

ESTUDO SOBRE A INFLUÊNCIA DE DIFERENTES FATORES NA FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA E RESISTÊNCIA DO CONCRETO DE PÓS REATIVOS (CPR)

Josué Rodrigues da Silva Junior ¹; Heloísa Cristina Fernandes Cordon ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O concreto de pós reativos (CPR) é um compósito relativamente novo no campo da ciência dos materiais, sendo este extremamente complexo devido a sua formulação se basear em diversos processos químicos e engenharia microestrutural. Por conta disso, seu processo de produção em larga escala apresenta diversas dificuldades, como elevado calor de hidratação devido ao alto consumo de cimento, e conseqüentemente torna-se um compósito de elevado custo e antiecológico. Contudo, suas características únicas o tornam a solução para diversos problemas complexos. Em virtude de torná-lo economicamente e ecologicamente viável o presente estudo analisou a influência da substituição do cimento por pó de calcário na formação da microestrutura do CPR, buscando-se a formulação de um concreto com maior viabilidade técnica e prática sem que as propriedades do CPR original fossem perdidas. Com substituições de 10, 20, 30, 50 e 75% foi possível perceber que apesar do consumo de cimento ser reduzido não houve nenhum decréscimo de resistência e os efeitos do calor de hidratação foram minimizados. Em amostras com substituição de 75%, que correspondem a um consumo de $194,29 \text{ kg.m}^{-3}$, a resistência a compressão foi de 245 MPa e o índice de ligantes de $1,62 \text{ kg.m}^{-3}.\text{MPa}^{-1}$.*

Introdução

Atualmente tem-se desenvolvido cada vez mais pesquisas para entendimento da microestrutura e propriedades das matrizes de cimento, principalmente para elaboração de concretos de ultra alto desempenho (concretos especiais), visto que suas aplicações são mais complexas e abrangentes no campo da engenharia. Além disso, devido às suas características, é possível que o Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) seja exposto a qualquer tipo de ambiente, até mesmo os agressivos, sem danos severos em grandes períodos de tempo, ao contrário do Concreto Convencional (CC) que cada vez mais vem sofrendo degradação prematura de suas estruturas, mesmo em ambientes com menor potencial de danos devido a intempéries e outros fatores (VANDERLEI, 2004).

Com o avanço dos estudos e da tecnologia do concreto, diversas linhas de pesquisa foram desenvolvidas e ramificadas, criando as diversas gamas de compósitos especiais de matrizes cimentícias que temos hoje. Dentre elas destaca-se o concreto de pós reativos (CPR), que é um concreto da classe CUAD desenvolvido com base na engenharia microestrutural. Este concreto possui como característica resistência à compressão na faixa de 200 a 800 MPa, energia de fratura entre 1200 e 40000 J.m^2 e resistência à tração de 30 a 150 MPa, sendo estas resistências muito superiores a outros concretos (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

O CPR foi desenvolvido pela primeira vez numa pesquisa realizada no laboratório de Bouygues, na França, finalizada em 1998. Seus idealizadores foram P. Richard e M. Cheyrezy (1995) que durante os seus estudos elaboraram conceitos e parâmetros que embasaram a criação de um concreto com altíssimas propriedades. Dentre os fatores que levaram à formulação dos princípios básicos do CPR, destacam-se:

- Eliminação de agregados graúdos na composição do concreto, limitando o tamanho máximo de partícula em $600 \mu\text{m}$, aumentando assim a homogeneidade do CPR.
- Densificação da microestrutura através da otimização do empacotamento de partículas da mistura e aplicação de pressão de configuração durante e após a moldagem.

- Melhora da microestrutura aplicando-se tratamento térmico, para formação de compostos cristalinos da família dos silicatos de cálcio hidratado (C-S-H).
- Aumento da ductilidade através da incorporação de microfibras de aço na matriz do concreto.
- Limitação da relação a/c para menos de 0,22.

Outro aspecto importante referente ao CPR está ligado à sua composição. Esse concreto apresenta um alto consumo de cimento chegando a atingir valores de 700 a 1000 kg.m³, sendo este seu principal constituinte. A areia de quartzo ingressa como um enchimento ultra resistente na mistura. Já a microssílica e o pó de quartzo entram como pós reativos, que ajudam a densificar a microestrutura devido a reações secundárias. Com isso, pode-se dizer que o CPR é uma mistura de cimento com pós ultrafinos e reativos que constituem grande parte da mistura (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Contudo, o CPR é um material limitado na questão de moldagem e tempo de produção e execução devido aos seus constituintes ultrafinos e reativos que diminuem muito o tempo de pega. Além disso, outros fatores como uma dosagem mais controlada e precisa dificultam o processo de produção do concreto *in loco* (VANDERLEI, 2004). Portanto, grande parte da sua aplicação se destina a peças pré-moldadas, onde o local permite um maior controle das variáveis envolvidas no processo de produção do CPR. Além disso, os materiais que compõem o CPR são de custo elevado, o que também acarreta numa redução no campo de atuação do compósito em virtude da viabilidade econômica.

