

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA-CAMPUS ARARANGUÁ

CHARLES LONDERO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

ARARANGUÁ

2017

CHARLES LONDERO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina-Campus Araranguá

Aprovado em: ____/____/____

Banca examinadora:

Professora Tatiana Pineda Vásquez

Professora Maria Ángeles Lobo

Professor Juan Daniel Martinez

Professor Cezar Casagrande

VALORIZAÇÃO DA CINZA DA CASCA DE ARROZ COM APLICAÇÃO NO CONCRETO

Charles Londero*

RESUMO

A casca de arroz, utilizada como fonte de energia em indústrias de beneficiamento de arroz, converte-se em cinza residual depois da queima. Esse resíduo, ainda sem um destino adequado, é muitas vezes depositado em grandes áreas abertas provocando grande impacto ambiental. Este trabalho teve como objetivo a valorização da cinza de casca de arroz (CCA), avaliando a viabilidade de sua aplicação na produção de concretos, como substituição parcial do cimento. Foi realizado a caracterização da CCA por meio da análise de fluorescência de raios-X, onde verificou-se o elevado percentual de sílica (SiO_2) na sua constituição, o que torna interessante sua aplicação em matriz cimentícia. Verificou-se as propriedades mecânicas das amostras de concreto produzidos a partir de 4 composições, um referência (sem adição de CCA), e outros três com 10%, 15% e 20% de CCA em substituição ao Cimento CP V ARI. Os ensaios apresentaram baixa resistência à compressão em relação ao acréscimo de CCA, para os primeiros dias, porém, com taxas de ganho de resistência superiores para as composições com maiores percentuais de CCA em relação à referência. Aos 28 dias a composição referência obteve resistência à compressão superior aos demais testes, mas com tendência a ser ultrapassado pela composição 4 com 20% de CCA. As análises financeiras apresentaram ótima viabilidade econômica para a utilização da CCA no concreto, porém, para determinadas aplicações que não necessitam de valores elevados de resistência nos primeiros períodos de tempo.

Palavras-chave: Cinza da casca de arroz, pozolanas, resíduos industriais, sustentabilidade.

* Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88900-000. E-mail: ch_londero@hotmail.com

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 3 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 4 |
| 2.1 | ARROZ E SUA PRODUÇÃO | 4 |
| 2.2 | CASCA DE ARROZ | 5 |
| 2.3 | PROCESSO DE COMBUSTÃO | 5 |
| 2.4 | CINZA DA CASCA DE ARROZ | 7 |
| 2.5 | APLICAÇÕES DA CINZA DA CASCA DE ARROZ | 9 |
| 2.6 | CONCRETO | 10 |
| 2.7 | CIMENTO | 11 |
| 2.8 | CONCRETO COM CINZA DA CASCA DE ARROZ | 11 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 12 |
| 3.1 | MATERIAIS | 13 |
| 3.1.1 | <i>Brita 0</i> | 13 |
| 3.1.2 | <i>Brita 3/4</i> | 14 |
| 3.1.3 | <i>Areia natural fina</i> | 15 |
| 3.1.4 | <i>Areia de britagem</i> | 16 |
| 3.1.5 | <i>Aditivo superplastificante</i> | 16 |
| 3.1.6 | <i>Água</i> | 17 |
| 3.1.7 | <i>Cimento</i> | 17 |
| 3.1.8 | <i>Cinza da casca de arroz</i> | 18 |
| 3.2 | DOSAGEM DO CONCRETO | 19 |
| 3.3 | CONFORMAÇÃO DOS CORPOS-DE-PROVA | 21 |
| 3.4 | TESTE DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | 25 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 26 |
| 4.1 | CONSISTÊNCIA DO CONCRETO | 27 |
| 4.2 | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO | 28 |
| 4.3 | VALOR DA CCA E PRODUÇÃO DE CONCRETO | 32 |
| 5 | CONCLUSÃO | 35 |
| | ABSTRACT | 36 |
| | REFERÊNCIAS | 37 |
| | AGRADECIMENTOS | 41 |

1 INTRODUÇÃO

Segundo o IBGE (2017), com produção de 12,3 milhões de toneladas colhidas na safra 2016/2017, o Brasil situa-se entre os grandes produtores mundiais de arroz. Após a colheita, na etapa de beneficiamento do grão, são gerados diferentes resíduos, onde a casca do arroz se destaca, principalmente devido ao grande volume gerado (GONÇALVES, 2009).

A queima da casca de arroz para geração de energia, se mostra uma alternativa ecológica, ética e economicamente rentável, gerando como principal resíduo a cinza (HOFMANN et. al., 2010). Essa cinza é largamente encontrada em regiões de grande produção do grão, considerada como um resíduo agroindustrial (POUEY, 2006).

O aproveitamento de cinzas, provenientes de processos geradores de energia, como adições minerais do concreto é uma das técnicas que vem sendo estudada por vários autores. Grande parte destas cinzas possui propriedades pozolânicas, ou seja, quando finamente moídos e em presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos mais densos e menos solúveis.

Segundo Pouey (2006), a adição de CCA no concreto, em substituição parcial do cimento, reduz o alto consumo de recursos naturais não renováveis e o impacto ambiental gerado pelo descarte da CCA no meio ambiente, tornando o processo mais sustentável.

Para fins de validação, a utilização da CCA em concretos deve passar por diversos testes normatizados, medindo-se sua resistência mecânica para atender a exigências iguais ou superiores aos materiais já existentes no mercado (BEZERRA, 2011).

Para o desenvolvimento deste trabalho, resolveu-se empregar a CCA residual da termoelétrica da empresa Arroz Realengo, localizada no Rio Grande do Sul, tendo como motivação a sua valorização. Além disso, o presente trabalho servirá de apoio para futuras termoelétricas à base de casca de arroz na região do vale do Araranguá, polo industrial de empresas de concreto, que possibilita uma ótima logística em relação ao transporte da CCA.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo fazer uma análise comparativa da influência da substituição parcial em volume do cimento Portland CP-V-ARI pela cinza da casca de arroz comercial em diferentes teores (0%, 10%, 15% e 20%) nas propriedades mecânicas do concreto convencional, nas idades de 3, 7 e 28 dias, sendo as amostras de concreto avaliadas quanto a resistência à compressão.

Adicionalmente, o trabalho irá considerar os custos dos materiais para produção do concreto, equipamento para moagem e transporte, verificando se a produção de concreto com CCA tem viabilidade econômica, tanto para a indústria termoeétrica, quanto para a empresa de concreto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir estão descritos os principais pressupostos teóricos relacionados ao tema da presente pesquisa.

2.1 Arroz e sua produção

Segundo Gurgel (2012), o arroz é um cereal cultivado em todos os continentes por cerca de 120 países, que dificilmente sofrerá substituição por outro tipo de grão por ser um hábito indiscutível da população mundial.

Na Ásia, estão os oito maiores produtores mundiais de arroz, com a China em 1º lugar, contribuindo com uma produção equivalente a 27% da mundial. O Brasil situa-se em 9º lugar, com 1,6% da produção mundial (FAO, 2013).

A produção de arroz brasileira alcançou 12,3 milhões de toneladas em 2017, aumento de 16,2% em relação à 2016 (IBGE, 2017). Santa Catarina colheu 1.176.235 toneladas de arroz na safra 2016/2017, um número 14,57% superior à safra passada, quando foram colhidas 1.026.633 toneladas do grão (EPAGRI, 2017).

A cultura de arroz expressa grande adaptabilidade a variadas condições de clima e de solo, sendo considerada uma espécie com elevado potencial de aumento da produção, podendo ser amplamente utilizada para o combate da fome no mundo (SANTOS et al, 2006).

Segundo Gomes (2004), o mercado mundial desse cereal continua com a demanda em crescimento, tanto na elevação da qualidade e diferenciação dos produtos quanto em volume, atendendo a exigência de cada perfil de consumidores.

2.2 Casca de arroz (CA)

A casca do arroz, removida durante o beneficiamento do grão, é um resíduo derivado do rejeito agrícola de atividades industriais dos produtores de arroz espalhados pelo mundo. Seu baixo valor comercial ou interesse para uso na agricultura tem causado grandes problemas aos produtores, devido à necessidade de armazenamento desse resíduo (GONÇALVES, 2009).

Segundo Gurgel (2012), a CA é um material fibroso, cujos maiores constituintes são celulose (50%), lignina (30%) e resíduos inorgânicos (20%). O resíduo inorgânico contém, em média, 95% a 98%, em massa, de SiO_2 , na forma amorfa hidratada, perfazendo 13% a 29% do total da casca.

Esta variação do percentual de sílica na casca de arroz depende da safra, ou seja, da variedade plantada, do clima e das condições do solo, além da localização geográfica (GURGEL, 2012).

Patel et al. (1987), estudando o efeito de tratamentos químicos e térmicos em material proveniente da Índia, encontraram percentuais de 22,12% de SiO_2 , 73,8% de material orgânico e água e, em torno de 4% de outros elementos constituintes como Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO e MnO_2 . A lignina e a celulose são removidas durante a queima da casca.

Considerando valores médios, a massa unitária da casca de arroz é 101 kg/m³, a massa específica aparente é de 900 kg/m³ e a massa específica de 1400 kg/m³ (AGOPYAN, 1991).

Em razão de seu alto poder calorífico (cerca de 16720 kJ/kg) e custo praticamente nulo, a casca de arroz é empregada como combustível na própria indústria, necessários para os processos de secagem e parbolização dos grãos de arroz (DELLA et al., 2001).

