INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS NA DURABILIDADE DE CONCRETOS

G. R. AMBROSIO
Acadêmica de Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba/PR; Brasil
giiambrosio@hotmail.com

G. C. SILVEIRA
Acadêmico de Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba/PR; Brasil
getulio_cesar@live.com

W. MAZER
Professor Titular
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba/PR; Brasil
wmazer@utfpr.edu.br

A. MEDEIROS
Professor Adjunto I
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Curitiba/PR; Brasil
arthurmedeiros@utfpr.edu.br

RESUMO

O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, sendo importante a pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias de modo a proporcionar, ao material, propriedades mais adequadas para suprir as demandas das construções. Neste sentido, um dos fatores a ser considerado é a durabilidade do material frente a ação de agentes agressivos, sendo que o empacotamento de partículas é uma técnica a ser utlizada para melhorar as propriedades do concreto, tais como resistência à compressão e durabilidade. Assim sendo, esta pesquisa tem por objetivo avaliar a penetração de íons cloretos, sulfatos e dióxido de carbono em corpos de prova de concretos com estudo de empacotamento de agregados, comparando com um concreto convencional. Os resultados indicam um melhor desempenho do concreto em que foi efetuado o empacotamento dos agregados frente aos agentes agressivos avaliados, quando comparados com o concreto convencional, devido a menor porosidade e maior resistência à compressão.
Palavras-chave: Empacotamento de partículas. Durabilidade. Agressividade ambiental.

ABSTRACT

Concrete is the most widely used construction material in the world, and it is important to research and develop of new technologies in order to provide the material with the most appropriate properties to meet the demands of construction. In this sense, one of the factors to be considered is the durability of the material against the action of aggressive agents, and the packing of particles is a technique to be used to improve concrete properties, such as compressive strength and durability. Thus, this research aim to evaluate the penetration of chloride, sulphate and carbon dioxide ions into concrete specimens with a study of aggregate packing, comparing with a conventional concrete. The results indicated a better performance of the concrete in which the aggregates packing was carried out against the aggressive agents evaluated, when compared to the conventional concrete, due to the lower porosity and greater compressive strength.
Keywords: Particles packing. Durability. Environmental aggressiveness.

1. INTRODUÇÃO

A resistência à compressão do concreto sempre foi um dos principais fatores de controle de qualidade dos concretos, no entanto o estudo da durabilidade dos concretos vem ganhando espaço entre os pesquisadores (MAZER et al., 2006; GLASSER et al., 2007; LIU et al., 2009; SOTO et al., 2013; TANG et al., 2015). Entre os diversos ambientes que provocam a degradação do concreto destaca-se entre os pesquisadores aqueles que possuem sulfatos e cloretos (AL-AMOUDI, 2002; MAES e DE BELIE, 2014;

MAZER et al., 2014a; MAZER et al., 2014b; ROMANO et al., 2015). As mudanças químicas que ocorrem nos concretos devido ao ingresso de sulfatos, cloretos e a carbonatação foi estudada por Brown e Doerr (2000).

Para melhorar a durabilidade dos concretos frente a ação dos agentes agressivos é possível trabalhar com o empacotamento de partículas (GOPINATH et al., 2011; KWAN et al., 2014; LI e KWAN, 2014; LENZ et al., 2017). A execução de concretos utilizando os conceitos de empacotamento de partículas conduz a materiais com maiores resistências e dudrabilidade, entre estes concretos é possível citar o concreto de pós reativos CPR, que vem sendo muito estudado (ROUX et al., 1996; LIU et al., 2009; HENCHE et al., 2012; SIEG et al., 2012; WANG et al., 2014).

Neste contexto, o presente trabalho visa estudar o efeito do empacotamento de partículas, através da confecção de um concreto de pós reativos, no aumento da durabilidade frente a ação de sulfato e de cloreto, comparado com um concreto convencional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para constextualizar o estudo experimental deste trabalho, faz-se necessário abordar três tópicos em conjunto: concreto de pós reativos, ataque por cloretos e ataque por sulfatos.

