

ESTUDO PARA USO DO RESÍDUO DO BIOETANOL CELULÓSICO ADICIONADO AO CIMENTO EM ARGAMASSAS DE CONCRETO

CARLOS CALADO^{1*}, AIRES CAMÕES², FABRÍZIO ELIAS¹, GABRIELLA DALPANE¹, BRUNA FERRAZ¹, TÂMARA DALPANE¹

1: Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco-UPE
Av. Agamenon Magalhães, S/N, Santo Amaro, Recife-PE, Brasil. CEP 50100-010
carlos.calado@upe.br; fabricioelias@protonmail.com; gabirdalpane@gmail.com; brunaferrazc@gmail.com; tamaradalpane@gmail.com

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 *A indústria da construção civil, uma das mais importantes atividades produtivas e econômicas, é também responsável por impactos ambientais de extração de matérias primas, geração de resíduos, fabricação de cimento, dentre outros. Desde 2012 o planeta já havia atingido recorde de emissões de CO₂ na atmosfera, 31,6 gigatoneladas, com crescimento de 1,4% em relação a 2011. Substituição parcial de cimento por resíduos industriais contribui para a redução da degradação ambiental e melhoria do desenvolvimento sustentável, além de agregar valor econômico aos meios de produção. O objetivo principal desta pesquisa foi estudar 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). Esses resíduos possuem lignina em suas respectivas composições e foram aplicados sem novo processamento industrial, in natura. Complementarmente, a pesquisa buscou obter respostas, quanto ao desempenho dessas composições em relação à trabalhabilidade no estado fresco e à resistência e durabilidade no estado endurecido, tendo comparado ainda as possíveis diferenças de comportamento entre os resíduos com e sem a presença de aditivos químicos superplastificantes (SP) e plastificantes (P).*

O resíduo do bioetanol celulósico de 2ª geração obtido da cana de açúcar foi estudado apenas secado em estufa e destorroado (R_{seco}) e queimado para obtenção de cinzas (R_{cinza}), tendo os resultados sido comparados com a lignina da produção de celulose e papel ($R_{lignina}$), em oito diferentes composições de argamassa para concreto, C1 a C8, com substituição parcial do cimento pelos diferentes resíduos, R_{seco} , R_{cinza} e $R_{lignina}$, e com incorporação de aditivos SP e P. No estado fresco, ensaios de agulha de Vicat para os tempos de início e fim de pega e de índices de consistência. No estado endurecido, resistência à compressão e ensaios de durabilidade: absorção de água por capilaridade, ascensão capilar e índice de vazios. As composições estudadas utilizaram constituintes usualmente aplicados na região metropolitana do Recife onde os estudos foram feitos. Cada ensaio realizado teve sempre três execuções e, nos ensaios em concreto endurecido, foram moldados corpos de prova cilíndricos de diâmetro 5 e altura 10 cm. 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 e diferentes combinações com e sem aditivos (SP) e (P).

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 $R_{lignina}$, seguido de R_{cinza} , com o menor desempenho para R_{seco} ; a durabilidade melhorou 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

Em 2012 o planeta havia atingido um nível recorde de emissões de CO₂ na atmosfera, 31,6 gigatoneladas, o que representou crescimento de 1,4% em relação a 2011. Nesse contexto a indústria da construção civil, uma das mais importantes atividades produtivas e econômicas, é também responsável por impactos ambientais a exemplo de extração de matérias primas, geração de resíduos, bem como a fabricação do cimento, dentre outros [1, 2]. A redução do consumo de cimento na produção do concreto através de substituição parcial por resíduos de outros processos industriais representa uma das formas de contribuir para a redução da degradação ambiental permitindo que o desenvolvimento se dê de forma mais sustentável. Ao diminuir o consumo de cimento, obtém-se efetiva redução de custos e de danos ambientais provocados pela extração de matérias primas e emissão de CO₂. O aproveitamento de resíduos pode agregar valor a muitas outras cadeias produtivas, a exemplo da produção de bioetanol celulósico, celulose e papel. Os resíduos destes processos industriais possuem elevado percentual de lignina. Ela é muito fina, confere rigidez à parede celular das plantas cimentando-as com aumento de resistência [3]. 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 [4]. No entanto, a produção de bioetanol de 2ª geração também deixa resíduo com lignina e pode ainda ser aproveitado em reuso, a exemplo de pesquisa desenvolvida na Universidade do Kansas que adicionou as cinzas do resíduo da produção do bioetanol ao cimento com proporção de substituição de 20%, incrementando a resistência à compressão do concreto em 32% [5]. Em relação à lignina presente no resíduo da produção de celulose e papel, o Brasil produziu 15 milhões de toneladas de celulose em 2013, o que permitiria a extração de 7 mil toneladas de lignina a partir do resíduo licor negro, onde apenas 2% desse potencial foi efetivamente aproveitado [6, 7]. Quanto à produção de cimento, 63 milhões de toneladas foram produzidas e consumidas no Brasil no período de um ano, entre março de 2015 e fevereiro de 2016 segundo publicação da Associação Brasileira de Cimento Portland-ABCP, tendo como fonte o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento-SNIC [8], o que indica escala de demanda para absorção de percentual de resíduos em substituição ao cimento.

