

Análise da influência de carvão mineral (RCM) em argamassas mistas: adição e substituição ao cimento Portland

Analysis of the influence of mineral coal reject (MCR) in mixed mortars: addition and substitution to Portland cement

Priscila Ongaratto Trentin¹, Beatriz Schimelfenig²,
Karin Patricia Michtal Wainer Teixeira²,
Marly Terezinha Quadri Simões da Silva²,
Fabio Cesar Bimbati², Adalberto Matoski²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, UFPR, Avenida Coronel Francisco Heraclito dos Santos, 100 - Jardim das Américas, CEP: 81530-000, Curitiba, PR, Brasil.

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, UTFPR, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000 - Cidade Industrial De Curitiba, CEP: 81280-340, Curitiba, PR, Brasil.

e-mail: priscila-trentin@hotmail.com, biaschimel@hotmail.com, karinmichtal@hotmail.com, marlytsilva@utfpr.edu.br, fabiobimbati@hotmail.com, adalberto@utfpr.edu.br

RESUMO

Devido à problemática ambiental relacionada à deposição de resíduos provenientes da produção de carvão mineral no Brasil, o objetivo deste estudo foi utilizar o resíduo do carvão mineral na produção de argamassas como adição mineral e também como substituição ao cimento Portland. Para análise das propriedades físico-mecânicas das argamassas foram utilizados corpos de prova de 5x10 cm. Partindo de um traço de argamassa sem adição de resíduo, denominado referência, para posteriormente serem utilizados os teores de 10 e 15% para adição, e de 20 e 30% para substituição de cimento Portland por resíduo de carvão mineral. As amostras de argamassa passaram por um processo de cura em câmara úmida e, aos 28 dias, foram realizados os ensaios de densidade no estado endurecido, absorção de água por capilaridade, resistência à compressão e difratometria de raios X. Os resultados obtidos indicaram que o resíduo de carvão mineral aumentou a absorção de água das argamassas em 67% e 100% para adição de 10 e 15% de carvão, respectivamente. Para substituição de 20% o aumento na absorção foi de 150%; com substituição de 30% a absorção de água foi considerada estatisticamente igual ao traço referência. Já a resistência mecânica apresentou redução, para adição de 10 e 15%, de 33% e 42%, respectivamente. Para a substituição de cimento em 20 e 30%, foi observada redução de resistência de 35% e 47%.

Palavras-chave: Resíduo de Carvão, carvão mineral, argamassa, rejeitos.

ABSTRACT

Due to the environmental problem related to the deposition of residues from the production of mineral coal in Brazil, the objective of this study was to use the residue of mineral coal in the production of mortar as a mineral addition and also as a substitute for Portland cement. For analysis of the physical-mechanical properties of mortars, 5x10 cm specimens were used. Starting from a mortar trace without addition of residue, called reference, to later be used the contents of 10 and 15% for addition, and 20 and 30% for substitution of Portland cement with mineral coal residue. The mortar samples underwent a curing process in a humid chamber and, at 28 days, density tests in the hardened state, water absorption by capillarity, compressive strength and X-ray diffractometry were performed. The results obtained indicated that the mineral coal waste increased the water absorption of mortar by 67% and 100% for the addition of 10 and 15% of coal, respectively. To replace 20 and 30%, the increases in absorption were 133% and 33%, respectively. The mechanical resistance, on the other hand, showed a reduction, for addition of 10 and 15%, of 33% and 42%, respectively. For the replacement of cement by 20 and 30%, a reduction in strength of 35% and 47% was observed.

Keywords: Coal waste, mineral coal, mortar, waste.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação da poluição ambiental nos últimos anos aumentou a conscientização da sociedade sobre os problemas associados com a acumulação de subprodutos industriais e resíduos. Um exemplo dessa conscientização é a instituição de políticas de meio ambiente que incentivem a reciclagem de resíduos como matéria-prima na indústria. A indústria de concreto é uma das principais responsáveis pelo aumento dos níveis de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, especialmente devido à produção de cimento. Ao mesmo tempo, porém, a indústria de concreto tem a capacidade de absorver resíduos industriais em diferentes etapas do processo de fabricação: preparação de matérias-primas, o uso de combustíveis alternativos e mistura com subprodutos industriais [1, 2].

Dentre os muitos rejeitos que causam problemas ambientais está o resíduo de carvão mineral, que traz sérios prejuízos para a qualidade do ar, solos, águas superficiais e subterrâneas, deteriorando a paisagem e reduzindo a biodiversidade nos arredores por poderem conter teores de pirita e minerais de rochas sedimentares [3-5].

Atualmente o comprometimento do sistema hidrográfico da bacia carbonífera, em virtude do descarte de forma irregular do material rejeitado pela mineração, é estimado em 2/3 de sua extensão. As bacias dos rios Tubarão, Urussanga e Araranguá diariamente 3370 toneladas sólidos totais, 127 toneladas acidez, 320 toneladas sulfato e 35,5 toneladas ferro total. Com relação aos padrões de qualidade da água, as concentrações de poluentes ultrapassam em muito os parâmetros estabelecidos na legislação ambiental vigente. Uma destinação correta deste material descartado, como a produção de argamassas, se torna de suma importância para a revitalização deste sistema hidrográfico [6].

Os grandes volumes de resíduos de carvão gerados em todo o mundo nas operações de mineração são depositados principalmente em lixões [7, 8]. Dessa forma, a valorização desses subprodutos na construção civil já vem sendo estudada mundialmente, como na implantação do material como enchimento em aterros rodoviários e ferroviários, além de diques marítimos. Na indústria de concreto é válida, com benefícios econômicos e sociais envolvidos [9, 10].

No Brasil o carvão mineral é uma importante matéria-prima para produção de energia, e as principais reservas são localizadas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. A produção, segundo dados oficiais estatísticos da Associação Brasileira do Carvão Mineral (ABCM) [11], no ano de 2018 o estado de Santa Catarina produziu o montante de 6.467.265 toneladas de carvão sendo vendável apenas 1.832.677 toneladas, para o Rio Grande do Sul 3.626.298 toneladas produzidas e vendáveis foi de 2.505.535, já no estado do Paraná a produção foi de 390.230 toneladas e o resultado para a produção vendável foi de 111.697 toneladas. Na Região Carbonífera Catarinense, onde foi retirado o material para este estudo, a extração do carvão é feita por mineração subterrânea e, após o processamento, cerca de 60% do material é descartado, gerando um grande passivo ambiental.

