura da água seja entre 20°C e 90°C. Diversos estudos apontam o incremento de resistência devido à cura térmica da mistura, como é o caso do estudo de Richard e Cheyrezy (1995), que testaram quatro tipos de situação sendo elas: concreto sem fibras submetido à cura em temperatura ambiente; concreto com fibras submetido à cura em temperatura ambiente; concreto sem fibras submetido à cura em temperatura de 90°C; concreto com fibras submetido à cura em temperatura de 90°C. Todos os provetes foram ensaiados aos 28 dias e o resultado encontra-se na Figura 1.

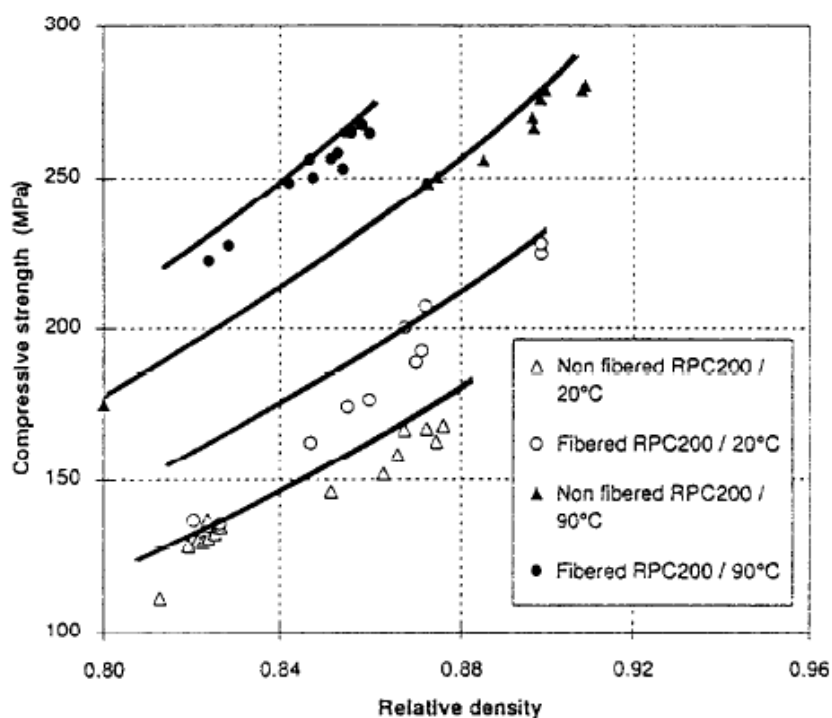


Figura 1 - Variação da resistência à compressão de acordo com a composição e método de cura

Fonte: Richard *et al*, 1995.

É possível observar que mesmo sem fibras, a resposta dos ensaios à compressão foram bastante superiores nos provetes submetidos ao tratamento térmico comparativamente aos provetes que tiveram sua cura realizada na temperatura de 20°C. É visível que, graças à cura térmica, o concreto passa a ter um incremento de pelo menos 50% em sua força de compressão em relação à resistência atingida pelos concretos que foram ensaiados à compressão após serem submetidos à cura tradicional.

Unindo a cura térmica, que confere maiores valores de resistência ao concreto, à aplicação de pressão no provete, conferindo menor porosidade à estrutura, tem-se um Concreto de Ultra Alto Desempenho com excelentes propriedades físicas e mecânicas à estrutura, elevando as possibilidades construtivas a outro patamar.

2.3 O Concreto de Pós Reativos

O Concreto de Pós Reativos, ou *Reactive Powder Concrete*, hoje patentado com nome comercial Ductal[®], é caracterizado pela sua composição, a qual possui água em baixas quantidades, areia de granulometria fina cujo módulo de finura é classificado como ótimo, onde a partícula máxima não ultrapassa os 2 mm, cimento com baixo teor de Aluminato Tricálcio

hidratado (C₃A), sílica ativa, pó de quartzo, fibras (podendo ser de polipropileno ou metálicas), e aditivo superplastificante.

De acordo com Richard e Cheyrezy (1995), as principais características que diferenciam o CPR dos demais concretos são a melhor homogeneização (pelo fato de haver apenas agregados miúdos, cujo tamanho não ultrapassa os 2 mm), aumento na densidade da mistura (otimizando a textura granular), inclusão de materiais pozolânicos no cimento (como a sílica ativa), melhoria da microestrutura através da cura térmica e aumento da ductilidade (devido à inclusão de fibras na mistura). Em seu estudo, Richard *et al.* (1995) determinaram alguns princípios para a obtenção do CPR, já expressos anteriormente. Neles o CPR tem suas características bem evidenciadas e cada um dos fatores é descrito de acordo com a melhoria que oferece à mistura. No estudo é dito que a aplicação do aumento da homogeneidade pela eliminação dos agregados graúdos, o aumento da densidade pela otimização da distribuição granulométrica dos grãos somado à aplicação de pressão no seu preparo e o fortalecimento da estrutura através de tratamento térmico produz uma matriz com uma alta força de compressão, apesar da ductilidade continuar semelhante aos concretos tradicionais. A inclusão de fibras confere o incremento de ductibilidade necessário ao CPR.

De acordo com Bonneau *et al.* (1996), com o uso de aditivos superplastificantes e sílica ativa é possível reduzir a relação água/cimento, ajudando a minorar o volume total de poros da pasta cimentícia e a média de diâmetro dos poros.

Um dos principais motivos para que o CPR atinja valores tão altos de resistência e durabilidade é devido ao fato de existir um grande estudo envolvendo o empacotamento de partículas (*particle packing*). Um dos métodos mais indicados para o empacotamento de partículas no caso do Concreto de Pós Reativos é o empacotamento de Alfred, como apontado por Oliveira (2000), uma vez que o material se assemelha muito aos compósitos cerâmicos. O CPR consiste num material bastante compacto e de granulometria fina, além de favorecer uma distribuição mais homogênea da curva de granulometria e a redução de vazios indesejáveis na mistura.

Para testes experimentais e com provetes de dimensão mínima, se comparado às estruturas executadas em CPR, a cura térmica é feita de modo que os provetes ficam submersos pelo tempo necessário a uma temperatura de água constante, sem que fatores externos influenciem sua cura. Nos trabalhos apresentados por Vanderlei (2004), mostram-se os diversos

efeitos da cura térmica em provetes com variação de relação a/c e o tempo de submissão a cura térmica, ver Figura 2.

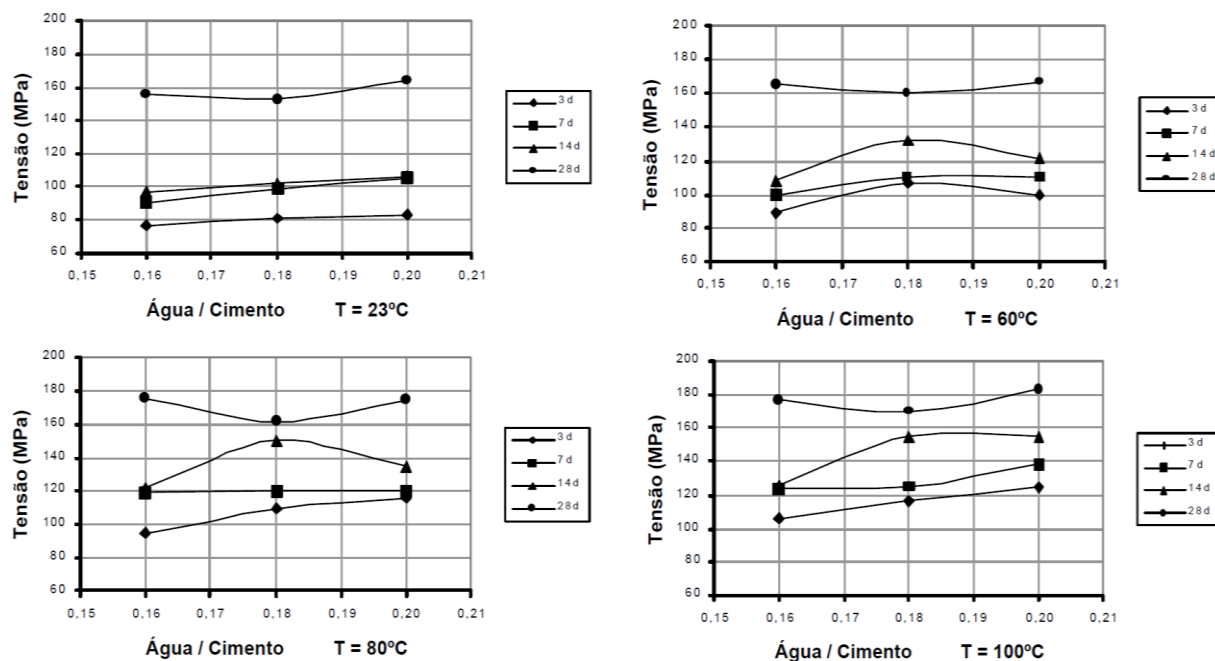


Figura 2 - Resistência à compressão de diversas amostras de CPR com base na temperatura de cura e na relação a/c em diversas idades

Fonte: Vanderlei, 2004.

O estudo deixa bastante claro que, independente da relação a/c ou da idade do concreto, a resistência à compressão sempre será superior naqueles provetes expostos a cura térmica com elevadas temperaturas. Neste caso, para uma cura térmica de 100°C é possível observar um incremento de resistência em todas as idades do concreto, em comparação às outras temperaturas de cura. Além disso, é possível notar que a cura térmica influencia de formas distintas as relações água/cimento, pois, considerando a idade de 28 dias do concreto, nos processos de cura à temperatura ambiente e a 100°C, o teor de a/c 0,20 foi aquele que apresentou melhores resultados, todavia, nas temperaturas de cura de 60°C e 80°C, este teor atingiu as mesmas capacidades do teor de 0,16.

Para uso em laboratório, as técnicas de cura são bastante controladas, já para o uso do CPR em obras, a cura térmica pode ser feita ainda em fábrica ou diretamente na obra, onde a estrutura fica envolta por panos e jatos de vapor com temperaturas entre 60°C e 90°C que ficam banhando a peça, para que ela se mantenha saturada mesmo não estando submersa. Assim as reações dos pós reativos, que dão nome ao CPR, podem ocorrer, de forma a manter os benefícios e reações químicas proporcionados através da cura térmica do concreto.

Uma grande vantagem do Concreto de Pós Reativos é a possibilidade do seu uso com uma redução ou até mesmo a eliminação de armadura passiva nas estruturas, como é o caso prático da passarela de Sherbrooke, no Canadá, como mostra o item 2.3.4. A retirada das armaduras só é possível uma vez que as fibras inseridas na mistura são capazes de substituir a armadura antes necessária. Devido a alta resistência à compressão, o CPR já foi testado por Richard (1996) e Adeline *et al.* (1996) em estruturas protendidas sem nenhuma armadura passiva, em uma viga de 10 m de comprimento na forma “T” e “X”. Os resultados obtidos na pesquisa lembraram o comportamento similar às estruturas de aço, assim como apresentado também pelo pesquisador Walraven (1999), sendo observado que a protensão foi capaz de absorver as tensões primárias de tração e o próprio CPR foi capaz de absorver as demais tensões apresentadas na peça, seja de tração secundária, cisalhamento ou compressão. Pode-se observar na Figura 3 a comparação feita por Walraven (1999).

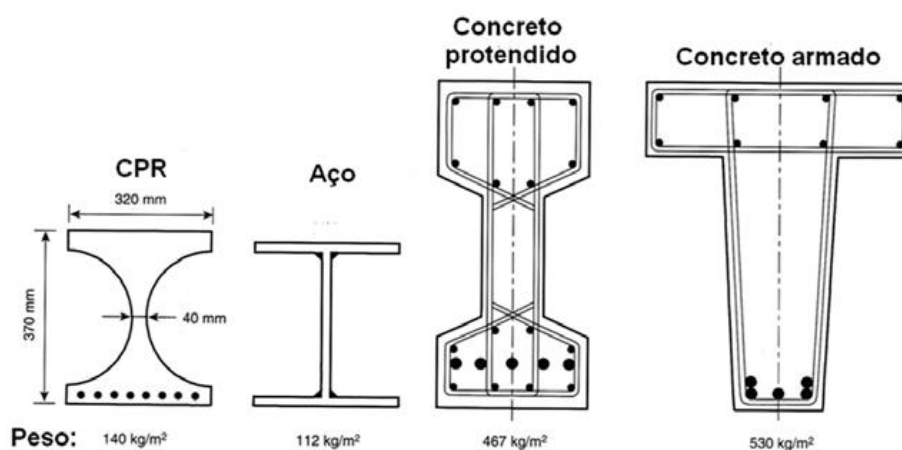


Figura 3 - Comparação entre perfis de diversos materiais submetidos a uma mesma carga

Fonte: Walraven, 1999.

Um material como o CPR pode ser favorável para diversos contextos da construção civil, uma vez que este é um material bastante resistente, com ótima trabalhabilidade, baixo índice de vazios e elevada durabilidade. Mas vale ressaltar que suas propriedades são boas se a escolha dos materiais para a mistura assim como sua cura forem adequadas.

2.3.1 Materiais necessários para fabricação do CPR

Os materiais empregados na composição do CPR são o grande diferencial do seu excelente desempenho e durabilidade, atrelado ao uso da cura térmica. Em essência, o Concreto de Pós Reativos é composto por areia de diâmetro não superior à 2 mm, fibras, água em baixas

quantidades, aditivos superplastificantes, pó de quartzo, sílica ativa e cimento. Cada um desses materiais desempenha uma determinada função na mistura para que o conjunto deles corresponda positivamente no resultado final.

2.3.1.1 Aditivo

Os aditivos podem alterar as propriedades do concreto tanto no estado fresco, influenciando a trabalhabilidade, como no estado endurecido, onde pode interferir nas propriedades mecânicas e físicas do concreto. O aditivo mais comumente utilizado para produção do Concreto de Pós Reativos é o superplastificante. Segundo Cheyrezy (1999), a finalidade do uso de aditivo superplastificante no CPR deve-se à combinação de três fatores principais:

- Aumento da trabalhabilidade do concreto sem a mudança da composição;
- Diminuição da relação a/c e, conseqüentemente, aumento da resistência e durabilidade;
- Reduzir a quantidade necessária de cimento para minimizar os efeitos de retração e tensões internas.

A principal função do aditivo superplastificante no CPR é de atingir a menor relação a/c possível, mantendo ou melhorando a trabalhabilidade do concreto. Em relação aos tipos de aditivos superplastificantes é válido enfatizar que quando o traço de CPR leva em sua composição fibras metálicas, é necessário que o aditivo escolhido tenha uma taxa bastante baixa de cloretos, uma vez que em contato com as fibras metálicas, pode favorecer sua corrosão.

A quantidade necessária de aditivo utilizada na mistura deve ser calculada através de ensaios previamente executados, como cone de o *mini slump* e o cone de *Marsh*, indicados por Gomes (2002), uma vez que a ação do aditivo é influenciada pelo tipo de cimento escolhido e nunca ultrapassar em 5% da quantidade de cimento na mistura.

2.3.1.2 Água

De acordo com a Lei de Abrams (Abrams, 1919), “quanto maior a quantidade de água na mistura do concreto, menor sua resistência à compressão”. Apesar desta lei não poder ser aplicada aos CPR’s pelo fato de que a quantidade de água presente na mistura não seria suficiente para hidratar todas as partículas do concreto, sendo apenas nesta situação que esta lei

se faz válida, ela é capaz de fornecer uma ideia do motivo para o Concreto de Pós Reativos, cuja principal característica é ser um concreto com resistência à compressão elevada, ter em sua composição o mínimo de água possível.

A água na composição do CPR atua de forma a hidratar todas as partículas presentes na mistura, em conjunto com o aditivo superplastificante, que permite uma redução na quantidade de água total. Vanderlei (2004) mostra como a relação água/cimento pode ser fundamental na resistência final do concreto. Em seu trabalho foram selecionadas misturas com relações a/c de 0,16, 0,18 e 0,20, tendo-se verificado com clareza o efeito da quantidade necessária de água na mistura ao longo dos dias, ver Figura 4.

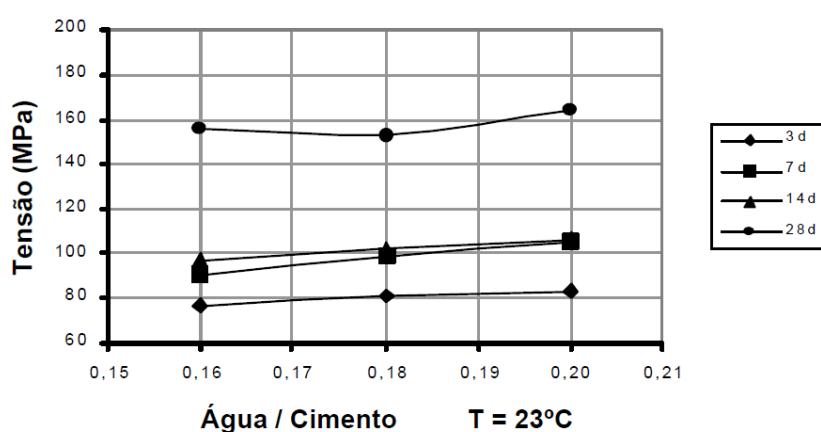


Figura 4 - Resistência à compressão de provetes com relações a/c variados e testados em diversas idades

Fonte: Vanderlei, 2004.

Na Figura 4 pode-se observar que nas primeiras idades o teor intermediário de 0,18 é aquele que apresenta resultados bons com menos água, mas conforme os dias vão avançando na cura em temperatura ambiente, este teor é o que atinge a menor resistência à compressão aos 28 dias entre os três teores experimentados. Pode-se notar ainda que a Lei de Abrams mais uma vez não se aplica ao CPR, uma vez que o teor de 0,20 apresentou resultados sempre melhores em relação aos outros dois teores.

A literatura em geral trabalha com valores de a/c entre 0,17 e 0,29, como apresentado no item 2.3.2 deste trabalho.

2.3.1.3 Areia

O uso de uma granulometria mais baixa do agregado utilizado no CPR é essencial para obtenção de uma menor permeabilidade, bem como para melhor homogeneização dos materiais (Biz, 2001). Além destas vantagens, a granulometria analisada no CPR contribui para a redução

da zona de transição, que é uma das desvantagens presentes no concreto convencional. Considerando a exclusão do agregado graúdo na composição do CPR e a inserção de areias mais finas, a granulometria da areia deve ser muito bem definida para evitar vazios na mistura (Richard e Cheyrezy, 1995). Ainda, a granulometria ideal de areia deve conter grãos a partir de 150 μm e evitar ultrapassar 600 μm , mas diversos autores já tentaram expandir este intervalo e mesmo assim chegaram a resistências à compressão próximas à 200 MPa. No entanto, a resistência à flexão foi menor quando o agregado mais grosso tomou lugar da areia mais fina. Para tanto, Kang *et al.* (2008) avaliaram que na proporção 1:1 entre areias finas e agregados maiores (5 mm), a mistura apresentava as maiores resistências e que esta combinação gerava mais vantagens do que utilizar um agregado de um único tamanho. Fatores como a menor permeabilidade do concreto, juntamente com uma melhor homogeneização dos materiais, justificam o uso da areia como o maior agregado da mistura para CPR, de modo a garantir a ausência de poros capilares e vazios no compósito.

Outro aspecto bastante relevante na escolha do agregado e sua granulometria é seu módulo de finura, uma vez que com o uso de agregados miúdos mais grossos, é possível reduzir a quantidade de água necessária para a mistura e conseqüentemente favorecer a obtenção de resistências mais altas, como considerado por Aïtcin (2000) em sua pesquisa. O módulo de finura ideal para o Concreto de Pós Reativos está entre 2,2 e 2,9 para se enquadrar na faixa ótima e esta granulometria deve ser contínua.

No caso do CPR, a eliminação do agregado graúdo também é justificada pela redução no tamanho de algumas microfissuras provenientes de carregamentos externos (mecânica), retração autógena (química) ou diferentes expansões entre pasta e agregado sob efeito de cura térmica (termomecânica) (Richard *et al.*, 1995).

2.3.1.4 Cimento

Para Mendes (2002), a escolha do cimento mais adequado leva em conta, além de suas propriedades mecânicas, outras três características que são sua finura, composição química e sua compatibilidade com os aditivos empregados na mistura. A quantidade reduzida de C_3A no cimento é um dos principais fatores para favorecer bons resultados, de acordo com diversos estudos já realizados na área de concretos de ultra-alta resistência. Cimentos com baixas percentagens de C_3A produzem melhores resultados de espalhamento e além disso, o teor de C_3A influencia o efeito do aditivo de forma inversamente proporcional à plasticidade do

concreto (Coppola *et al.*, 1997). Outro fator que envolve a importância do C₃A no fabrico do CPR diz respeito à cura térmica que este sofre. O estudo desenvolvido por Coppola *et al.* (1996) apresenta a comparação entre três cimentos com diferentes porcentagens de C₃A (0%, 4% e 11%). Seus resultados mostraram que para o cimento com menor teor de C₃A, a resistência alcançada foi a mais alta quando submetido à cura térmica entre 90°C e 160°C. Além da resistência ter sido melhorada, alcançando a marca de 200 MPa, nos outros cimentos foi possível perceber o aumento na relação a/c e um máximo valor de resistência de 160 MPa atingidos.

Com base na discussão de Grattan-Bellew (2000), o potencial para a formação atrasada da etringita é substancialmente aumentado com a elevação da temperatura de cura do concreto. Pelo seu estudo é possível perceber que para temperaturas de cura entre 90°C e 100°C, a etringita é muito estimulada uma vez que seu potencial para formação atrasada de etringita (FAE) é submetido a estas temperaturas. Já entre 70°C e 90°C, a etringita é destruída em partes ou em seu todo, embora o monossulfato seja estável, fato que pode fazer a formação atrasada de etringita ultrapassar seu nível crítico para expansão. Para temperaturas de cura inferiores a 70°C, o potencial para FAE é baixa, uma vez que a etringita se encontra estável.

Ainda vale ressaltar que cimentos com alta finura Blaine já foram comprovados como insatisfatórios, uma vez que a demanda de água para sua hidratação aumenta, visto que a área específica a ser hidratada aumenta, havendo uma reação inicial muito rápida com o aditivo, fato que compromete sua eficiência. Cimentos com quantidades elevadas de sílica são aqueles mais indicados para a confecção do CPR, de acordo com Richard *et al.* (1995), uma vez que suas características reológicas e desempenho mecânico são favorecidos, apesar de caracterizar o cimento com uma taxa lenta de pega, fato que evita seu uso em determinadas aplicações.

Cimentos com baixas quantidades de Aluminato Tricálcio (C₃A), Silicato Tricálcio (C₃S) e finura Blaine são aceitáveis para produção dos *Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, uma vez que a baixa finura Blaine reduz a demanda necessária de água e C₃A e C₃S contribuem para aumentar as resistências em idades iniciais do concreto (Safiuddin, 2008).

2.3.1.5 Fibras

Os primeiros usos de concretos com inclusão de fibras aconteceram por volta da década de 1960, com fibras retas de aço e teores que variavam de 90 kg/m³ a 100 kg/m³ de concreto (Figueiredo, 1997). As fibras tem função de reduzir ou evitar fissuras na peça, além de melhorar

a transferência de carga na estrutura. A ductilidade da peça, ou seja, a capacidade que representa o grau de deformação que suporta até o momento de sua fratura, é bastante elevada quando as fibras compõem o traço de concreto. Além disso, a energia de absorção e a dureza também são significativamente melhoradas.

Existe uma grande quantidade de fibras disponíveis para uso nas misturas cimentícias como:

- Fibras de silicatos cristalinos: amianto;
- Fibras de vidro;
- Fibras de metal: aço-carbono e aço-inox;
- Fibras de carbono;
- Fibras vegetais naturais: sisal, côco, cânhamo, entre outras;
- Fibras de polímeros: polietileno e polipropileno.

A grande parte dos estudos que envolvem CPR's faz uso de fibras de aço em sua composição. Mas, de acordo com os estudos apresentados por Gaiofatto e da Silva (2012), o incremento de fibras de polipropileno no CPR proporciona diversas melhorias à mistura. Em comparação às composições sem fibras, aquelas que continham fibras de polipropileno apresentaram ganho de tenacidade e após atingida sua tensão máxima ainda continuam absorvendo energia, tornando o material mais dúctil. Para teores de 1% e 5%, foi possível evidenciar três fases em ocorrência com base no deslocamento imposto pela carga aplicada: regime elástico linear, regime plástico e encruamento. Ainda, foi constatado que o teor de fibras não interfere na trabalhabilidade do concreto, apenas no seu adensamento.

O estudo de Ju *et al.* (2018) apresentou as propriedades mecânicas das fibras no concreto de acordo com a sua percentagem. Foram testadas e comparadas as percentagens de 0%, 0,3%, 0,6%, 0,9% e 1,2%. Para as fibras de polipropileno utilizadas na pesquisa, com 9 mm de comprimento e 30 μ m de diâmetro, notaram-se comportamentos que melhoravam conforme o percentual de fibras na mistura aumentava. Para o percentual de 0,9% em relação à massa de cimento, as fibras atuaram no concreto trazendo uma diferença bastante considerável em seu desempenho se comparado aos demais teores de fibras do estudo.

Ainda, sobre as falhas de compressão relativa a cada teor, que podem ser analisadas de forma visual, os teores de 0,9% e 1,2% são aqueles que melhor conseguem suportar a carga de compressão, como é possível observar através da Figura 5, retirada do estudo supracitado.

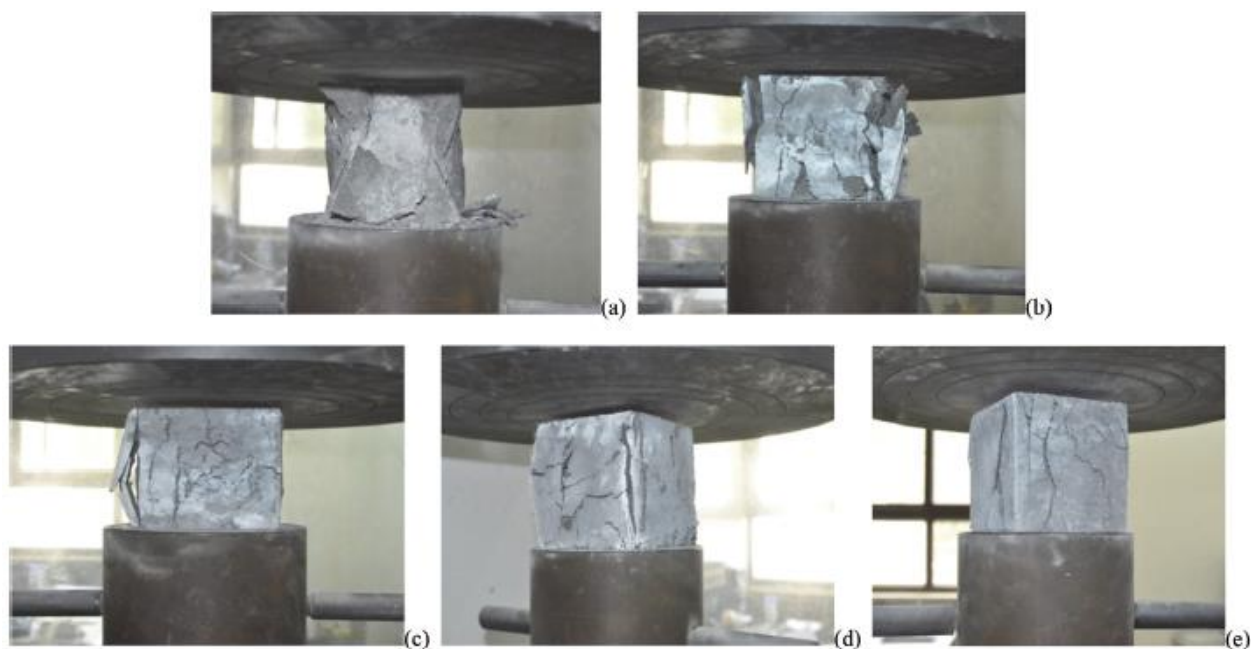


Figura 5 - Absorção de energia das fibras de polipropileno nos teores de (a) 0% , (b)0,3%, (c)0,6%, (d)0,9% e (e)1,2%
Fonte: Ju *et al.*, 2018

Com base nos resultados dos variados ensaios, chegou-se à conclusão de que o teor de 0,9% de fibras de polipropileno, para este traço, representaria o ponto ótimo na curva de acordo com as propriedades observadas no trabalho de Ju *et al.* (2018).

2.3.1.6 Pó de quartzo

O pó de quartzo é inserido na mistura dos CPR pelo seu tamanho, sendo em geral a quantidade passante na peneira 0,075 mm superior a 10%, para fazer a composição de um empacotamento ótimo, uma vez que, por ser muito fino, pode se “encaixar” entre as partículas maiores, fazendo com que o volume de vazios seja reduzido consideravelmente. Além disso, o pó de quartzo, como já apontado por Richard *et al.* (1995), é essencial para a cura térmica do CPR, intensificando as reações pozolânicas.

Quando o concreto é submetido à cura térmica, este tende a elevar sua temperatura e devido a isto iniciam-se as reações pozolânicas. O calor devido à cura térmica ativa outras reações pozolânicas, consumindo o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), que é gerado na hidratação do cimento, e passa a produzir silicato de cálcio hidratado (C-S-H) em maiores quantidade e tamanho. Tal fato provoca uma melhoria na resistência da pasta de cimento e da zona de transição, fazendo com que a espessura em geral seja reduzida (Richard *et al.*, 1995).

O problema que poderia ser causado através de uma reação álcali-sílica ou álcali-agregado é assegurado como improvável, uma vez que estes só acontecem em ambientes cuja água seja um fator em abundância para que os íons no interior da amostra se movimentem livremente. Como o CPR leva baixos teores de água em sua composição, a sua baixa permeabilidade limita a mobilização de íons fazendo com que estas reações não ocorram.

Em relação às quantidades de pó de quartzo utilizadas, observa-se no item 2.3.2.2 que a variação é significativa, mas vale ressaltar estudos mais recentes que apresentam uma quantidade média de pó de quartzo em torno de 20% da quantidade utilizada de cimento na mistura, como é o caso do estudo de Piccinini e Machado (2018).

2.3.1.7 Sílica ativa

A sílica ativa é um pó extremamente fino obtido através da fabricação do silício metálico e normalizado pela ABNT NBR 13956 (2012) e pela NBR 13957 (1997). De acordo com Biz (2001), a sílica ativa atua como pozolana, diminuindo a permeabilidade do concreto e aumentando a resistência ao ataque de agentes agressivos. Também influencia positivamente na resistência mecânica da mistura de Concreto de Pós Reativos e na redução da percentagem de cimento, diminuindo assim os custos com a fabricação deste.

Larrard (1989) e Richard *et al.* (1995) consideram que a sílica ativa tem três principais funções na mistura de CPR, nomeadamente:

- Preencher os vazios entre as partículas maiores de cimento (Figura 6);
- Aprimorar as características reológicas através do efeito lubrificante da perfeita esfericidade de suas partículas básicas;
- Produzir hidratação secundária através de reações pozolânica com a cal resultante da primeira hidratação.

Ilustrando o preenchimento dos vazios entre partículas maiores da mistura de CPR, a Figura 6 retrata tal função comparando as partículas de sílica ativa com as partículas de cimento.

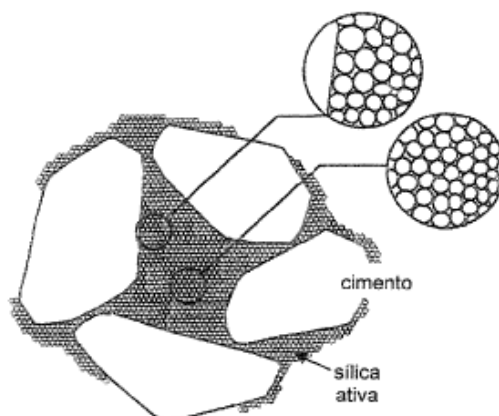


Figura 6 - Preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento por sílica ativa

Fonte: Biz, 2001.

Além desses fatores, a sílica ativa é responsável por fazer a ativação da reação pozolânica, juntamente com o pó de quartzo. Deve-se tomar cuidado na quantidade de sílica ativa a ser utilizada uma vez que, devido às suas minúsculas partículas, a quantidade de água demandada para hidratação delas é maior e este é um dos motivos para o uso dos aditivos superplastificantes se tornar necessário na mistura. Uma das principais características do CPR é manter uma baixa relação *a/c* para que o material atinja elevada resistência e tenha reduzida quantidade de vazios, por conseguinte, se faz necessário o ponderamento da quantidade de sílica ativa a ser utilizada. Em geral a bibliografia trata os valores entre 5% e 25% da massa de cimento.

O uso de sílica ativa nos CPR's contribui para a durabilidade da estrutura, pois reduz a exsudação do concreto fresco e reduz os vazios do concreto já endurecido, tornando-o impermeável aos agentes químicos. Seu uso também está associado a melhores resultados de aderência entre a matriz concreto-substrato.

2.3.2 Dosagem do Concreto de Pós Reativos

A dosagem do Concreto de Pós Reativos é um dos principais fatores para que se consiga o desempenho desejado para o material. Para ser feita a dosagem adequada dos materiais, primeiramente é necessário que haja um estudo relacionado ao empacotamento das partículas presentes na composição da mistura.

2.3.2.1 Distribuição de dimensão de partículas (granulometria)

O Concreto de Pós Reativos visa a redução dos vazios no concreto para que sua densidade seja aumentada e como consequência, o mínimo de defeitos. Para isto sugere-se o emprego de partículas entre 0,5 μm e 2 mm em sua composição. Vanderlei (2004) em seu trabalho explica que a distribuição granulométrica dos grãos que compõem o CPR deve ser estudada de modo a obter um produto com alta densidade, onde os espaços entre as partículas maiores são preenchidos pela classe de partículas imediatamente menor e assim sucessivamente. Este preenchimento das partículas, com partículas ligeiramente menores que elas próprias, é chamado de empacotamento de partículas (*particle packing*). O empacotamento pode se apresentar em dois formatos:

- Empacotamento real de partículas;
- Empacotamento teórico de partículas.

O empacotamento real de partículas é aquele que ocorre com partículas cujo diâmetro é superior a 2 mm, em que o empacotamento ocorre da fração granulométrica maior para a menor pois funciona com uma fração de granulometria menor que a anterior ocupe os vazios deixados pela fração granulométrica maior. Já o empacotamento teórico de partículas acontece para partículas com diâmetros inferiores a 2 mm, tornando-se bastante complicada sua real execução de empacotamento e por isso é chamado de empacotamento teórico.

O empacotamento de partículas (*particle packing*) possui diversos modelos teóricos para a dosagem dos materiais, mas como o CPR é um material com partículas bastante finas, alguns autores como Vanderlei (2004) e Pandolfelli (2009) recomendam os modelos teóricos para compósitos cerâmicos, já que se assemelham ao CPR.

Teoricamente para se conseguir um empacotamento de partículas ideal, a água não deveria se fazer presente uma vez que o cálculo do empacotamento é realizado apenas para as partículas e não contando com a hidratação delas. Mas sabe-se que sem água seria inviável produzir um concreto trabalhável, uma vez que a água entre as partículas atua de forma a lubrifica-las para que elas possam mover-se de forma a tornar o concreto mais fluido. Uma vez que o empacotamento é de suma importância para que o concreto atinja baixa porosidade e alta densidade, o uso de água torna-se o mais reduzido possível para que o empacotamento chegue o mais próximo possível de atingir tais propriedades.