2.1 Concretos pós reativos

A durabilidade do concreto vem atraindo a atenção de muitos pesquisadores nas últimas décadas, sendo o ataque de agentes externos o principal responsável pela degradação das estruturas (TANG et al., 2015). A resistência dos concretos frente aos agentes agressivos é regida pela natureza e severidade do ambiente, bem como pelo formato e constituição da mistura de concreto. Mecanismos de deterioração, tipicamente carbonatação do concreto e ataque de cloreto, são causados principalmente por impermeabilidade insuficiente do concreto e porosidade exagerada. A diminuição da relação água / cimento e a adição de partículas ultrafinas contribuem para melhorar a vida do concreto (ROUX et al., 1996)

Segundo Roux et al. (1996), melhorando as propriedades mecânicas do concreto, reduz-se a porosidade e assim aumenta-se a durabilidade do material. O CPR é uma família de concretos obtidos usando quatro princípios principais:

- Melhoria da homogeneidade do material através da remoção de todos os agregados graúdos;
- Aumento da compacidade por otimização granular e compactação;
- Possível melhora da microestrutura por tratamento térmico;
- Realização da ductilidade do material pela adição de fibras de aço.

Dessa forma, é considerado um concreto com maior resistência ao ataque de agentes externos e consequentemente mais durável.

2.2 Ataque por cloretos

Segundo Angst e Polder (2014), a entrada de cloretos no concreto pode levar à corrosão das armaduras e é uma das principais causas da deterioração das estruturas de concreto armado. Vários modelos foram desenvolvidos para prever a vida útil das estruturas de concreto (BAKKER, 1988; CEB, 1996; ANDRADE et al., 1997; DURACRETE, 1999; ANDRADE, 2001; MARTIN-PEREZ, 2001; ANOOP et al., 2002; ANDRADE, 2004; MAZER et al., 2017). Tais métodos geralmente consistem em um método teórico combinado com abordagem empírica. No entanto, a maioria destes métodos são muito difíceis de aplicar, porque muitas vezes muitos parâmetros são desconhecidos (ZHANG e BA, 2011).

A corrosão das armaduras causada pela ação dos íons cloretos é apresentada como uma das principais causas de degradação das estruturas de concreto armado (ARYA e XU, 1995; AL-KHAJA, 1997). Esta corrosão é resultante de um processo eletroquímico, acompanhado de reações anódicas e catódicas. Segundo Mehta e Monteiro (1982) as reações que ocorrem devido a ação dos íons cloretos são as apresentadas nas Equações 1 e 2:

- Reação anódica envolvendo íons Cl^-

$$Fe + 2Cl^- \rightarrow FeCl_2 \rightarrow Fe^{++} + 2Cl^- + 2e^- \quad (1)$$

- Reação catódica

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^- \quad (2)$$

Para Gentil (2003), os íons de Ferro formados na região anódica migram para a região catódica, enquanto que os íons Hidroxilas formados na região catódica migram em direção ao ânodo. O encontro destes íons se dá em uma região intermediária, formando o Hidróxido ferroso, mostrado na equação 3, o qual sofre uma transformação dando origem a outros compostos. Estes novos compostos dependem da oxigenação do meio; como nas estruturas de concreto armado o meio encontra-se oxigenado, formando-se o Hidróxido de ferro expansivo e o Óxido de ferro hidratado, como indicados nas equações 4 e 5.

- Formação do Hidróxido de ferro II

$$Fe^{++} + 2(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_2 \quad (3)$$

- Formação do Hidróxido de ferro III expansivo

$$2Fe(OH)_2 + H_20 + 1/2O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 \quad (4)$$

- Formação do Óxido de ferro hidratado

$$2Fe(OH)_3 \overset{-2H_2O}{\rightarrow} Fe_2O_3 \bullet H_2O \quad (5)$$

A equação 1 apresenta a reação química que ocorre devido à presença de íons cloretos em contato com as armaduras do concreto armado.

Os íons de cloreto são o primeiro ciclo comum de controle sobre o reforço no concreto. A importância dos íons de cloreto na corrosão levou ao conceito de um valor de limiar no cloreto, podendo ser definido como o teor de íons cloreto necessário para destruir a camada passivadora da armadura e, portanto, iniciar o processo de corrosão (ZHANG e BA, 2011).

2.2 Ataque por sulfatos

As recentes modificações na tecnologia de fabricação de cimento e o uso extensivo de aditivos minerais introduziram mudanças na composição química e mineralógica dos cimentos atuais. Essas mudanças podem alterar significativamente a durabilidade do concreto, particularmente o ataque de sulfato (AL-AMOUDI, 2002).