O estudo da viabilidade técnica de aplicação do resíduo gerado pela produção do bioetanol celulósico de 2ª geração e da lignina extraída do licor negro descartado pela indústria de celulose e papel, em substituição parcial de cimento em argamassas de concreto auto-adensável (CAA) e concreto convencional vibrado (CC), constituiu-se no objetivo principal desta pesquisa. O percentual de 2,5% de resíduo em substituição ao cimento foi escolhido a partir dos resultados de pesquisa anterior com lignina, desenvolvida por Calado *et al.* (2017) [9]. Como objetivos secundários: estabelecimento de comparativo de desempenho entre os resíduos da produção do bioetanol celulósico de 2ª geração e da lignina extraída do licor negro descartado pela indústria de celulose e papel; estudo quanto à viabilidade dos resíduos serem aplicados nas argamassas de concreto sem novos processamentos industriais que viessem a gerar novos custos e poluição ambiental; verificação quanto à compatibilidade dos resíduos com os aditivos químicos superplastificantes e plastificantes usualmente adicionados ao concreto. Dessa forma, o resíduo do bioetanol celulósico, de cana de açúcar, de 2ª geração, foi estudado de duas formas: apenas secado em estufa e destorroado (R_{seco}), e queimado para obtenção de cinzas (R_{cinza}). Seus resultados foram comparados com a lignina da produção de celulose e papel ($R_{lignina}$). Foram analisadas oito diferentes composições de argamassa para concreto, C1 a C8, onde C1 e C2 foram as composições de referência sem adição de resíduos e C3 a C8 tiveram substituição parcial do cimento pelos diferentes resíduos, R_{seco} , R_{cinza} e $R_{lignina}$, assim como 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 onde os estudos foram desenvolvidos.

2. CONSTITUINTES E COMPOSIÇÕES APLICADOS NA PESQUISA

2.1. Constituintes

O resíduo do bioetanol de 2ª geração foi fornecido pela GranBio, usina de fabricação de bioetanol celulósico de 2ª geração, localizada na cidade de São Miguel dos Campos - Alagoas, e foi coletado *in natura* do depósito onde aguardava a destinação final. No laboratório, uma parte do resíduo foi secada em estufa, destorroada e misturada para melhor homogeneização, obtendo-se então o R_{seco} conforme visualizado na Figura 1. A outra parte foi queimada em forno artesanal de gesso desenvolvido e fabricado para uso na pesquisa, conforme mostrado na Figura 2, onde se visualiza o insuflador de ar feito com secador de cabelo, estando o forno pronto para início da queima. A Figura 3 mostra o resíduo queimado depois de retirado do forno e já destorroado e misturado, R_{cinza} .



Figura 1: Resíduo R_{seco}



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



Figura 3: Resíduo R_{cinza}

Para determinação do teor final de cinzas nos resíduos R_{seco} e R_{cinza} , foi utilizada a balança termogravimétrica modelo DTG-60, fabricada pela Shimadzu®, conforme visualizado na Figura 4. Com a balança, realiza-se a queima de pequena amostra de aproximadamente 20mg de resíduo durante 2 horas, na presença constante de oxigênio, com temperatura variável entre ambiente e 950 graus Celsius ou até estabilização gravimétrica da amostra. A Figura 5 apresenta o gráfico termogravimétrico de R_{seco} e a Figura 6 o do resíduo R_{cinza} , com a estabilização próxima dos 950°C. O termograma identificou 8,45% de umidade, 82,29% de voláteis, restando ao final do processo 17,21% de cinzas. Pode-se ainda concluir quanto à estabilidade térmica do resíduo R_{cinza} , pois suas substâncias voláteis apenas são consumidas após a temperatura de 400°C, ao contrário de R_{seco} consumido logo após os 300°C. A análise de três amostras de R_{seco} obteve a média de 53,5% de lignina na sua composição, com 48,94% de carbono, 5,62% de hidrogênio e 1,42% de nitrogênio, conforme análise físico-química realizada em parceria com o Deptº de Química da UFRJ.



