

Dosagem de concretos leves de alto desempenho com poliestireno expandido e escória de alto forno

Dosage of slight concrete of high performance with expanded polystyrene and blast furnace slag



Camila de Oliveira Santos

Discente do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário de Patos de Minas.
e-mail: camilaos@unipam.edu.br

Sheilla Pereira Vieira

Mestre em Estruturas e Construção Civil pela Universidade de Brasília. Professora do UNIPAM.
e-mail: sheilapv@unipam.edu.br

Douglas Ribeiro Oliveira

Especialização em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Cândido Mendes. Professor do UNIPAM. e-mail: douglasro@unipam.edu.br

RESUMO: Em busca do aperfeiçoamento técnico para elevação da resistência e da diminuição da densidade específica, visou-se o estudo de concretos leves de alto desempenho obtendo as eficiências mais altas possíveis. Utilizou-se neste trabalho o método de empacotamento de Andreasen (1930) para definição da matriz cimentícia, obtendo concreto de pós-reativos (CPR) com até 136,9 MPa. Posteriormente foram utilizados como agregados leves a escória leve de alto forno e as pérolas de poliestireno expandido (EPS), proporcionando densidades de 1200 a 2200 kg/m³. Foram avaliadas as propriedades físico-mecânicas das misturas como resistência à tração na flexão, resistência à compressão, módulo elástico dinâmico por velocidade ultrassônica e densidade aparente no estado endurecido. Foram obtidos valores de resistência à compressão aos 7 dias para concretos leves com EPS de 56,0 MPa e com as escórias de alto forno de 78,6 MPa. Através desses resultados, foi possível caracterizar alguns traços como concretos leves de alto desempenho e outros como concretos leves estruturais.

PALAVRAS-CHAVE: Concreto de pós-reativos. Concreto leve de alto desempenho. Agregado leve. Poliestireno expandido. Escória leve de alto forno.

ABSTRACT: Aiming technical improvement to increase the concrete compressive strength and the decrease of specific gravity, the study of lightweight high performance concrete was performed to obtain the highest possible efficiency factor. In this work was used the Andreasen packing method (1930) to define the cementitious matrix, obtaining post-reactive concrete (CPR) with up to 136.9 MPa. Were evaluated mixtures of physical-mechanical

properties, such as splitting tensile strength, compressive strength, dynamic modulus of elasticity by ultrasonic pulses, and specific gravity of hardened concrete. Later, lightweight blast furnace slag and expanded polystyrene (EPS) beads were used as lightweight aggregates, as to achieve specific gravity of 2200 to 1200 kg / m³. Thereafter, compressive strength values were obtained at 7 days of 56,0 MPa and 78,6 MPa for EPS and blast furnace slag lightweight concretes, respectively. The concretes could be characterized as lightweight high performance concrete or at least as lightweight structural concrete.

KEYWORDS: Post-reactive Concrete. High performance lightweight concrete. Lightweight aggregate. Expanded polystyrene. Blast furnace slag.

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo e tem sido objeto de inúmeros estudos visando o aperfeiçoamento de técnicas, potencialização de características específicas, e mais recentemente, a diminuição dos impactos ambientais gerados. O concreto tradicional é composto por cimento Portland, água e agregados. Os agregados normalmente utilizados são areias e pedras britadas, comumente com elevada densidade específica.

O desenvolvimento de concretos especiais teve início no século XX, relativamente pouco tempo após o patenteamento do cimento Portland. Foram surgindo e sendo estudados cada vez mais materiais, naturais ou sintéticos, incorporados no concreto, com vários propósitos e distintas características atribuídas ao produto final.

Os aditivos químicos, denominados plastificantes, permitiram a diminuição da quantidade de água consumida e incrementos consideráveis de resistência. As adições, por outro lado, caracterizadas por serem normalmente materiais finos e de alta reatividade, têm garantido otimização das resistências através de seus efeitos químico e físico, bem como a pozolanicidade e o empacotamento, respectivamente. Combinados, aditivos e adições permitem que os concretos atinjam resistências até mesmo superiores às de rochas naturais, e sejam denominados concretos de altas resistências.

Por sua vez, o estudo e a substituição dos agregados convencionais por agregados de diversas origens resultaram, durante a Primeira Guerra Mundial, na obtenção e início dos estudos de concretos leves. Esse tipo de concreto carrega consigo agregados mais leves que os tradicionais, e apresenta massa específica inferior a 2000 kg/m³, ante a massa específica de 2400 kg/m³ do concreto comum, composto por areia e brita. A resistência, entretanto, é menor que a do concreto comum devido à menor resistência e à porosidade dos agregados leves.

O concreto leve tem suas aplicações voltadas para lajes de pontes, edificações pré-fabricadas e plataformas marítimas. Por ter menor densidade, consequentemente há vantagens no transporte, na execução da obra, além da redução de cus-

tos, principalmente com as estruturas de fundações, que transmitirão ao solo menores cargas comparativamente às estruturas convencionais (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

Os estudos mais avançados visam a dosagem de concretos de altas resistências com as mais baixas densidades possíveis. Essa relação entre a resistência à compressão e a massa específica é um índice do desempenho dos concretos leves denominado fator de eficiência. Spitzner (1994 *apud* ROSSIGNOLO, 2003) define concretos leves de alta resistência aqueles com fatores acima de 25 MPa.dm³/kg. Zhang e Gjorv (1991), por sua vez, conseguiram fator de 54,9 MPa.dm³/kg com resistência à compressão aos 28 dias de 102,4 MPa e massa específica aparente de 1865 kg/m³, utilizando como agregado leve uma argila expandida de diâmetro máximo 8 mm.

O presente estudo tem o propósito de desenvolver concretos leves de altas resistências e baixas densidades específicas testando dois diferentes tipos de agregados leves incorporados em matrizes cimentícias de alto desempenho. Tais matrizes são conhecidas como concretos de pós-reativos (CPR) e podem atingir resistências à compressão da ordem de 200 a 300 MPa. Como agregados leves serão utilizados escória leve de alto forno e poliestireno expandido (EPS).

2. OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é produzir concretos leves de alta resistência com fatores de eficiência acima de 25 MPa.dm³/kg, através da incorporação de dois tipos de agregados leves em matriz cimentícia de CPR, dosada com base em empacotamento granulométrico de partículas. Para obtenção das matrizes cimentícias é objetivo do estudo:

- Caracterizar fisicamente os aglomerantes, adições e agregados miúdos, através de ensaios de massa específica, massa unitária e composição granulométrica.
- Efetuar dosagem do concreto de pós-reativos através do método de empacotamento granulométrico de Andreassen e testar as resistências obtidas.
- Dosar concretos leves através da incorporação de diferentes consumos de cada agregado de modo a obter concretos com densidades de 1200 kg/m³, 1400 kg/m³, 1600 kg/m³, 1800 kg/m³, 2000 kg/m³ e 2200 kg/m³, de acordo com a característica de cada agregado.
- Mensurar no estado fresco, as características de trabalhabilidade dos concretos através de ensaios de densidade e consistência pela mesa de abatimento.
- Determinar as propriedades físico-mecânicas dos concretos no estado endurecido, através de ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico através da velocidade de pulso ultrassônico, densidade aparente e massa específica.

3. JUSTIFICATIVA

O concreto leve vem ganhando grande importância graças ao uso difundido do concreto estrutural e à possibilidade de obter estruturas com mesma resistência incorporando características tais como a redução do peso próprio, redução na propagação do calor, menor dilatação térmica, menor índice de fissuração devido a gradientes térmicos, grande durabilidade, economia de formas de madeira, e redução de custos com transporte e montagem no caso de peças pré-moldadas. Apesar das vantagens, segundo Angelin (2014, p. 7), “o concreto leve possui tecnologia pouco difundida em nível nacional e surge no cenário atual como um material inovador e alternativo ao concreto convencional”.

A associação de CPR com agregados leves é ainda menos explorada, se forem considerados o surgimento do CPR em meados da década de 90, através dos trabalhos de Richard e Cheyrezy (1995), e o foco dado à obtenção de altíssimas resistências associando agregados pétreos de pequena dimensão, fibras metálicas e diferentes processos de cura do concreto.

O presente estudo, por sua vez, visa avaliar os efeitos da incorporação de agregados leves nessas matrizes de alto desempenho, e diverge de estudos como os de Angelin (2014), Bouvard *et. al* (2007), Kiliç *et. al* (2003) e Rossignolo e Agnesini (2002), os quais avaliam concretos produzidos com um só tipo de agregado leve, respectivamente argila expandida, EPS, escória leve de alto forno e argila expandida com polímeros. A utilização de vários agregados permitirá uma otimização do desempenho mecânico e a definição do concreto mais resistente em função de sua densidade.

4. REVISÃO DA LITERATURA

Abaixo segue exposta a revisão teórica acerca dos temas norteadores deste trabalho.

4.1. CONCRETO

O concreto é constituído de cimento Portland, brita, areia e água, e possui um consumo mundial de cerca de 19 bilhões de toneladas por ano. Com as vantagens de possuir baixo custo, fácil disponibilidade de materiais e baixa necessidade de manutenção, o concreto é um material utilizado e pesquisado mundialmente (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Com o intuito de obter concretos cada vez mais resistentes, duráveis e sustentáveis, o concreto convencional vem sendo modificado pelo estudo dos agregados e aditivos introduzidos nele. Desses estudos surgiram diversas classificações de concretos, dentre eles o concreto projetado, o concreto de pós-reativos, o concreto autoadensável, o concreto rolado, o concreto pesado, o concreto leve, dentre outros.

4.1.1. Concreto leve

Segundo Rossignolo e Agnesini (2011), o concreto leve tem como características principais a massa específica seca com valores reduzidos, abaixo de 2000 kg/m³, podendo ser divididos em isolantes, de resistência moderada e estruturais, e a capacidade de resistência à compressão acima de 17,2 MPa. Os concretos leves podem ser produzidos pela substituição dos agregados convencionais por agregados leves, pela incorporação de ar, ou pela ausência de finos.

Na fabricação dos concretos leves com agregados leves, quatro fatores adicionais precisam ser levados em consideração, que são o projeto de uma massa específica particular; a variação da massa específica; e a absorção de água e as características dos agregados leves. Ressalta-se que o consumo de cimento deve ser superior a 300 kg/m³, para tornar possível a trabalhabilidade do concreto e assegurar a proteção e ancoragem da armadura. Também são utilizados aditivos e adições minerais para alteração de algumas propriedades dos concretos leves.

Outro aspecto importante dos concretos leves é que a consistência diminui com a substituição dos agregados. Enquanto o abatimento de um concreto convencional é em torno de 10 a 12 mm, o de um leve é em torno de 8 mm, isso porque os agregados leves absorvem uma quantidade maior de água que depois é passada ao concreto no momento da secagem. Para aplicação na construção, deve-se ainda ter o cuidado de não promover adensamento exagerado do concreto, o que pode refletir no deslocamento das partículas leves para a superfície do concreto pela sua densidade reduzida (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

4.1.2. Concreto de pós-reativos

O concreto de pós-reativos (CPR) é um material ultrarresistente composto de cimento Portland, areia e pó de quartzo, sílica ativa, superplastificante, fibras de aço e relação água/cimento entre 0,15 e 0,20. Suas principais propriedades são a massa mais homogênea e o aumento da compacidade do concreto, otimizando assim as propriedades mecânicas e a ductilidade, quando incorporadas fibras. Dessa forma, quanto menor a estrutura do CPR, ou seja, quanto mais compacta ela estiver, menor é a porosidade e permeabilidade do concreto (BIZ, 2001).

O CPR é formado por partículas de agregados, adições e aglomerantes com diâmetro inferior a 2 mm, que ajudam a obter um melhor empacotamento do concreto. Além disso, fatores como o aumento da densidade, as aplicações de pressão no concreto, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, o tratamento térmico e a adição de fibras metálicas no CPR, estão relacionadas diretamente com o aumento da resistência a compressão e com a ductilidade (VANDERLEI; GIONGO, 2006).