Segundo Al-Amoudi (1998), há três modos de deterioração do concreto que geralmente estão associados ao ataque de sulfato:

1) Ocorre a redução progressiva da pasta para uma massa granular, deixando o agregado exposto e levando à perda de resistência. Este modo é atribuído principalmente à formação de gesso.
2) Normalmente é caracterizado por expansão e fissuração, ocorre quando as fases de aluminato hidratado reativo, apresentadas em quantidades suficientes, são atacadas por íons sulfato, formando assim hidrato tricalciosulfo-aluminato, também chamado de etringita ou sal de Candlot.
3) O terceiro modo de ataque de sulfato é o tipo de cebola, que é caracterizado por descamação ou bombardeamento da superfície em camadas sucessivas sob a forma de delaminação de "cebola", sendo esta pouco comum.

Estudos sobre estes tipos de ataque são normalmente realizados expondo amostras de pasta de cimento, argamassa ou concreto a principalmente soluções de sulfato de sódio, magnésio e cálcio. Devido à

solubilidade limitada do sulfato de cálcio em água a temperaturas normais (aproximadamente 1400 mg / l de SO). Sendo o seu mecanismo descrito nas Equações 6 a 12 (AL-AMOUDI, 1995).

$$CH + NS^* + 2H \rightarrow CS^*H_2 + NH \quad (6)$$

$$CH + MS^* + 2H \rightarrow CS^*H_2 + MH \quad (7)$$

$$C_2AH_{13} + 3CS^*H_2 + 14H \rightarrow C_6AS^*_3H_{32} + CH \quad (8)$$

$$C_4AS^*H_{12} + 2CS^*H_2 + 16H \rightarrow C_6AS^*_3H_{32} \quad (9)$$

$$C_3A + 3CS^*H_2 + 26H \rightarrow C_6AS^*_3H_{32} \quad (10)$$

$$C_xS_yH_z + xMS^* + (3x + 005y - z)\ H \rightarrow xCS^*H_2 + xMH + 0{,}5yS_2H \quad (11)$$

$$4MH + SH_n \rightarrow M_4SH_{8,5} + (n - 4.5)H \quad (12)$$

Onde: C = CaO; N = Na_20; M = MgO; S* = SO_3; S = SiO_2; H = H_2O

Segundo Pinheiro-Alves et al. (2007), por muito tempo se considerou a formação de gipsita e etringita como a única forma de ataque por sulfatos. A estrutura da etringita e da taumasita são muito parecidas, e muitas vezes são até confundidas.

De acordo com Coutinho (2001), para que haja formação de taumasita há necessidade de íons sulfatos e carbonatos, silicatos cálcicos hidratados ou não, e umidade. Temperaturas baixas parecem ser mais favoráveis à formação de taumasita.

O ataque de sulfato com formação de taumasita se difere dos ataques citados anteriormente, com formação de gipsita e etringita, pois não são os aluminatos cálcicos que são atacados, mas os silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), que é o principal agente ligante do cimento Portland, ou seja, responsável pela coesão do concreto endurecido, incluindo dos resistentes a sulfatos e contribui de forma direta na resistência do concreto (COUTINHO, 2001).

Quando o C-S-H é substituído por taumasita, há redução das propriedades ligantes no concreto endurecido, com perda de resistência e transformação numa pasta sem coesão (CRAMMOND; HALLIWELL, 1997).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização dos materiais utilizados

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado na pesquisa foi o CP V – ARI, obedecendo às especificações da NBR 5732:1991. Nas Tabela 1 e 2 são apresentadas as análises químicas e físicas, respectivamente, feitas pelo fabricante.

Tabela 1 - Propriedades Químicas do Cimento utilizado (Fonte: Cimentos Itambé (2016))

PROPRIEDADES QUÍMICAS DO CIMENTO				
Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO
%	%	%	%	%
4,26	18,93	2,72	60,73	4,11
SO_3	P. Fogo	CaO L.	R. Ins.	Eq. Alc.
%	%	%	%	%
2,99	3,30	0,68	0,77	0,71

Tabela 2 - Propriedades Físicas do Cimento utilizado (Fonte: Cimentos Itambé (2016))

PROPRIEDADES FÍSICAS DO CIMENTO					
Exp. Quente		Cons. Normal	Blaine	# 200	# 325
Mm		%	cm²/g	%	%
0,23		30,0	4.342	0,04	0,43
Tempo de Pega (h:min)		Resistência à Compressão (MPa)			
Início	Fim	1 dia	3 dias	7 dias	28 dias
03:30	04:11	22,6	38,7	44,5	53,0

3.1.2 Agregados

O agregado miúdo utilizado foi uma areia natural proveniente de cavas do Rio Iguaçu, na região metropolitana de Curitiba. Já para concreto convencional também foi utilizado agregado graúdo classificado como brita n° 01, de origem granítica. Nas Figuras 1 e 2 são apresentadas as curvas granulométricas dos agregados utilizados para a produção do concreto convencional.

