

UTILIZAÇÃO DA CINZA DA CASCA DE ARROZ, HIDRÓXIDO DE SÓDIO E METACAU LIM EM TRAÇOS DE CONCRETO ATIVADOS ALCALINAMENTE

Paulo Victor Campos Guimarães (paulovictorcamposg@gmail.com); Guilherme Augusto do Nascimento Amorim (gui.amorim10@gmail.com); José Luiz Pinheiro Melges (jlmelges@dec.feis.unesp.br); Jorge Luís Akasaki (akasaki@dec.feis.unesp.br); Mauro Mitsuuchi Tashima (mmtashima@dec.feis.unesp.br); Mateus Barbosa Nishigima (mateusnishigima@gmail.com)

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”; Faculdade de Engenharia (UNESP-FEIS); Campus de Ilha Solteira - Brazil

Palavras chave: cimento Portland, concretos ativados alcalinamente, resistência à compressão.

A indústria do cimento Portland é responsável direta por uma carga de poluentes que gera um significativo dano ambiental. Os concretos ativados alcalinamente (CAA) são compostos por matrizes com ativação prévia e por aglomerantes alternativos. O material catalisador comumente utilizado para proceder com a ativação prévia é o silicato de sódio, cuja fabricação também é ambientalmente nociva. O silicato de sódio, no entanto, pode ser dispensado, uma vez que a produção do ativador pode se dar através de um composto rico em silício, como, por exemplo, a cinza da casca de arroz (CCA). Neste trabalho, junto com a CCA, utilizou-se a soda cáustica como fornecedora de sódio. Os CAAs foram definidos conforme o parâmetro ξ , que representa a razão entre os óxidos de silício e de sódio, com as variações $\xi = 1,2$, $\xi = 1,6$ e $\xi = 2,0$, esta última representando o CAA com maior taxa de CCA. De maneira geral, as resistências à compressão axial e diametral, aos sete dias de cura, encontraram-se nas faixas de 25 a 30 MPa, e de 1,5 a 3,5 MPa, respectivamente, para a amostra $\xi = 2,0$. Para esse compostos, não foram observados aumentos de resistência significativos para idades mais avançadas. O módulo de elasticidade longitudinal forneceu valores entre 10 e 20 GPa, com crescimento mais significativo entre as idade de 28 e 90 dias. Para efeito de comparação, elaborou-se um concreto convencional cujas resistências à compressão axial e diametral médias foram iguais a 24 MPa e 4 MPa, respectivamente. Neste caso, observou-se um aumento das resistências até os 90 dias de cura, com módulo de elasticidade superior a 20 GPa. Em suma, os concretos ativados alcalinamente são de alta pertinência, dadas as suas propriedades estruturais.

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil possui uma representatividade grande na economia global. Os componentes clássicos que integram as obras de infraestrutura apresentam produção em larga escala, justificada pela grande demanda desses materiais. O cimento Portland produz uma grande carga poluente no seu processo de fabricação, o que instiga o ramo de pesquisa científica a buscar novos materiais que possam substituir esse componente.

A substituição integral do cimento exige a abordagem dos geopolímeros, os quais se caracterizam por fornecer outro meio de aglomeração, uma vez que o cimento Portland não é mais um componente da mistura. Segundo Shi et al (2006), os geopolímeros tiveram sua difusão iniciada na década de 1930, através da ativação da escória com uma solução de potássio. Tais componentes são, hoje, uma grande vertente de pesquisa no ramo dos materiais alternativos de construção civil.

1.1. A indústria do cimento portland

O cimento Portland é o material mais consumido no ramo da construção civil. O avanço da infraestrutura incentivou a pesquisa por materiais que fornecessem propriedades satisfatórias para a aplicação no ramo construtivo. A indústria do cimento é uma das fontes mais significativas dos gases do efeito estufa (GAO et al., 2015).

Essa indústria abrange duas fontes de emissão: a advinda diretamente da queima do combustível fóssil e a relacionada com os processos de fabricação do cimento (SHEN et al., 2014). Por volta de 1990, nos Estados Unidos, o consumo médio de energia para a produção de uma tonelada de cimento, por meio do processo por via seca, era de 1,6 MWh. Nas fábricas modernas, esse valor é bem menor, estando abaixo de 0,8 mWh na Áustria, por exemplo. O consumo de eletricidade, que fica entre 6 e 8% do total da energia utilizada, normalmente é da seguinte ordem: 10 kWh para a moldagem das matérias-primas, 28 kWh na preparação da farinha crua, 24 kWh na queima e 41 kWh na moagem (NEVILLE, 2016).

1.2. Geopolímeros

No ano de 1981, o termo geopolímero surge na França, como a produção de aglomerante por meio da mistura de compostos alcalinos com caolinite, calcário e dolomite, pelo pesquisador Davidotis, surgindo a terminologia por razão da estrutura polimérica dos componentes finais. Mais tarde, os silicatos, aluminatos e silico-aluminatos tiveram sua reatividade comprovada com concentrações alcalinas suficientes, em termos de desempenho (SHI, et al., 2006).