4.2. AGREGADOS LEVES

Existem diversos tipos de agregados leves utilizados na produção de con-

cretos, dentre eles tem-se a argila expandida, o poliestireno expandido (EPS), a escória leve de alto forno e as microesferas de vidro ocas. Segundo Mehta e Monteiro (2014), para serem considerados agregados leves, a sua massa unitária deve ser inferior a 1120 kg/m^3 , isso porque eles são constituídos de microestrutura celular ou são altamente porosos.

A classificação dos agregados leves pode ser natural ou artificial. Quando o agregado é extraído diretamente em jazidas, ele é classificado em natural, suas aplicações não são voltadas para concretos estruturais, visto que as propriedades e os locais de extração variam. Um exemplo desse tipo de agregado é a pedra pomes e as escórias vulcânicas. Já os artificiais são obtidos através de produções industriais, que é através da sinterização ou forno rotativo, como, por exemplo, as argilas e as escórias expandidas (ROSSIGNOLO; AGNESINI, 2011).

4.2.1. Escória de alto forno

A escória de alto forno é obtida a partir da fabricação de ferro gusa. Mais precisamente, a escória é a impureza que fica separada do metal após sua fusão. A classificação das escórias é procedente do tipo de resfriamento a que ela é submetida. No caso da escória de alto forno utilizada como agregado no Brasil são somente aquelas geradas de alguma falha nas indústrias siderúrgicas, onde encontram-se na sua forma bruta ou cristalizada (NETO, 2011).

4.2.2. Poliestireno Expandido

De acordo com Tessari (2006, p. 17) o poliestireno expandido (EPS)

é uma espuma rígida obtida por meio da expansão da resina poliestireno PS durante sua polimerização. Esta expansão é realizada injetando-se um agente químico na fase de reação da polimerização. O agente de expansão comumente utilizado é o pentano. As principais aplicações do EPS são no uso de embalagens de proteção e no isolamento térmico.

5. METODOLOGIA

Abaixo seguem expostas as metodologias idealizadas para caracterização e produção dos concretos leves, todas embasadas em normativas brasileiras e nos equipamentos disponíveis no Laboratório de Análises Tecnológicas de Materiais de Construção.

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados nesta pesquisa para mistura dos concretos foram cimento CPV ARI, sílica ativa, fíler calcário, areia fina, areia média, água tratada da

rede de distribuição municipal e aditivo hiperplastificante Tecflow 8000.

Os ensaios de massa específica seguiram as diretrizes da ABNT NBR NM 23:2001 para os materiais finos como cimento, sílica ativa e fíler; e o método do picnômetro descrito pela DNER ME 084:1995 para os agregados miúdos e agregados leves. Para determinação da massa unitária foi utilizado o método proposto pela ABNT NBR NM 45:2006, utilizando cilindro padrão de volume conhecido.

A composição granulométrica dos materiais foi obtida por três métodos: peneiramento a seco de acordo com a ABNT NBR NM 248:2003 para os agregados graúdos e miúdos, peneiramento por lavagem adaptado da ABNT NBR 9289:2000 para os materiais finos; já para o fíler e a sílica, por serem um material muito fino, a granulometria foi feita de acordo com a metodologia de granulometria por sedimentação de solo preconizada pela ABNT NBR 7181:2016. O cimento CPV ARI teve sua composição granulométrica determinada por granulômetro a laser do Laboratório de Análise de Minerais e Rochas de Curitiba-PR.

Após a obtenção dos resultados granulométricos, foram realizadas dosagens de traços de CPR através do método de dispersão granulométrica de Andreassen, conforme demonstrado a seguir.

5.2. DOSAGEM DE MATRIZ CIMENTÍCIA

A dosagem do traço de CPR foi efetuada com base em método de dispersão granulométrica de Andreassen, na qual a porcentagem de contribuição de cada material é determinada de modo que a mistura tenha a distribuição granulométrica mais próxima da curva idealizada por Andreassen, obtida com base na Equação 1.

$$\%Passante\ acumulada\ na\ peneira = \left(\frac{D\ peneira}{D\ máximo} \right)^q$$

Equação 1

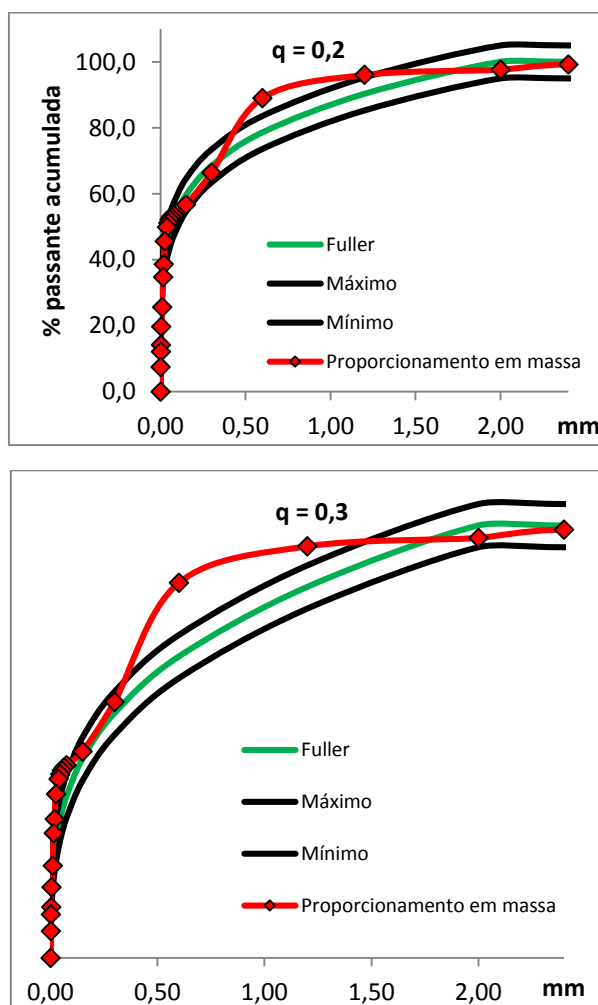
O índice q da Equação 1 é definido como o coeficiente de distribuição granulométrica, e foi adotado igual a 0,2 e a 0,3 de modo a escolher a mistura mais resistente.