ADDOU *et al.* [9], desenvolveram argamassas com adição resíduo de mineração da mina de Jerada por substituição volumétrica de areia com diferentes percentagens, sob efeito de tratamento térmico a 400 °C e 600 °C. Nas argamassas, a porosidade à água aumentou com a adição de resíduo de carvão. Apesar disso, a permeabilidade ao gás diminuiu com a incorporação de resíduos.

SAVADOGO *et al.* [12], avaliaram a sustentabilidade e absorção capilar, a porosidade na composição com carvão vegetal da mina de Tefereyre produzida pela SONICHAR (Empresa Nigeriana que produz Energia Mineral à Base de Carvão). Os autores concluíam que o carvão triturado pode substituir parcialmente o cimento Portland na proporção de 15%, possibilitando a modificação de uma composição de cimento tipo CEM II A da Nigéria.

O concreto é um material poroso por meio do qual os líquidos e gases podem fluir. Essa característica tem um impacto substancial na durabilidade do material, pois favorece o ingresso e ataque de agentes externos que podem afetar negativamente sua vida útil. A água desempenha um papel fundamental na maioria das ações agressivas ao concreto (ataque por sulfatos e cloretos, carbonatação, entre outros), pelo fluido ter mais facilidade de permear no concreto [13].

Nesse contexto, tem sido intensificada a utilização de materiais cimentícios suplementares e adições minerais ao concreto que, além de reduzirem os custos de produção, aumentam a durabilidade das estruturas. Os materiais adicionados à mistura podem reagir quimicamente e formar novos produtos hidratados, como ocorre com pozolanas e materiais cimentícios, ou atuar no refinamento de poros da estrutura como filler. Em ambos os casos se tem como resultado a redução da permeabilidade e aumento da durabilidade do concreto [14, 15].

De acordo com ISHIKAWA [16], as partículas finas melhoram a coesão interna da mistura, permitindo que a argamassa mantenha as deformações impostas pelo processo de mistura, uma vez que as partículas de menores dimensões apresentam maior tensão superficial. Além disso, os materiais finos têm elevadas su-

perfícies específicas, melhorando a trabalhabilidade da mistura.

A valorização do resíduo de carvão mineral é extremamente importante. Do ponto de vista ambiental, evita-se a deposição de resíduos e, se o resíduo de carvão for utilizado em substituição ao cimento, é reduzida também a utilização de matérias-primas para produção de clínquer e a quantidade de CO₂ liberado em seu processo de produção [14].

Dessa forma, o objetivo deste estudo foi caracterizar o uso de resíduo de carvão mineral proveniente da Região Carbonífera de Santa Catarina na produção de argamassas mistas de cal e cimento. Para tanto, foram utilizados os teores de adição de resíduo de 10 e 15% (em relação à massa de cimento) e os teores de substituição de cimento Portland por resíduo de 20 e 30%. As propriedades físico-mecânicas das argamassas com resíduo foram comparadas com um traço referência, sem a adição do resíduo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Programa experimental

O programa experimental dessa pesquisa foi baseado em um planejamento estatístico que permite trabalhar com variáveis de controle em diversos níveis e, posteriormente, utilizar ferramentas estatísticas para avaliar a influência de cada variável, bem como a interação entre elas, nas variáveis de resposta.

A Figura 1 demonstra, esquematicamente, o programa experimental que será realizado nesta pesquisa, especificando a caracterização dos materiais, a sequência dos ensaios e a análise dos dados dimensionados obtidos.

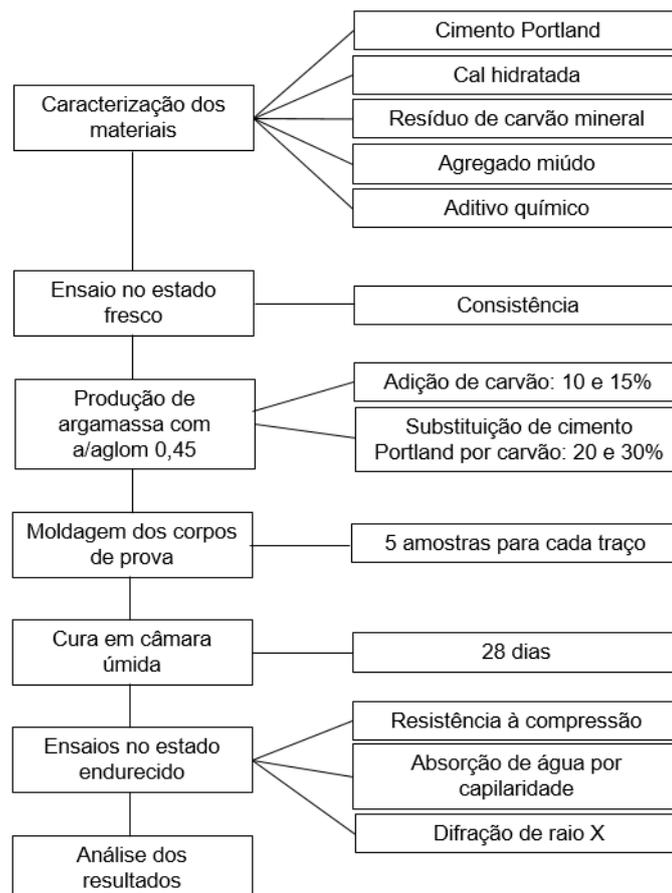


Figura 1: Programa experimental.

2.1.1 Variáveis de Respostas

As variáveis dependentes, objeto de estudo deste projeto experimental, relacionam-se às características da

qualidade do produto. As variáveis dependentes selecionadas para esta pesquisa foram:

- a) resistência à compressão;
- b) absorção por capilaridade;
- c) e difração de raio X (DRX).

2.1.2 Fatores Controláveis

Posteriormente, foram definidos os fatores controláveis ou variáveis controláveis, que correspondem aos parâmetros do processo escolhidos com a meta de serem estudados em diferentes níveis no experimento e avaliar a real influência desses fatores nas variáveis de resposta. Assim, as variáveis de controle que serão analisadas nesta pesquisa são as seguintes:

- a) tipo de cimento: CP V-ARI;
- b) relação a/agl: 0,45;
- c) traço volumétrico: 1:2:6;
- d) teor de substituição de rejeito de carvão mineral: 0 %, 20% e 30%;
- e) teor de adição do rejeito de carvão mineral: 0%, 10% e 15%;
- f) idade: 28 dias

2.2 Dosagem Experimental

Na argamassadeira, o cimento, a cal e o resíduo de carvão foram misturados com a água, em velocidade baixa, por 30 segundos (s). Na sequência, foi adicionada a areia, durante 30 s em velocidade baixa, sem paralisação do processo de mistura. Em seguida, passou-se para a velocidade alta por 30 s. Após esse processo o misturador foi desligado por 90 s, quando se realizou a raspagem da argamassa aderida a cuba. Ao final desse período, foi realizada nova mistura por 60 s em velocidade alta. No final do processo de mistura da argamassa foi acrescentado o aditivo superplastificante e misturado em velocidade alta por 60 s.