2.3 Processo de combustão

O resultado do processo de combustão da CA é a cinza da casca de arroz (CCA), e suas características podem variar, dependendo do processo de queima ao qual a casca é submetida (Silva et al., 2007). Esse processo é influenciado pela combinação de três variáveis principais: tipo de equipamento utilizado (a céu aberto, fornalhas tipo grelha ou

leito fluidizado), temperatura de queima e tempo de exposição durante o processo (James e Rao, 1986).

A combustão controlada pode ser um método eficiente para liberar a sílica da casca de arroz, porém, a quantidade de carbono resultantes na cinza (resíduo) e as propriedades de SiO₂ dependem significativamente das condições que prevalecem durante a combustão (James e Rao, 1986).

A CCA tende a ter a cor preta devido à presença de carbono residual, porém, ela também pode ser cinza, púrpura ou branca dependendo das impurezas presentes e das condições de queima (HUSTON, 1972).

Segundo Bartha (1995), a queima da casca de arroz em temperaturas de no máximo 500°C, gera CCA constituída basicamente de sílica amorfa e rica em carbonos fixos, a partir de 750°C, a cinza torna-se mais clara, devido à oxidação dos carbonos fixos, e a sílica mais cristalina.

Segundo Metha (1977), a CCA obtidas durante a combustão apresenta formas estruturais variáveis (amorfa e/ou cristalina), dependendo do tipo de queima (grelha, leito fluidizado), tempo e temperatura de oxidação.

A Tabela 1 apresenta de forma reduzida, o efeito de condições de queima nas propriedades de algumas CCA (METHA, 1977).

Tabela 1 - Efeito das condições de queima nas propriedades da CCA.

| Condições de queima (°C/tempo) | Ambiente de combustão | Propriedades da CCA | |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------------|---|
| | | Estrutura da sílica | Área superficial (m ² /g) |
| 500 – 600 / 1 min. | Moderada oxidação | Amorfa | 122 |
| 500 – 600 / 30 min. | Moderada oxidação | Amorfa | 97 |
| 500 - 600 / 2 horas | Moderada oxidação | Amorfa | 76 |
| 700 – 800 / 15 min. | Moderada oxidação | Amorfa | 42 |
| 700 – 800 / 15 min | Alta oxidação | Cristalina parcial | 10 – 6 |
| > 800 / > 1h | Alta oxidação | Cristalina | < 5 |

Fonte: Metha (1977).

Vários autores estudaram a questão da influência das condições de temperatura e tempo de exposição no processo de combustão da CCA. Boateng e Skeete (1990) entendem que para a cinza se apresentar amorfa e reativa, a temperatura de queima deve

manter-se entre 800 e 900°C, porém, segundo Sugita et al. (1993), a maior atividade pozolânica é para a queima em temperaturas inferiores a 600 °C e superiores a 500 °C e por tempo não superior a 60 minutos.

2.4 Cinza da casca de arroz (CCA)

A cinza de casca de arroz é o resíduo da cadeia produtiva do arroz, onde segundo James e Rao (1986) e Gurgel (2012), é uma importante fonte renovável de sílica, pois contém entre 90% e 95% de sílica, com percentuais menores de álcalis e outros elementos.

Segundo Silveira e Dal Molin (1995), a CCA equivale a cerca de 20% da casca queimada, sendo um material leve, volumoso e altamente poroso, podendo ser reduzido a pó fino com um consumo de energia relativamente baixo.

A coloração da cinza pode variar devido às mudanças de temperatura contidas no processo de queima e às impurezas. A cor branca da CCA aponta para um material oxidado, já a cor escura possui maior quantidade de carbono e menor quantidade de matéria orgânica queimada (SANTOS, 2006).

A composição química das CCA sempre apresenta elevados teores de sílica, independentemente dos parâmetros empregados no processo de combustão, conforme pode ser observado na Tabela 2 divulgada por Silveira (1996) e complementada neste trabalho.

Além dos processos de combustão, as características CCA também dependem da origem do arroz, conforme já comentado no item 2.2. Segundo Metha (1994), cinzas queimadas pelo mesmo método e com controle de combustão, obtidas a partir da CA de diferentes origens, apresentaram características diferentes: uma cinza originária da Arkansas apresentou um percentual de 90% de sílica amorfa, enquanto outra de Louisiana, 100%

Observa-se na Tabela 2 que a sílica é o elemento constituinte com maior percentual, variando de 72,1 a 94,7%. Os baixos teores de sílica, por exemplo, 72,1 e 78,6%, se refletem no elevado percentual de perda ao fogo, respectivamente 24,3 e 11,8% indicando que são cinzas pouco queimadas com grande quantidade de carbono residual.

Tabela 2 - Composição química de cinza da casca de arroz segundo vários autores.

| Autor | Composição típica em óxidos (% em peso) | | | | | | | |
|-----------------|---|--------------------------------|--------------------------------|------|------|------|------------------|------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MnO | MgO | CaO | K ₂ O | PF |
| Silveira (1996) | 91,97 | nd | 0,50 | nd | 1,05 | 0,85 | 0,60 | nd |
| Cook (1977) | 93,0 | 0,60 | 0,15 | nd | 0,42 | 0,43 | 1,05 | 2,77 |
| Sallas (1986) | 91,26 | 0,94 | 0,37 | nd | 0,88 | 2,15 | nd | nd |
| Cincotto(1988) | 94,70 | 0,09 | 1,46 | nd | 0,95 | 0,99 | 1,75 | 7,29 |
| Guedert (1989) | 93,11 | 0,92 | 0,40 | nd | 0,85 | 0,52 | 1,12 | nd |
| Farias (1990) | 91,78 | 0,60 | 0,34 | nd | 0,52 | 0,50 | 1,30 | nd |
| Sugita (1992) | 90,0 | 0,1 | 0,40 | nd | 0,3 | 0,40 | 2,41 | 4,2 |
| Isaia (1995) | 78,6 | 2,3 | 2,3 | nd | 0,80 | 1,0 | 0,56 | 11,0 |
| Fonseca (1999) | 83,68 | 0,17 | 0,17 | 0,66 | nd | 1,03 | 3,65 | 8,54 |
| Della (2001) | 72,1 | 0,3 | 0,15 | 0,15 | 0,7 | 0,43 | 0,72 | 24,3 |
| Qingge (2005) | 92,4 | 0,3 | 0,40 | 0,11 | 0,30 | 0,70 | 2,54 | 2,31 |

Fonte: Silveira (1996) – adaptado e complementado.

Notas: PF – perda ao fogo, nd – não divulgado.

Segundo Hoppe et al. (2005), as características físicas usualmente determinadas para a CCA são área superficial, tamanho das partículas, massa específica, umidade, perda ao fogo e distribuição granulométrica.

A Tabela 3 apresenta as medidas de área superficial e massa específica, obtidas por Hoppe et al. (2005) para CCA proveniente de usina termelétrica, com queima controlada, do Rio Grande do Sul, e por Agopyan (1991) para uma CCA proveniente de São Paulo.

Tabela 3 - Exemplos de características físicas da CCA.

| Autor | Tipo de forno | Área Superficial | | Massa Específica (kg/m ³) |
|-------------------------------|--------------------|--------------------------------|--|--|
| | | Blaine (m ² /kg) | Adsorção N -Bet (m ² /g) | |
| AGOPYAN (1991) | Comum Leito | 145 | 18,5 | 1880 |
| | fluidizado | 419 | 6,0 | 2110 |
| HOPPE <i>et al.</i> (2005) | Usina termelétrica | - | 4,0 | 2100 |

Fonte: Hoppe et al. (2005), Agopyan (1991).

Como tratamento físico para a CCA, o mais empregado é a moagem. Muitos autores realizaram moagem em moinho de bolas, via seca (DAFICO, 2001; FERREIRA, 1999; FONSECA, 1999, RÊGO, 2001; SENSALÉ, 2000; SILVEIRA, 1996), obtendo diâmetros médios na faixa de 7 a 8 μm . Alguns autores (DELLA, 2001 e SOUZA et al., 2000), no entanto, empregaram moagem via úmida.

Santos (2006), utilizando diferentes CCA residuais, verificou que diferentes tempos de moagem levaram a diferentes áreas superficiais do material, concluindo que cada CCA produzida por um determinado processo de queima possui seu tempo de moagem ótimo para atingir maior pozolanicidade.

2.5 Aplicações da CCA

Foletto et. e al. (2005) descreve que são variadas as possibilidades do uso da CCA, como o aproveitamento da sílica pura, utilizada para a fabricação de vidros, cerâmica, tijolos, cosméticos e detergentes industriais, sendo obtida através do processo de aquecimento realizado para remover o carbono residual contido na queima, possibilitando uma quantidade de 95% de sílica pura.

Além disso, segundo Foletto et. e al. (2005), uma das técnicas que vem sendo estudada está relacionada ao aproveitamento de cinzas provenientes de processos geradores de energia como adições minerais do concreto. Grande parte destas cinzas possui propriedades pozolânicas, ou seja, quando finamente moídos e em presença de umidade, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio formando compostos mais densos e menos solúveis.

A cinza da casca de arroz é uma pozolana, e contribui em concretos e argamassas tanto pelo efeito filer como pelo efeito pozolânico. Suas principais reações químicas benéficas são aquelas com o hidróxido de cálcio (CH), que reagi quimicamente e precipita na forma de Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), isto é, se transforma de material pouco resistente para um material muito resistente e aderente. Com esta reação, tem sido possível produzir um concreto mais econômico, com baixo calor de hidratação, mais resistentes com porosidade desconectada e com resistividade elétrica maior, mais durável frente a vários meios agressivos (SILVA, F.G.;2006).