Figura 1 - Análise granulométrica do CPR.

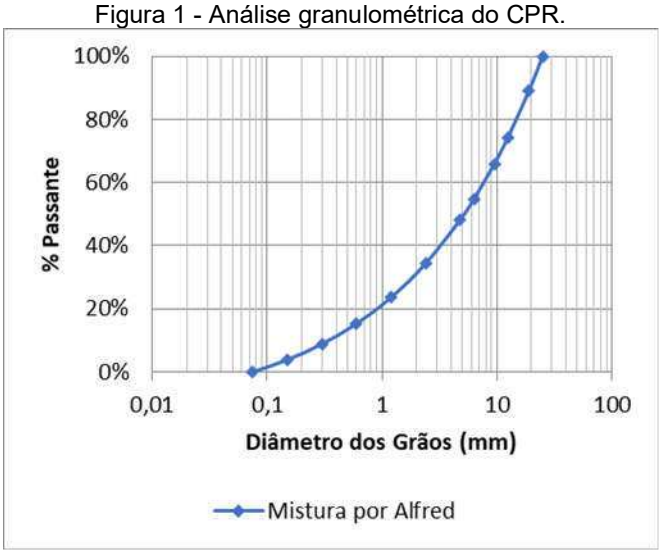
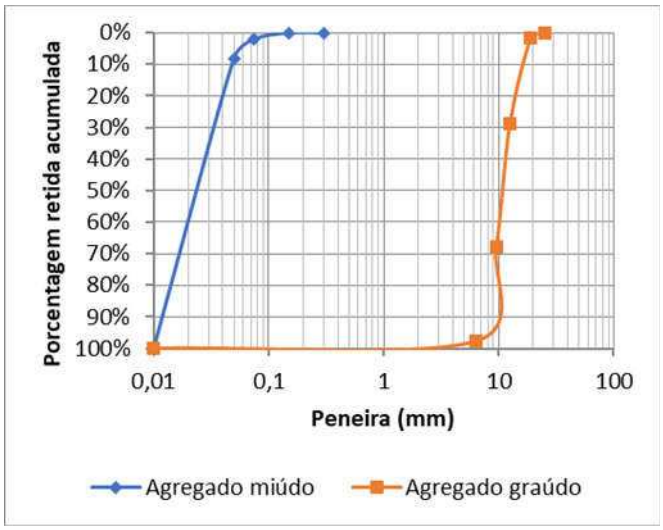


Figura 2 - Análise granulométrica - Concreto Convencional.



3.1.3 Adições

SÍLICA ATIVA

Para esse trabalho utilizou-se sílica ativa nacional, com coloração cinza. Encontram-se nas Tabela 3 e Tabela 4 as características química e física fornecidas pelo fabricante.

Tabela 3 - Caracterização Química da Sílica Ativa
(Fonte: Camargo Corrêa Metais, 2013)

PROPRIEDADES QUÍMICAS DA SÍLICA ATIVA	
Superfície específica (m²/kg)	20.000
Massa Específica (g/cm³)	2,20
Umidade (%)	1,20
Formato da partícula	Esférico
Diâmetro médio	0,20

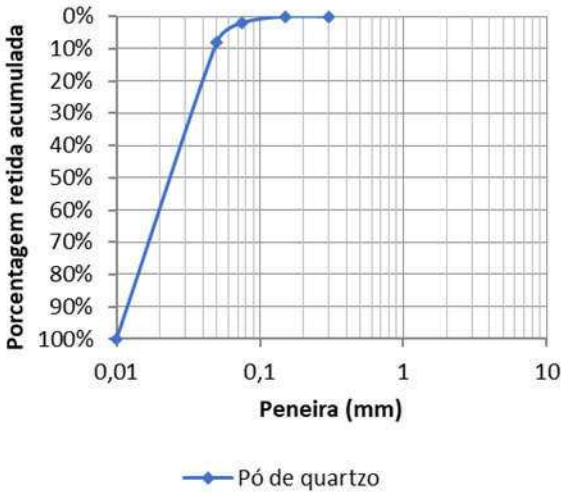
Tabela 4 - Caracterização Física da Sílica Ativa
(Fonte: Camargo Corrêa Metais, 2013)

PROPRIEDADES FÍSICAS DA SILICA ATIVA	
Teor de SiO_2	min 85,0%
Equivalente Alcalino em NaO_2	máx 0,50%

PÓ DE QUARTZO

Na Tabela 5, apresenta-se a análise química do pó de quartzo fornecida pelo fabricante e, na Figura 3, é apresentada a curva granulométrica do material.

