

ESTUDO PARA USO DO RESÍDUO DO BIOETANOL CELULÓSICO ADICIONADO AO CIMENTO EM ARGAMASSAS DE CONCRETO**Bruna Ferraz^{1*}, Carlos Calado¹, Aires Camões²**

1: Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco-UPE
Av. Agamenon Magalhães, S/N, Santo Amaro, Recife-PE, Brasil. CEP 50100-010
bfgcd@poli.br; carlos.calado@upe.br

2: CTAC, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho-UMINHO
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal
aires@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Resíduo, Lignina, Concreto, Argamassas, Sustentabilidade**Resumo**

O crescente volume de resíduos gerados pelas indústrias passou a ser um dos maiores problemas ambientais atuais. O setor da construção civil encontra-se em destaque, pois, além da responsabilidade na geração de resíduos, também causa impactos pela extração de matérias primas e por elevar as emissões de CO₂ na atmosfera com a fabricação do cimento. A utilização de subprodutos industriais como materiais de construção não convencionais é uma alternativa para contribuir com a redução da degradação ambiental e agregar valor econômico aos meios de produção.

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a viabilidade técnica de aplicação do resíduo gerado pela produção do bioetanol celulósico de segunda geração e do resíduo gerado pela indústria de celulose e papel em substituição parcial do cimento em argamassas de concreto auto-adensável (CAA) e concreto convencional vibrado (CC). O desempenho dessas composições foi estudado em seu estado endurecido, com ensaios de resistência à compressão e durabilidade, e em seu estado fresco, verificando sua trabalhabilidade.

O resíduo do bioetanol celulósico de 2ª geração obtido da cana de açúcar foi estudado apenas secado em estufa e destorroado (Bsec) e queimado para obtenção de cinzas (Bcin), tendo os resultados sido comparados com a lignina da produção de celulose e papel (Lign), em oito diferentes composições de argamassa para concreto, A1 a A8, com substituição parcial do cimento pelos diferentes resíduos, Bsec, Bcin e Lign, e com incorporação de aditivos SP e P. Esses resíduos possuem lignina em suas respectivas composições e foram aplicados sem novo processamento industrial, in natura. Para cada ensaio foram realizadas três execuções. O percentual aplicado dos resíduos estudados foi de 2,5% em massa da mistura de ligante, sendo o ligante considerado como a mistura de cimento e resíduo, base seca, razão água/ligante (a/l) = 0,50, cimento CP III 40 RS.

Os resultados demonstraram: houve compatibilidade entre os resíduos e aditivos químicos; o tempo de início de pega e o índice de consistência aumentaram com a aplicação dos resíduos; o melhor resultado de resistência à compressão foi de Lign, seguido de Bcin, com o menor desempenho para Bsec; os indicadores de durabilidade melhoraram em todos os ensaios nas composições com resíduos. A continuidade da pesquisa pode trazer contribuição para a sustentabilidade e melhoria do meio ambiente.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento tecnológico atual agregou significativamente a produção de bens industrializados e volume de recursos minerais explorados. Associado a isto, elevou-se a quantidade de resíduos produzidos, fazendo com que milhões de toneladas de resíduos inorgânicos sejam produzidas diariamente em todo o planeta [1]. A indústria da construção civil é o setor responsável pelo maior consumo de matéria prima, estimando 15 a 50% de recursos extraídos. Desta forma, visando a minimização dos impactos ambientais, buscam-se políticas ambientais mais eficientes, utilizando novas tecnologias e produtos. Por consequência, buscam-se formas de utilizar subprodutos industriais como material de construção para minimizar os impactos decorrentes da disposição destes resíduos no ambiente e reduzir os custos envolvidos nessa atividade [2, 3]. A exemplo da produção de bioetanol celulósico, celulose e papel, os resíduos destes processos industriais possuem elevado percentual de lignina. Nas plantas, a lignina confere rigidez às paredes celulares cimentando-as, provocando aumento de resistência [4]. O bioetanol celulósico, também denominado etanol de 2ª geração, é gerado a partir dos resíduos da produção do açúcar e etanol de 1ª geração, palha e bagaço [5]. No entanto, essa produção também deixa resíduo com lignina que pode ser reaproveitado. Em pesquisa desenvolvida na Universidade do Kansas, foram adicionadas as cinzas do resíduo da produção do bioetanol ao cimento substituindo 20% em massa do cimento, proporcionando aumento de resistência à compressão do concreto em 32% [6]. Em relação à lignina presente no resíduo da produção de celulose e papel, o Brasil produziu em 2017 19,5 milhões de ton. de celulose, o que permitiria a extração de 20 mil ton. de lignina a partir do resíduo licor negro [7, 8].