A consistência obtida com o traço referência serviu como padrão para os traços com adição e substituição de resíduo de carvão. Foram utilizados os teores de resíduo de carvão mineral de 10 e 15% de adição e 20 e 30% de substituição em relação à quantidade de cimento. Foram moldados cinco corpos de prova de 5x10 cm para cada traço utilizado, com compactação manual com soquete metálico, sendo utilizadas quatro camadas, com trinta golpes em cada camada.

Para dosagem experimental do estudo, optou-se por fixar um traço padrão de 1:2:6, bem como adotar a relação água/aglomerante em 0,45, utilizando aditivo superplastificante Glenium 51 BASF para adquirir a consistência de trabalhabilidade fixada em 240mm \pm 10mm. As dosagens de aditivo superplastificantes foram feitas em relação à massa de aglomerante da mistura. A Tabela 1 apresenta a dosagem experimental.

Tabela 1: Dosagem experimental.

RESÍDUO	TEOR (%)	TRAÇO	RELAÇÃO A/C	TRAÇO DA ARGAMASSA					TRABALHABILIDADE (mm)
				CIMENTO	RESÍDUO	CAL	AREIA	ADITIVO %	
Sem resíduo	0	1:2:6	0,45	1	0	2	6	2,25%	240
Substituição RCM	20			0,8	0,2	2	6	0,65%	230
	30			0,7	0,3	2	6	1,24%	230
Adição RCM	10			1	0,1	2	6	1,67%	230
	15			1	0,15	2	6	2,74%	230

Os corpos de prova foram desmoldados 24 horas após a moldagem e permaneceu em câmara úmida a temperatura de 23 \pm 2 °C até a data dos ensaios, após 28 dias.

2.3 Materiais Utilizados

O material estudado foi fornecido por uma carbonífera localizada no sul do estado de Santa Catarina. Os ensaios da argamassa foram realizados no laboratório da UTFPR dispostos no município de Curitiba, estado do Paraná, na sede Ecoville, a qual disponibilizou os demais materiais para a análise.

2.3.1 Cimento Portland

O cimento empregado nesta pesquisa foi o cimento Portland do tipo CPV-ARI. A opção por este cimento deu-se por o mesmo não apresentar qualquer tipo de adição além de fíler calcário. A Tabela 2 apresenta um resumo das características físicas do cimento adotado nessa pesquisa, seguindo as respectivas normas brasileiras e NBR 11579:2013 [17].

Tabela 2: Caracterização do cimento.

CARACTERÍSTICAS AVALIADAS	CIMENTO CPV-ARI	
	LABORATÓRIO UTFPR	EXIGÊNCIA DA NBR 11579
Massa específica (cm ³ /g)	3,12	-
Expansão a quente (mm)	-	≤ 5,0
Tempo de pega (h: min.)	Início	≥ 1:00
	Fim	≤ 10:00
Consistência normal (%)	-	-
Finura Blaine (cm ² /g)	-	≥ 3000
Resíduo peneira #200µm (%)	1,10	-
Resíduo peneira #325µm (%)	-	-

2.3.2 Rejeito do Carvão Mineral

O resíduo de carvão mineral é proveniente da região carbonífera de Santa Catarina e apresentou massa específica de 2,36 g/cm³. A Figura 2 apresenta o rejeito de carvão mineral utilizado na produção das argamassas.



Figura 2: Rejeito de carvão mineral.

A Figura 3 permite a comparação da distribuição granulométrica do cimento Portland, da cal hidratada e do resíduo de carvão mineral utilizados nesse estudo.

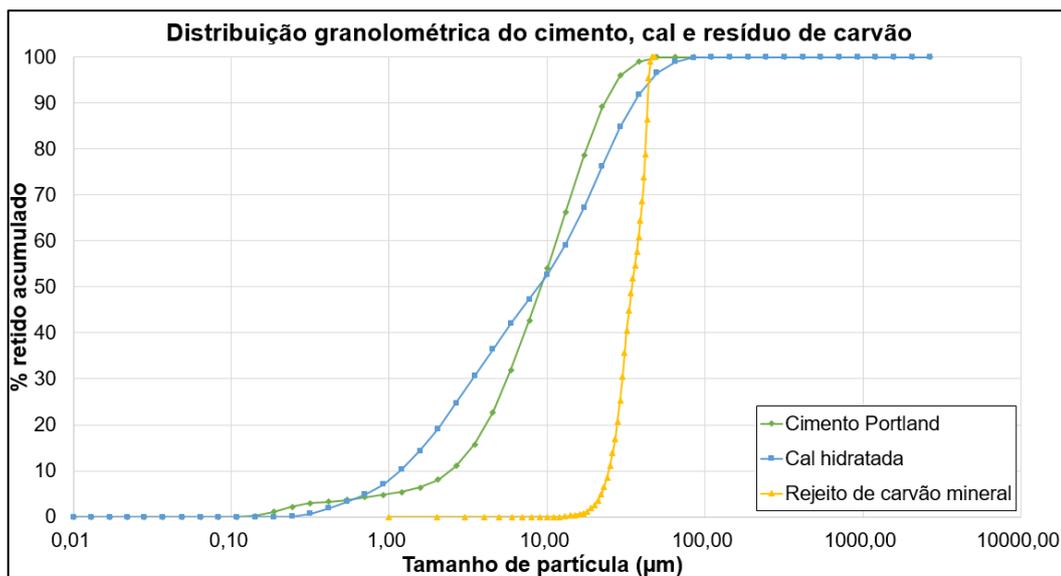


Figura 3: Distribuição granulométrica do cimento, cal e resíduo de carvão.

Pode-se observar que o resíduo de carvão possui maior tamanho de partículas comparado ao cimento e à cal. Sua granulometria pode ser comparada a de um fíler, que atua no preenchimento de vazios da matriz.

2.3.3 Cal

A cal hidratada utilizada apresentou massa específica de 2,67 g/cm³.