Figura 3 - Análise granulométrica - Pó de Quartzo.



(Fonte:Mineração Jundu)

Tabela 5 - Caracterização Química do Pó de Quartzo
(Fonte: Vanderlei (2004))

PROPRIEDADES QUÍMICAS DO PÓ DE QUARTZO	
Umidade (%)	0,020
Perda ao fogo (%)	0,130
Teor de SiO_2 (%)	> 99,000
Teor de Fe_2O_3 (%)	< 0,050
Teor de Al_2O_3 (%)	< 0,300
Teor de TiO_2 (%)	< 0,035

ADITIVO

O aditivo adotado foi o aditivo sintético de polímeros policarboxilatos classificado como superplastificante com as características, apresentadas na Tabela 6, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 6 - Características do aditivo superplastificantes (Fonte: MC – Bauchemie)

CARACTERÍSTICAS DO SUPERPLASTIFICANTE		
Característica	Unidade	Valor
Densidade	g/cm³	1,06
Dosagem recomendada	%	0,2 a 5,0
Teor de cloretos	%	< 0,1
Teor de álcalis	%	< 1,0

3.1.4 Proporcionamento dos Materiais

O concreto convencional foi dosado conforme o método ABCP/ACI para 20 MPa e para o concreto de pós reativos foi utilizado o modelo de empacotamento de partículas de Alfred para estabelecer a porcentagem dos materiais secos. Na Tabela 7 é apresentado o proporcionamento (traço) utilizado.

Tabela 7 – Traços utilizados

	Cimento	Areia	Brita	Água	Sílica	Quartzo	Aditivo

CONV	1	1,75	2,63	0,52	-	-	-
CPR	1	2,11	-	0,22	10%	15%	3%

Os corpos de prova do concreto foram desmoldados após 24 horas e mantidos em tanque de imersão até a data dos ensaios.

3.2 Ensaios realizados

3.2.1 Absorção de água por imersão e Índice de Vazios

Foi realizado o ensaio de absorção por imersão e índice de vazios conforme as recomendações da NBR 9778:1987. Para este estudo a temperatura utilizada para a secagem dos corpos de prova na estufa foi de 60ºC até a constância de massa.

3.2.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em uma prensa EMIC com capacidade de 200 toneladas de acordo com a NBR 7215:1996. Antes do ensaio os corpos de prova foram retificados e saturados.

3.2.3 Resistência à penetração de sulfatos

Foi realizado o ensaio para determinar o teor de sulfatos em corpos de provas de concreto que ficaram parcialmente submersos, por 2 anos, em uma solução de sulfato de magnésio com uma concentração de 5%. O ensaio foi realizado de acordo com a ASTM C114:04.

3.2.4 Resistência á penetração de cloretos

Foi realizado o ensaio para determinar o teor de cloretos em corpos de provas de concreto que ficaram parcialmente submersos, por 2 anos, em uma solução de cloreto de sódio com uma concentração de 5%. O ensaio foi realizado de acordo com o mátodo de Volhard, descrito por Andrade (1992).

3.2.5 Análise de porosimetria

Para análise da porosidade das amostras foi utilizado o método de Porosimetria por Injeção de Mercúrio. A técnica se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não-molhante em relação à maior parte das substâncias, por isso não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele. O equipamento utilizado foi o Poremaster 33, da Quantachrome.
O ensaio foi realizado em uma amostra de 1,30 g de cada tipo de concreto. O procedimento consiste em colocar a amostra num recipiente e aplicar uma pressão baixa ao líquido, que permite o preenchimento da maioria dos poros grandes. Ao se aumentar a pressão, os poros pequenos também são preenchidos.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Absorção por imersão e índice de vazios

A absorção do CPR foi de 0,84% e seu índice de vazios foi de 1,80%. Já para o concreto convencional, os valores obtidos foram de 2,96% para a absoção e de 6,84% para o índice de vazios. Estes resultado indicam que tanto a absorção quanto o índice de vazios do CPR se apresentou cerca de 3,5 vezes menor que no concreto convencional. Isto ocorre devido a menor relação água/cimento e ao estudo de empacotamento de partículas efetuado no CPR.