O objetivo principal da pesquisa foi estudar a viabilidade técnica de substituir parcialmente o cimento em argamassas de concreto auto-adensável (CAA) e concreto convencional vibrado (CC) pelo resíduo gerado pela produção do bioetanol celulósico, da cana de açúcar, de 2ª geração e pela lignina extraída do licor negro descartado pela indústria de celulose e papel. O percentual de substituição utilizado foi escolhido a partir dos resultados de pesquisa anterior com lignina, desenvolvida por Calado *et al.* de 2,5% [9].

Como objetivos secundários: comparar o desempenho entre os resíduos da produção do bioetanol celulósico de 2ª geração e da lignina; analisar viabilidade da aplicabilidade dos resíduos nas argamassas de concreto sem novos processamentos industriais que viessem a gerar novos custos e poluição ambiental; verificar compatibilidade dos resíduos com os aditivos químicos plastificantes e superplastificantes usualmente adicionados ao concreto. Assim, o resíduo do bioetanol celulósico foi estudado de duas formas: apenas secado em estufa e destorroado (**B_{sec}**) e queimado para obtenção de cinzas (**B_{cin}**). Seus resultados foram comparados com a lignina da produção de celulose e papel (**Lign**). Foram analisadas oito diferentes composições de argamassa para concreto, A1 a A8, onde A1 e A2 foram as composições de referência sem adição de resíduos e A3 a A8 tiveram substituição parcial do cimento pelos diferentes resíduos, **B_{sec}**, **B_{cin}** e **Lign**, e estudos com incorporação de aditivo plastificante e superplastificante. No estado fresco, foram aplicados ensaios de agulha de Vicat para os tempos de início e fim de pega e ensaios para determinação dos índices de consistência. No estado endurecido, foram aplicados ensaios de resistência à compressão e de durabilidade através de absorção de água por capilaridade, ascensão capilar e índice de vazios. A viabilidade técnica foi estudada também através da compatibilidade entre os constituintes com ênfase para os aditivos químicos superplastificantes (SP) e plastificantes (P) combinados, tomando-se por base as composições mais aplicadas na região metropolitana do Recife.

2. CONSTITUINTES E COMPOSIÇÕES APLICADOS NA PESQUISA

2.1. Constituintes

O resíduo do bioetanol de 2ª geração foi fornecido pela GranBio, indústria brasileira de biotecnologia, localizada na cidade de São Miguel dos Campos - Alagoas, e foi coletado *in natura* diretamente do local de armazenamento. No laboratório, uma parte do resíduo foi secada em estufa e então destorroada e peneirada, obtendo-se então o **B_{sec}** apresentado na Figura 1. A outra parte foi queimada em forno artesanal de gesso desenvolvido para uso científico, mostrado na Figura 2, estando o forno pronto para início da queima. A Figura 3 mostra o resíduo queimado após retirado do forno, já destorroado e peneirado, **B_{cin}**.



Figura 1. Resíduo **B_{sec}**



Figura 2. Conjunto do forno montado e pronto para ser utilizado

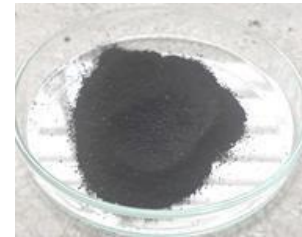


Figura 3. Resíduo **B_{cin}**

A balança termogravimétrica modelo DTG-60, fabricada pela Shimadzu®, foi utilizada para determinar o teor final de cinzas nos resíduos **B_{sec}** e **B_{cin}**, que realiza a queima de uma amostra de aproximadamente 20mg de resíduo durante 2 horas, variando entre temperatura ambiente e 950°C ou até a estabilização gravimétrica da amostra, na presença constante de oxigênio. O termograma identificou 8,45% de umidade, 82,29% de voláteis, restando ao final do processo 17,21% de cinzas. Com os resultados, concluiu-se que **B_{cin}** é mais estável termicamente do que **B_{sec}**, visto que as suas substâncias voláteis foram consumidas após 400°C, enquanto **B_{sec}** apresentou estes resultados após 300°C. De acordo com a análise físico-química realizada em parceria com o Departamento de Química da UFRJ, em três amostras de **B_{sec}** obteve-se a média de 53,5% de lignina na sua composição, com 48,94% de carbono, 5,62% de hidrogênio e 1,42% de nitrogênio.

O laboratório de combustíveis da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco foi utilizado para determinação do percentual de hemicelulose, celulose, lignina e constituintes celulares na análise das fibras. Foram utilizadas soluções de detergente neutro e ácido para a retirada dos constituintes, cinzas solúveis e hemicelulose, restando lignina, celulose e cinzas insolúveis. Três amostras com 0,3g do material foram utilizadas para determinação da lignina, desta forma, foi adicionada solução de 72% de ácido sulfúrico, macerada por 1 hora conforme mostrado na Figura 4 e levada ao digestor, Figura 5, para fibra MA450 por 4 horas. Logo após, foram filtradas, Figura 6, e secas em estufa, sendo o percentual dado pelo material que ficou retido no filtro. Os resultados estão presentes na Tabela 1.