Figura 4: Balança termogravimétrica

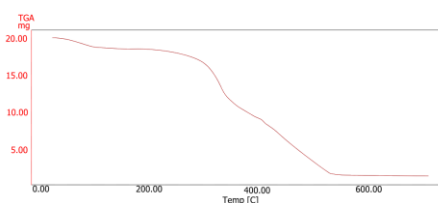


Figura 5: Gráfico termogravimétrico de R_{seco}

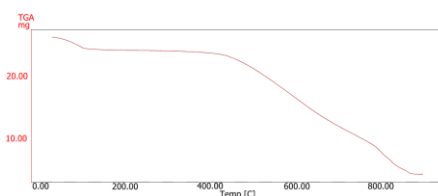


Figura 6: Gráfico termogravimétrico de R_{cinza}

A análise de fibras para determinação do percentual de hemicelulose, celulose, lignina e constituintes celulares foi realizada também no laboratório de combustíveis da Escola Politécnica da UPE. Soluções de detergente neutro e ácido foram utilizadas para a retirada dos constituintes, cinzas solúveis e hemicelulose, restando lignina, celulose e cinzas insolúveis. A determinação da lignina foi realizada em três amostras com 0,3g do material onde foi adicionada solução de 72% de ácido sulfúrico, macerada por 1 hora conforme mostrado na Figura 7 e levada ao digestor, Figura 8, para fibra MA450 por 4 horas. Logo após, foram filtradas, Figura 9, e secas em estufa, sendo o percentual dado pelo material que ficou retido no filtro. Os resultados estão mostrados na Tabela 1 a seguir.

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%

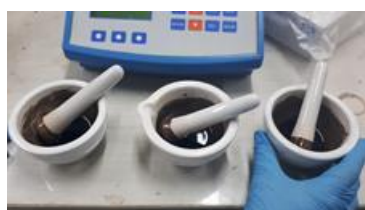


Figura 7: Amostras maceradas



Figura 8: Soluções no digestor



Figura 9: Amostras sendo filtradas

A lignina extraída do licor negro pelo processo Kraft, resíduo proveniente da indústria de celulose e papel, foi fornecida pela EMBRAPA do estado do Paraná e apresentou características físico-químicas de: 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 Dept^o de Química da UFRJ. A lignina, resíduo da indústria de celulose e papel, será denominada de R_{lignina} .

O cimento utilizado foi o CP III 40 RS, aplicado nas obras da região da pesquisa. A areia lavada foi adquirida no comércio do Recife com origem em jazidas entre Pernambuco e Paraíba. Tinha 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 conforme detalhadas na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2. Detalhamento das Composições C1 a C8.

Constituintes	U.	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
CP III 40 RS	g	588	588	573,3	573,3	573,3	573,3	573,3	573,3
R_{seco} (2,5%)	g	-	-	-	-	14,7	14,7	-	-
R_{cinza} (2,5%)	g	-	-	-	-	-	-	14,7	14,7
R_{lignina} (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

C1 foi a composição de referência sem adição de resíduo e de aditivos químicos, enquanto que C2 foi a composição de referência sem adição de resíduo e com aditivos químicos (SP+P).

C3 foi a composição com adição de R_{lignina} e presença dos aditivos químicos (SP+P), enquanto C4 foi a composição com adição de R_{lignina} e sem os aditivos químicos (SP+P).

C5 foi a composição com adição de R_{seco} e presença dos aditivos químicos (SP+P), enquanto C6 foi a composição com adição de R_{seco} e sem os aditivos químicos (SP+P).

C7 foi a composição com adição de R_{cinza} e presença dos aditivos químicos (SP+P), enquanto C8 foi a composição com adição de R_{cinza} e sem os aditivos químicos (SP+P).