Para tanto foram utilizadas planilhas eletrônicas mensurando a quantidade de cada material com base na sua composição granulométrica, obtida na etapa 1. Utilizou-se ferramenta computacional SOLVER[®] para cálculo do percentual dos materiais, de modo a aproximar a composição granulométrica resultante das composições de Andreassen com q igual a 0,2 e 0,3. É possível observar nos dois gráficos da página seguinte a curva granulométrica obtida através dos materiais utilizados em comparação com a curva de Andreassen.

Foi considerado diâmetro máximo das partículas de 2 mm, e definido um consumo de cimento entre 800 kg/m³ e 1100 kg/m³ como parâmetro da resolução.

Verificou-se nas primeiras tentativas de solução que as composições não se aproximavam do empacotamento teórico, o que exigiu a exclusão do fíler e a determinação da melhor composição de areias separadamente. Assim, após todos os ajustes e obtenção de curvas próximas às curvas de Andreassen com coeficientes 0,2 e 0,3, foram amassados 6 tipos de traços para cada composição granulométrica, alterando o fator a/c e o consumo de aditivo superplastificante. Foram utilizadas relações a/c 0,2 e 0,25, e percentuais de aditivo de 2%, 3,5% e 5%, o que resultou num montante de doze traços para análise.

GRÁFICO 1. Curva de Andreassen



Fonte: Autores (2017)

As misturas foram efetuadas em argamassadeira planetária, em alta velocidade de rotação, até obtenção de coesão e fluidez da matriz cimentícia, procedendo com a determinação do espalhamento pela ABNT NBR 13276:2005 e a moldagem de corpos de prova prismáticos 4 x 4 x 16 cm para ensaio de resistência conforme ABNT NBR 13279:2005. Para escolha do melhor traço, definiu-se um coeficiente de relevância duas vezes maior para a resistência característica à compressão em

relação ao espalhamento. Por fim, o traço com coeficiente de dispersão 0,2, relação a/c de 0,25 e 3,5% de aditivo, foi considerado a melhor matriz cimentícia para incorporação de agregados leves.

5.3. DOSAGEM DE CONCRETOS LEVES E ENSAIOS NO ESTADO FRESCO

Após definição da melhor matriz cimentícia e determinação da massa específica de todos os materiais, foram dosados concretos leves com 5 diferentes densidades teóricas - 1200, 1400, 1600, 1800 e 2000 kg/m³ para os concretos com poliestireno expandido e 1800, 2000 e 2200 kg/m³ para os concretos com escória de alto forno, por se tratar de um agregado mais denso que o EPS. Os cálculos foram realizados assumindo um teor de ar incorporado de 2% no concreto.

A consistência dos concretos produzidos foi determinada pela mesa de abatimento de acordo com a ABNT NBR 13276:2005, e a densidade de massa no estado fresco de acordo com ABNT NBR 13278:2005, utilizando recipiente de volume pré-determinado. O concreto fresco foi utilizado ainda para preenchimento dos moldes prismáticos supracitados.

5.4. CURA E ENSAIOS DO ESTADO ENDURECIDO

Foi realizada cura submersa até os 7 dias conforme preconizado pela ABNT NBR 5738:2015. De modo a aproveitar os corpos de prova prismáticos, os ensaios deram-se na seguinte ordem: massa específica aparente seca pela ABNT NBR 13280:2005, módulo de elasticidade dinâmico de acordo com a ABNT NBR 15630:2009, devido à impossibilidade de execução do ensaio estático no laboratório utilizando corpos de prova prismáticos e à resistência à tração na flexão e à compressão conforme ABNT NBR 13276:2005.

6. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios normatizados de massa unitária e massa específica dos materiais podem ser observados na Tabela 1.

TABELA 1. Caracterização dos agregados

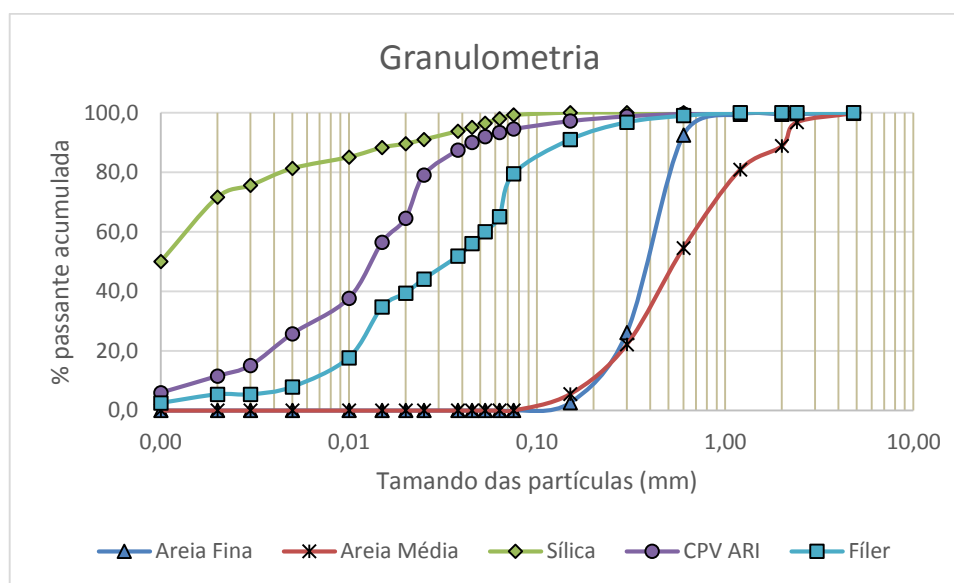
Agregados	Massa Específica (kg/m ³)	Massa unitária (kg/m ³)
Areia Fina	2632	1985
Areia média	2604	1704
Fíler	2650	1252
Sílica	2290	1483
	3077	1050
Cimento CPV ARI escória	1309	456
Pérolas de EPS	12	5,87

Fonte: Autores (2017)

A densidade do concreto final está relacionada diretamente com a massa específica dos agregados leves, ou seja, quanto mais leve é o agregado utilizado, menor é a densidade que se consegue estabelecer para as dosagens de concreto. Conforme mostrado na tabela 1, a massa específica da escória é de 1309 kg/m^3 , já das pérolas de EPS é de 12 kg/m^3 . Isso nos mostra que a densidade das pérolas de EPS é cerca de apenas 9% da densidade da escória. Com isso, compreende-se que os concretos leves, nos quais foram usadas as pérolas de EPS, podem atingir com mesmo consumo de agregado uma densidade inferior em relação aos concretos leves produzidos com as escórias leves. Pode-se notar também que a massa unitária de ambos os agregados leves é inferior ao limite de 1120 kg/m^3 para agregados leves, definido pela ABNT NBR NM 35:1995.

