

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM PATOLOGIAS DAS CONSTRUÇÕES

NICOLLE TALYTA ARRIAGADA SOTO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS: UM
ESTUDO DE DURABILIDADE**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2014

NICOLLE TALYTA ARRIAGADA SOTO

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS: UM
ESTUDO DE DURABILIDADE**

Monografia apresentada ao curso de Pós Graduação *Lato Sensu* em Patologias das Construções do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Patologias das Construções.

Orientador: Prof. Dr. Wellington Mazer.

Co-Orientadora: Prof^a. Dra. Juliana Machado Casali

CURITIBA

2014

NICOLLE TALYTA ARRIAGADA SOTO

AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS

Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista no Curso de Pós-Graduação em Patologia das Construções, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela comissão formada pelos professores:

Orientador:

Prof. Dr. Wellington Mazer

Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – Câmpus Curitiba.

Banca:

Prof. Dra. Juliana Machado Casali

Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – *Câmpus* Curitiba.

Prof. Esp. Marcelo Varisco

Departamento Acadêmico de Construção Civil, UTFPR – *Câmpus* Curitiba.

Curitiba

2014

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso

Às quatro pessoas que sempre serão exemplos de amor e dedicação: Meus pais Lori e Haroldo, Camilla e Gustavo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma grandiosa meus pais, Lori e Haroldo, e a minha irmã, Camilla, pelo amor incondicional e por serem grande exemplo de honestidade, caráter, hombridade e valor.

Agradeço também ao meu noivo, Gustavo, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades e me trazendo paz todos os dias.

Agradeço a orientação dos professores Wellington e Juliana, que colaboraram de forma fundamental nesse trabalho, acreditando sempre em mim e indicando sugestões que contribuíram de forma significativa. Agradeço pela oportunidade de aprendizado, pelas conversas, pelo crescimento intelectual, profissional e pessoal, pela confiança e pelo carinho.

Aos colegas de especialização pela oportunidade de convívio que me fez compreender a importância da vivência de mundo para a construção do sujeito.

E a todos aqueles que contribuíram para que eu pudesse subir mais esse degrau não canso de agradecer. Muito obrigada!

RESUMO

SOTO, N. T. A. Avaliação das propriedades do concreto de pós reativos: um estudo de durabilidade. 2013. 58 f. Monografia (Especialização em Patologias das Construções) - Departamento Acadêmico de Construção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Com o avanço das tecnologias de construção e a necessidade de estruturas cada vez mais resistentes e esbeltas, novos tipos de concreto têm sido desenvolvidos visando suprir essa demanda. Após o concreto convencional já houve o desenvolvimento do concreto de alta resistência, do concreto de alto desempenho e, mais recentemente, do concreto de ultra alto desempenho e do concreto de pós reativos. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades do concreto de pós reativos analisando principalmente o seu comportamento frente à penetração de agentes agressivos. As propriedades avaliadas foram: resistência à compressão, porosidade (através da injeção de ar sob pressão dentro da massa do concreto), resistividade elétrica, absorção de água total e absorção de água por capilaridade. Os resultados demonstram uma grande diferença das propriedades em relação ao concreto de pós reativos e um concreto convencional. Constatou-se que a utilização da sílica ativa e pó de quartzo, devido ao melhor empacotamento das partículas, promoveu uma porosidade e uma absorção de água menores dos concreto de pós-reativos em relação aos concreto convencional. Também foi observado valores de resistividade elétrica no concreto de pós reativos maiores do que os obtidos para os concretos convencional. Desta forma, este trabalho apresenta uma caracterização das diferentes propriedades que influenciam o comportamento à penetração de agentes agressivos e diferencia os tipos de concreto do ponto de vista de durabilidade demonstrando, de forma clara, os benefícios da utilização do concreto de pós-reativos em ambientes de maior agressividade.

Palavras-chave: Concreto de Pós Reativos, Durabilidade, Porosidade, Resistividade

ABSTRACT

SOTO, N. T. A. Properties Evaluation of Reactive Powder Concrete: a durability study. 2013. 58 f. Monografia (Especialização em Patologias das Construções) - Departamento Acadêmico de Construção Civil - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

With the advancement of technology and the need to build structures increasingly resistant and slim, new types of concrete have been developed to meet this demand. After conventional concrete, it has been the development the high resistance concrete, high performance concrete, and more recently, the ultra-high performance concrete or reactive powder concrete. The objective of this paper is to determine some properties of reactive powder concrete mainly evaluating its behavior towards the penetration of aggressive agents. It also has been compared to the conventional concrete results, since this is still the most widely used type of concrete. The properties evaluated were: compressive strength, porosity (by injecting air under pressure into the mass of the concrete), and electrical resistivity and total water absorption by capillarity. The results show a great difference of the properties between different types of concrete. It was found that the use of silica fume and quartz powder, according to a better packing of the particles, caused a reduce in the porosity and water absorption of reactive powder concrete in relation to conventional concrete. It was also observed values of electrical resistivity of reactive powder concrete greater than those obtained for conventional concrete. Therefore, this paper presents a characterization of the different properties that influence on the behavior of the penetration of aggressive agents and present different types of concrete in terms of durability demonstrating clearly the benefits of using reactive powder concrete in aggressive environments.

Keywords: Reactive Powder Concrete, RPC, Durability, Porosity, Resistivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Comparação de seções do (a) CPR, (b) aço, (c) Concreto Protendido e (d) Concreto Convencional.....	14
Figura 2 - Passarela de Sherbrooke, Canadá.....	18
Figura 3 - Estação de trem em Calgary.....	18
Figura 4 - Torre de sino, Laval, França.....	19
Figura 5 - Comparação da homogeneidade entre (a) CAR e (b) CPR.....	20
Figura 6 - Comportamento no tratamento térmico.....	22
Figura 7 - Grãos de sílica ativa ao redor de um grão de cimento.....	25
Figura 8 - Aplicação de pressão no CPR.....	27
Figura 9 - Parâmetros que influencia no módulo de elasticidade do concreto.....	29
Figura 10 - Modelo esquemático do método dos quatro eletrodos.....	30
Figura 11 - Análise granulométrica - Concreto Convencional.....	34
Figura 12 - Análise granulométrica - CPR.....	35
Figura 13 - Análise granulométrica - Pó de Quartzo.....	37
Figura 14 - Aparelho Medidor de Ar Incorporado para Concreto.....	39
Figura 15 - Parâmetros para medidas de corpos de prova de ensaios de resistividade - método dos quatro eletrodos.....	40
Figura 16 - Posicionamento dos fios de cobre e medidas dos corpos de prova.....	41
Figura 17 - Ensaio de resistividade elétrica.....	42
Figura 18 - Poroscope™ utilizado no ensaio de permeabilidade.....	44
Figura 19 - Ensaio de permeabilidade ao ar.....	44
Figura 20 - Tampão utilizado no ensaio de permeabilidade à água e ao ar.....	44
Figura 21 - Bolhas no topo do corpo de prova CPR.....	47
Figura 22 - Aspecto da seção do corpo de prova CPR rompido e retificado.....	47
Figura 23 - Resistividade Elétrica dos concretos avaliados.....	48
Figura 24 - Absorção de água por Imersão e Índice de vazios dos concretos avaliados.....	49
Figura 25 - Absorção de água por capilaridade obtidas do Concreto Convencional e CPR versus tempo.....	50
Figura 26 - Resultados do ensaio de resistência a compressão – CPR.....	52
Figura 27 - Resultados do ensaio de resistência a compressão – CPR.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dosagens típicas CPR.	26
Tabela 2 - Propriedades do CPR	28
Tabela 3 - Variação das propriedades x Variação % de fibras.....	29
Tabela 4 - Propriedades Químicas do Cimento Portland CP II Z - 32 utilizado.....	32
Tabela 5 - Propriedades Físicas do Cimento Portland CP II Z - 32 utilizado.....	33
Tabela 6 - Granulometria do Agregado Miúdo utilizado no Concreto Convencional .	33
Tabela 7 - Granulometria do Agregado Miúdo utilizado no CPR.....	33
Tabela 8 - Granulometria do Agregado Graúdo	34
Tabela 9 - Caracterização Química da Sílica Ativa	36
Tabela 10 - Caracterização Física da Sílica Ativa	36
Tabela 11 - Caracterização Química do Pó de Quartzo	36
Tabela 12 - Características do aditivo superplastificante	38
Tabela 13 - Resumo dos traços	38
Tabela 14 - Resumo dos corpos de prova para os ensaios	45
Tabela 15 - Critérios de avaliação do concreto quanto a resistividade	48
Tabela 16 - Classificação do concreto pela permeabilidade ao ar	51

LISTA DE SÍMBOLOS

CP – Cimento Portland

NBR – Norma Brasileira

CPR - Concreto de Pós Reativos

CAD - Concreto de Alto Desempenho

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1	HISTÓRICO DO CPR E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES.....	17
2.2	PRINCÍPIOS E PROPRIEDADES DOS CONCRETOS DE PÓS REATIVOS 19	
2.2.1	Aumento da homogeneidade	20
2.2.2	Aumento da compactidade.....	21
2.2.3	Melhora da microestrutura pelo tratamento térmico	21
2.2.4	Melhora da ductibilidade pela adição de fibras de aço.....	22
2.3	MATERIAIS CONSTITUINTES	22
2.3.1	Cimento Portland	22
2.3.2	Agregado miúdo	23
2.3.3	Aditivo Superplastificante	24
2.3.4	Sílica Ativa	24
2.3.5	Pó de quartzo	25
2.4	DOSAGEM DOS MATERIAIS	26
2.5	MÉTODO DE PREPARO E CURA	26
2.6	ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO	27
2.6.1	Resistência à compressão	28
2.6.2	Resistência à tração.....	28
2.6.3	Módulo de Elasticidade Estático	29
2.6.4	Resistividade Elétrica	30
3.	METODOLOGIA	32
3.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS.....	32
3.1.1	Cimento Portland	32
3.1.2	Agregados.....	33

3.1.3	Adições	35
3.1.3.1	Sílica ativa.....	35
3.1.3.2	Pó de Quartzo	36
3.1.4	Água de amassamento	37
3.1.5	Aditivos.....	37
3.2	DOSAGEM DOS MATERIAIS	38
3.3	ESTUDO DA PROPRIEDADE NO ESTADO FRESCO.....	39
3.4	ESTUDO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	40
3.4.1	Resistividade Elétrica	40
3.4.2	Absorção de água	42
3.4.2.1	Absorção de água total por imersão e índice de vazios.....	42
3.4.2.2	Absorção de água por capilaridade	43
3.4.3	Permeabilidade ao ar	43
3.4.4	Resistência a compressão	45
4.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISES	46
4.1	PROPRIEDADE NO ESTADO FRESCO.....	46
4.2	PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO	47
4.2.1	Resistividade Elétrica	48
4.2.2	Absorção de água total e por capilaridade e índice de vazios	49
4.2.3	Permeabilidade ao ar	51
4.2.4	Resistência à compressão	52
4.2.5	Correlação entre os resultados	Erro! Indicador não definido.
5.	CONCLUSÃO	54
5.1	Recomendações para trabalhos futuros	54
6.	REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo devido à abundância de matérias primas e de um conhecimento já solidificado de sua utilização.

Com o avanço das tecnologias de projeto e necessidade de estruturas que exigem cada vez mais desse material constantemente surgem pesquisas e novos tipos de concreto visando suprir essas necessidades. Após o concreto convencional já houve o desenvolvimento do concreto de alta resistência, o concreto de alto desempenho e, mais recentemente, o concreto de ultra alto desempenho, concreto de pós reativos ou somente CPR.