2.3.4 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado consiste em uma areia média quartzosa. O agregado miúdo foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas, sendo determinação da massa específica [18], determinação da massa unitária [19] e composição granulométrica [20]. Os resultados da caracterização física estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização do agregado miúdo.

ABERTURA DAS PENEIRAS (mm)	MÉDIA RETIDA (%)	MÉDIA RETIDA ACUMULADA (%)
25	0,00	0,00
19	0,00	0,00
12,5	0,00	0,00
9,5	0,65	0,65
6,3	1,54	2,19
4,75	4,01	6,20
2,36	12,55	18,75
1,18	14,84	33,59
0,6	18,47	52,06
0,3	20,85	72,91
0,15	19,01	91,92
Fundo*	8,08	100,00
Módulo de Finura		2,78
Dimensão Máxima Característica (mm)		4,75
Massa Específica (g/cm ³)		2,63

2.3.5 Aditivo Superplastificante

O aditivo químico utilizado nesse ensaio foi um superplastificante de alto desempenho. O fabricante indica a sua utilização para grandes reduções de água, sendo aplicado em diversas áreas.

Suas principais vantagens são: a redução na quantidade de água, longa manutenção do abatimento

com alta resistência, rápida dispersão no concreto, dosagens econômicas, compatibilidade com incorporadores de ar. Sua densidade, determinada de acordo com a NBR 11768-3 [21], era de 1,12 kg/L e, de acordo com o fabricante, são indicadas dosagens entre 0,2 e 0,5% sobre o peso do cimento.

2.4 Ensaios

2.4.1 Análise no estado fresco

2.4.1.1 Ensaio determinado de índice de consistência

De acordo com a NBR 7215 [22], o aparelho para determinação do índice de consistência é constituído por uma mesa horizontal lisa e plana de metal não corrosível, com uma haste fixada em seu centro, a qual, por uma guia conveniente, recebe de um excêntrico um movimento vertical ascendente, de $(12,5 \pm 0,2)$ mm de curso, e dessa altura cai, conforme ilustrado na Figura 4.



Figura 4: Aparelho para ensaio de consistência.

Com o auxílio de uma espátula, deve-se preencher o molde tronco cônico em três camadas de mesma altura e, com soquete normal, aplicar 15, 10 e 5 golpes uniformes e homogeneamente distribuídos, respectivamente, nas primeiras, segunda e terceira camadas. Terminada essa operação, remover o material que ultrapassar a borda superior e alisar o topo com régua metálica. Após o enchimento, retirar o molde, levantando-o verticalmente, com cuidado, e, em seguida, mover a manivela do aparelho para medida de consistência, fazendo com que a mesa caia 30 vezes em aproximadamente 30 s, o que provocará o abatimento do tronco de cone do compósito.

A medida do diâmetro da base do tronco de cone, após o abatimento, é feita com auxílio de uma régua. O índice de consistência é a média aritmética das medidas de dois diâmetros ortogonais, tomados em pares de pontos distribuídos uniformemente ao longo do perímetro, considerado normal resultando dentre 165 ± 5 mm, em conformidades Figura 5.



Figura 5: Ensaio de consistência.

2.4.2 Análise no estado endurecido

2.4.2.1 Resistência a Compressão Axial

O ensaio de resistência à compressão uniaxial seguiu a NBR 5739 [23], onde foram moldados corpos de provas cilíndricos com dimensão 50x100 mm.

2.4.2.2 Absorção por Capilaridade

Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 15259 [24]. Onde foram moldados, e ensaiados aos 28 dias, corpos de provas cilíndricos com dimensão 50x100 mm.

2.4.2.3 Difração de raio X

As medidas de difração de raios-X (DRX) foram conduzidas em um difratômetro convencional (Rigaku - Mini flex II), operando na geometria convencional 2 theta. O ângulo da análise estendeu-se entre 5 e 100 graus. Condições de análise: velocidades de 5°/min ao passo de 0,05; detector de cobre 1,54 nm; voltagem do detector 30 mA.

3. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

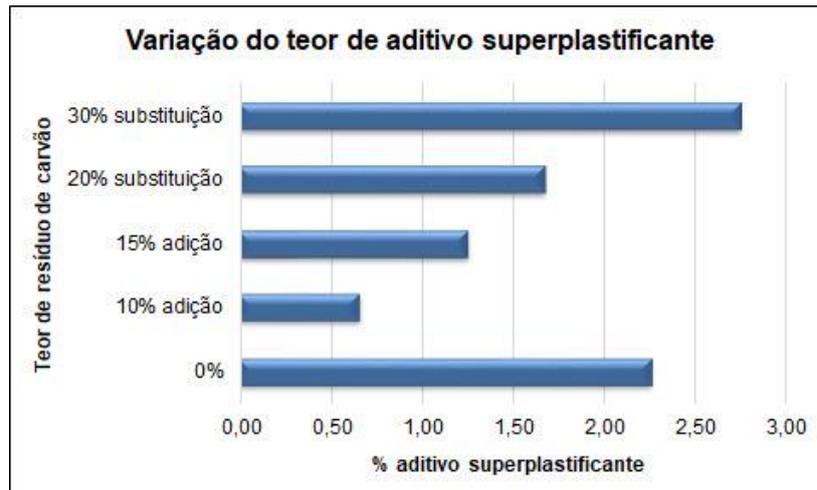
3.1 Análise de consistência

A Tabela 4 apresenta os resultados de consistência obtidos. Foi observado que a utilização do resíduo de carvão aumentou a trabalhabilidade da argamassa e menor teor de aditivo superplastificante foi necessário, exceto para o teor de 30% que foi analisado um aumento no uso de aditivo para obtenção da consistência desejada.

Tabela 4: Consistência das argamassas.

RESÍDUO DE CARVÃO	TEOR DE ADITIVO UTILIZADO	CONSISTÊNCIA MÉDIA
0%	2,25%	240 mm
10% (adição)	0,65%	230 mm
15% (adição)	1,24%	230 mm
20% (substituição)	1,67%	230 mm
30% (substituição)	2,74%	230 mm

Na Figura 6 estão apresentados os percentuais de aditivo superplastificante utilizados na produção das argamassas para que fosse obtida uma consistência média de 240 ± 10 mm.


Figura 6: Percentuais de utilização de aditivo superplastificante.