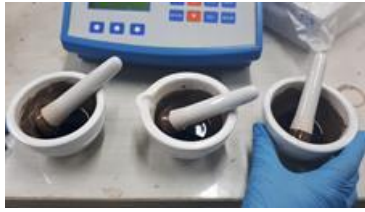


Figura 4. Amostras maceradas



Figura 5. Soluções no digestor



Figura 6. Amostras sendo filtradas

Tabela 1. Percentual de lignina pela análise de fibras.

Amostra	Filtro (g)	Filtro + filtrado (g)	Diferença (g)	Lignina (%)
1	1,905	2,0607	0,1557	51,90%
2	1,9698	2,1315	0,1617	53,90%
3	2,035	2,1991	0,1641	54,70%

As características físico-químicas do resíduo proveniente da indústria de celulose e papel, a lignina extraída do licor negro pelo processo Kraft, fornecida pela EMBRAPA do estado do Paraná são: 48,79% de carbono; 5,44% de hidrogênio; 36,16% de oxigênio e 14,4% de cinzas em massa, conforme análise físico-química realizada em parceria com o Departamento de Química da UFRJ. A lignina será denominada de **Lign**.

Os demais insumos utilizados nos ensaios foram adquiridos de acordo com o aplicado nas construções locais. O cimento utilizado foi o CP III 40 RS. A areia lavada teve origem em jazidas entre Pernambuco e Paraíba, possuindo dimensão máxima de 2,39 mm e módulo de finura 2,409. Os aditivos químicos aplicados foram o superplastificante (SP) Sika®Viscocrete 60 HE e o plastificante (P) Bauchemie®FK 840-MC.

2.2. Composições de argamassas de concreto

Foram estabelecidas oito composições diferentes detalhadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2. Detalhamento das Composições A1 a A8.

Constituintes	U.	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
CP III 40 RS	g	588	588	573,3	573,3	573,3	573,3	573,3	573,3
B _{sec} (2,5%)	g	-	-	-	-	14,7	14,7	-	-
B _{cin} (2,5%)	g	-	-	-	-	-	-	14,7	14,7
Lign (2,5%)	g	-	-	14,7	14,7	-	-	-	-
Areia	g	1252	1252	1252	1252	1252	1252	1252	1252
Água	g	288	288	288	288	288	288	288	288
SP	g	-	5,88	5,88	-	5,88	-	5,88	-
P	g	-	3,5	3,5	-	3,5	-	3,5	-
Relação (a/l)	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

A1 foi a composição de referência sem adição de resíduo e de aditivos químicos, enquanto que A2 foi a composição de referência sem adição de resíduo e com aditivos químicos (SP+P).

A3 foi a composição com adição de **Lign** e presença dos aditivos químicos (SP+P), enquanto A4 foi a composição com adição de **Lign** e sem os aditivos químicos (SP+P).

A5 foi a composição com adição de **B_{sec}** e presença dos aditivos químicos (SP+P), enquanto A6 foi a composição com adição de **B_{sec}** e sem os aditivos químicos (SP+P).

A7 foi a composição com adição de **B_{cin}** e presença dos aditivos químicos (SP+P), enquanto A8 foi a composição com adição de **B_{cin}** e sem os aditivos químicos (SP+P).

Buscou-se obter indicativos quanto a viabilidade técnica do uso dos resíduos e também a compatibilidade com os aditivos químicos SP e P quando usados em conjunto, como na maior parte das composições de concreto auto-adensável (CAA) aplicadas na região do estudo.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

3.1. Ensaio de agulha de Vicat

Na Tabela 3, foram definidas oito composições diferentes de pastas, onde as pastas P1 e P2 foram de referência, sendo respectivamente cimento (C) + água (A) e C + A + aditivos (SP+P). As pastas P3 e P4 tiveram a adição **B_{sec}** sem e com os aditivos (SP+P) respectivamente. As pastas P5 e P6 tiveram a adição **B_{cin}** sem e com os aditivos (SP+P) respectivamente, enquanto que as pastas P7 e P8 tiveram a adição **Lign** sem e com os aditivos (SP+P) respectivamente.