Os primeiros registros de um concreto com resistência à compressão próxima de 200 MPa foi em meados dos anos 70, desenvolvido por Brunauer e patenteado pela H. H. Bache (AÏTCIN, 2000). O princípio desse material é o uso de partículas muito finas como pó de quartzo e sílica ativa e aditivos superplastificantes, trabalhando-se para chegar à menor relação água/aglomerante possível.

O CPR é um material que se assemelha aos vãos, alturas e resistência do aço, porém com menor custo e maior durabilidade (ISAIA *et al*, 2011). Na Figura 1 comparar-se o concreto armado, concreto protendido e aço com o CPR, para uma mesma carga.

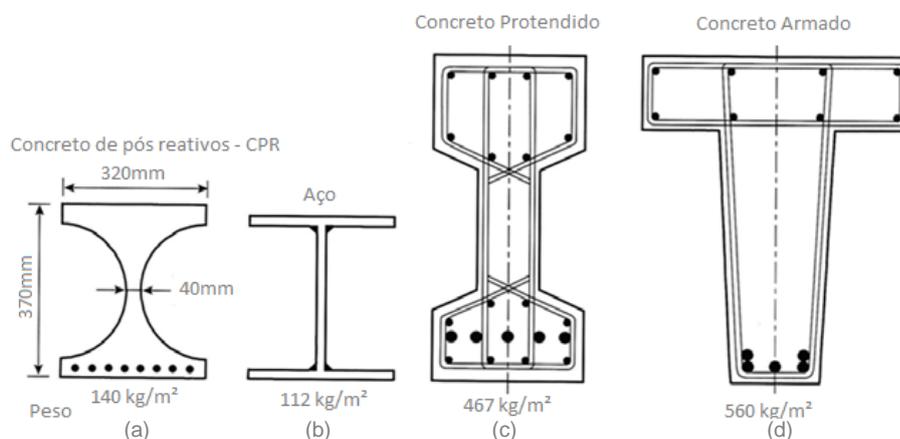


Figura 1 - Comparação de seções do (a) CPR, (b) aço, (c) Concreto Protendido e (d) Concreto Convencional.

Fonte: Walraven, 1999.

A durabilidade de materiais que tem como base o cimento Portland está intimamente relacionada com a permeabilidade, uma vez que é esse o mecanismo que permite a entrada de agentes agressivos como íons cloreto, íons sulfato e dióxido de carbono (SANJUAN & MARTIN, 1997). A penetração desses agentes pode ocasionar reações químicas e físicas que fazem com que o concreto não atinja a vida útil para a qual foi projetado (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

No que diz respeito à durabilidade, possivelmente o concreto de pós reativos tenha bom desempenho uma vez que funciona com o princípio do empacotamento de partículas muito finas, possui estrutura muito densa e de baixa porosidade, o que resulta em uma dificuldade para os agentes patológicos. Porém existem poucos estudos específicos na área para constatar como ocorre o processo de degradação das estruturas nesse material, e por isso sendo um dos objetivos desse trabalho.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral é determinar as propriedades dos concretos de pós reativos para indiretamente avaliar o seu comportamento frente a penetração de agentes agressivos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Determinar a porosidade dos concretos através da injeção de ar sob pressão dentro da massa do concreto;
- Verificar o módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade da onda ultrassônica nos diferentes tipos de concretos.

- Estimar a resistividade dos materiais através da medida da resistência elétrica a uma alta tensão;
- Avaliar a absorção de água total e por capilaridade e índice de vazios.

1.3 JUSTIFICATIVA

Como se trata de um material relativamente novo e ainda pouco difundido no Brasil, existe uma carência de estudos sobre o concreto de pós reativos.

Em pesquisas encontradas na literatura internacional o concreto de pós reativos aparece como uma alternativa para obras de saneamento e armazenamento de rejeitos radioativos e daí a importância de um estudo mais aprofundado sobre as características de porosidade, permeabilidade e durabilidade desse tipo de concreto, já que tratam-se de aplicações de vida útil longa e de interesse social.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente pesquisa é composta de 5 capítulos. No primeiro tem-se a introdução, com um histórico breve do concreto de pós reativos, objetivos traçados e justificativa de elaboração do trabalho.

No capítulo de número 2 tem-se a revisão bibliográfica que consta a teoria a sobre o material estudado e os conceitos técnicos necessários para o entendimento dos procedimentos realizados.

No terceiro capítulo está a metodologia onde são descritos todos os procedimentos utilizados no trabalho.

No quarto capítulo estão apresentados os resultados obtidos dos experimentos realizados e feita a discussão juntamente com a análise dos mesmos.

No quinto e último capítulo encontra-se as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo será apresentada uma revisão sobre o histórico do CPR bem como suas principais aplicações no mundo, e também as definições sobre materiais e métodos utilizados nessa pesquisa.

2.1 HISTÓRICO DO CPR E SUAS PRINCIPAIS APLICAÇÕES

A partir de 1824, ano em que Joseph Aspdin patenteou o cimento Portland, o concreto tem sido o material de construção mais consumido do mundo (KATTAR & ALMEIDA, 1999). O grande uso desse material deve-se a vários fatores como a facilidade e baixo custo dos materiais empregados, facilidade de execução, versatilidade, durabilidade e segurança (BIZ, 2001).

Através de pesquisas realizadas na França e no Canadá em meados de 1990 desenvolveram o CPR como material alternativo ao concreto de alto desempenho (CAD), obtendo resistência à compressão de 800MPa, contra 120MPa do CAD e 60MPa do concreto convencional (VANDERLEI, 2004).

O CPR é utilizado principalmente em construções de estruturas espaciais leves, tabuleiros de pontes, vigas, colunas, passarelas, pré-fabricados de túneis, placas de revestimento de fachadas além de cilindros para laminação (VANDERLEI, 2004).

Uma das primeiras e mais famosas aplicações do CPR é a Passarela de Sherbrooke, no Canadá (Figura 2).



Figura 2 - Passarela de Sherbrooke, Canadá.
Fonte: REVISTA DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA, 2006.

Construída em 1998, ela possui vão de 56m e emprega CPR encapsulado em tubos metálicos de paredes finas.

Outra construção utilizando o CPR é a estação de trem de Shawnessy, também no Canadá (Figura 3), onde foram construídas cascas côncavas sem a presença de armadura principal.



Figura 3 - Estação de trem em Calgary.
Fonte: REVISTA DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA, 2006.

Outro exemplo é a reconstrução da torre para o sino na cidade de Laval, na França. Neste caso houve um ganho significativo na vida útil e redução de 5 vezes em peso do conjunto (Figura 4).



Figura 4 - Torre de sino, Laval, França.
Fonte: REVISTA DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA, 2006.

2.2 PRINCÍPIOS E PROPRIEDADES DOS CONCRETOS DE PÓS REATIVOS

O concreto de pós reativos foi idealizado como base no princípio de formação com o mínimo de defeitos como fissuras ou poros capilares, propriedades obtidas com o aumento da compacidade e resistência dos materiais constituintes. Para isso, seguiram-se os seguintes princípios na pesquisa (CHEYREZY, 1999):

- Aumento da homogeneidade causada pela eliminação do agregado graúdo;
- Aumento da compacidade pela otimização granulométrica e aplicação de pressão antes e depois da pega;
- Progresso da microestrutura pelo tratamento térmico após o endurecimento;
- Melhora da ductibilidade pela adição de fibras de aço;
- Manter os procedimentos de mistura e moldagem tão próximos quanto possível dos padrões já existentes, de modo a gastar o menor tempo entre as operações.

Com os três primeiros elementos listados se obtém uma matriz com alta resistência à compressão, porém com baixa ductibilidade, propriedade conseguida com a adição de fibras de aço, que confere também resistência à tração ao CPR (VANDERLEI, 2004).

Os tópicos a seguir descrevem os efeitos de cada um desses princípios.

2.2.1 Aumento da homogeneidade

Para diminuir os problemas trazidos por um material heterogêneo como o concreto convencional como por exemplo a diferença entre os módulos de elasticidade da pasta e do agregado graúdo, diferença dos coeficientes de expansão térmica, entre outros – os agregados graúdos foram eliminados do CPR, com tamanho médio das partículas em torno de 0,2mm (ISAIA *et al*, 2011).

As propriedades mecânicas são melhoradas, com relação entre módulo de elasticidade da pasta e dos agregados entre 1,0 e 1,4. Além disso, a zona de transição agregado/pasta é suprimida e a relação agregado/matriz é reduzida (VANDERLEI, 2004).

Além disso se obtém as vantagens de um agregado com dimensões menores como aumento da superfície do esqueleto granular. Com isso as tensões aplicadas sobre a estrutura são mais bem distribuídas, evitando-se uma falha da microestrutura, o que aumenta a resistência última do material (ISAIA *et al*, 2011). Na Figura 5 observar-se a diferença de homogeneidade entre o CAD e o CPR.

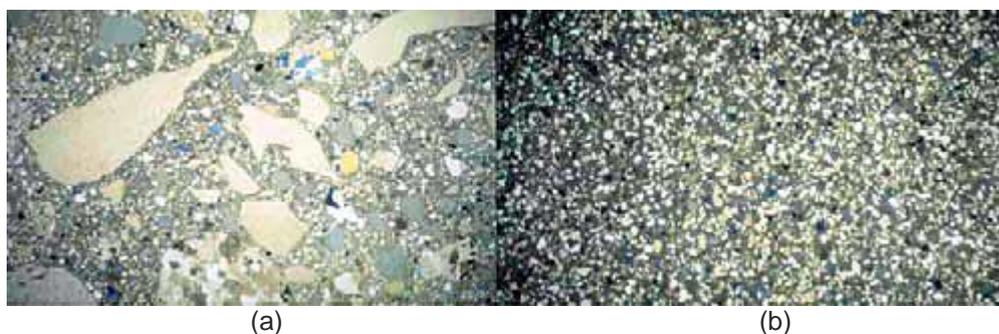


Figura 5 - Comparação da homogeneidade entre (a) CAR e (b) CPR.
Fonte: Resplendino, 2011.

2.2.2 Aumento da compacidade

O aumento da compacidade é obtido com uma mistura granular otimizada com uma pequena distância granular dentro de cada classe, sendo elas a areia, o pó de quartzo, o cimento e a sílica ativa. Além disso, é importante se realizar um estudo de compatibilidade do superplastificante bem como promover condições de mistura e vibração otimizadas (VANDERLEI, 2004).

O aumento da compacidade também é influenciado pela aplicação de pressão no concreto fresco. Esse procedimento diminui o ar incorporado, compensa a retração química e remove o excesso de água, podendo chegar a uma diminuição entre 20 a 25% de água, se for aplicada uma pressão de 50MPa durante 30 minutos (RICHARD & CHEYREZY, 1995).

2.2.3 Melhora da microestrutura pelo tratamento térmico

Segundo Richard & Cheyrezy (1995), quando os concretos de pós reativos são submetidos a um tratamento térmico existe a formação de hidratos cristalinos que melhora as propriedades mecânicas do material. Esse tratamento se inicia após o fim da pega do cimento e pode ser feito em ambiente com vapor d'água ou com ar quente.

Zanni *et al* (1996) estudaram a reação de hidratação medindo o comprimento da cadeia de hidratos C-S-H e a reação pozolânica com a sílica ativa e o pó de quartzo. O estudo utilizou a variação da temperatura na cura, aplicando temperaturas de 20°C, 90°C, 200°C e 250°C. Foi possível perceber-se um aumento da cadeia C-S-H com o aumento da temperatura e uma modificação na microestrutura acima de 200°C.

Para obtenção de um CPR200 Dugat *et al* (1995) aplicou o seguinte procedimento de cura térmica:

- Após desmoldagem os corpos de provas foram mantidos submersos em água a 20°C durante 7 dias;
- Após esse período foi aplicado vapor d'água a 90°C por 4 dias;

- Por último os corpos de prova foram expostos ao ar seco a 90°C por 2 dias.