O primeiro dos modelos teóricos de empacotamento de partículas em concreto foi apresentado por Feret (1892), no qual, a resistência máxima é obtida quanto a quantidade de vazios na mistura é a mínima possível, sendo a densidade do empacotamento máxima.

De modo geral, são três os principais modelos de empacotamento de partícula utilizados nos dias atuais para produção de concretos:

- Modelo de Furnas;
- Modelo de Andreassen & Andersen;
- Modelo de Alfred.

O modelo de empacotamento de Furnas foi apresentado no ano de 1931 e é caracterizado como um modelo discreto, cujo princípio é utilizar conjuntos idealizados de partículas para criar sua curva granulométrica. Este modelo caracteriza as partículas por seu diâmetro, volume e densidade e é válido para partículas finas. Este modelo considera o diâmetro das partículas infinito, o que o torna um modelo impossível de ser replicado na prática, e as proporções dos diversos tamanhos de partículas formam uma progressão geométrica (Oliveira, 2013).

Levando tais características em consideração, dependendo do tipo da mistura e de seus materiais, pode ocorrer dois efeitos em seu empacotamento: (a) o efeito parede e (b) o efeito de “afrouxamento” (*loosening*). O efeito parede é caracterizado por um incremento de vazios ao redor das partículas grossas ou da região de contorno, sendo assim não tão eficaz para os Concretos de Pós Reativos uma vez que se deseja evitar ao máximo os vazios na mistura. Já o efeito de afrouxamento é responsável pelo aumento de vazios quando as partículas finas rompem o melhor empacotamento das partículas grossas, também não sendo ideal ao uso do CPR. A equação proposta por Furnas é um procedimento para cálculo do volume aparente de misturas binárias e multicomponentes, representada através da Equação 1:

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D_P^{\log r} - D_S^{\log r}}{D_L^{\log r} - D_S^{\log r}} \right)$$

Equação 1

Onde *CPFT* é Percentagem acumulada de partículas inferiores a D_P (*Cumulative Percentage Finer Than*), D_P é o diâmetro da partícula em questão (mm), D_S é o diâmetro da menor partícula (mm), D_L é o diâmetro da maior partícula (mm) e r a razão entre o volume de partículas retidas na malha de uma peneira e da malha imediatamente inferior a esta.

Castro e Pandolfelli (2009) considera o modelo de Furnas como uma abordagem discreta por considerar as partículas individualmente, considerando que existem pelo menos dois tamanhos diferentes de partículas na mistura e que supostamente as partículas pequenas estão colocadas entre as partículas maiores. Na Figura 7 pode-se observar uma distribuição granulométrica obtida através do emprego do modelo de Furnas para empacotamento de partículas.

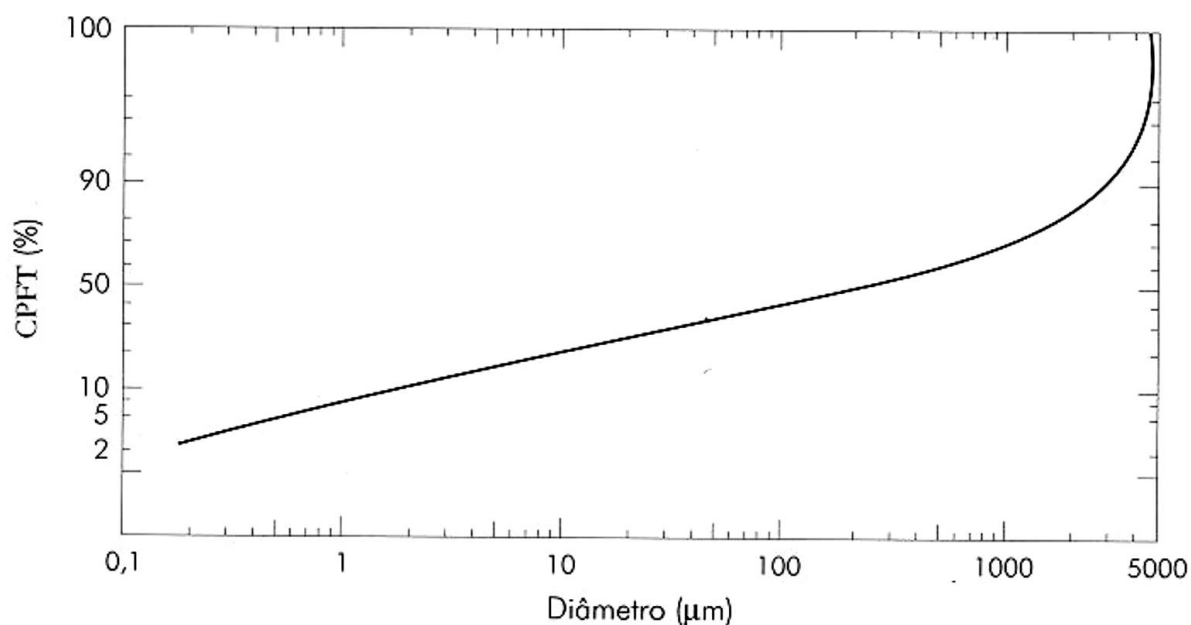


Figura 7 - Curva granulométrica pelo modelo de Furnas

Fonte: UNESP, 2010.

O modelo de Andreassen & Andersen, de 1930, é caracterizado como um modelo contínuo, cujo princípio é utilizar partículas com graduação contínua. Este modelo é caracterizado por ter uma distribuição real, onde são considerados todos os tamanhos de partículas.

Através da Equação 2 é possível perceber que para se conseguir um empacotamento ideal/perfeito é necessário que o diâmetro da menor partícula da mistura seja zero, fato que não é possível na prática, sendo necessário inserir na equação o diâmetro da menor partícula da mistura. Quanto menor for este diâmetro, melhor será o empacotamento de partículas através deste método (Oliveira, 2013).

$$CPFT (\%) = 100 \left(\frac{D}{D_L} \right)^q$$

Equação 2

Onde *CPFT* é a percentagem acumulada de partículas inferiores a *D* (*Cumulative Percentage Finer Than*), *D* é o diâmetro da partícula em questão na distribuição (mm), *D_L* é o diâmetro da maior partícula (mm) e *q* é o coeficiente da distribuição.

O coeficiente da distribuição é a chave para otimização do empacotamento de partículas, proporcionando a máxima densidade de empacotamento. A constante “*q*” trata-se de um valor designado pelo módulo de distribuição granulométrica e para se obter um empacotamento máximo, “*q*” deve estar compreendido entre 0,33 e 0,50 (Silva, 2004). De acordo com Henche e Mazer (2010), na década de 1990 foram feitos diversos testes em computador para comprovar a influência do parâmetro “*q*” no empacotamento das partículas e chegou-se à conclusão de que o melhor valor da constante para proporcionar a maior densidade possível na mistura é de 0,37.

O modelo proposto apresenta uma convergência dos valores das constantes, indicando uma progressão geométrica, como indicado na Figura 8.

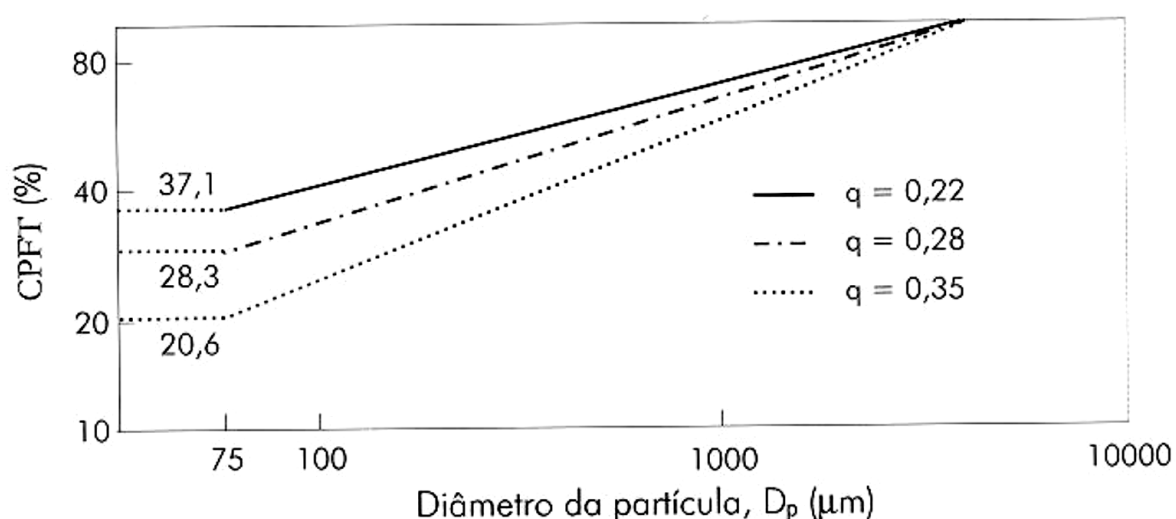


Figura 8 - Curva granulométrica pelo modelo de Andreassen & Andersen

Fonte: UNESP, 2010.

Por fim, o modelo de Alfred ou também chamado de modelo de Andreassen modificado, se enquadra na categoria de modelo contínuo, assim como o modelo supracitado, por assumir partículas com graduação contínua de tamanhos (Oliveira, 2013). Após realizados alguns estudos e observações foi possível concluir que os modelos de Furnas e Andreassen convergem para uma única equação.

Ortega *et al.* (1997) reconhece que a inexistência de partículas infinitamente pequenas podia acarretar desvios significativos no empacotamento de partículas previsto, como era o caso do modelo de Furnas. Assim, incorporando no modelo de Andreassen & Andersen um valor mínimo de tamanho de partícula, que é uma característica de sistemas reais seria possível gerar

uma equação que compatibilizasse melhor os tamanhos das partículas para gerar um empacotamento mais próximo do ideal, no qual a densidade da mistura é a máxima possível. Deste modo, chegou-se à

Equação 3, que como pode ser observado, tem como base a equação proposta no modelo de Furnas, mas estabelecendo o uso da constante “q” apresentada pelo modelo de Andreassen & Andersen.

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right)$$

Equação 3

Onde *CPFT* é a percentagem acumulada de partículas inferiores a D_P (*Cumulative Percentage Finer Than*), D_P é o diâmetro da partícula em questão (mm), D_S é o diâmetro da menor partícula (mm), D_L é o diâmetro da maior partícula (mm) e q é o coeficiente da distribuição.

Nota-se que, caso o valor da menor partícula seja zero, retorna-se à equação de Andreassen & Andersen.

Atualmente, o modelo de Alfred é o modelo de empacotamento de partículas mais recomendado pois se adequa melhor aos sistemas reais. Na Figura 9 pode-se observar a distribuição granulométrica através do modelo de Alfred.

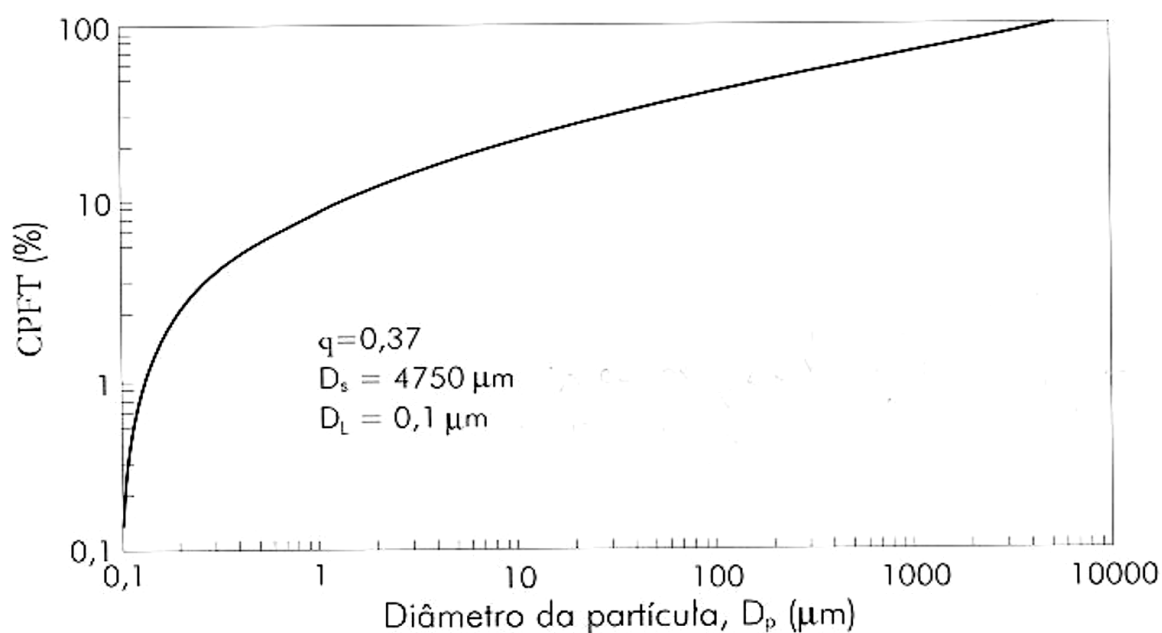


Figura 9 - Curva granulométrica pelo modelo de Alfred

Fonte: UNESP, 2010.

2.3.2.2 Revisão de traços da literatura

A Tabela 1 apresenta algumas das misturas utilizadas para fabricação do Concreto de Pós Reativos de autores que são referência neste tipo de concreto. Os valores dos traços apresentam-se unitários com base na quantidade inicial de cimento.

Ainda na Tabela 1 pode-se observar que desde o início das pesquisas em CPR até as pesquisas mais recentes, não se chegou em um consenso de qual a quantidade ideal para cada material. Também é possível notar que várias pesquisas usaram fibras de aço, outras utilizaram fibras de polipropileno e em outras não foi utilizado nenhum tipo de fibra na mistura. Como já dito anteriormente no item 2.3.1.5, as fibras tem um papel fundamental nas propriedades do concreto, como o aumento na ductibilidade da estrutura. Portanto, as pesquisas que tiveram a inclusão das fibras apresentaram peças mais dúcteis, ou seja, obtiveram um maior grau de deformação até o ponto de ruptura.

Ainda em relação às fibras, observa-se que quando estas são de aço, é necessária uma quantidade maior na mistura, quando comparadas com as fibras de polipropileno que aparecem em quantidades bastantes baixas nos estudos apresentados até o momento e presentes na Tabela 1. Consegue-se assumir, portanto, para as fibras de aço um valor de aproximadamente 10 vezes a quantidade de fibras de polipropileno usada, apenas como um parâmetro comparativo, mas que vem ocorrendo desde as primeiras pesquisas listadas.

Em geral, não se chegou a uma conclusão definitiva em relação à quantidade de fibras de aço na mistura. Já para as fibras de polipropileno, como indicado no item 2.3.1.5, os melhores resultados obtidos através do estudo de Ju *et al.* (2018) foram com 0.9% da quantidade de cimento da mistura. Vale ressaltar que esta performance foi específica para aquele traço desenvolvido naquela pesquisa. Provavelmente caso este traço fosse repetido, poderia apresentar resultados diferentes pois a escolha dos materiais e suas propriedades podem ser alteradas.

Na Tabela 1 ainda é possível observar que, apesar de ser um concreto com baixa relação a/c se comparado aos demais concretos, os traços de CPR apresentados contêm composições com relação a/c desde 0,15 (bastante reduzida) até 0,282 (mais próxima da relação utilizada para concretos comuns), fazendo com que este ainda não seja um fator cuja decisão de quantidade ótima seja unânime, nem mesmo com o passar do tempo, pois observando-se apenas os últimos 10 anos de pesquisa, as relações a/c variam desde 0,179 a 0,250. Tal fator está

diretamente ligado à quantidade de areia e micropartículas que precisam ser hidratadas, além da combinação com o aditivo escolhido para a mistura.

As diferenças entre a quantidade de areia são bastantes expressivas também uma vez que variam de 61,4% a 167% em relação à massa de cimento. Esta diferença é considerável pois em cada um dos traços, além da necessidade de hidratação das partículas em conjunto como aditivo, a granulometria para a mistura foi feita de forma diferente, por vezes contendo peneiras mais grossas (acima da peneira 0,6 mm) ou mais finas (abaixo da peneira 0,150 mm) e até mesmo com métodos de empacotamento de partículas diferentes.

A quantidade de aditivo é o único parâmetro que não pode ser fixado, respeitando uma variação pré-determinada, pois depende de vários ensaios para que seja possível a total hidratação das partículas da mistura em conjunto com a quantidade de água disponível. Outro fator que impede a imposição da quantidade de aditivo é o fato de sua capacidade de aproveitamento estar interligada diretamente à quantidade de água que será utilizada.

Além disso, é necessária análise na escolha da base do superplastificante. Entre os 24 traços apresentados na Tabela 1, aditivos das mais variadas bases foram usados, como poliacrilato, policarboxilato, éter carboxílico modificado de 3ª geração, entre outros. Como já dito no item 2.3.1.1, a quantidade ideal de aditivo deve ser experimentalmente testada e escolhida pois depende do tipo de cimento a ser utilizado na mistura e como este interage com o aditivo selecionado.

Tabela 1 - Traços de Concreto de Pós Reativos da literatura em massa

Autor	Cimento	Areia	Pó de quartzo	Sílica ativa	Aditivo superplastificante	Fibras aço	Fibras polipropileno	Água
Richard e Cheyrezy, 1995	1,000	1,100	0,390	0,230	0,019	0,175	-	0,190
Richard, 1996	1,000	1,433	0,298	0,326	0,027	-	-	0,277
Bonneau <i>et al.</i> , 1996	1,000	1,049	-	0,249	0,018	0,154	-	0,150
V. Matte, 1999	1,000	1,430	0,300	0,325	0,018	0,275	-	0,200
Staquet e Espion, 2004	1,000	1,430	0,300	0,324	0,021	0,218	-	0,230
Biz, 2001	1,000	1,430	0,300	0,320	0,010	-	-	0,290
Vanderlei, 2004	1,000	0,614	0,170	0,177	0,020	-	-	0,216
Vanderlei, 2004	1,000	1,101	0,235	0,246	0,020	-	-	0,216*
Lee <i>et al.</i> , 2007	1,000	1,250	0,350	0,300	0,099	0,056	-	0,186
Vanderlei e Giongo, 2006	1,000	1,101	0,235	0,246	0,020	-	-	0,216
Liu <i>et al.</i> , 2009	1,000	1,250	-	0,250	0,043	0,254	-	0,216
Gaiofatto e da Silva, 2012	1,000	1,100	0,238	0,241	0,065	-	0,010	0,250
Gaiofatto e da Silva, 2012	1,000	1,100	0,238	0,241	0,065	-	0,030	0,250
Gaiofatto e da Silva, 2012	1,000	1,100	0,238	0,241	0,065	-	0,050	0,250
Yazici <i>et al.</i> , 2010	1,000	1,128	0,483	0,232	0,045	-	-	0,179
Yazici <i>et al.</i> , 2010	1,000	1,128	0,483	0,232	0,045	0,186	-	0,179
<i>The concrete Portal</i> **	1,000	1,670	0,310	0,250	0,030	0,200	-	0,250
<i>The concrete Portal</i> **	1,000	1,670	0,310	0,250	0,030	-	-	0,250
Gusmão, 2017	1,000	1,101	0,235	0,246	0,030	-	-	0,180
Ju <i>et al.</i> , 2018	1,000	1,283	0,345	-	0,020	-	0,003	0,190
Ju <i>et al.</i> , 2018	1,000	1,283	0,345	-	0,020	-	0,006	0,190
Ju <i>et al.</i> , 2018	1,000	1,283	0,345	-	0,020	-	0,009	0,190
Ju <i>et al.</i> , 2018	1,000	1,283	0,345	-	0,020	-	0,012	0,190

Fonte: Autoria própria

*Pesquisa realizada também com traços acessórios que possuíam relações de a/c de 0,16, 0,18 e 0,20 além do traço apresentado na Tabela 1.

**http://www.theconcreteportal.com/react_pow.html, acessado em novembro de 2019.

Na Tabela 2 é possível observar os valores máximos, mínimos, média e desvio padrão de cada material apresentado nos 24 traços da literatura pesquisada. Tomando como base o valor da média dos traços, na última coluna, “% do desvio”, quando se analisa a taxa da relação entre o desvio padrão e a média das amostras, tem-se o percentil que o desvio padrão encontrado representa na amostra considerando a média dos valores como o valor de 100%.

Tabela 2 - Relação entre os valores apresentados nos traços da literatura, em massa

Material	Valor máximo	Valor mínimo	Média (\bar{y})	Desvio padrão	% do desvio
Areia	1,670	0,614	1,239	0,219	18%
Pó de quartzo	0,483	0,170	0,309	0,076	24%
Sílica ativa	0,326	0,177	0,262	0,041	16%
Superplastificante	0,099	0,010	0,033	0,021	63%
Fibras aço	0,275	0,056	0,198	0,064	32%
Fibras polipropileno	0,050	0,003	0,017	0,016	91%
Água	0,290	0,150	0,217	0,038	17%

Fonte: Autoria própria

Portanto, com base no procedimento descrito e na Tabela 2, pode-se observar que a maior variação foi atribuída às fibras de polipropileno, uma vez que nenhum dos traços apresentou quantidades próximas. Já a menor variação ficou entre a sílica ativa, água e a areia, onde os valores se apresentaram em geral com baixa taxa de variação. A análise do superplastificante não apresenta muita significância, devido aos motivos anteriormente citados.

2.3.3 Propriedades do Concreto de Pós Reativos

O Concreto de Pós Reativos costuma ser caracterizado principalmente pela sua grande capacidade resistente e durabilidade. A microestrutura é a chave do desempenho do CPR, conferindo-lhe reduzidas porosidade e permeabilidade (Richard *et al.*, 1995). Neste subcapítulo serão apresentadas as diversas propriedades do CPR presente na literatura disponível até o momento.

Como se sabe, o Concreto de Pós Reativos não possui um traço pré-definido para sua produção e devido a tal fator, os dados obtidos através das literaturas disponíveis contêm resultados ligeiramente distintos em suas propriedades. Portanto, neste capítulo os valores das propriedades apresentadas do CPR estarão contidos em intervalos aceitáveis como um valor característico, já que dificilmente serão pontuais.

São diversos os ensaios que podem ser realizados para determinar características ao concreto. Neste capítulo serão explorados, além das propriedades apresentados na Tabela 3, as propriedades e ensaios de caracterização abaixo:

- Resistência à compressão;
- Módulo de Young (ou módulo de elasticidade);
- Resistência à tração na flexão;
- Coeficiente de Poisson;
- Energia de fratura;
- Resistência aos sulfatos;
- Resistência à carbonatação;
- Coeficiente de difusão de íons Cloreto;
- Ensaio de ultrassom;
- Ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio.

2.3.3.1 Propriedades relativas à resistência do CPR

Para se caracterizar um determinado tipo de concreto existem diversos ensaios que podem ser realizados, assim como no estudo apresentado por Wang (2014), onde chega-se a diversos limites indicativos de valores para caracterizar a sua durabilidade de acordo com o tipo de concreto.

Pode-se observar através da Tabela 3 que todas as propriedades possuem uma faixa de variação considerável. Ainda se menciona que valores obtidos de porosidade, resistividade elétrica, coeficiente de difusão e permeabilidade, foram extraídos da revista *Scientific and Technical Report of the French Civil Engineering Association, AFGC*, através da publicação de Bouny (2004).

Tabela 3 - Classificação e valores limite dos indicadores de durabilidade de acordo com a classe do concreto para provetes cilíndricos

Indicador de durabilidade potencial	Classificação e valores limites				
	Muito baixo	Baixo	Mediano	Alto	Muito alto
Porosidade aberta (%) P_{water}	> 16	14 a 16	12 a 14	9 a 12	6 a 9
Porosidade medida por intrusão de mercúrio (%) P_{Hg}		13 a 16	9 a 13	6 a 9	3 a 6
Resistividade elétrica (Ohm.m)	<50	50 a 100	100 a 250	250 a 1000	>1000
Coefficiente de difusão efetiva de cloreto ($10^{-12} m^2.s^{-1}$) D_{eff}	>8	2 a 8	1 a 2	0.1 a 1	<0.1
Coefficiente de difusão de cloreto aparente (medido por um teste de migração) ($10^{-12} m^2.s^{-1}$) $D_{app(mig)}$	>50	10 a 50	5 a 10	1 a 5	<1
Coefficiente de difusão de cloreto aparente (medido por um teste de difusão) ($10^{-12} m^2.s^{-1}$) $D_{app(diff)}$				<5	
Permeabilidade aparente à gases (a uma $P_{ascendente}=2MPa$ e depois secando a $T=105^{\circ}C$) ($10^{-18} m^2$) k_{gas}	>1000	300 a 1000	100 a 300	10 a 100	<10
Permeabilidade à água líquida (a um P_{max} por medição direta da vazão, após saturação) ($10^{-18} m^2$) K_{liq}	>10	1 a 10	0.1 a 1	0.01 a 0.1	<0.01
Tipo de concreto (indicativo) (Denominação europeia EUROCÓDIGO 2 relativas ao f_{ck} do provete circular)		C25 a C35	C30 a C60	C55 a C80	>C80

Fonte: Adaptado de Wang *et al.*, 2014

Pode-se observar na Tabela 3 que através da classe do concreto assume-se qual seu potencial nível de durabilidade. O Concreto de Pós Reativos, apesar de usar cimentos CEM I 42,5 R ou CEM I 52,5 R, atinge valores de resistência superiores a 80 MPa, conferindo assim, através da Tabela 3 de Wang (2014), uma durabilidade potencial alta para este material.

A consistência de um CPR é fluida em geral, apesar da baixa relação *a/c*. O uso de aditivos confere a trabalhabilidade necessária para a mistura, deixando-a com um aspecto viscoso embora autoadensável, facilitando o molde dos provetes e reduzindo a quantidade de vazios nele. Após sua secagem, a retração é quase nula e apresenta uma camada bastante uniforme, sem demasiados poros em evidência.

Sobre o estado fresco relativamente à trabalhabilidade do Concreto de Pós Reativos, Gusmão (2017) em sua pesquisa analisa os valores de consistência de alguns tipos de concretos

e argamassas em relação ao desempenho do CPR, sendo todos inicialmente estipulados para utilização em reparos. Tendo como base a ABNT NBR 13278 (2005) para calcular os valores de ensaio do teor de ar, a ABNT NBR NM 67 (1998) para realização do *slump test* e a ABNT NBR 13276 (2005) para o ensaio do *flow table*, pode-se observar na Tabela 4 os valores obtidos para cada material.

Tabela 4 - Valores das propriedades dos materiais no estado fresco

Material	Trabalhabilidade		Densidade (kg/m ³)	Teor de ar (%)
	<i>Slump test</i> (mm)	Índice de consistência (<i>flow table</i>) (mm)		
Concreto comum	150,0	-	2226,0	15,00
CPR	-	230,0	2302,0	5,63
Argamassa industrializada de reparo 1	-	240,0	2102,0	10,65
Argamassa industrializada de reparo 2	-	270,0	1923,0	7,26
Argamassa industrializada de reparo com aditivo expansor	-	280,0	2270,0	7,35

Fonte: Adaptado de Gusmão, 2017.

Como visto na Tabela 4, o CPR foi o material que apresentou o menor índice de consistência entre os materiais ensaiados e devido ao fato dele ser um material com granulometria fina, atingiu a maior densidade atrelado ao menor teor de ar, que são características já intrínsecas a este tipo de concreto.

A respeito das propriedades mecânicas do concreto, pode-se destacar algumas de acordo com a Tabela 5, que apresenta os valores obtidos pelos mais importantes autores no estudo de CPR.

Tabela 5 - Comparação das propriedades obtidas do CPR de acordo com autores distintos

Característica	Norma	Autor		
		Richard <i>et al</i> (1995)	Bonneau <i>et al</i> (1996)	Bonneau <i>et al</i> (1996)
Resistência à Compressão (MPa)	NP EN 12390-3 (2011)	170 - 230	194 - 203	163 - 217
Módulo de elasticidade (GPa)	NP EN 12390-13 (2014)	50 - 75	59 - 66	46 - 49
Resistência à Tração na Flexão (MPa)	NP EN 12390-5 (2009)	30 - 60	32	-
Coefficiente de Poisson	NP EN 12390-5 (2009)	-	0,20 - 0,24	0,19
Energia de fratura (J/m ²)	TC 50-FMC RILEM	20000 - 40000	35500 - 47300	-

Fonte: Autoria própria

Através da Tabela 5 pode-se observar que, apesar dos valores das propriedades apresentadas oscilarem, eles seguem um padrão característico do CPR, onde a resistência à

compressão é em torno de 200 MPa, o módulo de elasticidade é superior a 40 GPa e a resistência à tração é superior a 20 MPa. Comparando o CPR com concretos de alta resistência (CAR), o CPR representa um ganho de resistência à compressão de aproximadamente 100% em relação aos valores encontrados para o CAR, que fica entre 50 MPa e 100 MPa. Ainda, o módulo de elasticidade de um concreto comum ou até mesmo um CAR está entre 14 MPa e 42 MPa, já o valor apresentado pelo CPR é bastante superior (maior que 46 MPa) aos demais tipos de concreto, quando se observam os valores da Tabela 5.

Em relação aos valores de energia de fratura, o CPR com fibras pode ser considerado mais dúctil se comparado a outros concretos, uma vez que a sua energia de fratura é superior aos concretos tradicionais. Os concretos usuais possuem uma energia de fratura entre 100 J/m² e 150 J/m², como indica Baron (1982), enquanto a energia de fratura do CPR está entre 20000 J/m² e 47300 J/m², como indicado na Tabela 5.

2.3.3.2 Relativamente à durabilidade do CPR

Um dos ensaios recorrentes ao Concreto de Pós Reativos para analisar sua durabilidade é o ciclo de gelo-degelo. Para Richardson *et al.* (2011), uma estrutura durável deve apresentar as necessárias condições de serviço, resistência e estabilidade durante a sua vida útil, sem perdas excessivas e sem requerer excesso de manutenção. Dito isso, torna-se importante analisar a influência que a ação do gelo-degelo tem na durabilidade.

No caso do gelo se formar nos poros presentes no concreto, a pressão nas paredes aumentará, podendo provocar danos na matriz cimentícia, mas a presença de bolhas de ar no betão pode permitir um alívio e dissipação dessas pressões. Quando o gelo se forma dentro destes espaços, atrai a água dos capilares, diminuindo assim as pressões hidráulicas passíveis de ocorrerem. Piltner e Monteiro (2000) verificaram que quando o gelo se forma nos vazios preenchidos por ar, a matriz cimentícia tende a retrair. No entanto, o que contribui com a resistência aos ciclos de gelo-degelo não é a quantidade de vazios presente no concreto, mas a dimensão do vazio e a distância entre um vazio e outro.

Através do estudo de Juanhong *et al.* (2009), foram feitos diversos ensaios referentes à durabilidade do CPR. O desempenho do CPR aos ciclos gelo-degelo foi consideravelmente superior aos concretos comuns. Enquanto os concretos comuns conseguem superar por volta de 300 ciclos gelo-degelo, após 1600 ciclos gelo-degelo o Concreto de Pós Reativos ainda não

apresentava nenhum sinal de fissuras na superfície dos provetes, sua perda de peso foi nula e seu módulo de elasticidade dinâmico teve uma diminuta variação.

Além dos ensaios de gelo-degelo, Juanhong *et al.* (2009) apresentam alguns outros ensaios para caracterizar a durabilidade do CPR, como o ensaio de resistência aos sulfatos, que simula sua ação em um ambiente acelerado. O mecanismo de ataque dos sulfatos consiste em reagir com alguns compostos do cimento, produzindo reações expansivas, podendo ocasionar fissuras e trincas ou até mesmo danos mais sérios nas estruturas a médio e longo prazos. Para este ensaio, normalizado pela ASTM C1012 (2004), foram comparados provetes imersos em uma solução apenas de água e provetes imersos em uma solução de sulfato de sódio.

Após ficarem imersos, os provetes foram colocados em estufa a uma temperatura de 90°C por 48 horas para secagem, indicando um ciclo completo para a análise. A cada ciclo completo os provetes eram pesados. Em geral o peso dos provetes não se alteraram. Além disso, foram observadas as variações de resistência à compressão dos provetes em condições iniciais, após 10 ciclos, 20 ciclos e 30 ciclos, tanto para os provetes que se mantiveram em solução aquosa quanto para aqueles que ficaram imersos na solução de sulfato.

Pôde-se observar que a resistência do CPR alterou apenas 2% em comparação à condição inicial e após 30 ciclos, pois devido à baixa relação a/c e a ótima compacidade do CPR, confere a ele impermeabilidade e assim dificulta a permeabilidade do sulfato na estrutura. Ademais, a alta temperatura de 90°C acelera a hidratação secundária da sílica ativa e a resistência do concreto continua a aumentar com o tempo. No entanto, a resistência do concreto curado na água não aumenta consideravelmente, visto que a hidratação secundária da sílica ativa no início acontece lentamente. A corrosão apresentou-se apenas na superfície, indicando a excelente durabilidade do CPR para mais de 50 anos.

Outrossim, a resistência à carbonatação é outro parâmetro bastante importante para os concretos, uma vez que ele está diretamente ligado à corrosão das armaduras. Para que a carbonatação ocorra são necessários três parâmetros: umidade, oxigênio e gás carbônico, os quais estão sempre presentes no ambiente. De forma resumida, o processo de carbonatação tem início quando o dióxido de carbono dissolvido em água, formando o ácido carbônico (H_2CO_3), é difundido nos poros de concreto (difusão) e reage com o hidróxido de cálcio $Ca(OH)_2$ resultante do processo de hidratação do concreto. Desta reação resultam cristais de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e a diminuição da alcalinidade do concreto associado à redução do pH do concreto. A redução da alcalinidade do concreto promove o processo de corrosão das

armaduras, porque contribui para a destruição da camada de despassivação das armaduras, ficando exposta ao desenvolvimento da corrosão.

O ensaio de resistência à carbonatação, normalizado pela ASTM C876 (2015), foi realizado no estudo de Juanhong *et al.* (2009), no qual os provetes são depositados em uma câmara de carbonatação para acelerar os resultados. Neste estudo as condições da câmara de carbonatação são com um teor de CO₂ correspondente a 20% dos gases no interior da câmara de carbonatação e uma temperatura de 20°C. Nessas condições os provetes estariam expostos à uma realidade mais agressiva com o intuito de acelerar as reações de carbonatação do concreto, correspondendo aproximadamente a um período de 50 anos das condições reais a cada 28 dias que os provetes permanecem na câmara.

Passados 28 dias da colocação dos provetes na câmara de carbonatação, a profundidade de carbonatação obtida dos provetes retirados da câmara de carbonatação foi de zero, sendo que para concretos comuns a profundidade de carbonatação é tida proporcional à raiz quadrada da concentração de gás carbono presente. Esta exposição na câmara de carbonatação a estas condições de concentração e temperatura corresponde a um período de degradação em condições naturais de 50 anos, indicando uma ótima resistência à corrosão do Concreto de Pós Reativos, uma vez que passados 28 dias nessas condições de ensaio a profundidade carbonatada foi nula. Tal resultado foi obtido principalmente pelo fato de existir no CPR uma quantidade mínima de água para que o Ca(OH)₂ e o CO₂ consigam reagir, evitando assim a corrosão da estrutura.