2.6 Concreto

Segundo Mehta e Monteiro (2008), existem três razões que tornam o concreto essencial na engenharia. A primeira razão são as diferentes formas com que o concreto pode ser trabalhado. O concreto fresco possui resistência plástica, favorecendo a sua entrada em moldes de variados tamanhos. Após algumas horas, o concreto cura possibilitando retirar suas fôrmas, pois ele torna-se uma massa rígida. A segunda é a propriedade de resistência do concreto à água, que, diferentemente de materiais como madeira e aço, não possui grave deterioração quando em contato com a mesma. A terceira razão para o uso do concreto é o baixo custo e a rapidez com que ele é disponível na obra.

O Cimento Portland, ao ser misturado com a água, forma uma mistura fluida, que depende da quantidade de água adicionada. Para fazer o concreto de Cimento Portland, é necessário conter essencialmente cimento, água e agregados, além de ser possível a adição de fibras, pigmentos e aditivos. A proporção desses materiais na mistura é buscada pela tecnologia do concreto, com intuito de adquirir propriedades mecânicas, durabilidade e trabalhabilidade (ISAIA, 2007).

O material escolhido para construir deve suportar as forças a que será submetido. A resistência é uma propriedade mecânica que leva em consideração a tensão necessária para o rompimento do material (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

O concreto tem como principal característica a resistência à compressão simples, quanto maior a quantidade de cimento, maior será a resistência do concreto. Essa variação se dá, principalmente, pela relação água/cimento (a/c) (RECENA, 2002).

A trabalhabilidade é uma propriedade do concreto de fluir, sem que perca a homogeneidade. Existem fatores internos e externos que afetam a trabalhabilidade do concreto. Com relação aos fatores internos, pode-se citar a composição e, através dele, as relações água/cimento e ainda a proporção entre agregado graúdo e miúdo, denominada granulometria. Quanto aos fatores externos, devem ser considerados o modo de mistura e o tipo de transporte, através de bombas, guinchos ou calhas (PETRUCCI, 1998).

A durabilidade do concreto dependerá do local onde está inserido e como será mantido, além de fatores originários desde sua produção, como porosidade e processos de adensamento e cura. Por ser um material cerâmico, o concreto pode retrair, fazendo com que pequenas fissuras sejam causadas. Isso permite que a água e outros materiais abrasivos percolem em seu interior causando degradação. (RECENA, 2002).

2.6.1 Cimento

O cimento é um material em pó fino que possui propriedades aglomerantes, aglutinantes e ligantes que endurece com a colocação de água. Após o endurecimento, quando em contato com a água novamente, não é mais decomposto (ABCP, 2002).

Segundo Bastos (2006), todos os tipos de cimento tem em sua composição o clínquer, que o torna o principal componente do cimento.

Para definir as propriedades do cimento, são feitas adições ao clínquer, tais como materiais carbonáticos e pozolânicos, gesso e escórias de alto-forno (BASTOS, 2006).

O cimento Portland de alta resistência inicial, CP V-ARI, é um tipo de cimento que possui particularidades quando comparados aos demais. A sua fabricação, com adições diferenciadas de calcário e argila na produção do clínquer e a moagem mais fina do cimento, faz com que ele atinja resistências maiores com mais rapidez (ABCP, 2002).

2.7 Adição de CCA no concreto

O concreto feito com a CCA em substituição ao cimento tem sido reportado por diversos autores. Segundo Mehta (1992) a CCA acelera o ganho de resistência e reduz a segregação e a exudação, tornando o concreto com melhor trabalhabilidade.

Segundo a ABNT NBR 12653 (2012), pozolanas são materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio para formar compostos com propriedades aglomerantes.

O emprego da CCA tende a promover melhorias nas propriedades mecânicas e na durabilidade de concretos, além de reduzir a temperatura de hidratação (CORDEIRO et al., 2009), e pode ser utilizada como uma fonte alternativa da sílica ativa (TASHIMA, 2006).

Essas melhoras se devem ao fato que durante o processo de hidratação do cimento, além de se formar produtos cimentantes caracterizados como gel do tipo C-S-H, também é liberado cerca de 20% de hidróxido de cálcio que acabam por reagir com a pozolana para formar novos produtos cimentantes, similares aos iniciais, diferenciados apenas pela relação Si/Ca, tendo como resultado a produção de fases químicas com maior estabilidade e poder aglomerante (CARMO; PORTELLA, 2008).

A incorporação da CCA também modifica a microestrutura da pasta de cimento, atuando fisicamente como filer inerte, através do efeito filer, pois devido ao menor diâmetro de suas partículas, a CCA exerce o papel de material de preenchimento, melhorando o empacotamento do sistema diminuindo a quantidade de poros existentes e proporcionando uma melhor coesão à matriz cimentícia essencialmente na microestrutura da zona de transição (TASHIMA et al., 2011).

Porém para que a adição em questão apresente uma alta reatividade, é necessário principalmente que a CCA tenha uma elevada finura, grandes quantidades de SiO_2 + Al_2O_3 em sua composição, e uma mineralogia amorfa (TASHIMA et al., 2011).

Sampaio, Coutinho e Sampaio (2000) pesquisaram o uso de CCA de origem portuguesa em substituição ao cimento com quantidades de 10%, 15% e 20% e concluíram que estes obtiveram maior resistência à compressão e maior resistência à penetração de cloretos, quando comparados com a composição referência sem adição de CCA.

Conforme Nehdi, Duquette e Damatty (2003) o uso de CCA utilizada como suplemento do concreto melhora propriedades como resistência a cloretos e à compressão, além de utilizar um subproduto do arroz e contribuir para a redução de impactos ambientais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental para verificação da resistência do concreto com adição de CCA foi desenvolvido em parceria com a empresa Concretar, atuante no ramo de concreto e argamassa, que forneceu os materiais e o laboratório para confecção dos corpos-de-prova e testes nos mesmos.

Coletou-se CCA na empresa Realengo Alimentos, que possui uma termoeletrica para gerar sua própria energia a partir da combustão da casca do arroz. Após a coleta, a CCA foi levada até o laboratório da empresa Concretar, onde foi realizado o procedimento para confecção dos corpos-de-prova e realização de testes.

O procedimento foi realizado em duas etapas. A primeira etapa consistiu em coletar os materiais (areias, britas, cimento e aditivo) na sede da empresa e realizar a moldagem dos corpos-de-prova, com uma composição denominado referência (sem adição de CCA) e outros três com adições de 10%, 15% e 20% de CCA em substituição

ao cimento, conforme os procedimentos da NBR-5738 (ABNT, 2003) e seguindo os processos de pesagem, desmoldagem, armazenagem e cura.

Na segunda etapa realizou-se a verificação da resistência à compressão conforme a NBR-5739 (ABNT, 2007) a partir do rompimento dos corpos-de-prova de concreto. As idades dos rompimentos foram de 3, 7 e 28 dias.

3.1 Materiais

Todos as análises dos materiais utilizados nesta trabalho são baseados em normas nacionais ou internacionais, realizados em laboratórios.

Os materiais foram selecionados de acordo com a disponibilidade da empresa Concretar, e serão apresentados a seguir.

3.1.1 Agregados

Para a realização dos composições de concreto foi utilizada a brita 0, Figura 1, com procedência da empresa Pavimentadora e Construtora Falchetti – Tubarão (SC), que em conjunto com os demais agregados melhora o preenchimento dos vazios internos, tornando o composição mais homogêneo.

As análises feitas no LEC – Laboratório de Engenharia Civil da UNISUL, verificou que a brita 1 possui dimensão máxima de 9,52mm, de acordo com os parâmetros da NBR-7225 (ABNT, 1993), onde a brita 0 é delimitada através da abertura de peneiras em malhas quadradas, com dimensões de 4,8mm a 12,5mm.

Além disso, com massa específica de 2610 kg/m³ e teor total de argila em 0,3%, se enquadra nos parâmetros da NBR-7211 (ABNT, 2005), que consta as especificações dos agregados para concreto.



Figura 1- Brita 0 selecionada para produção das amostras de concreto (Fonte: Autor)

Utilizou-se também a brita 3/4, Figura 2, com procedência da empresa Pavimentadora e Construtora Falchetti – Tubarão (SC), e com suas análises feitas no LEC – Laboratório de Engenharia Civil da UNISUL.

A brita 3/4 possui dimensão máxima de 19,1mm, estando de acordo com as dimensões delimitadas entre 12,5mm a 25mm da NBR-7225 (ABNT, 1993), através da abertura de peneiras em malhas quadradas.

E segundo NBR-7211 (ABNT, 2005), com massa específica de 2620 kg/m^3 e teor total de argila em 0,1%, a brita 3/4 está de acordo com as especificações dos agregados para concreto



Figura 2- Brita 3/4 selecionada para produção das amostras de concreto (Fonte: Autor)

Na composição foi utilizada a areia natural fina, Figura 3, com procedência de ARGASUL Comércio de argamassa Ltda – Jaguaruna (SC).

A areia fina possui como características dimensão máxima de 0,6mm, massa específica de 2660 kg/m³ e teor de argila em 0,0%, abaixo do máximo de 3,0%, parâmetros dado pela NBR 7211 (ABNT, 2005).



Figura 3 - Areia fina selecionada para produção das amostras de concreto (Fonte: Autor)

Utilizou-se também a areia de britagem (grossa), Figura 4, com procedência da empresa Pavimentadora e Construtora Falchetti – Tubarão (SC), com dimensão máxima de 6,3mm, teor de argila total de 0,9% e massa específica de 2447 kg/m³. Todos os dados dentro dos parâmetros da NBR 7211 (ABNT, 2005).

Cabe salientar que tanto as britas 0, $\frac{3}{4}$; areia natural fina e areia de britagem grossa são armazenadas sem cobertura, utilizadas sem pré-tratamento ou secagem, da mesma maneira que são usadas na fabricação do concreto na empresa Concretar.