No gráfico 2 é possível observar a granulometria dos materiais utilizados na matriz cimentícia, que inicialmente seria o cimento CPV ARI, sílica ativa, fíler, areia média e areia fina.

GRÁFICO 2. Granulometria dos materiais pasta cimentícia



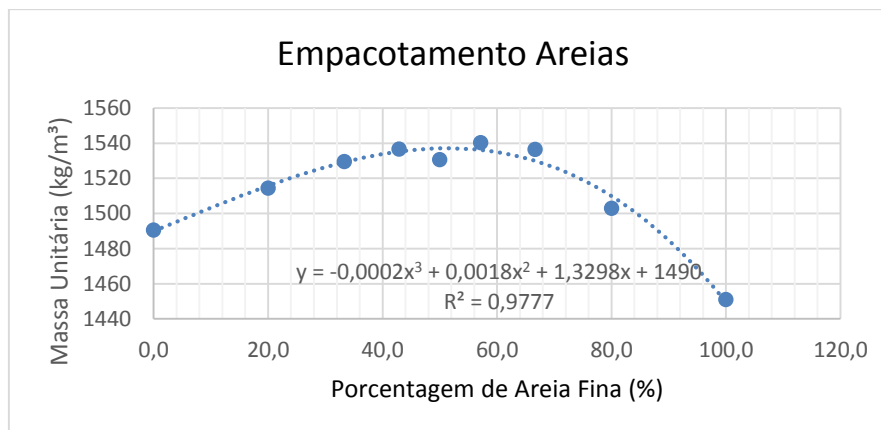
Fonte: Autores (2017)

Conforme afirma Castro e Pandolfelli (2009), para um concreto de pós-reativos é necessário que os materiais possuam granulometria fina que possibilitem uma matriz mais densa devido ao empacotamento granulométrico, no qual normalmente os materiais utilizados possuem tamanho máximo de $4500 \mu\text{m}$. Pode-se observar no gráfico 2 que o tamanho máximo característico calculado, segundo método da ABNT NBR NM 248:2003, da sílica ativa, CPV ARI, fíler, areia fina e areia média utilizados nesse concreto possuem 45 , 150 , 300 , 1200 , e $2400 \mu\text{m}$, respectivamente.

O diâmetro médio das partículas ensaiadas foi 1, 15, 30, 300 e 450 μm para a sílica ativa, CPV ARI, fíler, areia fina e areia média, respectivamente, o que demonstra que tanto o diâmetro máximo quanto o diâmetro médio foram suficientes para denotar a finura dos materiais utilizados. A sílica ativa, por exemplo, tem diâmetro médio 15 vezes inferior ao cimento, o que, segundo Rossignolo (2003), provoca a redução tanto da porosidade da pasta quanto do tamanho dos poros, devido ao empacotamento.

A partir das análises granulométricas obtidas anteriormente, foram ensaiadas as primeiras tentativas de dosagem, as quais exigiram a exclusão do fíler, devido a sua interferência direta no consumo do cimento e à determinação da melhor mistura das areias. Para tanto, foi efetuado estudo de empacotamento das areias fina e média, obtendo-se uma massa unitária otimizada para composição de 55% de areia fina e 45 % de areia média, conforme visualizado no gráfico 3. Esta composição foi utilizada posteriormente em toda a pesquisa.

GRÁFICO 3. Empacotamento das Areias



Fonte: Autores (2017)

Após a definição da porcentagem das areias e a exclusão do fíler, foi verificado, através da dispersão na curva de Andreassen, conforme gráfico 1, a adequação da dosagem dos traços. Observa-se que o gráfico com coeficiente 0,2 obteve uma dispersão inferior ao gráfico de coeficiente 0,3, o que é vantajoso, teoricamente, em relação à resistência, porém, seu consumo de aglomerante também é superior, o que pode acabar gerando um custo extra.

Na tabela 1 (página seguinte), é possível observar que o consumo de aglomerante gasto pelo coeficiente $q=0,2$ é em média 16% maior que o consumo gasto pelo $q=0,3$.

No amassamento do traço 1, foi verificada a impossibilidade de coesão da pasta com teor de a/c 0,2. Diante disso, foi verificada a necessidade de aumentar em 0,025 a relação a/c, o que o tornou mais coeso. Foi escolhida a relação a/c 0,225 de modo a produzir um concreto diferente do traço 4, que possui relação a/c 0,25 com mesma porcentagem de aditivo.