Ainda em relação à corrosão das armaduras no concreto, o coeficiente de difusão de íons cloreto no CPR é uma propriedade relevante para caracterizar a durabilidade do CPR. A difusão iônica acontece quando se busca o equilíbrio pela diferença de concentração de cloretos encontrados dentro e fora do concreto, gerando o deslocamento dos íons. Segundo Zhang e Gjörv (1994), a sucção capilar pode dominar a penetração da camada superficial do concreto que é muito porosa e parcialmente saturada, mas, se a porosidade for reduzida ou o concreto for úmido, o mecanismo de difusão pode dominar a penetração de íons cloreto. Ainda, a penetração de íons cloreto não reduz a resistência do concreto e não altera a sua aparência superficial (Hilsdorf *et al.*, 1995).

Através do estudo de Juanhong *et al.* (2009), o coeficiente de difusão de íons cloreto obtido para o CPR foi de $0,405 \cdot 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}^{-1}$, que indica aproximadamente metade do valor obtido pelo C80/95, um concreto de alta resistência. O coeficiente de difusão de íons cloreto do

CPR foi consideravelmente baixo devido à reduzida quantidade de água utilizada na mistura e por consequência da menor porosidade no concreto e sua elevada densidade.

Pormenorizando sobre as propriedades do CPR, Washer *et al.* (2004) estudaram ensaios ultrassônicos em provetes de Concretos de Pós Reativos para fornecer dados iniciais a respeito da velocidade de propagação de ultrassons e chegaram a algumas conclusões a respeito deste material. Devido à densidade do Concreto de Pós Reativos ser superior à de outros concretos, pode-se observar no estudo de Washer *et al.* (2004) uma praticidade em utilizar os modos de eco-pulso para distâncias superiores a 400 mm, facilitando a aferição dos seus valores. Em relação às ondas ultrassônicas e sua propagação no CPR, elas foram estabelecidas em 1 MHz como um valor suficiente para realizar os ensaios neste tipo de material, quando o valor padrão nos demais tipos de concreto gira em torno de 50 kHz. Além disso, notou-se que as fissuras em CPR podem ser detectadas usando um equipamento padrão de ultrassom.

Sobre a velocidade de propagação das ondas em concretos, Whitehurst (1951) estabeleceu alguns intervalos para definir a qualidade do concreto através deste parâmetro. Para concretos que possuem uma velocidade de propagação de ondas, este apresentou melhor classificação com base na sua qualidade. Tal informação encontra-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Relação entre a qualidade do concreto e a velocidade de impulso de onda

Velocidade de propagação da onda ultrassônica no concreto (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	EXCELENTE
3500 a 4500	BOM
3000 a 3500	REGULAR
2000 a 3000	MAU
< 2000	PÉSSIMO

Fonte: Whitehurst,1951.

A pesquisa realizada por Washer *et al.* (2004) indica valores de velocidade longitudinal de propagação de 5000 m/s com desvio padrão de 2%, portanto, como já esperado, o CPR possui uma excelente qualidade ao encaixar os valores apresentados na Tabela 6, com os valores propostos por Whitehurst. Ainda, observou-se que as fibras na mistura de concreto têm influência na velocidade de ondas ultrassônicas, sendo seus valores ligeiramente inferiores para os concretos isentos de fibras.

2.3.4 Aplicações

O Concreto de Pós Reativos vem sendo utilizado em obras de grande porte para que a estrutura apresente mais modernidade e eficiência, propiciando vãos livres amplos, estruturas esbeltas, resistências maiores e um concreto mais coeso devido ao agregado miúdo da mistura e a baixos teores de relação água/cimento, reduzindo a ação de agentes externos que possam prejudicar o concreto. A principal aplicação do CPR é em estruturas pré-fabricadas, sejam tabuleiros para pontes, vigas, colunas, estruturas espaciais leves, placas de revestimento de túneis, entre outros (Biz, 2001).

O CPR teve sua primeira aplicação, e uma das mais conhecidas até hoje, em 1997 no Canadá, a passarela de Sherbrook (ver Figura 10). A passarela tem 60 metros de comprimento ao todo, sendo 6 módulos pré-fabricados de 10 metros de comprimento e 3,5 metros de largura. A estrutura bastante leve foi projetada de acordo com um modelo de treliça tridimensional em que até as diagonais da peça foram feitas em CPR. A espessura do tabuleiro não passou dos 3 cm. As peças da ponte foram submetidas a cura térmica sob temperatura de 90°C e as diagonais foram anteriormente submetidas a um tratamento por pressão. Armaduras passivas não foram necessárias na construção desta passarela, o que aponta um marco nas vantagens deste tipo de concreto (Vanderlei, 2004).



Figura 10 - Passarela de Sherbrooke, Canadá

Fonte: Vanderlei, 2004.

Esta solução construtiva foi empregada também na revitalização de uma ponte canadense, em que o tabuleiro e o pavimento originais foram substituídos por uma laje de CPR com apenas 5 centímetros de espessura. Outro exemplo é a passarela de Seonyu, que liga a capital sul coreana (Seoul) à ilha de Seonyu, localizada em um parque com diversas espécies de bambus (ver Figura 11). Nesta passarela construída em 2002, o vão livre é de 120 m e seu

tabuleiro tem apenas 3 cm de espessura, buscando a obra homenagear a flexibilidade do bambu (Lafarge, 2010).



Figura 11 - Passarela de Seonyu, Coréia do Sul

Fonte: Lafarge, 2010.

Em 2014 foi aplicado o CPR mais uma vez para fim estrutural na concepção da ponte que liga o museu MuCEM (*Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée*) ao forte de Saint-Jean, na França. A passarela tem um comprimento de 130 m sendo que possui vão livre de 115 m até a chegada ao museu, como pode ser observado através da Figura 12.



Figura 12 - Museu MuCEM, Marselha, França

Fonte: Fávero, 2016.

Ainda como exemplo de soluções construtivas, Yan (2009) estudou o comportamento de barreiras em CPR e concluiu que apesar das barreiras feitas de CPR terem um custo maior por metro cúbico que aquelas feitas de concreto armado, elas são mais duráveis, tendo portanto um custo de manutenção menor que as barreiras de concreto armado. Além disso, as seções das barreiras de CPR foram consideravelmente menores que as feitas com concreto armado. Em geral, as barreiras feitas em Concreto de Pós Reativos foram consideradas melhores pela sua alta durabilidade e seu custo a longo prazo serem mais vantajosos que as barreiras de concreto armado.

Outra grande aplicação do CPR é no reparo de estruturas danificadas. Alguns pesquisadores como Gusmão (2017) e Tayeh *et al.* (2015) analisaram as vantagens do CPR em relação a outros materiais tradicionais de reparo, de acordo com diversos ensaios e parâmetros feitos comparativamente ao Concreto de Pós Reativos. Lee *et al.* (2007) concluíram que o CPR é um excelente material para reparos uma vez que, enquanto as argamassas de alta resistência e os concretos comuns após 1000 ciclos de congelamento e descongelamento perdem resistência e adesão de forma drástica, os CPRs apresentam uma variação consideravelmente inferior, indicando que são mais duráveis. Além disso, com base nos ensaios de extração de aço, o CPR proporcionou uma melhor adesão ao aço tal qual melhor durabilidade, quando foi submetido às mesmas condições ambientais dos concretos comuns e argamassas de alta resistência.

3 Programa experimental

O Concreto de Pós Reativos (CPR) exige que vários aspectos sejam estudados, nomeadamente os vários componentes e a dosagem, antes do seu fabrico. Por este fato, foi desenvolvido um programa experimental que será apresentado no item 3.2, contendo as etapas que foram necessárias para chegar à equação do traço ideal de CPR e atingir os objetivos deste trabalho.

Como apontado ao longo do capítulo 2, a composição dos traços de CPR é formada por cimento, sílica ativa, pó de quartzo, areia, água, fibras e aditivo superplastificante. Para conseguir atingir os objetivos desta pesquisa, inicialmente foram fixados alguns materiais para que o cálculo dos demais materiais fosse facilitado. Os materiais selecionados para serem fixados foram o cimento, pó de quartzo, fibras de polipropileno e aditivo superplastificante. Os demais materiais foram variados conforme indica o item 3.4.

Será apresentado inicialmente o estudo preliminar no qual este trabalho foi baseado e em seguida as etapas do programa experimental para realização do estudo. Em seguida serão apresentados os materiais escolhidos para o desenvolvimento deste trabalho, seguido dos critérios de seleção e quantidades utilizadas. Por fim será decorrido sobre o preparo dos provetes necessários para os ensaios, tal como a metodologia aplicada para ensaiá-los, assim como a maneira em que se procedeu para encontrar a equação ideal do CPR, que indica a quantidade necessária de cada material para que sejam obtidas as melhores propriedades possíveis.

Outrossim, serão apresentadas as metodologias usadas para caracterizar o novo Concreto de Pós Reativos, tal como resistência à compressão e à flexão, teor de ar, índice de vazios, absorção e porosimetria.

3.1 Estudo preliminar

O estudo preliminar que baseou esta pesquisa foi realizado nos laboratórios de aglomerantes e argamassas, de agregados e de ensaios de argamassas e concretos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus Curitiba, em 2018 durante a elaboração de um projeto de iniciação científica. Para o estudo preliminar foram desenvolvidos

17 traços de CPR, distintos nas quantidades de material de cada mistura como pode-se observar através da Tabela 7.

Tabela 7 - Traços iniciais do delineamento experimental completo

Traço	C	SA	PQ	Areia	FP	AS	Água
1	-	5% de C	18% de C	(1-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,20.(C+SA)
2	-	15% de C	18% de C	(1-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,20.(C+SA)
3	-	5% de C	18% de C	(1-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,24.(C+SA)
4	-	15% de C	18% de C	(1-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,24.(C+SA)
5	-	5% de C	18% de C	(2-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,20.(C+SA)
6	-	15% de C	18% de C	(2-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,20.(C+SA)
7	-	5% de C	18% de C	(2-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,24.(C+SA)
8	-	15% de C	18% de C	(2-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,24.(C+SA)
9	-	3% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,22.(C+SA)
10	-	17% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,22.(C+SA)
11	-	10% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,18.(C+SA)
12	-	10% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,26.(C+SA)
13	-	10% de C	18% de C	(0,8-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,22.(C+SA)
14	-	10% de C	18% de C	(2,2-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,22.(C+SA)
15	-	10% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,22.(C+SA)
16	-	10% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,22.(C+SA)
17	-	10% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,12% de C	4% de (C+SA)	0,22.(C+SA)

Legenda:

C - Quantidade de cimento;

SA - Quantidade de sílica ativa em relação à massa de cimento;

PQ - Quantidade de pó de quartzo em relação à massa de cimento;

FP - Quantidade de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento;

AS - Quantidade de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento;

As quantidades de cada traço tiveram esta faixa de variação indicada através da Tabela 7 como sendo as quantidades possíveis para cada material atuar em seu máximo e mínimo valor, obtidos através da literatura e serão explanadas no item 3.4 de forma mais detalhada.

Os materiais utilizados para descrever a equação ideal do CPR para o estudo preliminar foram diferentes daqueles usados para fabricação dos provetes desta tese, pois muitos dos materiais empregados foram provindos de indústrias locais brasileiras, não comercializadas em Portugal.

Por esta razão a quantidade de aditivo do estudo preliminar (4% da quantidade de cimento e sílica ativa) é alterada da quantidade utilizada para esta pesquisa (1,2% da quantidade de cimento e sílica ativa) pois, como foi referido no item 2.3.1.1, o aditivo deve passar por alguns testes de concordância com o cimento utilizado para otimizar seu uso na mistura. Os demais materiais seguem as mesmas características dos materiais utilizados nesta tese, principalmente com base na granulometria.

O aditivo selecionado para este trabalho é caracterizado por ser um superplastificante a base de eter-policarboxilatos com característica de ser um alto redutor de água na mistura de concreto, cuja densidade é de $1060 \pm 20 \text{ kg/m}^3$, sua coloração é marrom, o teor de cloretos é inferior a 0,1% e de álcali é inferior a 1%. O teor de sólidos não é fornecido pelo fabricante.

A areia utilizada para fabrico dos provetes para ensaio é uma areia disponível no mercado e utilizada frequentemente na elaboração de argamassas e concretos. As areias foram separadas em suas quantidades através do modelo de Alfred (item 2.3.2.1), onde as malhas das peneiras a serem utilizadas variaram desde 0,075 mm até 2,4 mm considerando a série normal de peneiras da ABNT NBR 7211 (2005).

O tipo de cimento escolhido para este trabalho foi o CP V – ARI, cujo módulo de finura Blaine é superior à $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$, não contém nenhum material pozolânico e apresenta uma resistência à compressão superior à 34 MPa aos 7 dias, conforme consta da ficha técnica do fabricante.

As fibras utilizadas foram de polipropileno, cujo peso específico é de $0,91 \text{ g/cm}^3$, com alongamento de 80%, comprimento de 12 mm e diâmetro de 18 μm .

O material selecionado para representar a parcela relativa ao pó de quartzo foi o material adquirido no comércio local, o qual apresentou os seguintes parâmetros de granulometria após submetido ao ensaio de granulometria: a percentagem retida na peneira 0,075 mm foi de 0,45% e a percentagem retida na peneira 0,045 mm foi de 7,0%, conferindo um material extremamente fino e que é capaz de atuar preenchendo os vazios presentes na mistura.

A sílica ativa selecionada para realização deste trabalho foi oferecida por uma empresa da região e possui massa específica de $2,2 \text{ g/cm}^3$.

Estes materiais que compuseram o CPR foram reproduzidos conforme os traços indicados em provetes cilíndricos de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, com a aplicação de desconfrante para facilitar a extração do provete no molde. Passadas 24 horas, os provetes foram desmoldados e colocados no processo de cura térmica em banho-maria a uma temperatura de 90°C onde permaneceram até ao dia do ensaio.

Decorridos 28 dias após o fabrico, os provetes foram retirados do banho-maria e ensaiados à compressão. Os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão estão indicados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de resistência à compressão aos 28 dias dos provetes do estudo preliminar

Traço	CPR 1	CPR 2	CPR 3	CPR 4	CPR 5	CPR 6	Média (\bar{y})	Desvio padrão (σ_p)
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
1	42,99	87,62	51,04	45,99			56,91	20,74
2	72,94	83,36	86,25	90,67	68,36		80,32	9,34
3	83,57	67,94	72,36	25,68	59,04		61,72	22,00
4	64,94	84,67	67,88	77,51	69,15		72,83	8,10
5	66,62	48,1	44,47	56,2	57,15		54,51	8,64
6	57,78	71,73	63,67	72,99	71,57		67,55	6,59
7	62,62	61,1	67,1	46,26	47,73		56,96	9,38
8	75,51	81,3	46,89	62,99	70,04	75,78	68,75	12,37
9	58,46	35,21	80,57	67,2	47,52	36,57	54,26	17,88
10	83,51	52,57	90,25	70,46	84,57	94,2	79,26	15,36
11	109,04	133,77	117,93	90,04	128,45	92,56	111,97	18,16
12	96,56	124,03	108,98	73,88	89,99	89,78	97,20	17,38
13	47,94	58,04	45,47	26,42			44,47	13,20
14	86,51	105,77	124,56	108,67	76,73	114,67	102,82	17,90
15	87,78	102,35	92,3	128,3	74,83	126,45	102,00	21,56
16	100,67	105,98	80,57	112,77	69,41		93,88	18,20
17	123,56	103,04	117,88	126,82	87,62		111,78	16,30

Considerou-se a média dos valores de resistência à compressão dos provetes do estudo preliminar para decidir quais dos traços seriam estudados nesta tese, uma vez que o objetivo principal é encontrar as quantidades ideais de cada material utilizado na produção do CPR para atingir as melhores propriedades possíveis, em específico, a maior resistência à compressão do concreto.

Com base nos valores de resistência, retirou-se da amostra aqueles que tiveram os menores resultados. Portanto, os traços 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 14 e 15 foram escolhidos dentre os 17 anteriormente estudados, conforme os valores prévios obtidos para serem reproduzidos e analisados neste trabalho.

3.2 Delineamento experimental

O programa experimental, ou ainda chamado delineamento experimental, indica os processos e escolhas feitos para atingir os objetivos do trabalho, assim como a escolha dos materiais e dos ensaios a serem executados.

O programa experimental foi realizado em grande parte nos laboratórios de estruturas e resistência dos materiais e de materiais de construção do Instituto Politécnico de Bragança, com exceção do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio que foi realizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná no laboratório de ensaios de argamassas e concretos.

Para esta pesquisa foram desenvolvidos alguns passos para que o objetivo principal seja atingido: encontrar uma equação que represente uma mistura ótima do CPR onde a quantidade dos materiais está idealmente calculada através do método de regressões lineares múltiplas. O procedimento de estudo adotado neste trabalho seguiu as etapas esquematizadas na Figura 13.

Seguindo a Figura 13 que indica o delineamento experimental desta pesquisa, pode-se observar que a primeira ação necessária é a seleção dos materiais a serem utilizados na pesquisa, assim como um estudo de granulometria e quantidades a serem utilizadas nas misturas. A seleção dos materiais é feita através das características necessárias a serem cumpridas, como o tamanho das partículas por exemplo, como já fora detalhado no item 2.3.1.

O estudo de granulometria da areia é feito através de um dos métodos de compactação de partículas. Para este trabalho optou-se pela realização do estudo da granulometria da areia

através do empacotamento de partícula (*particle packing*) do modelo de empacotamento de Alfred.

Como segunda ação, é necessário definir a quantidade a utilizar de cada componente para cada traço. A quantidade dos materiais variou de traço para traço, com exceção dos materiais que foram pré-fixados em seus valores, como é o caso do cimento.

Para esta etapa experimental, foram obtidos os traços conforme a variação dos materiais através dos valores máximos, mínimos e intermediários estabelecidos para eles, variando em suas quantidades dessa maneira. Selecionados os nove traços já referidos, moldaram-se três provetes prismáticos para cada uma das composições, resultando no total 27 provetes.

Após a desmoldagem, ocorrida ao fim de 24 horas, os provetes iniciaram o processo de cura térmica e passados 28 dias os provetes foram ensaiados tanto à flexão quanto à compressão. Com os dados de resistência à compressão, realizou-se uma análise de *outliers* para então inserir os valores com significância estatística no cálculo da equação ideal do CPR através da regressão linear múltipla desses valores.

Após a análise dos dados através da regressão linear múltipla, pretende-se obter a equação ideal do CPR que indique quais são as quantidades ótimas do novo traço para se obter o melhor valor de resistência, tendo em conta os diferentes materiais e quantidades presentes nesta pesquisa.

Para o novo traço de CPR encontrado pretende-se analisar outras propriedades, pelo que serão produzidos mais provetes devido a maior quantidade de ensaios, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

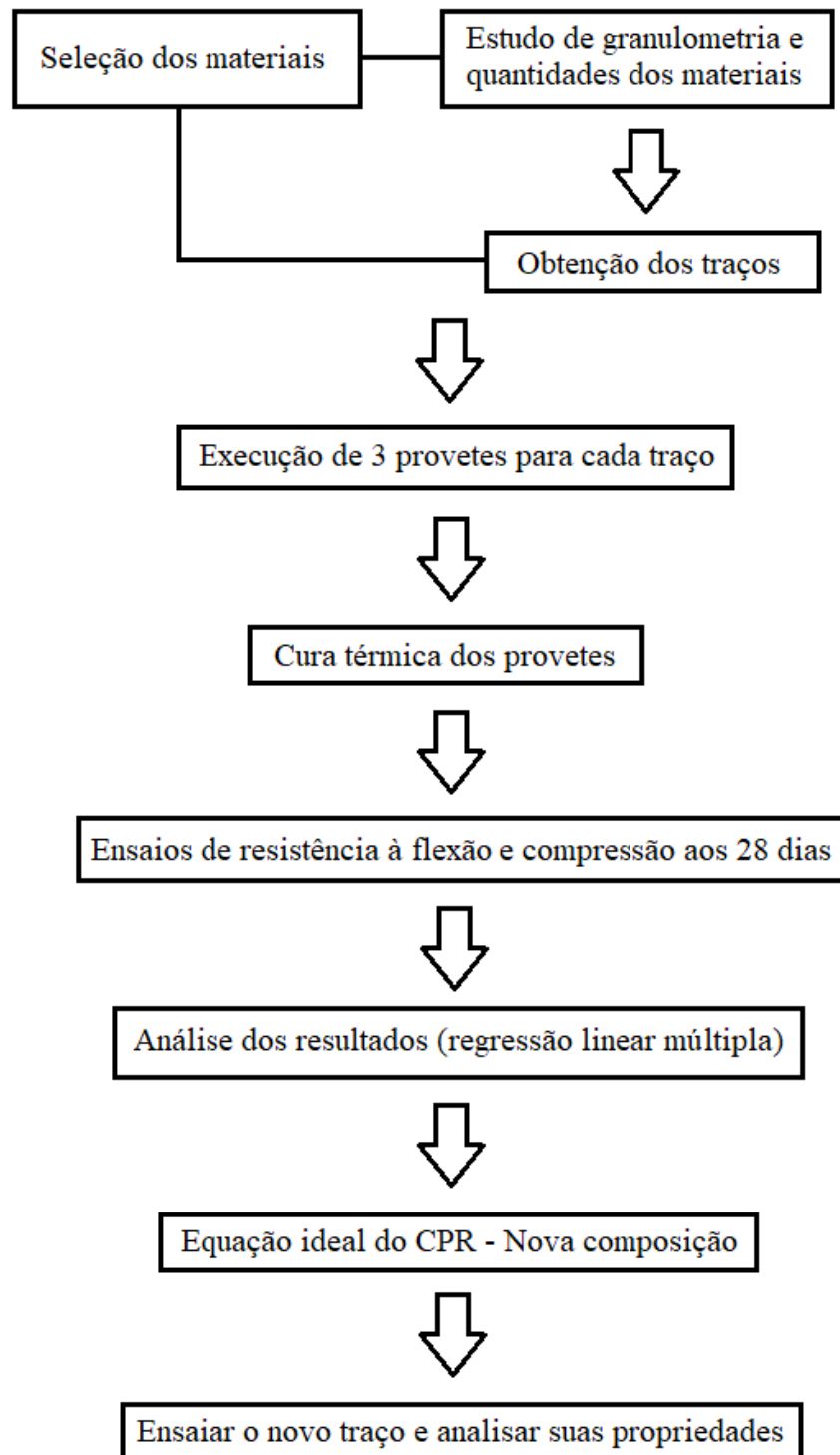


Figura 13 - Etapas do delineamento experimental

Os métodos de cada uma das fases apresentadas na Figura 13 seguem descritos de forma mais detalhada pelos itens 3.3 a 3.8.

3.3 Caracterização dos materiais

Uma das grandes diferenças do Concreto de Pós Reativos em relação ao concreto tradicional é o uso de materiais não convencionais em sua mistura para conferir as propriedades desejadas características de um CPR. Estes materiais devem ser escolhidos de forma criteriosa, para então atingir uma granulometria ideal e realizar as reações esperadas, como as reações pozolânicas.

Com base no capítulo 2, os materiais utilizados para descrever a equação ideal do CPR apresentam-se descritos nos itens 3.3.1 a 3.3.6.

3.3.1 Aditivo superplastificante

Inicialmente testaram-se três tipos de superplastificantes, tanto através do estado fresco pela sua trabalhabilidade, quanto no estado endurecido pela diferença apresentada na resistência à compressão de cada aditivo testado em provetes prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm após 28 dias. As propriedades de cada um dos aditivos encontram-se descritas na Tabela 9.

A decisão ocorreu entre os três aditivos especificados na Tabela 9 por serem os aditivos disponíveis para uso presentes no laboratório de materiais de construção do Instituto Politécnico de Bragança, que já haviam sido utilizados para produção de concretos e argamassas com granulometria mais fina que a usual e com propriedades que priorizam a elevada resistência e obtiveram bons resultados.

Além disso, os três aditivos apresentam características específicas para concretos com classe de resistência alta e têm como objetivos obter maiores resistências mecânicas às primeiras idades, reduzir a quantidade de água necessária na mistura e melhorar a trabalhabilidade do concreto, tornando-o adensável. A diferença entre os aditivos está principalmente na sua base química, teor de sólidos e pH, como pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9 - Aditivos testados para fabrico do CPR

Marca	Aditivo A	Aditivo B	Aditivo C
Base química	Policarboxilato modificado	Polímeros	Éter policarboxílico
Densidade	1,07 ± 0,02 kg/dm ³	1,07 ± 0,02 kg/dm ³	1,04 ± 0,02 kg/dm ³
pH	4,5 ± 1,0	6,0 ± 1,0	5,3 ± 1,0
Coloração	Castanho claro	Âmbar	Castanho
Teor de sólidos	35,8 ± 1,7 %	-	18,0 ± 1,8 %
Teor de cloretos	≤ 0,1%	≤ 0,1%	≤ 0,1%

Após feita uma análise qualitativa na qual foi observada a diferença de consistência e trabalhabilidade de cada aditivo para a execução de um traço-base de CPR (traço 11 do estudo preliminar) e após os provetes serem ensaiados à compressão e à flexão, passados 28 dias em cura térmica a 60°C, os resultados da análise de consistência e resistência encontram-se apresentados na Tabela 10.

As quantidades utilizadas foram as máximas recomendadas pelos fabricantes dos aditivos, considerando que a quantidade de aditivo na mistura nunca deve ser superior a 5% da quantidade de cimento.

Tabela 10 - Características dos aditivos selecionados

Marca	Aditivo A	Aditivo B	Aditivo C
Quantidade utilizada*	1,2% da quantidade de cimento e sílica ativa	1,0% da quantidade de cimento e sílica ativa	1,5% da quantidade de cimento e sílica ativa
Consistência	Bastante adensável	Pouco adensável	Pouco adensável
Resistência à flexão aos 28 dias (MPa)			
Provete 1	29,94	27,69	26,94
Provete 2	34,38	29,19	26,19
Provete 3	30,69	28,44	26,19
Média (\bar{y})	31,67	28,44	26,44
Desvio padrão (σ_p)	2,3767	0,75	0,43301
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)			
Provete 1	100,92	82,03	63,7
Provete 2	91,48	80,84	69,37
Provete 3	87,89	83,79	68,44
Provete 4	100,44	78,18	71,83
Provete 5	97,87	89,38	75,89
Provete 6	100,27	87,85	79,61
Média (\bar{y})	96,48	84,18	71,47
Desvio padrão (σ_p)	5,486	4,264	5,655

*Quantidades máximas indicada pelos fabricantes

Pode-se observar através da Tabela 10 que os valores de resistência, tanto à flexão quanto à compressão, tiveram uma expressividade significativa considerando as médias obtidas (\bar{y}) para cada aditivo. Comparando o aditivo A aos demais, este tem um incremento de resistência para a mesma mistura de 11% em relação ao aditivo B e de 20% em relação ao aditivo C em termos de resistência à flexão, apesar de ter apresentado o maior desvio padrão (σ_p) entre os três aditivos. Considerando os valores obtidos de resistência à compressão a diferença do aditivo A foi ainda mais significativa, sendo de 30% em relação ao aditivo C.

Desta vez o desvio padrão (σ_p) do aditivo A foi menos discrepante dos demais aditivos, tendo um valor de 5,486 MPa se comparado aos valores de 4,264 MPa do aditivo B e 5,655 MPa do aditivo C.

Portanto, com base nos fatores analisados na Tabela 10, para se fazer a escolha do tipo de aditivo, aquele que melhor se adequou às necessidades e obteve os melhores resultados, apesar de apresentar o maior desvio padrão do resultado de resistência à flexão dentre os 3 aditivos testados, foi o aditivo A, que atingiu os melhores resultados, tanto de resistência à flexão e à compressão, quanto em relação à trabalhabilidade do aditivo na mistura. Este aditivo é um superplastificante de alto desempenho bastante adequado para concretos com desmolde rápido, solicitações em idades curtas, autoadensáveis ou com resistências iniciais melhoradas e com menor custo. Como indicado pelo fabricante, este aditivo é um forte redutor de água que confere ao concreto algumas propriedades, tais como: 1) Possibilidade de redução de água em até 30%, conforme a dosagem e a composição; 2) Bom aspecto da superfície na desforma; 3) Um efeito plastificante intenso, permitindo obter consistências favoráveis para uma colocação fácil.

3.3.2 Areia

A areia utilizada para fabrico dos provetes para ensaio é uma areia disponível no mercado e utilizada frequentemente na elaboração de argamassas e concretos. Para fabrico do CPR desta pesquisa foi selecionada a utilização das peneiras ASTM 200 (abertura de 0,075 mm), ASTM 100 (abertura de 0,150 mm), ASTM 50 (abertura de 0,300 mm), ASTM 30 (abertura de 0,600 mm) e ASTM 16 (abertura de 1,200 mm) atendendo a ASTM C 136, como pode-se observar na Figura 14. Pelo fato da areia ser provinda de rio, esta já não continha a percentagem necessária para a peneira de menor diâmetro a ser usada (0,075 mm), portanto, posteriormente, esta percentagem foi substituída por pó de quartzo do mesmo diâmetro, sem prejudicar a estrutura nem o empacotamento de partículas.



Figura 14 - Areia utilizada conforme granulometria escolhida

As areias foram separadas em suas quantidades através da técnica do empacotamento de Alfred, o qual está detalhado teoricamente no item 2.3.2.1 deste trabalho e obtiveram a curva granulométrica presente no Gráfico 1.

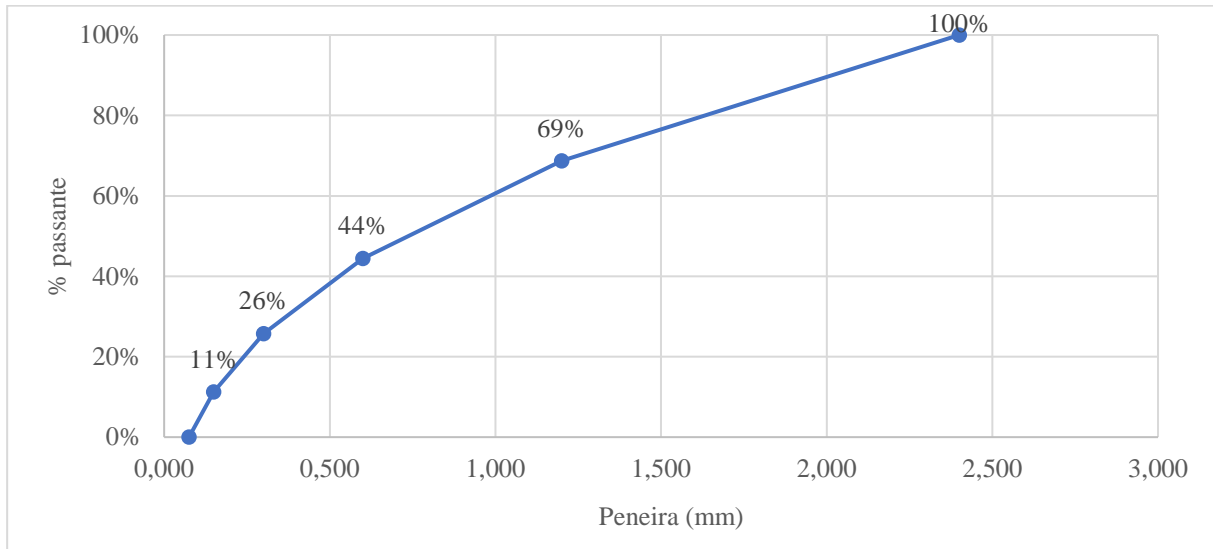


Gráfico 1 - Empacotamento de partículas de acordo com modelo de Alfred

3.3.2.1 Granulometria esperada

Para produção do CPR é necessário estudar a granulometria dos traços, uma vez que o principal fator, como já visto no capítulo 2 deste trabalho, é o empacotamento das partículas para que o número de vazios seja o menor possível na mistura. Para isso, foram analisados através do método de empacotamento de partículas de Alfred, as partículas de areia que seriam utilizadas para compor este traço.

Com base nos critérios estabelecidos para este trabalho referente às areias, através do item 3.3.2, em que as maiores partículas de areia seriam de 1,2 mm de diâmetro e as menores seriam de 0,075 mm de diâmetro, assumindo através da metodologia do empacotamento de Alfred, os valores de D_L e D_S respectivamente seriam 2,4 mm e 0,075, uma vez que o D_L é a primeira peneira passante a ser utilizada e o D_S é a última peneira retida, como já explicado no item 2.3.2 deste trabalho. Além disso, o coeficiente de distribuição para este estudo assume-se sendo $q = 0,37$. Uma vez que os parâmetros necessários já estão estabelecidos, pretende-se criar uma granulometria com módulo de finura ótimo para que existam o mínimo de vazios nos traços estudados, como já explicado no item 2.3.1.3 e através da utilização da Equação 4, também presente no item 2.3.2.

$$CPFT(\%) = 100 \left(\frac{D_P^q - D_S^q}{D_L^q - D_S^q} \right)$$

Equação 4

Considerando os parâmetros expostos na Equação 4 e sabendo que D_P é a peneira em análise, é possível observar na Tabela 11 a granulometria pretendida para esta situação.

Tabela 11 - Empacotamento das partículas de acordo com o modelo de Alfred

Peneira (mm)	% Passante	% Retida	% Retida acumulada
2,400	100,00	0,00	0,00
1,200	68,69	31,31	31,31
0,600	44,47	24,22	55,53
0,300	25,73	18,74	74,27
0,150	11,22	14,50	88,78
0,075	0,00	11,22	100,00

Com base nos valores expostos através da Tabela 11, é possível gerar a curva do empacotamento de partículas de acordo com modelo de Alfred, como pode ser observado no Gráfico 1.

Com a granulometria obtida através da Tabela 11, o módulo de finura encontrado é de 2,4, se encaixando, portanto, na faixa de granulometria ótima (entre 2,2 e 2,9), como desejado. Os valores das quantidades de areia de cada um dos traços desenvolvidos para esta pesquisa podem ser analisados na Tabela 12.

Tabela 12 - Valor em quilogramas das quantidades de areia em cada mistura de acordo com a peneira

Mistura \ Peneiras	1,2 mm (31,31%)	0,6 mm (24,22%)	0,3 mm (18,74%)	0,15 mm (14,50%)	0,075 mm (11,22%)	Total das peneiras (kg)
1	0,254	0,197	0,156	0,123	0,090	0,820
2	0,254	0,197	0,156	0,123	0,090	0,820
3	0,460	0,356	0,282	0,223	0,163	1,485
4	0,460	0,356	0,282	0,223	0,163	1,485
5	0,409	0,317	0,251	0,198	0,145	1,320
6	0,409	0,317	0,251	0,198	0,145	1,320
7	0,409	0,317	0,251	0,198	0,145	1,320
8	0,510	0,395	0,313	0,247	0,181	1,645
9	0,409	0,317	0,251	0,198	0,145	1,320

3.3.3 Cimento

O cimento escolhido para compor os traços de CPR deste trabalho foi o CEM I 42,5 R. Este é um cimento certificado segundo a NP EN 197-1 (2011), composto de 95% a 100% de clínquer Portland e 0% a 5% de outros constituintes. Possui como características coloração cinzenta, elevado calor de hidratação e ganho rápido de resistência. Tem em sua composição um teor de sulfatos inferior a 4% e de cloretos inferior a 0,1%. Algumas características químicas, mecânicas e físicas encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Características do cimento CEM I 42,5 R

Propriedades	Método de ensaio	Valor especificado
Perda ao fogo	NP EN 196-2	$\leq 5,0\%$
Resíduo Insolúvel	NP EN 196-2	$\leq 5,0\%$
Teor de Sulfatos (em SO_3)	NP EN 196-2	$\leq 4,0\%$
Teor de Cloretos	NP EN 196-21	$\leq 0,1\%$
Resistência de referência aos 28 dias	NP EN 196-1	$\geq 42,5$ e $\leq 62,5$
Início de pega	NP EN 196-3	≥ 60 min
Expansibilidade	NP EN 196-3	≤ 10 mm

Fonte: Adaptado da ficha técnica do fabricante

É possível analisar o rápido ganho de resistência deste cimento nas primeiras idades, através da Figura 15, retirado da ficha técnica do fabricante. O ganho rápido de resistência nas idades iniciais é um fato relevante pois entra em concordância com os princípios do aditivo selecionado e, como visto anteriormente, é muito importante que o cimento seja associado ao aditivo, como exposto por Richard *et al.* (1995) e Mendes (2002).