Figura 4 – Areia grossa selecionada para produção das amostras de concreto (Fonte: Autor)

3.1.2 Aditivo superplastificante

Para a composição em questão foi adicionado aditivo superplastificante polifuncional da marca MATCHEM, conhecido comercialmente como MAXIMENT NT 17.

Segundo o fabricante, o produto pode ser utilizado em todos os casos onde é necessária redução no fator água/cimento (A/C) do concreto com um maior tempo de trabalhabilidade, além disso, a taxa de redução de água do MAXIMENT NT 17 está entre 6% e 18%, dependendo das características da composição executada e dosagens utilizadas.

O produto é compatível com todos os tipos de cimento Portland, em especial aqueles com baixa quantidade de adição, tipos CII e CPV, atendendo requisitos da NBR 11768 (tipo P e SP) e da ASTM C494 (tipo A e F).

3.1.6 Água

A água utilizada, tanto para a realização da moldagem quanto para a cura dos corpos-de-prova no laboratório de ensaios da empresa Concretar, é proveniente de um poço construído na própria empresa e não sofreu tratamento prévio.

3.1.7 Cimento

Para a realização dos ensaios foi utilizado o Cimento Portland CP V ARI da marca Itambé, de alta resistência inicial. De acordo com o fabricante, tem alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem ao que foi submetido, proporcionando maior rendimento ao concreto.

O produto cumpre as exigências da NBR 5733 (ABNT, 1991) e NBR 5737 (ABNT, 1992), sendo indicado para o uso de concretos e argamassas industrializadas.

A Tabela 4 apresenta a análise química disponibilizado pela empresa Itambé para o Cimento Portland CP V-ARI.

Tabela 4 - Principais compostos químicos constituintes do cimento Portland CP V ARI

| Elemento | SiO ₂ | CaO | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | MgO | Al ₂ O ₃ |
|-----------------|------------------|-------|--------------------------------|-----------------|------|--------------------------------|
| Teor (%) | 18,91 | 60,59 | 2,69 | 2,86 | 4,74 | 4,35 |

Fonte: Cimento Itambé (2013)

O emprego deste tipo de cimento se justifica por ser, comercialmente, o cimento disponível com menor teor de adições, neste caso, filer calcário, e sem adições pozolânicas. Assim, são evitados efeitos combinados de diferentes adições. Desta forma, neste trabalho, o CP V ARI funcionou como cimento-base para a produção dos cimentos com substituição por CCA beneficiada.

3.1.8 Cinza da casca de arroz (CCA)

A cinza da casca de arroz utilizada para os ensaios é proveniente da termoelétrica instalada na indústria Arroz Realengo, em Santo Antônio da patrulha – RS, que beneficia

o arroz e utiliza a casca como combustível na termoelétrica para geração de sua própria energia.

A queima da casca de arroz ocorre com temperaturas entre 800°C e 900°C e pressão interior de 15 Bar, em uma caldeira do tipo grelha.

A caldeira possui uma alimentação de casca de arroz estimada em 1900 kg/hora e 2 entradas de ar, a primeira entrada com vazão de 15390 m³/hora, e a segunda com vazão de 1500 m³/hora.

A Tabela 5 apresenta a análise química por espectrometria de fluorescência de raios X e espectrometria de absorção atômica, realizada no laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais SENAI – Criciúma (SC).

Tabela 5 - Principais compostos químicos constituintes da CCA

| Elemento | SiO ₂ | CaO | Fe ₂ O ₃ | K ₂ O | MgO | MnO | P ₂ O ₅ | Al ₂ O ₃ | pf |
|-----------------|------------------|------|--------------------------------|------------------|------|------|-------------------------------|--------------------------------|------|
| Teor (%) | 89,37 | 0,66 | 0,07 | 2,23 | 0,72 | 0,14 | 0,99 | 0,08 | 5,70 |

Fonte: autor. (pf - perda ao fogo)

A CCA ao natural é muito grossa para ser utilizada em aglomerantes, por isso, sofreu um processo de moagem manual, sendo amassada por um rolo de ferro, simulando um moinho de bolas (equipamento mais empregado para esse tipo de tratamento). Em seguida, a CCA foi submetida a uma peneira com aberturas de 40µm, onde pouco material ficou retido.

A diferença física entre a CCA sem tratamento e CCA com tratamento é apresentada nas figuras 5 (A - sem moagem) e (B – com moagem). Verificou-se que para a mesma quantidade de CCA, após a moagem, o volume diminuiu aproximadamente 60%.

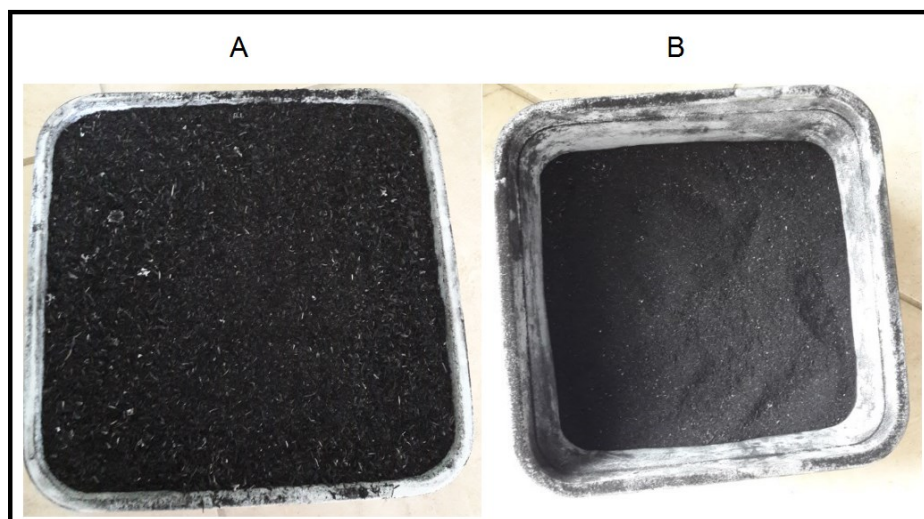


Figura 5 – CoMParação entre CCA sem/com moagem (Fonte: Autor)

3.2 Dosagem do concreto

A composição unitário empregado para a composição do concreto de referência (0%) é o padrão aplicado na empresa Concretar, com relação água/cimento de 0,57, e dosado para atingir resistência de 35 MPa aos 28 dias de hidratação do cimento.

A Tabela 6 apresenta o consumo em quilogramas por metro cúbico de cada material utilizado para a produção de 1m³ de concreto.

Tabela 6 – Composição 1 referência (0%) para produção de 1m³ de concreto

| Item | Composição Unitária | Composição Massa (kg/m ³) |
|---------------|---------------------|---------------------------------------|
| Cimento CP V | 1,000 | 300,00 |
| Areia grossa | 1,922 | 576,45 |
| Areia fina | 1,035 | 310,40 |
| Brita 3/4 | 1,865 | 559,51 |
| Brita 0 | 1,243 | 370,01 |
| Água | 0,570 | 171,00 |
| Aditivo | 0,80% | 2,40 |
| CCA | 0,00% | 0,00 |
| Total: | | 2289,77 |

Fonte: Autor

A partir da composição referência, foram realizadas mais três composições apresentados nas Tabelas 7, 8 e 9, com teores de 10%, 15% e 20% de substituição em volume do cimento Portland CP V pela CCA, considerando a diferença entre os valores de volume específico dos mesmos.

Estas proporções foram escolhidas devido a empresa Concretar já ter realizado testes com proporções similares em amostras de concreto com adição de CCA e visando a obtenção de resistências mecânicas aceitáveis com o maior teor de substituição possível.

Tabela 7 - Composição 2 com 10% de CCA em substituição ao cimento para produção de 1m³ de concreto

| Item | Composição Unitária | Composição Massa (kg/m ³) |
|---------------|---------------------|---------------------------------------|
| Cimento CP V | 1,000 | 270,00 |
| Areia grossa | 1,922 | 576,45 |
| Areia fina | 1,035 | 310,40 |
| Brita 3/4 | 1,865 | 559,51 |
| Brita 0 | 1,243 | 370,01 |
| Água | 0,570 | 171,00 |
| Aditivo | 0,54% | 2,40 |
| CCA | 10,00% | 25,26 |
| Total: | | 2285,03 |

Fonte: Autor

Tabela 8 - Composição 3 com 15% de CCA em substituição ao cimento para produção de 1m³ de concreto

| Item | Composição Unitária | Composição Massa (kg/m ³) |
|---------------|---------------------|---------------------------------------|
| Cimento CP V | 1,000 | 255,00 |
| Areia grossa | 1,922 | 576,45 |
| Areia fina | 1,035 | 310,40 |
| Brita 3/4 | 1,865 | 559,51 |
| Brita 0 | 1,243 | 370,01 |
| Água | 0,570 | 171,00 |
| Aditivo | 0,54% | 2,40 |
| CCA | 15,00% | 37,89 |
| Total: | | 2282,66 |

Fonte: Autor

Tabela 9 - Composição 4 com 20% de CCA em substituição ao cimento para produção de 1m³ de concreto

| Item | Composição Unitária | Composição Massa (kg/m ³) |
|--------------|---------------------|---------------------------------------|
| Cimento CP V | 1,000 | 240,00 |
| Areia grossa | 1,922 | 576,45 |
| Areia fina | 1,035 | 310,40 |
| Brita 3/4 | 1,865 | 559,51 |
| Brita 0 | 1,243 | 370,01 |
| Água | 0,570 | 171,00 |
| Aditivo | 0,54% | 2,40 |
| CCA | 20,00% | 50,52 |
| Total: | | 2280,29 |

Fonte: Autor

Como o volume de concreto para a fabricação dos corpos-de-prova é pequeno, foi realizado o cálculo da quantidade mássica dos materiais necessário considerando o tamanho da betoneira utilizada e o volume mínimo de 15 litros para poder realizar perfeitamente a mistura.