Buscou-se estabelecer comparativo de desempenho entre as composições estudadas que possibilitasse obter indicativos quanto a viabilidade técnica do uso dos resíduos e também a compatibilidade deles 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

Foram estabelecidas oito composições diferentes de pastas conforme detalhadas na Tabela 3 a seguir, onde as pastas P1 e P2 foram de referência, apenas cimento(C)+água(A) e C+A+aditivos(SP+P) respectivamente. As pastas P3 e P4 tiveram a adição R_{seco} sem e com os aditivos (SP+P) respectivamente. As pastas P5 e P6 tiveram a adição R_{cinza} sem e com os aditivos (SP+P) respectivamente, enquanto que as pastas P7 e P8 tiveram a adição R_{lignina} sem e com os aditivos (SP+P) respectivamente.

Os ensaios foram realizados conforme a Norma ABNT NBR NM 65 [10]. A execução dos ensaios pode ser visualizada nas fotos mostradas na Figura 10, com o molde preenchido com a pasta, e na Figura 11, com o equipamento da agulha de Vicat em operação. 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.

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
R_{seco}	g	-	-	12,5	12,5				
R_{cinza}	g	-	-			12,5	12,5		
R_{lignina}	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



Figura 10: Molde preenchido com pasta



Figura 11: Penetração da agulha de Vicat

3.2. Ensaio de índice de consistência

Os ensaios foram realizados segundo 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 expresso em milímetros. 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, 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, conforme pode ser observado nas fotos mostradas nas Figuras 12 e 13 abaixo.



Figura 12: Molde preenchido com argamassa



Figura 13: Argamassa após espalhamento

3.3. Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios seguiram as recomendações da ABNT NBR 7215 [12] e foram realizados no laboratório de materiais de construção da Escola Politécnica da UPE, nas idades de 7, 28 e 90 dias. Foram moldados três corpos de prova (CPs) para cada idade, 9 CPs para cada composição estudada, totalizando 72 moldagens. 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 CPs após moldagem eram armazenados na câmara úmida por 3 dias até serem desmoldados e ali permaneciam até o momento dos ensaios. Foi utilizada a prensa computadorizada e servo mecanizada modelo EMIC DL 300, 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. As Figuras 14 e 15 mostram fotografias da execução dos ensaios.



Figura 14: Materiais selecionados e pesados



Figura 15: Prensa EMIC DL 300

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

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]. Foram moldados 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 sendo possível medir a ascensão capilar. As composições ensaiadas foram: C2 (referência), sem adição de resíduo e com aditivos químicos SP e P; C3, C5 e C7 com resíduos e aditivos químicos; C4, C6 e C8, com resíduos e sem aditivos químicos. As Figuras 16 e 17 mostram fotografias dos CPs após a realização do ensaio com rompimento diametral.



Figura 16: Rompimento diametral



Figura 17: 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 18 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 (ver Tabela 3). P1 é a pasta de referência apenas com cimento e água, enquanto que as pastas P3, P5 e P7, contêm adição dos resíduos R_{seco} , R_{cinza} , e $R_{lignina}$, respectivamente. Observe-se que estas pastas não possuíam aditivos químicos nas suas composições. Os resultados mostraram que a presença de R_{cinza} em P5 reduziu em 5,3% o valor de Ti ao comparar-se com a pasta de referência P1. No entanto, a presença de R_{seco} e $R_{lignina}$, resíduos *in natura*, aumentou em 245% e 322%, respectivamente, o Ti das pastas P3 e P7 em relação a P1. Por outro lado, ao analisar-se o gráfico da Figura 19 onde todas as pastas possuíam aditivos químicos SP e P nas suas composições, é possível verificar que P6 (R_{cinza}) aumentou o valor de Ti em 617% em relação à pasta de referência P2 e P8 ($R_{lignina}$) aumentou em 276%. Mas, P4 (R_{seco}) 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.

Portanto, verificou-se que sob o aspecto de tempo de pega, a presença dos resíduos R_{cinza} e $R_{lignina}$, *in natura*, fizeram aumentar 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, R_{seco} retardou de forma muito acentuada o início da pega em presença dos aditivos SP e P, diferente do comportamento de R_{cinza} e $R_{lignina}$.