No Figura 6 pode-se observar a relação entre resistência à compressão e duração e temperatura do tratamento térmico. Os autores concluíram que quanto maior a temperatura e duração maior é a resistência à compressão.

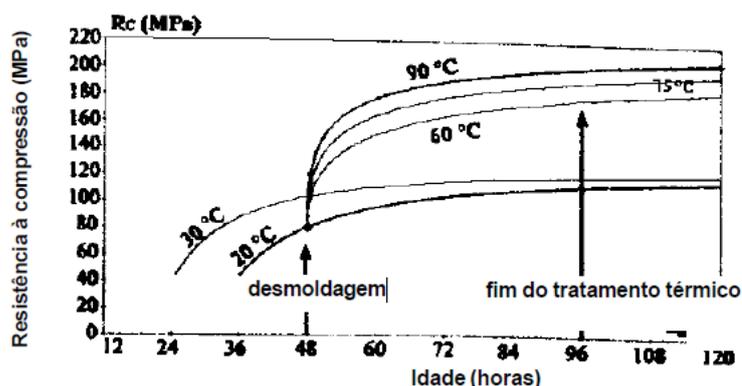


Figura 6 - Comportamento no tratamento térmico.

Fonte: Adeline & Behloul, 1996.

2.2.4 Melhora da ductibilidade pela adição de fibras de aço

O comportamento do concreto de pós reativos sem nenhuma adição de fibras é elástico linear e não excede 30kJm^{-2} de energia de fratura (VANDERLEI, 2004). Para a melhoria da ductibilidade são utilizadas fibras metálicas de módulo de elasticidade elevado.

A dosagem das fibras é feita de modo experimental e são utilizadas em percentuais que variam entre 1,5% e 3% (RICHARD & CHEYREZY, 1995).

2.3 MATERIAIS CONSTITUINTES

2.3.1 Cimento Portland

A seleção do cimento Portland é feita em virtude de duas características: sua composição e quantidade de finos e a compatibilidade com o aditivo superplastificante.

Em relação a composição é preferível a escolha de um cimento o mais puro possível e com menor quantidade de finos, já que cimentos com alta finura Blaine não são considerados satisfatórios, em virtude da demanda de água necessária para sua hidratação (COPOLLA *et al*, 1997).

Um cimento Portland com alto módulo de sílica é o mais indicado em virtude de suas características reológicas, entretanto esse tipo de cimento apresenta taxa lenta de pega, o que pode comprometer seu uso em alguns casos (BIZ, 2001).

Para Bonneau *et al* (1996) o cimento mais indicado para a produção de CPR é o cimento Portland comum (CP-I), mas o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI) também é utilizado por alguns autores.

Com relação ao superplastificante, é necessário determinar o ponto de saturação, ou seja, o ponto em que o aditivo deixa de agir como tal para agir somente como água na mistura. A colocação máxima de aditivo reduz a relação a/c e, por consequência, melhora as propriedades mecânicas do CPR.

2.3.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo é o agregado com maior diâmetro máximo no CPR, e isso se justifica pela obtenção de uma menor permeabilidade no concreto bem como pela melhor homogeneização dos materiais (BIZ, 2001).

A granulometria é de suma importância para o CPR. Ela deve ser muito bem definida para se evitar vazios na mistura (RICHARD & CHEYREZY, 1995).

A agregado miúdo selecionada deve ter um diâmetro máximo médio de 250µm, não podendo ultrapassar os limites superior de 600µm e inferior de 150µm. Esse agregado pode ser obtida tanto pelo peneiramento de pedra britada ou pela extração de agregado miúdo natural sendo que a primeira possui grãos altamente angulares e a segunda possui grãos mais arredondados. Ambas são adequadas para a produção de CPR, porém o agregado miúdo natural demanda um consumo

ligeiramente menor de água e, por esse motivo, torna-se preferível (VANDERLEI, 2004).

De acordo com AITCIN (2000) o agregado miúdo deve conter resultados de módulo de finura entre 2,7 e 3,0, características inerentes a um agregado miúdo mais grosso. Essa característica é apreciável uma vez que o CAD e o CPR já apresentam grande quantidade de partículas finas, então uma areia mais grossa significa uma redução na quantidade de água, o que gera um acréscimo na resistência.

2.3.3 Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante é de fundamental importância para o concreto de pós reativos para manter a relação a/c o mais baixa quanto possível mas manter a plasticidade. A determinação da dosagem do superplastificante é experimental e influenciada pelo tipo de cimento, devendo ser feitos ensaios de compatibilidade como o cone de Minislump e o cone de Marsh (GOMES, 2002).

A finalidade do uso de superplastificantes no CPR se deve à combinação dos três fatores a seguir (CHEYREZY, 1999):

- 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 do cimento para minimizar os efeitos de retração e tensões internas.

2.3.4 Sílica Ativa

A sílica ativa é a adição mineral mais utilizada e indicada para a produção de CPR. Isso se deve à sua forma bem arredondada e ao seu tamanho, que chega a

ser até 100 vezes menor que o cimento (ISAIA, *et al*, 2011). A comparação entre o tamanho do grão de cimento e os grãos de sílica ativa pode ser observada na Figura 7:

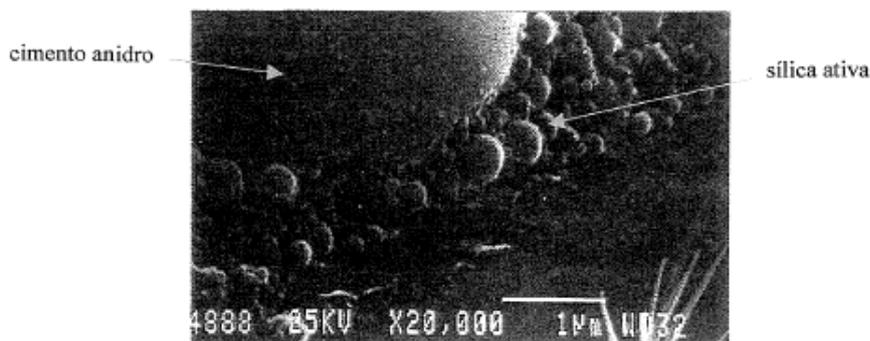


Figura 7 - Grãos de sílica ativa ao redor de um grão de cimento.
Fonte: Richard & Cheyrezy, 1995.

O seu uso em concretos se deve principalmente à (LARRARD, 1989):

- Enchimento dos vazios entre as partículas de cimento;
- Aumento das propriedades reológicas;
- Produção de hidratos secundários.

Outro efeito do tamanho reduzido de suas partículas é a redução da exsudação interna e superficial, importante no aspecto micro estrutural e na zona de transição entre pasta e agregado e pasta e armadura (GOLDMAN & BENTUR, 1989).

A taxa de utilização de sílica ativa/cimento é de aproximadamente 0,25, número que corresponde ao melhor empacotamento e próximo da quantidade necessária para consumir a cal que se forma da hidratação do cimento. No CPR a hidratação do cimento Portland é incompleta e a quantidade de sílica excedente atua como microfiller (VANDERLEI, 2004).

2.3.5 *Pó de quartzo*

O pó de quartzo é adicionado ao concreto de pós-reativos para contribuir com o fechamento do pacote granulométrico. Para isso, o tamanho das partículas

deve estar entre 5 μ m e 25 μ m. O pó de quartzo fecha os vazios entre os grãos de areia e intensifica as reações pozolânicas durante o tratamento térmico (BIZ, 2001).

2.4 DOSAGEM DOS MATERIAIS

A Tabela 1 apresenta o proporcionamento (traço) utilizado.

Tabela 1 - Dosagens típicas CPR.
Fonte: RICHARD & CHEYREZY, 1995.

Materiais	CPR 200 MPa				CPR 800 MPa	
	Sem fibras		Com fibras		Agregados de sílica	Agregados metálicos
Cimento Portland	1	1	1	1	1	1
Sílica ativa	0,25	0,23	0,25	0,23	0,23	0,23
Areia (150-600 μ m)	1,1	1,1	1,1	1,1	0,5	-
Quartzo (d50 = 10 μ m)	-	0,39	-	0,39	0,39	0,39
Aditivo superplastificante	0,016	0,019	0,016	0,019	0,019	0,019
Fibra metálica (L=12 mm)	-	-	0,175	-	-	-
Fibra metálica (L=3 mm)	-	-	-	-	0,630	0,630
Agregados metálicos <800 μ m	-	-	-	-	-	1,49
Água	0,15	0,17	0,17	0,19	0,19	0,19
Pressão de compactação	-	-	-	-	50 MPa	50 MPa
Temperatura de tratamento térmico	20°C	90°C	20°C	90°C	250 - 400°C	250 - 400°C

2.5 MÉTODO DE PREPARO E CURA

Todas as misturas que contem aglomerantes devem ser cuidadosamente preparadas para que as propriedades dos materiais sejam bem aproveitadas. Isso se torna ainda mais necessário quando tratamos do concreto de pós reativos devido a sua importância fundamental na estrutura que, por vezes, não apresenta armadura (ISAIA, *et al*, 2011).

A primeira etapa da produção do CPR é a mistura das matérias primas, e esse processo é bem mais complicado que no concreto convencional ou CAD. Isso se deve ao fato de o CPR não conter agregado graúdo, que auxilia em muito a mistura dos componentes. Também não é possível fazer a mistura em betoneiras ou caminhões betoneiras, pois eles fazem a mistura por gravidade, que não energia suficiente nesse caso (ISAIA, *et al*, 2011).

Para atingir propriedades mecânicas elevadas, os corpos de prova devem ser submetidos à pressão durante a sua fase de endurecimento. Isso faz com que as bolhas de ar sejam expelidas em um primeiro momento, seguidas pela eliminação do excesso de água e, por fim, a porosidade química também é eliminada depois de 6 a 12h (BIZ, 2001).

Segundo Isaia *et al* (2004) as pressões aplicadas podem variar entre 20MPa e 50 MPa durante um período mínimo de 6 horas em aparatos como os apresentados na Figura 8:



Figura 8 - Aplicação de pressão no CPR
Fonte: Christ, 2011

Outro método utilizado para que o CPR alcance ótimas propriedades é a cura térmica. O benefício imediato desse processo é a aceleração da resistência inicial à compressão e acelera novas reações pozolânicas. As temperaturas em torno de 90°C são recomendadas em vários trabalhos, mas temperaturas de 250°C a 400°C podem ser usadas para atingir resistências muito elevadas, pois produzem cristais hidratados de xonotlita (BIZ, 2001).

2.6 ESTUDO DAS PROPRIEDADES DO ESTADO ENDURECIDO

A seguir serão apresentadas as propriedades de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade estático e resistividade elétrica.

2.6.1 Resistência à compressão

A resistência à compressão é um parâmetro para análise de outras propriedades e por isso o concreto é classificado de acordo com ela. Segundo Richard (1996) o CPR divide-se em duas classes:

- CPR200 – resistência à compressão entre 170 e 230 MPa;
- CPR800 – resistência à compressão entre 500 e 800 MPa;

As propriedades e procedimentos de cura propostas por Richard (1996) podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do CPR
Fonte: Richard, 1996.

Tipo de Tratamento Térmico	CPR200	CPR800
Pressurização Pré Moldagem	Nenhuma	10MPa a 50MPa
Tratamento Térmico (°C)	20 a 90	250 a 400
Propriedades	CPR200	CPR800
Resistência à compressão (Mpa)	170 a 230	500 a 800
Resistência à tração por flexão (Mpa)	30 a 60	45 a 140
Energia de Fratura (J/m ²)	20.000 a 40.000	1.200 a 20.000
Módulo de elasticidade	50 a 60	65 a 75

Como exposto nos princípios e propriedades dos concretos de pós reativos, o aumento da compactidade, homogeneidade e melhora da microestrutura do CPR também contribuem favoravelmente ao melhor desempenho desse material a resistência à compressão (CHEYREZY, 1999).