3.3 Moldagem dos corpos-de-prova

De acordo com a Norma Brasileira NBR 5738 (ABNT, 2003), que regulamenta o procedimento, realizou-se a moldagem dos corpos-de-prova de concreto.

Atendendo a quantidade exigida para cada composição, foram realizadas as pesagens dos materiais. Com os materiais pesados e separados em recipientes diversos, conforme apresentado na Figura 6, os mesmos foram inseridos na betoneira do laboratório, a qual contém capacidade máxima de 120 L.



Figura 6 – Seleção e pesagem dos materiais utilizado na produção do concreto
(Fonte: Autor)

O processo de mistura na betoneira, dos materiais utilizados para a produção das amostras de concreto é apresentado na Figura 7.



Figura 7 – Mistura dos materiais (Fonte: Autor)

Após 3 minutos de misturados na betoneira, foi realizado o ensaio denominado “*Slump Test*”, ou teste de *Slump*, regulamentado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), (determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone).

O teste de *Slump* consiste em preencher três camadas de concreto no molde metálico com 25 golpes com uma barra de aço na amostra em cada camada, nunca atingido a camada inferior golpeada. Após o preenchimento das camadas, o concreto restante na última camada é rasada (procedimento de acabamento dos corpos-de-prova) com uma colher de pedreiro.

Com as camadas prontas, o molde metálico foi retirado e colocado ao lado da amostra. A medida do abatimento foi definida pela altura da superfície do concreto até a barra de ferro que está colocada em cima do molde, conforme a Figura 8.



Figura 8 – Teste de *Slump* (Fonte: Autor)

O abatimento do concreto fresco foi fixado em 120 ± 20 mm. O abatimento entre 100 e 150 mm é considerado fluido, tendo uma tolerância de ± 20 mm. Este valor para o abatimento foi escolhido porque é suficientemente fluido para ser bombeado, e não há necessidade de valores excessivos de superplastificante na mistura, o que tornaria mais caro o processo.

Após ser realizado o primeiro teste de *Slump*, a amostra de concreto foi colocada de volta na betoneira, e misturada por mais 15 minutos, que simulam o concreto sendo

transportado por 1 hora dentro de um caminhão betoneira, e foi realizado novamente um teste de *Slump*.

Após o teste, é adicionado água se necessário (caso esteja muito consistente), e a amostra de concreto volta para a betoneira onde fica mais 3 minutos sendo misturada. Após nova mistura, é realizado o terceiro teste de *Slump*, e então a amostra de concreto é moldada nos corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova cilíndricos utilizados para o concreto possuem dimensões de 20 cm de altura por 10 cm de diâmetro e receberam uma fina camada de desmoldante a base de óleo vegetal, a fim de que o concreto não grude nas paredes do molde e consequentemente dificulte a retirada do mesmo (NBR-5738 - ABNT, 2003).

Foram moldados 15 corpos-de-prova para cada composição de concreto (composição referência sem CCA, 10%, 15% e 20% de CCA), totalizando 60 corpos-de-prova. A Figura 9 apresenta os corpos-de-prova moldados.



Figura 9 – Corpos-de-prova moldados (Fonte: Autor)

A moldagem dos corpos-de-prova seguiu os requisitos da NBR 5738 (ABNT, 2003). Por possuírem 10 cm de diâmetro, foi inserido concreto nos moldes em duas camadas dos corpos-de-prova, sendo que cada uma delas recebeu 12 golpes. Na camada de cima são aplicados os mesmos 12 golpes, com o cuidado de que camada inferior não fosse atingida. Com as camadas prontas, foi realizado o rasamento dos corpos-de-prova com colher de pedreiro.

Após 24 horas da cura inicial dentro do laboratório, os corpos-de-prova foram desmoldados e armazenados em um tanque cheio de água devidamente identificados, no qual ficaram até obter as idades de 3, 7 e 28 dias para o rompimento.

3.4 Ensaio de resistência à compressão

Quando completaram as idades determinadas para ensaio, é feito a retificação dos corpos-de-prova. A retificação consiste na retirada, de forma mecânica, de uma fina camada das superfícies superior e inferior do corpo-de-prova, possibilitando assim atingir uma superfície lisa para a realização da compressão e não induzir erros nas medidas. Esse processo é realizado pelo equipamento apresentado na Figura 10.



Figura 10 – Equipamento utilizado para a retificação na empresa Concretar (Fonte: Autor)

Após a retificação, foram realizados os ensaios de compressão conforme NBR-5739 (ABNT, 2007).

A resistência à compressão é a propriedade mais importante requerida dos compósitos à base de cimento porque está diretamente ligada à estrutura interna do material, fornecendo uma importante estimativa sobre a durabilidade. Além disso, a resistência à compressão é uma propriedade amplamente estudada e sua determinação é de fácil execução em laboratório.

A prensa utilizada para o ensaio de compressão é hidráulica da marca “Emic” apresentada na Figura 11, certificada pela Rede Brasileira de Calibração – RBC. Possui acionamento elétrico de classe 1 e capacidade máxima para 120 toneladas, atendendo aos requisitos das NBR NM ISO 7500 1 (ABNT, 2004).



Figura 10 – Prensa “Emic” utilizada para o ensaio de compressão na empresa Concretar
(Fonte: Autor)

A compressão axial foi aplicada continuamente com velocidade entre 0,15 e 0,45 MPa/s, e só parou quando aconteceu uma queda de força que indicou a ruptura do corpo-de-prova. Em ambos os testes foram empregados 60 corpos de prova.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A continuação neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos a partir das diferentes análises feitas nos corpos de prova, iniciando com a análise de consistência do concreto, propriedade importante no que tange a conformação e transporte do concreto, seguido pela análise da resistência mecânica do concreto.

Para finalizar será apresentada uma análise financeira que inclui os custos dos materiais, equipamento para moagem e transporte para produção do concreto, onde será analisada a viabilidade econômica da produção de concreto com CCA tanto para a indústria termoeletrica, quanto para a empresa de concreto.

4.1 Análise da consistência do concreto

A Tabela 10, através da realização do teste de *Slump*, apresenta o abatimento de cada composição de concreto, com 3 e 15 minutos de mistura, e o abatimento final.

Tabela 10 – Testes de *Slump* para os 4 composições de concreto

| Composição | 1° <i>Slump</i> | 2° <i>Slump</i> | 3° <i>Slump</i> |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | 3 min (mm) | 15 min (mm) | Final (mm) |
| 1 - Referência | 120 | 80 | 120 |
| 2 - 10% CCA | 130 | 125 | 125 |
| 3 - 15% CCA | 115 | 150 | 150 |
| 4 - 20% CCA | 80 | 120 | 120 |

Fonte: Autor.

De acordo com os padrões de aplicação do concreto da empresa Concretar, após os primeiros 3 minutos, o esperado é que a amostra esteja aproximadamente à 120 mm da barra de aço no teste de *Slump*, representando a consistência ideal para aplicação do concreto na obra, como apresentado na Figura 11-A.

Com mais 15 minutos de mistura, espera-se um aumento na consistência da amostra de concreto, diminuindo a distância entre amostra e a barra de ferro, como apresenta a Figura 11-B. Com isso, adiciona-se uma quantidade padrão de água que irá diminuir a consistência do concreto, e após mais 3 minutos sendo misturado na betoneira, a distância entre o concreto e a barra de ferro volta para aproximadamente 120 mm, padrão de aplicação do concreto.



Figura 11 - Realização do teste de *Slump* (Fonte: Autor)

Para o composição referência, os teste de *Slump* apresentam uma amostra de concreto dentro dos padrões de consistência em todos os momentos, com um adicional de 300 gramas de água após o segundo teste de *Slump*.

Com o acréscimo de CCA na composição, o concreto se comporta de maneira contrária ao padrão, apresentando uma grande consistência inicial, necessitando do acréscimo de água na primeira mistura, e perdendo consistência com o decorrer do tempo.

Esse comportamento fica explícito no composição 4- 20% de CCA, pois no primeiro teste de *Slump* a amostra de concreto é bem consistente, necessitando da adição de 300 gramas de água para a primeira mistura, e com o decorrer do tempo e das próximas misturas, a amostra de concreto perde consistência, chegando a 120 mm no teste de *Slump*.

Segundo Silva (2007), a CCA pode comprometer a trabalhabilidade do concreto, apresentando problemas associados à demanda excessiva de água em consequência da elevada superfície específica e, por vezes, em razão do alto teor de carbono residual de algumas amostras.

A CCA utilizada neste trabalho possui 5,7% de perda ao fogo, conforme a Tabela 5 no item 3.1.8, ou seja, carbono residual, que juntamente com sua elevada superfície específica, explicam o comportamento apresentado.

Essas características tornam a adição de CCA interessante em aplicações onde o tempo de transporte do concreto é elevado.

4.2 Análise da resistência à compressão

A resistência à compressão foi avaliada nas idades obrigatórias de 3, 7 e 28 dias, conforme a norma brasileira NBR 11578/91. Foram testados 5 amostras por composição em cada dia, totalizando 60 amostras de concretos. Os resultados estão apresentados na Tabela 11 do Apêndice A.

A tabela 12 apresenta os resultados das médias das resistências à compressão individuais de cada amostra, para cada idade, e seus respectivos desvios padrão, enquanto que a Figura 12 sintetiza os resultados graficamente.