Entretanto, apesar do CPR já ser utilizado em peças pré-moldadas para estruturas especiais ainda não há um modelo de dosagem universal para esse tipo de concreto e isso fez com que suas pesquisas se intensificassem para que pudessem-se criar critérios mais teóricos. Essa dificuldade de se criar um método de dosagem é devido a grande quantidade de variáveis existentes no processo de confecção do CPR, ou seja, para que se consiga um concreto de ultra alto desempenho é imprescindível entender como cada parâmetro age na microestrutura do mesmo, assim como cada variável interfere na outra (HIREMATH; YARAGAL, 2017a).

Dentro dessas variáveis atualmente uma forte linha de pesquisa vem sendo debatida e estudada no mundo inteiro, em relação a esses concretos especiais, que são os Materiais Substituintes do Cimento (MSC). Esses materiais podem ser de diversas composições, sendo elas pozolânicas, fillers ou cimentantes, tendo em vista melhorar as propriedades do concreto e reduzir seu custo sem prejudicar as características dos concretos de controle (originais) (YAZICI et al., 2010).

Afim de tornar a produção do CPR viável o presente estudo visa investigar como os MSC agem na formação da microestrutura tanto química quanto fisicamente de modo a reduzir problemas relacionados a moldagem dos corpos de prova, como calor de hidratação e tempo de moldagem, e conseqüentemente redução do custo do compósito final.

Para isso, realizou-se previamente estudos sobre a microestrutura do CPR e formação do C-S-H a partir dos materiais constituintes da amostra, afim de compreender as reações primárias (clínquer) e secundárias (sílica e pó de quartzo com portlandite) que promovem a densificação da rede, incremento de resistência e queda das relações Ca/Si (RICHARD; CHEYREZY, 1995). As reações secundárias tem papel fundamental na composição do CPR devido a modificações do C-S-H quando submetidos a tratamento térmico, isso faz com que as estruturas amorfas tornem-se cristalinas gerando compostos mais densos e resistentes (tobermorite e xonotlite) (YANG et al., 2018); (HIREMATH; YARAGAL, 2017b).

A substituição de cimento por um material "equivalente" e com grande quantidade de cálcio em sua composição é necessário em virtude de gerar as reações secundárias com sílica e pó de quartzo. Para isso, optou-se por utilizar pó de calcário devido a elevada quantidade de cálcio em sua composição (65%) e seu alto módulo de finura, o que favorece as mudanças na reatividade do material. Entretanto, para que isso ocorra, a ativação química deve gerar uma reação entre esses dois materiais (sílica e calcário) para a formação do C-S-H. Além disso, o

custo do material é menor em relação ao do cimento e sua extração é feita diretamente de jazidas o que torna menos impactante os danos ao meio ambiente.

Objetivo

O objetivo do trabalho visa analisar como o material MSC pó de calcário age na formação da microestrutura do CPR de modo a desenvolver um concreto economicamente e ecologicamente viável.

Material e Métodos

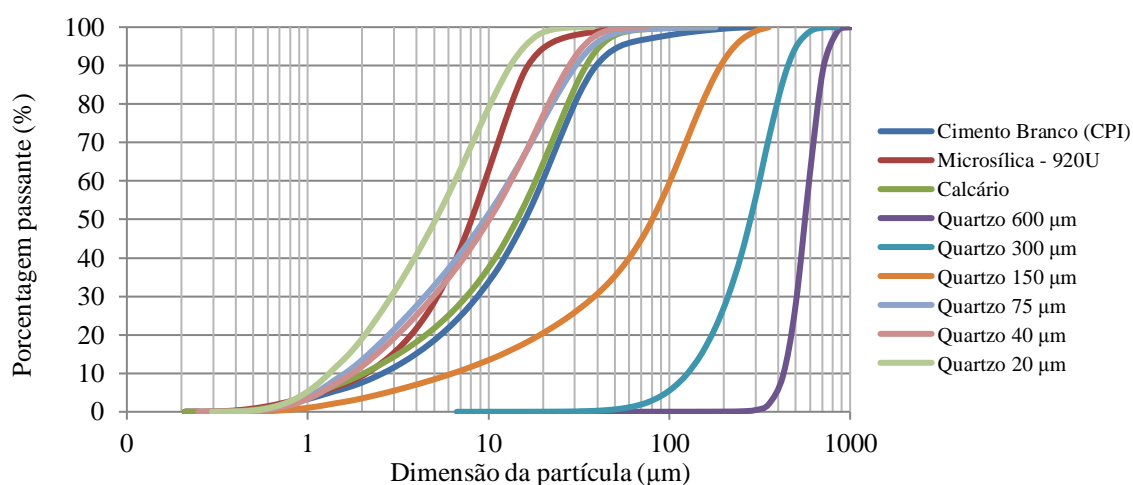
Características dos materiais

Os materiais utilizados na produção dos concretos foram: cimento branco tipo CPI da marca Tolteca, microssílica 920U da empresa Elkem, quartzos de seis granulometrias diferentes (600 µm, 300 µm, 150 µm, 75 µm, 40 µm e 20 µm), aditivo redutor de água MasterGlenium51 da empresa BASF e pó de calcário da empresa Brasil Minas.

