

## **PRODUTOS CIMENTÍCIOS ULTRALEVES COM CENOSFERA: VIABILIDADE E APLICAÇÃO ESTRUTURAL**

Felipe Basquioto de Souza (1), Elaine Guglielmi Pavei Antunes (2)

*UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
(1) [felipebasquioto@gmail.com](mailto:felipebasquioto@gmail.com), (2) [elainegpa@unesc.net](mailto:elainegpa@unesc.net)*

### **RESUMO**

A cenosfera é um resíduo do processo de combustão do carvão mineral que apresenta propriedades interessantes para ser incorporada em compósitos cimentícios, como estrutura oca e conseqüente baixa densidade, baixa condutividade térmica, notável estabilidade térmica, além de reagir pozolanicamente em certas circunstâncias. No entanto, este resíduo não vem sendo reaproveitado de forma que estas propriedades sejam exploradas. Este estudo investiga o emprego da cenosfera como agregado miúdo para produção de materiais cimentícios leves para aplicações estruturais, dividindo-se em três etapas: 1) caracterização química e física da cenosfera fornecida pela empresa Engie Energia e abordagem da viabilidade de sua separação; 2) aplicação da cenosfera em argamassas para blocos estruturais; 3) emprego da cenosfera em microconcretos de alta resistência. Foi descoberto que a cinza volante da termoelétrica é composta por 0,2% de cenosfera. Argamassas com cenosfera atingiram densidades seca menores que 800 kg/m<sup>3</sup> e maior estabilidade térmica. Microconcretos com cenosfera como agregado miúdo apresentaram resistência à compressão de 70 MPa e densidade menor que 1500 kg/m<sup>3</sup>. De maneira geral, a utilização de cenosfera como agregado miúdo melhorou o fator de eficiência dos materiais cimentícios, sendo que o emprego em até dois terços em substituição à areia se mostra como um teor ideal para fabricação de produtos com resistências equivalentes ao de referência, porém com densidades significativamente reduzidas.

*Palavras-Chave: Cenosfera; Argamassa; Microconcreto; Ultraleve; Baixa densidade.*

### **1. INTRODUCAO**

Apesar dos esforços mundiais em diminuir quantidade de emissões de gás carbônico à atmosfera com novas alternativas para produção de energia, nota-se que a produção de carvão, após atingir uma estabilidade no fim da década de 90, vem crescendo consideravelmente nos últimos anos devido especialmente ao crescimento da economia chinesa (BP Global, 2016). Conseqüentemente, é essencial que os rejeitos provindos por esta importante indústria tenham um destino adequado ou ainda melhor se reaproveitados em outras indústrias.

No processo de combustão do carvão mineral em termoelétricas é gerado um grande volume de cinza volante. É estimado que no mundo sejam produzidos aproximadamente 500 milhões de toneladas de cinza anualmente (Ahmaruzzaman,

2010). Dentro desta grande produção de cinza volante, entre 0,3 a 1,5% em massa são cenosferas (Fomenko, Anshits et al. 2011), partículas que enclausuram ar durante a combustão e são ocas em seu interior, apresentando densidade entre 400 e 900 kg/m<sup>3</sup> (Wu, Wang et al. 2015).

As cenosferas são aluminossilicatos com propriedades interessantes. Além de baixa densidade, a cenosfera apresenta baixa condutividade térmica devido à sua estrutura oca. Quando grandes quantidades de mulita são encontradas em sua morfologia, a cenosfera também exibe notável estabilidade térmica e baixa dilatação térmica, além de grande resistência à fluência, à propagação de fissuras e choques térmicos (Chávez-Valdez, Arizmendi-Morquecho et al. 2011).

Materiais cerâmicos compostos puramente de cenosferas já foram produzidos e exibem grande potencial para a fabricação de barreiras térmicas (Arizmendi-Morquecho, Chávez-Valdez et al. 2012). A cenosfera também reage pozolanicamente com a portlandita do cimento Portland em certas temperaturas (Wang, Zhang et al. 2012) e podem ser ativadas por meio de soluções ácidas e básicas para a formação de geopolímeros (Biju-Duval, 2007).

Apesar de sua reatividade em meios alcalinos, foi mostrado que a cenosfera não apresenta potencial para reações deletérias, como a reação álcali-silica, quando incorporada em argamassas de cimento Portland (Wang, Zhang et al. 2012).

Tirando proveito destas excelentes propriedades, a cenosfera tem o potencial para aplicação em materiais cimentícios para a criação de estruturas de concreto com menos da metade da densidade de concretos convencionais (Wang, Zhang et al. 2012).

No sul de Santa Catarina está localizado o maior complexo termelétrico a carvão da América do Sul, administrado pela empresa Engie Engenharia (Tractebel Energia, 2013). Esta termelétrica possui capacidade instalada própria de 857 MW, equivalente a cerca de 0,7% da capacidade total instalada no Brasil (Aneel, 2016). Porém, nesta termoelétrica não existe um sistema de coleta e separação da cenosfera, que possui dois destinos: descartada juntamente com as cinzas pesadas ou destinada à produção de cimento juntamente com a cinza volante, sendo perdida em qualquer das duas formas.

Este estudo investiga a viabilidade do emprego da cenosfera como agregado miúdo para produção de materiais cimentícios estruturais e de baixa densidade, sendo dividido em três etapas:

- 1) Caracterização química e física da cenosfera fornecida pela empresa Engie Energia. A viabilidade da separação da cenosfera também foi brevemente abordada no estudo.
- 2) Aplicação da cenosfera como agregado miúdo em argamassas para blocos estruturais leves. Resistência à compressão e a tração das argamassas com diferentes teores de cenosfera foram testadas, assim como a estabilidade térmica do material a altas temperaturas.
- 3) Emprego da cenosfera como agregado em microconcretos de alta resistência com densidade reduzida. Testes de compressão e módulo de elasticidade foram realizados em concretos com diferentes teores de cenosfera. Também foi analisada a influência da cura térmica nas propriedades mecânicas e microestrutura do concreto.

## **2. PARTE EXPERIMENTAL:**

### **2.1. Materiais**

A cenosfera foi coletada em uma das bacias da termoelétrica, onde a cinza pesada do processo de combustão é descartada. Como a cenosfera tem uma massa específica menor que a da água, ela boia, o que facilita sua separação e obtenção. Como se percebe na Figura 1, a quantidade de cenosfera contida na cinza pesada descartada nas bacias é pequena comparada com toda a produção de carvão, e pouco material pôde ser nesse processo. A cenosfera coletada apresentou massa específica de  $0,68 \text{ g/cm}^3$ , densidade de 3,5 a 4 vezes menor que os outros agregados.

Cimento Portland classificado pela NBR 5736:1991 como CP-IV classe 25, com massa específica de  $3,16 \text{ g/cm}^3$  foi utilizado em todas as misturas. Cal hidratada com massa específica de  $2,21 \text{ g/cm}^3$  foi adicionado às misturas argamassadas, enquanto sílica ativa com massa específica de  $2,26 \text{ g/cm}^3$  foi adicionado às misturas de microconcreto de alta resistência.

Em relação aos agregados, areia padrão, conforme NBR 7214:2015, foi utilizada como agregado miúdo de referência das argamassas. Para fabricação dos

microconcretos de alta resistência, areia lavada com massa específica de  $2,48 \text{ g/cm}^3$  e pedrisco basáltico de  $2,91 \text{ g/cm}^3$  com dimensão máxima característica de 8 mm foram incorporados. Hiperplastificante da marca GCP Applied Technologies, com nome comercial de Tec-Flow 8000, também foi empregado nas misturas do microconcreto.

Figura 1: Pequena quantidade de cenosfera boiando na bacia



Fonte: Do autor, 2016

## 2.2. Argamassas para blocos estruturais

A Tabela 1 demonstra os traços das argamassas. Os traços foram definidos de acordo com a ASTM C 270 (2014), norma americana para unidades de blocos estruturais. Para se aumentar a trabalhabilidade, retenção de água e plasticidade das argamassas, cal hidratada foi adicionada à mistura em uma proporção de 50% em relação ao cimento, sendo, portanto, uma argamassa de cimento-cal do Tipo S, segundo a ASTM C 270 (2014). A granulometria da areia normal empregada nas misturas foi similar a granulometria apresentada pela cenosfera.