Nos últimos anos, as pesquisas têm mostrado que os geopolímeros sintetizados através de uma variedade de materiais de baixo custo, tais como a cinza volante, a cinza da casca de arroz e a escória de alto forno, possuem alta capacidade de resistência à compressão e alto desempenho quando submetido a ambientes ácidos e a situações de temperatura elevada (FAN, et al., 2018). Um fator muito trabalhado na análise desse tipo de componente é a proporção entre o sódio e a solução de silicato, uma vez que é de notória relevância uma sílica em estado solúvel para o ataque aos oligômeros de alumínio (DAVIDOVITS, 2008).

Os materiais alternativos são integrados majoritariamente por descartes advindos de inúmeras atividades industriais e agrícolas. Estes podem ser incorporados nas matrizes de cimento e argamassa. Em algumas situações, o procedimento é pautado em substituir quantidades parciais de cimento por algum material que apresente os requisitos que os dão a classificação de materiais pozolânicos. Segundo Tashima (2006), as características típicas dos materiais pozolânicos levam em consideração: alto teor de SiO₂ ou SiO₂/Al₂O₃, granulometria fina e material com fase amorfa. Caso essas características sejam evidenciadas, o material é capaz de reagir com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento.

O mecanismo de geopolimerização é pautado na habilidade dos oligômeros Al e Si serem liberados numa solução altamente alcalina, para a polimerização e formação dos compostos Na(K)-(Al)_n-(Si)_m-H, com intervalo para a razão m/n entre 1,5 e 3 (KAMSEU, et al., 2017). Para a formação dos polímeros, ou ainda, das estruturas tridimensionais típicas dos géis formados na matriz da pasta de cimento, a solução alcalina é imprescindível (KAMSEU, et al., 2017). De maneira geral, os geopolímeros são materiais que solicitam moderada energia para sua fomentação, sendo portanto amistosos para com o meio ambiente (KHALE, et al., 2007).

Kamseu et al (2017) afirmam que o desenvolvimento de compósitos geopoliméricos à base de metacaulim, com substituição de 75% do silicato de sódio pelo ativador formado pela

cinza da casca de arroz com o hidróxido de sódio, é uma alternativa importante para a produção de geopolímeros sustentáveis, sem contar na viabilidade mostrada pelos resultados tanto das propriedades mecânicas das amostras quanto das propriedades microscópicas das mesmas. Portanto, apenas 25% de silicato de sódio padrão, em termos do total do ativador alcalino, fez-se necessário para equilibrar o desempenho esperado para o aglomerante. A cinza da casca de arroz possui em sua composição cerca de 90 a 95% de sílica, sendo portanto utilizada como aglomerante em substituição ao aglomerante convencional (KAUR, et al., 2018).

Os concretos geopoliméricos têm atraído muitos pesquisadores para o estudo e análise de sua eficácia para o uso na indústria da construção, na qual a demanda por cimento vem aumentando no mundo inteiro. A grande vantagem que o concreto geopolimérico apresenta, com relação aos benefícios ambientais e a utilização de aglomerante cuja composição é majoritariamente de materiais reciclados, se tornou uma motivação para dar continuidade a um estudo detalhado inicializado por pesquisas prévias (HUSEIEN, et al., 2017).

Diversas linhas de pesquisa podem ser conduzidas por meio dos concretos geopoliméricos. É mister ressaltar que na abordagem de um material alternativo, existe uma vertente que não pode ser negligenciada, sendo esta as propriedades mecânicas desses novos componentes. E para efeito de comportamento estrutural, o estudo pode ser conduzido em direção à análise direta de peças estruturais. Alguns elementos de viga e de pilares podem ser produzidos em laboratório, desde que as dimensões se encaixem nas limitações dos ensaios e do ambiente próprio para o ensaio.

Os concretos geopoliméricos apresentam propriedades similares ou superiores se comparados com o concreto convencional de cimento Portland (ZHANG, et al., 2018). A evolução na resistência à compressão axial dos concretos geopoliméricos se dá, de acordo com os dados levantados por Zhang et al (2018), com ganho significativo em idades curtas. Numa linha comparativa entre os concretos ativados alcalinamente e os concretos convencionais, dependendo da tipologia de cimento Portland utilizada, as resistências iniciais podem ser altas, para o caso do CPV-ARI. A figura 1 mostra o crescimento observado para os dois grupos de concreto.