Tabela 3. Detalhamento das composições das pastas P1 a P8

Constituintes	Unid	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
CP III 40 RS	g	500	500	487,5	487,5	487,5	487,5	487,5	487,5
B_{sec}	g	-	-	12,5	12,5				
B_{cin}	g	-	-			12,5	12,5		
Lign	g	-	-					12,5	12,5
Água	g	158	158	158	158	158	158	158	158
SP	g	-	5	-	5	-	5	-	5
P	g	-	3	-	3	-	3	-	3

A execução dos ensaios pode ser visualizada na Figura 7, com o molde preenchido com a pasta, e na Figura 8, com o equipamento da agulha de Vicat em operação. Os ensaios foram realizados conforme a Norma ABNT NBR NM 65 [10]. O tempo de início de pega foi determinado quando a agulha penetrou (4 ± 1) mm na pasta com leituras realizadas com intervalos de 15 minutos e o tempo de fim de pega quando a agulha penetrou 0,5 mm com leituras realizadas no mesmo intervalo de tempo.



Figura 7. Molde preenchido com pasta



Figura 8. Penetração da agulha de Vicat

3.2. Ensaio de índice de consistência

A execução do ensaio consistiu no preenchimento do molde tronco-cônico para, em seguida, posicioná-lo no centro de mesa vibratória onde a argamassa era liberada, Figura 9, seguindo-se a vibração manual consistindo de trinta quedas em trinta segundos cronometrados, quando era efetuada a medição dos diâmetros nas duas diagonais para obtenção do valor médio do espalhamento, Figura 10. Os ensaios seguiram a ABNT NBR 13276 [11] e a ABNT NBR 7215 [12], sempre utilizando três moldagens para cada composição ensaiada, onde o índice de consistência era a medida do diâmetro médio da base do tronco de cone de argamassa após o espalhamento/abatimento, com as medições sendo feitas com auxílio de paquímetro e expressas em milímetros.



Figura 9. Molde preenchido com argamassa



Figura 10. Argamassa após espalhamento

3.3. Ensaio de resistência à compressão

Foram moldados três corpos de prova (CPs) para cada idade, 9 CPs para cada composição estudada, exemplificando uma composição na Figura 11, totalizando 72 moldagens para rompimento nas idades de 7, 28 e 90 dias. Todos os corpos de prova cilíndricos possuíam diâmetro de 50 mm e altura 100 mm tendo sido curados em câmara úmida com temperatura de 27°C e umidade de 80%. Os ensaios seguiram as recomendações da ABNT NBR 7215 [12] e foram realizados no laboratório de materiais de construção da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Foi utilizada a prensa computadorizada modelo EMIC DL 300, Figura 12, carregamento constante de 0,040 mm/s, onde os resultados eram fornecidos por software próprio com produção de gráficos e apresentação das resistências em MPa.



Figura 11. Materiais selecionados e pesados



Figura 12. Prensa EMIC DL 300

3.4. Durabilidade: Absorção de água por capilaridade, Ascensão capilar e Índice de vazios.

Moldaram-se três corpos de prova (CPs) para cada composição na idade de 60 dias, totalizando 21 moldagens. Os CPs foram secados em estufa e resfriados até a temperatura ambiente de 27°C quando foram pesados para determinação de suas massas e iniciados os ensaios. Em seguida, foram colocados sobre filme de água com altura constante de (5 ± 1) mm acima da face inferior, quando as massas foram sendo medidas nos tempos de 3, 6, 24, 48 e 72 horas. Em seguida à última pesagem, os CPs foram rompidos através do ensaio de compressão diametral, Figura 13, sendo possível medir a ascensão capilar, Figura 14. Os ensaios de absorção de água por capilaridade e ascensão capilar, tomaram por base a ABNT NBR 9779 [13] e a ABNT NBR 7222 [14], enquanto a determinação do índice de vazios foi feita conforme a ABNT NBR 9778 [15]. As composições ensaiadas foram: A2 (referência), sem adição de resíduo e com aditivos químicos SP e P; A3, A5 e A7 com resíduos e aditivos químicos; A4, A6 e A8, com resíduos e sem aditivos químicos.



Figura 13. Rompimento diametral



Figura 14. Visualização da ascensão capilar

4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE AVALIATIVA

4.1. Tempos de início (Ti) e fim (Tf) de pega por agulha de Vicat

A Figura 15 apresenta gráfico dos resultados dos tempos de início e fim de pega, em horas, para as pastas P1, P3, P5 e P7 conforme as composições indicadas. P1 é a pasta de referência sem adição de resíduos, enquanto que as pastas P3, P5 e P7, contêm **B_{sec}**, **B_{cin}** e **Lign**, respectivamente. Ao analisar as pastas que não possuíam aditivos químicos nas suas composições, observa-se que a presença de **B_{cin}** em P5 reduziu em 5,3% o valor de Ti ao comparar-se com a pasta de referência P1. No entanto, a presença de **B_{sec}** e **Lign**, resíduos *in natura*, aumentou em 245% e 322%, respectivamente, o Ti das pastas P3 e P7 em relação a P1. Por outro lado, ao avaliar o gráfico da Figura 16 onde todas as pastas possuíam aditivos químicos SP e P nas suas composições, é possível verificar que P6 (**B_{cin}**) aumentou o valor de Ti em 617% em relação à pasta de referência P2 e P8 (**Lign**) aumentou em 276%. Mas, P4 (**B_{sec}**) aumentou em 26 vezes o tempo Ti em relação a P2, valor superior 3,6 vezes o tempo Ti para P6 e 6,9 vezes para P8.