Todos os materiais pulverulentos e granulares utilizados (cimento, microssílica, quartzo e calcário) foram caracterizados quanto à sua massa específica em picnômetro de gás Hélio e distribuição granulométrica em um granulômetro a laser *HELOS/BR*, equipado com uma unidade de dispersão úmida automática Sucell.

Os resultados referentes às distribuições granulométricas estão apresentados a seguir (Figura 1) e os resultados referentes à massa específica dos materiais são 2,60 g.cm⁻³ para os quartzos, 3,00 g.cm⁻³ para o cimento, 2,11 g.cm⁻³ para a microssílica e 2,66 g.cm⁻³ para o pó de calcário.

Figura 1 - Curvas granulométricas dos materiais utilizados no estudo



Elaboração do traço

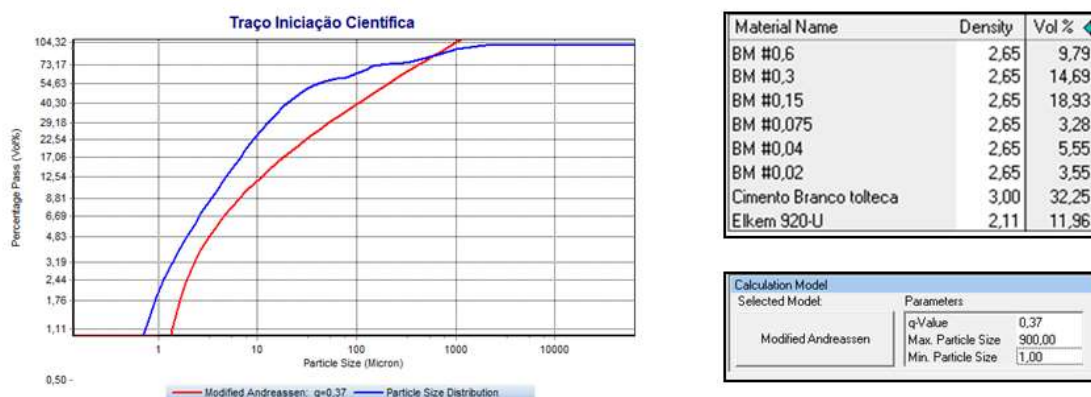
A formulação do traço do concreto baseou-se no modelo de empacotamento de partículas, no qual utilizou-se o software EMMA da empresa ELKEM de modo a gerar as composições em porcentagens de cada material constituinte da mistura, tornando-a uma estrutura ultradensa.

Dentre as várias teorias estudadas sobre o empacotamento de partículas encontradas na literatura, optou-se por utilizar como base o modelo de Andreassen Modificado, sendo este o que apresentou os melhores resultados devido a sua construção teórica mais refinada, sendo a porcentagem de cada material definida pela Equação 1.

$$CPFT(\%) = 100x \left(\frac{D_p^q - D_s^q}{D_l^q - D_s^q} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Dentro do modelo adotou-se o fator de distribuição "q" igual a 0,37, já que valores menores ou iguais a este favorecem o empacotamento máximo para distribuições infinitas como considerado no método, enquanto que para valores maiores verifica-se sempre uma porosidade residual (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). A Figura 2 abaixo apresenta a curva resultante para o concreto com todos os materiais, bem como os parâmetros e porcentagens definidas para a amostra de controle.

Figura 2 - Desenvolvimento do traço de concreto a partir do software EMMA



Para os demais traços com materiais MSC apenas substituiu-se a quantidade em massa de cimento por calcário nas porcentagens de 10, 20, 30, 50 e 75%, mantendo-se os demais materiais fixos e alterando-se o consumo de água e aditivo para a manutenção do espalhamento pré-determinado de 100 mm no funil de argamassa. Isso não provocou grandes alterações no empacotamento do concreto devido à distribuição granulométrica dos materiais serem próximas, sendo o efeito fíler preponderante. A Tabela 1 ilustra todos os traços produzidos durante o estudo e os respectivos consumos (cimento e ligantes) em cada uma das classes de concreto.

Tabela 1- Traços unitários desenvolvidos no estudo, com seus respectivos consumos

Traço Unitário	Materiais							Consumo (kg.m ³)	
	Cimento	Quartzo	Pó de Quartzo	Sílica	Água	Aditivo	Calcário	Consumo Cimento	Consumo Ligantes
Controle	1	1,188	0,25	0,26	0,22	0,030	0,00	799,5	1007,3
SCM 10	0,9	1,188	0,25	0,26	0,22	0,030	0,10	701,9	905,4
SCM 20	0,8	1,188	0,25	0,26	0,22	0,030	0,20	621,8	826,9
SCM 30	0,7	1,188	0,25	0,26	0,22	0,027	0,30	544,5	745,9
SCM 50	0,5	1,188	0,25	0,26	0,24	0,020	0,50	380,3	578,1
SCM 75	0,25	1,188	0,25	0,26	0,21	0,011	0,75	194,3	396,3