4.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão axial foi realizado na idade de 28 dias, sendo que o concreto convencional apresentou uma resistência média de 22,5 MPa e o CPR apresentou 173,9 MPa de resistência, tendo sido ensaiados 6 corpos de prova para cada tipo de concreto. A resistência à compressão do CPR foi cerca de 7,7 vezes maior que a obtida no concreto convencional, sendo que somente com a redução da relação água/cimento não seria possível obter o aumento da resistência à compressão observado, sendo que o empacotamneto de partículas também contribuiu para esse resultado.

4.3 Resistência à penetração de sulfatos

O teor de sulfatos foi determinado, para ambos os concretos, em relação à massa de concreto da amostra, tendo sido obtido para a amostra de CPR o valor de 0,85%, como média de 4 amostras, já o concreto convencional apresentou média de 3,29%, em 4 amostras. Considerando o consumo de cimento utilizado em cada concreto, 700kg/m^3 para o CPR e 410kg/m^3 para o concreto convencional e que o cimento utilizado apresenta 2,99% de SO_3, conforme indicado na Tabela 1, foi possível verificar que no CPR ocorreu a penetração de 0,03% de sulfatos, enquanto que no concreto convencional a penetração de sulfatos foi de 2,76%. A menor absorção e índice de vazios do CPR associado à maior resistência à compressão contribuem para um melhor comportamento deste material frente à ação de agentes agressivos, aumentando a sua durabilidade.

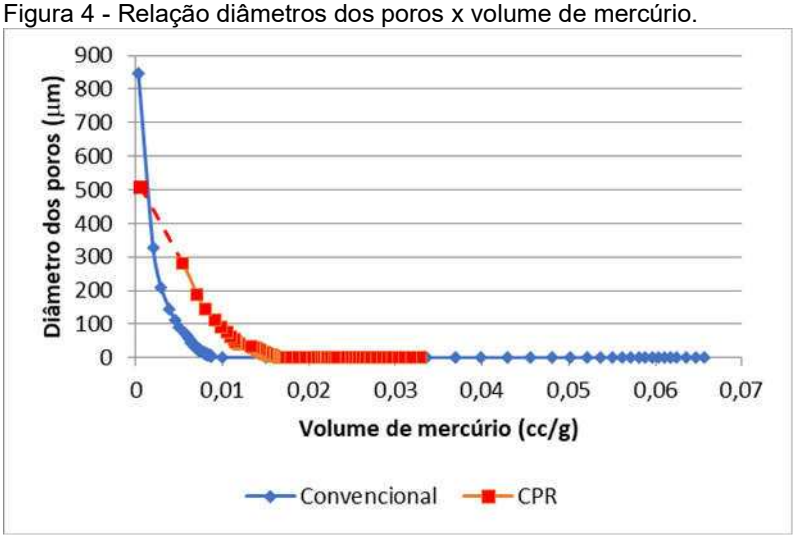
4.4 Resistência à penetração de cloretos

A concentração de cloretos determinada para os concretos de pós reativos e convencional foi de 0,3% e 1,6%, respectivamente, em relação à massa de concreto, tendo sido ensaiadas 4 amostras de cada concreto. A menor absorção e índice de vazios do CPR associado à maior resistência à compressão contribuem para um melhor comportamento deste material frente à ação de agentes agressivos, aumentando consequentemente a sua durabilidade.

4.5 Porosimetria

Considerando que o ataque por sulfatos pode aumentar a porosidade do concreto, foi realizado este ensaio em amostras de referência de concreto convencional e de CPR, tendo obtido, respectivamente, as porosidades de 5,71% e 3,22%. Após dois anos de ataque dos corpos de prova por sulfato de magnésio, as porosidades obtidas foram de 6,56% e 3,29% para o concreto convencional e o CPR, respectivamente. Na Figura 4 é apresentada a relação entre o diâmetro dos poros e o volume de mercúrio intrudido na amostra.

Figura 4 - Relação diâmetros dos poros x volume de mercúrio.



Nos resultados deste ensaio é possível observar que os poros do CPR possuem diâmetro menor que o concreto convencional e a menor porosidade também se comprova pela menor intrusão de mercúrio nos poros. No caso dos diâmetros dos poros, o CPR apresentou como maior diâmetro o valor 507 μm, enquanto que no concreto convencional o valor observados foi de 847 μm.