2.6.2 Resistência à tração

Para melhorar as características do concreto de pós reativos à tração pode ser feita a adição de fibras. A quantidade pode variar, podendo chegar a até 12% do volume, produzindo resultados de resistência à tração significativamente melhores (BEHLOUL *et al*, 1996).

Na Tabela 3 pode-se observar o aumento da resistência à flexão com o aumento da porcentagem de fibras no CPR obtido por Behloul *et al* (1996).

Tabela 3 - Variação das propriedades x Variação % de fibras
 Fonte: Behloul *et al*, 1996.

Quantidade de Fibras	Resistência a Tração (MPa)	Resistência a Compressão (MPa)	Resistência a Flexão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
0	5,1	208	11,3	40,6
0,01	7,5	216	24	39,6
0,024	7,8	225	36,8	43
0,04	11,4	225	58	43

2.6.3 Módulo de Elasticidade Estático

O módulo de elasticidade estático é obtido através da instrumentação de corpos de prova submetidos à compressão axial. O módulo de elasticidade é a deformação longitudinal até a força de ruptura.

A Figura 9 mostra os fatores que influenciam o módulo de elasticidade do concreto, que são o estado de umidade dos corpos de prova e condições de carregamento, estado de umidade dos corpos de prova e condições de carregamento, porosidade e composição da zona de transição na interface, módulo de elasticidade do agregado e a fração volumétrica.

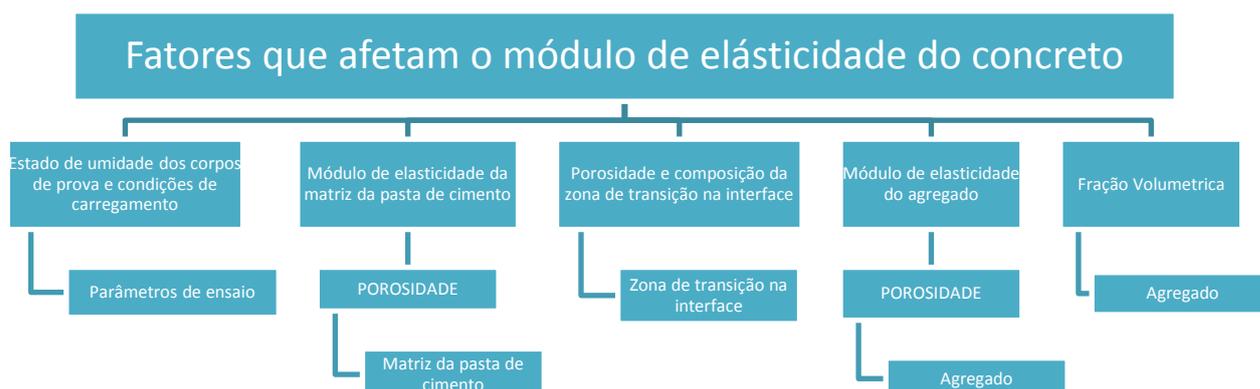


Figura 9 - Parâmetros que influencia no módulo de elasticidade do concreto
 Fonte: Mehta e Monteiro, 2008.

Observa-se que dois fatores que influenciam no módulo de elasticidade do concreto – Módulo de elasticidade da matriz da pasta de cimento e módulo de elasticidade do agregado – são influenciados pela porosidade e, por esse motivo,

pode-se considerar o módulo de elasticidade estático como parâmetro de durabilidade do concreto.

Para o CPR200, os valores obtidos em Richard & Cheyrezy (1994), Dugat *et al* (1995), Behloul *et al* (1996) e Bonneau *et al* (1996) para o módulo de elasticidade estático ficaram entre 40GPa e 66GPa, com aumento similar ao de resistência à compressão (VANDERLEI, 2004).

2.6.4 Resistividade Elétrica

Para a medida da resistividade elétrica utilizou-se o Método dos Quatro Eletrodo, ou Método de Wenner.

Este método é normatizado pela ASTM G57, e, apesar de ter sido desenvolvido para uso em solos, o seu uso para medida de resistividade em concreto tem sido muito estudada, tendo sido adaptados equipamentos para esse uso (ABREU, 1998).

Este ensaio é realizado conforme ilustra a Figura 10. Nos eletrodos externos é usada uma corrente alternada, enquanto nos eletrodos internos é medida uma diferença de potencial. Para que as medidas sejam confiáveis os eletrodos devem estar equidistantes e em linha reta.

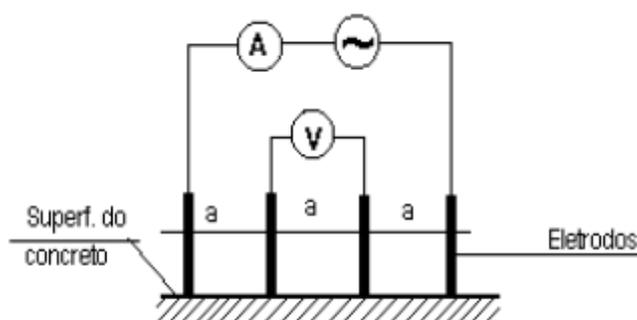


Figura 10 - Modelo esquemático do método dos quatro eletrodos
Fonte ABREU 1998

O valor da resistividade é dado conforme fórmula de Frank Wenner, conforme segue abaixo (MEDEIROS FILHO, 1979):

$$\rho = R \cdot k \quad (\text{Equação 1})$$

$$k = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2-4b^2}}} \quad (\text{Equação 2})$$

sendo

ρ - resistividade calculada do concreto, em ohm.cm;

R - resistência medida pelo instrumento, em ohm;

a - distância de separação entre os eletrodos, em cm;

b - profundidade de penetração dos eletrodos no corpo de prova, em cm.

Há, entretanto, uma simplificação para os casos em que $b \leq \frac{a}{20}$, onde a resistividade pode ser calculada conforme fórmula abaixo:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot \frac{V}{I} \quad (\text{Equação 3})$$

sendo

ρ - resistividade calculada do concreto, em ohm.cm;

a - distância de separação entre os eletrodos, em cm;

V - diferença de potencial entre os eletrodos internos (mV);

I - corrente (mA).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e procedimentos utilizados para o desenvolvimento desse trabalho estão descritos a seguir.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

A seguir são descritos os materiais utilizados na pesquisa.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado foi o Cimento Portland composto com pozolana (CP II Z - 32), obedecendo às especificações da NBR 5732:1991, para os dois tipos de concretos: convencional e CPR, por ser o tipo de cimento Portland mais comumente utilizado na região em que foi realizada a pesquisa. O material foi fornecido em sacos de papel *kraft* de 50kg cada, sendo posteriormente armazenados em bombonas plásticas lacradas para conservação das características iniciais. As Tabela 4 e Tabela 5 apresentam as análises químicas e físicas, respectivamente, fornecidas pelo fabricante com os resultados da média do mês em que o cimento foi produzido, em março de 2013.

Tabela 4 - Propriedades Químicas do Cimento Portland CP II Z - 32 utilizado
Fonte: Itambé – Adaptado pela autora

PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CIMENTO				
Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
%	%	%	%	%
6,47	22,64	3,16	54,26	4,01
SO ₃	P. Fogo	CaO L.	R. Ins.	Eq. Alc.
%	%	%	%	%
2,27	4,86	1,15	10,85	0,97

Tabela 5 - Propriedades Físicas do Cimento Portland CP II Z - 32 utilizado
Fonte: Itambé – Adaptado pela autora

PROPRIEDADES FÍSICAS DO CIMENTO					
Exp. Quente		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325
mm		%	cm ² /g	%	%
0,65		27,5	3705	2,27	11,36
Tempo de Pega (h:min)		Resistência à Compressão (MPa)			
Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
0,1298611	0,1604167	14,5	26,8	33,7	40,5

3.1.2 Agregados

O agregado utilizado nesse trabalho foi uma areia natural proveniente do Rio Iguazu, região metropolitana de Curitiba. Para o concreto convencional utilizou-se o agregado com granulometria apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Granulometria do Agregado Miúdo utilizado no Concreto Convencional
Fonte: Autoria própria

AGREGADO MIÚDO - Convencional		
Abertura da Peneira	% retida	% retida acumulada
4,8	1,5%	2%
2,4	6,7%	8%
1,2	18,3%	27%
0,6	29,3%	56%
0,3	20,8%	77%
0,15	9,8%	86%
< 0,15 (fundo)	13,5%	100%

Já para o CPR foi utilizado agregado miúdo com composição granulométrica diferente visando promover o melhor empacotamento das partículas, que pode ser vista na Tabela 7.

Tabela 7 - Granulometria do Agregado Miúdo utilizado no CPR
Fonte: Autoria própria

AGREGADO MIÚDO - CPR		
Abertura da Peneira	% retida	% retida acumulada
0,6	35,0%	35%
0,3	27,0%	62%
0,15	22,0%	84%
0,075	16,0%	100%
Fundo	0%	0%

No concreto convencional foi utilizado como agregado graúdo brita n° 01 de origem granítica.

A curva granulométrica da brita é apresentada na Tabela 8. Na Figura 11 e Figura 12 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados utilizados para cada tipo de concreto.

Tabela 8 - Granulometria do Agregado Graúdo
Fonte: Autoria própria

AGREGADO GRAÚDO		
Abertura da Peneira	% retida	% retida acumulada
25	0,00%	0%
19	3,22%	3%
12,5	57,12%	60%
9,5	26,26%	87%
6,3	12,19%	99%
4,8	0,95%	100%
< 4,80	0,25%	100%

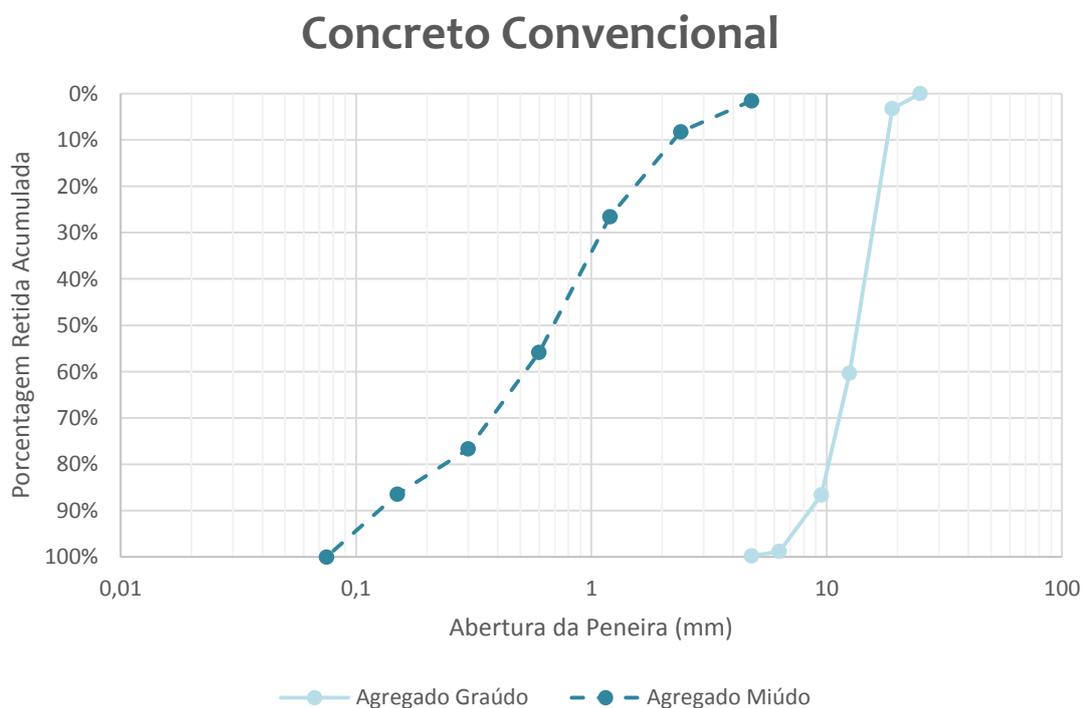


Figura 11 - Análise granulométrica - Concreto Convencional
Fonte: Autoria própria