Desta forma, a presença dos resíduos **B_{cin}** e **Lign**, *in natura*, aumentaram o tempo de início de pega da argamassa de concreto, indicando comportamento similar ao obtido quando se adiciona aditivos químicos retardadores de pega em composições de concreto. No entanto, **B_{sec}** retardou de forma muito acentuada o início da pega em presença dos aditivos SP e P, diferente do comportamento de **B_{cin}** e **Lign**.

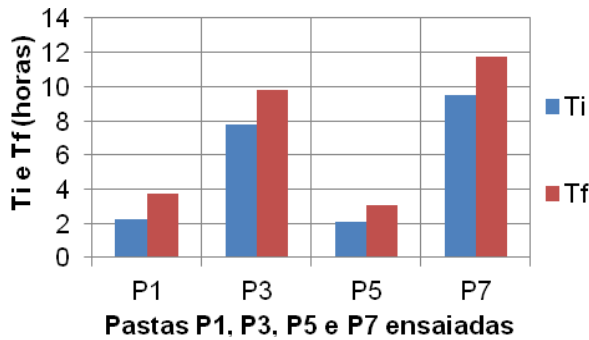


Figura 15. Pastas sem presença de SP e P

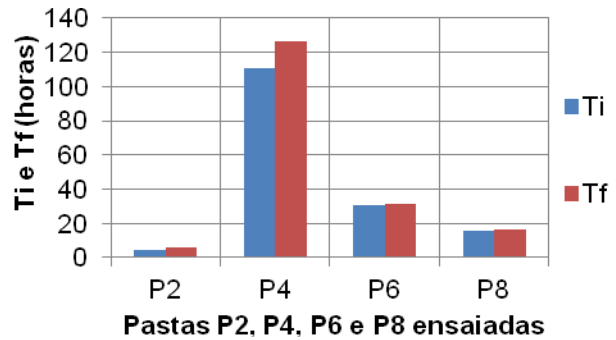


Figura 16. Pastas com presença de SP e P

4.2. Índice de consistência

Os resultados de espalhamento obtidos nos ensaios na mesa vibratória manual aplicada nas composições ensaiadas A1 a A8 podem ser observados através do gráfico apresentado na Figura 17.

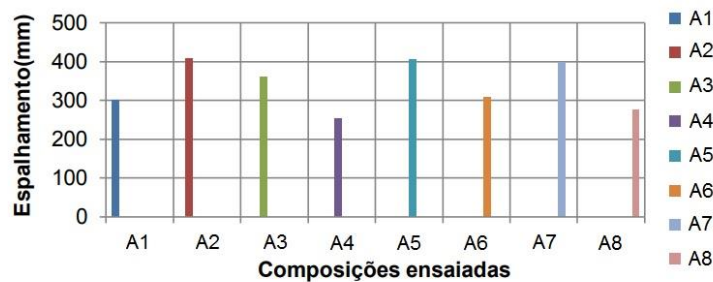


Figura 17. Gráfico dos resultados de espalhamento das composições C1 a C8

Considerando-se as composições A1 (referência), A4 (**Lign**), A6 (**B_{sec}**) e A8 (**B_{cin}**), que não possuíam aditivos químicos SP e P, verificou-se que o melhor comportamento foi de A6 em relação a A1 com pequeno incremento no resultado do espalhamento em 1,7%, enquanto que o pior comportamento foi de A4 com diminuição de 16,6%. Ao considerar as composições A2 (referência), A3 (**Lign**), A5 (**B_{sec}**) e A7 (**B_{cin}**), que possuíam aditivos químicos SP e P, verificou-se que o melhor comportamento foi de A5 em relação a A2 com pequena diminuição no resultado do espalhamento em 0,7%, enquanto que o pior comportamento foi de A3 com diminuição de 11,5%.

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de índice de consistência, notam-se indicativos de não haver comprometimento relevante de desempenho quando do uso de adição ao cimento de qualquer dos três resíduos pesquisados, com melhores resultados para **B_{sec}** em relação à **B_{cin}** e **Lign**.

4.3. Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão estão apresentados no gráfico na Figura 18 para as composições A1, A4, A6 e A8, todas sem uso de aditivos químicos SP e P, e na Figura 19 para as composições A2, A3, A5 e A7, todas com uso de aditivos químicos SP e P.