Em relação às misturas, o primeiro número representa a quantidade em volume de cenosfera como agregado, enquanto o segundo é a relação entre aglomerante e agregados. Por exemplo, a mistura M67-3.25 é composta de 67% em volume de cenosfera e 33% de areia, com uma relação em volume de agregados/aglomerantes igual a 3,25.

Para a mistura das argamassas, primeiramente água destilada foi adicionada na argamassadeira. Então os materiais cimentantes e os agregados (previamente misturados a mão) foram adicionados em 120 s na velocidade baixa de

aproximadamente 150 rpm. Em seguida, a argamassa é misturada em velocidade alta de aproximadamente 300 rpm por 30 s. A argamassa é colocada em repouso por 90 s. Após, mistura-se por mais 30 s na velocidade de 300 rpm. O mini-slump foi de  $210 \pm 10$  mm para todas as argamassas.

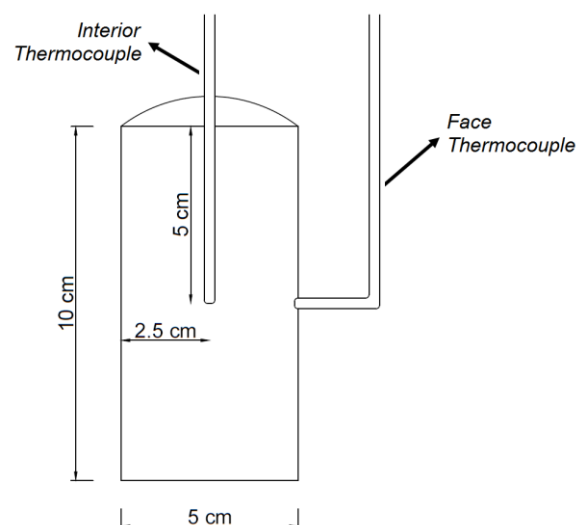
Tabela 1: Traços das Argamassas em  $\text{kg/m}^3$

Mistura	Aglomerante		Agregados Miúdos		Água	a/c	Cimento/Cal (Volume)	Agl/Agr (Volume)
	Cimento Portland	Cal	Areia	Cenosfera				
M0-3.25	314,1	109,9	1318,3	-	356,2	0,84	2,0	3,25
M33-3.25	316,8	110,9	886,5	111,3	350,7	0,82	2,0	3,25
M67-3.25	319,6	111,8	447,1	224,5	345,1	0,80	2,0	3,25
M100-3.25	323,8	113,3	-	341,3	336,6	0,77	2,0	3,25
M100-2.5	396,2	138,6	-	321,2	331,6	0,62	2,0	2,5
M100-4.0	271,7	95,1	-	352,5	344,8	0,94	2,0	4

Fonte: Do autor, 2016

Para caracterização mecânica das amostras, corpos-de-prova prismáticos de 4 cm x 4 cm x 16 cm foram moldados de acordo com a NBR 13279:2005. Após a mistura, os corpos de prova foram cobertos com filme plástico para evitar a perda de água do material. As amostras foram submetidas à cura em solução saturada hidróxido de cálcio, com temperatura controlada de  $23 \pm 2$  °C. As amostras foram ensaiadas a flexão e compressão aos 28 dias também de acordo com a NBR 13279:2005.

Figura 2: Configuração do teste de estabilidade térmica no forno mufla



Fonte: Do autor, 2016

Para avaliar a estabilidade térmica das argamassas, corpos de prova cilíndricos da mistura M0-3.25 e M100-3.25 foram aquecidos, um por um, em forno mufla a um aquecimento de 20 °C/min. Ao atingir-se um patamar de 600 °C, manteve-se as argamassas nesta temperatura por aproximadamente 30 min, até que a temperatura interna do corpo de prova também atingisse 600 °C. O resfriamento foi realizado a temperatura ambiente. Durante o experimento, as temperaturas interna e da face das argamassas foram medidas com auxílio de três termopares, um no interior e dois na face. A configuração do ensaio é mostrada na Figura 2. Os corpos de prova possuíam tamanho de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura e foram moldados de acordo com a NBR 7215:1996.

### **2.3. Microconcreto de Alta Resistência**

Para fabricação dos microconcretos de alto desempenho, primeiramente água destilada foi misturada com hiperplastificante. Adicionou-se então os aglomerantes previamente misturados à mão em um tempo de 10 min. A areia e a cenosfera (anteriormente misturados secos à mão) foram adicionados ao misturador em 5 min. Finalmente, o pedrisco também foi misturado para formação do concreto. O concreto foi homogeneizado por mais 5 min, para que o hiperplastificante tivesse um efeito maior e a mistura atingisse uma consistência fluida. Todas as etapas descritas foram realizadas em velocidade alta de 300 rpm.

A Tabela 3 mostra os traços dos microconcretos. As composições foram baseadas em diversos traços trazidos na literatura sobre concreto de alta resistência, no qual o material atinge resistência à compressão maior que 100 MPa aos 28 dias. Para atingir resistências tão elevadas, os traços se caracterizam por apresentar pequena razão entre agregados e aglomerantes; fator de compactação controlada; grandes quantidades de materiais suplementares, como a sílica ativa; água/cimento entre 0,20 e 0,25; emprego extensivo de superplastificante; e utilização de fibras (não abordada nesta pesquisa) (Schmidt, 2005; Russell, 2013; Camp).

Em relação às misturas, o número do grupo representa a quantidade em volume de cenosfera como agregado miúdo em substituição à areia. Por exemplo, os agregados miúdos da mistura HP67 são compostos por 67% em volume de cenosfera e 33% de areia.

Tabela 3: Traços dos microconcretos em kg/m<sup>3</sup>

Mistura	Aglomerantes		Agregados			Água	Hiper Plastificante	a/c	Cura
	Cimento Portland	Sílica Ativa	Areia	Cenosfera	Pedrisco				
HP0	732,4	244,1	1065,6	-	211,0	214,8	19,5 (2%)	0,22	23 °C / 80 °C (72 h)
HP33	732,4	244,1	710,4	111,3	211,0	214,8	19,5 (2%)	0,22	23 °C
HP67	732,4	244,1	355,2	178,3	211,0	214,8	19,5 (2%)	0,22	23 °C
HP100	732,4	244,1	-	267,5	211,0	214,8	19,5 (2%)	0,22	23 °C / 80 °C (72 h)

Fonte: Do autor, 2016

Corpos-de-prova cilíndricos, com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura foram moldados em quatro camadas com a compactação realizada através de 30 golpes entre cada camada. As amostras foram submetidas à cura submersa em água saturada com cal, com temperatura controlada de 23 °C. Os procedimentos de moldagem e cura seguiram a NBR 7215:1996. Além disso, corpos-de-prova adicionais das misturas HP0 e HP100 foram curados termicamente em água a 80 °C (submersos) por um período de 72 h, e posteriormente também foram colocados na cura submersa a 23 °C.

Todos os ensaios de compressão e módulo de elasticidade foram realizados aos 28 dias, seguindo a NBR 5738:2003 e a NBR 8522:2008 respectivamente.

## 2.4. Caracterização

Difração de raios-X (DRX) foi realizada em equipamento Shimadzu, modelo Lab X XRD-6000. Imagens microscópicas das amostras foram obtidas com auxílio de microscópio óptico Olympus, modelo BX41M-LED e de microscópio eletrônico de varredura (MEV) Zeiss, modelo EVO-MA-10. A distribuição granulométrica da cenosfera foi obtida com analisador de partículas à laser CILAS, modelo 1064. Ensaio de perda ao fogo foi realizado de acordo com a NBR 5743:1985.