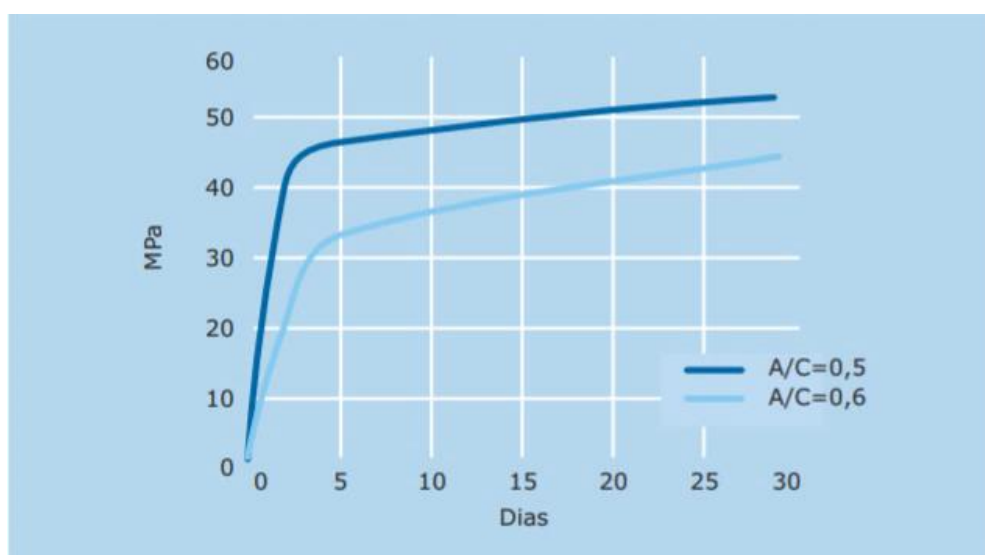


Figura 15 - Resistência à compressão do CEM I 42,5 R

Fonte: Ficha técnica do fabricante

3.3.4 Fibras

As fibras usadas na confecção do CPR podem ser tanto metálicas quanto de polipropileno, como já dito no item 2.3.1.5. As fibras escolhidas para a realização deste trabalho foram fibras de polipropileno que quando adicionadas ao concreto são capazes de melhorar as resistências à fissuração, ao impacto, à tração por flexão e à abrasão. A escolha desta fibra foi feita por ser um produto que atende os requisitos previstos no item 2.3.1.5 através da descrição em sua ficha técnica, na qual especifica como características o aumento da impermeabilidade, a melhora na resistência à compressão e à flexão e assegura a distribuição homogênea e uniforme das tensões na massa de concreto ou argamassa, evitando a formação de fissuras e por consequência de pontos fracos. Na Tabela 14 é possível observar alguns dados técnicos do fabricante para as fibras que serão utilizadas neste trabalho.

Tabela 14 - Propriedades da fibra de polipropileno selecionada

Fibra de polipropileno - Propriedades	
Densidade	910 kg/m ³
Absorção da água	Nula
Alongamento à ruptura	80 – 140 %
Comprimento da fibra	12 mm
Tenacidade	280 – 310 N/mm ²
Diâmetro das fibras	31 µm.
Ganho de resistência à compressão em relação ao concreto sem fibras	8,24 %
Ganho de resistência à tração em relação ao concreto sem fibras	7,41 %
Ganho de resistência à flexão em relação ao concreto sem fibras	8,57 %

Fonte: Adaptado da ficha do produto

3.3.5 Pó de quartzo

O material selecionado neste trabalho para representar o pó de quartzo foi o FPS 120. Como já visto no item 2.3.1.6, o pó de quartzo é inserido na mistura de CPR para compor a granulometria preenchendo os vazios por ser um material muito fino e sobretudo, intensifica as reações pozolânicas da mistura, que em cura térmica atribuem um ganho de resistência considerável ao concreto.



Figura 16 - Material usado como pó de quartzo no fabrico do CPR

Fonte: Fabricante

Pode-se notar através da Figura 16 que este é um material de coloração clara, quase branca. Além disso, ele é um material bastante fino, como pode ser visto em suas propriedades apresentadas na Tabela 15, assim como sua curva granulométrica, representada pela Figura 17.

Tabela 15 - Propriedades FPS 120

Norma Harmonizada	EN 13139 (2002), AC (2004)			
Características	Desempenho	Granulometria Típica		
Dimensão Nominal - Tamanho das partículas	0/1	Abertura (mm)	Passante (%)	Tolerância (%)
Massa volúmica (Mg/m ³)	$\rho_a = 2,61 - 2,71$			
Absorção de água	< 0,8%			
Teor de finos	Categoria 4	2	100	100
Teor de cloretos	< 0,001%	1	100	95 - 100
Teor de sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,2}	0,250	95	70 - 100
Teor de enxofre total	< 0,04%	0,063	20	15 - 25
Teor de húmus	Mais claro que padrão			

Fonte: Adaptado da declaração de desempenho do fabricante

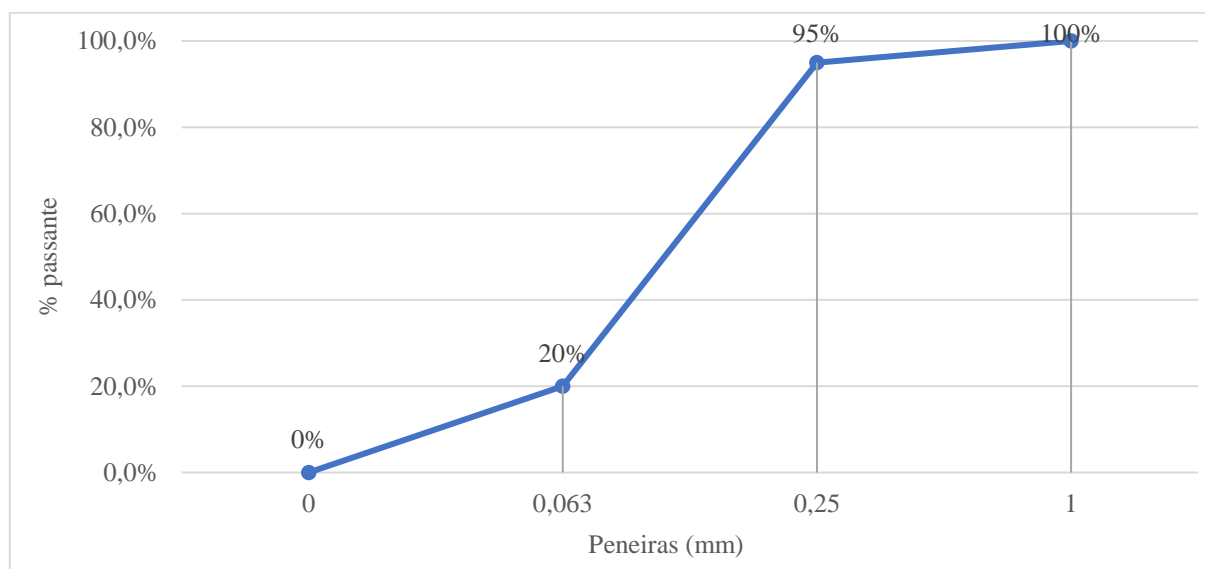


Figura 17 - Curva granulométrica do Pó de Quartzo (FPS 120)

A Figura 17, que representa a curva granulométrica do pó de quartzo, indica que se trata de um material bastante fino, contendo uma parcela significativa de material considerando pulverulento (filler), ou seja, com partículas inferiores à 0,063 mm, de acordo com a EN 12620 (2013), e portanto a análise granulométrica não foi realizada abaixo desta peneira. A dimensão das partículas do pó de quartzo é de bastante relevância para desenvolvimento da resistência do CPR.

3.3.6 Sílica ativa

Neste trabalho, a sílica ativa utilizada foi o Tipo III. Este material também apresenta uma coloração clara (Figura 18) e possui diâmetros bastante pequenos. A sílica ativa tem como principal função na composição do CPR, produzir hidratação secundária através de reações pozolânica resultante da primeira hidratação e preencher os vazios da mistura, além de diminuir a permeabilidade do concreto e aumentar a resistência ao ataque de agentes agressivos. Para isso é necessário que o material seja extremamente fino e por este motivo foi escolhido este material.



Figura 18 - Material usado como sílica ativa no fabrico do CPR

Fonte: Fabricante

As características do material encontram-se descritos na Tabela 16 e sua curva granulométrica está representada através da Figura 19.

Tabela 16 - Propriedades Tipo III

Norma Harmonizada	EN 13139 (2002), AC (2004)			
Características	Desempenho	Granulometria típica		
Massa volúmica (Mg/m ³)	$\rho = 2,62 - 2,82$	Abertura (mm)	Passante (%)	Tolerância (%)
Teor de cloretos	< 0,005%	2	100	100
Teor de sulfatos solúveis em ácido	AS _{0,2}	0,125	95	90-100
Teor de enxofre total	< 0,1%	0,063	90	85-95
Teor de húmus	Mais claro que padrão			

Fonte: Adaptado da declaração de desempenho do fabricante

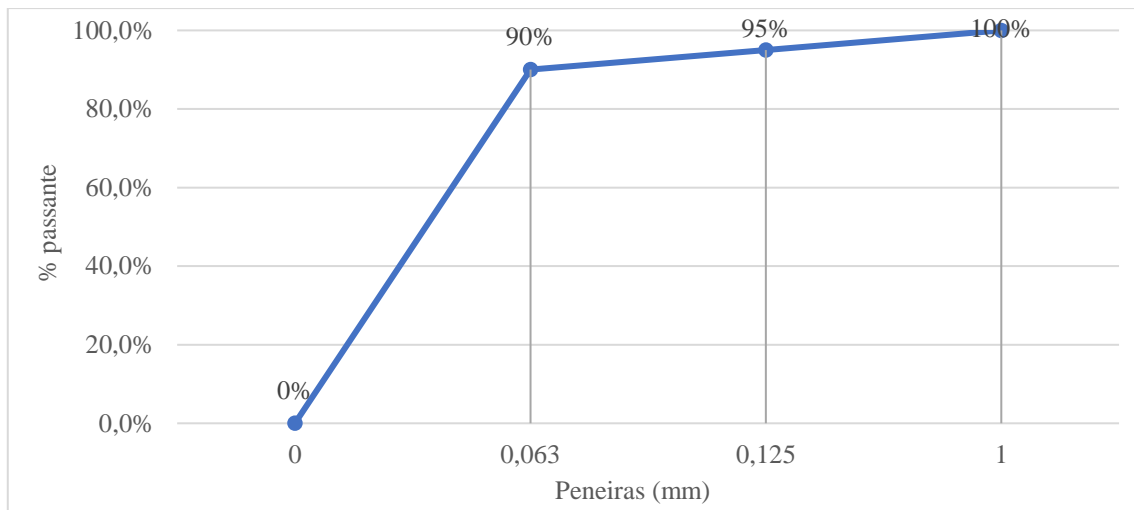


Figura 19 - Curva granulométrica da Sílica ativa (Tipo III)

Como pode ser visto na Figura 19, o material selecionado para representar a sílica ativa é extremamente fino, sendo assim ideal para cumprir seu papel na composição do CPR que é o preenchimento dos espaços vazios entre as partículas. A Figura 19 encerra a análise granulométrica na peneira 0,063 mm pois após este tamanho de partícula, já é considerado material pulverulento (filler), ou seja, neste material 90% das partículas são consideradas filler e não foi realizada granulometria abaixo desta peneira.

3.4 Estudo de quantidades e obtenção dos traços

Após a seleção dos materiais, é necessário definir suas quantidades. Para esta pesquisa optou-se por estudar 9 traços a serem executados com quantidades de cimento, sílica ativa, pó de quartzo, areia, água, fibras de polipropileno e do aditivo superplastificante. Pretende-se que, através da variação de alguns materiais, seja possível estabelecer as quantidades ideais destes, no intuito de atingir o objetivo principal desta tese que é encontrar uma equação que representa as quantidades ótimas de cada material, gerando assim um traço de concreto capaz de proporcionar as melhores propriedades disponíveis para a mistura, principalmente relacionados à resistência mecânica, dentro de alguns fatores limitantes.

Alguns materiais foram fixados, nomeadamente o cimento, pó de quartzo, fibras de polipropileno e aditivo superplastificante, para facilitar a análise dos dados a serem considerados para a obtenção do novo traço de CPR otimizado. As quantidades dos restantes materiais utilizados na composição do CPR serão diferentes de modo a que seja selecionada a

quantidade ideal de cada um deles, através da análise dos dados de resistência à compressão que serão obtidos.

O teor de sílica ativa das misturas foi de 10%, 15% e 17%, (em massa, relativo à quantidade de cimento). O valor de 15% relativamente à quantidade de cimento, representa a quantidade necessária para que a sílica ativa consiga consumir todo o hidróxido de cálcio presente no cimento, variando conforme o tipo de cimento usado. Além deste teor máximo de 15%, foram feitas outras misturas com um teor mínimo de 10% da quantidade de cimento, que é a quantidade mínima em que a sílica ativa começa a ter sua contribuição significativa para a mistura. Ademais, foi feita uma mistura com teor de sílica ativa de 17% da quantidade de cimento para ser observado como esta extrapolação reagiria na mistura.

A areia apresentou uma variação que foi calculada com base na multiplicação da quantidade de cimento pelo fator “m” subtraído pela quantidade de pó de quartzo de cada traço. Este fator “m” diz respeito ao somatório dos agregados secos presentes na mistura divididos pela quantidade de cimento, indicado através da Equação 5. Tal fator variou entre 1 e 2,2 entre as misturas de acordo com o traço. A aplicação da Equação 5, pode verificar-se na Tabela 17 e na Tabela 18, onde se apresentam de forma demonstrativa as quantidades de areia utilizadas para este estudo.

$$m = \frac{\sum \text{agregados secos (kg)}}{\text{Cimento (kg)}}$$

Equação 5

Em relação à quantidade de água, para cada mistura também se estabeleceu um coeficiente de multiplicação “n”, que estabeleceu uma variação de 0,18 a 0,26, em um intervalo de 0,02 unidades. A variação do fator confere à mistura a característica de um concreto mais seco (n=0,18) ou úmido (n=0,26). Este fator se calcula de forma semelhante ao fator “m”, como pode ser visto na Equação 6. Para cálculo dos traços, o coeficiente “n” é multiplicado pela soma da quantidade de sílica ativa e cimento da mistura, para então ser obtido o valor referente à quantidade de água de cada traço. Cada traço é definido de acordo com o seu fator correspondente, ver Tabela 17. Estes fatores de máximo e mínimo foram escolhidos considerando os demais traços presentes na literatura, ver item 2.3.2.2.

$$n = \frac{\text{Água (kg)}}{\sum \text{Cimento + Sílica ativa (kg)}}$$

Equação 6

No que se refere aos materiais que tiveram seus valores fixos, após feitos ensaios para verificar o desempenho de três aditivos diferentes, detalhado no item 3.3.1, e com base nas quantidades indicadas pelos fabricantes, concluiu-se que o aditivo especificado no item 3.3.1 obteve um melhor desempenho quando usado com uma taxa de 1,2% relativa ao somatório das quantidades de cimento e sílica ativa na mistura. As fibras de polipropileno tiveram um percentual constante de 0,12% em relação à quantidade de cimento de cada traço. A percentagem de pó de quartzo utilizada foi sempre de 18% em relação ao peso do cimento de cada mistura, uma vez que, com base em estudo mais recentes (Campos, 2015), esta quantidade provou ser a mais adequada para a análise de desempenho deste tipo de concreto, comparativamente aos estudos já apresentados no item 2.3.1.6.

Na Tabela 17 é possível observar a composição das misturas em estudo definidas com base nos parâmetros que a literatura indica. A variação dos traços foi definida conforme o método de planejamento experimental, no qual são utilizados os extremos de cada variável e os valores centrais a serem adotados para cada material nas misturas. Ainda, abaixo do nome dos materiais é possível visualizar qual dos materiais tiveram seus valores assumidos como fixos ou variáveis.

Tabela 17 - Formulação das quantidades fixas e variáveis de cada material em massa

Mistura	C	SA	PQ	Areia	Água	FP	AS
	Fixo	Variável	Fixo	Variável (m-PQ).C	Variável n. (C+SA)	Fixo	Fixo
1	-	15% de C	18% de C	(1-PQ).C	0,20. (C+SA)	0,12% de C	1,2% de (C+SA)
2	-	15% de C	18% de C	(1-PQ).C	0,24. (C+SA)	0,12% de C	1,2% de (C+SA)
3	-	15% de C	18% de C	(2-PQ).C	0,20. (C+SA)	0,12% de C	1,2% de (C+SA)
4	-	15% de C	18% de C	(2-PQ).C	0,24. (C+SA)	0,12% de C	1,2% de (C+SA)
5	-	17% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,22. (C+SA)	0,12% de C	1,2% de (C+SA)
6	-	10% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,18. (C+SA)	0,12% de C	1,2% de (C+SA)
7	-	10% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,26. (C+SA)	0,12% de C	1,2% de (C+SA)
8	-	10% de C	18% de C	(2,2-PQ).C	0,22. (C+SA)	0,12% de C	1,2% de (C+SA)
9	-	10% de C	18% de C	(1,5-PQ).C	0,22. (C+SA)	0,12% de C	1,2% de (C+SA)

Legenda:

C - Quantidade de cimento;

SA - Quantidade de sílica ativa em relação à massa de cimento;

PQ - Quantidade de pó de quartzo em relação à massa de cimento;

FP - Quantidade de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento;

AS - Quantidade de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento;

Com base nas formulações apresentadas na Tabela 17 a quantidade em quilogramas de cada material presente na mistura e o peso total de cada um dos nove traços apresentados pode ser visualizado tanto com base na produção de 1 m³ de Concreto de Pós Reativos (ver Tabela 18), quanto na produção dos provetes necessários para este estudo (ver Tabela 19).

Tabela 18 - Quantidades de cada material componente do CPR para produção de 1m³ de concreto

Mistura	C (kg)	SA (kg)	PQ (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	FP (kg)	AS (kg)	Total (kg)
1	848,82	127,32	152,79	696,04	195,23	1,02	11,71	2032,93
2	848,82	127,32	152,79	696,04	234,28	1,02	11,71	2071,98
3	679,06	101,86	122,23	1260,50	156,18	0,81	9,34	2330,02
4	679,06	101,86	122,23	1260,50	187,59	0,81	9,34	2361,43
5	848,82	144,30	152,79	1120,45	218,15	1,02	11,88	2497,41
6	848,82	84,88	152,79	1120,45	168,07	1,02	11,20	2387,23
7	848,82	84,88	152,79	1120,45	242,76	1,02	11,20	2461,93
8	679,06	67,91	122,23	1396,32	164,67	0,81	9,00	2439,95
9	848,82	84,88	152,79	1120,45	205,42	1,02	11,20	2424,58

Legenda:

C - Quantidade de cimento em kg;

SA - Quantidade de sílica ativa em kg;

PQ - Quantidade de pó de quartzo em kg;

FP - Quantidade de fibras de polipropileno em kg;

AS - Quantidade de aditivo superplastificante em kg;

Tabela 19 - Quantidades de cada material componente do CPR para produção dos provetes

Mistura	C (kg)	SA (kg)	PQ (kg)	Areia (kg)	Água (kg)	FP (kg)	AS (kg)	Total (kg)
1	1,0000	0,1500	0,1800	0,8200	0,2300	0,0012	0,0138	2,3950
2	1,0000	0,1500	0,1800	0,8200	0,2760	0,0012	0,0138	2,4410
3	0,8000	0,1200	0,1440	1,4850	0,1840	0,00096	0,0110	2,7450
4	0,8000	0,1200	0,1440	1,4850	0,2210	0,00096	0,0110	2,7820
5	1,0000	0,1700	0,1800	1,3200	0,2570	0,0012	0,0140	2,9422
6	1,0000	0,1000	0,1800	1,3200	0,1980	0,0012	0,0132	2,8124
7	1,0000	0,1000	0,1800	1,3200	0,2860	0,0012	0,0132	2,9004
8	0,8000	0,0800	0,1440	1,6450	0,1940	0,00096	0,0106	2,8745
9	1,0000	0,1000	0,1800	1,3200	0,2420	0,0012	0,0132	2,8564

Legenda:

C - Quantidade de cimento em kg;

SA - Quantidade de sílica ativa em kg;

PQ - Quantidade de pó de quartzo em kg;

FP - Quantidade de fibras de polipropileno em kg;

AS - Quantidade de aditivo superplastificante em kg;

Para melhor visualização das quantidades utilizadas na composição de cada traço, o Gráfico 2 representa a porcentagem presente de cada material em cada um dos 9 traços. A legenda presente no Gráfico 2 indica qual material cada cor representa.

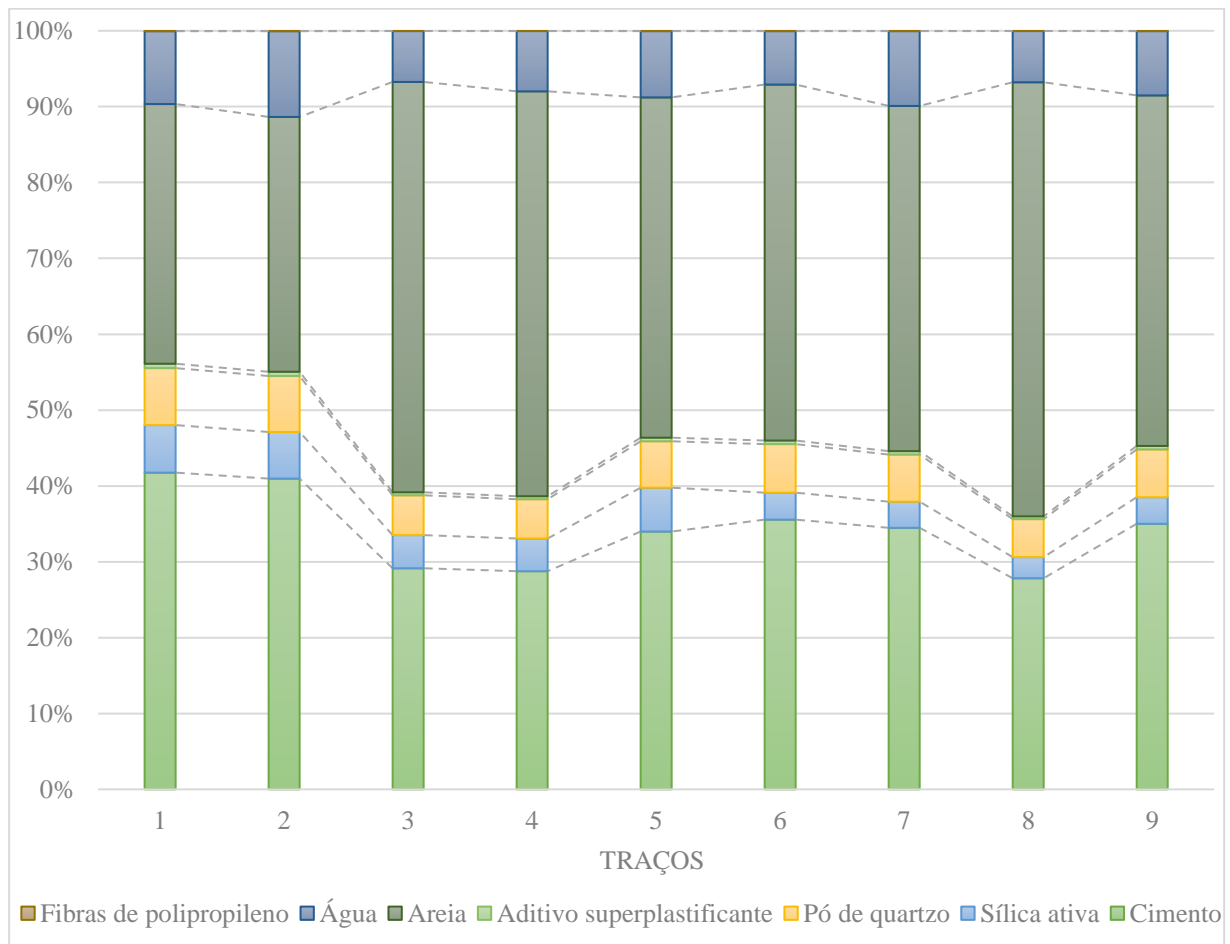


Gráfico 2 - Quantidades dos materiais representados em porcentagem

Através do Gráfico 2 fica evidente que a areia apresenta a maior taxa de variação entre as misturas a serem estudadas. O aditivo superplastificante é apenas representado por uma linha entre as quantidades de pó de quartzo e a areia, uma vez que a parcela que o representa em relação ao todo é ínfima. O mesmo acontece com as fibras de polipropileno, indicadas por uma linha extremamente fina, após a representação da água, no topo das barras que representam as misturas.

3.5 Execução dos variados traços de CPR

A execução dos provetes de concreto requer a realização de várias fases, nomeadamente preparação dos materiais, fabrico das misturas e moldagem dos provetes.

A preparação dos materiais se inicia com a peneiração da areia a ser utilizada na granulometria desejada, como indicado no item 3.3.2, com o auxílio de um agitador de peneiras, para atingir as quantidades referentes à cada peneira, conforme Tabela 12. As peneiras utilizadas estão regulamentadas através da norma ASTM C 136 (2014). O agitador de peneiras foi utilizado para agilizar o processo de peneiramento.

O processo de peneiração da areia decorreu até se obterem as quantidades necessárias para cada fração tal como indicadas na Tabela 12. Como a areia utilizada para realização deste trabalho foi extraída de rio, esta já não continha a parcela mais fina de sua composição então, para preencher a granulometria relativa à peneira 0,075 mm foi utilizado, em substituição à areia, o pó de quartzo sem prejuízo da composição inicial, como já dito no item 3.3.2.

Em seguida, os materiais foram todos pesados através da balança digital e separados (Figura 20), para facilitar o processo de mistura.



Figura 20 - Materiais separados de acordo com cada traço

Para a preparação das misturas, na execução do CPR é necessário que na misturadora utilizada, com capacidade para 5 litros e regulamentada de acordo com a NP EN 196-1 (2016), ver Figura 21, sejam inseridos primeiramente os materiais secos, previamente separados como visto na Figura 20, juntamente com a metade da quantidade de água indicada para cada traço. Após colocados na misturadora, esta é ligada em velocidade de rotação baixa e em seguida é adicionado o aditivo e por fim a restante água. A misturadora faz o processo de mistura, sempre na velocidade de rotação baixa, por aproximadamente 3 minutos.

Decorrido este tempo, o concreto terá um aspecto viscoso embora bastante adensável, como pode ser evidenciado na Figura 22 e já pode ser moldado. Apesar da baixa quantidade de água nas misturas, o CPR em geral não apresenta um aspecto seco, graças ao aditivo superplastificante.



Figura 21 - Misturadora utilizada no processo de fabrico das misturas de CPR



Figura 22 - Aspecto geral da mistura de CPR

Para o processo de moldagem, foram utilizados provetes prismáticos metálicos cuja dimensão é de 4 cm x 4 cm x 16 cm, em conformidade com a norma NP EN 196-1 (2016). Foram executados três provetes prismáticos para cada traço analisado, gerando um total de 27 provetes a serem ensaiados à flexão inicialmente.

A mistura de concreto foi colocada nos moldes, previamente pincelados com óleo desconfrante, já fixados no compactador horizontal em duas camadas até o preenchimento do provete. A compactação é feita mecanicamente segundo a norma NP EN12390-2 (2019) através da aplicação de 60 golpes como previsto na norma de adensamento de provetes prismáticos.

Na Figura 23 pode-se observar o preenchimento da segunda camada de concreto no provete, após o adensamento da primeira camada. As camadas foram preenchidas com o auxílio de uma espátula e entre a colocação das camadas é necessário que aconteça uma mistura manual do concreto para que ele não perca sua fluidez, dificultando o trabalho de adensamento. Na Figura 24 está representado o provete já moldado, após o adensamento de ambas as camadas e posterior regularização do topo com o auxílio de uma espátula.



Figura 23 - Colocação da segunda camada para adensamento



Figura 24 - Provette finalizado

Após 24 horas da moldagem dos provetes, estes foram primeiramente desmoldados, com a abertura do molde, pesados na balança digital, medidos com paquímetro digital e submetidos à cura térmica no banho-maria por 28 dias, como é possível ver na Figura 25.

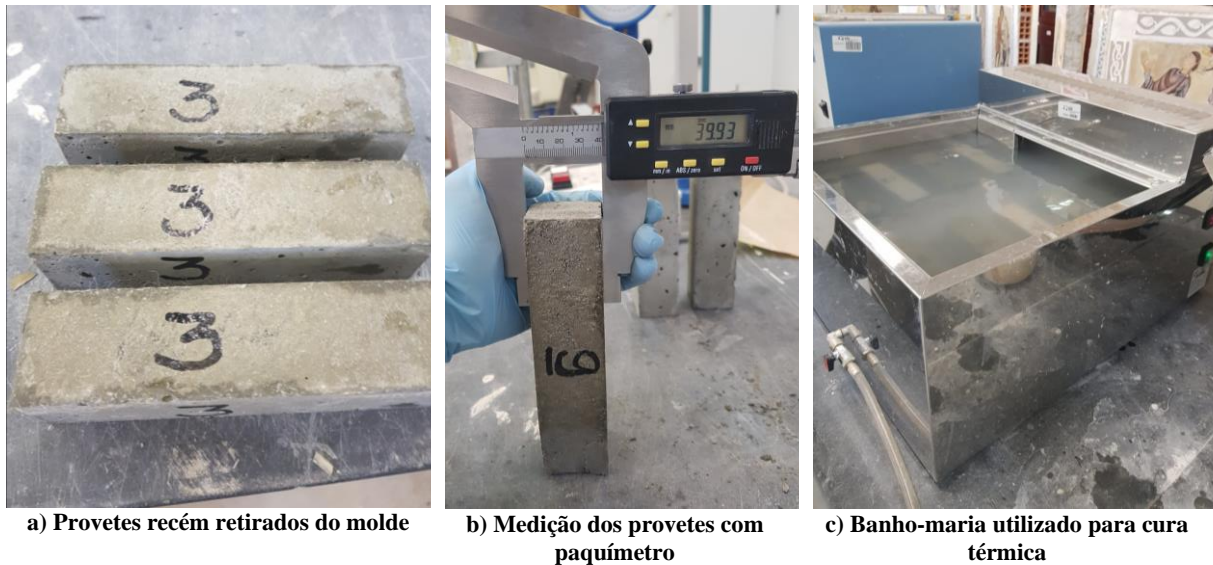


Figura 25 - Preparação dos provetes para cura térmica

Os provetes foram submersos em água a uma temperatura de 60°C , uma vez que, além dos motivos apontados no item 2.3, a cura térmica é bastante significativa e apresenta um incremento de resistência de 50% se comparado a um concreto que não foi submetido a este processo, como apresenta o estudo de Richard e Cheyrezy (1995). Esta foi a temperatura escolhida devido à capacidade de aquecimento do aparelho utilizado ser limitada e ser esta a temperatura na qual o ganho de resistência já se torna bastante expressivo e as reações pozolânicas ocorrem naturalmente.

Após os 28 dias em cura térmica, os provetes foram novamente pesados na balança digital e medidos com o auxílio do paquímetro digital para então serem ensaiados primeiramente à flexão e em seguida à compressão.

Logo após serem retiradas do banho-maria, as 27 peças relativas aos traços de CPR estudados para esta pesquisa, ficaram com aspectos variados devido à diferença na composição de cada traço, que será possível de ser evidenciado melhor através da análise feita no item 4.1.

3.6 Ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos são cruciais para a avaliação do CPR, como indica o capítulo 2 e para isso, 27 provetes foram novamente pesados e medidos e em seguida foram inicialmente

ensaiados à flexão e em seguida à compressão para obtenção das propriedades mecânicas, nomeadamente resistência à flexão e resistência à compressão.

3.6.1 Ensaio de resistência à flexão

Primeiramente foi realizado o ensaio de resistência à flexão, de acordo com a NP EN 12390-5 (2009), no equipamento representado na Figura 26.



Figura 26 - Equipamento utilizado para ensaiar os provetes à flexão



Figura 27 - Aspecto dos provetes após submetidos ao ensaio de resistência à flexão

Os 27 provetes foram posicionados de forma que o atuador que aplica a força ficasse centrado em relação ao comprimento do provete, de forma a não conter irregularidades que fariam com que a peça rompesse antes do esperado. A deformação do elo foi programada para acontecer a uma velocidade de 0,03 mm/min.

Após o ensaio de todos os provetes, os meio provetes resultantes da rotura (Figura 27) foram os provetes utilizados para os ensaios de compressão, o que resultou no total de 54 provetes.

3.6.2 Ensaio de resistência à compressão

O ensaio de compressão teve como base a NP EN 12390-3 (2011) e foi realizado com o equipamento com resolução de indicador de força de 0,1kN e comando de leitura digital, apresentado na Figura 28. O aumento no número de provetes para este ensaio tem uma vantagem significativa para o tratamento dos dados, pois aumenta a precisão dos resultados através de uma maior amostragem, deixando o valor com uma maior significância estatística.



Figura 28 - Equipamento utilizado para ensaiar os provetes à compressão



Figura 29 - Peça de auxílio no ensaio de resistência à compressão para provetes prismáticos

Para o ensaio de resistência à compressão posicionou-se uma das metades do provete na peça de auxílio (representada na Figura 29) para provetes de dimensões menores e em seguida aplicou-se uma força com velocidade de aplicação da carga de 13 kN/min até atingir a força máxima.

3.7 Obtenção do traço ideal

O objetivo principal desta pesquisa refere-se à elaboração de um traço de CPR que favorece suas características mecânicas, principalmente a capacidade de resistência à compressão, que é uma das principais características a ser observada em concretos. Com isso, após a preparação dos provetes, deixando-os em cura térmica por 28 dias e ensaiando-os à compressão, pode ser feita uma regressão linear múltipla que analisa diversas variáveis e sua influência em relação aos resultados obtidos das misturas relativo à resistência à compressão dos provetes. No entanto, antes de obter as variáveis para a regressão linear múltipla realizou-se uma análise de *outliers* em relação aos valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão, descrita no anexo A.

3.7.1 Regressão linear múltipla de dados

A regressão linear é um método usado para pré-estabelecer uma equação que apresenta uma estimativa de uma propriedade física ou mecânica. Para isso são analisadas relações entre

variáveis iniciais, considerando uma variável dependente e as restantes variáveis independentes. Para a regressão linear simples existe a correlação entre duas variáveis, uma independente e outra dependente e para a regressão linear múltipla a correlação é realizada entre a variável dependente e mais de duas variáveis independentes, como é o caso desta tese. A regressão linear múltipla será aquela utilizada nesta tese para atingir o objetivo proposto.