Concreto de Pós Reativos

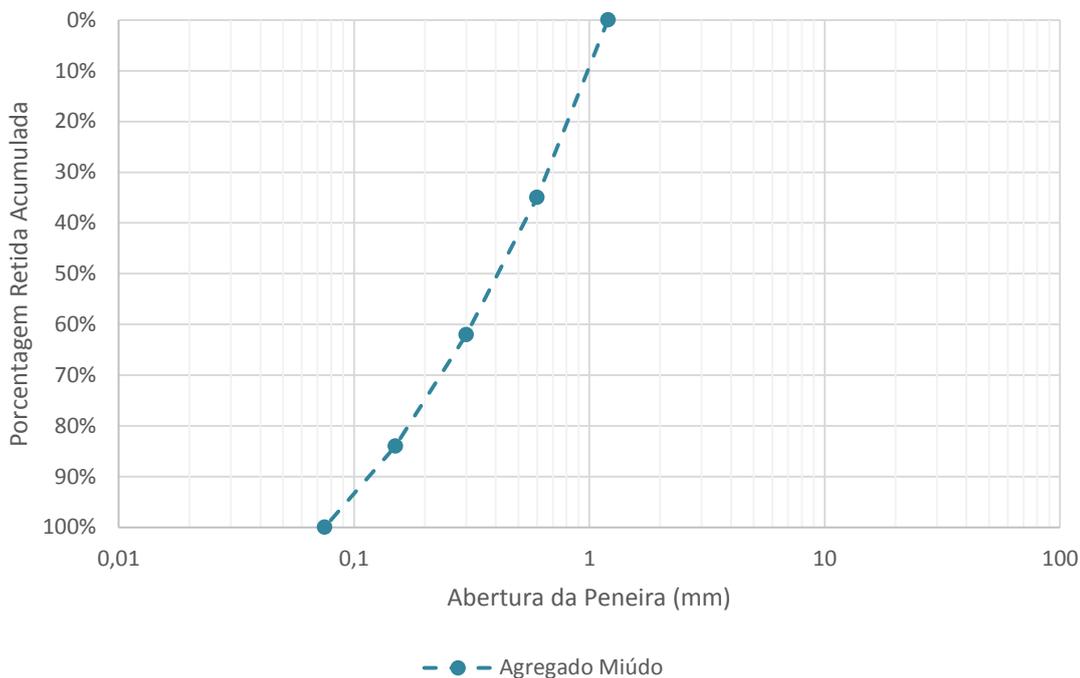


Figura 12 - Análise granulométrica - CPR
Fonte: Autoria própria

3.1.3 Adições

3.1.3.1 Sílica ativa

Para esse trabalho utilizou-se sílica ativa nacional, em pó de cor cinza, fornecida em sacos de papel *kraft* de 15kg e armazenadas em bombonas plásticas lacradas para a manutenção de suas características iniciais. Encontram-se, nas Tabela 9 e Tabela 10, as características química e física fornecidas pelo fabricante.

Tabela 9 - Caracterização Química da Sílica Ativa
Fonte: Camargo Corrêa Metais

PROPRIEDADES QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA	
Superfície específica (m²/kg) (BET)	20000
Massa Específica (g/cm ³)	2,2
Umidade (%)	1,2
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio (µm)	0,2

Tabela 10 - Caracterização Física da Sílica Ativa
Fonte: Camargo Corrêa Metais

PROPRIEDADES FÍSICAS DA SILICA ATIVA	
Teor de SiO₂	min 85,0%
Equivalente Alcalino em NaO ₂	máx 0,50%

3.1.3.2 Pó de Quartzo

O pó de quartzo é um componente essencial nos concretos de pós reativos durante o tratamento térmico e deve possuir tamanho médio de 10µm – mesma classe granular do cimento Portland - para atingir sua reatividade máxima (VANDERLEI, 2004).

Na Tabela 11 apresenta-se granulometria típica do pó de quartzo e análise química em boletim técnico pelo fabricante.

Tabela 11 - Caracterização Química do Pó de Quartzo
Fonte: Vanderlei, 2004.

PROPRIEDADES QUÍMICAS DO PÓ DE QUARTZO	
Umidade (%)	0,02
Perda ao fogo (%)	0,13
Teor de SiO ₂ (%)	> 99,000
Teor de Fe₂O₃ (%)	< 0,050
Teor de Al ₂ O ₃ (%)	< 0,300
Teor de TiO ₂ (%)	< 0,035

Concreto de Pós Reativos

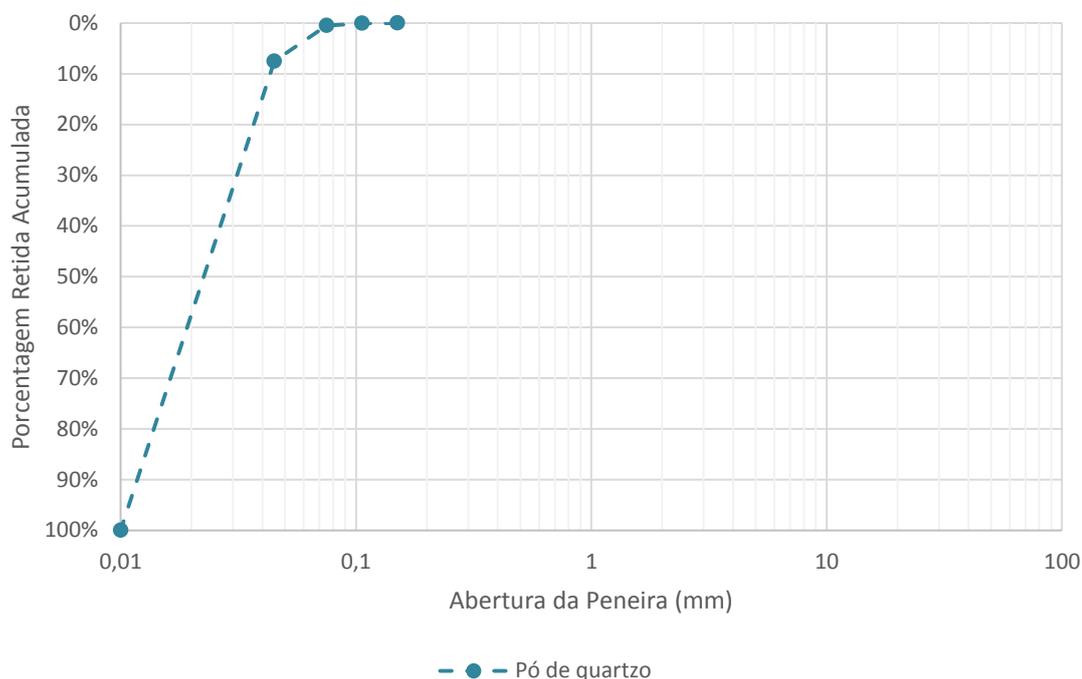


Figura 13 - Análise granulométrica - Pó de Quartzo
Fonte:Mineração Jundu

3.1.4 Água de amassamento

A água de amassamento utilizada para essa pesquisa foi água potável originada da rede de abastecimento da Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR.

Para o CPR utilizou-se água a aproximadamente 7°C para diminuir o calor de hidratação, uma vez que o consumo de cimento é elevado.

3.1.5 Aditivos

O aditivo adotado foi o aditivo sintético de polímeros policarboxilatos classificado como superplastificante com as características apresentadas na tabela 12, fornecidas pelo fabricante

Tabela 12 - Características do aditivo superplastificante
Fonte: MC - Mauchemie

CARACTERÍSTICAS DO SUPERPLASTIFICANTE		
Característica	Unidade	Valor
Massa Específica	g/cm ³	1,06
Dosagem recomendada	%	0,2 a 5,0
Teor de cloretos	%	< 0,1
Teor de álcalis	%	< 1,0

3.2 DOSAGEM DOS MATERIAIS

Para a obtenção do traço do concreto convencional foi utilizado o método ABCP/ACI para uma resistência característica de projeto (f_{ck}) de 25 MPa.

Para o concreto de pós reativos foi utilizado o método de Alfred - adaptação do modelo de Andreasen que incorpora um valor mínimo de tamanho de partícula, o que é uma característica de sistemas reais (DINGER & FUNK, 1994). Esse método foi escolhido por promover o empacotamento das partículas dos materiais, sendo de natureza matemática e semi-empírica.

Na Tabela 13 estão apresentados os traços utilizados nesse estudo.

Tabela 13 - Resumo dos traços
Fonte: Autoria própria

RESUMO DOS TRAÇOS							
	Cimento	Areia	Brita	Água	Sílica	Quartzo	Aditivo
CONV	1	1,94	2,46	0,52	-	-	-
CPR	1	1,1	-	0,22	0,15	0,23	0,04

O processo de obtenção do CPR foi em misturador de argamassa e seguidos os procedimentos a seguir:

- Pesagem de todos os materiais;
- Em uma vasilha misturar o pó de quartzo, cimento, areia e sílica por 60 segundos, até que o material fique homogêneo;
- Juntar o aditivo à água;
- Colocar na bacia do misturador os pós e parte da água com aditivo;
- Com o misturador ligado na velocidade baixa acrescentar o restante da água durante 60 segundos;
- Mudar a velocidade para alta e misturar durante 60 segundos;

- Após o fim da mistura, moldar os corpos de prova com 2 camadas e compactação em mesa vibratória;
- Manter um vidro sobre os CP's para nivelar a superfície e impedir a perda de água;
- Desmoldar depois de passadas as primeiras 24 horas e iniciar os tratamentos de cura.

Após desmoldados os corpos de prova permaneceram em cura úmida durante 3 dias seguidos por 4 dias de cura térmica a 90°C.

3.3 ESTUDO DA PROPRIEDADE NO ESTADO FRESCO

A propriedade no estado fresco avaliada foi o teor de ar incorporado.

Para a determinação do teor de ar incorporado do concreto convencional foi utilizado o método pressiométrico descrito pela NBR NM 47:2002, mostrado na Figura 14.



Figura 14 - Aparelho Medidor de Ar Incorporado para Concreto
FONTE: SOLOTEST (2012)

Para determinação do teor de ar incorporado do concreto de pós reativos foi utilizada a NBR 13278:2005.

O CPR necessita de mistura mecânica e, por esse motivo, ele foi obtido em argamassadeiras. O ensaio utilizado para o concreto convencional requeria um volume de 8 litros para ser feito e isso tornou inviável sua realização para o CPR.

Em virtude do grande volume necessário para o ensaio, o que era um fator limitante, optou-se pelo método utilizado para argamassas, uma vez que ele necessita de uma pequena amostra para ser realizado.

3.4 ESTUDO DAS PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades avaliadas no estado endurecido foram: resistividade elétrica, absorção de água total e por capilaridade e permeabilidade ao ar, descritas a seguir.

3.4.1 Resistividade Elétrica

Para este ensaio foram moldados três corpos de prova de cada um dos concretos, medindo 15cm x 15cm x 15cm, seguindo as recomendações de GOWERS & MILLARD (1999) mostrados na Figura 15.