Tabela 12 – Valores médios de resistência em MPa

| Composições | 3 dias (MPa) | | 7 dias (MPa) | | 28 dias (MPa) | |
|------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| | Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão | Média | Desvio padrão |
| Composição 1 Ref | 25,37 | ±1,76 | 30,30 | ±1,75 | 34,71 | ±1,24 |
| Composição 2 10% | 21,67 | ±1,59 | 25,80 | ±2,10 | 31,24 | ±0,89 |
| Composição 3 15% | 17,34 | ±1,62 | 19,82 | ±1,77 | 26,57 | ±1,44 |
| Composição 4 20% | 16,24 | ±1,53 | 20,53 | ±1,38 | 31,27 | ±1,42 |

Fonte: Autor.

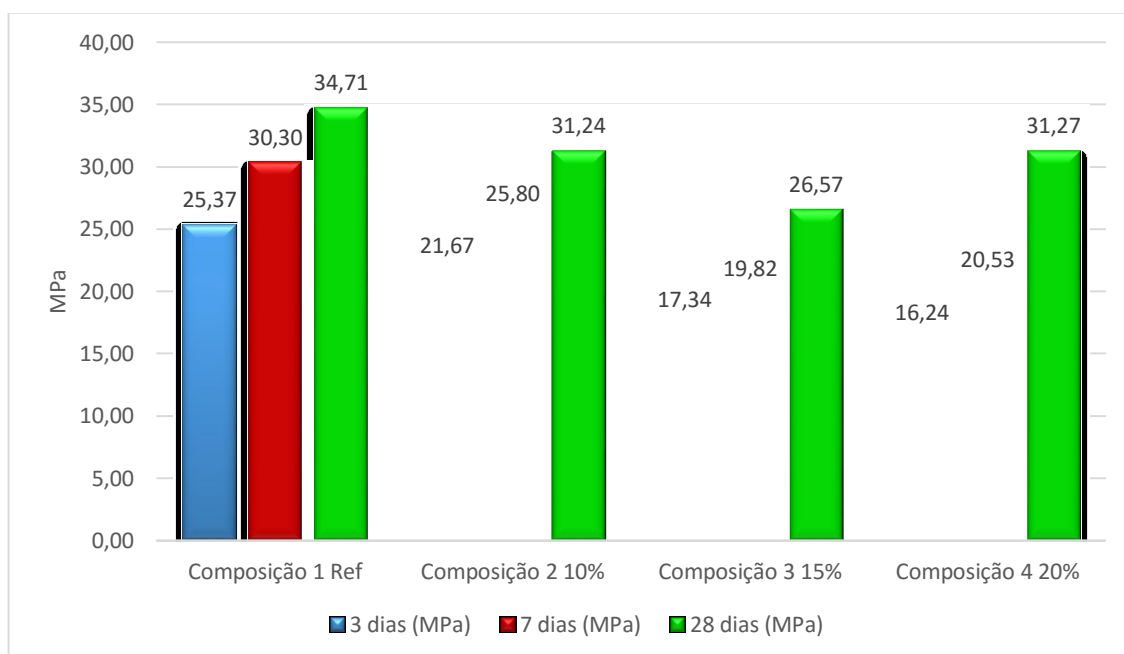


Figura 12 - Valores médios de resistência em MPa (Fonte: Autor)

Nos primeiros 3 dias, a composição referência obteve melhor desempenho, atingindo 25,37 MPa, seguido pela composição 2 (10% CCA) com 21,67 MPa, composição 3 (15% CCA) com 17,34 MPa, e a composição 4 (20% CCA) com a menor média de resistência, 16,24 MPa.

Com o aumento de CCA na composição, observa-se um desenvolvimento mais tardio da resistência à compressão das misturas a medida que cresce a fração de CCA nas primeiras idades (3 e 7 dias), valores significativamente inferiores quando comparados à mistura de referência.

Isso pode ser explicado pelo comportamento pozolânico da CCA, pois quando há substituição de parte do cimento pela pozolana, há uma diminuição na formação da fase do cimento C_3S , responsável pela hidratação mais rápida no cimento. Além disso, a reação pozolânica da CCA é mais lenta. Este resultado está de acordo com diversas pesquisas feitas por vários autores (MALHOTRA e MEHTA, 1996; ZHANG e MALHOTRA, 1996; RODRIGUEZ e DAL MOLIN, 1999; SENSALÉ, 2000).

Já nas idades mais avançadas, a composição 2 com 20% de CCA exibiu o maior aumento de resistência, 52,3% entre os dias 7 e 28, principalmente se comparado ao composição 1- referência, no mesmo período, como é apresentado na Tabela 13 e sintetizado no gráfico da Figura 13.

Tabela 13 – Valores percentuais do aumento de resistência para cada composição

| Composição | Ganho Dia 3 - Dia 7 (%) | Ganho Dia 7 - Dia 28 (%) |
|------------------|-------------------------|--------------------------|
| Composição 1 Ref | 19,4% | 14,5% |
| Composição 2 10% | 19,0% | 21,1% |
| Composição 3 15% | 14,3% | 34,0% |
| Composição 4 20% | 26,5% | 52,3% |

Fonte: Autor.

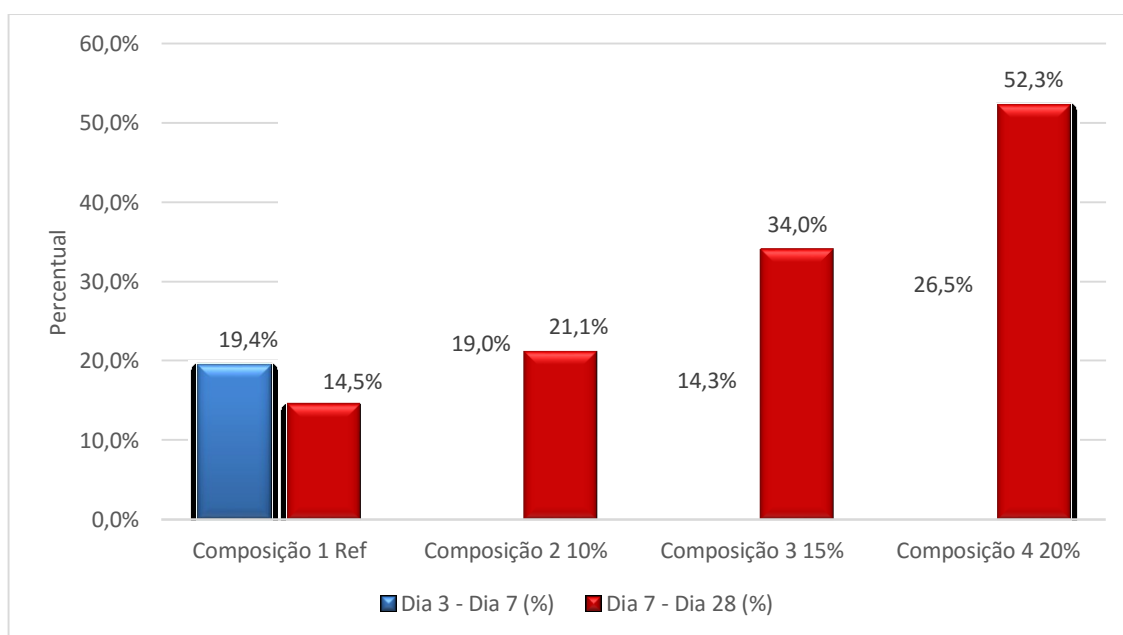


Figura 13 - Valores percentuais do ganho de resistência para cada composição (Fonte: Autor)

Apesar do aumento de resistência do composição com 20% de CCA a série referência ainda obteve resultados médios superiores às demais séries no ensaio de resistência à compressão, pois, para que a adição apresente uma alta reatividade, é necessário que a CCA tenha uma finura, quantidades de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ em sua composição, e uma estrutura principalmente amorfa (TASHIMA et al., 2011), que não é o caso da CCA estudada, pois passou por um pequeno e simples processo de moagem, e teve sua combustão praticada em elevadas temperaturas, prejudicando sua pozolanicidade pela formação de fases cristalinas as quais são menos reativas, em comparação com a sílica amorfa.

Em geral, verificou-se que a substituição do cimento Portland CP V pela CCA não apresentou incrementos relevantes nos valores de resistência à compressão, sendo que o ponto com acréscimo de CCA de maior proporção foi mostrado pelo composição 4 com 20% de CCA aos 28 dias, com valor médio de resistência 11% menor em relação ao composição de referência para a mesma idade, como apresentado no gráfico na Figura 14.

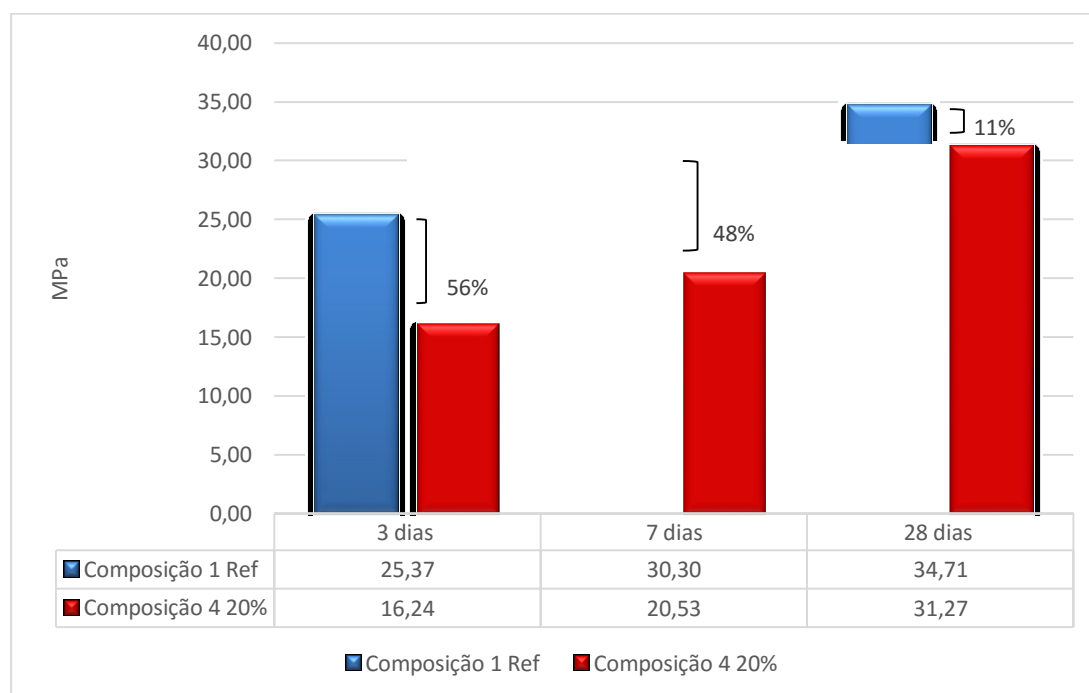


Figura 14 - Variação da resistência entre os composições 1 e 4 (Fonte: Autor)