Em geral, a regressão linear múltipla possui uma equação característica que descreve uma relação entre as variáveis independentes X_j e a variável dependente, Y , como demonstra a Equação 7, sendo β_j os coeficientes de regressão parciais.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_j X_j$$

Equação 7

Os parâmetros β_j representam a variação esperada na resposta Y para cada unidade de variação em X_j quando todos os restantes regressores são considerados constantes em termos experimentais. Através desta formulação ainda é possível constatar que esta poderia ser a soma de todos os fatores $\beta_j X_j$ e do coeficiente de regressão parcial inicial, β_0 . A letra j como subscrito indica a qual material o parâmetro pertence. No presente trabalho, os parâmetros a variar consistem na percentagem de sílica ativa, areia ou água, definidos para cada um dos 9 traços estudados.

Assim, a equação de regressão linear múltipla genérica pode ser transcrita em forma matricial, em que o número de colunas consiste no número de variáveis independentes mais o termo independente e o número de linhas diz respeito ao número de traços definidos (Equação 8).

$$Y = \beta X$$

Equação 8

Sendo,

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \dots \\ \beta_j \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nj} \end{bmatrix}$$

O coeficiente de regressão parcial, β , é caracterizado com a matriz apresentada na Equação 8 com sua forma simplificada, mas para encontrar o valor deste coeficiente é necessário utilizar uma relação indicada na Equação 9 para assim chegar à matriz real de β . A letra subscrita n indica a qual traço o parâmetro pertence, variando de 1 a 9. O parâmetro

X^T representa a matriz transposta de X . Considerando tal equação, a matriz real de β está apresentada no seguimento da Equação 9

$$\beta = (X^T X)^{-1} \cdot X^T Y$$

Equação 9

Sendo,

$$X^T X = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ij} \\ \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{ij} \\ \sum_{i=1}^n X_{i2} & \sum_{i=1}^n X_{i2}X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i2}^2 & \dots & \sum_{i=1}^n X_{i2}X_{ij} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n X_{ij} & \sum_{i=1}^n X_{ij}X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{ij}X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ij}^2 \end{bmatrix}$$

$$X^T Y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ X_{11} & X_{21} & X_{31} & \dots & X_{n1} \\ X_{12} & X_{22} & X_{32} & \dots & X_{n2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{1j} & X_{2j} & X_{3j} & \dots & X_{nj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{i1}Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{i2}Y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n X_{ij}Y_i \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \dots \\ \beta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ij} \\ \sum_{i=1}^n X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{i1}X_{ij} \\ \sum_{i=1}^n X_{i2} & \sum_{i=1}^n X_{i2}X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{i2}^2 & \dots & \sum_{i=1}^n X_{i2}X_{ij} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n X_{ij} & \sum_{i=1}^n X_{ij}X_{i1} & \sum_{i=1}^n X_{ij}X_{i2} & \dots & \sum_{i=1}^n X_{ij}^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{i1}Y_i \\ \sum_{i=1}^n X_{i2}Y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n X_{ij}Y_i \end{bmatrix}$$

Na Equação 8, as variáveis dependentes são indicadas por Y e as variáveis independentes são indicadas por X_j . É possível ter inúmeras variáveis X_j , mas para fazer com

que o resultado tenha um valor significativo é necessário que o número de amostras seja coerente com o número de variáveis. Para esta pesquisa as variáveis independentes são as quantidades de sílica ativa, areia e água e a variável dependente é a resistência à compressão dos traços. Importa ressaltar que para facilitar o cálculo das variáveis independentes, estas foram transformadas em parâmetros adimensionais de modo a facilitar o cálculo de regressão linear múltipla.

Para elaboração dos parâmetros adimensionais foram adotados valores máximos e mínimos dos traços, conforme o estudo preliminar descrito no item 3.1 através da Tabela 17. Os valores a serem parametrizados foram obtidos através do estudo preliminar que baseou este trabalho, uma vez que os 9 traços executados possuem assimetria em seus valores.

Os valores adimensionais foram calculados com base na taxa de variação dos teores dos materiais e na sua média. Portanto, a fórmula que pode definir tal expressão de forma a generalizar o método em que eles foram obtidos pode ser vista na Equação 10.

$$X_j = \left(\frac{V_P - V_M}{T_V} \right)$$

Equação 10

Na Equação 10 o valor de X_j , com j variando de 1 a 3, é assumido de acordo com o material, sendo X_1 representado pela sílica ativa, X_2 indicando pela água e X_3 caracterizado pela areia. Além do fator X_j , o fator V_P representa o valor no qual o teor de material está sendo transformado para um valor adimensional, por exemplo para descobrir o valor adimensional referente ao teor de 3% de sílica ativa, este é assumido na fórmula como V_P . O parâmetro V_M representa a média dos valores de teores. Tendo como referência os valores de sílica ativa, se somados os valores de variação (considerando os percentuais do estudo preliminar devido à simetria dos valores que são de 3%, 5%, 10% 15% e 17%) e divididos pelo número de teores somados (5) têm-se, portanto, o V_M para parametrização adimensional da sílica ativa. Por fim, o T_V indica a taxa de variação de cada material, considerando os valores mais praticados nos traços apresentados na Tabela 17 e descartando os valores-teste. Como valores-teste pode-se entender por aqueles praticados apenas em um dos traços, como por exemplo para a sílica ativa são tidos como os valores-teste os teores de 3% e 17%, sendo, portanto, a T_V para a sílica ativa é de 5% pois analisa a variação entre os teores restantes (5%, 10% e 15%). A água possui 0,18 e 0,26 como valores-teste, tendo uma T_V de 0,02 e a areia tem como valores-teste 0,8 e 2,2, tendo uma T_V de 0,5. Na parametrização foram utilizados os valores do estudo preliminar uma

vez que a análise deve ser simétrica, apesar de não terem sido utilizados alguns valores na prática.

Sendo assim, extraindo as quantidades utilizadas na Tabela 17 e fazendo a aplicação da Equação 10 para cada um dos teores dos materiais variáveis, tem-se então a representação dos valores originais transformados em valores adimensionais, na Tabela 20.

Tabela 20 - Valores adimensionais para inserção na equação da regressão múltipla

Material	Sílica ativa					\bar{y}
Teor	3%	5%	10%	15%	17%	10%
Representação	-1,4	-1	0	1	1,4	X_1
Material	Água					\bar{y}
Fator “n”	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,22
Representação	-2	-1	0	1	2	X_2
Material	Areia					\bar{y}
Fator “m”	0,8	1	1,5	2	2,2	1,5
Representação	-1,4	-1	0	1	1,4	X_3

Através da Tabela 20, quando utilizada a equação da regressão linear múltipla o valor de $X_j = 0$ indica que este coincide com o valor da média (\bar{y}) de variação do material analisado, podendo assumir o valor real de 1,5 para o caso da areia, 0,22 para o caso da água e 10% para o caso da sílica ativa. Após encontrada a melhor combinação para os valores da equação de regressão linear múltipla, é necessário realizar uma interpolação entre os valores para retornar ao valor real do material.

Após estabelecidos os parâmetros adimensionais para facilitar os cálculos futuros, pode ser observado através da Tabela 21 os valores das variáveis X_j para cada um dos 9 traços desta pesquisa.

Tabela 21 - Valores adimensionais usados para a regressão linear múltipla

Traços	X_1	X_2	X_3
1	1	-1	-1
2	1	1	-1
3	1	-1	1
4	1	1	1
5	1,4	0	0
6	0	-2	0
7	0	2	0
8	0	0	1,4
9	0	0	0

Tendo os valores já de forma adimensional, para facilitar os cálculos futuros em relação à equação da regressão linear múltipla, é necessário então estabelecer a matriz responsável pela elaboração da equação, conforme a Equação 7, que apresentará o melhor valor de resistência à compressão. Em seguida, deve-se realizar a simulação de todos os valores de X_j para estimar o maior valor possível para Y , como será melhor evidenciado no Capítulo 4.

3.8 Ensaios com o traço ideal

Após obtida a equação do traço ideal de Concreto de Pós Reativos, que indica novas quantidades de sílica ativa, areia e água, foram produzidos mais provetes com esta nova formulação para que fossem analisadas as características do novo traço de CPR. A Tabela 22 indica o número de provetes produzidos para cada um dos ensaios e respectivas normas, bem como se encontrava o estado da mistura na altura da execução do ensaio.

Tabela 22 - Ensaios realizados com o novo traço de CPR

Ensaio	Norma Brasileira	Norma Portuguesa	Aplicação	Número de provetes
Teor de ar e massa volúmica	NBR 13278 (2005)	NP EN12350 – 7 (2010)	Estado fresco	-
Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica	NBR 9778 (2005)	LNEC E 394 (1993)	Estado Endurecido	3
Resistência à flexão	NP EN 12390-5 (2009)	NP EN 12390-5 (2009)	Estado Endurecido	12
Resistência à compressão	NP EN 12390-3 (2011)	NP EN 12390-3 (2011)	Estado Endurecido	24
Porosimetria por intrusão de mercúrio	-		Estado Endurecido	1

3.8.1 Teor de ar e massa volúmica

O ensaio para determinação do teor de ar e massa volúmica de argamassas e concretos é normatizado pela ABNT NBR 13278 (2005) e pela NP EN12350 – 7 (2010). Valores de ar incorporado entre 2% e 3% são comuns em concretos em geral, mas para concretos leves é cerca de 10%.

Para realização do ensaio foi necessário que, logo após a mistura ter sido finalizada na misturadora ainda em estado fresco, esta foi depositada em um recipiente cilíndrico de dimensões de aproximadamente 8,5 cm de diâmetro e 8 cm de altura em três camadas iguais

com aplicação de 20 golpes em cada uma das camadas, evitando muita força para que apenas a camada em questão seja adensada. Após adensamento das camadas, soltou-se o recipiente com a mistura de uma altura de 3 cm por três vezes para que não fiquem vazios entre a parede do recipiente e a mistura. Por fim, o topo do recipiente foi regularizado com uma espátula inclinada 45° em relação ao topo do recipiente (Figura 30) e no fim pesada na balança digital (Figura 31).



Figura 30 – Regularização do topo do recipiente para ensaio em estado fresco



Figura 31 - Aferição do peso recipiente + concreto para o novo traço de CPR

O peso do recipiente limpo e cheio de água e o volume do reservatório foi registrado (v_r). Em seguida foi determinada a massa volúmica da mistura através da Equação 11

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \cdot 1000$$

Equação 11

onde, d é a massa volúmica da argamassa (kg/m^3), m_c é a massa do recipiente contendo a argamassa de ensaio (g), m_v é a massa do recipiente vazio (g) e v_r é o volume do recipiente (cm^3).

O teor de ar na argamassa (A) foi determinado em percentagem através da Equação 12

$$A = 100 \cdot \left(1 - \frac{d}{d_t}\right)$$

Equação 12

onde, d é o valor da massa específica da argamassa conforme Equação 11, em g/cm^3 e d_t é o valor da massa volúmica teórica da argamassa sem vazios em g/cm^3 .

Para encontrar o valor de d_t foi necessário inserir os valores de massa seca do concreto (m_s) somado à massa da água que compõe a mistura ($m_{\text{água}}$) e a massa específica do concreto anidro (γ_s), através da Equação 13.

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}}$$

Equação 13

3.8.2 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

O ensaio para determinação da absorção de água por imersão baseou-se nas normas ABNT NBR 9778 (2005) e LNEC E 394 (1993) e através dela, com o mesmo ensaio foi possível encontrar algumas outras propriedades do concreto como o índice de vazios e as massas específicas (seca, saturada e real) da mistura analisada.

O ensaio é realizado no estado endurecido do concreto e, com base na norma técnica, para a realização deste ensaio foi necessário a utilização de 3 amostras para o traço de concreto a ser analisado. Estas amostras foram secas em estufa por 72 horas para que fosse possível determinar sua massa no estado seco. Em seguida, as amostras foram imersas em água por um período de 72 horas (ver Figura 32), sendo possível a determinação da sua massa na condição saturada, como mostra a Figura 33.



Figura 32 - Amostras imersas em água por 72 horas para ensaio de absorção por imersão



Figura 33 - Amostra para ensaio de absorção por imersão sendo pesado saturado

Após a etapa de saturação, as amostras foram levadas a ebulição por 5 horas, mantendo-se constante o volume de água (ver Figura 34). Após esse período, a água foi resfriada até chegar à temperatura ambiente e registrado a sua massa através da balança hidrostática, como é possível verificar através da Figura 35. Em seguida, as amostras foram secas com um pano úmido e determinada a sua massa saturada após imersão e fervura.



Figura 34 - Provetes em ebulição por 5 horas para o ensaio de absorção por imersão



Figura 35 - Balança hidrostática utilizada no ensaio de absorção por imersão

Feitas as aferições das amostras, a absorção de água foi calculada por meio da Equação 14,

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100$$

Equação 14

na qual m_{sat} representa a massa saturada da amostra após imersão e fervura (g) e m_s é a massa da amostra seca em estufa (g). O índice de vazios das argamassas foi calculado utilizando a Equação 15,

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100$$

Equação 15

onde, I_v é o índice de vazios (%) e m_i é a massa da amostra saturada imersa em água após a fervura. A massa específica das argamassas no estado endurecido foi calculada através da Equação 16,

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i}$$

Equação 16

onde ρ_r é a massa específica real (g/cm^3).

3.8.3 Resistências mecânicas

O ensaio de resistência à flexão seguiu a mesma norma do ensaio de resistência à flexão realizado para os 9 traços de CPR e os mesmos equipamentos anteriormente utilizados, já descrito no item 3.6.1.

O mesmo ocorreu para o ensaio de resistência à compressão, que seguiu a mesma norma do ensaio de resistência à compressão realizado para os 9 traços de CPR e os mesmos equipamentos anteriormente utilizados, já descrito no item (ver item 3.6.2)

3.8.4 Porosimetria por intrusão de mercúrio

Com o objetivo de avaliar a porosidade e o tamanho dos poros na nova mistura de CPR, realizou-se o ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio. O método de porosimetria por intrusão de mercúrio se baseia no fato de que, para atravessar um fluido não permeável em um poro de diâmetro d , uma pressão p deve ser aplicada de forma inversamente proporcional ao diâmetro deste poro (Vočka *et al.*, 2000). Estas pressões aplicadas nos poros devem ser convertidas em diâmetro equivalente de poros através da fórmula de Washburn da equação de Laplace (Cook e Hover, 1993) representada através da Equação 17,

$$d = \frac{-4 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{p}$$

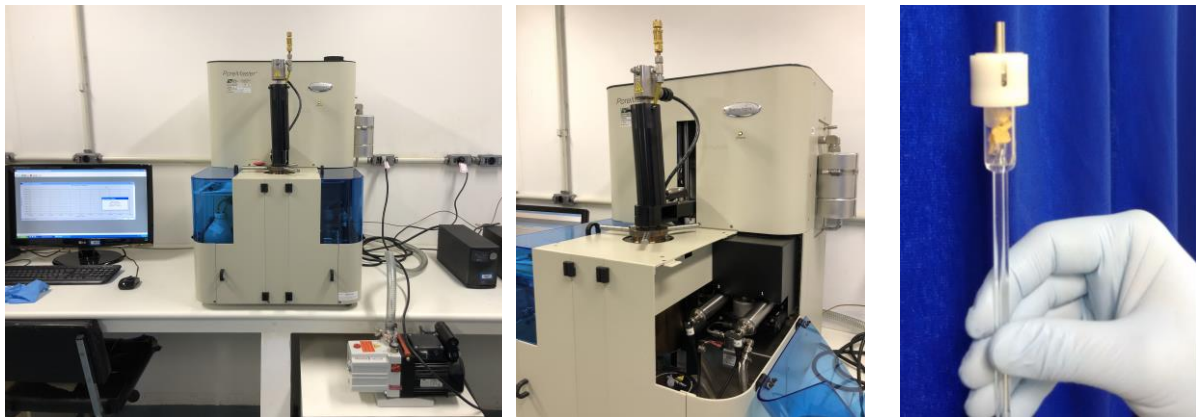
Equação 17

onde d representa o diâmetro equivalente dos poros preenchidos por mercúrio, σ representa a tensão superficial do mercúrio, p é a pressão aplicada através do equipamento para a intrusão do mercúrio na amostra e θ indica o ângulo de contato entre o mercúrio e a parede do poro.

Para este ensaio a amostra é seca para retirar dos poros qualquer água ou fluido existente. A amostra é pesada e em seguida transferida para a câmara no penetrômetro, que é onde a amostra fica inserida no vácuo e o mercúrio é introduzido, de forma que cubra toda a superfície da amostra. Como o mercúrio não é capaz de molhar os grãos de cimento espontaneamente, não é capaz de penetrar os poros vazios, a menos que uma pressão seja aplicada. Dessa forma a pressão é aumentada aos poucos e aplicada ao mercúrio e assim pode ser feita a intrusão do mercúrio, que é então monitorizada (Diamond, 2000).

Neste trabalho foi moldado um provete prismático para que fosse extraída uma pequena amostra do seu interior, que não tenha sofrido nenhum tipo de desgaste ou dano externo, para

que o ensaio tenha êxito em sua execução. O ensaio aconteceu no laboratório de ensaios de argamassas e concretos, com uso do equipamento presente na Figura 36-a e na Figura 36-b, onde a leitura máxima de pressão pelo equipamento à baixa pressão é de 0,2 a 50 psi e à alta pressão é de 20 a 33.000 psi. Além disso, o gás utilizado é ar sintético a 60 psi e o diâmetro máximo da célula de amostra é de $d = 10$ mm, $h = 20$ mm (ver Figura 36-c). Para a intrusão de mercúrio utilizou-se um ângulo de contato Θ de 140° e a tensão superficial σ de 480 dynes/cm.



a) Vista geral do equipamento de alta e baixa pressão

b) Estação de intrusão por alta pressão (haste preta)

c) Porta-amostras

Figura 36 - Equipamento utilizado no ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio

Em suma, as etapas para o ensaio são: 1) fragmentar e colocar a mostra no porta-amostras (aproximadamente 2g); 2) colocar o porta-amostras na estação de baixa pressão, onde será penetrado o mercúrio e feita a leitura em baixa pressão (só a pressão de intrusão do mercúrio); 3) colocar na estação de alta pressão, onde o mercúrio presente na cápsula será pressionado por óleo hidráulico, entrando ainda mais nos poros da amostra.

Como resultado do ensaio são obtidos gráficos que relacionam o diâmetro do poro com a porcentagem de volume de mercúrio intrudido, área superficial da amostra, fração do número de poros, porosidade obtida por intrusão de mercúrio, entre outros. Estes gráficos e os relatórios que contém os resultados obtidos pelo ensaio são gerados pelo software presente no computador que está interligado ao equipamento de porosimetria por intrusão de mercúrio e podem ser observados detalhadamente através do item 4.4.1.5 e do apêndice C.

4 Apresentação e análise dos resultados

A partir da metodologia aplicada, este capítulo apresentará os resultados obtidos para o trabalho referente ao estudo dos traços de CPR, além de avaliar as diferenças entre eles e alguns parâmetros que foram produzidos. Também neste capítulo será apresentada a equação de regressão linear múltipla capaz de otimizar o traço de CPR e por fim apresentarão os resultados de alguns ensaios feitos com a nova mistura originada da equação de regressão para avaliar as propriedades deste novo traço.

4.1 Aspecto dos provetes

Ao longo do programa experimental os diversos provetes de CPR executados, foram analisados em três diferentes situações: 1) Estado fresco (item 4.1.1); 2) Estado endurecido após desmolde (item 4.1.2); 3) Estado endurecido após cura térmica (item 4.1.3)

4.1.1 Estado fresco

Na Figura 37 pode verificar-se o aspeto, no estado fresco recém moldado, dos 9 traços de CPR, na qual pode-se notar que as misturas tem variações de coloração e até mesmo de número de bolhas que aparecem na superfície dos provetes. A variação na coloração dos traços deve-se à quantidade de areia e água de cada um dos traços. Quanto maior a quantidade de água inserida na mistura, relativa a uma quantidade menor de areia, mais clara ficou a mistura.

Relativamente à execução dos 9 traços inicialmente apreciados, estes passaram por uma análise qualitativa avaliando as características dos traços em estado fresco, como a trabalhabilidade, fluidez e adensabilidade. Para auxiliar na análise empírica e considerando o ligante da mistura os materiais sílica ativa e cimento, através da Tabela 23 pode-se observar a relação ligante/agregado (L/A) e a relação água/ligante (\dot{A}/L), tendo como principal objetivo avaliar os efeitos da trabalhabilidade na mistura.

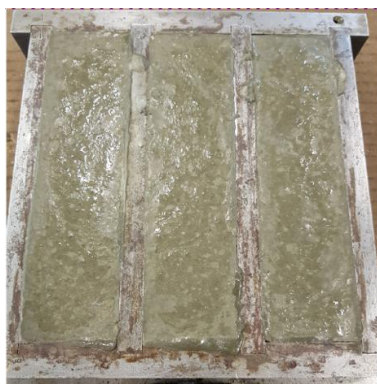
Tabela 23 - Relações entre ligante, agregado e água das misturas de CPR

Mistura	Relação L/A	Relação Á/L
1	1,22	0,20
2	1,22	0,24
3	0,55	0,20
4	0,55	0,24
5	0,76	0,22
6	0,76	0,18
7	0,76	0,26
8	0,50	0,22
9	0,76	0,22

De forma geral, observando a Tabela 23 e a Figura 37, quanto maior a relação Á/L , mais clara encontra-se a mistura e quanto menor esta relação, pior a sua trabalhabilidade. Com base no exposto, entre os nove traços de CPR observados, o traço 1, de forma empírica, foi o que apresentou maior fluidez e adensabilidade para produzir os provetes, além do seu aspecto ser bem satisfatório, uma vez que não apresenta diversas bolhas de ar em sua superfície ou irregularidades. Considerando as relações L/A e Á/L , o traço 1 apresentou a maior relação entre ligantes e agregados e a segunda menor relação água e ligantes, conferindo uma cor mais escura e boa trabalhabilidade. Os traços 3 e 5 também se apresentaram com boas características apesar de não terem tanta água em suas composições. Proporcionalmente, estes traços apresentam quantidades semelhantes, portanto, sua coloração e trabalhabilidade apresentaram-se análogas.

O traço 6 foi o pior dos nove traços em termos de mistura pois houve um péssimo adensamento, assim como grande número de vazios em sua superfície exposta. Tal ocorrência dá-se pela baixa quantidade de água utilizada, somado a uma grande quantidade de areia na mistura, representado pela menor relação água/ligantes presente no estudo. O traço 9 conseguiu ser adensado mecanicamente com alguma dificuldade devido à baixa relação Á/L (ver Tabela 23) e sua coloração manteve-se escura devido a esta mesma relação, como pode ser visto na Figura 37. Ao deparar-se com esta situação, seria possível exceder a quantidade de água ou aditivo utilizado nas misturas 6 e 9 para conseguir atingir uma trabalhabilidade aceitável e possam ser estudadas.

Os traços 2, 4 e 7 apresentaram uma boa trabalhabilidade para execução dos provetes, mas a superfície exposta no molde ficou com um aspecto brilhante e uma fina película de água, dando a entender que a quantidade de água nestas misturas estava em excesso. Tal fato pode ser evidenciado através da Tabela 23, na qual estes traços apresentam as maiores relações água/ligantes dentre os 9 traços analisados.



Traço 1



Traço 2



Traço 3



Traço 4



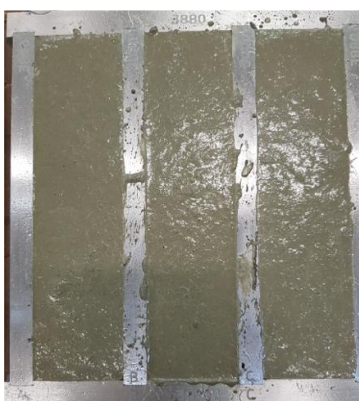
Traço 5



Traço 6



Traço 7



Traço 8



Traço 9

Figura 37 - Traços nos moldes em estado fresco

4.1.2 Estado endurecido após desmolde

Decorridas 24 horas após a moldagem, os provetes foram desmoldados, pesados e medidos, antes de serem colocados em banho-maria por 28 dias. Comparativamente à Figura 37, a aparência e coloração dos CPR alteraram, como pode ser percebido através da Figura 38.



Figura 38 - Traços no estado endurecido

Relativamente aos traços 1, 4 e 5 estes não tiveram seus registros fotográficos. Na Figura 39 pode-se observar de forma mais clara a diferença no adensamento e na superfície exposta dos provetes de cada um dos traços, além da quantidade dos poros superficiais presente.



Traço 2



Traço 3



Traço 6



Traço 7



Traço 8



Traço 9

Figura 39 - Aspecto dos provetes no estado endurecido

Dos traços apresentados na Figura 39, é possível notar que o traço 6 apresentou uma compactação bastante fraca, pela falta de água na mistura, percebida pela falta de coesão entre as partículas. Os demais traços tiveram uma compactação satisfatória, com o número de poros visíveis relativamente baixo, com base na análise qualitativa das faces do provete.

Os traços 3, 6 e 9 têm aparentemente uma quantidade significativa de vazios em suas paredes e os demais traços apresentam menos vazios, uma vez que estas são as três misturas que apresentam relações água/ligantes baixas (ver Tabela 23). Apesar de não estarem presentes na Figura 39, os traços 1 e 5 foram os que menos apresentaram vazios na mistura, quando foram visualmente analisados. Estas observações e registros fotográficos foram realizados 24 horas após feita a execução da mistura dos traços.

Considerando a superfície exposta dos provetes na Figura 39 depois deles terem sido retirados dos moldes, a superfície exposta dos traços 2 e 7, que se encontravam com uma fina película de água após moldagem dos provetes, não está mais presente nas Figura 38 e Figura 39.

Os provetes foram pesados e medidos após serem retirados dos moldes e em seguida foram colocados no banho-maria para uma cura térmica a 60°C por 28 dias. As Figura 40, Figura 41 e Figura 42 mostram os traços de CPR dentro do banho-maria com 2 dias, 7 dias e 28 dias em cura térmica.



Figura 40 - Provetes passados 2 dias em cura térmica à 60°C

Figura 41 - Provetes passados 7 dias em cura térmica à 60°C

Figura 42 - Provetes passados 28 dias em cura térmica à 60°C

Como pode ser observado através das Figura 40, Figura 41 e Figura 42, nos primeiros dois dias em cura térmica os provetes não apresentaram nenhuma variação em seu aspecto, mas após a primeira semana em banho-maria, as reações pozolânicas já aconteceram. Devido às reações pozolânicas esperadas para o CPR pela presença de sílica ativa, pó de quartzo, cimento e altas temperaturas de cura, o material apresenta em sua superfície esta camada branca, resultante das reações entre os materiais presentes nas misturas. Esta camada branca varia de acordo com o tipo do traço, pois quanto maior é a relação ligante/agregado (ver Tabela 23), a camada apresentou-se mais intensificada. Pode-se dizer, portanto, que aqueles traços que possuem quantidades menores de areia e por consequência uma parcela mais significativa de materiais reativos como sílica ativa e cimento, apresentaram maiores quantidades de material branco depositado em sua superfície. Considerando a diferença visível dos provetes na primeira semana (ver Figura 41), o aspecto geral deles não teve grandes variações até os 28 dias em cura térmica (ver Figura 42).

Passados os 28 dias em cura térmica os provetes foram novamente pesados e medidos, como pode ser observado na Tabela 24. A tabela na íntegra, com o valor obtido para cada um dos provetes se apresenta no apêndice B.

Tabela 24 – Média dos valores obtidos dos traços de CPR antes e depois do processo de cura térmica

Traço	Antes da cura térmica				Depois da cura térmica			
	C (mm)	L (mm)	H (mm)	Massa (g)	C (mm)	L (mm)	H (mm)	Massa (g)
1	160,16	39,86	40,08	591,73	161,49	40,45	40,01	603,13
2	160,42	39,87	39,03	574,23	160,66	39,87	39,80	587,60
3	160,30	39,96	40,86	575,87	160,35	40,22	40,69	585,87
4	160,54	39,92	38,96	569,73	160,58	39,98	39,34	582,23
5	160,42	39,85	40,66	585,50	160,56	40,23	40,21	595,03
6	160,99	39,96	40,32	498,23	161,05	40,01	40,32	544,20
7	160,47	39,91	39,43	579,30	160,49	39,91	39,82	590,47
8	159,57	39,86	40,21	580,30	159,87	39,81	40,37	591,33
9	159,68	39,86	40,28	574,43	160,42	39,84	40,17	584,80

Legenda:

C – Comprimento

L – Largura

H - Altura

A Tabela 24 indica a variação dos valores de cada um dos 3 provetes feitos para cada um dos 9 traços, com um total de 27 provetes a serem analisados. Em geral não se nota uma diferença significativa em termos de variação de comprimento, largura ou altura após o processo de cura térmica. O fator que mais variou entre as amostras é a massa, uma vez que após retirado do molde, o provete passou 28 dias imerso em água à temperatura de 60°C, fazendo com que a água entrasse pelos poros do concreto, deixando-o mais pesado.

O CPR é bastante caracterizado por ter um baixo índice de vazios em seu interior e pode ser notado através dos valores apresentados na Tabela 25, que apresenta a variação de cada provete em relação a sua massa inicial e final, antes e depois de ficar imerso em água. O valor detalhado de cada um dos provetes analisados para cada um dos traços está no apêndice B. Esta diferença de massa também foi determinada para verificar o nível de homogeneidade dos traços, uma vez que, como pode ser notado, os traços com maiores dificuldades de adensamento e compactação foram aqueles que apresentaram maiores variações de massa.

Tabela 25 - Variação da massa dos provetes antes e depois da cura térmica

Traço	Massa antes da cura térmica (g)	Massa depois da cura térmica (g)	Variação de massa (g)
1	591,73	603,13	11,40
2	574,23	587,60	13,37
3	575,87	585,87	10,00
4	569,73	582,23	12,50
5	585,50	595,03	9,53
6	498,23	544,20	45,97
7	579,30	590,47	11,17
8	580,30	591,33	11,03
9	574,43	584,80	10,37

A Tabela 25 mostra que a variação média da massa dos provetes é de 1,93%, com exceção dos provetes do traço 6 que, devido às dificuldades no adensamento e má compactação, como mostra o resultado apresentado na Figura 39, teve uma percentagem de variação de massa média de 9,23%, valor bastante superior comparado aos demais traços. Sendo assim, pode ser feita uma comparação dos valores de resistência à serem obtidos. Com base no Gráfico 3, os valores de variação mantiveram-se baixos, indicando que estes traços terão um desempenho esperado melhor quando ensaiados à compressão.

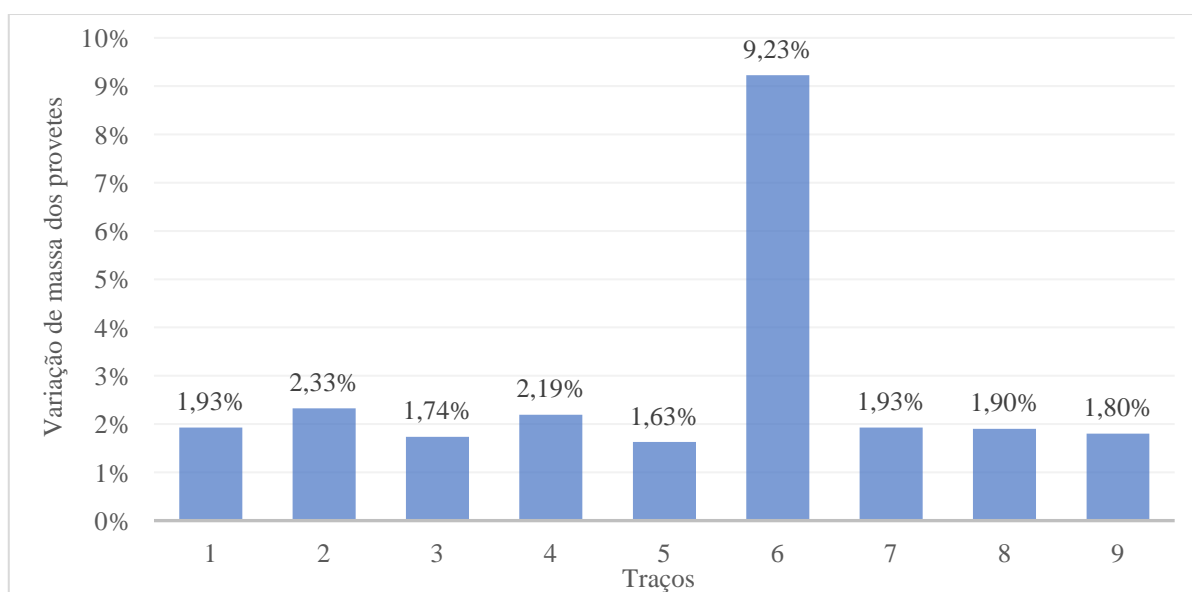


Gráfico 3 - Variação de massa dos traços de CPR

O Gráfico 3 deixa evidenciada a grande diferença de valores entre o traço mais seco e com pior adensamento dos demais traços. Tendo como base apenas este parâmetro, o traço de

concreto mais resistente seria o traço 5, pois é o traço que apresentou a menor percentagem de variação de peso antes e depois do tratamento térmico imerso em água, indicando baixos índices de permeabilidade e vazios.

4.1.3 Estado endurecido após a cura térmica

No estado endurecido após a cura térmica, os provetes se apresentaram mais uma vez com aspecto diferente daquele retratado nas Figura 37 e Figura 38. Após a cura térmica os provetes estavam mais esbranquiçados devido ao resíduo branco resultante das reações que ocorreram devido à alta temperatura de cura do concreto. Com exceção dos provetes do traço 6, os demais traços já estavam com um aspecto mais uniforme e diferentes das Figura 37 e Figura 38, principalmente pela sua coloração, que agora já se apresenta mais próxima da cor usual dos concretos comuns, como pode ser observado através da Figura 43.



Figura 43 - Aspecto final dos provetes após cura térmica

Ressalva-se que não foi possível registrar o aspecto dos provetes relativos ao traço 1 uma vez que estes já tinham sido ensaiados, embora sua aparência fosse bastante semelhante ao aspecto apresentado pelo traço 8, com baixa porosidade e uma coloração não tão escura.

Os traços 3, 8 e 9 apresentam variação na coloração dos provetes do mesmo traço pois a variação da coloração entre os provetes de mesmo traço ocorreu devido a face que foi fotografada não ser a mesma em todos os provetes e como eles foram registrados logo após serem retirados do banho-maria, alguns ficaram com um aspecto “mais seco” que outros pois até o momento da fotografia a água quente presente na superfície dos provetes evaporou facilmente, além daqueles que apresentaram maior quantidade de material esbranquiçado resultante das reações pozolânicas que ocorreram no concreto.

Os provetes dos traços 2 e 7 tiveram uma coloração mais clara que os demais concretos por conterem uma maior taxa de água em suas misturas ($n=0,24$ e $n=0,26$ respectivamente, de acordo com a Tabela 17). O traço 6 teve seus provetes com a coloração mais escura dentre todos os traços analisados pois nele a quantidade de água foi insuficiente para hidratação de todas as partículas da mistura e devido à péssima compactação a água da cura térmica permeou o concreto e fez com que as amostras tenham este aspecto “molhado” mesmo após retiradas da água. O traço 9 é o segundo traço com a coloração mais escura dentre os 9 traços estudados. Se comparados os traços 6 e 9 aos demais, as taxas de água empregadas em suas misturas estão entre as mais baixas (relações água/ligantes com valores de $n=0,18$ e $n=0,22$ respectivamente, de acordo com a Tabela 17) para os traços que empregaram o parâmetro de areia como $m=1,5$. Os demais traços mantiveram uma coloração padrão para concretos.