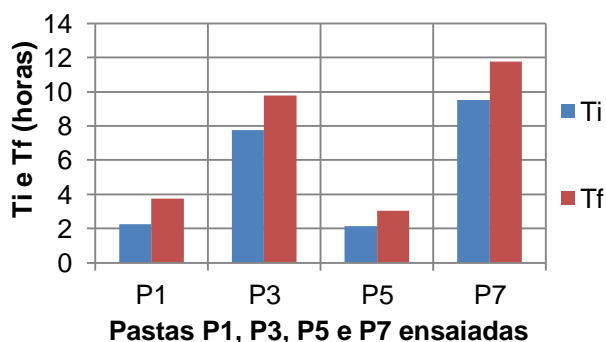


Figura 18: Pastas sem presença de SP e P

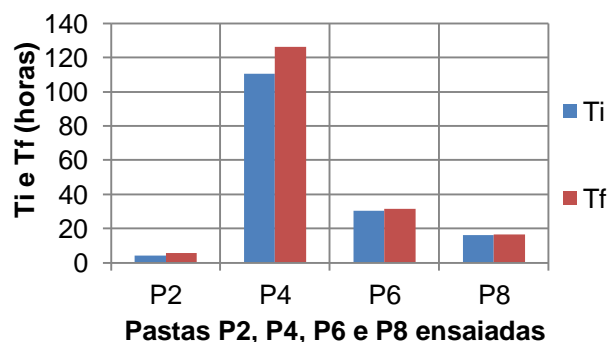


Figura 19: Pastas com presença de SP e P

4.2. Índice de consistência

Os resultados de espalhamento obtidos nos ensaios na mesa vibratória manual aplicada nas composições ensaiadas C1 a C8 podem ser observados através do gráfico apresentado na Figura 20.

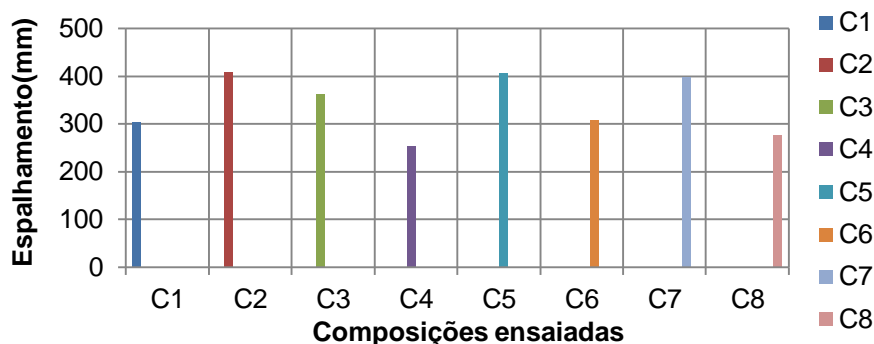


Figura 20: Gráfico dos resultados de espalhamento das composições C1 a C8

Considerando-se as composições C1 (referência), C4 (R_{lignina}), C6 (R_{seco}) e C8 (R_{cinza}), que não possuíam aditivos químicos SP e P, verificou-se que o melhor comportamento foi de C6 em relação a C1 com pequeno incremento no resultado do espalhamento em 1,7%, enquanto que o pior comportamento foi de C4 com diminuição de 16,6%. Ao considerar as composições C2 (referência), C3 (R_{lignina}), C5 (R_{seco}) e C7 (R_{cinza}), que possuíam aditivos químicos SP e P, verificou-se que o melhor comportamento foi de C5 em relação a C2 com pequena diminuição no resultado do espalhamento em 0,7%, enquanto que o pior comportamento foi de C3 com diminuição de 11,5%.

Entende-se então que os ensaios de índice de consistência apresentaram indicativos de que não há comprometimento relevante de desempenho quando do uso de adição ao cimento de qualquer dos três resíduos pesquisados, com melhores resultados para R_{seco} em relação à R_{cinza} e R_{lignina} .

4.3. Resistência à compressão

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão estão apresentados no gráfico na Figura 21 para as composições C1, C4, C6 e C8, todas sem uso de aditivos químicos SP e P, e na Figura 22 para as composições C2, C3, C5 e C7, todas com uso de aditivos químicos SP e P.