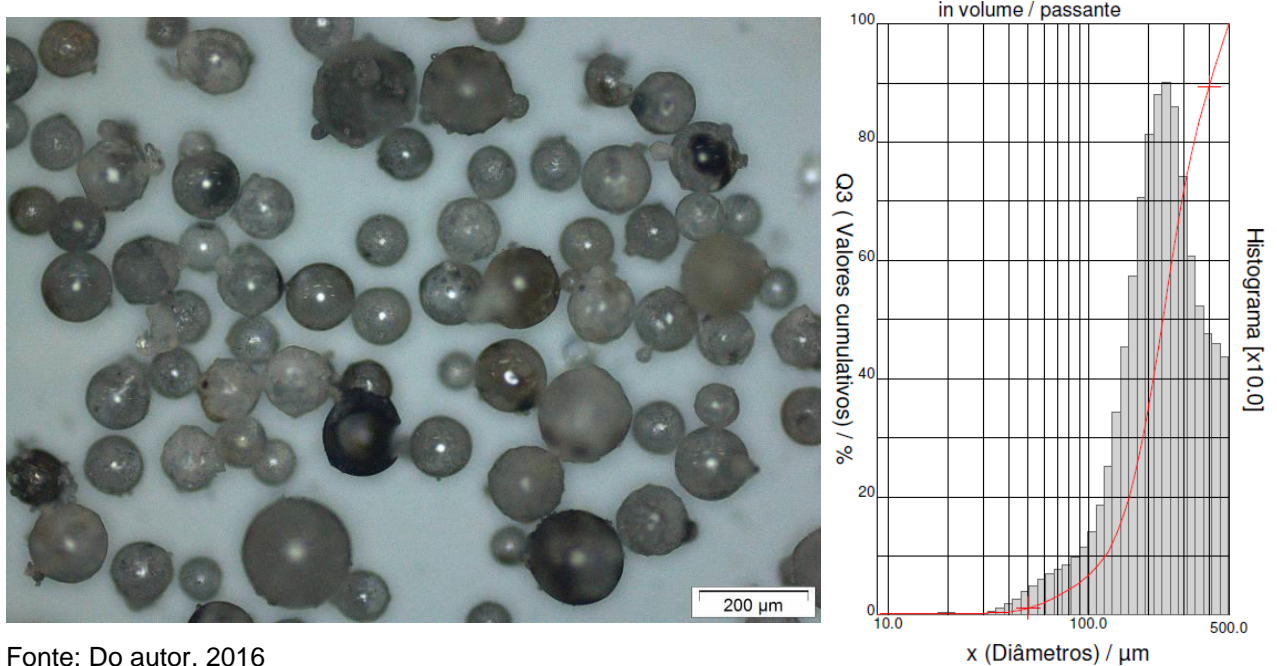
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1. Caracterização da Cenofera

Imagem microscópica da cenofera coletada é mostrada na Figura 3a. Percebe-se visualmente que o rejeito apresenta formato esférico, com tamanho médio entre 50 e 250 µm. Análise de distribuição granulométrica a laser é exibida na Figura 3b. A análise indicou tamanho médio das partículas de 248 µm, diferente do observado na

imagem. Essa diferença pode ser atribuída ao fato que a análise a laser foi realizada apenas com partículas com densidade maior que  $789 \text{ kg/m}^3$  e que conseqüentemente afundavam em etanol, solvente utilizado no ensaio.

Figura 3: Distribuição granulométrica da cenosfera: a) imagem microscópica; b) granulometria a laser



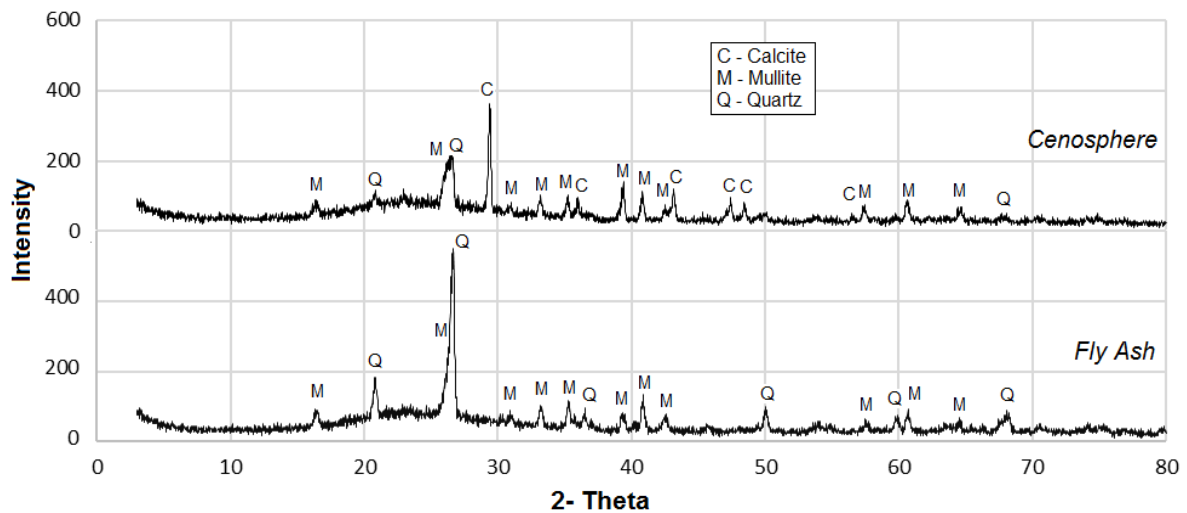
Fonte: Do autor, 2016

A mineralogia da cenosfera foi analisada por meio de DRX e comparada com as fases cristalinas da cinza volante provinda do mesmo processo de combustão. Conhecer as fases cristalinas de um material é importante para estimar sua estabilidade térmica, expansão térmica, resistência à propagação de fissuras e a choques térmicos, propriedades essenciais para materiais submetidos a altas temperaturas.

Nota-se na Figura 4 que a cenosfera é constituída por uma fase amorfa e outra cristalina. A fase cristalina é composta de mulita, composto de notável estabilidade térmica. Calcita também foi encontrada juntamente com uma pequena quantidade de quartzo. Curiosamente, esta mineralogia é diferente quando comparada com a da cinza volante, que não apresenta evidências de carbonato de cálcio em sua composição. Além disso, a cinza possui uma estrutura cristalina com maior predominância de quartzo.



Figura 4: Mineralogia da cenosfera e cinza volante do mesmo processo de combustão



Fonte: Do autor, 2016

Com a parte inorgânica da cenosfera caracterizada, realizou-se o ensaio de perda ao fogo para descobrir a quantidade de matéria orgânica existente no rejeito. Como a cenosfera é um produto da combustão do carvão, existe a possibilidade de que este não esteja completamente queimado e conseqüentemente, carbono seria encontrado em sua constituição. Conhecer a quantidade de carbono na constituição da cenosfera é importante porque produtos orgânicos modificam as propriedades reológicas de materiais cimentícios, geralmente aumentando o consumo de água (Mohebbi, Rajabipour, Scheetz, 2015). A perda ao fogo do resíduo encontrada foi de 9,5% ( $\pm 1,3$ ), porcentagem acima do limite imposto pela ASTM C 618 (2015) para cinzas volantes de classe C e F, que é 6%. Na Figura 5 é visualizado amostras de antes (a) e depois (b) do ensaio de perda ao fogo. A mudança na coloração cenosfera após exposição a 950 °C pode ser atribuída a alteração de fases cristalinas, provavelmente ao desaparecimento da calcita (Santisteban, Juan I., et al, 2004; Fox, 2005).

Para avaliar a viabilidade de um processo de separação e coleta da cenosfera, mediu-se a porcentagem de cenosfera existente na cinza volante da termoelétrica em estudo. Amostras de 500 g de cinza volante foram colocadas em um recipiente com água. Como as partículas da cenosfera emergem para superfície, elas foram coletadas e tiveram seu peso medido. A Figura 6 demonstra a relação de volumes entre a cinza volante e a cenosfera depois de separadas em água.

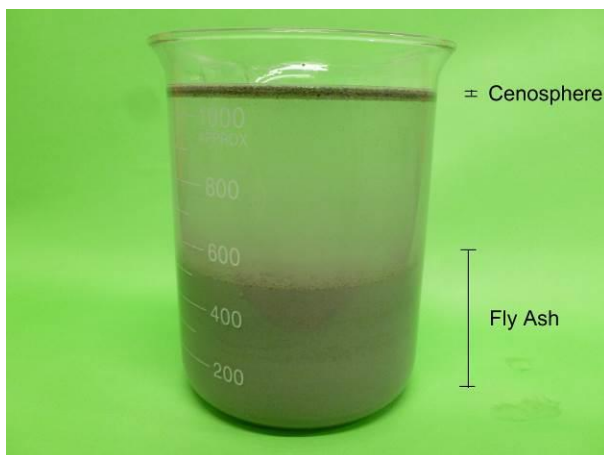
Figura 5: Amostra de cenosfera antes (a) e depois (b) do ensaio de perda ao fogo



Fonte: Do autor, 2016

Verificou-se que a cinza volante é constituída por aproximadamente 0,20% ( $\pm 0,02$ ) em massa de cenosfera, representando um percentual cerca de 0,6% em volume do rejeito. De acordo com a informação fornecida pela empresa, a termoelétrica em estudo gera em média 4 mil toneladas de cinza volante por dia. Portanto, estima-se que nesta termoelétrica são desperdiçados junto a cinza cerca de 8 toneladas por dia, ou seja, 3 mil toneladas por ano de cenosfera. Como base, o Brasil produziu em 2015 aproximadamente 65 milhões de toneladas de cimento (SNIC, 2015), valor consideravelmente elevado comparado com a quantidade de cenosfera disponível para ser coletada. Portanto, a separação da cenosfera se justificaria para aplicações especiais, e não para uso disseminado como agregado na construção civil em geral.