5 CONIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de absorção menor de 1% e o índice de vazios pouco acima de 1% do CPR indicam um concreto possivelmente mais durável que o concreto convencional, fato este confirmado nos ensaios de determinação do teor de sulfatos e de cloretos existentes nas amostras, cerca de 100 vezes menor para sulfatos e de 5,5 vezes menor para cloretos, quando comparados ao concreto convencional.
A existência de um baixo índice de vazios conduz a um aumento na resistência à compressão do concreto, fato também observado nos ensaios, sendo que a diminuição de 3,5 vezes no índice de vazios conduziu a um aumento de 7,7 vezes na resistência à compressão.
O estudo do empacotamento de partículas considerando, além dos agregados, as adições minerais de sílica ativa e de pó de quartzo, assim como uma baixa relação água/cimento apresentou grande influência nos resultados dos ensaios, conduzindo a um concreto com maior durabilidade.

6 REFERÊNCIAS

AL-KHAJA, W. A., Influence of temperature, cement type and level of concrete consolidation on chloride ingress in conventional and high-strength concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 11, nº. 1, pp. 9-13, 1997.

AL-AMOUDI, O. S. B. Performance of 15 reinforced concrete mixtures in magnesium-sodium sulphate environments. **Construction and Building Materials**, vol. 9., no. 3, pp. 149-158, 1995.

AL-AMOUDI, O. S. B. Sulfate Attack and Reinforcement Corrosion in Plain and Blended Cements Exposed to Sulfate Environments. **Building and Environment**, vol. 33, no.1, pp. 53-61, 1998.

AL-AMOUDI, O. S. B. Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments. **Cement & Concrete Composites**, vol. 24, pp 305–316, 2002.

ANDRADE, M. C., DIEZ, J. M., CRUZ ALONSO, M., Mathematical modeling of a concrete surface “Skin Effect” on diffusion in chloride contaminated media. **Advanced Cemente Based Materials**, vol. 6, pp. 39-44, 1997.

ANDRADE, J.J.O., **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos**. Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, C., Calculation of initiation and propagation periods of service life of reinforcements by using the electrical resistivity. In: International Symposium on advances in concrete through science and engineering, Evason. **Procedings…..** Evason: Northwestern University/RILEM, 2004.

ANOOP, M.B.; RAO, K.B.; RAO, T.V.S.R.A., Application of fuzzy sets for estimating service life of reinforced concrete structural members in corrosive environments. **Engineering Structures**, 2002.

ANGST, U. M.; POLDER, R. Spatial variability of chloride in concrete within homogeneously exposed areas. **Cement and Concrete Research**, vol. 56, pp. 40–51, 2014.

ARYA, C., XU, Y., Effect of cement type on chloride binding and corrosion of steel in concrete. **Cement and Concrete Research**, vol. 25, no. 4, pp.893-902, 1995.

BAKKER, R. F. M., Initiation period. In: SCHIESSL, P., **Corrosion of steel in concrete**. London, Chapman & Hall, 1988.

BROWN, P.W.; DOERR, A., Chemical changes in concrete due to the ingress of aggressive species. **Cement and Concrete Research**, vol. 30, pp. 411-418, 2000.

COUTINHO, Joana de S. **Materiais de Construção 1; Durabilidade – Ataque por Sulfatos**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP. Porto, Portugal, 2001.

CRAMMOND, N. J.; HALLIWELL, M. A.; **Assessment of the Conditions required for the Thaumasite form of sulphate attack.** Simpósio MRS - Mechanisms of Chemical Degradation of Cement-based Systems; Editores: K.L.Scrivener & J.F.Young, E&Fn SPON, 1997.

CEB, **Durable concrete structures**. Lausane, 1996.

DURACRETE, **Models for environmental actions on concrete structures**. The European Union, 1999.

GLASSER, F. P.; MARCHAND, J.; SAMSON, E., Durability of concrete — Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. **Cement and Concrete Research**, vol. 38, pp. 226-246, 2008.

GOPINATH, S.; RAMACHANDRA MURTHY, A.; RAMYA, D.; IYER, N. R., OPTIMISED MIX DESIGN FOR NORMAL STRENGTH AND HIGH PERFORMANCE CONCRETE USING PARTICLE PACKING METHOD. **ARCHIVES OF CIVIL ENGINEERING**, LVII, 4, 2011

HENCHE, D.; ALESSI, E.; MAZER, W.; MEDEIROS, M. H. F., CONCRETO DE PÓS-REATIVOS: PARÂMETROS DE DOSAGEM E PROPRIEDADES. In: **54º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2012.