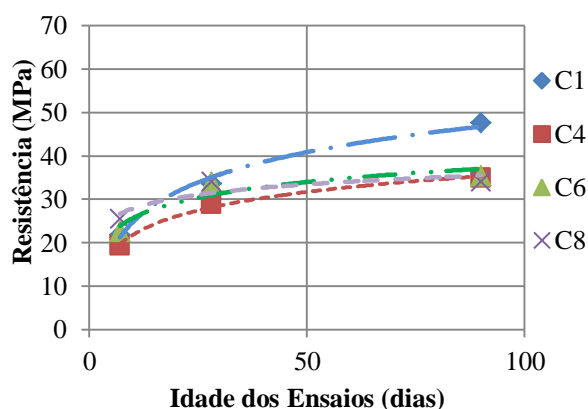


Figura 21: Resultados para C1, C4, C6 e C8

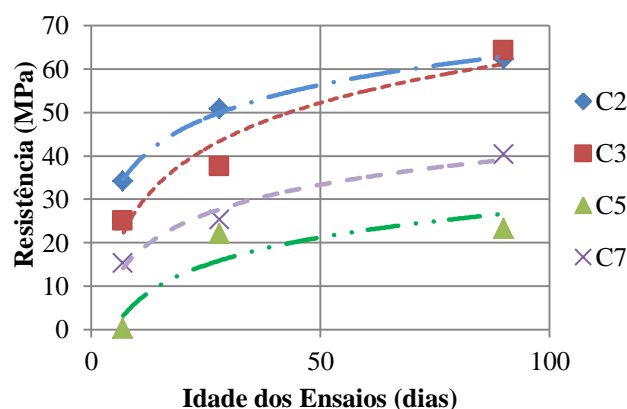


Figura 22: Resultados para C2, C3, C5 e C7

A partir dos resultados apresentados no gráfico da Figura 21, verificou-se que até os 28 dias, as quatro composições sem presença dos aditivos químicos estavam com valores de resistência próximos. No entanto, para a idade de 90 dias, a composição de referência C1 adquiriu melhor resultado que C4 (R_{lignina}), C6 (R_{seco}) e C8 (R_{cinza}), 36,7% de crescimento em relação à média de resistência dessas composições. Ao avaliarem-se os resultados apresentados no gráfico da Figura 22, onde as quatro composições tinham presença dos aditivos químicos, verificou-se que para as três idades ensaiadas a composição de referência C2 e a composição C3 (R_{lignina}) apresentaram as maiores resistências, com valores muito próximos entre elas aos 90 dias. No entanto, as composições C5 (R_{seco}) e C7 (R_{cinza}) apresentaram valores inferiores de resistência para todas as idades ensaiadas, onde o desempenho de C5 foi da ordem de 37% em relação a média de C2 e C3 e de 58% em relação a C7 aos 90 dias, porém, aos 28 dias, foi de 50% e 87%.

Considerando-se a resistência à compressão, a partir dos resultados dos ensaios realizados, foi encontrado indicativo do melhor desempenho de R_{lignina} em relação à R_{seco} e R_{cinza} . Ainda, a aplicação de R_{seco} promoveu redução da resistência à compressão quando comparado aos outros dois resíduos ensaiados. Ressalte-se a compatibilidade da associação dos resíduos com os aditivos químicos SP e P, onde foi possível identificar 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/cm^2 , para a idade de 60 dias, nas medições após 72 horas de ensaio, conforme recomendação normativa. A Figura 23 apresenta o gráfico para as composições que tinham presença dos aditivos químicos SP e P: C2, C3, C5 e C7. A Figura 24 apresenta o gráfico para as composições que não tinham presença dos aditivos químicos SP e P: C4, C6, e C8.

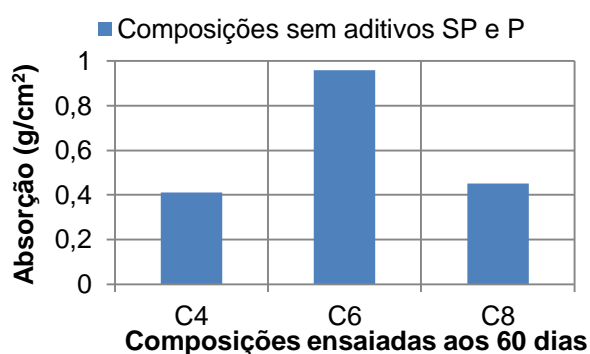
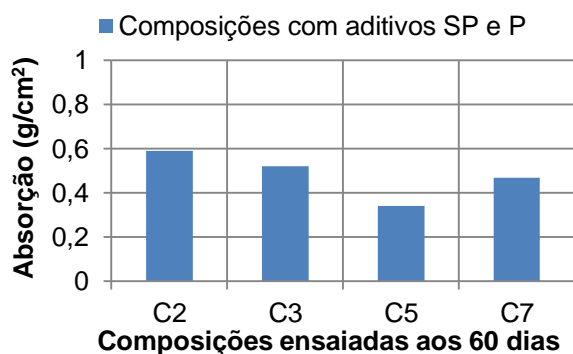