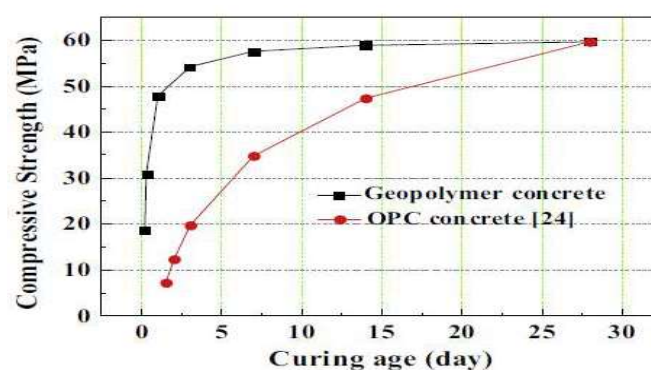


Figura 1. Evolução da resistência à compressão; **Fonte:** Zhan et al (2018).

Segundo Mathew et al (2018), as vigas de concreto geopolimérico possuem redução na sua capacidade de carga se submetidas a temperaturas superiores à 600°C. Tal redução é atribuída em especial ao decréscimo da ligação nas barras de aço decorrente da temperatura elevada. A ductilidade das vigas de concreto geopolimérico reduzem de maneira rápida com a elevação da temperatura em análise. É válido ressaltar que a curva-momento encontrada para as vigas de concreto geopolimérico e para as vigas de concreto convencional são semelhantes, o que torna possível uma utilização de análise comparativa

para com as deformações clássicas das vigas de concreto convencional, caso a procura seja das deformações convenientes nas peças de concreto alternativo (MATHEW, et al., 2018).

Conforme os distintos trabalhos que vão sendo reunidos, a viabilidade dos concretos geopoliméricos é clara. Diversas linhas, sejam elas focadas em propriedades mecânicas, ou em propriedades estruturais de peças (vigas, pilares ou lajes), ou ainda características físicas das matrizes de concreto, demonstram resultados significativos. Portanto essa vertente da pesquisa científica no ramo dos materiais alternativos possui grande difusão e grandes promessas de trabalhos futuros.

2. OBJETIVOS

O trabalho tem ênfase na análise das propriedades mecânicas de concretos com ativação alcalina prévia, estabelecendo em conjunto um comparativo para com os concretos ditos convencionais, já que o cimento Portland será suprimido de maneira integral nas matrizes dos concretos alternativos. De maneira específica, buscam-se os seguintes objetivos:

- Confeccionar um concreto alternativo otimizado, com diferentes dosagens, este com dispensa integral da utilização do cimento Portland e silicato de sódio;
- Buscar as melhores propriedades mecânicas dos concretos alternativos que serão elaborados, montando um comparativo para diferentes concretos de alta resistência inicial;

3. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho será dividida em duas partes. A primeira fornecerá a descrição dos materiais utilizados na elaboração dos concretos. A segunda irá tratar dos procedimentos experimentais e aparatos utilizados para a obtenção dos resultados preliminares.

3.1. Descrição dos materiais

3.1.1 Agregados

O agregado miúdo utilizado no desenvolvimento do projeto foi a Areia Média Natural, proveniente do Porto Nossa Senhora Aparecida, de Andradina – SP; já o agregado graúdo selecionado, foi classificado como sendo uma Brita 1, proveniente da Pedreira Três Irmãos, de Andradina – SP. Os materiais já foram previamente caracterizados, de maneira que as propriedades necessárias para proceder com as dosagens e análises posteriores foram recolhidas e utilizadas.

3.1.2 Aglomerante convencional

O aglomerante selecionado para a fabricação das amostras de concreto convencional, as que serão ditas de referência para efeito comparativo, foi o cimento CPV-ARI-Plus - Cimento Portland de Alta Resistência Inicial.

3.1.3 Metacaulim

Material de origem argilosa, e portanto rico em silício e alumínio, sendo que sua utilização será dada como aglomerante na mistura do concreto ativado alcalinamente. Tal composto terá função de precursor na matriz geopolimérica.

3.1.4 Cinza da casca de arroz (CCA)

Material alternativo silico-aluminoso altamente difundido no ramo da construção civil, com comercialização de unidades do material. Seu caráter pozolânico é intrínseco para a elaboração da matriz geopolimérica.

3.1.5 Soda cáustica (NaOH)

Em substituição ao silicato de sódio, a soda cáustica, combinada com um material de origem pozolânica, no caso a CCA, fornece uma composição aproximada em relação ao silicato.

3.2. Procedimento experimental

3.2.1 Panorama geral

A metodologia geral do trabalho será pautada em dois grupos de concretos, estes sendo instrumentos de análise posterior. Tomando como ponto central o estabelecimento de comparativos e pontos de proximidade entre dois grupos distintos de concretos, é de extrema relevância detalhar o processo de dosagem de ambos os componentes.

A fabricação das amostras de concreto ativado alcalinamente compõe-se em duas etapas: a primeira sendo a preparação do ativador (CCA + NaOH + H₂O), este sendo elaborado com 24 horas de antecedência ao amassamento do concreto. Passado um dia da mistura prévia dos materiais que integram o ativador alcalino, há a subsequente mistura destes com o aglomerante (metacaulim), e o efetivo amassamento do material, com a inclusão dos agregados à mistura. Em relação aos concretos convencionais, mantém-se o padrão especificado em norma, e conforme a dosagem, as amostras são construídas. Um intuito primordial do projeto foi manter o mesmo parâmetro de riqueza para as duas tipologias de concreto, e fatores água/cimento próximos, conforme a trabalhabilidade estudada previamente.