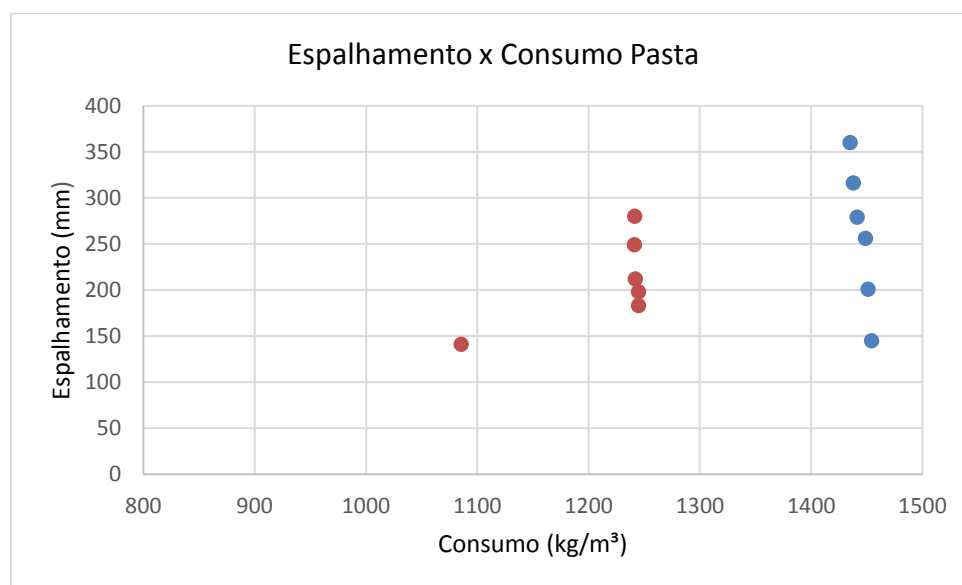
TABELA 1. Resultados dos Traços de CPR

TRAÇOS	q	1*	a/c	ADITIVO (%)	2*	3*	fck,est (MPa)	NOTA (fck,est . consistência/2)
1	0,3	872	0,225	2	141	114,7	99,36	7,0
2	0,3	1008	0,2	3,5	183	122,42	74,06	6,8
3	0,3	996	0,2	5	198	106,39	70,61	7,0
4	0,3	978	0,25	2	212	105,91	79,9	8,5
5	0,3	966	0,25	3,5	249	111,45	82,52	10,3
6	0,3	955	0,25	5	280	105,11	91,02	12,7
7	0,2	1192	0,2	2	145	136,9	123,59	8,9
8	0,2	1175	0,2	3,5	201	121,14	87,98	8,9
9	0,2	1159	0,2	5	256	98,51	87,61	11,2
10	0,2	1135	0,25	2	279	105,27	88,9	12,4
11	0,2	1119	0,25	3,5	316	101,76	86,42	13,7
12	0,2	1104	0,25	5	360	97,5	67,07	12,1

Em que 1* refere-se ao consumo de aglomerante em kg/m³; 2* refere-se à consistência medida através do espalhamento em mm; e 3* da maior resistência individual à compressão do traço em MPa. Fonte: Autores (2017)

No gráfico 5 é realizada uma relação entre o espalhamento e o consumo da pasta cimentícia.

GRÁFICO 5. Espalhamento x Pasta Cimentícia



Fonte: Autores (2017)

Observa-se no gráfico acima que o espalhamento variou significativamente, mesmo com pequenas variações no consumo total da pasta, isso se deve principalmente ao efeito do aditivo químico.

Devido ao fato de os índices de consistência dos traços 1, 2, 3, 7 e 8 não apresentarem espalhamento superior a 200mm, optou-se por sua exclusão na escolha da matriz cimentícia, por causa da trabalhabilidade reduzida. O traço 7, por exemplo, que obteve maior resistência à compressão de 136,9 MPa, e espalhamento de apenas 145mm, teve que ser retirado mesmo apresentando o maior valor de resistência dentre os outros traços, devido à necessidade de uma pasta trabalhável.

Feita a relação entre os traços com índice de consistência acima de 200mm, de forma que a resistência fosse 2 vezes mais relevante que a consistência, obteve-se que o traço 11 foi o que apresentou melhor comportamento. Pertencente à família do coeficiente de dispersão 0,2, a/c de 0,25 e porcentagem de aditivo de 3,5%, com maior resistência individual de 101,76 MPa, fck estimado de 86,42 MPa e consistência média de 316 mm, conforme mostrado no quadro 1.

Escolhida a matriz cimentícia, foram projetados os traços e as densidades dos concretos leves. Foram projetados 5 traços com as pérolas de EPS e 3 traços para as escórias de alto forno. São demonstrados na tabela 2 o índice de consistência de cada traço e sua densidade aparente no estado fresco, após o amassamento das mesmas.

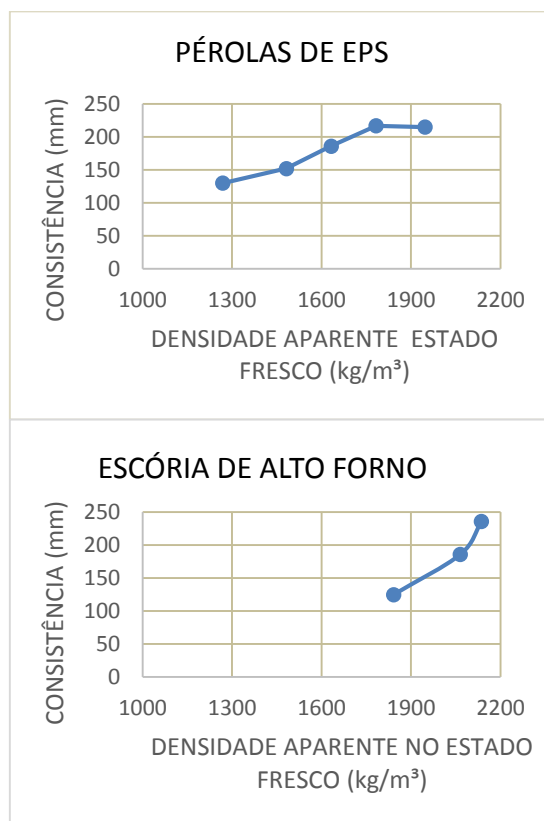
TABELA 2. Densidade, consistência e resistência

TRAÇO	D. TEÓRICA (kg/m ³)	D. APARENTE FRESCO (kg/m ³)	CONSISTÊNCIA (mm)
EPS 1	2000	1947	215
EPS 2	1800	1783	217
EPS 3	1600	1632	186
EPS 4	1400	1482	152
EPS 5	1200	1269	130
ESC 1	2200	2136	236
ESC 2	2000	2065	186
ESC 3	1800	1842	125

Fonte: Autores (2017)

A consistência dos traços de concreto leve em relação ao traço convencional (matriz cimentícia) diminuíram consideravelmente, o que, conforme Rossignolo (2003), pode ser explicado pela taxa de absorção de água dos agregados leves, com exceção do poliestireno expandido que não absorve água, e ainda pode ser resultado da menor massa de amostra de concreto para provocar a deformação sobre a mesa de espalhamento. Através do gráfico 6, pode-se observar que para ambos os concretos, a consistência foi diretamente proporcional à densidade fresca, com coeficiente de correlação 93% para o concreto com EPS, e 94,7% para o concreto com escória leve.