Figura 23: Composições com aditivos químicos

Figura 24: Composições sem aditivos químicos

Verificou-se que os três resíduos ao terem sido adicionados nas composições com aditivos químicos SP e P, quando comparado com C2, composição de referência sem qualquer adição de resíduo, promoveram redução da absorção de água por capilaridade com melhor desempenho para R_{seco} , seguido de R_{cinza} e por último R_{lignina} . No entanto, quando foi levado em consideração os resultados das composições sem aditivos químicos, verificou-se melhor desempenho para R_{lignina} , seguido de R_{cinza} , com maior redução de desempenho para R_{seco} .

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 25 apresenta o gráfico para as composições que continham os

aditivos químicos SP e P: C2, C3, C5 e C7. A Figura 26 apresenta o gráfico para as composições que não continham os aditivos químicos SP e P: C4, C6, e C8.

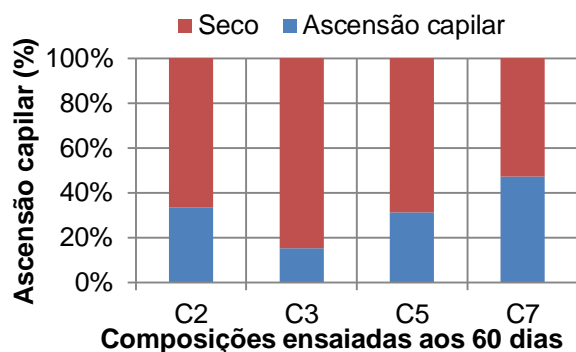


Figura 25: Composições com aditivos químicos

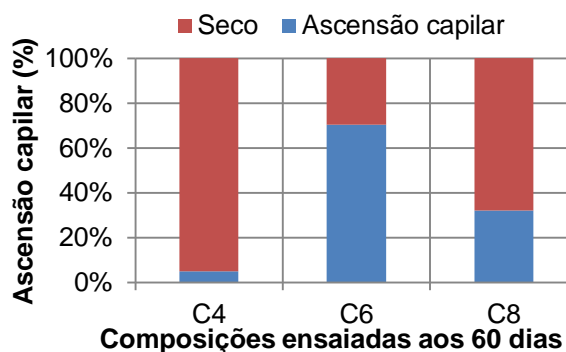


Figura 26: Composições sem aditivos químicos

Verificou-se que os resíduos R_{lignina} e R_{seco} ao terem sido adicionados nas composições com aditivos químicos SP e P, conforme a Figura 25, quando comparado com C2, composição de referência sem qualquer adição de resíduo, trouxeram melhor desempenho com redução da ascensão capilar, enquanto que R_{cinza} aumentou em 25% a ascensão capilar de C7 em relação a C2. Ao analisar-se o gráfico da Figura 26, onde todas as composições não possuíam aditivos químicos, verificou-se melhor desempenho de R_{lignina} em C4, equivalência de resultado para R_{cinza} em C8, e redução de desempenho de R_{seco} em C6 quando relacionado a C2.

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 27 apresenta o gráfico para as composições com presença dos aditivos químicos: C2, C3, C5 e C7. A Figura 28 apresenta o gráfico para as composições sem presença dos aditivos químicos SP e P: C4, C6, e C8.