3.2.2 Dosagem do concreto de alta resistência inicial - Método de Dosagem do IPT/EPUSP Helene & Terzian

O método IPT/EPUSP Helene & Terzian consiste na elaboração de três traços de concreto, com as seguintes proporções entre aglomerantes e agregados secos, em massa: 1:3,5 (traço rico), 1:5,0 (traço médio) e 1:6,5 (traço pobre). Após a ruptura das amostras destes concretos, é elaborado um diagrama de dosagem, a partir do qual é possível obter a relação entre água e cimento (a/c), o traço e o consumo de cimento para o concreto definitivo, com as características pré-determinadas.

Uma vez que para os concretos referentes ao trabalho, o teor de argamassa e as proporções entre os materiais foram definidas como parâmetro constante, sendo elas: teor de argamassa de **50%** e traço **1:1,25:2,25**, os quantitativos de materiais são definidos conforme a expressão do consumo de cimento, a qual considera as massa específicas dos materiais e suas respectivas proporções na matriz de concreto.

$$C = 1000 - \text{teorar} (\%) / (1 / \gamma_c + a / c / \gamma_{\text{água}} + a / \gamma_a + p / \gamma_p) \quad (1)$$

Onde:

- γ_c é a massa específica do cimento, em kg/m³;
- $\gamma_{\text{água}}$ é a massa específica da água, a qual vale 1 kg/m³;
- γ_a é a massa específica da areia, em kg/m³;
- γ_p é a massa específica da brita, em kg/m³;

3.2.2 Dosagem dos concretos ativados alcalinamente (CAA)

Os concretos ativados alcalinamente (CAA) apresentam uma grande particularidade no seu procedimento de dosagem dos materiais. Existe a consideração de parâmetros estequiométricos para estabelecimento de cada proporção em específico. É mister iniciar a abordagem citando dois óxidos intrínsecos no tratamento desse tipo de matriz. São eles: SiO₂ e Na₂O. O parâmetro que terá variabilidade é justamente a proporção destes dois elementos; esse parâmetro, ξ , pode variar de 0 até em torno de 2,4, considerando as proporções ótimas testadas na matriz de argamassa. É válido ressaltar que essas relações

são provenientes do valor $\xi = 1,2$ no qual, em termos de massa, resultam em iguais quantidades de CCA e NaOH. Portanto, um incremento para $\xi = 1,6$ nos indica que houve um acréscimo do óxido SiO_2 .

O precursor (metacaulim) da matriz geopolimérica será o parâmetro inicial que fornecerá o volume de CAA final. De maneira empírica, constatou-se que são necessárias 680 gramas do precursor para gerar um volume de CAA de 1,6 litros, o qual se aproxima do volume característico do corpo-de-prova com altura de 20 centímetros e diâmetro de 10 centímetros.

Com relação ao ativador, cuja composição não traz o silicato de sódio industrial, terá as massas da CCA (cinza da casca de arroz) e do NaOH (soda cáustica) conforme o parâmetro ξ . A água da mistura será de acordo com as proporções geradas mediante os cálculos estequiométricos e a molalidade estabelecida para a confecção das amostras. A molalidade permite a retirada, em valores de massa, dos materiais utilizados na construção dos CAA's. Considerando o peso molecular dos óxidos SiO_2 e Na_2O , e levando em consideração o fato destes componentes serem a base da CCA e da soda cáustica, respectivamente, é possível levantar os quantitativos desses materiais. A preparação dos concretos ativados alcalinamente solicita confecção prévia (24 horas de antecedência) do ativador.

Em relação aos agregados, a traço foi fixado na proporção 1:1,25:2,25, em que o metacaulim (aglomerante) fornece o parâmetro Inicial para a determinação dos demais quantitativos. O fator água/aglomerante foi padronizado no valor de 0,6, este com origem em testes empíricos de argamassas geopoliméricas para a avaliação da melhor amostra em termos de trabalhabilidade e possibilidade de fabricação dos corpos de prova. É importante garantir que os agregados ocupem mais de 70% da massa total da matriz de concreto CAA.

Conforme a dosagem própria especificada, a tabela 1 traz os valores percentuais dos componentes para a confecção dos concretos. Em conjunto com os parâmetros de dosagem dos concretos CAA, a tabela também fornece as proporções dos concretos convencionais. Uma vez que o aglomerante para as matrizes é o metacaulim, é a partir dele que a dosagem se procede, com a determinação do restante dos materiais. As massas e os respectivos volumes arbitrários de CAA são definidos conforme as proporções apresentadas.