4.1.4 Análise geral dos traços

Os 9 traços de CPR estudados, detalhados em suas quantidades através das Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19, têm variação na quantidade de alguns dos seus materiais, como é o caso da sílica ativa, areia e água, para facilitar a análise dos dados e atingir o objetivo principal do trabalho que é desenvolver uma equação que apresente as quantidades ideais dos materiais variáveis na mistura de CPR, para otimizar as propriedades deste concreto.

Após analisadas as características estéticas dos 27 provetes, estes podem ser analisados também com base na composição dos materiais. Com base na variação dos 9 traços, uma maneira mais tangível para visualizar estas diferenças é através do gráfico de barras que

compara a quantidade de material utilizada em cada um dos traços. No Gráfico 4 se evidenciam os materiais pré-fixados como o cimento e o pó de quartzo, que não sofrem alterações conforme muda o traço, e os materiais variáveis como areia, através dos quais pode ser observada a grande variação entre os traços conforme a peneira utilizada.

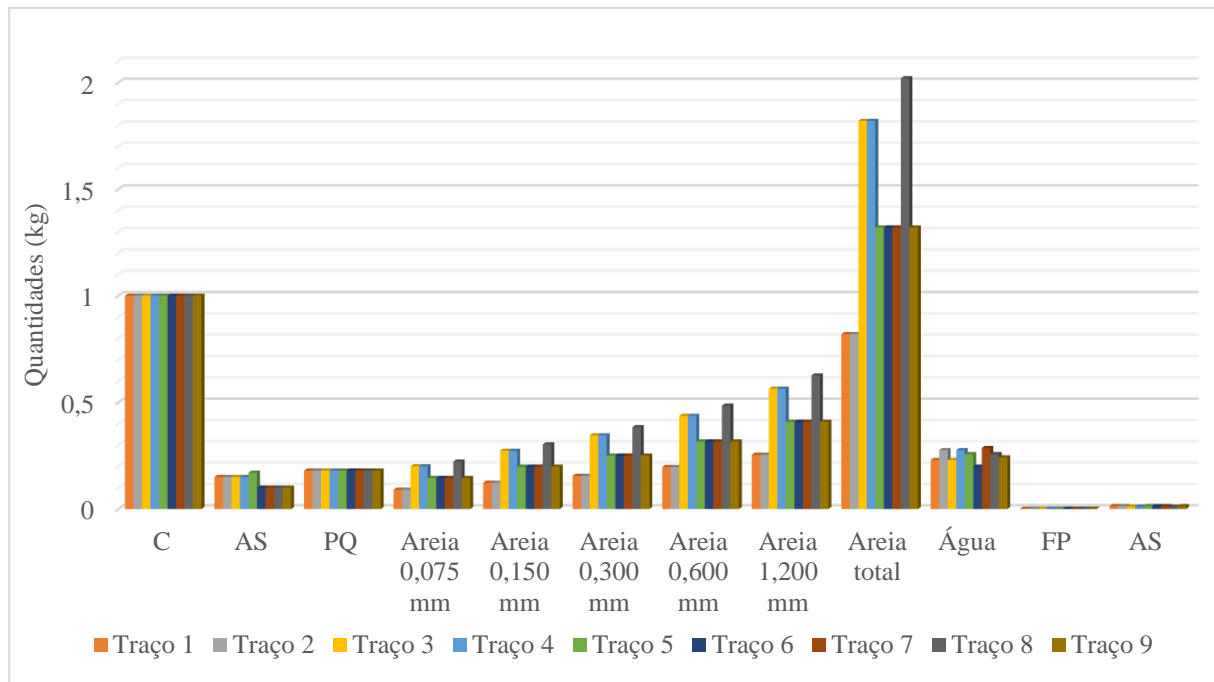


Gráfico 4 - Variação dos materiais em análise à cada traço de CPR

Legenda:

- C - Quantidade de cimento;
- SA - Quantidade de sílica ativa em relação à massa de cimento;
- PQ - Quantidade de pó de quartzo em relação à massa de cimento;
- FP - Quantidade de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento;
- AS - Quantidade de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento;

Através do Gráfico 4 observa-se que a areia é o parâmetro de maior influência nos traços de CPR estudados, uma vez que é o material cuja variação é mais expressiva considerando as quantidades presentes na mistura, além de ser o parâmetro que está presente em maior quantidade dentre os materiais variáveis. Pode-se então assumir que o fator principal para analisar tanto a trabalhabilidade quanto a coloração dos traços é a areia, associada à quantidade de água utilizada, visto que esta relação pode indicar se a mistura apresenta uma trabalhabilidade melhor.

No item 4.1.1, onde as amostras encontravam-se em seu estado fresco, o aspecto e trabalhabilidade dos provetes foram os melhores naqueles traço que tinham menores quantidades de areia, ou então se as quantidades de areia eram mais elevadas então a quantidade de água também era. Já no item 4.1.2, onde as amostras já estavam em seu estado endurecido após 24 horas da moldagem dos provetes mas antes de serem submetidos à cura térmica, a

coloração das amostras é similar entre todos os traços, não podendo estabelecer um parâmetro que corresponda à realidade dos provetes de acordo com o traço que eles pertencem.

Por fim, no item 4.1.3 a mesma constatação dos provetes analisados nas condições de estado fresco se reitera nos provetes em estado endurecido após cura térmica, onde os provetes com a maior quantidade de água relativamente à quantidade de areia continham uma coloração mais clara e os provetes com a menor quantidade de água relativamente à quantidade de areia das misturas continham uma coloração mais escura. No tocante à composição dos traços, pode-se notar através do Gráfico 5 a variação dos materiais nos traços estudados e observar a forte influência da variação da areia na composição dos traços de CPR.

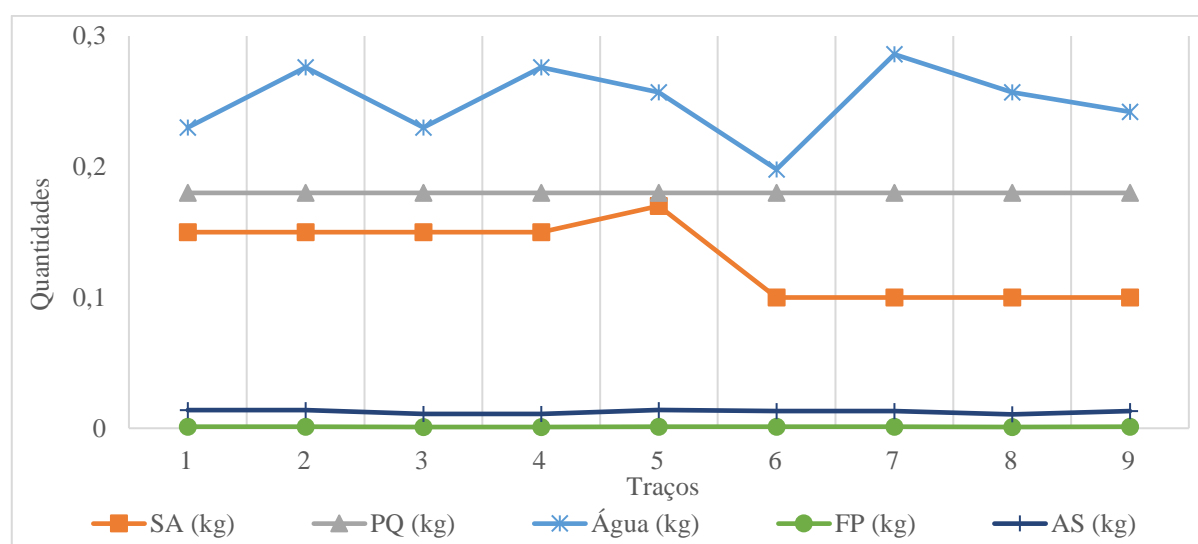


Gráfico 5 - Variação nos materiais componentes do CPR

Legenda:

- C - Quantidade de cimento;
- SA - Quantidade de sílica ativa em relação à massa de cimento;
- PQ - Quantidade de pó de quartzo em relação à massa de cimento;
- FP - Quantidade de fibras de polipropileno em relação à massa de cimento;
- AS - Quantidade de aditivo superplastificante em relação à massa de cimento;

4.2 Ensaios de resistência

Após retirados do banho-maria, os provetes foram todos ensaiados à flexão e à compressão aos 28 dias de idade. Inicialmente os provetes seriam apenas ensaiados à compressão, mas visando aumentar o número de resultados com uma maior significância estatística, realizou-se *a priori* o ensaio de resistência à flexão.

Os resultados obtidos em cada ensaio para todos os provetes estão melhor detalhados e explicados nos itens 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1 Resistência à flexão

Para o ensaio de resistência à flexão foram ensaiados 27 provetes prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) ao todo, representando 3 provetes para cada um dos 9 traços analisados. O resultado do ensaio de resistência à flexão realizado aos 28 dias apresenta-se na Tabela 26. Já os resultados para cada um dos provetes ensaiados estão presentes no apêndice B.

Tabela 26 - Resultados do ensaio de resistência à flexão dos 9 traços estudados

Traço	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Média (\bar{y}) (MPa)	33,15	27,19	30,19	26,69	30,44	12,75	26,94	26,19	29,44
Desvio padrão (σ_p) (MPa)	5,57	0,87	2,29	2,41	0,43	1,30	1,98	2,70	4,13
Coefficiente de variação (%)	16,80	3,18	7,59	9,03	1,42	10,19	7,36	10,32	14,03

Através da Tabela 26 é possível notar que a média dos 27 provetes representantes dos 9 traços estudados foi de 27,00 MPa e o desvio padrão (σ_p) de 5,81 MPa. De maneira geral, as amostras apresentaram um coeficiente médio de variação de 8,88%, que representa uma dispersão baixa em relação aos seus valores. Ainda, apenas um dos traços apresentou coeficiente de variação superior a 15%, sendo então possível afirmar que em geral as amostras tiveram uma baixa dispersão, oferecendo dados homogêneos.

Através do Gráfico 6 é possível inferir que, com exceção do traço 6, que encontra-se expressivamente fora da faixa de variação aceitável, os demais traços se comportaram com valores relativamente próximos uns dos outros.

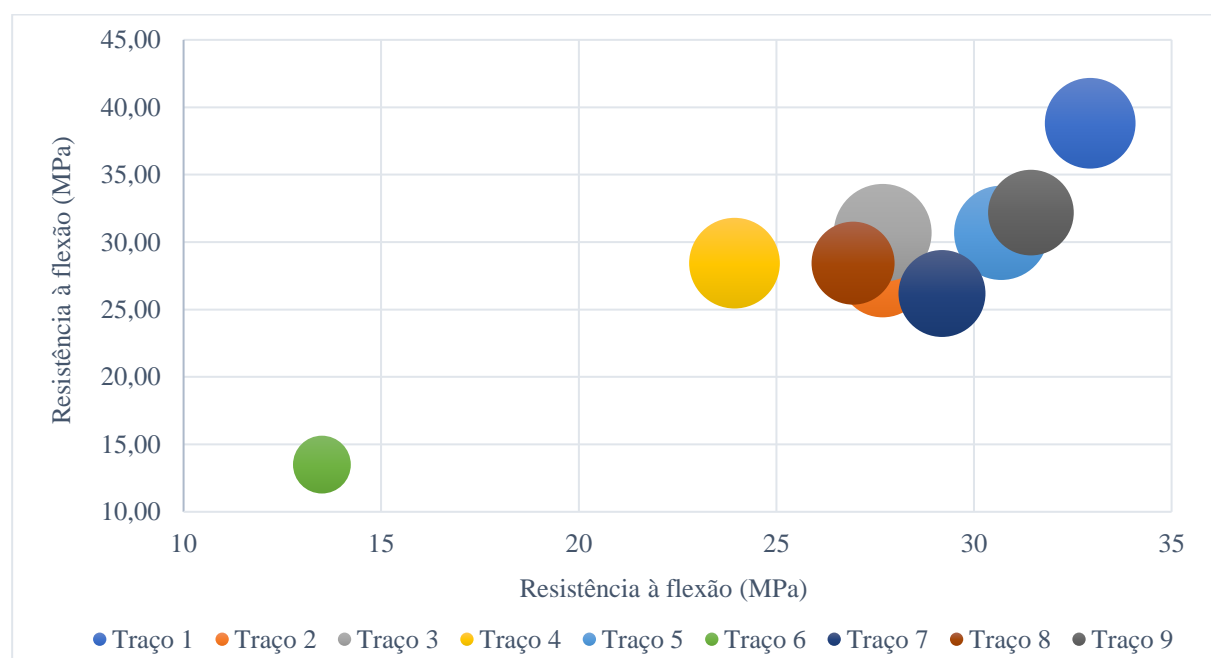


Gráfico 6 - Dispersão dos valores obtidos no ensaio de resistência à flexão

O valor de resistência à flexão do traço 6 foi o menor entre os 9 traços e o traço 1 foi o que melhor resistiu à flexão, dado já esperado uma vez que, analisando o adensamento e a trabalhabilidade das misturas estudadas, o traço 1 foi o que apresentou melhor trabalhabilidade e auto adensamento, ao contrário do traço 6 que teve péssimos adensamento e trabalhabilidade.

Quando as amostras do traço 6 são desconsideradas, a média dos valores de resistência à flexão dos traços passa de 27,00 MPa para 28,78 MPa, o desvio padrão tem uma redução de 5,81 MPa para 2,43 MPa (redução de mais de 60%) e o coeficiente de variação passa de 8,88% para 8,72%, caracterizando a amostra com baixa dispersão (dados homogêneos).

4.2.2 Resistência à compressão

Para o ensaio de resistência à compressão foram ensaiados 54 provetes prismáticos (4 cm x 4 cm x 16 cm) ao todo, pois quando ensaiados à flexão, obtiveram-se o dobro de amostras. Logo, cada um dos traços analisados teve 6 provetes para serem ensaiados à compressão. Os resultados do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias apresentam-se na Tabela 27. Os resultados para cada um dos provetes ensaiados estão presentes no apêndice B.

Tabela 27 - Resultados do ensaio de resistência à compressão dos 9 traços estudados

Traço	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Média (\bar{y}) (MPa)	153,15	131,34	121,16	130,68	144,50	35,40	126,36	126,24	138,13
Desvio padrão (σ_p) (MPa)	14,32	14,65	20,36	5,02	8,56	4,96	12,94	12,17	8,38
Coeficiente de variação (%)	9,35	11,15	16,80	3,84	5,92	14,02	10,24	9,64	6,07

Analisando a Tabela 27, como já era esperado, novamente o traço 6 teve um desempenho inferior aos demais traços estudados com um valor médio de 35,4 MPa. Tal valor de resistência à compressão aos 28 dias é comumente atingido por concretos tradicionais onde não é necessária nenhuma adição ou uso de uma classe de cimento superior. Além disso, o traço 1 foi o traço que apresentou os melhores valores de resistência à compressão aos 28 dias, com um valor de 153,15 MPa, seguido do traço 5, com valor de resistência à compressão aos 28 dias de 144,50 MPa. A média entre os 9 traços de CPR foi de 122,99 MPa e o coeficiente de variação foi de 9,67%, conferindo às amostras uma homogeneidade alta.

Considerando a exclusão dos dados de resistência à compressão referentes ao traço 6, a média dos traços passaria de 122,99 MPa para 135,94 MPa, o desvio padrão tem uma redução de 34,33 MPa para 10,66 MPa, que representa uma redução de 65% em relação ao valor anterior, e o coeficiente de variação reduziu para 9,13%, indicando ainda uma amostra com dados homogêneos.

Após realizado o ensaio de compressão, o impacto causado na peça pela força aplicada durante o ensaio de resistência é visível na metade inferior dos provetes apresentados na Figura 44 à exceção do provete que representa o traço 6, o qual não deixa evidente a marca de aplicação da força para o ensaio de resistência à compressão.



Figura 44 - Aspecto dos provetes de CPR após ensaio de resistência à compressão

4.3 Obtenção do novo traço de Concreto de Pós Reativos

Após obtenção dos dados de resistência à compressão relativos aos 54 provetes ensaiados, como pode ser visto através da Tabela 27, agora é possível analisar as variáveis que já foram expostas no item 3.7, trazendo-as para os valores obtidos neste trabalho.

4.3.1 Análise dos *outliers*

Conforme a metodologia apresentada através do apêndice A, a Tabela 28 apresenta os valores (com base nos valores já apresentados na Tabela 27) de média, desvio padrão, limites máximos e mínimos com base no desvio padrão da média, além de quantas das 6 amostras de cada traço está dentro deste intervalo e, caso a quantidade de amostras difira em relação à 68% do total, é necessário que seja retirado um dos valores componentes da amostra e que se refaça o cálculo até que se enquadre no valor estatístico de 68% ou mais próximo possível dele.

Tabela 28 - Valores em análise dos traços de CPR estudados, em MPa

Traço	Média (\bar{y})	Desvio Padrão (σ_p)	Limite Mínimo ($\bar{y} - \sigma_p$)	Limite Máximo ($\bar{y} + \sigma_p$)	% Amostras dentro	De acordo?	Amostra retirada
1	153,15	14,32	138,83	167,47	83%	Não	130,04
2	131,34	14,65	116,69	145,99	33%	Não	112,99
3	121,16	20,36	100,80	141,52	67%	Sim	
4	130,68	5,02	125,66	135,70	67%	Sim	
5	144,50	8,56	135,94	153,06	50%	Não	154,87
6	35,40	4,96	30,44	40,36	67%	Sim	
7	126,36	12,94	113,41	139,30	67%	Sim	
8	126,24	12,17	114,08	138,41	83%	Não	103,51
9	138,13	8,38	129,75	146,51	67%	Sim	

O limite mínimo foi calculado subtraindo-se da média o valor do desvio padrão e o limite máximo, somando-se o desvio padrão ao valor da média. Para as 6 amostras em cada traço, se os respectivos valores encontrados estavam entre 58% e 78% dentro dos limites, a média é considerada com significância, mas caso estivessem fora deste intervalo, o valor mais distante dos extremos era retirado, tendo que repetir os cálculos com menos uma amostra até que se atinja um número de amostras entre o intervalo de 58% e 78%. Com isso, na última coluna da Tabela 28 apresentam-se os valores retirados das amostras que se encontraram mais distantes dos limites máximo e mínimo.

Para os traços 1, 2, 5 e 8 foi feita uma nova análise dos dados, incluindo as variáveis presentes na Tabela 29.

Tabela 29 - Valores de acordo com a segunda análise dos traços de CPR estudados, em MPa

Traço	Média (\bar{y})	Desvio Padrão (σ_p)	Limite Mínimo ($\bar{y} - \sigma_p$)	Limite Máximo ($\bar{y} + \sigma_p$)	% Amostras dentro	De acordo?	Amostra retirada
1	157,77	9,80	147,96	167,57	80%	Não	144,53
2	135,01	12,93	122,08	147,94	80%	Não	116,27
5	142,43	7,70	134,73	150,13	80%	Não	153,67
8	130,79	5,48	125,31	136,27	60%	Sim	

Mesmo após uma segunda análise de *outliers* com a retirada de uma das seis amostras, os traços 1, 2 e 5 ainda não apresentam uma significância estatística, portanto deverá ser feita uma nova análise retirando os valores das amostras indicados na última coluna da Tabela 29. Sendo assim, os novos valores de média, desvio padrão, limites máximo e mínimo e a

percentagem de amostras dentro dos limites, com duas das seis amostras retiradas, encontram-se na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores de acordo com a terceira análise dos traços de CPR estudados, em MPa

Traço	Média (\bar{y})	Desvio Padrão (σ_p)	Limite Mínimo ($\bar{y} - \sigma_p$)	Limite Máximo ($\bar{y} + \sigma_p$)	% Amostras dentro	De acordo?
1	161,08	7,43	153,65	168,50	75%	Sim
2	139,70	8,75	130,95	148,45	75%	Sim
5	139,62	5,14	134,48	144,76	75%	Sim

Após a terceira análise dos dados, pode-se perceber que todas as amostras agora estão com seus valores de acordo com as porcentagens para que tenham seus valores considerados estatisticamente significativos. Sendo assim, os valores que serão utilizados, após a análise dos *outliers*, assim como sua média e valor padrão estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Dados definitivos para cálculo da regressão linear múltipla, em MPa

Traço	Nº amostras	Valores dos provetes a serem considerados						Média (\bar{y})	Desvio Padrão (σ_p)
		CPR 1	CPR 2	CPR 3	CPR 4	CPR 5	CPR 6		
1	4	167,39	162,39	164,15	150,38			161,08	7,43
2	4	129,51	135,35	146,17	147,76			139,70	8,75
3	6	82,62	128,95	122,65	125,19	143,52	124,03	121,16	20,36
4	6	126,72	132,15	127,83	135,28	137,32	124,77	130,68	5,02
5	4	135,57	138,72	147,08	137,11			139,62	5,14
6	6	38,96	38,92	36,61	39,56	30,11	28,24	35,40	4,96
7	6	134,11	144,94	107,77	127,59	126,59	117,13	126,36	12,94
8	5	133,00	131,02	138,29	127,99	123,65		130,79	5,48
9	6	122,82	140,62	136,67	140,19	148,08	140,38	138,13	8,38

Tendo em vista os valores obtidos através da Tabela 31, para verificar se existe diferença estatística entre os resultados obtidos dos traços realizou-se a análise de variância (ANOVA) com o auxílio do software *Statistics Kingdom* e comprovou-se, com a rejeição da hipótese H_0 ($H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_9$) que os traços apresentaram diferença estatística entre si, com um nível de confiança de 95%.

Com base nos dados analisados ainda é possível continuar a análise para definir se os traços entre si possuem uma diferença considerável e para isso é necessário que sejam calculados alguns parâmetros como o desvio da média (Equação 18), desvio total (Equação 19)

e desvio total corrigido (Equação 20), sendo n o número de amostras, σ_p o desvio padrão e σ_s o erro sistemático da prensa (indicado na Equação 21).

$$\sigma_m = \frac{\sigma_p}{\sqrt{n}}$$

Equação 18

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_s^2}$$

Equação 19

$$\sigma_{Tc} = 1,1 \cdot \sigma_T$$

Equação 20

Para o cálculo do desvio total (Equação 19), foi tido como base o valor de erro sistemático da prensa hidráulica encontrado na ABNT NBR NM-ISO 7500-1 (2004), a qual aponta o erro de exatidão para a classe 1 da máquina igual a 1% do valor das medidas médias, como mostra a Equação 21.

$$\sigma_s = \bar{y} \cdot 0,01$$

Equação 21

Com estas equações e dados, através da Tabela 32 é possível ver quais são os resultados dos desvios da média, total e total corrigido, para todos os 9 traços analisados.

Tabela 32 - Valores dos desvios com base nos valores da média (em MPa) dos 9 traços de CPR estudados

Traço	Amostras (n)	Média (\bar{y})	Desvio Padrão (σ_p)	Limite Mínimo ($\bar{y} - \sigma_p$)	Limite Máximo ($\bar{y} + \sigma_p$)	σ_m	σ_T	σ_{Tc}	$y \pm \sigma_{Tc}$
1	4	161,08	7,43	153,65	168,51	3,72	4,05	4,45	161,08 ± 4,45
2	4	139,70	8,75	130,95	148,45	4,38	4,59	5,05	139,70 ± 5,05
3	6	121,16	20,36	100,80	141,52	8,31	8,40	9,24	121,16 ± 9,24
4	6	130,68	5,02	125,66	135,70	2,05	2,43	2,67	130,68 ± 2,67
5	4	139,62	5,14	134,48	144,76	2,57	2,92	3,22	139,62 ± 3,22
6	6	35,40	4,96	30,44	40,36	2,02	2,06	2,26	35,40 ± 2,26
7	6	126,36	12,94	113,42	139,30	5,28	5,43	5,97	126,36 ± 5,97
8	5	130,79	5,48	125,31	136,27	2,45	2,78	3,06	130,79 ± 3,06
9	6	138,13	8,38	129,75	146,51	3,42	3,69	4,06	138,13 ± 4,06

Com base nos dados da Tabela 32 é possível criar um método comparativo para que seja possível comparar entre os traços, quais deles possuem diferenças estatísticas de acordo com a diferença e o desvio projetado (Dp), que toma como base o desvio total corrigido de cada uma das amostras. O cálculo da diferença (D) nada mais é que o valor, em módulo, da diferença dos valores analisados. Já o cálculo do desvio projetado é feito como indica a Equação 22.

$$D_p = \sqrt{(\sigma_{Tc_i})^2 + (\sigma_{Tc_j})^2}$$

Equação 22

Na Equação 22, σ_{Tc_i} e σ_{Tc_j} são os valores de desvio total corrigido comparados e considerando estes critérios foram obtidos os seguintes dados, comparando os traços em duplas, gerando 36 combinações, como indica a Tabela 33.

Tabela 33 - Diferença estatística entre 36 combinações envolvendo os 9 traços de CPR

Combinações	Diferença	Dp	D > Dp (68% de confiança)	2.Dp	D > 2.Dp (95% de confiança)
1-2	21,38	6,74	Sim	13,47	Sim
1-3	39,92	10,26	Sim	20,51	Sim
1-4	30,40	5,19	Sim	10,39	Sim
1-5	21,46	5,49	Sim	10,99	Sim
1-6	125,68	5,00	Sim	9,99	Sim
1-7	34,72	7,45	Sim	14,90	Sim
1-8	30,29	5,40	Sim	10,80	Sim
1-9	22,95	6,03	Sim	12,05	Sim
2-3	18,54	10,53	Sim	21,06	Não
2-4	9,02	5,72	Sim	11,43	Não
2-5	0,08	5,99	Não	11,98	Não
2-6	104,30	5,53	Sim	11,07	Sim
2-7	13,34	7,82	Sim	15,65	Não
2-8	8,91	5,90	Sim	11,81	Não
2-9	1,57	6,48	Não	12,96	Não
3-4	9,52	9,62	Não	19,24	Não
3-5	18,46	9,78	Sim	19,57	Não
3-6	85,76	9,51	Sim	19,02	Sim
3-7	5,20	11,00	Não	22,01	Não
3-8	9,63	9,73	Não	19,46	Não
3-9	16,97	10,09	Sim	20,18	Não
4-5	8,94	4,18	Sim	8,37	Sim
4-6	95,28	3,50	Sim	7,00	Sim
4-7	4,32	6,55	Não	13,09	Não
4-8	0,11	4,06	Não	8,12	Não
4-9	7,45	4,86	Sim	9,72	Não
5-6	104,22	3,93	Sim	7,86	Sim
5-7	13,26	6,79	Sim	13,57	Não
5-8	8,83	4,44	Sim	8,87	Não
5-9	1,49	5,18	Não	10,36	Não
6-7	90,96	6,39	Sim	12,78	Sim
6-8	95,39	3,80	Sim	7,60	Sim
6-9	102,73	4,65	Sim	9,29	Sim
7-8	4,43	6,71	Não	13,42	Não
7-9	11,77	7,22	Sim	14,45	Não
8-9	7,34	5,08	Sim	10,16	Não

Com base nos valores apresentados na Tabela 33, quando as combinações apontam um resultado positivo para as colunas 4 e 6, é possível afirmar que tais combinações apresentam diferenças estatísticas significativas. Pelo contrário, quando tais colunas apresentam um resultado negativo para a combinação, a comparação é irrelevante estatisticamente, na qual não pode se dar certeza de que tais dados de fato têm diferenças consideráveis e/ou estão contribuindo para os avanços na pesquisa.

Sendo assim, é possível evidenciar através dos valores comparados na Tabela 33 com 95% de certeza ($D > 2.Dp$), que 75% das comparações feitas possuem diferença estatística, ou seja, que a variação das misturas estão, de fato, fazendo diferença entre as amostras comparadas onde apenas 9 das 36 combinações não apresentam diferença estatística. Portanto, pode-se afirmar que os traços diferem entre si significativamente através da análise feita.

Ainda, com base principalmente nos valores de resistência e também no aspecto dos provetes decidiu-se por retirar os valores do traço 6 das análises posteriores, visto que os resultados obtidos por esta mistura não representam o desempenho de um CPR, além de apresentar um valor diferente do esperado por conta de sua moldagem.

Considerando o exposto e após feita a análise dos *outliers* foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk, no qual com base nas equações e passos indicados pelo anexo A, obtiveram-se os seguintes resultados evidenciados através da Tabela 34, já sendo excluídas as informações do traço 6.

Tabela 34 - Valores obtidos para o teste de normalidade de Shapiro-Wilk

i	a _(n+1-i)	A	B	C	b	A- \bar{y}	B- \bar{y}	(A- \bar{y}) ²	(B- \bar{y}) ²
		X _(i)	X _(n+1-i)	X _(i) - X _(n+1-i)	a _(i) *C	x - média		(x - média) ²	
1	0,6062	121,16	161,0775	39,9	24,1980	-14,8	25,14	218,4	631,99
2	0,3164	126,355	139,6975	13,3	4,2216	-9,6	3,76	91,8	14,13
3	0,1743	130,6783	139,62	8,9	1,5585	-5,3	3,68	27,7	13,56
4	0,0561	130,79	138,1267	7,3	0,4116	-5,1	2,19	26,5	4,79
Soma:					30,3897	Soma:		1028,9	

A Tabela 34 representa inicialmente o valor de a_(n+1-i), o qual foi obtido considerando a quantidade de traços a serem analisados, no caso 8 traços (n). A coluna com o parâmetro A da Tabela 34 retrata os quatro valores mais baixos de resistência obtidos pelas 8 amostras analisadas e a coluna com o parâmetro B retrata os quatro valores mais altos. Já a coluna com

o parâmetro C representa a diferença entre as colunas A e B. A coluna com o parâmetro b representa o valor necessário para uso no denominador da Equação A. 1 presente no anexo A. As colunas com os parâmetros $A-\bar{y}$ e $B-\bar{y}$ apresentam a diferença entre a amostra analisada e a média de todas as amostras e por fim, as duas últimas colunas representam essa diferença elevada ao quadrado.

Para esta análise a média (\bar{y}) dos valores de resistência dos traços (excluindo o traço 6 que obteve valores discrepantes do resto das amostras) foi de 135,94 MPa. Portanto, para calcular o parâmetro W , conforme a Equação A. 1, os valores apontam-se.

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2} = \frac{(30,3897)^2}{1028,9} = 0,897622599$$

Com base no valor obtido de W e analisando os dados da Tabela A. 2, com base no número de amostras ($n=8$) e o nível de significância desejado (0,05), cujo valor apresentado para W é de 0,818, pode-se comprovar que $W_{\text{calculado}} > W_{0,05}$, logo é possível afirmar que a amostra vem de uma distribuição normal, aceitando-se portanto a hipótese H_0 (H_0 : A amostra vem de uma população normal).

4.3.2 Equação ideal de Concreto de Pós Reativos

Com os valores de resistência apresentados na Tabela 31, é possível estabelecer uma estimativa dos valores de resistência à compressão esperados para cada um dos traços conforme os parâmetros X_1 , X_2 e X_3 . A estimativa é feita através das variáveis colocadas na Equação 7, que de forma simplificada resultam na Equação 23,

$$\beta_i = \frac{\left(\frac{\sum_{j=1}^n X_{ij} \cdot y_j}{\sum_{j=1}^n (X_{ij})^2} \right)}{2}$$

Equação 23

sendo i variando de 1 a 3, referentemente aos parâmetros X e j variando de 1 a 8, referente aos traços analisados. Considera-se ainda que y representa o valor da média dos provetes resultantes de um determinado traço. A Tabela 35 apresenta os valores que representam X e y , além do subíndice j e os valores dos provetes considerados para o cálculo da média.

Tabela 35 - Valores usados para equação de regressão linear múltipla

Traços	j	X ₁	X ₂	X ₃	CPR 1 (MPa)	CPR 2 (MPa)	CPR 3 (MPa)	CPR 4 (MPa)	CPR 5 (MPa)	CPR 6 (MPa)	Média (y) (MPa)	
1	1	1	-1	-1	167,39	162,39	164,15	150,38			161,08	
2	2	1	1	-1	129,51	135,35	146,17	147,76			139,70	
3	3	1	-1	1	82,62	128,95	122,65	125,19	143,52	124,03	121,16	
4	4	1	1	1	126,72	132,15	127,83	135,28	137,32	124,77	130,68	
5	5	1,4	0	0	135,57	138,72	147,08	137,11			139,62	
7	6	0	2	0	134,11	144,94	107,77	127,59	126,59	117,13	126,36	
8	7	0	0	1,4	133	131,02	138,29	127,99	123,65		130,79	
9	8	0	0	0	122,82	140,62	136,67	140,19	148,08	140,38	138,13	
											Média (y) (MPa)	135,94
											σ_p (MPa)	12,12

Com isso, os valores de β_i da Equação 7 estão detalhados a seguir de acordo com os valores necessários para o seu cálculo. Salienta-se que como são três os parâmetros variáveis, serão também três valores de β_i envolvidos, além do β_0 que representa a própria média entre as amostras analisadas. Portanto β_1 , β_2 e β_3 estão representados conforme indicou a Equação 23.

$$\beta_1 = \frac{\left(\frac{\sum_{j=1}^n X_{1j} \cdot y_j}{\sum_{j=1}^n (X_{1j})^2} \right)}{2} = \frac{\left(\frac{X_{11} \cdot y_1 + X_{12} \cdot y_2 + \dots + X_{18} \cdot y_8}{(X_{11})^2 + (X_{12})^2 + \dots + (X_{18})^2} \right)}{2}$$

$$= \frac{\left(\frac{1 \cdot 161,1 + 1 \cdot 139,7 + \dots + 0 \cdot 138,1}{(1)^2 + (1)^2 + \dots + (0)^2} \right)}{2} = 62,76$$

$$\beta_2 = \frac{\left(\frac{\sum_{j=1}^n X_{2j} \cdot y_j}{\sum_{j=1}^n (X_{2j})^2} \right)}{2} = \frac{\left(\frac{X_{21} \cdot y_1 + X_{22} \cdot y_2 + \dots + X_{28} \cdot y_8}{(X_{21})^2 + (X_{22})^2 + \dots + (X_{28})^2} \right)}{2}$$

$$= \frac{\left(\frac{(-1) \cdot 161,1 + 1 \cdot 139,7 + \dots + 0 \cdot 138,1}{(-1)^2 + (1)^2 + \dots + (0)^2} \right)}{2} = 15,05$$

$$\beta_3 = \frac{\left(\frac{\sum_{j=1}^n X_{3j} \cdot y_j}{\sum_{j=1}^n (X_{3j})^2} \right)}{2} = \frac{\left(\frac{X_{31} \cdot y_1 + X_{32} \cdot y_2 + \dots + X_{38} \cdot y_8}{(X_{31})^2 + (X_{32})^2 + \dots + (X_{38})^2} \right)}{2}$$

$$= \frac{\left(\frac{(-1) \cdot 161,1 + (-1) \cdot 139,7 + \dots + 0 \cdot 138,1}{(-1)^2 + (-1)^2 + \dots + (0)^2} \right)}{2} = 11,26$$

Na Tabela 36 apresentam-se os valores dos parâmetros β_0 , β_1 , β_2 e β_3 , seguidos da variância (σ^2) e erro padrão (S_x) de cada um dos valores, que representam respectivamente quão longe o valor obtido se encontra do valor esperado e a precisão do cálculo.