Figura 6: Relação de volumes entre cenosfera (boiando) e cinza (fundo)



Fonte: Do autor, 2016

Um melhor estudo deve ser procedido com uma amostra mais abrangente de cinza volante produzida pela empresa. Também, parâmetros da queima do carvão devem ser estudados para verificar o que influencia na quantidade de partículas que acabam incorporando ar e se tornando cenosfera.

### 3.2. Argamassas para Blocos Estruturais Leves

Os resultados de consistência, densidade saturada e seca, resistência à compressão, resistência à flexão, e fator de eficiência das argamassas estão resumidos na Tabela 4.

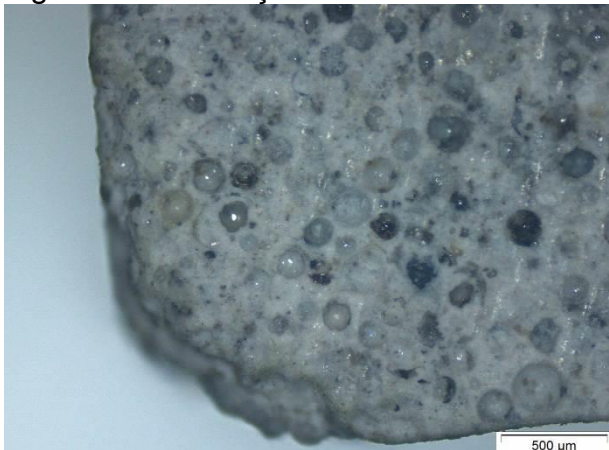
Diferentes teores de cenosfera foram adicionados nas argamassas como agregado para verificar sua influência na densidade e nas propriedades mecânicas do material. Quatro teores foram testados: 0% (M0-3.25); 33% (M33-3.25); 67% (M67-3.25) e 100% (M100-3.25) em substituição à areia. A Figura 7 demonstra a distribuição homogênea da cenosfera na argamassa.

Tabela 4: Resumo das propriedades das argamassas

Mistura	a/c	Mini Slump (mm)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )		Resistência Mecânica aos 28 dias (MPa)		Fator de Eficiência (MPa.m <sup>3</sup> /kg)	
			Saturada	Seca em Estufa	Compressão	Flexão	Compressão	Flexão
M0-3.25	0,84	200	1972	1684	8,8	2,5	5,2	1,5
M33-3.25	0,82	213	1685	1393	9,0	2,7	6,5	2,0
M67-3.25	0,80	211	1403	1086	8,5	2,4	7,8	2,2
M100-3.25	0,77	206	1127	770	7,2	1,9	9,4	2,5
M100-2.5	0,62	209	1185	866	12,6	3,0	14,5	3,5
M100-4.0	0,94	204	1065	699	5,3	1,4	7,5	2,0

Fonte: Do autor, 2016

Figura 7: Distribuição da cenosfera na amostra M100-3.25

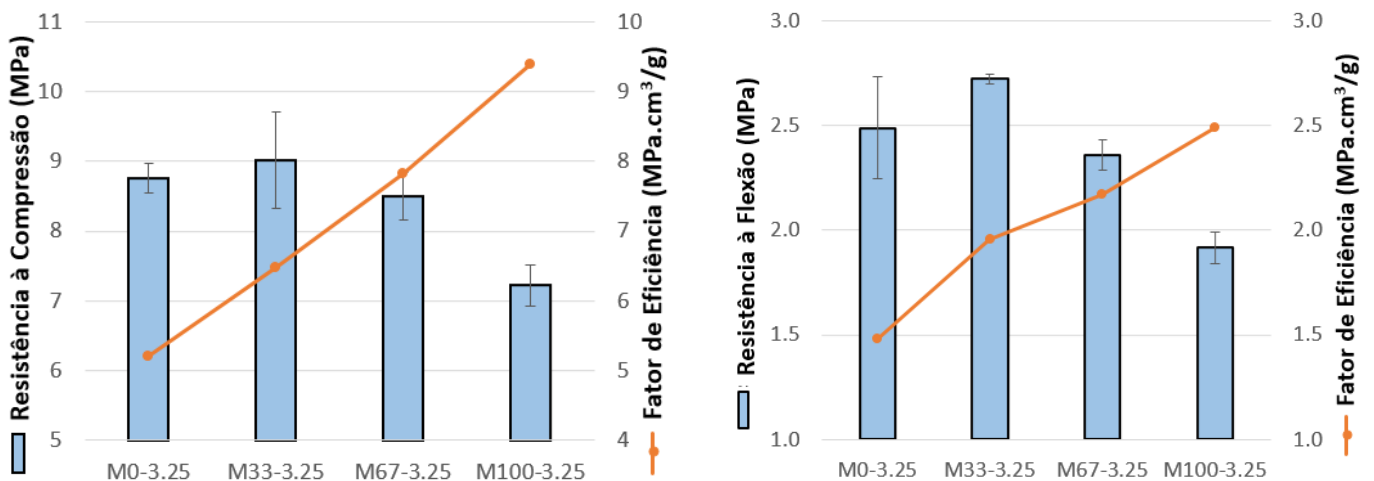


Fonte: Do autor, 2016

Percebeu-se que a substituição da areia pela cenosfera aumentou consideravelmente tanto a coesão quanto a trabalhabilidade das argamassas devido ao seu formato esférico. Como resultado, misturas com mais cenosfera precisaram de menor quantidade de água para atingir a mesma consistência, tendo sua relação a/c reduzida. A menor trabalhabilidade da argamassa sem cenosfera também é atribuída ao uso de areia de mesma distribuição granulométrica do resíduo.

Percebe-se na Figura 8 que a utilização de cenosfera em teores de até 67% do agregado não apresentou redução na resistência mecânica, como esperado para materiais de menor densidade. Aliás, a substituição em 33% apresentou efeitos positivos e argamassas obtiveram aumento de resistência à compressão e à flexão. Este aumento pode ser atribuído ao fato da menor relação a/c utilizado para estas misturas e consequente menor porosidade.

Figura 8: Resistência à a) compressão e b) flexão de argamassas com diferentes teores de cenosfera

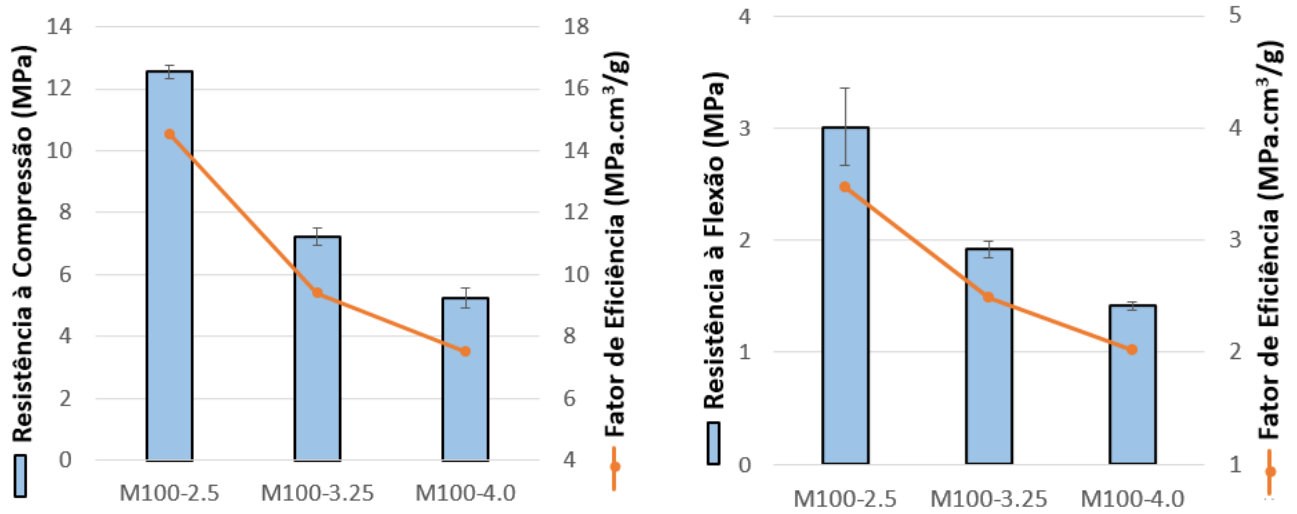


Fonte: Do autor, 2016

Considerando a densidade, é nítido que argamassas com maior teor de cenosfera apresentam fatores de eficiência (resistência/densidade seca) superiores, evidenciando a vantagem de substituir a areia pelo resíduo leve.