Método de Mistura

No CPR foi observado que a ordem de mistura tem grande influência sobre as condições de moldagem, afetando tanto o tempo de pega quanto o calor de hidratação (AHMAD; ZUBAIR; MASLEHUDDIN, 2015); (HIREMATH; YARAGAL, 2017a). Em virtude disso, buscou-se na literatura um método de mistura que levasse em consideração tais fatores, para que o concreto pudesse ser produzido em larga escala sem que tais aspectos prejudicassem sua confecção. Portanto, foi utilizado um modelo próprio para a confecção do CPR denominado "Mistura de 4 etapas" (HIREMATH; YARAGAL, 2017a). Essa mistura constitui:

- i. Misturar os materiais ligantes (cimento e sílica) em rotação baixa por 1 minuto para homogeneização da mistura.
- ii. Depois é adicionado 80% da água e 100% do aditivo superplastificante misturando-se por 3 minutos. Com o teor alto de água nessa etapa e também com um maior tempo de mistura há maior produção de íons Ca^{2+} devido as reações iniciais do clínquer, o que posteriormente ajudará o fluxo da mistura, pois esses íons adsorvem mais facilmente as cadeias do aditivo superplastificante.
- iii. Adicionar os demais constituintes, no caso o quartzo e o calcário, misturando-os em velocidade alta por mais 3 minutos até atingir homogeneidade no concreto.
- iv. Acrescentar os 20% restantes de água (transição do estado pendular, capilar e sólido/líquido), misturando-se o concreto por mais 4 minutos em velocidade alta.

Deve se levar em consideração que o método apresenta alguns fatores limitantes tais como tempo de mistura que não pode exceder 15 minutos e as rotações que não podem ser superiores a 125 rpm, pois há a possibilidade de incorporação de ar na mistura que consequentemente prejudicaria as características mecânicas e microestruturais do CPR. Para a confecção dos concretos utilizou-se uma argamassadeira com rotação em 2 eixos, sendo a capacidade máxima da mesma de 1,5 litros úteis, dentro dos parâmetros citados.

Cura

A cura térmica é um dos fatores que mais acarreta mudanças drásticas nas propriedades do CPR, tanto em questões de resistência quanto em microestrutura. Sua maior característica é o fato da temperatura agir de modo a transformar C-S-H amorfo em cristalino dentro do CPR. Além disso, também há a aceleração das reações de formação do C-S-H e aumento da quantidade de produtos hidratados. Portanto, é imprescindível compreender o que leva à formação desses produtos de modo a obter a maximização desse fator sem que se forme substâncias indesejáveis como Jennite¹ e C_2SH . (HIREMATH; YARAGAL, 2017b)

Em estudos anteriores o efeito da cura térmica já foi testada no CPR e foi observado que os melhores resultados obtidos eram encontrados combinando-se tipos de temperaturas diferentes durante a confecção do CPR (HIREMATH; YARAGAL, 2017b). Essas duas etapas da cura combinada são separadas da seguinte maneira: (i) na primeira fase da cura combinada (Efeito Global): formação dos grãos de C-S-H amorfo e densificação da microestrutura com a aceleração dos processos de hidratação primária e secundária dentro da rede do CPR sem alteração do tipo de cristal; (ii) na segunda fase da cura combinada (Efeito Local): tem a função de desenvolver a formação do C-S-H de modo a transformá-lo de amorfo para cristalino, sendo que o tipo de arranjo do cristal é variável e dependente da temperatura / tempo de cura (RICHARD; CHEYREZY, 1995).

Portanto como cada etapa da cura combinada se destina a um fim, para que se possa entender de modo mais amplo esses dois fatores serão feitas abordagens explicando-se os conceitos que as embasam.

Na primeira fase de cura utilizou-se o banho maria a 90 °C por 3 dias, pois pelo fato do meio que promove o aquecimento ser a água o mesmo propaga o calor de maneira mais uniforme e contínua sobre a amostra que está submersa. Além disso, devido a essa faixa de temperatura (90 °C) o efeito da pozolanicidade do pó de quartzo é ativada, gerando apenas C-S-H amorfo e promovendo a densificação da microestrutura. Ainda com relação à 1ª fase da cura combinada esta pode influenciar também no tamanho dos grãos C-S-H, sendo que este crescimento está diretamente ligado com a quantidade de energia / calor no começo da

¹ É uma estrutura C-S-H formada a partir de reações secundárias em concretos que foram submetidos a tratamento térmico em uma temperatura superior a 150 °C por longos períodos de tempo ou autoclavados nessa mesma faixa de temperatura. Essa estrutura é uma variação da tobermorite, porém é originada da má formação dos cristais que reagem rapidamente formando poros em sua microestrutura e promovendo uma maior relação Ca/Si, fazendo com que suas propriedades mecânicas sejam reduzidas.

formação da microestrutura, ou seja, quanto maior a temperatura no processo inicial maior será o tamanho do grão e conseqüentemente menor a força desenvolvida pelo CPR, devido à criação de fases fracas e mal desenvolvidas de C-S-H amorfo. Por conta disso, não se pode utilizar temperaturas tão superiores a essa e deve-se atentar à taxa de aquecimento, sendo o recomendado pela literatura uma progressão de 20 °C.h⁻¹ (HIREMATH; YARAGAL, 2017b).