Tabela 36 - Valores dos parâmetros β_0 , β_1 , β_2 e β_3

	Valor (MPa)	σ^2	S_x
B₀	135,94	18,37	4,29
B₁	62,76	24,66	4,97
B₂	15,05	18,37	4,29
B₃	11,26	24,66	4,97

Com a obtenção dos valores de β_1 , β_2 e β_3 , é possível completar a Equação 7 como indica na Equação 24.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3$$

$$Y = 135,94 + 62,76 \cdot X_1 + 15,05 \cdot X_2 + 11,26 \cdot X_3$$

Equação 24

Substituindo os valores dos parâmetros X_1 , X_2 e X_3 da Tabela 35 na equação acima, os valores esperados para cada um dos traços em comparação com os valores obtidos na prática, representados pelo parâmetro Y na equação, estão presentes na Tabela 37.

Tabela 37 - Valores estimados para os traços de CPR estudados

Traço	Valor Estimado pela equação (MPa)	Valor médio obtido experimentalmente (MPa)	Diferença (%)
1	172,4	161,1	7,0%
2	202,5	139,7	45,0%
3	194,9	121,2	60,8%
4	225,0	130,7	72,1%
5	223,8	139,6	60,3%
7	166,0	126,4	31,3%
8	151,7	130,8	16,0%
9	135,9	138,1	-1,6%
Média (\bar{y}) (MPa)	178,7	135,9	31,5%
Desvio padrão (σ_p) (MPa)	34,6	12,1	

Pode-se notar que com exceção do traço 9, os demais traços apresentaram seus valores menores que o esperado, devido às condições de adensamento e moldagem não terem sido ideais, como calcula-se na teoria. Na prática muitos fatores podem ser considerados variáveis em adição aos fatores já expostos, como o tipo do material utilizado, granulometria, condições de armazenagem, entre outros. Considerando o método utilizado para cura térmica, sugere-se que o fator mais agravante é a temperatura da água na qual os provetes ficaram submersos. Como já exposto no capítulo 2, a temperatura na qual o incremento de resistência foi mais significativo é de 90°C, apesar de já apresentar diferenças a partir dos 20°C, mas devido à restrições do equipamento disponível para uso desta pesquisa foi necessário manter a temperatura à 60°C.

Seguindo os valores esperados para os traços de CPR estudados e a equação com os valores dos parâmetros β_1 , β_2 e β_3 , é necessário fazer uma simulação com todas as combinações possíveis com base nos valores representativos da Tabela 20 a fim de alcançar o maior valor de Y, para então obter as quantidades ideais para o novo traço de CPR que terá suas propriedades melhoradas.

Com isso, fazendo a simulação dos valores da Tabela 20 na Equação 24, os valores obtidos através da equação de regressão linear (Equação 24) para otimizar o traço de CPR estão apontados na Tabela 38, sendo X_1 , X_2 e X_3 respectivamente representados pelos parâmetros adimensionais da sílica ativa, água e areia, tal como o valor máximo de resistência à compressão esperado para esta composição (parâmetro Y).

Tabela 38 - Parâmetros empregados para uso no novo traço de CPR

Parâmetro	Valor
X_1	1,4
X_2	2,0
X_3	1,4
Y (MPa)	269,7

De acordo com os valores apresentados na Tabela 38 e convertendo os parâmetros que foram parametrizados (Tabela 20), o parâmetro X_1 , que representa o teor de sílica ativa, cujo valor adimensional selecionado é de 1,4, em valores de teor representa 17% da quantidade de cimento. O parâmetro X_2 , que representa o fator “n” da água, tem seu melhor valor para 2,0 na forma parametrizada, correspondente ao fator $n=0,26$. Por fim, o parâmetro X_3 , representativo do fator “m” da areia otimiza a Equação 24 quando seu valor parametrizado é 1,4, que

representa o fator $m=2,2$ da areia. Com o emprego desses parâmetros na Equação 24, o valor otimizado para o traço de CPR foi o valor máximo de 269,7 MPa e espera-se na prática atingir tal valor, com os materiais e métodos já empregados para estudo dos 9 traços que deram origem a este novo traço.

4.4 Traço ideal de Concreto de Pós Reativos

Visto que o traço de CPR para este estudo manteve a maioria dos seus componentes fixos e apenas se alterou a quantidade de sílica ativa, areia e água, o novo traço de concreto obtido através do item 4.3.2, é representado como mostra o traço a seguir, onde as quantidades apresentadas são relativas às proporções de cimento, sílica ativa, pó de quartzo, areia, água, fibra de polipropileno e aditivo, respectivamente. Este novo traço foi intitulado CPR-F.

1: 0,17: 0,18: 2,02: 0,3042: 0,0012: 0,035

Os valores do novo traço para produção de 1 m³ de Concreto de Pós Reativos seguem representados através da Tabela 39.

Tabela 39 - Quantidades de cada material componente do novo traço de CPR para produção de 1m³ de concreto

Mistura	C	SA	PQ	Areia	Água	FP	AS
CPR-F	848,82	144,30	152,79	1714,63	258,21	1,02	29,79

Legenda:

C - Quantidade de cimento em kg;

SA - Quantidade de sílica ativa em kg;

PQ - Quantidade de pó de quartzo em kg;

FP - Quantidade de fibras de polipropileno em kg;

AS - Quantidade de aditivo superplastificante em kg;

Com base nas novas quantidades a serem utilizadas, foram feitos ensaios para estudar as propriedades obtidas deste novo traço de CPR, cujos resultados e análises são descritas no item 4.4.1.

4.4.1 Ensaios

Os ensaios com o novo traço foram realizados tanto no estado fresco, com o ensaio de teor de ar, como no estado endurecido com a preparação de 39 provetes prismáticos de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm.

4.4.1.1 Teor de ar

Para o ensaio de teor de ar de acordo com a ABNT NBR 13278 (2005) e NP EN 12350-7 (2000), foram feitos os passos apontados no item 3.8.1 e com o auxílio de uma balança digital e um recipiente cilíndrico foi possível chegar aos seguintes dados, expostos na Tabela 40.

Tabela 40 - Dados para cálculo do teor de ar do CPR-F

Componente	Massa (g)
Recipiente vazio	36,35
Recipiente com CPR-F	546,5
Recipiente com água	222,62

Preenchendo o recipiente com água foi possível determinar o volume do recipiente (v_r) através da divisão da massa do recipiente com água subtraído da massa do recipiente pela densidade da água, que é de 1 g/cm^3 . Sendo assim o v_r do recipiente utilizado é de $186,27 \text{ g/cm}^3$.

Com o valor do volume do recipiente sendo 186270 kg/m^3 , é possível encontrar a densidade do concreto em questão, através da Equação 11, onde

$$d = \frac{m_c - m_v}{v_r} \cdot 1000 = \frac{546,5 - 36,35}{186,27} \cdot 1000 = 2738,77 \text{ kg/m}^3$$

Para chegar ao valor de teor de ar é necessário primeiro determinar a massa volúmica teórica da mistura, e pode ser calculado através da Equação 13. Para determinar a massa volúmica teórica é necessário separar os valores de massa e massa volúmica dos materiais utilizados para compor o traço, como mostra a Tabela 41, e em seguida aplica-los à equação que segue.

Tabela 41 - Informações dos materiais para cálculo da massa volúmica teórica do CPR-F

Materiais	Massa volúmica (γ_i) (kg/m^3)	Massa (m_i) (kg)	$\sum \frac{m_i}{\gamma_i}$
Cimento	3200	848,82	0,26526
Sílica ativa	2720	144,3	0,05305
Pó de quartzo	2710	152,79	0,05638
Arcia	2300	1714,63	0,74549
Água	1000	275,19	0,27519
Fibras de polipropileno	910	1,02	0,00112
Aditivo superplastificante	1070	29,79	0,02784
Somatório:		3166,54	1,14914

$$d_t = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} = \frac{3166,54}{1,14} = 2755,57 \text{ kg/m}^3$$

Com o valor da massa volúmica teórica é possível encontrar o teor de ar, através da Equação 12, onde

$$A = 100. \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) = 100. \left(1 - \frac{2738,77}{2777,67}\right) = 0,61\%$$

O teor de ar na mistura, com base nas densidades de massa prática e teórica, obtido através do CPR-F é de 0,61% e representa um valor extremamente baixo para tal parâmetro, uma vez que este percentual aproxima-se de 3% para concretos normais (Barbar, 2016) e para argamassas é entre 8% e 18% (NBR 13278, 2005).

4.4.1.2 Absorção de água por imersão

No ensaio de absorção de água por imersão normalizado pela ABNT NBR 9778 (2005) e LNEC E 394 (1993), realizou-se o ensaio com três provetes, como indica a norma, e estes foram secos em estufa, imersos em água, levados à ebulição por 5 horas e resfriados para serem pesados em uma balança hidrostática. As informações dos três provetes para cada uma destas etapas está presente na Tabela 42.

Tabela 42 - Informações para ensaio de absorção de água por imersão do CPR-F

	Peso seco (m_s) (kg)	Peso saturado após ebulição (m) (kg)	Peso saturado na balança hidrostática (m_{sat}) (kg)
Provete 1	561,76	324	587,5
Provete 2	559,15	322	584,7
Provete 3	553,1	318	578
Média (\bar{y})	558,00	321,33	583,40
Desvio padrão (σ_p)	4,442	3,055	4,882
Coefficiente de variação (%)	0,80	0,95	0,84

O cálculo da absorção de água é feito como indica a Equação 14. Sendo assim, o valor para a absorção de água por imersão é de

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \cdot 100 = \frac{583,40 - 558,00}{558,00} \cdot 100 = 4,55\%$$

Tal valor representa um valor baixo de absorção para concretos e argamassas, visto que o percentual de absorção de água geralmente ultrapassa os 10% em misturas mais comuns.

Além desta propriedade, através das Equação 15 e Equação 16, é possível determinar o índice de vazios (I_v) e a massa específica real (ρ_r) da mistura de CPR, sendo portanto

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \cdot 100 = \frac{583,40 - 558,00}{583,40 - 321,33} \cdot 100 = 9,69\%$$

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} = \frac{558,00}{558,00 - 321,33} = 2,3577 \text{ g/cm}^3$$

Os valores de massa específica e índice de vazios encontram-se dentro da normalidade para argamassas ou concretos de granulometria reduzida, como é o caso do CPR. Para o valor de índice de vazios, o traço ideal apresentou-se dentro do esperado quando comparado a estudos relativos à concretos como o de Silva (2004), que apresentou valores de índice de vazios para concretos em suas amostras de até 16%. Já para o valor de massa específica real, que usualmente possui valores na casa dos 2,2 a 2,4 g/cm³, o valor alcançado pelo CPR-F encontra-se incluído nesta faixa de variação.

4.4.1.3 Resistência à flexão

Para o ensaio de resistência à flexão, os provetes ficaram com aspecto como mostra a Figura 45, onde pode-se notar que a quebra das metades ocorreu de uma forma regular e seus resultados encontram-se na Tabela 43.



Figura 45 - Aspecto dos provetes aos 28 dias após ensaiados à flexão

Os ensaios foram realizados em um total de 12 provetes, sendo cada uma das amostras composta por 3 provetes. Todas as amostras foram realizadas de acordo com a composição do novo traço de CPR, de acordo com o informado na Tabela 39.

Tabela 43 - Resultados de resistência à flexão para provetes do CPR-F

	Resistência à flexão CPR-F		
	7 dias	14 dias	28 dias
Média (\bar{y}) (MPa)	29,92	31,61	34,35
Desvio padrão (σ_p) (MPa)	2,494	3,117	3,487
Coefficiente de variação (%)	8,33	9,86	10,15

De acordo com os resultados apresentados através da Tabela 43, é possível observar relativamente aos traços de CPR anteriores (27,00 MPa) que esta nova mistura ganhou um incremento de 21% relativamente à média dos resultados para 28 dias, além da redução considerável entre a discrepância de valores da amostra, que antes era de 5,805 MPa e passou para 3,487 MPa. O coeficiente de variação manteve-se estável com o passar do tempo, com cerca de 10% de dispersão, indicando que os dados analisados foram homogêneos. Tais resultados comprovam a eficiência das novas quantidades para este traço de CPR, apresentadas suas melhorias.

O Gráfico 7 apresenta a curva de resistência para 7, 14 e 28 dias dos provetes ensaiados. Vale ressaltar que os 12 provetes ensaiados tinham a mesma composição e não apresentavam nenhum tipo de variação, nem mesmo de equipamentos para sua produção.

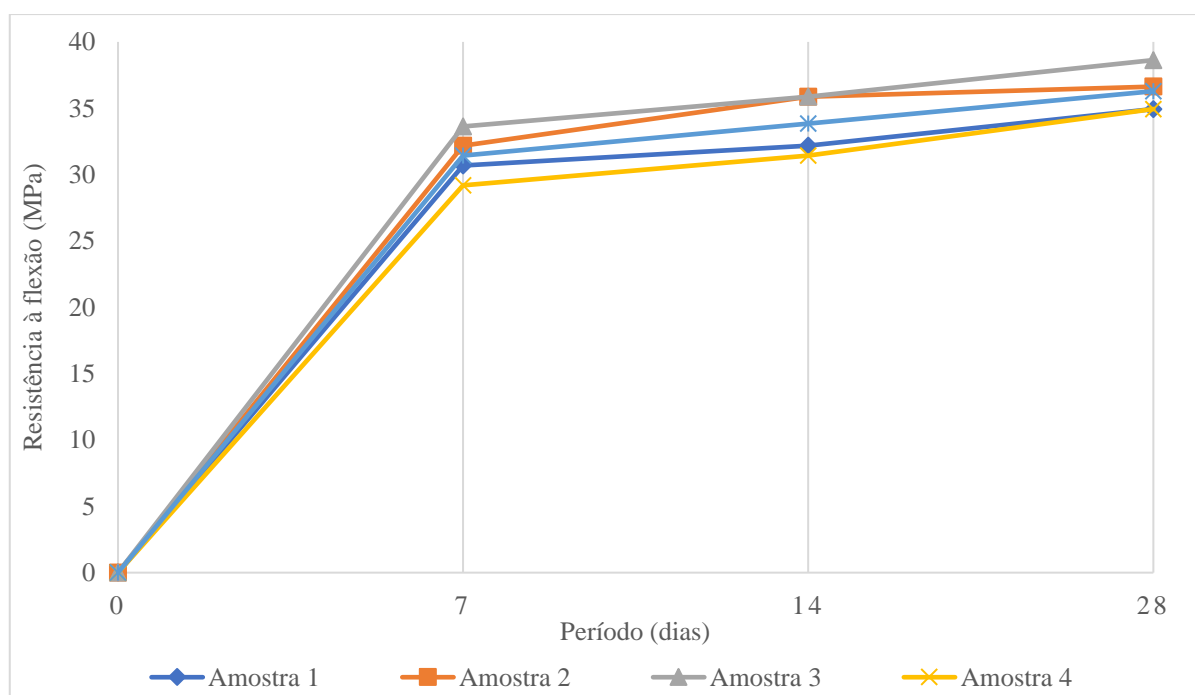


Gráfico 7 - Curva de resistência à flexão para o novo traço de CPR

4.4.1.4 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado sucessivamente ao ensaio de resistência à flexão. Os resultados dos 24 provetes ensaiados aos 7, 14 e 28 dias encontram-se discriminados a partir da Tabela 44.

Tabela 44 - Resultados de resistência à compressão para provetes do CPR-F

	Resistência à compressão CPR-F		
	7 dias	14 dias	28 dias
Média (\bar{y}) (MPa)	117,59	130,02	144,64
Desvio padrão (σ_p) (MPa)	8,452	3,873	6,366
Coefficiente de variação (%)	7,19	2,98	4,40

É possível inferir com base nos valores das médias dos 9 traços anteriormente estudados, a resistência à compressão do novo traço ganhou um incremento de 15% quando analisadas as médias dos traços anteriores de CPR, com a alteração das quantidades dos materiais em sua composição, apesar de ficar ainda bastante distante da estimativa calculada pela equação de regressão linear múltipla, que sugeriu um valor de resistência à compressão de 269,7 MPa. Embora em análise à média dos 54 provetes anteriormente estudados, o CPR-F apresentou-se menos eficiente quando comparado à média do traço 1 e de alguns provetes do traço 5, que obtiveram valores superiores à média obtida pelo CPR-F aos 28 dias.

A diferença de valor obtida entre a expectativa para o traço CPR-F obtida pela equação de regressão (Equação 24) e a realidade gerada aos 28 dias é de quase 54%, percentual indicador de uma grande falha no processo fabril da mistura, uma vez que quando analisada a Tabela 37, nenhum dos traços anteriores apresentou tal variação, chegando a uma discrepância máxima de 41,9% referente ao traço 4.

Ainda, através do Gráfico 8 pode-se notar que o ganho de resistência mais significativo ocorre nos primeiros 7 dias e após este período o aumento de resistência é quase nulo, se comparado ao ganho da primeira semana.

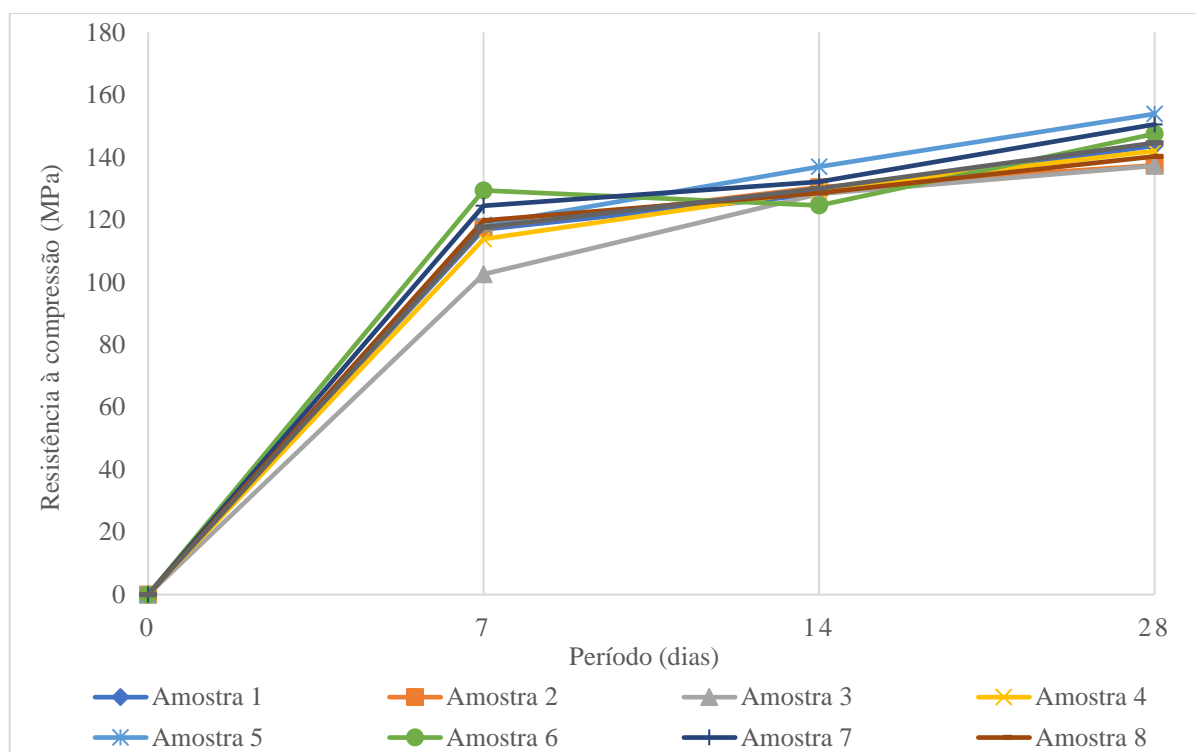


Gráfico 8 - Curva de resistência à compressão para o novo traço de CPR

4.4.1.5 Porosimetria por intrusão de mercúrio

De maneira sucinta, os valores obtidos para este ensaio apresentam-se na Tabela 45. Os demais resultados obtidos através do software conectado ao equipamento de porosimetria podem ser observados na íntegra no apêndice C, assim como os gráficos gerados.

Tabela 45 - Resultados encontrados para o ensaio de porosimetria de mercúrio do CPR-F

Dados gerais da análise					
Peso (g)			Volume do penetrômetro (cm ³)	Densidade mercúrio (g/cm ³)	Volume de mercúrio intrudido (cm ³ /g)
Penetrômetro	Amostra	Mercúrio			
1,000	1,6157	2,00	0,0256	13,5	0,0159
Resumo dos resultados da amostra					
Poros			Densidade (g/cm ³)		Porosidade (%)
Área (m ²)	Diâmetro médio (volume) (µm)	Diâmetro médio (área) (µm)	Aparente	Esqueleto	
0,0075	8,383	8,383	1,5963	1,6157	2,5644

Através da Tabela 45 pode-se notar que a porosidade encontrada na amostra retirada do provete foi de 2,56%, sendo de 2,55% o valor de intrusão interpartículas e 0,01% para o valor de intrusão intrapartículas. Pelo Gráfico 9 pode-se observar a curva obtida pelo software

interligado ao equipamento de porosimetria por intrusão de mercúrio, relacionando o diâmetro do poro da amostra de CPR-F e o percentual obtido de porosidade por intrusão de mercúrio no ensaio, que se apresenta com um máximo de 2,56%, como exposto na Tabela 45. Quando comparado com os concretos comuns e de alto desempenho, que possuem porosidade acima de 10% (Vanderlei e Giongo, 2006), o ensaio resultou-se satisfatório para o valor obtido relativo ao traço de CPR avaliado.

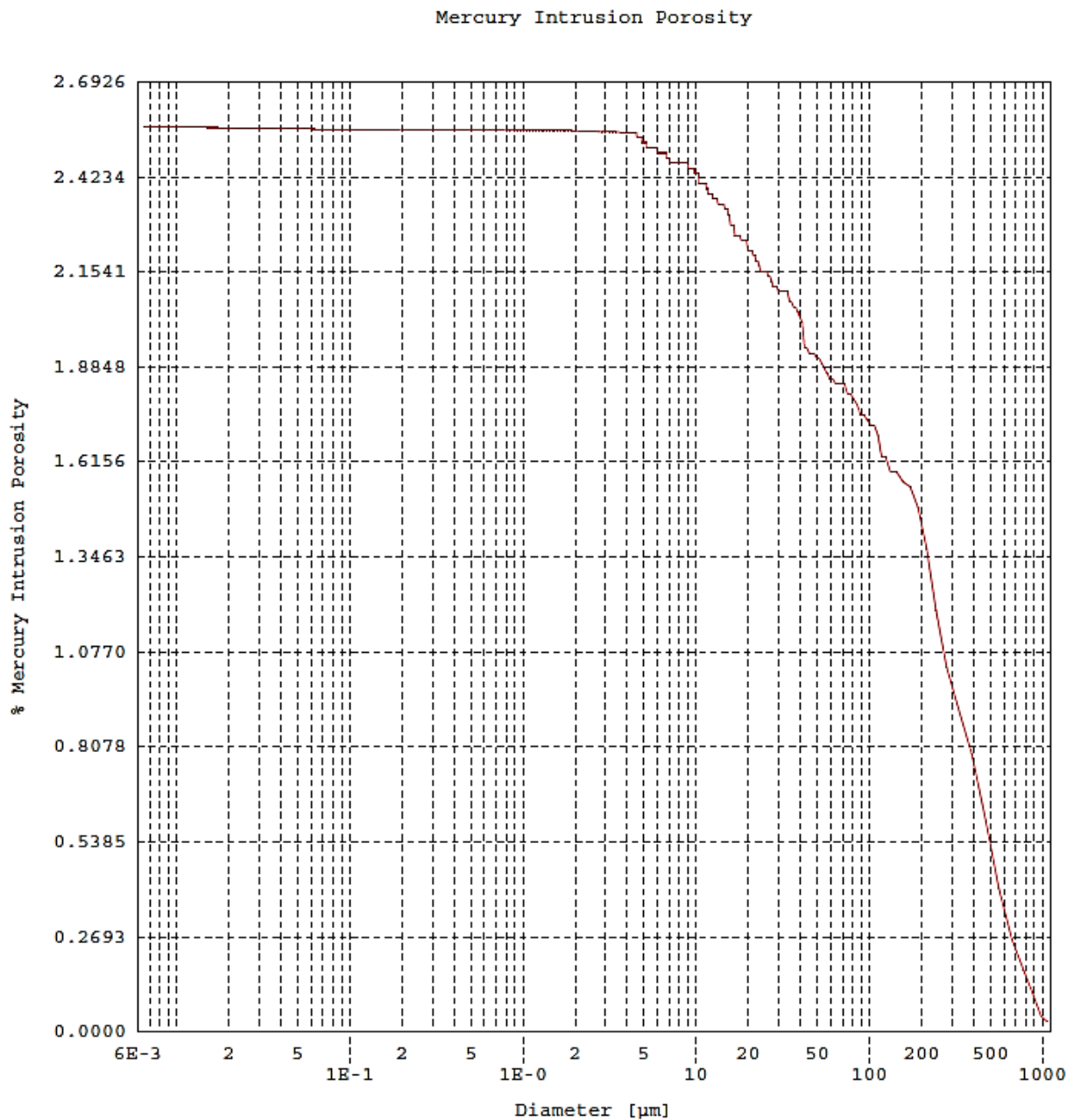


Gráfico 9 - Porosidade por intrusão de mercúrio x Diâmetro do poro

5 Conclusões

No presente trabalho foram apresentados e discutidos os resultados de uma análise experimental com intuito principal de estudar diferentes composições de CPR em contexto laboratorial, bem como a otimização das quantidades dos materiais usados através de regressão linear múltipla e análise estatística dos resultados, de forma a aperfeiçoar as propriedades de um novo traço de CPR.

Para esta pesquisa foram realizados 7 ensaios e 97 provetes ao todo. Estes números procedem algumas etapas que foram necessárias para o cumprimento do objetivo da análise, nomeadamente a seleção e preparo dos materiais a serem utilizados, o peneiramento da areia para compor a granulometria desejada, obedecer o processo de mistura, molde e cura dos provetes, avaliar a resistência à compressão e flexão dos provetes, fazer um estudo de *outliers*, gerar uma equação com base na regressão linear múltipla dos valores de resistência à compressão obtidos e por fim, analisar as propriedades do novo traço de CPR gerado através da análise experimental.

Com base nas etapas planejadas e executadas nesta pesquisa para avaliar as diversas composições de CPR a fim de elaborar um novo traço, cujo objetivo era otimiza-lo com base nas quantidades empregadas na mistura, foi possível chegar as seguintes constatações:

- 1) Com a preparação dos provetes pôde-se observar que cada traço teve um aspecto diferente do outro e que no processo de cura térmica só houve mudanças visuais dos provetes entre os sete primeiros dias de cura. Após o sétimo dia até o vigésimo oitavo dia não houveram mudanças significativas.
- 2) Após análise dos dados obtidos através dos diversos ensaios feitos para este trabalho, é possível afirmar sobre os traços iniciais de CPR que seus resultados de resistência à compressão seguem uma distribuição normal, quando descartado o valor do traço 6, o qual apresentou um valor diferente e pouco expectável em relação aos demais traços. Tal conclusão foi baseada na análise de Shapiro-Wilk que aceitou a hipótese H_0 na qual afirmava que as amostras seguem uma distribuição normal. Empregando a análise ANOVA pode-se comprovar que os traços apresentam diferença estatística entre si, com 95% de confiança.
- 3) Sobre os resultados esperados para os provetes relativos aos nove traços iniciais de CPR, aplicando a equação de regressão linear múltipla foi possível inferir

individualmente que apenas o traço 9 obteve o valor real superior ao valor estimado e relativamente ao conjunto dos oito traços avaliados pela equação, a média estimada era de 178,7 MPa, mas na realidade atingiu-se o valor de 135,9 MPa, representando uma variação de quase 24% em relação ao valor esperado.

- 4) Relativamente ao novo traço de CPR, este teve como quantidades que devem ser ideias de sílica ativa, areia e água, sendo 17% do peso de cimento, fator $n = 0,26$ e fator $m = 2,2$ respectivamente, obtidas através da equação de regressão linear múltipla dos dados de resistência à compressão dos traços anteriores.
- 5) O novo traço de CPR (CPR-F) alcançou através do ensaio de resistência à compressão um valor de 144,64 MPa aos 28 dias, enquanto o valor estimado pela equação de regressão foi de 269,7 MPa, sendo uma diferença de 86,5% do valor de resistência realmente atingido.
- 6) Para o ensaio de teor de ar do CPR-F, o valor presente na mistura foi de 0,61% e a densidade da mistura foi de 2738,77 kg/m³, representando um concreto bastante denso.
- 7) No ensaio de absorção de água do CPR-F, que também obteve um bom resultado (4,55%), foi também possível obter o valor do índice de vazios e de massa específica real. Sobre o valor alcançado para o índice de vazios, este foi satisfatório (9,69%), uma vez que usualmente as argamassas ou concretos de granulometria reduzida apresentam valores próximos a 10%. Relativo à massa específica real da amostra de CPR-F, esta manteve-se dentro dos valores geralmente atingidos para concretos especiais e argamassas, com uma massa específica real de 2357,7 kg/m³.
- 8) Em relação ao ensaio de porosimetria, o CPR-F apresentou uma baixíssima percentagem de porosidade na amostra analisada, afirmando a eficiência da granulometria, empacotamento e compactação da amostra, indicando um percentual inferior a 3% de porosidade, considerando que para concretos comuns este é superior a 10%.

De forma geral, os valores de resistência à compressão obtidos pelos 9 traços iniciais apresentaram-se abaixo do valor esperado para um CPR, visto que os valores característicos para este tipo de concreto são próximos ou superiores a 200 MPa, conforme o método de cura, material ou adensamento utilizados. Visto que o valor mais alto atingido pelos provetes de todos os traços foi de 167,39 MPa, a variação entre estes traços de concreto e dos CPR apresentados

em estudos como de Richard e Cheyrezy (1995) que atinge valores superiores a 200 MPa é considerável. Acredita-se que tal diferença ocorreu devido ao uso de sílica ativa com propriedades diferentes das utilizadas usualmente (filler de calcário ao invés de quartzo).

Outra razão que pode ter contribuído para os valores mais baixos da resistência à compressão pode consistir na temperatura de cura, que apesar de ser bastante elevada (60°C), não era de 90°C, como sugerido na literatura, devido à limitação do aparelho disponível para uso. Como indicaram estudos apresentados ao longo deste trabalho, o ganho de resistência é mais significativo quando a temperatura de cura atinge os 90°C, apesar de ocorrer também, embora com menor expressividade em temperaturas a partir de 20°C.

Por fim, vale enfatizar que a equação ideal obtida ao longo deste trabalho se aplica apenas para os materiais e métodos utilizados neste estudo. Para outros traços iniciais deverá ser feita nova análise, com novos parâmetros para usar na equação, e assim chegar a um traço otimizado de CPR. A metodologia para definir a equação ideal se mantém para qualquer estudo.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo como base a ideia inicial deste projeto, com finalidade o aperfeiçoamento deste trabalho, sugere-se como trabalhos futuros:

- Realização de ensaios complementares como ensaios de energia de fratura, ultrassom e resistências aos sulfatos e à carbonatação para obter mais características do novo traço de CPR em questão;
- Realização de novos traços com mais variáveis para serem analisadas na regressão linear múltipla, para que o valor alcançado através da equação obtida pela regressão linear múltipla seja mais aproximado do valor real obtido experimentalmente;
- Estudo da diferença de quantidades de aditivo para cada um dos traços, variando sua percentagem na mistura, para analisar o ganho ou perda de resistência devido a quantidade de aditivo nas misturas e atingir o menor percentual de água na mistura para que tenha boa trabalhabilidade;
- Estudo da interferência da temperatura para os traços apresentados, avaliando o incremento de resistência proporcionado apenas pela variação na temperatura de cura dos provetes;

Referências

- [1] ABNT NBR 13276 (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.
- [2] ABNT NBR 13278 (2005). Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.
- [3] ABNT NBR 13278 (2005). Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.
- [4] ABNT NBR 13956-1 (2012). Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta. Parte 1: Requisitos.
- [5] ABNT NBR 13957 (1997). Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland – Métodos de ensaio.
- [6] ABNT NBR 7211 (2005). Agregados para concreto – Especificação.
- [7] ABNT NBR 9778 (2005). Argamassas e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.
- [8] ABNT NBR NM 67 (1998). Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.
- [9] ABNT NBR NM ISO 7500-1 (2004). Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova de argamassa e concreto.
- [10] Abrams, D. A. (1919). *Design of Concrete Mixtures. Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute.*
- [11] Adeline, R., Behloul, M., Bernier, G. (1996). *High ductile beams without passive reinforcement. 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High Performance Concrete, 29-31.*
- [12] Aïtcin, P. C. (2000). Concreto de alto desempenho. Pini, 667.
- [13] Aïtcin, P. C., Mehta, P. K. (1990). *Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. Materials Journal, 87(2), 103-107.*
- [14] ASTM C1012 (2004). *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. ASTM International.*
- [15] ASTM C136 / C136M (2014) *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International.*
- [16] ASTM C876 (2015). *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete. ASTM International.*
- [17] ASTM D4404 (2010). *Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Porosimetry – Committee D18 on Soil and Rock. ASTM International.*
- [18] Baccin, A. G. C. (1998). Fundamentos do concreto de alto desempenho e sua aplicação no projeto de pilares. Universidade de São Paulo.
- [19] Baron, J. (1982). *La resistance a la propagation de fissure. Le beton hydraulique. L'école Nationale des Ponts et Chaussées.*
- [20] Biz, C. E. (2001). Concreto de Pós Reativos. Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.
- [21] Bonneau, O., Poulin, C., Dugat, M., Tcin, P. C. A. (1996). *Reactive powder concretes: from theory to practice. Concrete international, 18(4), 47-49.*
- [22] Bouny, V. B. (2004). *Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages. Association française de génie civil.*

- [23] Campos, H. F. (2015). Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland: Estudo experimental. Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná.
- [24] Castro, A. L., Pandolfelli, V. C. (2009). Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos.
- [25] Cheyrezy, M. (1999). *Structural applications of RPC. Concrete (London)*, 33(1), 20-23.
- [26] Cook, R. A., Hover, K. C. (1993). *Mercury porosimetry of cement-based materials and associated correction factors. Construction and Building Materials*, 7(4), 231-240.
- [27] Coppola, L., Troli, R., Borsoi, A., Zaffaroni, P., Collepardi, M. (1997). *Influence of Superplasticizer Type on the Compressive Strength of Reactive Powder Mortars. Special Publication*, 173, 537-558.
- [28] Coppola, L., Troli, R., Cerulli, T., Collepardi, M. (1996). *The influence of materials on the performance of reactive powder concrete. International Congress on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, 502-513.
- [29] Couto, J. A. S., Carminatti, R. L., Nunes, R. R. A., Moura, R. C. A. (2013). O concreto como material de construção. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIT-Sergipe, 1(3), 49-58.
- [30] Diamond, S. (2000). *Mercury porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials. Cement and concrete research*, 30(10), 1517-1525.
- [31] Fávero, R. B. (2016). Caracterização mecânica de material compósito cimentício avançado à base de Pós Reativos. 2016. Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.
- [32] Feret, R. (1892). *Sur la compacité des mortiers hydrauliques. Pintas et Chaussees*, 4, 5.
- [33] Figueiredo, A. D. D. (1997). Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço. Universidade de São Paulo.
- [34] Gaiofatto, R. L.; da Silva, T. L. (2012). Desenvolvimento de Concreto de Pós Reativos (RPC) com fibras sintéticas. Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis.
- [35] Gomes, P. C. C. (2002). *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete. Universitat Politècnica de Catalunya*.
- [36] Grattan-Bellew, P. E. (2000). *A discussion of the paper "Delayed ettringite formation in heat-cured Portland cement mortars" by R. Yang, C.D. Lawrence, C. J. Lynsdale and J. H. Sharp. Cement and Concrete Research*, 30(4), 665-666.
- [37] Gusmão, A. C. (2017). Utilização do Concreto de Pós Reativos como material de reparo - ênfase na resistência de aderência. Universidade Federal de Viçosa.
- [38] Henche, D., Mazer, W. (2010). Efeito da distribuição granulométrica sobre o empacotamento de partículas e sob a trabalhabilidade do concreto de pós-reativos. 52º congresso brasileiro do concreto.
- [39] Hilsdorf, H., Kropp, J. (1995). *Performance criteria for concrete durability. CRC Press*.
- [40] Ju, Y.; Wang, L.; Liu, H.; Ma, G. (2018). *Experimental Investigation into Mechanical Properties of Polypropylene Reactive Powder Concrete, ACI Materials Journal*, 115, 21-32.
- [41] Kaefer, L. F. (1998). PEF 5707 – Concepção, projeto e realização das estruturas: aspectos históricos: a evolução do concreto armado.
- [42] Kang, S.T., Park, J.J., Koh, K.T., Kim, S.W., (2008). *Flexural capacity of reinforced concrete beam with UHSFRC. 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-performance Concrete*, 1061 – 1068.
- [43] Lafarge (2010). Ductal®: *the ultra-high-performance concrete*. Disponível em: <<http://www.ductal-lafarge.com/>>. Acesso em: 26 junho 2020
- [44] Larrard, F. (1989). *Ultrafine particles for the making of very high strength concretes. Cement and concrete research*, 19(2), 161-172.