Observando a Figura 6, verifica-se uma queda no teor de aditivo utilizado nas argamassas com uso de RCM quando comparados com o teor de referência, sendo assim, o rejeito aumentou a trabalhabilidade da argamassa; tal fato pode estar relacionado à sua massa específica ser menor se comparada em relação ao cimento Portland utilizado no estudo. Além disso, AHN [25] observou que a adição de filer pode melhorar a trabalhabilidade e as propriedades mecânicas de uma argamassa com areia de britagem; o mesmo comportamento pode ocorrer com utilização de areia natural.

No entanto, o teor de substituição de 30% de RCM foi excessivo, provocando um travamento na mistura, por possuir granulometria superior ao cimento Portland, sendo necessário um aumento de 0,49% de aditivo comparando ao teor de referência, para então obter a consistência desejada. JANTSCH [26] afirma que a análise de consistência é o ensaio onde a argamassa tende a resistir às deformações que são impostas, como no caso dos aditivos, que quando adicionados nas argamassas podem modificar suas propriedades reológicas, por isso as divergências nos resultados.

3.2 Densidade no estado endurecido

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os valores de densidade no estado endurecido, determinada aos 28 dias.

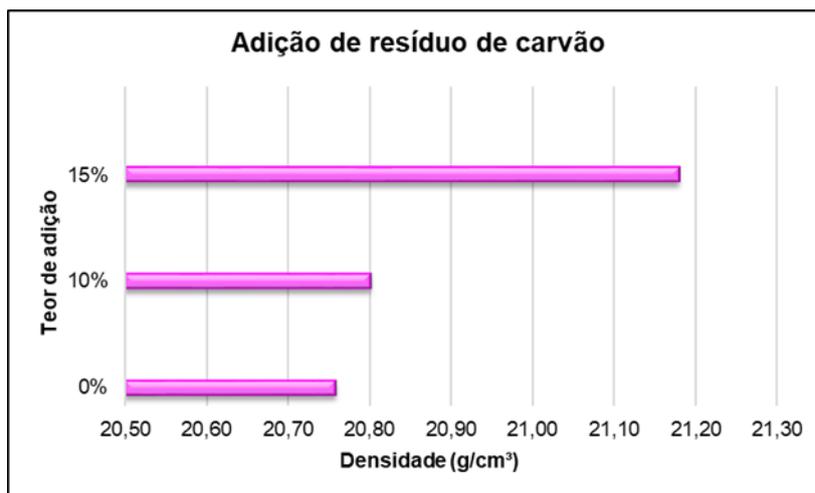


Figura 7: Densidade das argamassas com adição de resíduo de carvão.

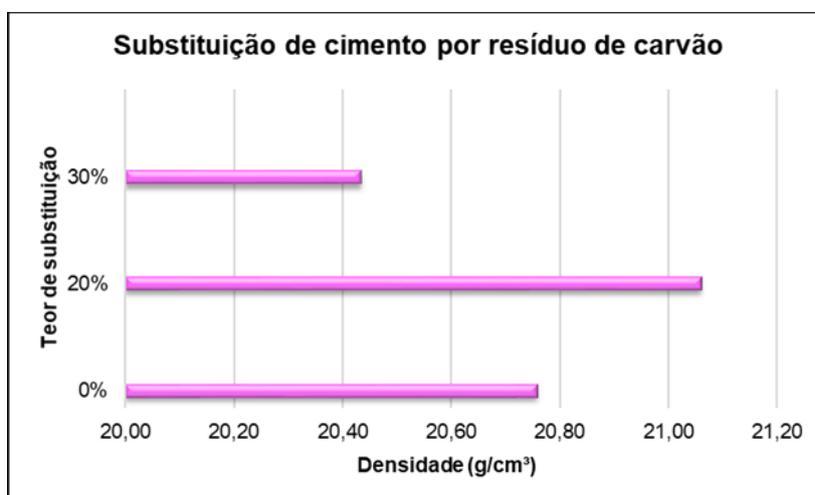


Figura 8: Densidade das argamassas com adição de resíduo de carvão.

Quando adicionados 10 e 15% de resíduo de carvão a densidade das argamassas teve aumento de 0,2% e 2,0%, respectivamente. Com a utilização de resíduo em substituição ao cimento, a densidade aumentou 1,4% para o teor de adição de 20% e reduziu 1,6% para o teor de 30%. Nesse caso observou-se que os resultados de densidade no estado endurecido com utilização de resíduo de carvão são estatisticamente iguais ao traço referência.

É possível afirmar que as argamassas que apresentaram maior retenção são aquelas de menor densidade, segundo estudo realizado por PCZIECZEK [27], o qual aborda a análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassas para revestimentos utilizando cinza volante com substituição do cimento Portland em 10% e 20%, e nos resíduos de borracha de pneus descartados, como substituição do agregado miúdo em 5% e 10% com o rejeito do pneu.

3.3 Absorção por capilaridade

As Figuras 9 e 10 apresentam o coeficiente de capilaridade das argamassas, aos 28 dias.



Figura 9: Coeficiente de capilaridade das argamassas com adição de resíduo de carvão.

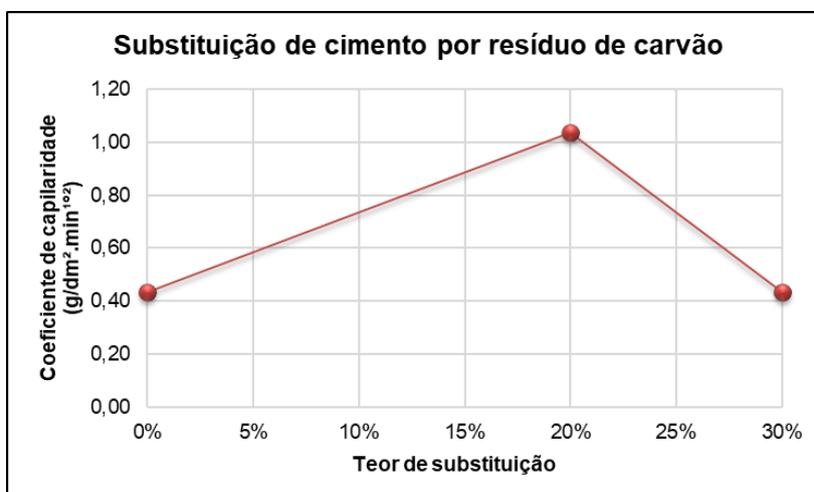


Figura 10: Coeficiente de capilaridade das argamassas com substituição de cimento por resíduo de carvão.