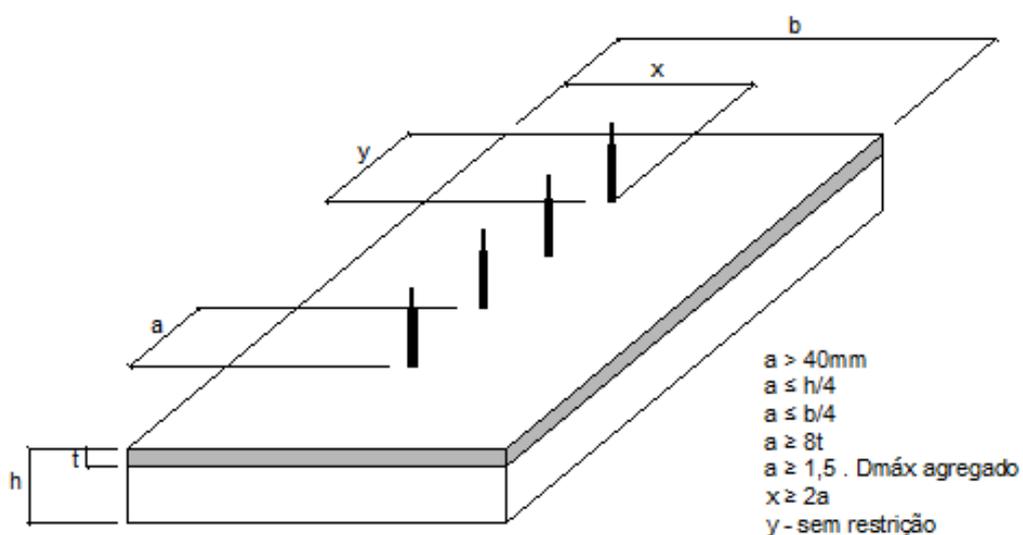


Figura 15 - Parâmetros para medidas de corpos de prova de ensaios de resistividade - método dos quatro eletrodos.

Fonte: Adaptado de GOWERS & MILLARD (1999)

Eles foram instrumentados com 4 trechos de fios de cobre de 10mm^2 de área e comprimento de 8cm cada, decapados nas extremidades.

Para melhorar o contato com o substrato a capa de verniz dos fios foi retirada nas duas extremidades e a ponta a ser imersa no concreto foi amassada em seus últimos 2cm.

O detalhe dos eletrodos e o esquema do seu posicionamento nos corpos de prova podem ser observados na Figura 16. Os equipamentos e o corpo de prova podem ser observados na Figura 17.

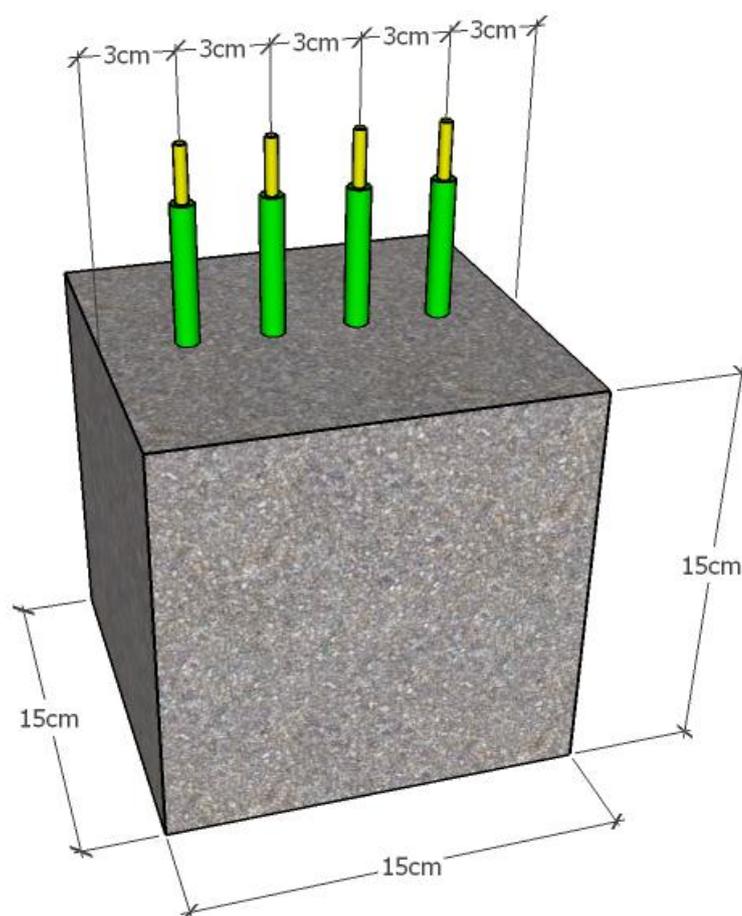


Figura 16 - Posicionamento dos fios de cobre e medidas dos corpos de prova
Fonte: Autoria própria



Figura 17 - Ensaio de resistividade elétrica
Fonte: Autoria própria

O ensaio teve a finalidade de coletar as medidas de diferença de potencial e corrente elétrica, feitas com multímetro. Em cada corpo de prova foram feitas duas leituras, sendo aceitas se tivessem diferença muito pequena entre elas, e a leitura considerada era a média entre essas duas medidas.

3.4.2 Absorção de água

3.4.2.1 Absorção de água total por imersão e índice de vazios

A absorção de água total por imersão e o índice de vazios foram determinados conforme recomendações da NBR 9778:1987, utilizando 3 corpos de prova cilíndricos com 50mm diâmetro por 100mm de altura para cada tipo de concreto.

O procedimento é dividido em três etapas: secagem em estufa (105 ± 5) °C, saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C e saturação da amostra na água em ebulição.

Para este estudo foram realizadas todas as etapas previstas na norma, porém a temperatura utilizada para a secagem dos corpos de prova na estufa foi de 50°C. Esse procedimento foi adotado, pois, segundo SILVA (2005), pode haver mudança na estrutura dos poros devido a altas temperaturas. Uma secagem não controlada a 105°C pode inclusive, segundo MCCARTER *et al* (1992) causar microfissuração e outros efeitos que influenciariam no resultado dos ensaios.

Os corpos de prova permaneceram 28 dias na câmara úmida antes de serem submetidos ao ensaio.

3.4.2.2 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi feito segundo determinações da NBR 9779:1995, tendo sido moldados 3 corpos de prova de com 50mm diâmetro por 100mm de altura para cada um dos tipos de concreto.

Os corpos de prova permaneceram 28 dias na câmara úmida antes de serem submetidos ao ensaio. Em sua preparação estes corpos de prova também foram colocados em estufa a 50°C para evitar os efeitos indesejados da secagem a 105°C.

3.4.3 Permeabilidade ao ar

A permeabilidade ao ar foi determinada utilizando o aparelho Poroscope™, que utiliza a técnica de injeção de ar sob pressão para determinar a permeabilidade do concreto. O aparelho pode ser observado na Figura 18 e Figura 19.



Figura 18 - Poroscope™ utilizado no ensaio de permeabilidade
Fonte: James Instruments



Figura 19 - Ensaio de permeabilidade ao ar
Fonte: James Instruments

Para este ensaio foram moldados três corpos de prova cilíndricos de 50mm diâmetro por 100mm de altura para cada tipo de concreto e em cada corpo de prova foi feito um orifício de (10x40)mm onde e foi inserido um tampão como o ilustrado na Figura 20 para vedar completamente o orifício.



Figura 20 - Tampão utilizado no ensaio de permeabilidade à água e ao ar
Fonte: James Instruments

Com a introdução deste tampão é deixado um espaço vazio cilíndrico de 10mm de diâmetro x 20 mm de altura, que fica há 20 mm abaixo da superfície do corpo de prova. O ar do corpo de prova é retirado pela pistola, criando um vácuo igual ou superior a 55kPa. O temporizador do aparelho mostra quantos segundos foram necessários para que a pressão diminuísse para 50kPa. Esse tempo é utilizado como parâmetro para medir a permeabilidade do concreto.

3.4.4 Resistência a compressão

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados em uma prensa EMIC com capacidade de 200 toneladas de acordo com a NBR 7215:1996. Os corpos de prova foram previamente retificados para regularização da superfície e saturados, tendo sido utilizados 3 corpos de prova cilíndricos com 50mm diâmetro por 100mm de altura para cada tipo de concreto.

Na Tabela 14 estão apresentadas as quantidades de corpos de prova utilizados nesse estudo.

Tabela 14 - Resumo dos corpos de prova para os ensaios
Fonte: Autoria Própria

ENSAIO	ESTADO FRESCO	07 DIAS	14 DIAS	21 DIAS	28 DIAS
Teor de Ar Incorporado	3	-	-	-	-
Resistividade Elétrica	-	3	3	3	3
Abs. imersão	-	3	3	3	3
Abs. por capilaridade	-	3	3	3	3
Mod. Elasticidade	-	3	3	3	3
Resistência a compressão	-	3	3	3	3
Permeabilidade ao ar	-	3	3	3	3
Porosimetria	-	3	3	3	3

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E ANÁLISES

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados e discutidas suas relações com os mecanismos de entrada de agentes patológicos no concreto, fator determinante para a durabilidade desse material.

4.1 PROPRIEDADE NO ESTADO FRESCO

No estado fresco foi avaliado o teor de ar incorporado.

O concreto convencional apresentou 3,30% de teor de ar incorporado, sendo esse valor próximo do encontrado na literatura, que varia de 1 a 3% mesmo em concretos sem aditivos, podendo chegar a até 5% sem causar prejuízos ao desempenho mecânico do material (GEYER & SÁ, 2006).

Já o concreto de pós reativos apresentou teor de ar incorporado maior do que o encontrado para o concreto convencional, com o valor de 4,01% de teor de ar incorporado.

Este comportamento pode ser explicado pela ação do aditivo superplastificante, segundo Hartmann & Helene (2003), pois durante a mistura mecânica o aditivo facilita a incorporação de bolhas de ar aumentando os valores do teor de ar incorporado. Possivelmente o ar incorporado foi expelido para a superfície, pois apesar de ter sido feito adensamento do concreto durante o ensaio, a textura extremamente viscosa do concreto de pós reativos dificultou a saída de ar logo após a moldagem.

O ensaio para determinação do teor de ar incorporado foi realizado imediatamente após o término da mistura devido rápida perda de fluidez do CPR. Após passados aproximadamente 15 minutos do fim da moldagem dos corpos de prova foi possível verificar a formação de bolhas na parte superior, num tempo superior a realização do ensaio de ar incorporado (Figura 21). O CPR após curado não apresentava bolhas de ar aparente em seu interior, fato observado visualmente após retificação dos corpos de prova (Figura 22). Assim, possivelmente, a formação de bolhas foi superficial.



Figura 21 - Bolhas no topo do corpo de prova CPR
Fonte: Autoria Própria



Figura 22 - Aspecto da seção do corpo de prova CPR rompido e retificado
Fonte: Autoria Própria

4.2 PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO

As propriedades no estado endurecido avaliadas foram resistividade elétrica, absorção de água total e por capilaridade e índice de vazios, permeabilidade ao ar e resistência à compressão.

4.2.1 Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica é um importante parâmetro no monitoramento de corrosão de estruturas. Isso se dá pelo fato de ela controlar o fluxo de íons que se difundem no concreto (HELENE, 1993).

A Figura 23 apresenta as medidas de resistividade elétrica obtida para os dois tipos de concreto estudados com o tempo.