Esse elevado ganho de resistência do composição com 20% de CCA, resultando numa grande variação de resistência com o composição referência, acontece pelo fato da sílica deixar de reagir quimicamente de maneira significativa como um aglomerante,

depois de um certo tempo. Com isso, o restante da sílica, principalmente as fases cristalinas, como quartzo e tridimita, atuam como um filler inerte, contribuindo fisicamente para o preenchimento dos poros. Esta contribuição acontece porque os finos preenchem os vazios entre as partículas maiores (efeito de empacotamento), e como consequência, reduz o tamanho dos vazios pela segmentação dos poros maiores na pasta e a porosidade, aumentando a durabilidade do concreto (SENSALE, 2000).

4.3 Valor da CCA e produção de concreto

Buscando valores financeiros que demonstram a realidade na indústria e comércio, além da falta de conteúdo na bibliografia, foi feita uma pesquisa com empresários do ramo de beneficiamento de arroz, onde estimou-se valores financeiros para a tratamento (operação, manutenção e custo com energia do equipamento para moagem da CCA), além dos custos com transporte da mesma.

A Tabela 14 apresenta os valores mensais para tratamento e transporte da CCA residual de uma termoelétrica com geração de 1 MW de energia e consumo de 35 toneladas de casca de arroz por dia, resultando em 7 toneladas de CCA por dia.

Tabela 14 – Custos para tratamento e transporte da CCA

| Tratamento e transporte | Valores mensais (R\$) |
|-------------------------|-----------------------|
| Operação/manutenção | 4.400,00 |
| Energia | 2.200,00 |
| Transporte | 3.840,00 |
| Total | 10.440,00 |

Fonte: Autor

Com os valores da Tabela 14, o custo da CCA seria em média 0,062 Reais/kg.

Segundo a pesquisa, esses valores consideram a operação sendo feito por funcionários que já atuam pela empresa, ou seja, sem gastos adicionais com contratação de novos funcionários. Além disso, como as empresas já possuem caminhão e funcionário para transporte da CCA, não seria necessário novos investimentos nesse setor. Com isso, o único investimento seria no equipamento de moagem da casca de arroz.

Segundo pesquisa de mercado, um moinho de bolas, equipamento para moagem da casca de arroz, para o fluxo de CCA estimado, custaria aproximadamente R\$ 50.000,00.

Considerando o preço de venda da CCA em R\$ 0,13, 100% de lucro em cima do custo de tratamento e transporte, o investimento no equipamento de moagem teria seu retorno financeiro estimado em 5 meses.

Com o valor da CCA estipulado, foi feito um levantamento de custos dos materiais na região, buscando um valor final para o concreto com/sem a aplicação da CCA.

Os custo dos materiais e o custo total para produção de 1m³ de concreto sem adição de CCA está apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 - Custos para produção de 1m³ de concreto sem adição de CCA

| Material | Quantidade (kg) | Valor Unitário (R\$/kg) | Valor total (R\$) |
|----------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| Cimento CP V | 300 | 0,50 | 150,00 |
| Areia britagem | 576,45 | 0,03 | 17,29 |
| Areia fina | 310,4 | 0,027 | 8,38 |
| Brita 3/4 | 559,51 | 0,03 | 16,78 |
| Brita 0 | 370,01 | 0,033 | 12,21 |
| Água | 171 | 0,00 | 0,00 |
| Aditivo | 2,4 | 4,25 | 10,20 |
| CCA | 0 | 0,13 | 0,00 |
| TOTAL | | | 214,86 |

Fonte: Autor.

Por ter apresentado melhor desempenho e ganho de resistência que as demais composições com CCA, será utilizado como base para aplicação comercial da CCA no concreto a composição com 20% de CCA.

A Tabela 16 apresenta os custo dos materiais e o custo total para produção de 1m³ de concreto a partir do composição 4 com adição de 20% de CCA em substituição parcial do Cimento CP V.

Tabela 16 - Custos para produção de 1m³ de concreto com adição de CCA

| Material | Quantidade (kg) | Valor Unitário (R\$/kg) | Valor total (R\$) |
|----------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| Cimento CP V | 240 | 0,50 | 120,00 |
| Areia britagem | 576,45 | 0,03 | 17,29 |
| Areia fina | 310,4 | 0,027 | 8,38 |
| Brita 3/4 | 559,51 | 0,03 | 16,78 |
| Brita 0 | 370,01 | 0,033 | 12,21 |
| Água | 171 | 0,00 | 0,00 |
| Aditivo | 2,4 | 4,25 | 10,20 |
| CCA | 50,52 | 0,13 | 6,57 |
| TOTAL | | | 191,43 |

Fonte: Autor.

O custo para produzir 1m³ de concreto com 20% de CCA em substituição parcial de Cimento CP V é de R\$ 191,43, 12% mais barato que produzir o concreto convencional (sem adição de CCA), que custa R\$ 214,86.

Considerando que toda a CCA residual da termoelétrica seja utilizada pelas empresas de concreto da região do vale do Araranguá, seria possível produzir 3.325 m³ de concreto mensalmente com 20% de CCA, diminuindo o consumo do Cimento CP V ARI em 200 toneladas, levando a uma economia de R\$ 77.922,00 mensais em cimento para produção de concreto.

A emissão de CO₂ varia de país para país e depende da tecnologia/matéria-prima empregada na produção. No Brasil, estima-se que para cada tonelada de cimento são emitidos 610 kg de CO₂ (CETESB, 2012), ou seja, além da economia financeira, deixariam de ser emitidos 122 toneladas de CO₂ por mês ao meio ambiente.

5 CONCLUSÃO

Os concretos com CCA em sua composição exibiram influência significativa negativas em relação ao composição referência, nos primeiros dias de aplicação, porém, com elevado ganho de resistência ao decorrer do tempo, tendendo a ultrapassar os valores de resistência à compressão do composição referência.

Os resultados apresentados ficaram abaixo do esperado quando comparados a composição referência nos primeiros 28 dias, sendo este fato provavelmente justificado pela caracterização da CCA, que foi avaliada com uma atividade pozolânica relativamente baixa, devido ao simples processo de moagem que foi aplicado, não sendo suficiente para aumentar a área superficial e elevar a reatividade pozolânica da amostra, além das elevadas temperaturas à que foi exposta em seu processo de combustão gerando fases cristalinas pouco reativas.

A mistura com CCA que obteve melhor comportamento em relação à resistência à compressão foi a composição 4 com 20% de CC, considerando suas taxas de ganho de resistência e seu valor média de resistência no período de 28 dias.

A partir dos resultados apresentados, é possível concluir que a utilização da cinza da casca de arroz empregada nessa pesquisa, em substituição ao cimento Portland (CP-V-ARI) na mistura de concretos convencionais, se mostra viável economicamente, para determinadas aplicações, onde não há necessidade de altos valores de resistência em curto período de tempo, além de ser uma opção sustentável para diminuir o consumo de cimento, diminuindo consequentemente a emissão de CO₂.

VALORIZATION OF THE RICE HUSK ASH WITH APPLICATION IN THE CONCRETE.

ABSTRACT

The rice husk, used as a source of energy in rice processing industries, converts, after burning, into a residual ash. This residue, still without a suitable destination, is often deposited in large open areas and causes great environmental impact. The objective of this work was to evaluate the rice husk ash (RHA), evaluating the feasibility of its application in the production of concrete, as a partial substitute of the cement. The RHA characterization was performed by X-ray fluorescence analysis, where the high percentage of silica (SiO₂) in its constitution was observed, which makes its application interesting. Through laboratory tests, the mechanical properties of the concrete samples produced from 4 compositions, a reference (without addition of RHA), and other three with 10%, 15% and 20% of RHA in substitution to Cement CP V ARI. The tests presented

a low compressive strength in relation to the increase of RHA for the first few days, however, with much higher resistance gain rates for the traits with higher RHA percentages in relation to the reference. Nevertheless, at 28 days, the reference trait had higher compressive strength than the other tests, but tended to be exceeded by composition 4 with 20% RHA. The financial analyzes presented an excellent economic feasibility for the use of RHA in the concrete, however, for certain applications that do not require high values of resistance in the first periods of time.

Keywords: Rice Husk Ash, pozzolans, industrial residues, sustainability.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-5733: **Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, 1991b. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-7215: **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR-7225: **Materiais de pedra e agregados naturais**. Rio de Janeiro, 1993. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR NM-67: **Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738/Emd.1:2008: **concreto: processo para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: **materiais pozolânicos: requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 5 p.

AGOPYAN, Vahan. **Materiais Reforçados com Fibras para a Construção Civil nos Países em Desenvolvimento: uso de fibras vegetais**. São Paulo, 1991. 99 p. Tese de

Livre-docência. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo.