- [45] Lee, M. G., Wang, Y. C., Chiu, C. T. (2007). *A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material. Construction and building materials*, 21(1), 182-189.
- [46] Liu, J., Song, S., Wang, L. (2009). *Durability and micro-structure of reactive powder concrete. Journal of Wuhan University of Technology*, 24(3), 506-509.
- [47] LNEC, E. (1993). 393-Betões: Determinação da absorção da água por capilaridade.
- [48] Matias, L., Nunes, A. F., Cruz, R. D. C. A. L. (2018). Desperdícios na construção civil. *Revista Campo do Saber*, 4(3).
- [49] Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2008). *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. IBRACON.
- [50] Mendes, S. D. S. (2002). Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba. Universidade Federal do Paraná.
- [51] NP EN 12350 – 7 (2010). Ensaio do Betão fresco - Parte 7: Determinação do teor de ar. IPQ.
- [52] NP EN 12390 – 3 (2011). Ensaio do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. IPQ.
- [53] NP EN 12390 – 5 (2009). Ensaio do betão endurecido - Parte 5: Resistência à flexão dos provetes. IPQ.
- [54] NP EN 12390-2 (2009). Ensaio do betão endurecido - Parte 2: Execução e cura dos provetes para ensaios de resistência mecânica. IPQ.
- [55] NP EN 12390-3 (2011). Ensaio do betão endurecido - Parte 3: Resistência à compressão dos provetes de ensaio. IPQ.
- [56] NP EN 12390-5 (2009). Ensaio do betão endurecido - Parte 5: Resistência à flexão de provetes. IPQ.
- [57] NP EN 12620: 2002 (2010) Agregados para betão. IPQ.
- [58] NP EN 196-1 (2016). Métodos de ensaios de cimentos. IPQ.
- [59] NP EN 197-1 (2011). Cimento - Parte 1: composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes. IPQ.
- [60] Oliveira, C. (2013). Análise das propriedades reológicas de materiais cimentícios associando o conceito de empacotamento de partículas. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira.
- [61] Oliveira, H. M. (2000). *Propriedades do Concreto Endurecido*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 447.
- [62] Ortega, F. D. S., Pileggi, R. G., Sepúlveda, P., Pandolfelli, V. C. (1997). Influência dos modelos de Alfred e de Andreasen sobre a microestrutura e densidade de compactos cerâmicos obtidos por colagem ou prensagem. *Cerâmica*, 43(283-284), 185-191.
- [63] Pedroso, F. L. (2009). Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. *Concreto e construções – IBRACON*, 53.
- [64] Piccinini, Â. C., Machado, G. F. (2018). Análise experimental do comportamento do Concreto de Pós Reativos (CPR) com e sem fibras. *Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil da UNESC*, 1(1), 1-18.
- [65] Piltner, R., Monteiro, P.J.M. (2000) *Stress analysis of expansive reactions in concrete. Cement And Concrete Research*, 30(6), 843-848.
- [66] Richard, P. (1996). *A new ultra-high strength cementitious material. 4th International Symposium. on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, 1343-1349.
- [67] Richard, P., Cheyrezy, M. (1995). *Composition of reactive powder concretes. Cement and concrete research*, 25(7), 1501-1511.
- [68] Richardson, A., Coventry, K., Bacon, J. (2011). *Freeze/thaw durability of concrete with recycled demolition aggregate compared to virgin aggregate concrete. Journal of Cleaner Production*, 19, 272-277.

- [69] Sadrekarimi, A. (2004). *Development of a light weight reactive powder concrete. Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3), 409-417.
- [70] Safiuddin, M. (2008). *Development of self-consolidating high-performance concrete incorporating rice husk ash*. Universidade de Waterloo. Disponível em: <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/3758>. Acesso em 20 de janeiro de 2020.
- [71] SILVA, A. D. (2004). Dosagem de concreto pelos métodos de empacotamento compressível e Aitcin-Faury modificado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [72] Silva, A. P., Segadães, A. M., Devezas, T. C. (2004). Aplicação de métodos estatísticos na otimização da densidade de empacotamento de distribuições de pós de alumina. *Cerâmica*, 50(316), 345-354.
- [73] Silva, I. S. D. (1995). Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento. Universidade de São Paulo.
- [74] Staquet, S., Espion, B., (2004). *Early-age autogenous shrinkage of UHPC incorporating very fine fly ash or metakaolin in replacement of silica fume. International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 587-599.
- [75] Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H., Megat Johari, M. A. (2015). *Assessment of adhesion between RPC overlay and existing concrete substrate. Applied Mechanics and Materials*, 802, 95-100.
- [76] UNESP (2010). Efeito da distribuição granulométrica sobre o empacotamento de partículas. Disponível em: www.dec.feis.unesp.br/sao/ciencias_materiais_6. Acesso em 23 de fevereiro de 2020.
- [77] Vanderlei, R. D. (2004). Análise experimental do Concreto de Pós Reativos: dosagem e propriedades mecânicas. Universidade de São Paulo.
- [78] Vanderlei, R. D., Giongo, J. S (2006). Análise experimental do Concreto de Pós Reativos: dosagem e propriedades mecânicas. *Cadernos de Engenharia de Estruturas*, 8 (33), 115-148.
- [79] Vočka, R., Gallé, C., Dubois, M., Lovera, P. (2000). *Mercury intrusion porosimetry and hierarchical structure of cement pastes: Theory and experiment. Cement and Concrete Research*, 30 (4), 521-527.
- [80] Walraven, J. (1999). *The evolution of concrete. Structural concrete - Thomas Telford limited*, 3-12.
- [81] Wang, W., Liu, J., Agostini, F., Davy, C. A., Skoczylas, F., Corvez, D. (2014). *Durability of an ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) under progressive aging. Cement and Concrete Research*, 55, 1-13.
- [82] Washer, G., Fuchs, P., Graybeal, B. A., Hartmann, J. L. (2004). *Ultrasonic testing of reactive powder concrete. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 51(2), 193-201.
- [83] Whitehurst, E. A. (1951). *Soniscopes tests concrete structures. Journal Proceedings*, 47 (2), 433-444.
- [84] Yan, G. (2009). *Application of reactive powder concrete in highway barriers. International Conference on Transportation Engineering*, 1232-1237.
- [85] Yazici, H., Yardımcı, M.Y., Yiğiter, H., Aydın, S., and Türkel, S., (2010). *Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. Cement & Concrete Composites*, 32, 639–648.
- [86] Zhang, T., Gjörv, O. E. (1994). *An electrochemical method for accelerated testing of chloride diffusivity in concrete. Cement and Concrete Research*, 24(8), 1534-1548.
- [87] Zia, P., Ahmad, S., Leming, M. (1991). *High-performance concrete: a state-of-art report. Strategic Highway Research Program, National Research Council*.

Apêndice A - Análise de outliers

A análise dos *outliers* consiste em analisar a média dos valores obtidos em uma amostragem e fazer com que este valor se aproxime ao máximo do valor de 68% das amostras dentro do intervalo limites de $\bar{y} \pm \sigma_p$, onde \bar{y} representa a média dos valores da amostra e σ_p representa o desvio padrão. Se a amostra estivesse com uma variação diferente, é feita uma análise para retirada dos valores e novo cálculo de *outliers*.

Após obtidos os valores da média e desvio padrão das amostras de cada um dos 9 traços analisados, é feita uma verificação da percentagem dos valores que se encontram dentro do intervalo de $\bar{y} \pm \sigma_p$. Caso o percentual de amostras dentro deste intervalo esteja próximo de 68%, os dados são considerados estatisticamente significativos, mas se o intervalo não é atendido em pelo menos 68% dos valores da amostra, deve-se analisar qual dos valores está mais distante dos limites da média e retirá-lo, refazendo o cálculo da média e desvio padrão da nova amostra, desta vez sem um dos valores de resistência à compressão que foi considerado um dado espúrio. Este processo repete-se até o valor das amostras se encontrar dentro do intervalo especificado para que sejam considerados estatisticamente significativos.

Após feita a análise dos *outliers*, realizou-se a análise estatística através do teste de normalidade Shapiro-Wilk. O teste de normalidade de Shapiro-Wilk foi realizado inicialmente em 1965 e é baseado na estatística W , representada na Equação A. 1, onde $x_{(i)}$ representa os valores das amostras em ordem crescente e o parâmetro b encontra-se apresentado através da Equação A. 2.

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_{(i)} - \bar{x})^2}$$

Equação A. 1

$$b = \begin{cases} \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} a_{(n-i+1)} \cdot (x_{(n-i+1)} - x_{(i)}) & \text{caso } n \text{ seja par} \\ \sum_{i=1}^{\frac{n+1}{2}} a_{(n-i+1)} \cdot (x_{(n-i+1)} - x_{(i)}) & \text{caso } n \text{ seja impar} \end{cases}$$

Equação A. 2

Na Equação A. 2, $a_{(n-i+1)}$ representa uma constante que é gerada pelas médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem da amostra de tamanho n em uma distribuição normal.

Os valores são tabelados de acordo com a tabela simplificada de Shapiro-Wilk representada através da Tabela A. 1.

Tabela A. 1 - Tabela reduzida de Shapiro-Wilk

$i \backslash n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,7071	0,7071	0,6872	0,6646	0,6431	0,6233	0,6062	0,5888	0,5739	0,5601	0,5475
2			0,1677	0,2413	0,2806	0,3031	0,3164	0,3244	0,3291	0,3315	0,3325
3					0,0875	0,1401	0,1743	0,1976	0,2141	0,226	0,2347
4							0,0561	0,0947	0,1224	0,1429	0,1586
5									0,0399	0,0695	0,0922
6											0,0303

A Tabela A. 1 representa a parte da tabela de de Shapiro-Wilk que será utilizada neste trabalho. Nela i representa o número de amostras que será utilizado com base no parâmetro n que é o número de amostras a serem analisadas.

Portanto, para calcular o teste de Shapiro-Wilk é necessário estabelecer um teste de hipóteses no qual

$$\begin{cases} H_0: A \text{ amostra vem de uma população normal} \\ H_1: A \text{ amostra não vem de uma população normal} \end{cases}$$

Em seguida, determina-se o nível de significância desejado para o teste (α). Para este trabalho serão analisados os níveis de significância de 0,05. Quando estabelecidas as hipóteses e o nível de segurança, deve-se ordenar os n traços da amostra, do menor valor ao maior ($x_{(1)}$, $x_{(2)}$, $x_{(3)}$, ..., $x_{(n)}$) e calcular a parcela indicada no denominador da Equação A. 1. Assim já é possível calcular os parâmetros b e W e tomar a decisão de rejeitar H_0 ao nível de significância de 0,05 se $W_{\text{calculado}} < W_{0,05}$. O valor de $W_{0,05}$ é obtido através da Tabela A. 2, de acordo com o nível de significância desejado e a quantidade de traços analisados (n).

Tabela A. 2 - Análise de aceitação de hipóteses do teste de Shapiro-Wilk

n	Nível de significância								
	0,01	0,02	0,05	0,1	0,5	0,9	0,95	0,98	0,99
3	0,753	0,756	0,767	0,789	0,959	0,998	0,999	1	1
4	0,687	0,707	0,748	0,792	0,935	0,987	0,992	0,996	0,997
5	0,686	0,715	0,762	0,806	0,927	0,979	0,986	0,991	0,993
6	0,713	0,743	0,788	0,826	0,927	0,974	0,981	0,986	0,989
7	0,73	0,76	0,803	0,838	0,928	0,972	0,979	0,985	0,988
8	0,749	0,778	0,818	0,851	0,932	0,972	0,978	0,984	0,987
9	0,764	0,791	0,829	0,859	0,935	0,972	0,978	0,984	0,986
...

Apêndice B – Tabelas adicionais

Tabela detalhada indicando o valor obtido dos 27 provetes referentes aos nove traços estudados, antes e depois do processo de cura térmica, referenciando a Tabela 24.

Tabela B. 1 - Valores obtidos dos traços de CPR antes e depois do processo de cura térmica

Traço	Antes da cura térmica				Depois da cura térmica			
	C (mm)	L (mm)	H (mm)	Peso (g)	C (mm)	L (mm)	H (mm)	Peso (g)
1	160,26	39,89	39,58	584,7	163,04	40,32	39,94	595,3
	160,09	39,88	40,40	595,80	160,56	40,79	40,02	608,00
	160,13	39,81	40,27	594,70	160,86	40,24	40,06	606,10
2	160,39	39,87	38,68	577,10	160,44	39,67	40,04	589,60
	160,41	39,82	38,85	571,50	160,53	40,02	39,84	584,40
	160,45	39,92	39,55	574,10	161,00	39,92	39,51	588,80
3	160,23	39,96	40,24	575,80	160,22	39,98	42,36	586,10
	160,40	40,01	41,14	579,60	160,55	40,02	39,81	589,60
	160,26	39,92	41,21	572,20	160,29	40,66	39,90	581,90
4	161,04	39,89	38,98	566,90	160,92	40,00	38,87	579,10
	160,27	40,00	38,67	571,00	160,40	39,96	39,71	583,60
	160,32	39,88	39,22	571,30	160,41	39,97	39,44	584,00
5	160,63	39,77	41,31	587,20	160,97	40,00	40,38	595,90
	160,31	39,91	40,83	588,20	160,19	40,87	39,97	598,30
	160,32	39,87	39,85	581,10	160,51	39,81	40,27	590,90
6	161,29	39,99	40,66	502,50	161,38	40,02	40,60	546,70
	161,02	39,94	40,23	494,20	161,27	39,98	40,13	541,90
	160,65	39,94	40,08	498,00	160,51	40,02	40,22	544,00
7	160,49	39,86	39,24	578,00	160,53	39,85	39,69	589,50
	160,48	39,99	39,11	572,70	160,50	40,02	40,51	582,90
	160,44	39,89	39,95	587,20	160,44	39,85	39,25	599,00
8	159,50	39,88	40,18	574,60	159,73	39,82	40,76	585,20
	159,64	39,83	40,32	580,60	159,99	39,80	40,30	591,40
	159,58	39,86	40,12	585,70	159,88	39,81	40,04	597,40
9	159,61	39,83	40,11	574,60	160,00	39,84	40,10	585,20
	159,62	39,82	40,22	574,20	160,43	39,80	40,32	584,50
	159,81	39,93	40,51	574,50	160,82	39,89	40,08	584,70

Legenda:

C – Comprimento

L – Largura

H - Altura

Tabela detalhada indicando a variação do peso de cada um dos provetes analisados, antes e depois da cura térmica, referenciando a Tabela 25.

Tabela B. 2- Variação do peso dos provetes antes e depois da cura térmica

Traço	Peso antes da cura térmica (g)	Peso depois da cura térmica (g)	Variação de peso (g)	%
1	584,70	595,30	10,60	1,81%
	595,80	608,00	12,20	2,05%
	594,70	606,10	11,40	1,92%
2	577,10	589,60	12,50	2,17%
	571,50	584,40	12,90	2,26%
	574,10	588,80	14,70	2,56%
3	575,80	586,10	10,30	1,79%
	579,60	589,60	10,00	1,73%
	572,20	581,90	9,70	1,70%
4	566,90	579,10	12,20	2,15%
	571,00	583,60	12,60	2,21%
	571,30	584,00	12,70	2,22%
5	587,20	595,90	8,70	1,48%
	588,20	598,30	10,10	1,72%
	581,10	590,90	9,80	1,69%
6	502,50	546,70	44,20	8,80%
	494,20	541,90	47,70	9,65%
	498,00	544,00	46,00	9,24%
7	578,00	589,50	11,50	1,99%
	572,70	582,90	10,20	1,78%
	587,20	599,00	11,80	2,01%
8	574,60	585,20	10,60	1,84%
	580,60	591,40	10,80	1,86%
	585,70	597,40	11,70	2,00%
9	574,60	585,20	10,60	1,84%
	574,20	584,50	10,30	1,79%
	574,50	584,70	10,20	1,78%

Tabela detalhada indicando o resultado obtido de resistência à flexão de cada um dos 27 provetes analisados, referenciando a Tabela 26.

Tabela B. 3- Resultados do ensaio de resistência à flexão dos 9 traços estudados

Traço	Resistência à flexão (MPa)	Média (\bar{y}) (MPa)
1	32,94	33,15
	38,82	
	27,69	
2	27,69	27,19
	27,69	
	26,19	
3	27,69	30,19
	30,69	
	32,19	
4	23,94	26,69
	28,44	
	27,69	
5	30,69	30,44
	30,69	
	29,94	
6	13,50	12,75
	13,50	
	11,25	
7	29,19	26,94
	26,19	
	25,44	
8	26,94	26,19
	28,44	
	23,19	
9	31,44	29,44
	32,19	
	24,69	
Média dos traços (\bar{y}) (MPa)		27,00
Desvio padrão (σ_p) (MPa)		5,805

Tabela detalhada indicando o resultado obtido de resistência à flexão de cada um dos 54 provetes analisados, referenciando a Tabela 27.

Tabela B. 4- Resultados do ensaio de resistência à compressão dos 9 traços estudados

Traço	Provete 1 (MPa)	Provete 2 (MPa)	Provete 3 (MPa)	Provete 4 (MPa)	Provete 5 (MPa)	Provete 6 (MPa)	Média (\bar{y}) (MPa)	Desvio Padrão(σ_p) (MPa)
1	167,39	162,39	144,53	130,04	164,15	150,38	153,15	14,319
2	129,51	135,35	146,17	147,76	116,27	112,99	131,34	14,648
3	82,62	128,95	122,65	125,19	143,52	124,03	121,16	20,360
4	126,72	132,15	127,83	135,28	137,32	124,77	130,68	5,023
5	135,57	153,67	138,72	154,87	147,08	137,11	144,50	8,556
6	38,96	38,92	36,61	39,56	30,11	28,24	35,4	4,962
7	134,11	144,94	107,77	127,59	126,59	117,13	126,36	12,943
8	133	131,02	138,29	127,99	103,51	123,65	126,24	12,167
9	122,82	140,62	136,67	140,19	148,08	140,38	138,13	8,379

Tabela detalhada indicando o resultado obtido de resistência à flexão de cada um dos 12 provetes analisados, referenciando a Tabela 43.

Tabela B. 5 - Resultados de resistência à flexão para provetes do novo traço de CPR

	Resistência à flexão		
	7 dias	14 dias	28 dias
Amostra 1 (MPa)	28,44	28,44	30,19
Amostra 2 (MPa)	28,44	30,69	33,63
Amostra 3 (MPa)	33,63	35,88	38,63
Amostra 4 (MPa)	29,19	31,44	34,94
Média (MPa)	29,92	31,61	34,35
σ_p	2,494	3,117	3,487

Tabela detalhada indicando o resultado obtido de resistência à compressão de cada um dos 24 provetes analisados, referenciando a Tabela 44.

Tabela B. 6 - Resultados de resistência à compressão para provetes do novo traço de CPR

	Resistência à compressão		
	7 dias	14 dias	28 dias
Amostra 1 (MPa)	116,95	128,30	143,73
Amostra 2 (MPa)	117,59	130,39	137,44
Amostra 3 (MPa)	102,56	128,25	137,27
Amostra 4 (MPa)	113,79	129,48	142,04
Amostra 5 (MPa)	118,36	137,02	153,91
Amostra 6 (MPa)	129,42	124,55	147,54
Amostra 7 (MPa)	124,47	132,16	150,56
Amostra 8 (MPa)	119,79	128,58	140,3
Média	117,59	130,02	144,64
σ_p	8,452	3,873	6,366

Apêndice C – Ensaio de porosimetria

Neste apêndice serão apresentados os valores obtidos através do ensaio de porosimetria por intrusão de mercúrio, conforme itens 3.8.4 e 4.4.1.5.

Report date: 07/13/2020

Merged File

QUANTACHROME CORPORATION
 QUANTACHROME POREMASTER FOR WINDOWS® DATA REPORT
 VERSION 8.01

SAMPLE ID	CPR-F	FILE NAME
S071301H_Merged.PRM		
SAMPLE WEIGHT	1.6157 grams	BULK SAMPLE VOLUME 1.0000 cc
SAMPLE DESCRIPTION		
COMMENTS		
HG SURFACE TENSION	480.00 erg/cm ²	HG CONTACT ANGLE
(I)140.00°, (E)140.00°		
MINIMUM DELTA VOL.	0.000 % FS	MOVING POINT AVG. 11 (Scan Mode)
OPERATOR	FELIPE	Mercury volume normalized by
sample weight.		

Porosity Summary

Sample (bulk) volume =	1.0000 [cc]
Interparticle filling pressure limit =	50.0000 [PSIA]
Interparticle filling poresize limit =	4266.4438 [nm]
Intruded volume (interparticle) =	0.0255 [cc]
Total interparticle porosity =	2.5497 [%]
Intruded volume (intraparticle) =	0.0001 [cc]
Total intraparticle porosity =	0.0147 [%]
Total intruded volume =	0.0256 [cc]
Total porosity =	2.5644 [%]
He density =	2.0000 [g/cc]
Theoretical porosity =	19.2150 [%]

Standard Report

Data Acquisition Parameters

Density of Mercury 13.5000 [g/cc]
Temperature 20.00 [°C]

High Pressure

Data File Name S071301H.PRM
Analysis Date 07/13/2020
of repeat cycles 0
Penetrometer Constant . 1589 [mV/cc]
Auto-Oil Fill Time 5 [sec]
Run Mode Fixed Speed
Motor Speed 15

Low Pressure

Data File Name S0713032.PRM
Analysis Date 07/13/2020
of repeat cycles 0
Penetrometer Constant . 1752 [mV/cc]
Evacuation Rate 7
Fine Evac. Until 200.0000 [mm Hg]
Coarse Evac. Until 5.0000 [min.]

574 Points Acquired 573 Pts in Intrusion Range 1 Pts in Extrusion
Range
571 Points Used 572 Intrusion Pts Used -1 Extrusion Pts
Used

Intrusion Statistics

Pressure Range : 0.201 PSIA to 32896.105 PSIA
Pore Diameter Range : 1059.996582 µm to 0.006485 µm

Pore Diameter Statistics Summary

	Mean	Mode (df/dD)	Median
----- -----			
cc/g	1.524E-02 cc/g	5.095E-03 cc/($\mu\text{m-g}$)	8.026E-03
Volume of	at a diameter of	at a diameter of	at a diameter of
μm	8.383E+00 μm	1.739E-02 μm	1.910E+02
----- -----			
m^2/g	9.128E-04 m^2/g	2.917E-01 $\text{m}^2/(\mu\text{m-g})$	3.744E-03
Surface Area of	at a diameter of	at a diameter of	at a diameter of
μm	8.383E+00 μm	1.739E-02 μm	1.887E-02
----- -----			
Pore Number of	1.491E-07	3.601E+02	5.263E-01
Fraction of	at a diameter of	at a diameter of	at a diameter of
μm	8.383E+00 μm	1.739E-02 μm	1.724E-02
----- -----			

Mercury Porosimetry Data Summary

Total Intruded Volume	0.0159 cc/g	Bulk (Particle) Density
1.6157 [g/cc]		
Total Surface Area	0.0075 m^2/g	Apparent Density
1.5963 [g/cc]		

Mercury Intrusion Porosity

Printing one out of every 10 data points.

Intrusion	Pore Diameter [μm]	Volume [cc/g]	Hg Porosity [%]
	6.485E-03	0.0256	2.5644
	7.218E-03	0.0256	2.5644
	7.928E-03	0.0256	2.5644
	8.517E-03	0.0256	2.5644
	9.048E-03	0.0256	2.5644
	9.595E-03	0.0256	2.5644
	1.020E-02	0.0256	2.5644
	1.086E-02	0.0256	2.5644
	1.160E-02	0.0256	2.5644
	1.243E-02	0.0256	2.5644
	1.335E-02	0.0256	2.5644
	1.439E-02	0.0256	2.5644
	1.558E-02	0.0256	2.5635
	1.694E-02	0.0256	2.5635
	1.852E-02	0.0256	2.5617
	2.037E-02	0.0256	2.5617
	2.255E-02	0.0256	2.5617
	2.517E-02	0.0256	2.5617
	2.836E-02	0.0256	2.5617
	3.234E-02	0.0256	2.5617
	3.743E-02	0.0256	2.5608
	4.416E-02	0.0256	2.5598
	5.341E-02	0.0256	2.5598
	6.676E-02	0.0256	2.5580
	8.742E-02	0.0256	2.5580
	1.219E-01	0.0256	2.5580
	1.855E-01	0.0256	2.5580
	3.112E-01	0.0256	2.5571
	5.407E-01	0.0256	2.5571
	8.839E-01	0.0256	2.5552

Apêndice C – Ensaio de porosimetria

1.323E+00	0.0256	2.5552
1.886E+00	0.0256	2.5552
2.737E+00	0.0255	2.5515
4.073E+00	0.0255	2.5497
4.687E+00	0.0254	2.5351
5.019E+00	0.0252	2.5206
5.407E+00	0.0251	2.5060
5.912E+00	0.0251	2.5060
6.444E+00	0.0249	2.4914
6.932E+00	0.0248	2.4768
7.433E+00	0.0246	2.4623
8.030E+00	0.0246	2.4623
8.536E+00	0.0246	2.4623
9.104E+00	0.0245	2.4477
1.001E+01	0.0243	2.4331
1.114E+01	0.0240	2.4040
1.230E+01	0.0237	2.3749
1.369E+01	0.0235	2.3457
1.536E+01	0.0232	2.3166
1.789E+01	0.0226	2.2583
2.143E+01	0.0220	2.2000
2.614E+01	0.0214	2.1417
3.292E+01	0.0210	2.0981
4.359E+01	0.0194	1.9378
6.159E+01	0.0185	1.8504
9.311E+01	0.0175	1.7483
1.724E+02	0.0154	1.5444
7.777E+02	0.0017	0.1748

Total porosity = 2.5644 [%]
Sample (bulk) volume = 1.0000 [cc]
Total intruded volume = 0.0256 [cc]

Pore Size Distribution By Volume - Intrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure dV/d(log d) [PSI] [cc/g]	Pore Diameter [µm]	Volume Intruded [cc/g]	Delta Volume [cc/g]	% Volume Intruded %	Dv (d) [cc/ (µm-g)]	-
0.201 8.329E-03	1.060E+03	0.0002	0.0002	1.13	2.549E-06	
0.879 1.096E-02	2.426E+02	0.0070	0.0068	44.26	2.163E-05	
1.997 6.424E-03	1.068E+02	0.0105	0.0034	65.85	2.720E-05	
3.086 3.544E-03	6.913E+01	0.0113	0.0009	71.23	2.224E-05	
4.443 5.000E-03	4.801E+01	0.0119	0.0006	74.84	4.351E-05	
5.995 5.639E-03	3.559E+01	0.0128	0.0009	80.52	7.000E-05	
7.646 3.446E-03	2.790E+01	0.0131	0.0004	82.80	5.298E-05	
9.402 4.669E-03	2.269E+01	0.0135	0.0004	85.07	8.839E-05	
11.308 3.940E-03	1.886E+01	0.0139	0.0004	87.34	9.052E-05	
13.331 6.013E-03	1.600E+01	0.0142	0.0003	89.41	1.613E-04	
15.081 3.763E-03	1.414E+01	0.0145	0.0003	91.32	1.166E-04	
16.797 2.924E-03	1.270E+01	0.0146	0.0001	92.20	9.918E-05	
18.590 4.228E-03	1.148E+01	0.0148	0.0002	93.23	1.595E-04	
20.650 4.694E-03	1.033E+01	0.0150	0.0002	94.36	1.959E-04	

Apêndice C – Ensaio de porosimetria

22.851	9.335E+00	0.0151	0.0002	95.40	1.244E-04
2.674E-03					
24.546	8.691E+00	0.0152	0.0001	95.97	9.505E-05
1.885E-03					
26.033	8.194E+00	0.0152	0.0000	96.02	0.000E+00
0.000E+00					
28.011	7.616E+00	0.0152	0.0000	96.02	0.000E+00
0.000E+00					
30.130	7.080E+00	0.0153	0.0000	96.22	1.775E-04
2.938E-03					
32.391	6.586E+00	0.0154	0.0001	97.00	1.893E-04
2.844E-03					
35.093	6.079E+00	0.0154	0.0000	97.31	1.057E-04
1.506E-03					
38.461	5.546E+00	0.0155	0.0001	97.72	7.536E-05
9.509E-04					
41.657	5.121E+00	0.0156	0.0000	98.03	2.653E-04
3.156E-03					
44.533	4.790E+00	0.0157	0.0001	98.65	3.133E-04
3.469E-03					
48.469	4.401E+00	0.0158	0.0001	99.27	1.453E-04
1.458E-03					
71.189	2.997E+00	0.0158	0.0000	99.48	1.076E-05
7.882E-05					
105.508	2.022E+00	0.0158	0.0000	99.60	2.161E-05
9.845E-05					
149.789	1.424E+00	0.0158	0.0000	99.64	4.239E-06
1.216E-05					
221.231	9.642E-01	0.0158	0.0000	99.64	9.630E-06
2.470E-05					
355.071	6.008E-01	0.0158	0.0000	99.71	2.486E-05
3.178E-05					
613.534	3.477E-01	0.0158	0.0000	99.72	0.000E+00
0.000E+00					
1044.120	2.043E-01	0.0158	0.0000	99.73	4.408E-05
2.166E-05					
1622.027	1.315E-01	0.0158	0.0000	99.75	1.880E-05
4.810E-06					
2296.107	9.291E-02	0.0158	0.0000	99.75	0.000E+00
0.000E+00					
3040.687	7.016E-02	0.0158	0.0000	99.75	2.495E-04
4.386E-05					
3831.084	5.568E-02	0.0158	0.0000	99.81	5.422E-04
6.736E-05					
4660.509	4.577E-02	0.0158	0.0000	99.82	0.000E+00
0.000E+00					
5522.784	3.863E-02	0.0158	0.0000	99.85	1.407E-03
1.280E-04					
6415.188	3.325E-02	0.0159	0.0000	99.89	6.094E-04
4.443E-05					
7334.068	2.909E-02	0.0159	0.0000	99.89	0.000E+00
0.000E+00					
8282.704	2.576E-02	0.0159	0.0000	99.89	0.000E+00
0.000E+00					
9260.633	2.304E-02	0.0159	0.0000	99.89	0.000E+00
0.000E+00					
10268.650	2.077E-02	0.0159	0.0000	99.89	0.000E+00
0.000E+00					

Apêndice C – Ensaio de porosimetria

11306.837	1.887E-02	0.0159	0.0000	99.90	2.327E-03
1.040E-04					
12373.065	1.724E-02	0.0159	0.0000	99.95	4.569E-03
1.800E-04					
13468.824	1.584E-02	0.0159	0.0000	99.96	1.388E-03
5.230E-05					
14593.757	1.462E-02	0.0159	0.0000	99.99	3.222E-03
1.076E-04					
15745.938	1.355E-02	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
16927.857	1.260E-02	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
18138.967	1.176E-02	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
19382.898	1.101E-02	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
20659.443	1.033E-02	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
21967.102	9.711E-03	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
23304.262	9.154E-03	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
24730.018	8.626E-03	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
26481.357	8.056E-03	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
28970.895	7.363E-03	0.0159	0.0000	100.00	0.000E+00
0.000E+00					
32031.996	6.660E-03	0.0159	0.0000	100.00	3.430E-06
5.287E-08					

Pore Size Distribution By Number - Intrusion

Printing one out of every 10 data points.

Pressure [PSI]	Pore Diameter [μm]	Pore Num Fraction
0.201	1.060E+03	0.0000E+00
0.879	2.426E+02	1.6444E-07
1.997	1.068E+02	1.7124E-07
3.086	6.913E+01	1.8069E-07
4.443	4.801E+01	4.2467E-07
5.995	3.559E+01	7.4174E-07
7.646	2.790E+01	5.9274E-07
9.402	2.269E+01	1.0552E-06
11.308	1.886E+01	1.1859E-06
13.331	1.600E+01	2.0382E-06
15.081	1.414E+01	1.2853E-06
16.797	1.270E+01	1.1812E-06
18.590	1.148E+01	1.9198E-06
20.650	1.033E+01	2.7884E-06
22.851	9.335E+00	1.7207E-06
24.546	8.691E+00	9.2191E-07
26.033	8.194E+00	0.0000E+00
28.011	7.616E+00	0.0000E+00
30.130	7.080E+00	2.2519E-06
32.391	6.586E+00	3.1288E-06
35.093	6.079E+00	2.2131E-06
38.461	5.546E+00	1.6542E-06
41.657	5.121E+00	4.9420E-06
44.533	4.790E+00	6.4130E-06
48.469	4.401E+00	7.4731E-06
71.189	2.997E+00	2.3413E-06
105.508	2.022E+00	5.1268E-06
149.789	1.424E+00	1.4781E-06
221.231	9.642E-01	5.8021E-06
355.071	6.008E-01	2.9103E-05
613.534	3.477E-01	0.0000E+00

Apêndice C – Ensaio de porosimetria

1044.120	2.043E-01	1.4665E-04
1622.027	1.315E-01	7.7474E-05
2296.107	9.291E-02	0.0000E+00
3040.687	7.016E-02	1.2601E-03
3831.084	5.568E-02	2.8836E-03
4660.509	4.577E-02	0.0000E+00
5522.784	3.863E-02	8.1168E-03
6415.188	3.325E-02	3.6213E-03
7334.068	2.909E-02	0.0000E+00
8282.704	2.576E-02	0.0000E+00
9260.633	2.304E-02	0.0000E+00
10268.650	2.077E-02	0.0000E+00
11306.837	1.887E-02	1.6081E-02
12373.065	1.724E-02	3.2428E-02
13468.824	1.584E-02	1.0128E-02
14593.757	1.462E-02	2.4093E-02
15745.938	1.355E-02	0.0000E+00
16927.857	1.260E-02	0.0000E+00
18138.967	1.176E-02	0.0000E+00
19382.898	1.101E-02	0.0000E+00
20659.443	1.033E-02	0.0000E+00
21967.102	9.711E-03	0.0000E+00
23304.262	9.154E-03	0.0000E+00
24730.018	8.626E-03	0.0000E+00
26481.357	8.056E-03	0.0000E+00
28970.895	7.363E-03	0.0000E+00
32031.996	6.660E-03	7.2859E-05