Argamassas com diferentes quantidades de cenosfera no traço também foram analisadas. Três relações em volume de aglomerante/cenosfera foram analisadas: 1:2,5 (M100-2.5); 1:3,25 (M100-3.25); 1:4 (M100-4.0). Os resultados de compressão e flexão são exibidos na Figura 8.

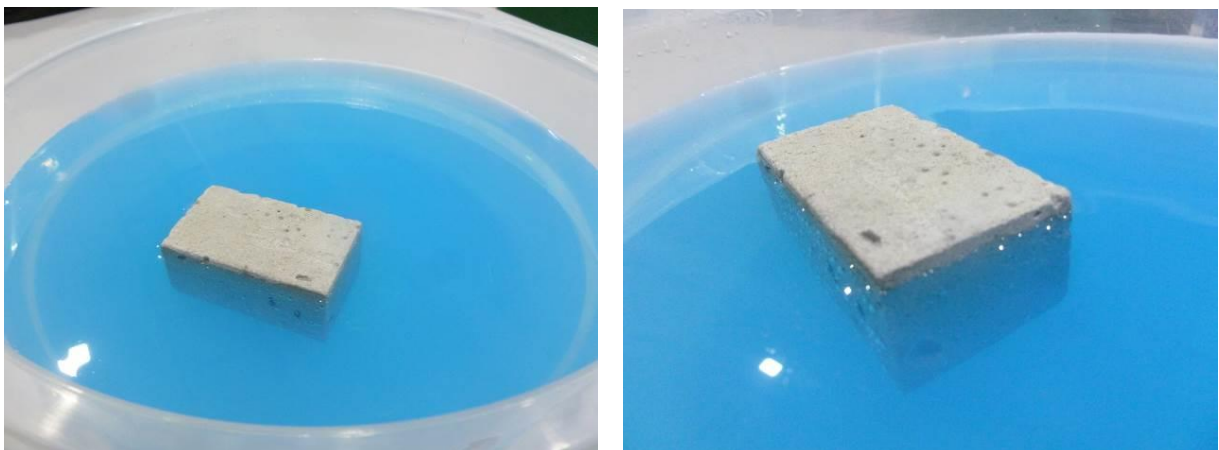
Figura 8: Resistência à a) compressão e b) tração de argamassas de cenosfera com diferentes traços



Fonte: Do autor, 2016

Percebe-se que o traço mais rico (M100-2.5) apresentou resistência consideravelmente superior, com um aumento de aproximadamente 55% e 58% na resistência à compressão e à flexão em relação ao traço M100-3.25, respectivamente. Todavia, o aumento na densidade saturada e seca do material foi de apenas 5% e 24%, respectivamente. Constata-se dessa maneira que o aumento da relação aglomerante/cenosfera apresenta grandes benefícios para o aumento do fator de eficiência das argamassas. Por outro lado, obtêm-se argamassas com densidades baixíssimas ao se aumentar a quantidade de cenosfera no traço, como visualizado na Figura 9.

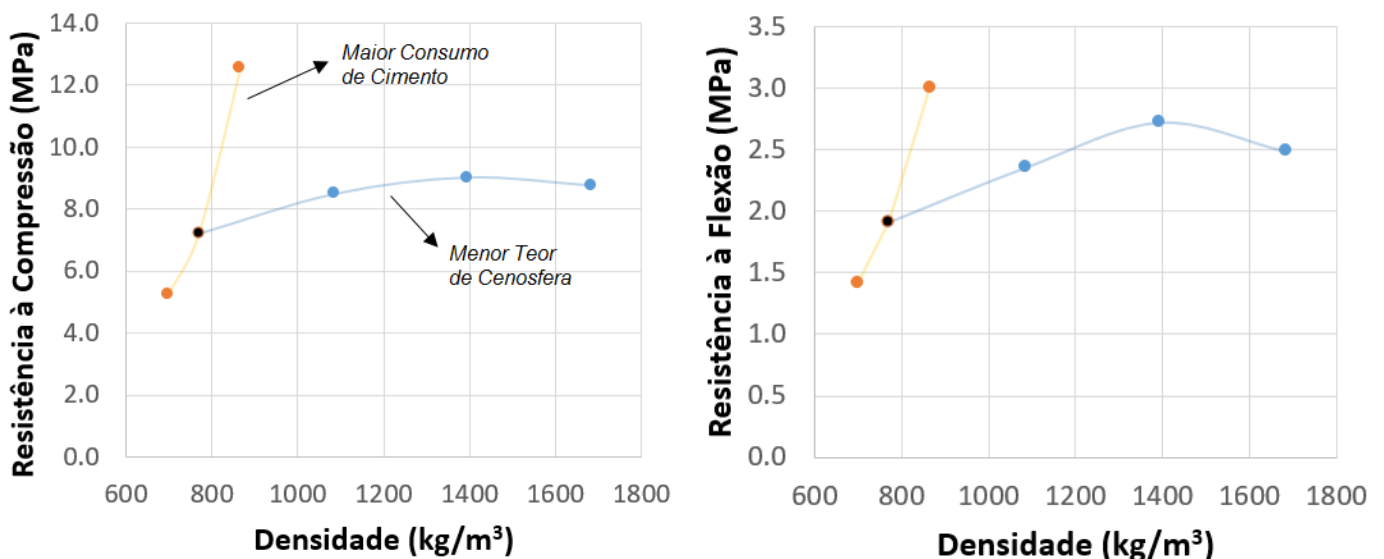
Figura 9: Argamassa M100-4.0 boiando na água



Fonte: Do autor, 2016

A Figura 10 demonstra a relação entre a densidade seca e a resistência à compressão e tração de todas as argamassas testadas. Pode-se desenhar duas tendências para as argamassas: a resistência mecânica aumenta ao diminuir a substituição da areia pela cenosfera; e resistência mecânica aumenta com o aumento da razão aglomerante/cenosfera. Comparando as tendências, percebe-se que a resistência das argamassas é significativamente maior com o incremento de aglomerante, como observado nas inclinações das curvas. Portanto, para fabricação de produtos cimentícios de baixa densidade com propriedades mecânicas equivalentes as de maior densidade, é preferível aumentar o consumo de cimento do que diminuir o teor de agregado leve. Resultados de flexão e compressão apresentaram tendências semelhantes.