Com relação à segunda fase da cura combinada tem-se a formação de C-S-H cristalino em temperaturas superiores a 150 °C, que favorece o aumento das propriedades mecânicas de compressão do CPR. Contudo, essas modificações trazem consigo um fenômeno denominado "rearranjo de grãos", que por sua vez causa uma densificação no C-S-H aumentando a relação Si/Ca e conseqüentemente tornando-o mais forte, mas para isso o grão precisa consumir sílica do meio, o que acarreta na modificação da microestrutura que passa a ser mais porosa. Além disso, uma série de cuidados devem ser tomados quando se trabalha em cura a altas temperaturas, ou seja, problemas relacionados à propagação de microfissuras se tornam mais propensos. Outro aspecto que se deve ter atenção é a taxa de aquecimento que não pode ser muito rápida, pois causa um desenvolvimento muito acelerado do cristal, que conseqüentemente apresenta uma formação mais fraca, por isso recomenda-se uma taxa de aquecimento na ordem de 50 °C.h⁻¹ que será adotada no trabalho quando o concreto for elevado a uma temperatura superior a 100°C em estufa. Afim de se ter a estrutura mais resistente no concreto optou-se por utilizar a faixa de temperatura de 250 °C por 3 dias visando a formação da xonotlite² (HELMI et al., 2016). Além disso, para estudar o efeito do tratamento inicial também foram elaboradas amostras que foram submetidos apenas ao tratamento em banho maria por um período de 3 dias.

Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos de compressão simples e tração por compressão diametral das amostras, com 14 dias de idade, foram realizados segundo a ASTM C1856 / C1856M - 17, que é a norma referente ao Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD / UHPC). Para os testes de resistência à compressão foram moldados 6 corpos de prova cilíndricos de $\Phi = 50$ mm e $h = 100$ mm para cada uma das categorias de traço, já para os testes de compressão diametral foram ensaiadas 4 amostras, de mesmas dimensões.

Resultados e Discussão

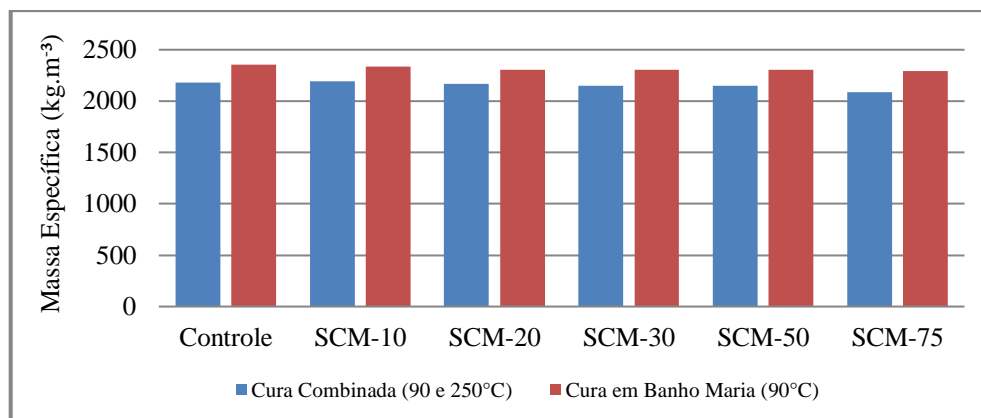
As amostras desenvolvidas nesse estudo apresentaram uma massa específica elevada devido à otimização do empacotamento de partículas, sendo a mais elevada a de controle como observado no Gráfico 1 (2355 kg.m⁻³). É válido ressaltar que as amostras que foram curadas em banho maria a 90 °C não apresentaram grandes mudanças quanto à sua densidade antes desse processo, ou seja, à temperatura ambiente. Isso se deve ao fato de que nessa condição a microestrutura não origina tipos de C-S-H diferentes dos encontrados em temperatura ambiente com períodos mais longos de tempo.

As amostras que foram submetidas à cura combinada apresentaram valores de massa específica 6% menores do que em relação ao primeiro tratamento (Gráfico 1). Isso se deve ao fato de que nesse ponto há a formação de xonotlite, uma estrutura cristalina que densifica sua microestrutura a partir do expurgamento de água quimicamente ligada e consome os materiais silicosos presentes na microestrutura do concreto. Esse expurgamento da água promove a densificação da microestrutura localmente, ou seja, no cristal, mas há um efeito colateral que é a origem de micro e nano poros em uma escala global. É válido constatar que as amostras

² Estrutura C-S-H do tipo cristalina que se origina através da aplicação de tratamento térmico em concretos numa faixa de temperatura entre 250 e 300 °C. Esse cristal possui como características alta resistência à compressão, dureza elevada e fragilidade. Apresenta valores de Ca/Si inferiores a 1, ou seja, possui uma ligação química extremamente forte.

com substituições altas de 50 e 75% de calcário tem perda da massa específica devido à retirada de água no processo, mas também grande parte dessa água está quimicamente livre dentro do concreto, ou seja, se retira muito menos água química para a formação da xonotlite do que em outras amostras com maior consumo de cimento. As massas específicas com relação a cada compósito podem ser observadas no gráfico abaixo.