Foi observada uma tendência de aumento no coeficiente de capilaridade com aumento na adição de resíduo de carvão. No caso da substituição de cimento por resíduo, houve um aumento do coeficiente de capilaridade com o teor de 20%, mas, para o teor de substituição de 30%, o coeficiente de capilaridade foi estatisticamente igual ao traço referência.

Os valores de coeficiente de capilaridade observados em todas as argamassas são baixos (inferiores a 1,5 g/dm².min^{1/2}) o que permite a aplicação da argamassa para diferentes finalidades, tais como: argamassa de vedação, argamassa de revestimento, argamassa de encunhamento, argamassa decorativa e argamassa monocamada.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os valores de absorção de água por capilaridade, medidos nos tempos de 10 e 90 minutos.

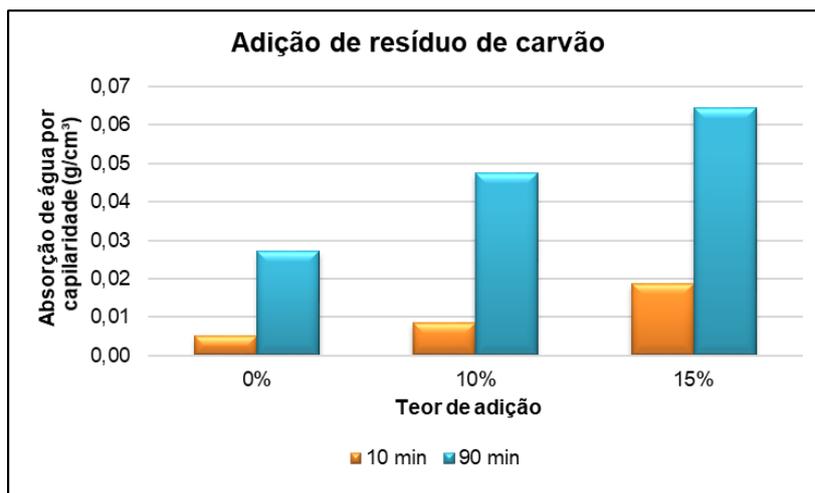


Figura 11: Absorção de água por capilaridade das argamassas com adição de resíduo de carvão.

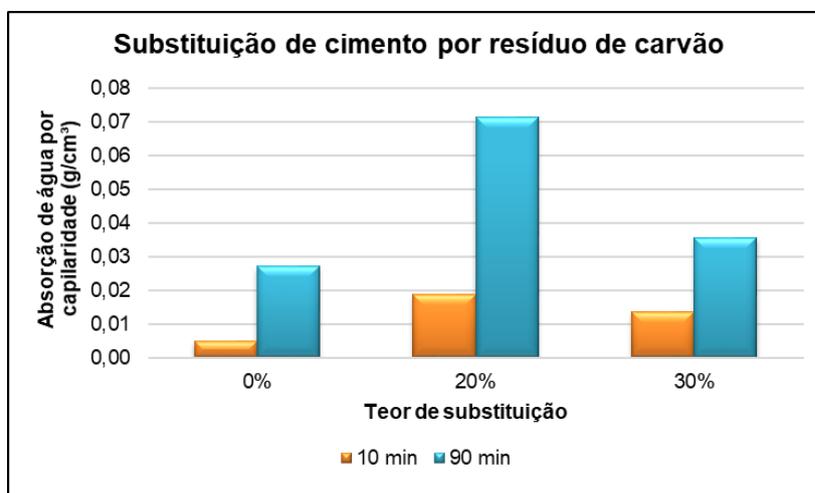


Figura 12: Absorção de água por capilaridade das argamassas com substituição de cimento por resíduo de carvão.

No ensaio de absorção de água por capilaridade nos tempos 10 e 90 minutos observou-se comportamento de aumento da absorção com o aumento da adição de resíduo de carvão. No caso da substituição de cimento Portland pelo resíduo, as maiores taxas de absorção foram observadas com o teor de 20% de adição.

A infiltração de água pelas paredes revestidas com argamassa compromete tanto a higiene e a saúde dos usuários, como a estética do edifício, além de estar associada às manifestações patológicas como eflorescências, descolamentos e manchas de bolor e mofo [28].

Com análise dos resultados observa-se que tanto a adição de resíduo de carvão como a substituição de cimento pelo resíduo afetaram negativamente as argamassas, aumentando sua absorção de água. A exceção é observada para o teor de 30% de substituição, que apresentou absorção de água próxima à observada no traço referência.

3.4 Resistência à compressão

As Figuras 13 e 14 apresentam os resultados de resistência à compressão aos 28 dias.



Figura 13: Resistência mecânica das argamassas com adição de resíduo de carvão.

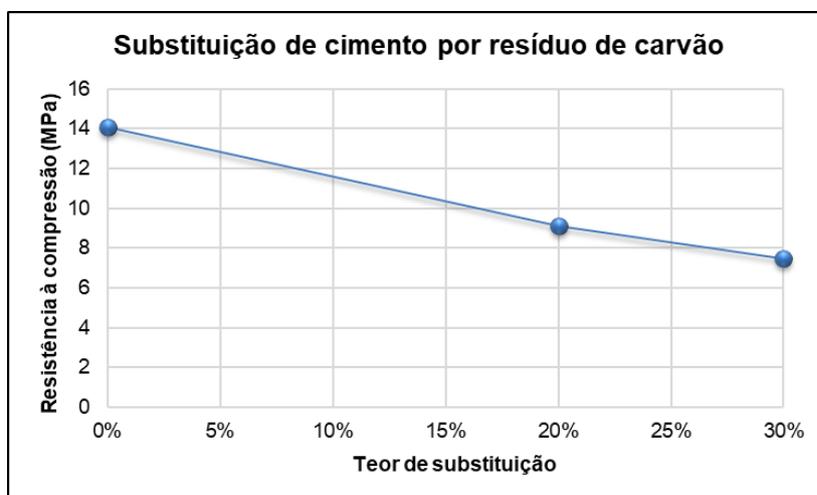


Figura 14: Resistência mecânica das argamassas com substituição de cimento por resíduo de carvão.

No ensaio de resistência à compressão foi observada redução de resistência tanto com adição de resíduo como com substituição de cimento pelo mesmo. Com adição de 10 e 15% de resíduo as reduções de resistência foram de 33,0% e 42,0%, respectivamente. Com a substituição de cimento por resíduo, a redução de resistência foi de 35,2% para o teor de 20% e de 46,9% para o teor de 30%.