BASTOS, Paulo Sérgio. **Fundamentos do concreto armado**. Universidade Estadual Paulista. Disponível em: <[http://www.wp.feb.unesp.br/pbastos/Sistemas% 20Estruturais /Fund%20Concreto.pdf](http://www.wp.feb.unesp.br/pbastos/Sistemas%20Estruturais/Fund%20Concreto.pdf)>. Acesso em: 30 set 2017.

BEZERRA, I. M. T. et al. **Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 639-645, 2011.

BOETENG, A. A.; SKEET, D. A. **Incineration of rice hull for use as a cementitious material: the Guyana experience**. Cement and Concret Research, v.20, p. 795-802, 1990.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. **Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto**. Cerâmica, v. 54, n. 331, p. 309-318, 2008.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente (2012) **Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa associadas aos Processos Industriais: Produtos Mineraiis, Produção de Cimento do Estado de São Paulo, 1990 a 2008**. São Paulo. 27 p.

CORDEIRO, G. C. et al. **Ultrafine Grinding of Sugar Cane Bagasse Ash for Application as Pozzolanic Admixture in Concrete**. Cement and Concrete Research, v. 39, n. 2, p. 10-115, 2009.

DAFICO, D. (2001). **Estudo da dosagem do concreto de alto desempenho utilizando pozolanas provenientes da casca de arroz**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DAL MOLIN, D. C. C. (1995). **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adições de microssílica**. São Paulo. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, USP.

DELLA, V. P.; KÜHN, I.; HORTZA, D. **Caracterização de cinza de casca de arroz para o uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica**. Revista Química Nova. Vol. 24, no. 06, 778-782, 2001.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA - EPAGRI. **Produção da safra 2016/2017**. Centro de Socioeconomia e Planejamento Agrícola da Epagri (Epagri/Cepa). Disponível em: <<http://www.epagri.sc.gov.br/>>. Acesso em: 21 ago. 2017

FERREIRA, A. A. & DAL MOLIN D. C. C. & CATEN C. S. (1999) **Water absorption in rice-husk ash concretes**. In: INTERNACIONAL CONFERENCE ON HIGH-PERFORMANCE CONCRETE, 1999, Gramado: [s.n.].

FOLETTTO, HOFFMANN, SCOPEL, LIMA, JAHN; **Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz**. Departamento de Engenharia Química, UFSM – RS. Quim. Nova, V. 28 Nº 6, 2005, 1055-1060 pp.

FONSECA, M. R. G; **Isolantes Térmicos Fabricados a partir da Cinza da Casca de Arroz: Obtenção, caracterização de Propriedades e sua Relação com a Microestrutura**. Porto Alegre, 1999. 120p. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GOMES, Algenor da Silva; MAGALHÃES JÚNIOR, Ariano Martins de (Coord.). **Arroz irrigado no sul do Brasil**. 1. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 899 p.

GONCALVES, Gislayne Elisana et al . **Síntese e caracterização de mulita utilizando sílica obtida da casca de arroz**. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 62, n. 3, set. 2009. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-44672009000300016&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 11 out. 2017.

GURGEL, Fábio de Lima. **A Cultura do Arroz**. 2012. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAARc4AE/cultivo-arroz>. Acesso em: 20/10/2017.

HOFFMANN, R; JAHN, S.L; BAVARESCO, M; SARTORI, T.C. **Aproveitamento da cinza produzida na combustão da casca de arroz: estado da arte**. 2010. 14 p. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/cenergia/artes_final.pdf>. Acesso em: 01 out. 2017.

HOPPE, T. F. et al. Influência do Teor de Cinza de casca de Arroz na Resistividade Elétrica do Concreto. **47º Congresso Brasileiro do Concreto**. Anais: Recife, 2005. p.933-944.

HOUSTON, D. F. **Rice Hulls**. Rice Chemistry and Technology, American Association of Cereal Chemists, p. 301-340, MN, 1972.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção agrícola nacional**. Disponível em: <<http://www.ibge.com.br>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

ISAIA, Geraldo C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. 2v. 1712 p.

ISAIA, Geraldo C. **Efeitos de misturas binárias e ternárias de pozolanas em concreto de elevado desempenho: um estudo de durabilidade com vistas à corrosão da armadura**. Tese de doutorado, Escola Politécnica / USP, São Paulo, 1995.

JAMES, J.; SUBBA RAO, M. **Reactivity of Rice Husk Ash**. Cement and Concrete Research, v. 16, n. 3, p. 296-302, 1986.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and Cementitious Materials**. Amsterdam: Gordon and Breach Publishers, 1996.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008. 574 p.

METHA, P. K. **Properties of Blended Cements Made from Rice Husk Ash**. ACI Journal. Set, 1977.

NEHDI, M.; DUQUETTE, J.; DAMATTY, E. L.; **Performance of Rice husk ash produced using a new technology as a mineral admixture in concrete**. Cement and Concret Research, 2003, p. 1203-1209.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA ALIMENTAÇÃO E CULTURA – FAO. **Produção mundial de arroz**. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/pt/>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

PATEL, M. KARERA, A.; PRASANNA P. **Effect of thermal and chemical tratments on carbon and silica conténs in rice husk**. Journal of Materials Science. 22. 1987. P. 2457 – 2464.

PETRUCCI, Eladio G. R.; PAULON, Vladimir Antonio. **Concreto de cimento Portland**. 13. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1998. 307 p.

POUEY, M. T. F.. **Beneficiamento da casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico**. 2006. 345 p. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/7733/000554896.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

RECENA, Fernando A. Piazza; SERRA, Geraldo G. **Dosagem empírica e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. Porto Alegre: EdiPucrs, 2002. 166 p.

SAMPAIO, J.; COUTINHO, J. S.; SAMPAIO, M. N.; **Portuguese Rice Husk Ash as a Partial Cement Replacement**, Portugal, 2000.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolâna com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Tese de doutorado, PECV UFSC Florianópolis, Brasil 2006, 267 p.

SANTOS, S. **Produção e avaliação do uso de pozolâna com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. Tese de doutorado, PECV UFSC Florianópolis, Brasil 2006, 267 p.

SENSALE, G. R. B. (2000). **Estudo coMParativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz**. Porto Alegre: programa de Pós-graduação em engenharia Civil. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVA, I. O. **Influência da cinza de casca de arroz amorfa e cristalina e da sílica ativa na reação álcali-agregado**. 2007. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2007.

SILVA E.J, RICCI E.C, AKASAKI J.L, TASHIMA.MT. **Análise da variação da retração por secagem em argamassas com a adição da cinza de casca de arroz.** Anais do VI Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, Abril / 2006.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas à durabilidade de concretos: estudo de ataque por sulfatos.** Porto Alegre, 1996. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SUGITA, S.; YAMAMICHI, H.; SHOYA, M. e QINGGE F. **Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment.** Cement and Concrete Research. v.34, 2004. p.521-526.

TASHIMA, M. M. et al. **Reaproveitamento da cinza de casca de arroz na construção civil.** HOLOS Environment, v. 11, n. 1, p. 81-89, 2011.

TASHIMA, M. M. **Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland.** 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira. 2006.

ZHANG, M.-H.; MALHOTRA, M. **HighPerformance Concrete Incorporating Rice Husk Ash as a Supplementary Cementing Material.** ACI Materials Journal, v. 93, n. 6, p. 629-636, 1996.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Professora Dra. Tatiana Pineda, pela orientação neste trabalho e, principalmente, pela passagem de seu conhecimento e tempo despendido.

À empresa CONCRETAR, ao Engenheiro Civil Márcio e ao meu amigo Miguel, que abriram as portas de seu laboratório e se dispuseram a ajudar na elaboração dos composições, amostras de concreto e testes de resistência, sendo fundamentais na concepção deste trabalho.

À empresa REALENGO e ao Técnico Fernando, que se dispuseram a me ajudar dando total apoio com amostras de CCA e informações de sua termoelétrica.

À Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de realização do curso de graduação de Engenharia de Energia.

E por fim, à minha família, pelo apoio incondicional em todos esses anos de graduação.

APÊNDICE A

Tabela 11 - resultados obtidos em MPa para todas as idades e composições

| composições | 3 dias (MPa) | 7 dias (MPa) | 28 dias (MPa) |
|--------------------|--------------|--------------|---------------|
| Composição 1 Ref | 25,14 | 29,14 | 36,74 |
| Composição 1 Ref | 26,33 | 32,91 | 34,74 |
| Composição 1 Ref | 23,65 | 31,25 | 33,57 |
| Composição 1 Ref | 27,85 | 28,72 | 34,61 |
| Composição 1 Ref | 23,84 | 29,44 | 33,84 |
| Composição 2 / 10% | 21,54 | 26,49 | 32,44 |
| Composição 2 / 10% | 23,22 | 24,58 | 30,45 |
| Composição 2 / 10% | 20,30 | 22,75 | 31,80 |
| Composição 2 / 10% | 19,93 | 27,76 | 31,15 |
| Composição 2 / 10% | 23,35 | 27,37 | 30,34 |
| Composição 3 / 15% | 16,41 | 19,98 | 27,50 |
| Composição 3 / 15% | 15,99 | 17,77 | 24,34 |
| Composição 3 / 15% | 19,82 | 18,93 | 27,20 |
| Composição 3 / 15% | 16,33 | 22,57 | 27,85 |
| Composição 3 / 15% | 18,11 | 19,83 | 25,92 |
| Composição 4 / 20% | 16,70 | 21,63 | 33,49 |
| Composição 4 / 20% | 14,78 | 20,18 | 30,97 |
| Composição 4 / 20% | 17,37 | 19,00 | 29,55 |
| Composição 4 / 20% | 17,83 | 19,55 | 31,35 |
| Composição 4 / 20% | 14,47 | 22,28 | 30,95 |

Fonte: Autor.