Tabela 1. Proporção dos materiais para a dosagem dos CAA's e concretos referência

Amostra	Aglomerante (%)	$\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$	Aglomerante:água:a:p	Molalidade
CAA-1,2	100% MK	1,2	1:0,6:1,25:2,25	8
CAA-1,6	100% MK	1,6	1:0,6:1,25:2,25	8
CAA-2,0	100% MK	2,0	1:0,6:1,25:2,25	8
CPV-ARI 0,55	100% CPV-ARI	-	1:0,55:1,25:2,25	-

Nota: MK se trata da nomenclatura referente ao Metacaulim. A Molalidade é medida em mol.Kg-1.

O correspondente a um quilograma de metacaulim fornece, em termos de volume, aproximadamente 2,5 litros de concreto ativado alcalinamente, seguindo a dosagem especificada. Uma análise primária da tabela 1 concretiza, em termos percentuais, as relações estabelecidas entre o aglomerante e os agregados e a água de amassamento. Os componentes base para o ativador alcalino se relacionam, de maneira estequiométrica, conforme o parâmetro ξ , sendo convertidos em massa conforme seus pesos moleculares e a molalidade definida para as dosagens.

3.2.3 Amassamento, adensamento e cura dos concretos

A mistura típica para os concretos convencionais será a padrão para a elaboração dessa tipologia de amostra. Pesados os quantitativos dos materiais, iniciou-se o processo de mistura mecânica destes na betoneira. Inicialmente, foram adicionados os agregados que

compõem a mistura (Brita 1 e Areia Média), além de 50% da parcela da água dosada. A betoneira foi ligada por 60 segundos. Posteriormente foi acrescentado o aglomerante CPV-ARI e os demais 50% da água referente.

Na sequência, o concreto formado foi misturado por mais 180 segundos, até que sua consistência ideal fosse verificada. No que diz respeito ao uso de aditivo superplastificante, para as dosagens trabalhadas não se fez necessário o acréscimo deste material à mistura, uma vez que os concretos apresentam fator a/c considerável e portanto, em sua essência, já apresentaram trabalhabilidade satisfatória.

O adensamento dos concretos foi desenvolvido de maneira padronizada para os dois grandes grupos de concretos. É mister ressaltar que tais tipologias apresentam fluidez com significativa distinção, entretanto, a construção dos corpos de prova foi viabilizada pela coesão de todas as matrizes de concreto. Com o auxílio da mesa vibratória, estipulando o tempo de vibração em aproximadamente 60 segundos, o preenchimento das fôrmas foi gradativo e se deu através de três camadas (cerca de um terço da altura do molde, para cada parcela).

Foram utilizados moldes de PVC, cilíndricos, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para os concretos de alta resistência inicial, enquanto que, para os concretos CAA, os moldes foram encomendados com material propício para a não aderência entre o mesmo e o concreto ativado alcalinamente. Com relação à cura das amostras, os corpos de prova confeccionados permaneceram em câmara úmida para cura, mediante temperatura de 25°C e umidade relativa do ar de 100%, até as idades correspondentes de ensaio.

3.2.4 *Ensaio destrutivo e manuseio de dados*

Após o tempo de cura de cada concreto em questão, realizou-se o ensaio de resistência à compressão diametral (NBR 7222 - ABNT, 2011). As idades de ensaios foram iguais a 7, 28 e 90 dias. A ruptura foi conduzida com a utilização de uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade de 300KN de carga aplicada. De posse dos valores das rupturas, a resistência à compressão diametral será medida analisando a área da superfície lateral do corpo de prova, já que essa região foi solicitada.

O ensaio de resistência à compressão axial foi conduzido segundo a norma NBR 5739 - ABNT, 2007. As idades de ensaios propostas foram as necessárias para a construção do ganho de resistência inicial e também para a avaliação em maiores idades de cura. São elas: 1, 3, 7, 14, 28 e 90 dias. Os valores médios foram calculados considerando o desvio relativo máximo, conforme item 3.6.3 da NBR 7215 (ABNT, 1997). Para desvios relativos máximos superiores a 6%, foram desconsiderados os valores discrepantes e calculadas novas médias, conforme prescreve o item 3.6.4 da NBR 7215 (ABNT, 1997).

Além da apresentação dos dados das médias de resistência à compressão, calculou-se o desvio padrão correspondente, após o descarte dos corpos de prova com desvios relativos acima de 6%. Com o desvio padrão calculado, o cálculo do coeficiente de variação pode ser procedido utilizando a média de resistência obtida. O desvio padrão relaciona os valores de cada amostra com a média calculada.

Em concomitância com o ensaio de resistência à compressão axial, foi coletado o módulo de elasticidade longitudinal dos concretos, por meio da utilização de extensômetros para medição da deformação. Portanto, houve o levantamento da carga última de ruptura juntamente com a relação entre as grandezas de tensão aplicada e deformação evidenciada, sendo, através da relação entre ambas, possível quantificar o módulo de elasticidade longitudinal das amostras.