Figura 10: Relação entre densidade seca e a resistência à a) compressão e b) tração das argamassas

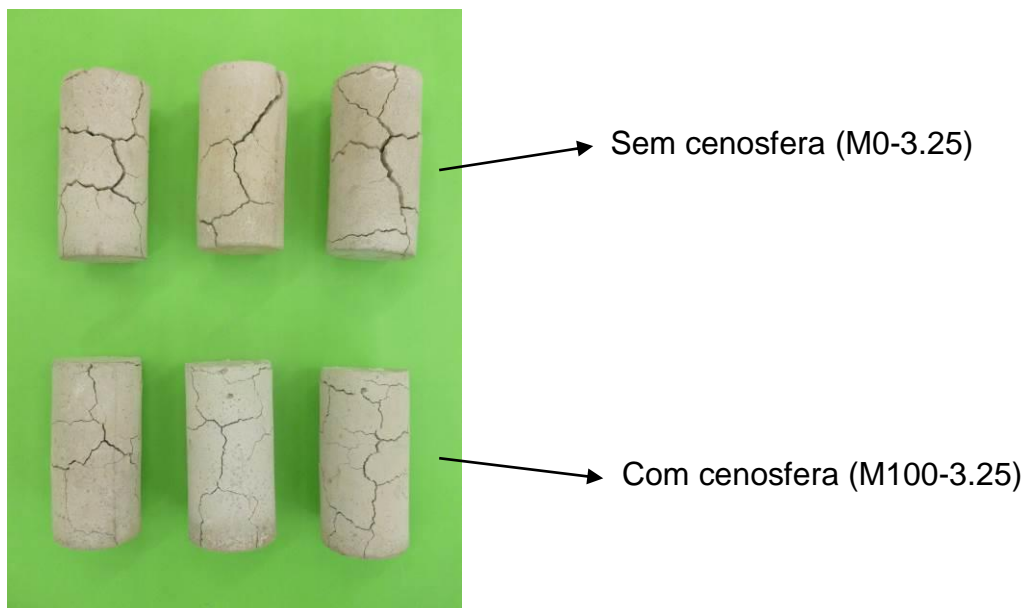


Fonte: Do autor, 2016

Adicionalmente, a estabilidade térmica das argamassas M0-3.25 e M100-3.25 foram analisadas visualmente após serem aquecidas a 600 °C e resfriadas a temperatura ambiente. Como a argamassa é um material heterogêneo, seus componentes apresentam dilatações e retrações térmicas diferenciadas. Estas movimentações deterioraram o material, tendência confirmada nas argamassas M0-3.25 e M100-3.25. Porém, observa-se na Figura 11 que corpos de prova compostos de cenosfera apresentam fissuração significativamente inferior quando comparados com as

argamassas com areia quartzosa. As fissuras de maior tamanho das argamassas M0-3.25 foram de 2,5 a 3 mm, contra aberturas entre 1,1 e 1,3 mm das M100-3.25. O melhor comportamento térmico e argamassas com cenosfera é explicado pela estabilidade térmica e volumétrica apresentada pela mulita, principal composto presente na cenosfera, como comentado anteriormente na análise de DRX. Por outro lado, a areia normal apresenta quartzo, cristais que acima de 500 °C passam por uma transformação de fase seguida de expansão de 0,85% (de Souza, Moreno Jr, 2010; Uygunoğlu, Topçu, 2009).

Figura 11: Argamassas após serem aquecidas a 600 °C e resfriadas a temperatura ambiente; amostras M0-3.25 estão dispostas na linha superior; enquanto as amostras M100-3.25 estão na linha inferior:



Fonte: Do autor, 2016

### 3.3. Microconcreto de Alta Resistência

Resultados de densidade saturada e seca, resistência à compressão e módulo de elasticidade dos microconcretos de alta resistência estão resumidos na Tabela 5.

Em relação à consistência dos microconcretos, a mistura HP0 apresentou uma consistência fluida, similar a de um concreto auto-densável. Porém, com o aumento do teor de substituição da areia pela cenosfera, houve uma perda significativa da trabalhabilidade da mistura devido ao tamanho reduzido das cenosferas comparado

com a areia lavada. Devido a esta maior consistência, a mistura HP100 teve que ser misturada por 2 min adicionais a uma velocidade de 400 rpm.

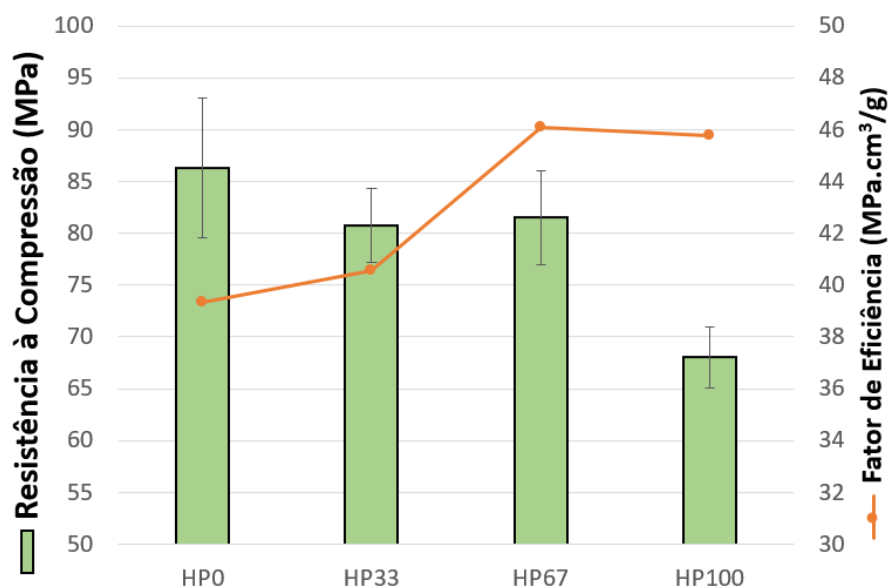
Tabela 5: Resumo das propriedades dos microconcretos

Mistura	a/c	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )		Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)		Fator de Eficiência (MPa.m <sup>3</sup> /kg)	Modulo de Elasticidade (GPa)
		Saturada	Seca em Estufa	Cura 23 °C constante	Cura 80 °C por 72h		
HP0	0.22	2346	2195	86.3	94.0	39.3	44.3
HP33	0.22	2134	1991	80.7	-	40.5	-
HP67	0.22	1912	1768	81.5	-	46.1	-
HP100	0.22	1650	1487	68.0	64.9	45.8	21.9

Fonte: Do autor, 2016

Microconcretos com diferentes teores de cenosfera como agregado foram misturados para verificar influência do agregado leve na densidade e nas propriedades mecânicas do material. Quatro teores de cenosfera foram testados: 0% (HP0); 33% (HP33); 67% (HP67) e 100% (HP100) em substituição à areia lavada. A Figura 12 demonstra os valores de resistência à compressão dos microconcretos.

Figura 12: Resistência e fator de eficiência de microconcretos com diferentes teores de cenosfera



Fonte: Do autor, 2016

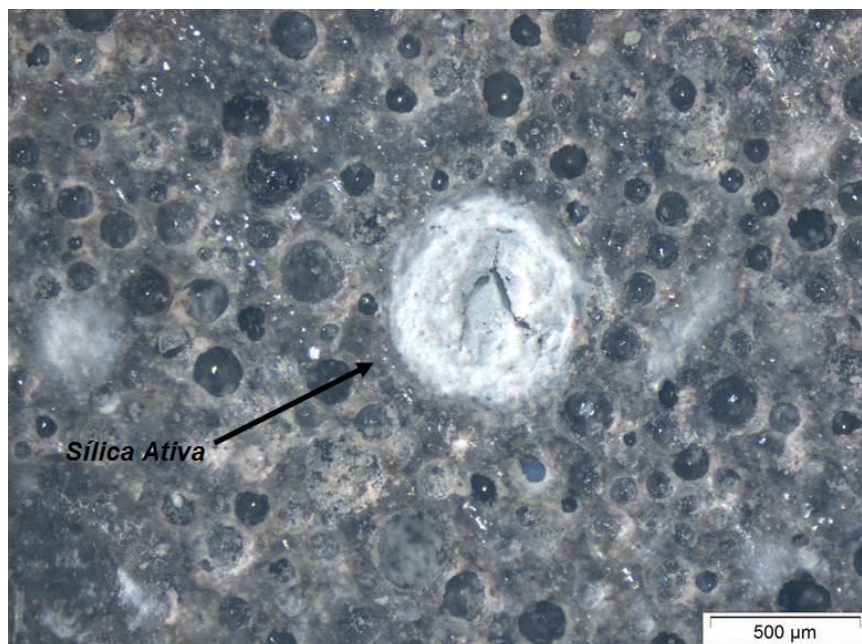
Nota-se novamente que o emprego de até 67% de cenosfera como agregado não apresenta grande influência na resistência à compressão do material, com redução



de somente 6% em relação ao HP0. O microconcreto com 67% de substituição também apresentou o maior fator de eficiência entre todas as amostras. Isso demonstra o excelente comportamento da cenosfera frente a tensões tão elevadas, demonstrando o seu potencial para fabricação de concretos leves e de alta resistência.