Gráfico 1 - Massas específicas dos concretos desenvolvidos com suas respectivas curas



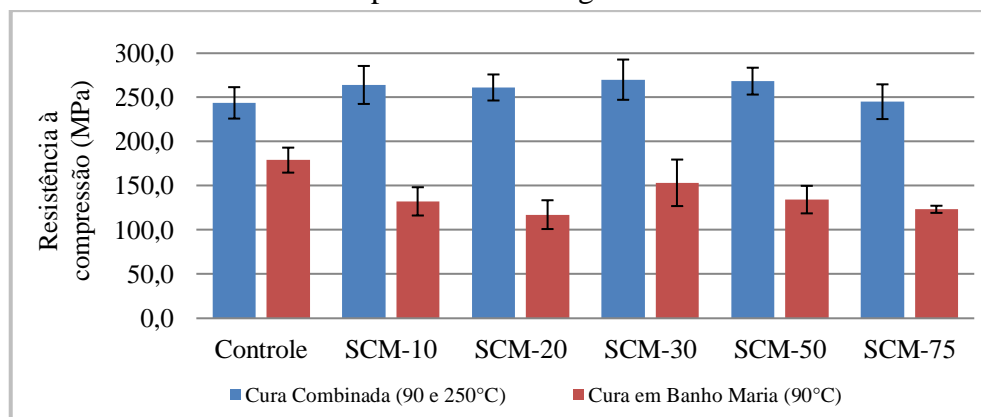
Ainda com relação à formação dos cristais, nota-se que a amostra de controle submetida à cura combinada atingiu uma resistência de 241,42 MPa (Gráfico 2), caracterizando uma ótima formação dos cristais (RICHARD; CHEYREZY, 1995) visto que essa resistência só pode ser atingida quando o tratamento é feito corretamente.

Com relação à resistência à compressão observa-se no Gráfico 2 que as amostras que possuem materiais MSC e foram submetidas à cura combinada não sofreram nenhum decréscimo de resistência, sendo até visível ganhos da mesma. Essa manutenção de resistência mesmo após a diminuição do consumo de cimento se deve ao efeito filler do calcário, que possui um módulo de finura superior ao cimento, e conseqüentemente favorece a densificação da microestrutura fisicamente. Entretanto, essa conservação das características do CPR de controle deve-se principalmente às reações químicas que ocorrem dentro da microestrutura devido ao material MSC conter grande quantidade de cálcio na sua composição. À medida que se diminui o consumo de cimento, há menor quantidade de portlandites dentro do concreto, o que acarreta numa diminuição do hidróxido de cálcio para reagir com os materiais silicosos e reativos (sílica e pó de quartzo) o que gera uma menor quantidade de produtos secundários e conseqüentemente um concreto com características mecânicas inferiores. Entretanto como o material constituinte é um calcário, o mesmo possui em sua composição cerca de 65% de cálcio, que ao ser moído finamente torna-se reativo e assume uma reação direta com a sílica quando tem-se um meio que já possui o hidróxido de cálcio (reação do clínquer) e quando há o tratamento térmico em uma temperatura elevada. Tal processo favorece a reatividade dos materiais constituintes da mistura. Com base em estudos (RICHARD; CHEYREZY, 1995); (MORIN et al., 2002); (HELMÍ et al., 2016) observou-se que as reações secundárias de materiais silicosos com a portlandite no CPR tem caráter fundamental na formação de estruturas bem desenvolvidas e resistentes, e por conta disso optou-se por utilizar um material MSC de grande composição de cálcio afim de substituir os subprodutos da reação do clínquer de modo a formar C-S-H secundário. Além disso, observou-se na composição dos traços que para a manutenção do espalhamento fixado em 100 mm foi utilizado uma maior relação a/c e aditivo à medida que se aumentava o teor de substituição, isso se deve à finura do calcário e à diminuição dos materiais aglutinantes da mistura. Contudo, mesmo essa relação do fator água/cimento sendo aumentada em cerca de 220% para amostras de 50% de substituição não houve decréscimos na resistência do concreto, isso se deve aos princípios básicos que tangem a formação da microestrutura do CPR. Nesse concreto as configurações no estado fresco / endurecido podem ser definidas por