CANEDA-MARTÍNEZ [14] observaram o mesmo comportamento de redução de resistência mecânica em argamassas com 20 e 50% de substituição de cimento Portland por resíduo de carvão ativado termicamente. Os autores atribuíram a queda de resistência à ausência de atividade pozolânica do resíduo em 28 dias.

3.5 Difração de raio X

Os resultados das análises de difração de raio X (DRX) são apresentados nas Figuras 15 e 16.

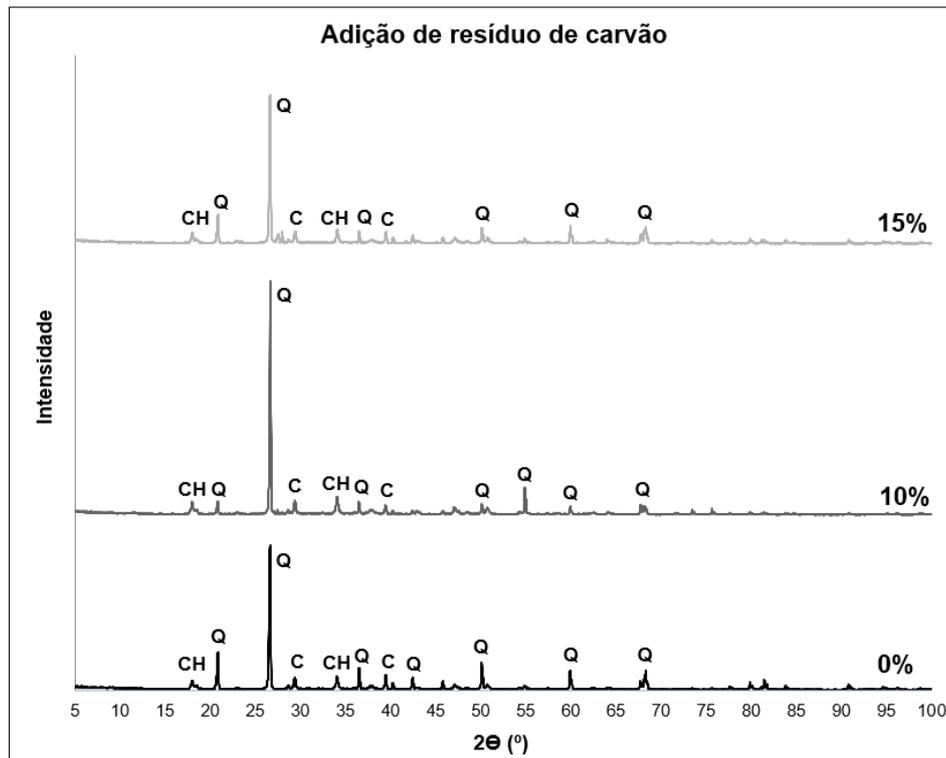


Figura 15: DRX das argamassas com adição de resíduo de carvão.

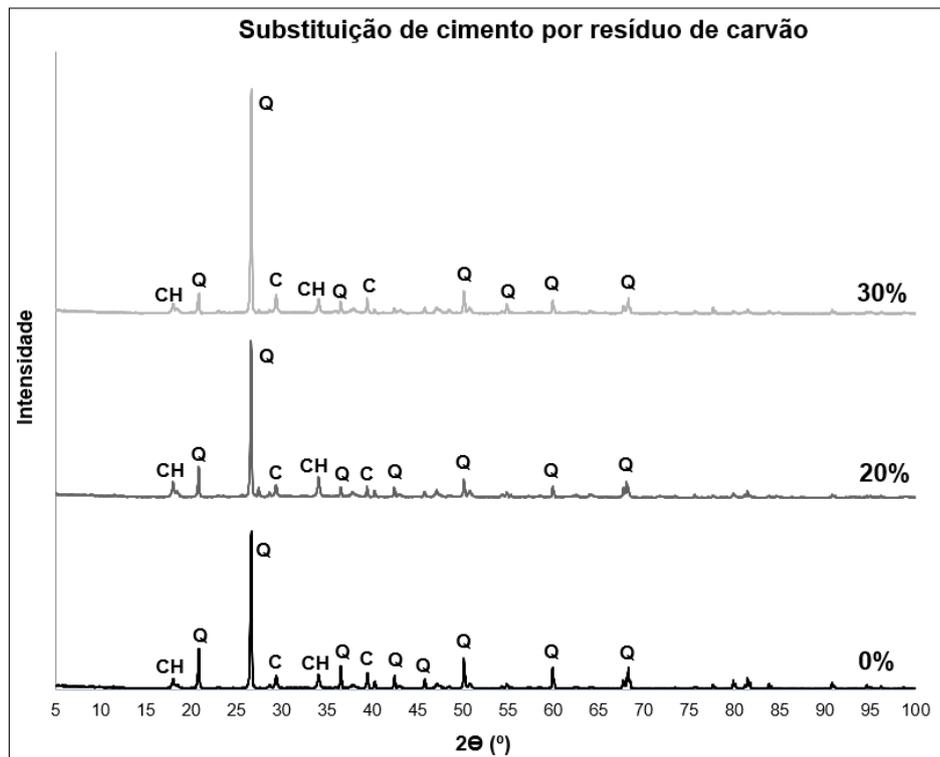


Figura 16: DRX das argamassas com substituição de cimento por resíduo de carvão.

Tanto com adição de resíduo de carvão quanto com a substituição de cimento Portland pelo resíduo não foram observadas modificações na microestrutura das argamassas.

Dessa forma, conclui-se que a adição de resíduo de carvão ou substituição de cimento Portland pelo mesmo não interferiu na microestrutura dos materiais, apesar da redução de resistência mecânica e aumento na absorção de água.

4. CONCLUSÕES

A adição de resíduo de carvão aumentou a densidade das argamassas no estado endurecido. Apesar disso, esse comportamento não foi refletido nos ensaios de resistência mecânica e absorção de água por capilaridade, onde a adição de resíduo de carvão interferiu negativamente no comportamento das argamassas.

A substituição de cimento por resíduo de carvão aumentou a porosidade da matriz, com consequente aumento da absorção de água e redução de resistência mecânica. Os resultados obtidos devem-se às características do resíduo de carvão.

Uma alternativa para melhorar as propriedades do resíduo é realizar sua calcinação. No processo de calcinação seria obtido um teor significativo de sílica amorfa, que, devido à reação pozolânica, traria melhora a propriedades das argamassas.