Quando a areia é completamente substituída pela cenosfera, obtém-se microconcretos com densidade menor de  $1500 \text{ kg/m}^3$ . Com a densidade reduzida, a perda em resistência foi de aproximadamente 21%. Conseqüentemente, o fator de eficiência dos microconcretos diminui ligeiramente e não segue a linha de tendência crescente. Esta redução no fator de eficiência pode ser atribuída a dois fatores: a falta de agregados de maiores dimensões e que dão maior resistência ao concreto, já que a granulometria da cenosfera é menor que a da areia lavada; e menor trabalhabilidade da mistura, fazendo com que a sílica ativa não pudesse ser devidamente homogeneizada. Esta falta de homogeneização é percebida na Figura 13, onde a imagem microscópica mostra sílica ativa aglomerada em meio a matriz, com aglomerados maiores que a própria cenosfera. Provavelmente, um maior tempo de mistura seria necessário para eliminar estes aglomerados tão grandes.

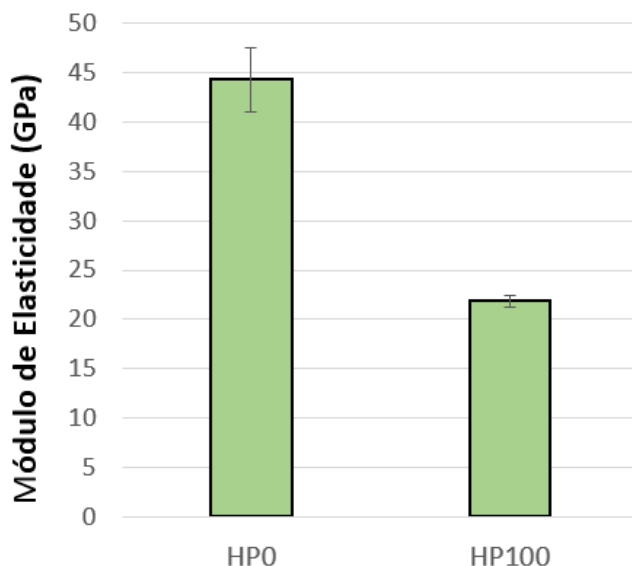
Figura 13: Sílica ativa aglomerada e não misturada à matriz.



Fonte: Do autor, 2016

O módulo de elasticidade dos microconcretos HP0 e HP100 também foram testados e é exibido na Figura 14. É de conhecimento geral que o módulo de elasticidade do concreto está diretamente ligado às propriedades dos agregados utilizados. Conseqüentemente, era esperado que a substituição da areia pela cenosfera (de sólidos por vazios) reduziria a rigidez do material. A redução do HP100 foi de aproximadamente 50% em relação ao HP0. Microconcretos com diferentes teores de cenosfera provavelmente possuiriam valores intermediários das duas amostras aqui testadas.

Figura 14: Módulo de elasticidade dos microconcretos HP0 e HP100

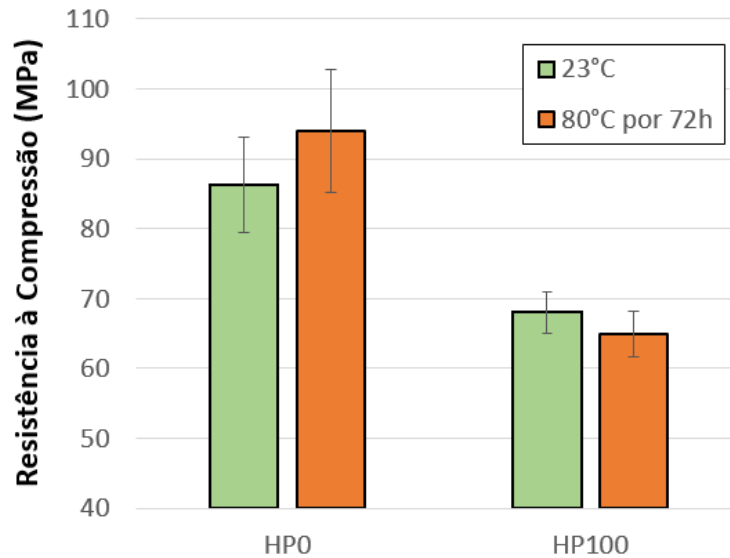


Fonte: Do autor, 2016

Adicionalmente, corpos de prova da mistura HP0 e da HP100 foram curados a 80 °C por 72 h e comparados com corpos de prova curados a 23 °C. O emprego de cura térmica é utilizado principalmente em concretos de alta resistência com objetivo de acelerar a reação do cimento Portland e obter resistências maiores (Russell, 2013; Camp). Além disso, autores demonstraram que a cenosfera reage pozolanicamente quando submetida a temperatura de 80 °C (Wang, Zhang et al. 2012), o que poderia apresentar efeitos positivos nas propriedades do concreto.

Porém, percebe-se na Figura 15 que a cura térmica de três dias não apresentou efeitos positivos na resistência a compressão da HP100. Pelo contrário, a resistência obtida foi ligeiramente inferior do que corpos de prova curados normalmente. Efeito contrário foi observado no caso do HP0, beneficiado pela maior temperatura na cura.

Figura 15: Influência da cura térmica nos microconcretos HP0 e HP100



Fonte: Do autor, 2016

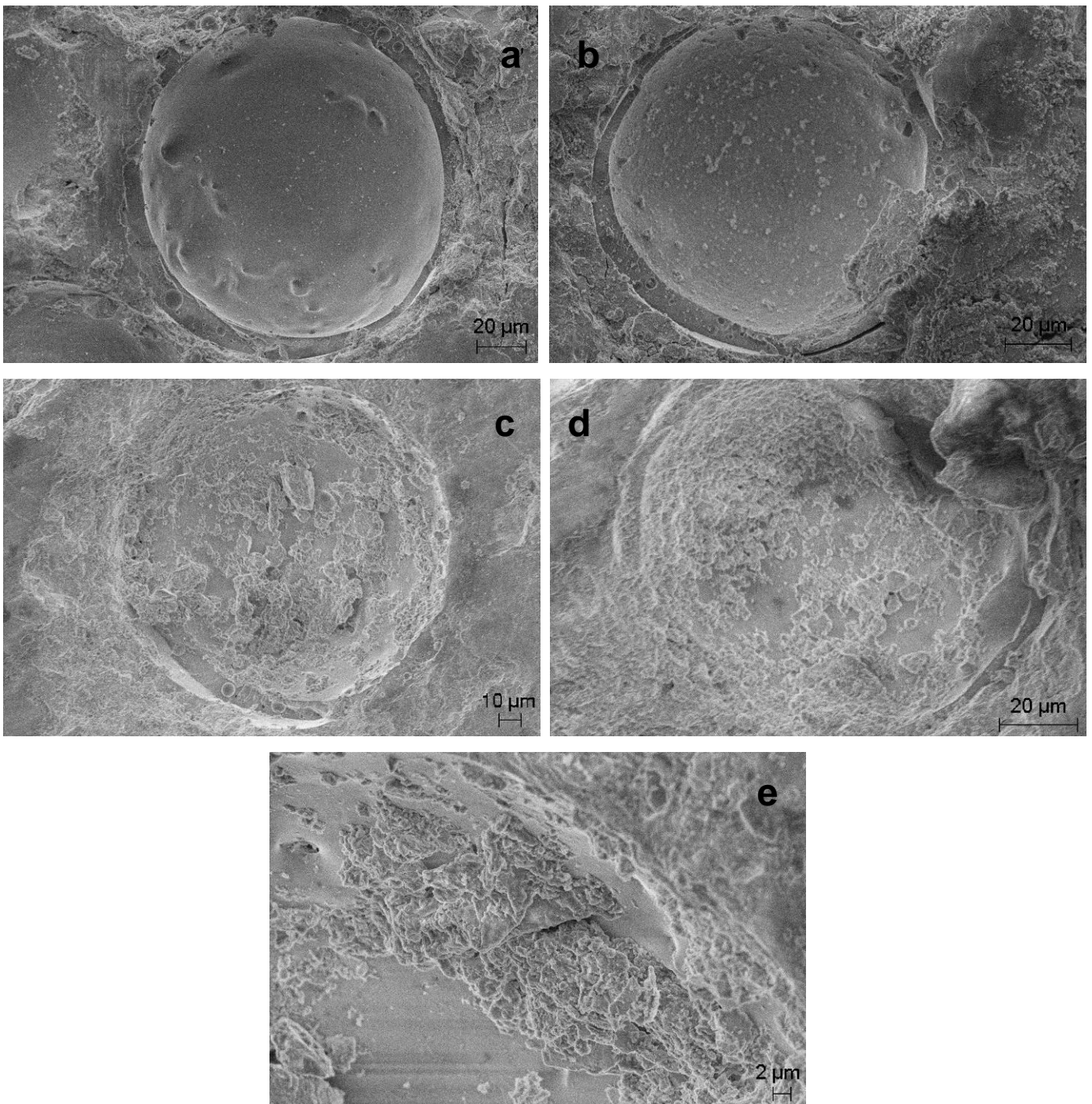
Para averiguar o comportamento químico da cenosfera submetida à cura térmica, imagens microscópicas do microconcreto HP100 com diferentes métodos de cura são mostradas na Figura 16. Nota-se que enquanto o interior das cenosferas do microconcreto curado a temperatura ambiente demonstram uma superfície lisa e homogênea (Figura 16a, b), a parte interna das cenosferas do microconcreto curado a uma temperatura de 80 °C por 72 h apresentam a formação de novos cristais (Figura 16c, d). Além disso, os microconcretos curados termicamente não apresentam uma interface tão visível entre pasta e cenosfera, comparando com os curados normalmente, indicando novamente que houve reação entre o agregado e a matriz.