GRÁFICO 6. Relação entre consistência e densidade fresca



Fonte: Autores (2017)

Observa-se também que a consistência foi mais sensível à incorporação de escória leve, graças ao maior consumo específico do material, à sua absorção e ao formato irregular dos grãos que contribuem para redução da trabalhabilidade.

Foram obtidas densidades aparentes no estado fresco bem próximas das densidades teóricas, com erro máximo de 5,9%, o que é vantajoso, evitando assim correções na hora do amassamento. Tem-se como única exceção o traço EPS 5 apresentando densidade de 1340kg/m³ frente à densidade teórica de 1200kg/m³. Foi realizada a correção no ato através da adição de 1 g de pérolas de EPS, resultando na densidade de 1269 kg/m³. Tal divergência não pôde ser atribuída a nenhum parâmetro ou variável controlada.

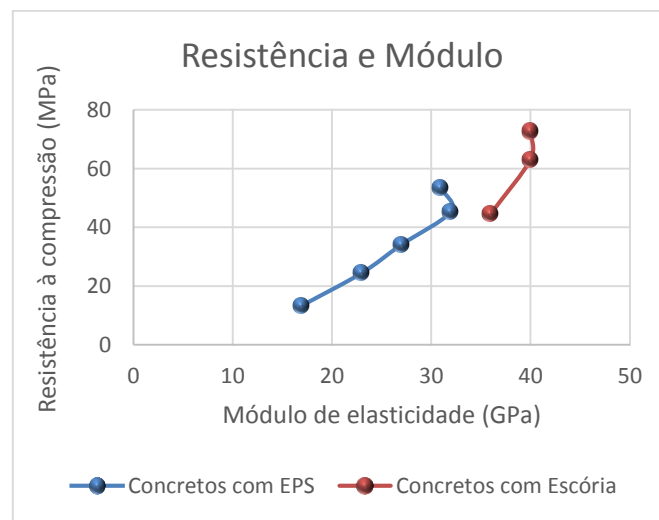
A consistência dos concretos leves, entretanto, diminuiu significativamente em relação à consistência da matriz, com reduções de no mínimo 28,5%, caindo de 316 mm para valores abaixo de 236 mm. Segundo Rossignolo (2003), o índice de consistência em concretos leves diminuem, pelo fato de a massa específica dos agregados leves serem bem inferiores aos dos agregados convencionais, impedindo assim o abatimento do concreto.

Após a cura submersa, foram obtidos os resultados aos 7 dias de resistência à tração na flexão, à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade ultrasônico. No gráfico abaixo pode-se observar que, para os traços com densidades de

1200, 1400 e 1600 kg/m³ do concreto com EPS, a resistência e o módulo de elasticidade obtiveram uma relação linear, que, segundo Borja (*apud* ZANG; GJORV, 1990), os agregados leves possuem propriedades elásticas que juntamente com a hidratação da pasta cimentícia acarretam uma linearidade no módulo de elasticidade. Já para os concretos leves com densidades maiores, não se obteve nenhum tipo de relação entre os dois fatores, visto que a resistência continuou aumentando e o módulo de elasticidade estabilizou.

De acordo com Borja (2011), quando existe o intuito de diminuir a densidade do concreto adicionando agregados leves, estes acabam alterando as propriedades elásticas do concreto comparados ao concreto convencional, o que pode ser observado neste trabalho, em que o valor de módulo de elasticidade da pasta cimentícia foi de 46 GPa e os concretos leves apresentaram valores de 13 GPa até 40 GPa. Portanto, houve uma redução no módulo elástico dos concretos.

GRÁFICO 7. Relação entre Resistência e Módulo de Elasticidade



Fonte: Autores (2017)

Segundo Bauer, Pereira e Leal (2012), o consumo alto de cimento e uma relação a/c baixa contribuem para o fortalecimento do concreto e, com isso, o aumento do módulo de elasticidade e da resistência à compressão. Pode-se observar que, neste trabalho, nos concretos com densidades de 2200, 2000 e 1800 kg/m³, que possuem quantidade maior de cimento, a resistência foi superior e o módulo de elasticidade também, comparados aos concretos de densidades 1200, 1400 e 1600 kg/m³.

Outro fator que foi levado em consideração foi o rompimento dos corpos de prova somente aos 7 dias, devido à estabilização dos resultados de resistência à compressão. De acordo com Rossignolo (2009), concretos leves feitos com cimento de alta resistência inicial, como é o caso do CPV ARI, estabilizam os valores

de resistência aos 7 dias pelo fato de a resistência da matriz cimentícia ultrapassar a resistência dos agregados leves. Angelin (2014) afirma que, para os concretos convencionais submetidos à compressão, o seu rompimento é ocorrido na pasta-agregado, pelo fato de o agregado também possuir resistência. Já no caso de concretos leves, o rompimento ocorre apenas na matriz cimentícia, pelo fato de os agregados leves não possuírem resistência.

Com base na resistência à compressão aos 7 dias, e nas densidades teóricas, foi possível encontrar fatores de eficiência de 26.7 e 25.2 MPa.dm³/kg para os concretos com EPS de 2000 e 1800 kg/m³ e 33.1, 31.6 e 24.9 MPa.dm³/kg respectivamente, para os concretos com escória leve de densidades 2200, 2000 e 1800 kg/m³, o que permite caracterizá-los como concretos leves de alto desempenho, segundo Rosignolo (2003). Entretanto, Angelin (2014) afirmar que concretos leves têm densidade inferior a 2000 kg/m³, o que caracterizaria o concreto ESC1 como concreto de alta resistência e densidade convencional. Os demais concretos com EPS puderam ser considerados como estruturais de acordo com a ABNT NBR NM 35:1995 e com a ASTM C330:2009, pois obtiveram fatores de desempenho de 21.3 e 17.5 MPa.dm³/kg e valores de resistência acima de 17 MPa, com exceção daquele com densidade teórica de 1200 kg/m³, que obteve resistência de apenas 13,40 MPa.