4. RESULTADOS

4.1. Resistência à compressão diametral

A tabela 2 reúne as resistências à compressão diametral acompanhadas do coeficiente de variação próprios de cada amostragem considerada.

Tabela 2. Resistência à compressão diametral (MPa)

Amostra	7 dias	28 dias	90 dias
CAA-1,2	1,37 ± 3,75%	1,37 ± 7,93%	1,40 ± 3,14%
CAA-1,6	2,08 ± 6,14%	2,79 ± 2,35%	2,90 ± 4,46%
CAA-2,0	3,21 ± 3,26%	3,32 ± 0,35%	3,48 ± 12,83%
CPV 0,55	3,30 ± 1,31%	3,74 ± 1,16%	4,20 ± 6,52%

No geral, as resistências adquirem seus valores limite na idade de sete dias, mantendo-os para as idades subsequentes. Os coeficientes de variação demonstram baixa variabilidade com relação aos valores médios levantados. Os concretos se caracterizam por serem materiais de baixa resistência à compressão diametral. Fica observada um aumento na resistência à compressão diametral à medida que a solução ganha em quantitativo de CCA. Portanto da amostra CAA-1,2 até a amostra CAA-2,0 há um crescimento significativo na propriedade analisada. Verifica-se, em acréscimo, uma maior proximidade entre o grupo CAA-2,0 e CPV-ARI 0,55, aproximando-os, inicialmente para a mesma classe de resistência à compressão diametral. O concreto CPV-ARI 0,45 evidencia um desempenho maior no que diz respeito ao ensaio analisado, e portanto, espera-se um distanciamento também nas demais propriedade que serão analisadas.

4.2. Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade

Para uma análise do ganho de resistência em idades mais curtas, avalia-se, inicialmente, as primeiras resistências dos concretos. A tabela 3 abrange as resistências à compressão axial acompanhadas dos coeficientes de variação da amostragem considerada, até os 28 dias.

Tabela 3. Resistência à compressão axial (MPa)

Amostra	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
CAA-1,2	6,22 ± 3,12%	16,36 ± 4,28	16,53 ± 6,87%	16,43 ± 6,88%	17,10 ± 0,55%
CAA-1,6	16,58 ± 1,47%	21,00 ± 0,18%	26,79 ± 3,20%	28,53 ± 1,94%	28,75 ± 2,91%
CAA-2,0	15,54 ± 3,20%	22,90 ± 2,96%	29,91 ± 5,50%	29,72 ± 0,21%	33,00 ± 2,67%
CPV 0,55	14,26 ± 1,60%	20,38 ± 6,26%	24,36 ± 9,08%	32,22 ± 8,38%	33,25 ± 7,73%

Os dados da tabela 2 fornecem as curvas de resistência ilustradas pela figura 2, a qual é apresentada na sequência:

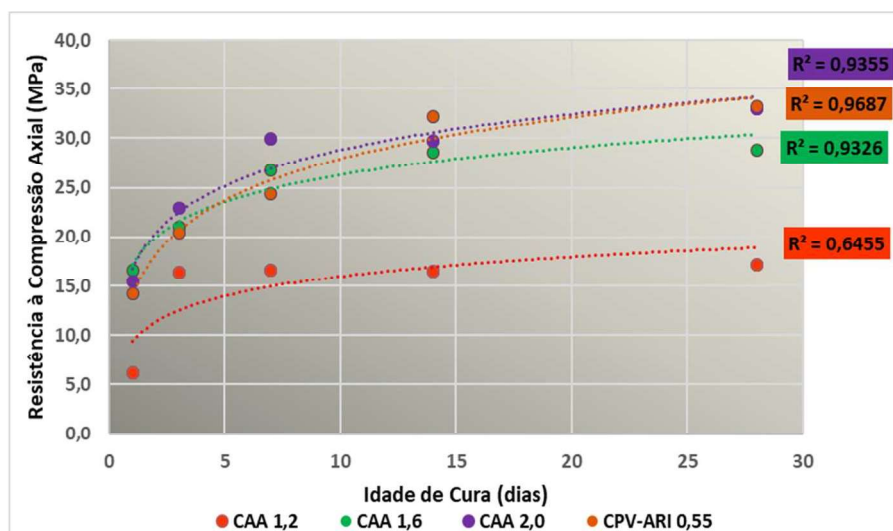


Figura 2. Curvas que melhor representam a evolução da resistência à compressão axial dos concretos.

Em termos comportamentais da curva de resistência, o formato logarítmico garante um valor do R^2 acima de 95% para ambos os modelos de curvas, no que faz referência ao concreto CPV-ARI. Portanto existe uma alta possibilidade de valores medidos em idades aleatórias, ou até mesmo novas medições das idades correspondentes para a construção das curvas, estarem expressos pela formato de curva apresentada.