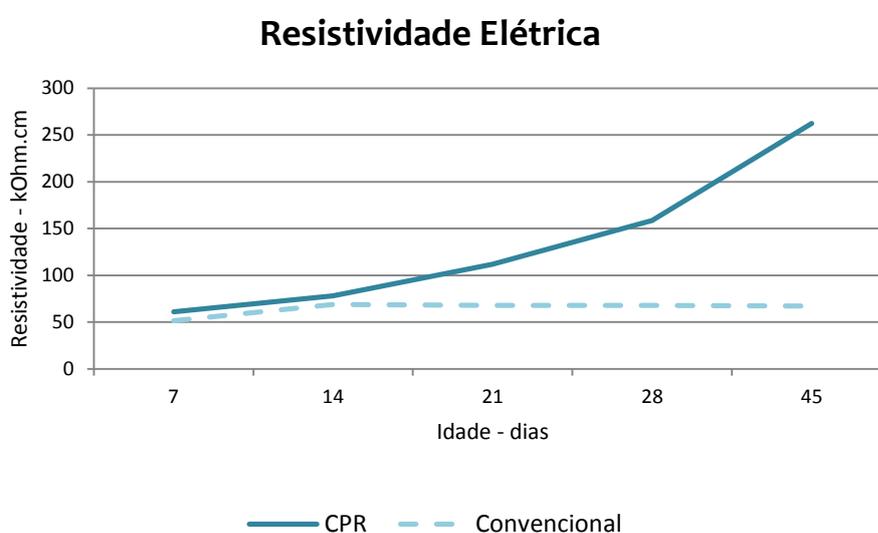


Figura 23 - Resistividade Elétrica dos concretos avaliados
Fonte: Autoria Própria

Observa-se Tabela 15 classificação apresentada por Cascudo (1997) para a resistividade, proposta pela Comité Euro-internacional Du Beton - CEB - e com grande aceitação no meio técnico.

Tabela 15 - Critérios de avaliação do concreto quanto a resistividade
Fonte: Cascudo (1997)

Resistividade do Concreto	Indicação de Probabilidade de Corrosão
$\rho > 20 \text{ kohm.cm}$	Desprezível
10 a 20 kohm.cm	Baixa
5 a 10 kohm.cm	Alta
$\rho < 5 \text{ kohm.cm}$	Muito Alta

Seguindo os princípios da classificação CEB (Tabela 15) pode-se concluir que ambos concretos encaixam-se na classe de probabilidade de corrosão desprezível. Porém o concreto de pós reativos apresenta valores de resistividade

aos 28 dias 2,3 vezes maior do que o concreto convencional. Também observou-se no concreto de pós reativos um aumento considerável da resistividade, enquanto o concreto convencional apresenta leituras praticamente constantes desde os 14 dias de idade.

Aos 45 dias o CPR aumentou a sua resistividade em aproximadamente 65% em relação aos 7 dias, chegando a valores quase 4 vezes maiores que o concreto convencional.

Observa-se que o concreto de pós reativos apresenta valores maiores e com aumento constante durante o período ensaiado, fatores que possivelmente diminuem muito mais a probabilidade de corrosão e deterioração do concreto.

4.2.2 Absorção de água total e por capilaridade e índice de vazios

A Figura 24 apresenta os valores de absorção de água total e o índice de vazios para os concretos avaliados aos 28 dias.



Figura 24 - Absorção de água por Imersão e Índice de vazios dos concretos avaliados
Fonte: Autoria Própria

Analisando-se a absorção de água, medida por meio da imersão total dos corpos de prova na água, pode-se observar que o CPR apresentou absorção de água bastante inferior ao do concreto convencional usado como referência.

Possivelmente o volume de poros abertos é muito menor do que o concreto convencional.

Ishikawa (2010) considera que um concreto com absorção menor que 6% é de grande durabilidade. Assim como o CPR apresentou valores quase 5 vezes menor que o concreto convencional, provavelmente o concreto de pós reativos teria durabilidade maior quando analisada essa propriedade.

Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade realizados para os dois tipos de concreto após 28 dias são apresentados na Figura 25.

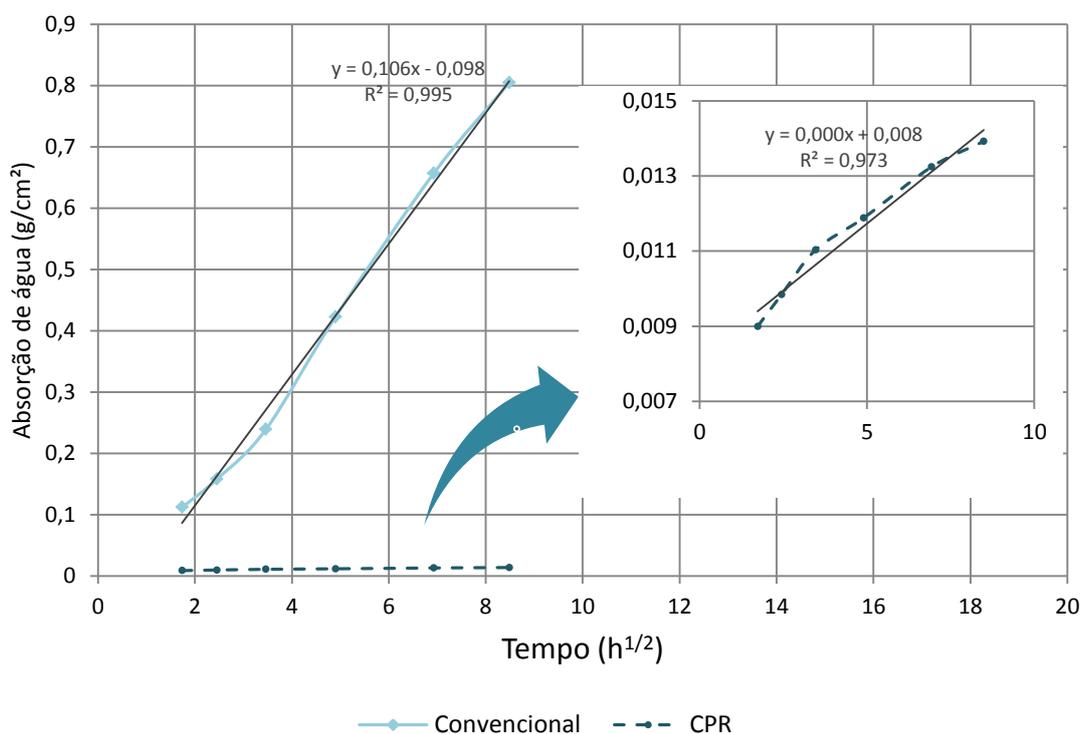


Figura 25 - Absorção de água por capilaridade obtidas do Concreto Convencional e CPR versus tempo

Fonte: Autoria Própria

Observa-se que os valores de absorção de água por capilaridade versus tempo do concreto de pós reativos é muito inferior ao concreto convencional, cerca de 60 vezes no tempo de 72 horas em relação ao convencional.

Esse comportamento pode ter sido obtido pela utilização da sílica ativa e do pó de quartzo que, devido a sua pequena dimensão e, por conseqüência, grande área específica, interfere na microestrutura do concreto de pós reativos.

Isso pode ter influenciado a estrutura dos poros como na intercomunicabilidade, distribuição e diâmetro pois a utilização de adições minerais acarreta o refinamento dos poros, que têm seu diâmetro reduzido (NETO, 2011)

Comparando-se os valores obtidos com outros concretos com adições minerais, o concreto de pós reativos estudado apresentou valores inferiores. Neto (2011), em seu estudo com concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz, obteve valores de 0,042g/cm² às 72h do concreto contendo 10% de sílica ativa aos 91 dias de cura. Ainda Santos (2006) observou valores de absorção capilar para o concreto com sílica ativa de 0,1122g/cm² às 72 e aos 98 dias de cura.

4.2.3 Permeabilidade ao ar

Em seus estudos sobre o método Cather *et al* (1984) propôs a seguinte classificação, apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 - Classificação do concreto pela permeabilidade ao ar
Fonte: Cather *et al* (1984)

Categoria de Qualidade	Tempo (s)	Interpretação	Tipo de material
0	<30	Pobre	Argamassa porosa
1	30-100	Moderado	Concreto com resistência à compressão de 20 N/mm ²
2	100-300	Satisfatório	Concreto com resistência à compressão de 50 N/mm ²
3	300-1000	Bom	Concreto adensado e bem curado
4	>1000	Excelente	Concreto com polímeros

Para o ensaio de permeabilidade ao ar o concreto convencional apresentou resultado, aos 28 dias, de 537 segundos. Com os valores obtidos, realizado com o aparelho Poroscope™, pode-se afirmar que o concreto convencional apresenta aos 28 dias valores que permitem classificá-lo na categoria de qualidade 3 (bom).

Já para o concreto de pós reativos, não foi possível a realização de uma medida quantitativa para o mesmo, uma vez que o tempo do ensaio foi superior a bateria do equipamento (1 hora). Possivelmente a quantidade de poros do CPR era muito pequena, impedindo a dispersão da pressão através de poros no corpo de prova ou essa pressão é muito pequena para a realização do ensaio com esse material.

4.2.4 Resistência à compressão

Nos Figura 26 e Figura 27 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência a compressão conforme a idade.

Resultados do ensaio de resistência a compressão – CPR

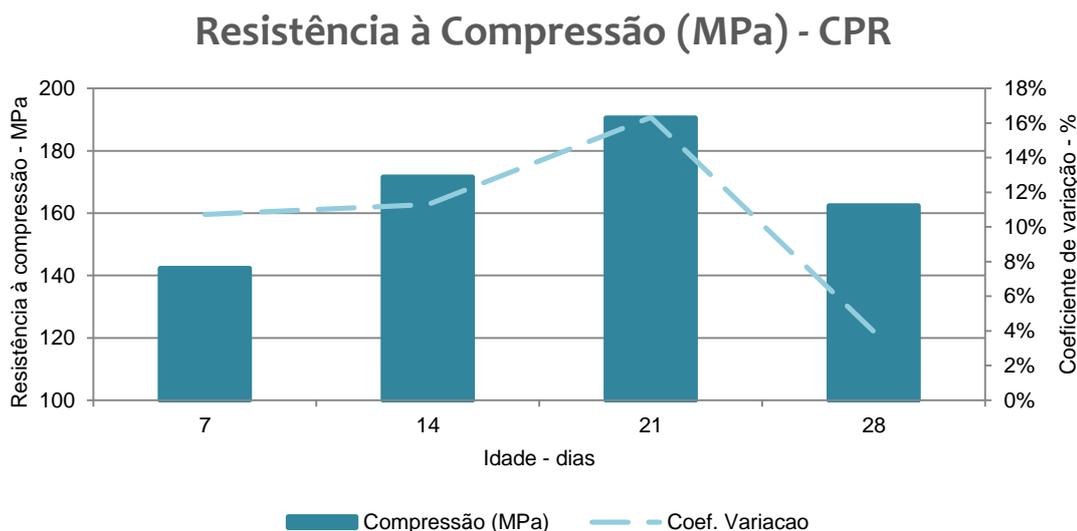


Figura 26 - Resultados do ensaio de resistência a compressão – CPR
Fonte: Autoria Própria

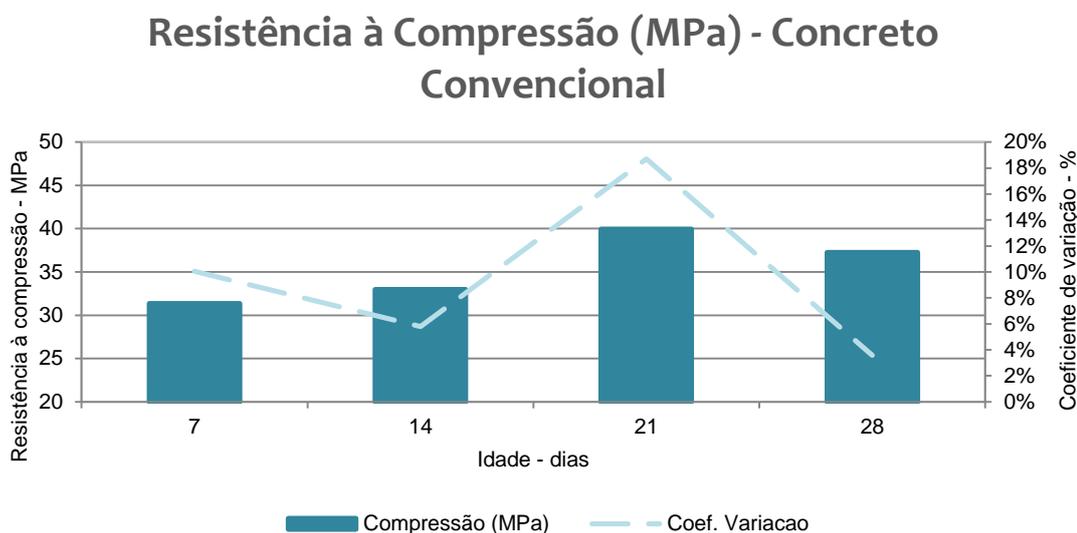


Figura 27 - Resultados do ensaio de resistência a compressão – CPR
Fonte: Autoria Própria

Os resultados de resistência a compressão para os dois concretos foi maior aos 28 dias do que aqueles ensaiados aos 7 dias, como esperado, mostrando a

influência da idade no ganho de resistência de compostos a base de cimento (MEHTA & MONTEIRO, 2008).