KWAN, A. K. H.; NG, P. L.; HUEN, K. Y., Effects of fines content on packing density of fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 61, pp. 270–277, 2014.

LENZ, L. A.; LONDERO, C.; KLEIN, N. S.; MAZER, W.; PEREIRA, D. A., AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO EMPACOTAMENTO DOS AGREGADOS NA DURABILIDADE DE CONCRETOS ATRAVÉS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS: RESISTIVIDADE ELÉTRICA E PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ULTRASSOM. **Revista Técnico-científica do CREA-PR**, 2º SPPC 2017

LI, L. G.; KWAN, A. K. W., Packing density of concrete mix under dry and wet conditions. **Powder Technology**, vol. 253, pp. 514–521, 2014.

LIU, J.; SONG, S.; WANG, L., Durability and Micro-structure of Reactive Powder Concrete. **Journal of Wuhan University of Technolotgy-Mater. Sci**. *Ed.* June, vol. 24, pp. 506-509, 2009.

MARTIN-PÉREZ, B., PANTAZOPOULOU, S.J., THOMAS, M.D.A., Numerical solution of mass transport equations in concrete structures. **Computers and Structures**, vol. 79, pp. 1251-1264, 2001.

MAES, M.; DE BELIE, N., Resistance of concrete and mortar against combined attack of chloride and sodium sulphate. **Cement & Concrete Composites**, vol. 53, pp. 59–72, 2014.

MAZER, W.; LENCIONI, J. W.; LIMA, M. G., PENETRACÃO DE CLORETOS – DISCUSSÃO SOBRE OS MODELOS EXISTENTES ENVOLVENDO PARÂMETROS AMBIENTAIS. In: **48º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2006.

MAZER, W. ; MACIOSKI, G. ; SOTO, N. T. A. ; BAETTKER, E. C. . Determinação do teor de íons sufato em estruturas de concreto. In: **XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014**, Florianópolis. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014a.

MAZER, W. ; MACIOSKI, G. ; SOTO, N. T. A. . Penetração De Íons Cloreto Em Estruturas De Concreto. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014**, Florianópolis. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014b.

MAZER, W.; LIMA, M. G.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A., Fuzzy logic for estimating chloride diffusion in concrete. **Structures and Buildings**, 2017.

PINHEIRO-ALVES, Maria T.; GOMÀ, Ferran; JALALI, Said. **Um Cimento mais Sustentável Frente a um Ataque Severo por Sulfatos.** 3º Congresso Nacional da Construção. Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal, 2007.

ROMANO, P.; BRITO, P. S. D.; RODRIGUES, L., Monitoring of the degradation of concrete structures in environments containing chloride ions. **Construction and Building Materials**, vol. 47, pp. 827–832, 2013.

ROUX, N.; ANDRADE, C; SANJUAN, M. A. Experimental study of durability of reactive powder concretes. **J. Mater. Civ. Eng.**, vol. 8(1), pp. 1-6, 1996.

SIEG, A. P. A.; NAKANISHI, E. Y.; MOHAMAD, G.; MAZER, W., Concreto de Pós Reativos – Estudo das Adições Minerais: Cinza de Casca de Arroz, Metacaulim e Sílica Ativa. In: **54º Congresso Brasileiro do Concreto**, 2012.

SOTO, N. T. A. ; MACIOSKI, G. ; MAZER, W. ; CASALI, J. M. . Avaliação de propriedades do Concreto de Pós Reativos: um estudo de durabilidade. **In: Congresso Brasileiro do Concreto, 2013**, Gramado. Anais do 55 Congresso Brasileiro do Concreto, 2013.

TANG, S.W.; YAO, Y.; ANDRADE, C; LI, Z.J. Recent durability studies on concrete structure. **Cement and Concrete Research**, vol. 78, pp. 143-154, 2015.

WANG, W.; LIU, J.; AGOSTINI, F.; DAVY, C. A.; SKOCZYAS, F.; CORVEZ, D., Durability of an Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) under progressive aging. **Cement and Concrete Research**, vol. 55, pp. 1–13, 2014.

ZHANG, W. BA, H. **Accelerated Life Test of Concrete in Chloride Environment**. J. Mater. Civ. Eng., 2011, 23(3): 330-334.