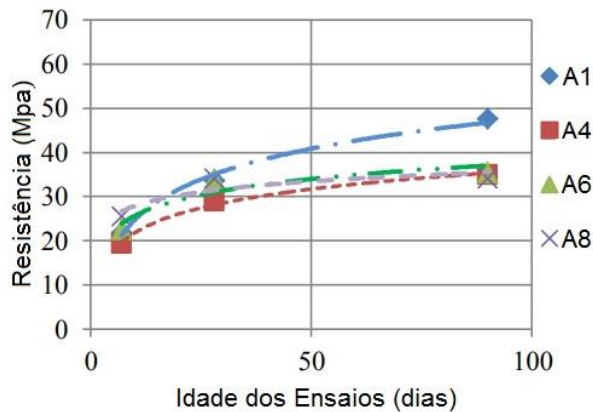


Figura 18. Resultados para A1, A4, A6 e A8

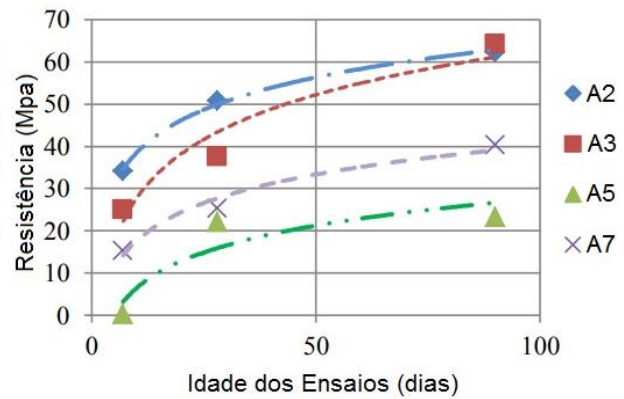


Figura 19. Resultados para A2, A3, A5 e A7

A partir dos resultados da Figura 18, aos 28 dias percebe-se que as quatro composições sem presença dos aditivos químicos estavam com valores próximos de resistência. No entanto, aos 90 dias, a composição de referência A1 adquiriu melhor resultado que A4 (**Lign**), A6 (**B_{sec}**) e A8 (**B_{cin}**), com 36,7% de crescimento em relação à média de resistência dessas composições. Ao avaliar os resultados da Figura 19, onde as composições tinham presença dos aditivos químicos, verificou-se que para as três idades ensaiadas a composição de referência A2 e a composição A3 (**Lign**) apresentaram os maiores valores de resistência, com valores muito próximos entre elas aos 90 dias. No entanto, as composições A5 (**B_{sec}**) e A7 (**B_{cin}**) apresentaram valores inferiores de resistência para todas as idades ensaiadas, onde o desempenho de A5 foi da ordem de 37% em relação à média de A2 e A3 e de 58% em relação a A7 aos 90 dias, porém, aos 28 dias, foi de 50% e 87%.

De acordo com os resultados dos ensaios realizados, o melhor desempenho encontrado foi o de **Lign** em relação à **B_{sec}** e **B_{cin}**. Ainda, com a aplicação de **B_{sec}** houve redução da resistência à compressão quando comparado aos outros dois resíduos. Ficou indicada a compatibilidade da junção dos resíduos com os aditivos químicos SP e P, onde foi possível verificar melhoria de desempenho da resistência à compressão e da curva de aquisição de resistência com o aumento da idade da argamassa do concreto.

4.4. Absorção de água por capilaridade

Os gráficos apresentam os resultados dos valores médios encontrados para a absorção de água por capilaridade em g/cm², para a idade de 60 dias, nas medições após 72 horas de ensaio. A Figura 20 apresenta o gráfico para as composições que não tinham presença dos aditivos químicos SP e P: A4, A6, e A8. A Figura 21 apresenta o gráfico para as composições que tinham presença dos aditivos químicos SP e P: A2, A3, A5 e A7.

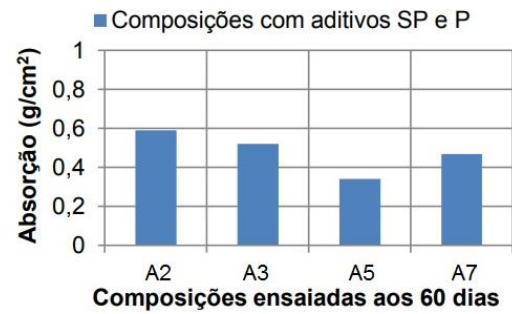
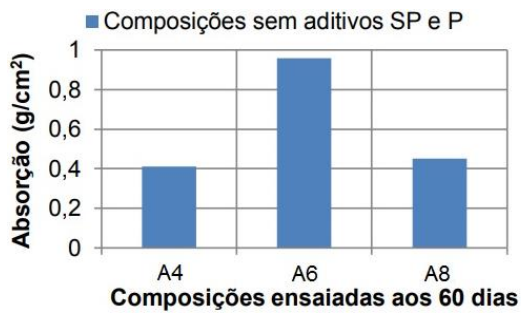