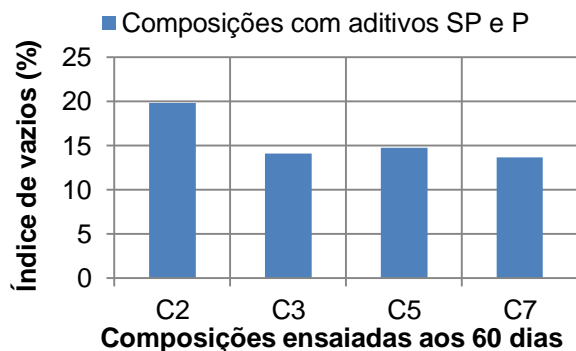


Figura 27: Composições com aditivos químicos

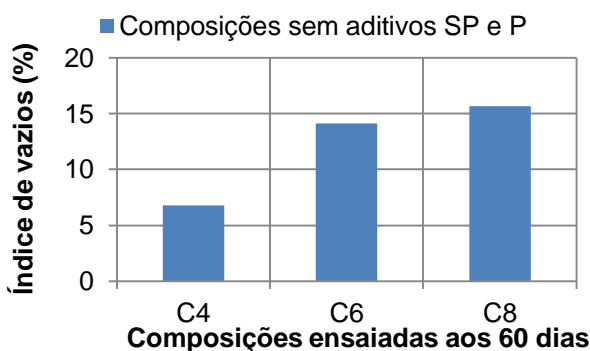


Figura 28: Composições sem aditivos químicos

Verificou-se que os três resíduos ao terem sido adicionados nas composições com aditivos químicos SP e P, quando comparado com C2, 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 R_{cinza} , em seguida R_{lignina} e por último R_{seco} . Ao se analisar a Figura 28, verificou-se melhor desempenho para R_{lignina} , comparando-se com R_{seco} e R_{cinza} . Mesmo assim, R_{seco} e R_{cinza} apresentaram desempenho superior à composição C2, sem resíduos, mas com presença dos aditivos químicos na sua composição.

5. CONCLUSÕES

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

- 1) Os resultados obtidos após a aplicação dos resíduos pesquisados nas composições estudadas demonstraram que houve previsíveis alterações de comportamento dessas composições quando confrontadas com os valores encontrados para as composições de referência, sem resíduos, adotadas;
- 2) Em relação ao tempo de pega, verificou-se que R_{seco} e $R_{lignina}$ 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. Por outro lado, R_{cinza} e $R_{lignina}$ mantiveram bom desempenho de retardamento do tempo de início de pega quando associados a SP e P. No entanto, na mesma condição, R_{seco} retardou demasiadamente o tempo de início de pega;
- 3) Ao analisar-se o índice de consistência, verificou-se a viabilidade do uso dos três resíduos pesquisados, tanto nas composições que não continham SP e P, quanto nas composições com os aditivos químicos;
- 4) Para a resistência à compressão nas composições sem SP e P, 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, $R_{lignina}$ atingiu aos 90 dias resistência de 64,3 MPa, um pouco superior à composição de referência C2 com 62,3 MPa e R_{cinza} apresentou boa resistência, 40,3 MPa. Para R_{seco} foi observado que aos 28 dias sua resistência foi 87% em relação à resistência de R_{cinza} , no entanto, aos 90 dias o incremento de resistência à compressão foi menor ao comparar-se com R_{cinza} e $R_{lignina}$;
- 5) Os ensaios de durabilidade demonstraram que há viabilidade técnica no uso dos três resíduos, principalmente quando aplicados associados aos aditivos químicos SP e P;
- 6) Finalmente, 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.

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ; ao Laboratório de Combustíveis da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco – UPE; à GranBio Investimentos S.A. pelo fornecimento do resíduo do processamento industrial do bioetanol celulósico de 2ª geração; e à EMBRAPA-PR pelo fornecimento da lignina oriunda da produção de celulose e papel.

REFERÊNCIAS

- [1] Gasques, A.C.F., *et al.*, 2014. “Impactos Ambientais dos Materiais da Construção Civil: Breve Revisão Teórica”. Universidade Federal de Maringá, Paraná.
- [2] Link publicação jornalística, 2013. “<https://oglobo.globo.com/sociedade/ciencia/emissoes-de-co2-na-atmosfera-atingiram-nivel-recorde-em-2012-8646055>”.
- [3] 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.
- [4] Link publicação Raízen, 2014. “<https://www.raizen.com.br/energia-do-futuro-tecnologia-em-energia-renovavel/etanol-de-segunda-geracao>”.

- [5] Kansas State University, 2013. “Scientists build stronger, greener concrete with lignin”. Department of Civil Engineering, USA.
- [6] Nogueira, L.A.H. e Walter, A.C.S., 1995. “Experiências de Geração de Energia Elétrica a Partir de Biomassa no Brasil: aspectos técnicos e econômicos”. Informe de la Reunión Regional sobre Generación de Electricidad a partir de Biomasa, FAO/FOWP, Montevideo.
- [7] Gosselink, R.J.A., *et al.*, 2004. « Co-ordination network for lignin—standardisation, production and applications adapted to market requirements (Eurolignin)”. *Industrial Crops and Products*, 20, p. 121–129.
- [8] Link publicação Associação Brasileira de Cimento Portland-ABCP, 2016. <http://www.cimentoverdedobrasil.com.br/producao-e-consumo-de-cimento-no-brasil/>.
- [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, 31 de outubro a 03 de novembro, Bento Gonçalves-RS, Brasil.
- [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.