A importância da utilização do resíduo de carvão é justificada devido à inertização desse material. Se utilizado em pequenas porcentagens, o resíduo de carvão não afeta significativamente as propriedades de matérias cimentícias. Dessa forma, indica-se que, além da utilização do material calcinado, menores percentuais de adição e/ou substituição sejam utilizados em futuros estudos. Além disso, a aplicação desse tipo de material restringe-se ao uso não-estrutural, como em calçadas, por exemplo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a doutoranda do PPGE da UTFPR-CT pelo fornecimento do resíduo de carvão mineral utilizado neste estudo. Agradecem também à UTFPR – Campus Ecoville pela cedência dos laboratórios para realização dos ensaios.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] MEJIA-BALLESTEROS, J.E., SAVASTANO JR, H., FIORELLI, J., *et al.* “Effect of mineral additions on the microstructure and properties of blended cement matrices for fibre-cement applications.” *Cement and Concrete Composites*, v. 98, p. 49-60, 2019.
- [2] STARK, J., “Recent advances in the field of cement hydration and microstructure analysis.” *Cement and concrete research*, v. 41, n. 7, p. 666-678, 2011.
- [3] FILHO, J.R.A., SCHNEIDER, I.A.H., BRUM, I.A.S., *et al.* “Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil.” *Revista Escola de Minas*, vol. 66, n. 33, p. 347-353, 2013.
- [4] BAITE, E., MESSAN, A., HANNAWI, K., *et al.* “Étude expérimentale des propriétés physico-mécaniques des mortiers à base des granulats de mâchefer de charbon minéral.” *Afrique Science*, v. 12, n. 2, 2016.
- [5] YAGÜE, S., SÁNCHEZ, I., VIGIL DE LA VILLA, R., *et al.* “Coal-mining tailings as a pozzolanic material in cements industry.” *Minerals*, v. 8, n. 2, p. 46-59, 2018.
- [6] MILIOLI, G., POMPÊO, M., ALEXANDRE, N.Z., *et al.* O sul do Estado. PORTAL DA ECOLOGIA AQUÁTICA, http://ecologia.ib.usp.br/portal/index.php?option=com_content &view=article&id=76&Itemid=414. Acessado em setembro de 2020.
- [7] FRÍAS, M., DE LA VILLA, R.V., DE ROJAS, M.S., *et al.* “Scientific aspects of kaolinite based coal mining wastes in pozzolan/Ca(OH)₂ system.” *Journal of the American Ceramic Society*, v. 95, n. 1, p. 386-391, 2012.
- [8] FRÍAS, M., DE ROJAS, M.S., GARCÍA, R., *et al.* “Effect of activated coal mining wastes on the properties of blended cement.” *Cement and Concrete Composites*, v. 34, n. 5, p. 678-683, 2012.
- [9] ADDOU, R., SALMO, K.H., AGBODJAN, W.P., *et al.* “Impact des déchets stériles de charbon en tant qu’ajouts sur les propriétés physiques des mortiers”, In: *Congrès de Mécanique*, n. 13, p. 1-3, 2017.
- [10] HASANBEIGI, A., PRICE, L., “A technical review of emerging technologies for energy and water efficiency and pollution reduction in the textile industry.” *Journal of Cleaner Production*, v. 95, p. 30-44, 2015.
- [11] ABCM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CARVÃO MINERAL. Dados estatísticos – Ano 2018, http://www.carvaomineral.com.br/conteúdo/gm_estatisticas/estatisticas_2018.pdf. Acessado em agosto de 2020.
- [12] SAVADOGO, N., MESSAN, A., HANNAWI, K., *et al.* “Durabilité d’un ciment composé à base des cendres de mâchefer de Tefereyre au Niger: Absorption capillaire, porosité accessible à l’eau et attaque acide.” *Journal of materials and engineering Structures*, v. 2, p. 213–223, 2015.
- [13] MEDINA, C., DE ROJAS, M.S., FRÍAS, M., “Properties of recycled ceramic aggregate concretes: water resistance.” *Cement and Concrete Composites*, v. 40, p. 21-29, 2013.
- [14] CANEDA-MARTÍNEZ, L., MEDINA, C., DE ROJAS, M.I.S., *et al.* “Water transport in binary eco-cements containing coal mining waste.” *Cement and Concrete Composites*, v. 104, p. 1-8, 2019.

- [15] HOSSAIN, M.M., KARIM, M.R., HASAN, M., *et al.* “Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review.” *Construction and Building Materials*, v. 116, p. 128-140, 2016.
- [16] ISHIKAWA, P.H. Propriedades de argamassas de assentamento produzidas com areia artificial para alvenaria estrutural. Dissertação de M.Sc., UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2003.
- [17] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579. “Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (n^o 200)”, Rio de Janeiro, 2013.
- [18] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52. “Agregado miúdo: Determinação da massa específica e massa específica aparente”, Rio de Janeiro, 2009.
- [19] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBRNM 45. “Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios”, Rio de Janeiro, 2012.
- [20] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. “Agregados: Determinação da composição granulométrica”, Rio de Janeiro, 2011.
- [21] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-3. “Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaios de caracterização”, Rio de Janeiro, 2019.
- [22] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. “Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2019.
- [23] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739. “Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro, 2018.
- [24] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15259. “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade”, Rio de Janeiro, 2018.
- [25] AHN, N.S, FOWLER, D.W. “Experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate micro fines in Portland cement concrete”, In: *International Center For Aggregates Research - ICAR*, v. 102, n. 1F, p. 1-435, 2000.
- [26] JANTSCH, A.C.A. *Análise do desempenho de argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes*. Dissertação de M.Sc., UFSM, Santa Maria, RS, Brasil, 2015.
- [27] PCZIECZEK, A. *Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis*. Dissertação de M.Sc., Udesc, Joinville, SC, Brasil, 2017.
- [28] CARASEK, H. *Argamassas, materiais de construção civil e princípio de ciência e engenharia dos materiais*. Editor Geraldo C. Isaia, v.2, São Paulo, Brasil, 2010.

ORCID

Priscila Ongaratto Trentin

Beatriz Schimelfenig

Karin Patricia Michtal Wainer Teixeira

Marly Terezinha Quadri Simões da Silva

Fabio Cesar Bimbatí

Adalberto Matoski

<https://orcid.org/0000-0002-4993-300X>

<https://orcid.org/0000-0002-6872-5775>

<https://orcid.org/0000-0003-4912-8999>

<https://orcid.org/0000-0003-1617-4817>

<https://orcid.org/0000-0001-9762-9910>

<https://orcid.org/0000-0001-5503-4943>