estágios como descrito por (HIREMATH; YARAGAL, 2017a) em que o mesmo caracteriza essas etapas visando a compreensão de suas propriedades. Nas quatro fases temos a formação do estado pendular, funicular, capilar e sólido/líquido. No estágio pendular há a formação das interações entre os grãos de cimento com o mínimo de água possível e consequentemente a configuração dos clusters que são as regiões entre partículas de cimento ligados quimicamente por pontes. Posteriormente, à medida que se acrescenta água na mistura o cimento passa para o estado funicular onde os grãos são hidratados, mas só há água suficiente para hidratação. Ao acrescentar novamente água, a mesma preenche os vazios entre as partículas de cimento formando o estado capilar, sendo essa configuração ocasionada em regiões dispersas na matriz. Por fim adicionando-se mais água à mistura tem-se a formação do último estágio denominado estado sólido/líquido que une as regiões geradas a partir do estado capilar formando uma estrutura viscosa e densa. A partir desses conceitos foi analisado que as regiões que compõem os cluster aumentam de maneira proporcional a quantidade de água na mistura, fazendo com que as interações entre os grãos de cimento se tornem mais fracas à medida que se adiciona maior quantidade de água no concreto. Entretanto esse efeito não foi observado no estudo, isso se deve ao fato de que entre os clusters há grandes quantidades de produtos reativos (calcário, sílica e pó de quartzo) que ocupam os espaços entre os grãos de cimento devido à menor dimensão de suas partículas, sendo que ao atuarem concomitantemente a temperatura e o efeito de reatividade nesses espaços "vazios" há a formação de C-S-H secundário que densifica a microestrutura de modo a evitar que o efeito adverso do maior espaçamento dos grãos de cimento seja prejudicial as propriedades do concreto, e além disso faz com que as relações Si/Ca aumentem de modo a gerar uma maior cadeia de reações favorecendo a manutenção e o ganho de resistência mesmo com altos valores de a/c.

Com relação à cura em banho maria a 90 °C foi observado que a resistência à compressão dos concretos submetidos a esse tratamento foi menor do que em relação à cura combinada (Gráfico 2 - Resistência à compressão das categorias de concretos desenvolvidas). Isso se deve ao fato de que nessa faixa de temperatura há a formação somente de C-S-H tipo amorfo (HIREMATH; YARAGAL, 2017b) que apenas densifica a microestrutura promovendo apenas o efeito de 1º ordem (global). Apesar disso, ainda há resultados satisfatórios visto que esse método é mais viável no ponto de vista prático na produção de concretos pré-moldados, no qual muitas empresas do ramo utilizam desses recursos na Europa. Outro ponto a se ressaltar é o fato de que a amostra de controle apresenta melhores desempenhos em relação às outras amostras devido à maior quantidade de ligantes e a menor atuação das reações secundárias nesse processo de cura (90°C) no desenvolvimento e formação da microestrutura, no qual o efeito do calcário pode não ser preponderantemente químico e estar mais atrelado a um efeito filer.

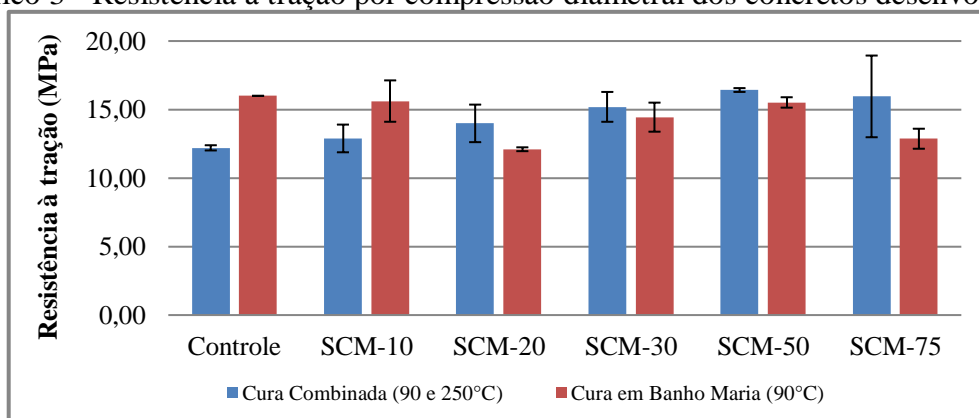
Gráfico 2 - Resistência à compressão das categorias de concretos desenvolvidas



Com relação à resistência à tração das amostras que foram submetidas à cura em banho maria a 90 °C notou-se que todos os concretos com substituição apresentaram queda de resistência em relação à amostra de controle (Gráfico 3), esse fato está relacionado com a