Figura 20. Composições sem aditivos químicos

Figura 21. Composições com aditivos químicos

Quando foi levado em consideração os resultados das composições sem aditivos químicos, verificou-se melhor desempenho para **Lign**, seguido de **B_{cin}**, com maior redução de desempenho para **B_{sec}**. Ao terem sido adicionados nas composições com aditivos químicos SP e P, quando comparado com A2, composição de referência sem qualquer adição de resíduo, promoveram redução da absorção de água por capilaridade com melhor desempenho para **B_{sec}**, seguido de **B_{cin}** e por último **Lign**.

4.5. Ascensão capilar

Os gráficos apresentam os resultados dos valores médios encontrados para a ascensão capilar em percentual do valor medido em centímetros em relação à altura de 10 cm do corpo de prova, para a idade de 60 dias. A Figura 22 apresenta o gráfico para as composições que não continham os aditivos químicos SP e P: A4, A6 e A8. A Figura 23 apresenta o gráfico para as composições que continham os aditivos químicos SP e P: A2, A3, A5 e A7.

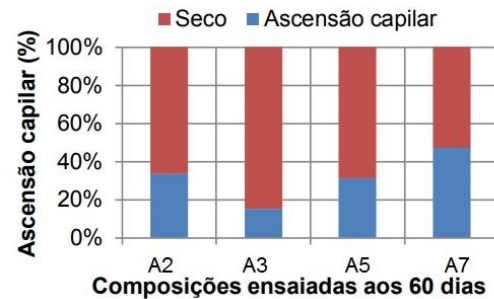
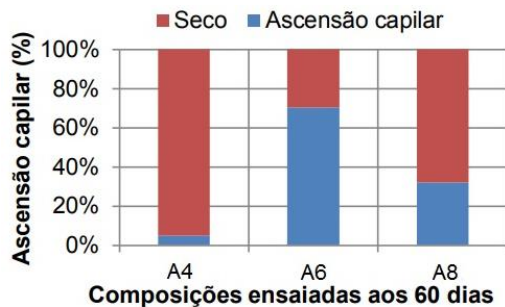


Figura 22. Composições sem aditivos químicos

Figura 23. Composições com aditivos químicos

Ao analisar o gráfico da Figura 22, verificou-se melhor desempenho de **Lign** em A4, equivalência de resultado para **B_{cin}** em A8, e redução de desempenho de **B_{sec}** em A6 quando relacionado a A2. Verificou-se que os resíduos **Lign** e **B_{sec}** ao terem sido adicionados nas composições com aditivos químicos SP e P, conforme a Figura 23, quando comparado com A2, composição de referência sem qualquer adição de resíduo, trouxeram melhor desempenho com redução da ascensão capilar, enquanto que **B_{cin}** aumentou em 25% a ascensão capilar de A7 em relação a A2.

4.6. Índice de vazios

Os gráficos apresentam os resultados dos valores médios encontrados para o índice de vazios, em percentual (%), para a idade de 60 dias. A Figura 24 apresenta o gráfico para as composições sem presença dos aditivos químicos SP e P: A4, A6, e A8. A Figura 25 apresenta o gráfico para as composições com presença dos aditivos químicos: A2, A3, A5 e A7.

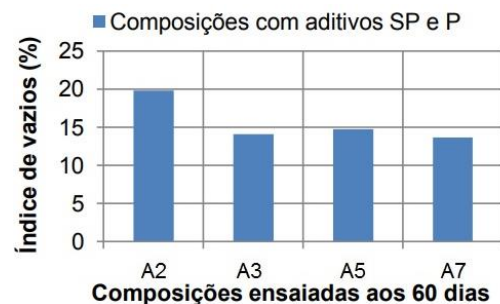
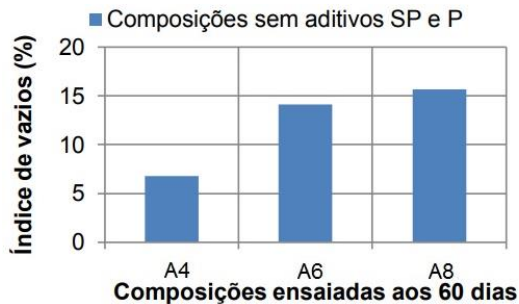