Procedendo com a análise direcionada aos concretos ativados alcalinamente, com exceção da tipologia CAA-1,2, as demais amostras (CAA-1,6 e CAA-2,0) apresentam um comportamento próximo ao formato logarítmico, o que diretamente aproxima os concretos CAA do de alta resistência inicial CPV-ARI. De fato, uma vez que era desconhecido o comportamento geral dessas amostras alternativas, existe uma proximidade clara para com os concretos convencionais. Assim como nas próprias médias de resistências, as curvas de evolução dessa propriedade aproximam, em especial as amostras com melhores propriedades, os concretos CAA com o referência para análise CPV-ARI 0,55.

O grupo CAA 2,0 demonstrou o ápice dos resultados dentre os concretos alternativos, com o alcance da classe C30 para a resistência à compressão axial. A amostra CAA 1,6 é muito próxima da classe C30, porém usando o critério das médias de resistências, a classe C25 seria, em conjunto com a C30, plausível de ser designada para esse tipo de concreto ativado alcalinamente. Em contrapartida, o grupo CAA 1,2 fornece uma propriedade visivelmente inferior aos demais, sendo que sua classe estaria inserida entre as padronizadas C15 e C20.

Elaborando um paralelo entre as amostras CAA-1,2 e CAA-2,0, em relação à dosagem, não há grandes distinções. Contudo, é de extrema importância o ponto de partida nessas amostras alternativas fomentadas. A dispensa do silicato de sódio torna intrínseco o fornecimento adequado de silício através do resíduo base do trabalho. A cinza, a qual é a fornecedora de sódio, deve ser atuante na mistura de concreto, e de maneira empírica observa-se que a classe terá desempenho mais satisfatório a partir do CAA-1,6.

Com relação ao módulo de elasticidade, os dados obtidos pelo ensaio descrito na metodologia é exposto pela tabela 4:

Tabela 4. Módulo de elasticidade longitudinal (GPa).

Amostra	1 dia	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
CAA-1,2	5,21 ± 4,04%	11,13 ± 7,55	10,94 ± 8,06%	11,44 ± 13,92%	11,16 ± 2,25%
CAA-1,6	5,44 ± 4,22%	12,90 ± 9,78%	13,34 ± 1,60%	13,72 ± 1,52%	14,96 ± 0,56%

CAA-2,0	8,83 ± 6,94%	13,24 ± 5,55%	16,89 ± 4,25%	16,08 ± 2,38%	16,13 ± 3,48%
CPV 0,55	20,17 ± 5,11%	23,65 ± 2,21%	23,74 ± 11,38%	25,28 ± 9,17%	25,41 ± 6,05%

Existe um claro distanciamento da propriedade, comparando os concretos de alta resistência inicial e os concretos ativados alcalinamente. Aos sete dias de idade, são notórios os módulos alcançados pelo grupo CPV-ARI 0,55, com superação da faixa de 20 GPa para ambos.

Os concretos alternativos atingem limitações no que diz respeito ao módulo de elasticidade. Em especial o grupo CAA-2,0, houve êxito pelo aumento dessa propriedade, apesar das médias apresentarem quedas na transição entre as idades de 7, 14 e 28 dias. Em termos estatísticos, e considerando a sensibilidade do medidor de deformação utilizado para a construção do módulo, há uma possível constância na propriedade em questão, apesar do que está retratado para o CAA-2,0 aos 14 dias de idade, cujos valores limitadores são 16,17 GPa e 17,61 GPa.

As curvas de evolução dessa propriedade foram construídas de maneira análoga à resistência à compressão axial. Segue a figura 3 com a descrição das curvas:

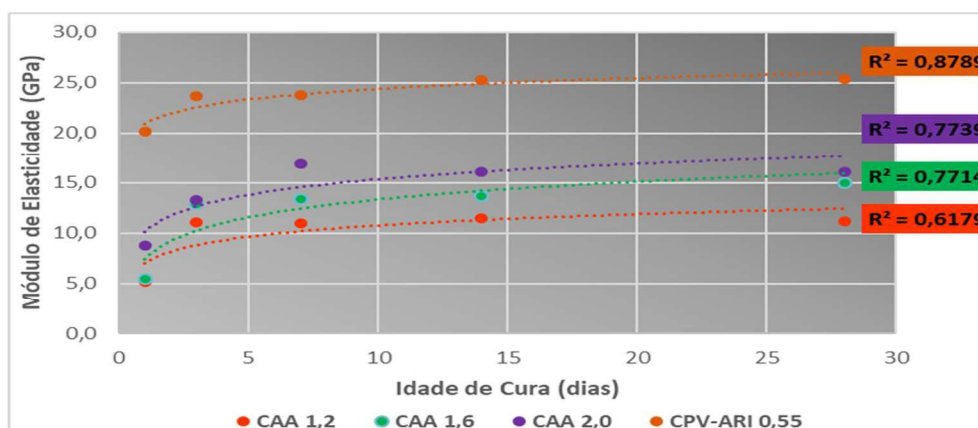


Figura 3. Curvas logarítmicas representativas da evolução do módulo de elasticidade longitudinal dos concretos.