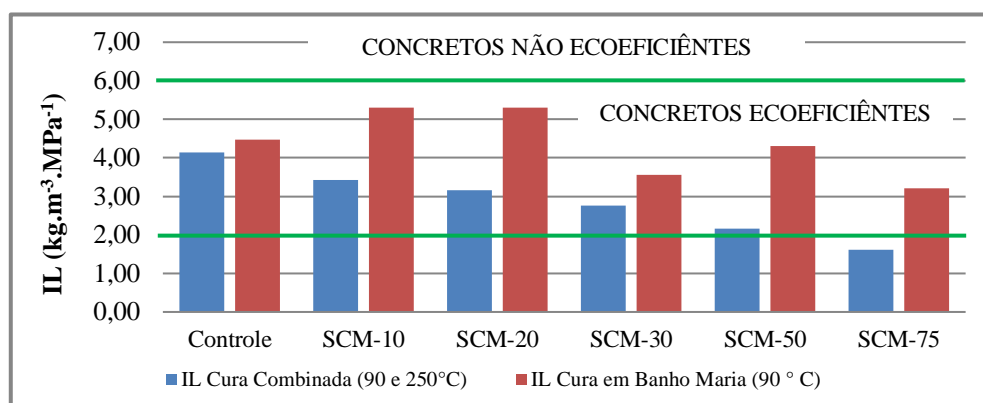
diminuição do teor de aglutinantes da mistura e com o tipo de efeito desempenhado pelo calcário nessa temperatura, que apenas consegue reagir pouco com os materiais silicosos de modo a formar C-S-H e prepondera-se o efeito fíler, apesar disso a resistência ainda apresenta valores positivos em relação ao CPR original. Ao analisar o outro tipo de cura, no caso a combinada, verifica-se que o processo é inverso, ou seja, à medida que a substituição aumenta a resistência à tração aumenta de maneira equivalente, pois como já foi citado na análise da resistência à compressão os mesmos efeitos com relação a microestrutura são observados nesse caso. Além disso, outro dado que pode ser acrescentado na análise refere-se à forma do cristal. Como já foi descrito, à medida que a temperatura aumenta para a formação de xonotlite há o expurgamento da água, alterando as características do cristal, fazendo com que ele encolha e se torne uma espécie de concha, que possui uma rigidez extremamente elevada e torna-se frágil (HIREMATH; YARAGAL, 2017b). Em estruturas formadas a partir da reação do clínquer esse efeito é mais intenso que em relação ao C-S-H secundário o que faz com que em temperaturas mais elevadas a amostra de controle sofresse uma perda de aproximadamente 24% na resistência à tração. Entretanto, todas as amostras com substituição com exceção da SCM10 apresentaram aumento da resistência à tração mesmo com a maior fragilidade do concreto devido à formação de xonotlite por estruturas secundárias. Isso se deve ao fato de nessas estruturas há a minimização dos efeitos relacionados ao encolhimento de rede, densificação e perda de água.

Gráfico 3 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos desenvolvidos



O índice de ligantes (IL) dos concretos confeccionados no estudo possuem valores extremamente baixos enquadrando-se nos padrões de ecoeficiência em ambos os tratamentos térmicos adotados (Gráfico 4). Isso ocorreu nas amostras de controle, SCM10, SCM20, SCM30 e SCM50 tanto em banho maria quanto na cura combinada, além da SCM75 em cura banho maria, pois os ILs encontram-se entre 2 e 6 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$. Além disso, na amostra SCM75 foi obtido valores de IL inferiores aos especificados, sendo de 1,62 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{MPa}^{-1}$, portanto esta classe de concreto pode ser enquadrada em uma categoria superior de ecoeficiência, sendo esta ainda não descrita na literatura.

Gráfico 4 - Índice de ligantes dos concretos desenvolvidos



Conclusão

Foi possível constatar que os fenômenos que ocorrem dentro da microestrutura são de caráter distinto em elevadas temperaturas. Portanto, observa-se que mesmo com consumos baixíssimos, cerca de 200 kg.m^{-3} , e teor de a/c elevados de cerca de 0,85 ainda foi possível produzir concretos de ultra alta resistência chegando a 243,1 MPa de resistência à compressão. Consequentemente, foi possível formular concretos com IL que se enquadram na categoria de Concreto Ecoeficiente, sendo que na amostra SCM75 houve uma redução drástica no IL superando os valores encontrados na literatura, sendo este de classe superior.

Observou-se também que os efeitos relacionados ao calor de hidratação foram minimizados bem como o tempo de moldagem levemente aumentado. Contudo, devido ao estudo utilizar um cimento extremamente fino a moldagem se limitou a um período mais curto de tempo, o que poderia ser prolongado utilizando-se um aditivo inibidor de hidratação que postergaria a pega e garantiria uma melhor moldagem, bem como uma melhor formação inicial dos cristais. Logo, a viabilidade prática em termos de produção devido a minimização de tais problemas e a redução do custo devido a diminuição do consumo de cimento torna o campo de atuação do compósito mais abrangente.

Além disso, o material SCM escolhido foi em virtude dos conceitos estudados previamente onde buscou-se em sua composição se ter um caráter reativo e fino, com grande quantidade de cálcio de modo a suprir a falta de cimento em grandes quantidades. Portanto, para outras substituições com tais características de módulo de finura e composição química, espera-se obter resultados similares, quando se aplica tratamento térmico nos concretos.

Referências Bibliográficas

- AHMAD, S.; ZUBAIR, A.; MASLEHUDDIN, M. Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 99, p. 73–81, 2015.
- CASTRO, A. L. DE; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, v. 55, n. 333, p. 18–32, 2009.
- HELMI, M. et al. Effects of high-pressure/temperature curing on reactive powder concrete microstructure formation. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 554–562, 2016.
- HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of Reactive Powder Concrete. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 271–288, 2017a.
- HIREMATH, P. N.; YARAGAL, S. C. Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 72–87, 2017b.

- MORIN, V. et al. Evolution of the capillary network in a reactive powder concrete during hydration process. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 12, p. 1907–1914, 2002.
- RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, 1995.
- VANDERLEI, R. D. Análise Experimental Do Concreto De Pós Reativos : Dosagem E. p. 196, 2004.
- YANG, H. et al. Effect of limestone powder in manufactured sand on the hydration products and microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 188, p. 1045–1049, 2018.
- YAZICI, H. et al. Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 8, p. 639–648, 2010.