7. CONCLUSÕES

Verificou-se neste trabalho que a massa específica dos agregados leves tem relação direta com a densidade final dos concretos, visto que quanto mais baixa é a densidade do agregado, menor é a massa específica do concreto leve. O que se pode observar para os dois casos deste trabalho é que a escória leve de alto forno que possuía massa específica de 1,309 kg/m³ só conseguiu gerar densidades de até 1800kg/m³, já o EPS conseguiu prover concretos com densidades de até 1200kg/m³.

Ainda na dosagem através do empacotamento de Andreassen, percebeu-se que, quando existem vários materiais finos próximos a granulometria do cimento, estes acabam por interferir em seu consumo, podendo gerar uma queda na resistência. Cita-se o filer calcário, que teve que ser excluído da massa por interferência direta no consumo dos aglomerantes. O coeficiente 0,2 de dispersão, escolhido como matriz cimentícia, mostrou-se mais trabalhável que os demais, devido ao seu consumo de cimento superior ao do coeficiente 0,3.

Aferiu-se ainda que o índice de consistência dos concretos leves amassados tem relação direta com a densidade deles, visto que para os concretos com densidades baixas, como é o caso do traço EPS 5 com densidade de 1200kg/m³ a sua trabalhabilidade foi 65% inferior comparado ao traço EPS 1 com densidade de 2000 kg/m³.

Concluiu-se que a resistência à compressão dos concretos tem relação direta com a sua consistência e principalmente com a densidade. Percebeu-se que nos concretos leves com densidades muito baixas, a resistência diminuiu, devido à redução da quantidade da pasta cimentícia, que, neste caso, é quem apresenta

resistência, visto que agregados leves não possuem tal. Já a redução ocorrida na consistência dos concretos leves deve-se majoritariamente ao fato de os agregados possuírem baixa massa específica, gerando menor massa de amostra para provocar a deformação sobre a mesa de espalhamento, podendo ser atribuída, em alguns casos, como da escória de alto forno, à alta taxa de absorção de água e ao formato irregular dos grãos, que diminui consideravelmente a trabalhabilidade das misturas.

Os resultados da resistência à compressão dos concretos leves foram satisfatórios, visto que os que apresentaram densidades de 2000 e 1800 kg/m³ puderam ser classificados como concretos leves de alto desempenho e os que obtiveram densidades de 1600 e 1400 kg/m³ foram considerados como estruturais. Dessa forma, os estudos até então desenvolvidos satisfizeram as expectativas empregadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C 330: Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. United States: Copyright ©, 2009. Disponível em: <<https://www.theexpeditionaryengineer.com/wp-content/uploads/2013/04/C330.1613807-1.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

ANDREASSEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. *Kolloid Z. Ind. Eng. Chem.* 50(1930): 217-228.

ANGELIN, A. F. *Concreto leve estrutural - Desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais*. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas, Limeira-SP, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 35. Agregados Leves Para Concreto Estrutural - Especificação*. Rio de Janeiro, 1995.

_____. *NBR 9289. Cal hidratada para argamassas - Determinação da finura*. Rio de Janeiro, 2000.

_____. *NBR NM 23. Cimento Portland e Outros Materiais em Pó - Determinação da Massa Específica*. Rio de Janeiro, 2001.

_____. *NBR NM 248. Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.

_____. *NBR 13276. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *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, 2005.

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

_____. *NBR 13280*. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido. Rio de Janeiro, 2005.

_____. *NBR NM 45*. Agregados - Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. *NBR 9778*. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. *NBR 15630*. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. *NBR 5738*. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

BAUER, Elton; PEREIRA, Cláudio Henrique de Almeida Feitosa; LEAL, Antonio Carlos Ferreira de Souza. Valores do módulo de elasticidade de concretos comerciais da região do distrito federal, in: *Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 14, 2012, Juiz de Fora. Infohab. Juiz de Fora: [s.n.], 2012, p. 3174-3182.

BIZ, C. E. *Concretos de Pós Reativos*. Dissertação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

BOUVARD, D. et al. Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(12): 1666-1673, 2007.

BORJA, Edilberto Vitorino de. *Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis*. 2011. 231 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

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*. - Curso

de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132009000100003> Acesso em: 05 fev. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. ME 084. Agregado Miúdo - Determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

KILIÇ, A. et al. High-strength lightweight concrete made with scoria aggregate containing mineral admixtures. *Cement and Concrete Research*, 33(10): 1595-1599, 2003.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2 ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

NETO, C. S. "Agregados naturais, britados e artificiais para concreto", in: ISAIA, G. C. *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: Ibracon, v. 1, 2011, p. 233-260.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*, 25(7): 1501-1511, 1995.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Mechanical properties of polymer-modified lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 32(3): 329-334, 2002.

ROSSIGNOLO, J. A. *Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos: Dosagem, produção, propriedades e microestrutura*. São Carlos, 2003. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ROSSIGNOLO, J. A. *Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. São Paulo: Pini, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. "Concreto leve estrutural", in: ISAIA, G. C. *Concreto: ciência e tecnologia*. São Paulo: Ibracon, 2011, v. 2, p. 1531-1568.

SPITZNER, J. High-strength LWA concrete. High-Strength Concrete. *RILEM*, cap. II-Aggregates, 1994.

TESSARI, J. *Utilização de Poliestireno expandido e potencial de aproveitamento de seus resíduos na construção civil*. Dissertação. UFSC. Santa Catarina. 2006.

VANDERLEI, R. D.; GIONGO, J. S. Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas. São Carlos: USP, 2006.

ZHANG, M. H.; GJORV, O. E. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *ACI Materials Journal*, 88(3): 240-247, 1991.