Os formatos logarítmicos são, visualmente uma escolha de alta pertinência. Porém, o fator de proximidade dos valores base para com as curvas retratam de maneira opostora a validade do modelo de curva. O concreto CAA-1,2 é de fato a amostra que fornece a maior instabilidade em termos de características mecânicas, em que, tanto na propriedade do módulo de elasticidade, quanto na resistência à compressão axial, há um crescimento único até os três dias de idade, com posterior constância dos parâmetros. Os demais concretos alternativos têm maior proximidade com o concreto de alta resistência inicial, pois há uma elevação dos valores mais declarada, em especial entre as idades de 1 e 14 dias.

Com relação aos parâmetros médios aos 90 dias de idade, observam-se os seguintes valores, conforme é apresentado pela tabela 5.

Tabela 5. Propriedades mecânicas dos materiais aos 90 dias.

Amostra	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
CAA-1,2	18,97 ± 0,61%	10,96 ± 2,08%
CAA-1,6	28,45 ± 1,35%	17,27 ± 1,45%
CAA-2,0	33,50 ± 2,46%	16,91 ± 3,43%
CPV 0,55	37,11 ± 6,83%	29,97 ± 4,56%

Não houve a constatação de ganhos consideráveis na transição entre as idades de 28 e 90 dias. De maneira geral, a amostra CAA-1,6 apresentou a maior elevação, dentre os compostos alternativos, no módulo de elasticidade. Esta, entretanto, não evidencia uma distinção sólida em termos numéricos. Em suma, há a manutenção dos valores das propriedades mecânicas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados reforçam os objetivos que foram propostos pelo trabalho. Em termos da fabricação dos concretos ativados alcalinamente, o seu procedimento de dosagem foi contemplado com eficácia e foi possível perceber os distintos condicionantes dos materiais que interferem mais adiante, nas propriedades mecânicas propriamente ditas.

Em relação às diferentes tipologias de CAA trabalhadas, houve um alcance das melhores propriedades na amostra CAA-2,0, a qual, em termos de dosagem, possui seu ativador mais robusto em termos do quantitativo de silício e consequente fator de polimerização. Porém, é mister ressaltar que o grupo CAA-1,6 forneceu resultados pertinentes, em especial para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 7222: concreto e argamassa — determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011. 1 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: cimento portland — determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997. 8 p.
- Davidovits, J., 2008. *Geopolymer Chemistry and Applications*, p. 570. Publ. Morrisville, USA.
- Fan, F.; Liu, Z.; Xu, G.; Peng, H.; Cai, C.S. *Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers*. *Construction and Building Materials*, v.160, p.66-81, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.023>.
- Gao, T.; Shen, L.; Shen, M.; Chen, F.; Liu, L.; Gao, L. *Analysis on differences of carbon dioxide emission from cement production and their major determinants*. *Journal of Cleaner Production*, v.103, p.160-170, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.026>.
- Helene, P.; Terzian, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. São Paulo: Copyright editora PINI LTDA, p.349, 1993.
- Huseien, G.F.; Mirza, J.; Ismail, M.; Ghoshal, S.K.; Hussein, A.A. *Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.80, p.54-74, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.076>.
- Kamseu, E.; Beleuk à Moungam, L.M.; Cannio, M.; Billong, N.; Chaysiwan, D.; Chinje Melo, U.; Leonelli, C. *Substitution of sodium silicate with rice husk ash-NaOH solution in metakaolin based geopolymer cement concerning reduction in global warming*. *Journal of Cleaner Production*, v.142, p.3050-3060, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.164>.
- Kaur, K.; Singh, J.; Kaur, M. *Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator*. *Construction and Building Materials*, v.169, p.188-192, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.200>.
- Khale, D.; Chaudhary, R. *Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review*. *J Mater Sci*, v.42, p.729-746, 2007. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-006-0401-4>.

- Mathew, G.; Joseph, B. *Flexural behaviour of geopolymer concrete beams exposed to elevated temperatures. Journal of Building Engineering*, v.15, p.311-317, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.09.009>.
- Neville, A.M. *Propriedades do concreto / A. M. Neville; tradução: Ruy Alberto Cremonini. - 5. Ed. - Porto Alegre: Bookman, 2016.*
- Shen, L.; Gao, T.; Zhao, J.; Wang, L.; Lan, W.; Liu, L.; Chen, F.; Xue, J. *Factory-level measurement on CO₂ emission factors of cement production in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.34, p.337-349, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.025>.
- Shi, C; Krivenko, P.V; Roy, D. *Alkali-Activated Cements and Concretes. e-Library*, 2005, 388p.
- Tashima, M. M. *Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento Portland. 2006. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.*
- Zhang, H.Y.; Kodur, V.; Wu, B.; Yan, J.; Yuan, Z.S. *Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete. Construction and Building Materials*, v.163, p.277-285, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.043>.

7. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.