Figura 24. Composições sem aditivos químicos

Figura 25. Composições com aditivos químicos

Ao se analisar a Figura 24, verificou-se melhor desempenho para **Lign**, comparando-se com **B_{sec}** e **B_{cin}**. Mesmo assim, **B_{sec}** e **B_{cin}** apresentaram desempenho superior à composição A2, sem resíduos, mas com presença dos aditivos químicos na sua composição. Verificou-se que os três resíduos ao terem sido adicionados nas composições com aditivos químicos SP e P, quando comparado com A2, composição de referência sem qualquer adição de resíduo, promoveram redução do índice de vazios com desempenho equivalente entre eles, tendo sido o melhor resultado para **B_{cin}**, em seguida **Lign** e por último **B_{sec}**.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados, foi possível estabelecer os seguintes indicativos:

Após a aplicação dos resíduos, os resultados obtidos nas composições de argamassa estudadas demonstraram que houve previsíveis alterações de comportamento quando confrontados com os valores encontrados para as composições de referência adotadas;

Verificou-se que **B_{sec}** e **Lign** quando aplicados sem a presença de aditivos químicos apresentaram maior tempo de início de pega quando comparado à composição de referência sem resíduo e com os aditivos químicos. **B_{cin}** e **Lign** mantiveram bom desempenho de retardamento do tempo de início de pega quando associados a SP e P. No entanto, na mesma condição, **B_{sec}** retardou demasiadamente o tempo de início de pega;

Ao analisar-se o índice de consistência, verificou-se a viabilidade do uso dos três resíduos pesquisados, com e sem a presença de aditivos químicos;

Para a resistência à compressão nas composições sem aditivos químicos, os três resíduos estudados apresentaram comportamento similar com resistência média de 34,8 MPa aos 90 dias, porém 26,8% inferior à resistência da composição de referência no valor de 47,5 MPa na mesma idade. Ao terem sido adicionados SP e P nas composições, **Lign** atingiu aos 90 dias resistência de 64,3 MPa, superior à composição de referência C2 com 62,3 MPa e **B_{cin}** apresentou boa resistência, 40,3 MPa. Para **B_{sec}** foi observado que aos 28 dias sua resistência foi 87% em relação à resistência de **B_{cin}**, no entanto, aos 90 dias o incremento de resistência à compressão foi menor ao comparar-se com **B_{cin}** e **Lign**;

Os ensaios de durabilidade demonstraram viabilidade técnica no uso dos três resíduos, principalmente quando aplicados associados aos aditivos químicos SP e P;

Por fim, os resultados encontrados demonstraram haver viabilidade técnica para a aplicação dos resíduos estudados incentivando a continuidade da pesquisa com a programação de novos estudos a partir do estabelecimento de novas composições, ensaios e variáveis de análise.

REFERÊNCIAS

- [1] Menezes, R.R. *et al.*, 2009. “Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas”. *Cerâmica*, v. 55, p 263-270.
- [2] Lucas, D.; Benatti, C.T., 2008. “Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil”. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, v. 1, n.3, p. 405-418.
- [3] Betat, E.F. *et al.*, 2009. “Concretos produzidos com resíduos do beneficiamento de ágata: avaliação da resistência à compressão e do consumo de cimento”. *Revista Matéria*, v. 14, n. 3, p. 1047 – 1060.
- [4] D’Almeida, M.L.O., 1988. “Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica”. 2.ed., São Paulo: IPT, v.1, p. 45-106.
- [5] Link publicação Raízen, 2014. “<https://www.raizen.com.br/energia-do-futuro-tecnologia-em-energia-renovavel/etanol-de-segunda-geracao>”.
- [6] Kansas State University, 2013. “Scientists build stronger, greener concrete with lignin”. Department of Civil Engineering, USA.
- [7] Link publicação Extra, 2017. “<https://extra.globo.com/noticias/economia/producao-de-celulose-no-brasil-cresce-38-em-2017-attinge-volume-recorde-diz-iba-22348998.html>”
- [8] Link publicação Suzano Papel e Celulose – Apresentação Institucional, 2017. “https://www.valor.com.br/sites/default/files/03.05.2017_1t17_apr_1.pdf”.
- [9] Calado, C.; Camões, A.; Elias, F.; Dalpane, G.; Ferraz, B., 2017. “Estudo de Aplicação de Lignina para Adição ao Cimento em Argamassas de Composições de Concreto”, *Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2017*.
- [10] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR NM 65, 2003. “Cimento Portland – Determinação do tempo de pega”. Rio de Janeiro.
- [11] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 13276, 2002. “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência”. Rio de Janeiro.
- [12] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7215, 1996. “Cimento Portland - Resistência a Compressão”. Rio de Janeiro.
- [13] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 9779, 2012. “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade”. Rio de Janeiro.
- [14] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7222, 2011. “Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”. Rio de Janeiro.
- [15] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 9778, 2005. “Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica” Rio de Janeiro.