A Figura 16e exibe os cristais formados com maior resolução. Os novos produtos não apresentam forma definida, apenas precipitações em flocos, indicando que estes são CSH provavelmente provindos da reação entre a sílica encontrada na cenosfera e hidróxido de cálcio da pasta de cimento.

No entanto, a formação destes novos produtos cimentantes não refletiu no comportamento mecânico das amostras, possivelmente pelo fato que a formação do CSH foi apenas superficial, e um tempo maior de cura seria necessário para que essa reação pozolânica se tornasse significativa e apresentasse alguma influência no comportamento macroscópico do microconcreto. Outro fator a ser considerado é que os microconcretos já possuíam sílica ativa em sua composição, que também

reage pozolanicamente. Dessa forma, pouca quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  estaria disponível para interagir com a cenosfera.

Figura 16: Imagens no MEV do microconcreto HP100 curado a temperatura ambiente (a, b), e curada termicamente a 80 °C por 72 h (c, d); Produto formado após cura térmica (e)



Fonte: Do autor, 2016

#### 4. CONCLUSÃO

Utilizando a cenosfera fornecida pela empresa Engie Energia, foram produzidos materiais cimentícios ultraleves com propriedades mecânicas equivalentes aos com densidades convencionais.

A cenosfera é composta por partículas esféricas de tamanho médio de 248  $\mu\text{m}$ , composto por cerca de 9,5% de matéria orgânica. A parte inorgânica e cristalina é predominada pela mulita e pequena quantidade de calcita. Também foi descoberto que a cinza volante da termoelétrica é composta por 0,2% de cenosfera, fazendo sua separação viável para aplicações especiais na construção civil.

Quando substituem agregados de mesmo tamanho, a cenosfera melhora a trabalhabilidade e coesão das mistura, devido a sua esfericidade. No entanto, quando substituem agregados de tamanho maior, ela acaba por aumentar a consistência da mistura fresca devido ao seu tamanho reduzido.

Quando empregadas em argamassas de bloco estrutural, teores de até 67% de cenosfera em substituição à areia melhoram as propriedades mecânicas do material. Já traços com 100% de cenosfera como agregado atingem densidades baixíssimas, menores que  $700 \text{ kg/m}^3$ , e se tiverem seu consumo de cimento aumentado, apresentam resistência mecânica equivalente às argamassas de maior densidade. A cenosfera também atribuiu maior estabilidade térmica ao material.

Foi encontrado que o teor de 67% de cenosfera também foi o teor que apresentou melhor resultado quando adicionado em microconcretos de alta resistência. Com um teor de cenosfera de 100%, argamassas com aproximadamente 70 MPa e apenas  $1500 \text{ kg/m}^3$  foram obtidos. Ao realizar-se cura térmica do microconcreto com cenosfera, o resíduo acabou apresentando certa atividade pozolânica, apesar desta reação não ser suficiente para influenciar as propriedades do material.

De maneira geral, a utilização de cenosfera como agregado miúdo melhora o fator de eficiência dos materiais cimentícios, sendo que seu emprego em até dois terços se mostra como o teor ideal para fabricação de compósitos com resistência elevada e com densidade significativamente reduzida. Assim, este estudo demonstra que a utilização da cenosfera é viável e tem potencial para produção de concreto ultraleve com função estrutural.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecimento especial à empresa Engie Energia pelo fornecimento da cenosfera durante o decorrer da pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736: **Cimento Portland pozolânico**. Versão Corrigida:1999. (1991)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. (2007)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 18: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo**. (2012)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: **Areia normal para ensaio de cimento** – Especificação. (2015)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Versão Corrigida: 1997. (1996)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: **Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão**. (2008)

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos** - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. (2005)

ASTM C270-14a, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2014).

ASTM C618-15, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2015).

AHMARUZZAMAN, M.. A review on the utilization of fly ash. Progress in energy and combustion science 36(3): 327-363. (2010)

ANEEL. **Capacidade de Geração do Brasil**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso: novembro de 2016.

ARIZMENDI-MORQUECHO, A., et al.. High temperature thermal barrier coatings from recycled fly ash cenospheres. Applied Thermal Engineering 48: 117-121. (2012)

BIJU-DUVAL, P. M. A new porous material based on cenospheres. (2007)

BP GLOBAL. **BP Global Outlook: Outlook to 2035.** Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2016/bp-energy-outlook-2016.pdf>. Acesso: novembro de 2016.

CHÁVEZ-VALDEZ, A., et al.. "Ultra-low thermal conductivity thermal barrier coatings from recycled fly-ash cenospheres." *Acta Materialia* 59(6): 2556-2562. (2011)

DE SOUZA, A. A. A., MORENO JR, A. L.. Assessment of the influence of the type of aggregates and rehydration on concrete submitted to high temperatures. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 3.4: 477-493. (2010)

FOMENKO, E. V., et al.. Fly Ash Cenospheres: Composition, Morphology, Structure, and Helium Permeability. *World of Coal Ash (WOCA) Conference*. (2011)

CAMP, Charles. Design and Control of Concrete Mixtures. **Chapter 17: High-Performance Concrete.** Disponível em: [http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA\\_manual/Chap17.pdf](http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap17.pdf). Acesso: novembro de 2016.

FOX, John M. "Changes in fly ash with thermal treatment." *World of Coal Ash, Conference Proceedings, University of Kentucky, Lexington*. 2005.

MOHEBBI, Mina. RAJABIPOUR, Farshad. SCHEETZ Barry E.. Reliability of Loss on Ignition (LOI) Test for Determining the Unburned Carbon Content in Fly Ash. (2015).

RUSSELL, Henry G., GRAYBEAL, Benjamin A.. Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community. No. FHWA-HRT-13-060. (2013).

SANTISTEBAN, Juan I., et al. "Loss on ignition: a qualitative or quantitative method for organic matter and carbonate mineral content in sediments?." *Journal of Paleolimnology* 32.3: 287-299. (2004).

SCHMIDT, Michael. FEHLING, Ekkehard. "Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe." *ACI Special publication* 228: 51-78. (2005)

SNIC, Sindicato Nacional da Indústria do Cimento. **Produção Nacional de Cimento por Regiões e Estados (t).** Disponível em: <http://www.snic.org.br/numeros/numeros.asp?path=ProducaoRegional2015.gif>. Acesso: novembro de 2016.

TRACTEBEL ENERGIA. Boas Novas. Informativo da Tractebel Energia. Ano 9, Nº 46, 2º trimestre, (2013).

UYGUNOĞLU, T., TOPÇU, İ. B.. Thermal expansion of self-consolidating normal and lightweight aggregate concrete at elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 23(9), 3063-3069. (2009)

WANG, J.-Y., et al.. Stability of cenospheres in lightweight cement composites in terms of alkali-silica reaction. *Cement and Concrete Research* 42(5): 721-727. (2012)

WU, Y., et al.. Development of ultra-lightweight cement composites with low thermal conductivity and high specific strength for energy efficient buildings. *Construction and Building Materials* 87: 100-112. (2015)