Apesar dessa diferença, pode-se observar que ambos materiais apresentaram comportamentos não lineares de ganho de resistência. Porém também é possível observar que os maiores valores de resistência – alcançados aos 21 dias – estão atrelados aos maiores valores de coeficiente da variação. Por esse motivo pode-se considerar que ambos concretos apresentaram o comportamento esperado.

No que diz respeito aos valores de resistência à compressão, aos 7 dias o CPR apresentou resultados 4 vezes maiores do que o concreto convencional, tendo o concreto de pós reativos aumentado sua resistência em 14% dos 7 aos 28 dias e o concreto convencional 19%.

Possivelmente o concreto de pós reativos apresentou menor acréscimo de resistência pois para esse concreto foi realizado o processo de cura térmica nos primeiros 7 dias, contribuindo assim para que a sua resistência aos primeiros dias de idade fosse aumentada.

Os dois tipos de concreto apresentaram altos valores de coeficiente de variação, variando de 4 a 20%. Talvez seria necessário um número maior do que 3 corpos de prova por idade como foi realizado.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos verificou-se que o melhor empacotamento promovido pelas adições, o alto consumo de cimento e o emprego de aditivo superplastificante teve grande influência na redução da absorção de água e maior resistência no concreto de pós reativos.

De forma geral, o CPR apresentou resistividade elétrica superior, crescente ao longo do tempo e, segundo a classificação, indicou probabilidade de corrosão desprezível; a absorção total de água por imersão e vazios foram próximos também a 1%; a absorção de água por capilaridade foi muito inferior em relação ao concreto convencional; a permeabilidade foi caracterizada como excelente.

O ensaio de teor de ar incorporado apresentou um alto valor que não corresponde ao que pode ser observado em uma seção do corpo de prova e nem condiz com os demais resultados. Esse resultado demonstra que tal ensaio não mostrou-se adequado para ser aplicado nesse material, sendo necessário o desenvolvimento de metodologia específica para esse fim.

O ensaio de absorção de água total demonstrou que a quantidade de poros é muito menor quando comparada ao concreto convencional. Porém, ao romper-se o corpo de prova após o ensaio pode-se constatar que ele não estava saturado mesmo tendo sido executado de acordo com a norma. Isso demonstra que, além de uma quantidade pequena de poros esses não encontram-se interligados – resultado corroborado pelo ensaio de injeção de ar.

Todos os ensaios realizados apresentam que, possivelmente, existe um indicativo que o concreto de pós reativos tem um excelente desempenho quanto à resistência a penetração de agentes agressivos por apresentar baixo índice de vazios, baixa capilaridade, pouca permeabilidade e alta resistividade elétrica além de altos valores de resistência à compressão.

5.1 Recomendações para trabalhos futuros

É visível a necessidade do desenvolvimento de metodologias de ensaios específicas para este tipo de material. Apesar de ter-se conseguido obter resultados significativos para todas as propriedades analisadas, alguns dos ensaios utilizados não eram específicos para concreto e nenhum deles contemplava as particularidades do concreto de pós reativos.

Um ensaio de absorção de água total inserindo o corpo de prova em uma lâmina de água aumentada com o passar do tempo pode expulsar o ar do interior do corpo de prova e dessa forma satura-lo por completo, obtendo-se assim um valor mais preciso de índice de vazios.

O ensaio de resistividade elétrica também merece maiores estudos. Os valores coletados variavam muito entre as medições e também com a umidade relativa do ar e umidade do corpo de prova. Nesse estudo as medidas foram feitas depois de 6 horas dos corpos de prova retirados da cura umida. Para diminuir essa variabilidade pode-se trabalhar com um ambiente mais controlado e com corpos de prova completamente secos, diminuindo assim a variabilidade dos resultados.

Possivelmente com mais estudos e métodos específicos esse concreto pode ser mais estudado e, como consequência, ser cada vez mais difundido como solução para ambientes agressivos e não só notável pela sua excepcional resistência mecânica.

6. REFERÊNCIAS

ABREU, A. G. **Efeito das adições minerais na resistividade elétrica de concretos convencionais**. Porto Alegre. 1998. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ADELIN, R.; BEHLOUL, M. (1996). **High Ductility Beams Without Passive Reinforcement**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 4., 1996, Paris, France. Anais... Paris. p. 1383-1390.

AÏTCIN, P.-C. **Concreto de Alto Desempenho**– São Paulo – Editora Pini, 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four electrode method – G 57:95a** (reapproved 2001). Annual Book of ASTM Standard, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – determinação da densidade de massa e do Teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. NBR 5732: **Cimento Portland comum**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

_____. NBR 7215 - **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

_____. NBR 8522 - **Concreto - Determinação do módulo de deformação estática e diagrama tensão deformação**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 9778. **Argamassas e concreto endurecido - Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. NBRNM 47: **Concreto: determinação do teor de ar em concreto fresco - método pressiométrico**. Rio de Janeiro, 2002.

BEHLOUL, M.; BERNIER, G.; CHEYREZY, M. **Tensile Behavior of Reactive Powder Concrete (RPC)**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 4., 1996, Paris, France. Anais...Paris. p. 1375-1381.

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

BONNEAU, O.; POULIN, C.; DUGAT, J.; RICHARD, P.; AITCIN, P. C. (1996). **Reactive powder concretes: from theory to practice**. Concrete International. v. 18, n. 4, p. 47-49, Apr.

CAMARGO CORREA METAIS. **Boletim Técnico SILMIX**. Disponível em <http://www.impercia.com.br/_img/produtos/BOL1070.pdf>. Acesso em 20 de maio de 2013.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini; Goiania: UFG, 1997.

CATHER, R.; FIGG, J. W.; MARSDEN, A. F.; O'BRIEN, T. P. **Improvements to the Figg Method for determining the air permeability of concrete**. Magazine of Concrete Research, Vol. 36, No. 129. p. 241-245. Reino Unido, 1984.

CHEYREZY, M. **Structural applications of RPC**. Concrete, London, 1999.
COPPOLA, L.; TROLI, R.; BORSOI, A.; et al. **Influence of superplasticizer type on the compressive strength of reactive powder mortars**. In: Fifth CANMETIACI SP-173, 1997, Rome:Italy. Proceedings .Rome: Chemical Admixtures, 1997, SP-173-27, p.537-557.

CHRIST, R. **Desenvolvimento do concreto de pós reativos com materiais do estado do Rio Grande do Sul**. São Leopoldo: UNISINOS, 2011. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

DINGER, D.R; FUNK, J.E. **Particle Packing, Part VI - Applications of Particle Size Distribution Concepts**. Interceram, 1994).

DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. **Étude Expérimentale de la Déformation sous Contrainte et du Comportement à la Rupture du Béton de Poudres Réactives**. In: ANNALES DE L'INSTITUT TECHNIQUE DU BATIMENT ET DES TRAVAUX PUBLICS - ITBTP, 1995. Anais... .n. 532, p. 112-121.

JAMES INSTRUMENTS. **Poroscope™ Determines Air and Water Permeability in Concrete Both At and Below the Surface**. Disponível em <<http://www.ndtjames.com/Poroscope-p/c-p.htm>>. Acesso em 15 de abril de 2013.

GEYER, A.L.B.; SÁ, R.R. **Importância do controle de qualidade do concreto no estado fresco**. Informativo Técnico Realmix. Goiania, 2006.

GOLDMAN A.; BENTUR, A. **Bond effects in high-strength silica-fume concretes**. ACI Materials Journal. v.86, n.5. September-October, 1989. p.962-972.

GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete**. 2002. 139p. Tese - Escola Técnica Superior D'Engineers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GOWERS, K. R. & MILLARD, S. G. **Measurement of concrete resistivity for assessment of corrosion severity of steel using Wenner technique**, ACI Materials Journal, 1999.

HARTMANN, C.T.; HELENE, P.R.L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilato destinado a concretos de cimento Portland**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. São Paulo, 2003.

HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo de corrosão em armaduras de concreto armado**. Livre docência. – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1993.

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

ISAIA, G.C., HELENE, P., TUTIKIAN, B.F. **Concreto de alto e ultra alto desempenho**. Concreto: ciência e tecnologia. 1 ed. São Paulo. Ibracon, 2011, p. 1283-1325. v.2.

KATTAR, J. E.; ALMEIDA, N. J. **Cimento Portland**. Holdercim Brasil S.A, 4a ed., jul.,1999. 43p.

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

MC BAUCHEMIE. **MC-PowerFlow 1110**. Disponível em <<http://www.mc-bauchemie.com.br/download.aspx?file=/datasheets/technical/MC-PowerFlow%201110.pdf>>. Acesso em 30 de maio de 2013.

MCCARTER, W. J.; EZIRIM, H.; EMERSON, M. **Absorption of water and chlorite into concrete**. Magazine of Concrete Research. 1992.

MEDEIROS FILHO, S. **Fundamentos de medida elétrica**. Recife. Editora Universitária Universidade Federal de Pernambuco, 1979.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Editora Pini, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. **Concreto, estrutura, propriedades e materiais**, São Paulo, PINI, 1994.

NETO, C.Z.M. **Absorção capilar e resistividade elétrica de concretos compostos com cinza de casca de arroz de diferentes teores de carbono grafítico**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2011

RESPLENDINO, J. **Les bétons fibrés ultra performants (BFUP). Perspectives offertes vis-à-vis de la pérennité et la maintenance des ouvrages**. In: Colloques sur lês Ouvrages d'Art, Toulouse, 2006. Disponível em: <http://www.le-pont.com/Histo/programme/interventions/lcpc/J%20Resplendino-2.pdf>. Acesso em: junho de 2013.

REVISTA DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA. **Aplicação Estrutural de Concretos de Altíssimo Desempenho Reforçados com Fibras de Aço**. Rio de Janeiro, 2006.

RICHARD, P. **Reactive powder concrete: A new ultra-high-strength cementitious material**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 4, 1996, Paris, France, 1996. Anais...Paris. p. 1343-1349.

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

SANJUÁN, M. A.; MARTIALAY, R. M. **Variability of the concrete air permeability coefficient with time**. Building and Environment, 1997.

SANTOS, L. (2006). **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SILVA, V.B. **Avaliação da eficiência de pastilhas galvânicas na proteção de armaduras em estruturas de concreto sujeitas à ação de cloretos**. Dissertação (Mestrado) Universidade de Brasília. Brasília, 2005.

VANDERLEI, R.D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. São Carlos, 2004.

WALRAVEN, J. **The evolution of concrete**. Structural Concrete. Lausanne: Fédération Internationale du Béton, v. P1, n. 1, p. 3-12, 1999.

ZANNI, H.; CHEYREZY, M.; MARET, V.; PHILIPPOT, S.; NIETO, P. (1996). **Investigation of Hydration and Pozzolanic Reaction in Reactive Powder Concrete (RPC) Using ^{29}Si NMR**. Cement and Concrete Research, v. 26, n. 1, p. 93-100.