

Viabilidade técnica na utilização de resíduo de jateamento abrasivo como agregado miúdo no concreto

Technical feasibility in the use of waste of blasting abrasive as fine aggregate in concrete

Eduardo Polesello(1); Roana de Oliveira Georg(2)

1 Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

E-mail: edupole@terra.com.br | <http://orcid.org/0000-0003-3183-0675>

2 Universidade Feevale, Novo Hamburgo, RS, Brasil.

E-mail: roana.georg@gmail.com

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 6, n. 2, p. 95-114, Julho-Dezembro 2019 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Fevereiro 26, 2019; Aceito: Novembro 04, 2019]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2019.v6i2.3204>

Endereço correspondente / Correspondence address

Eduardo Polesello

Avenida Bento Gonçalves – 1865 – Apto 301, Bairro

Partenon – Porto Alegre / RS, Brasil.

CEP: 90650-002

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora: Luciana Oliveira Fernandes

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

Resumo

Na indústria petroquímica, a etapa de jateamento abrasivo em tanques de armazenamento de nafta, na preparação da superfície para aderência de revestimentos anticorrosivos, gera, por intervenção em cada tanque, aproximadamente 100 toneladas de resíduo classificado como classe II A. Em média são realizadas duas intervenções anuais em cada tanque. Nesse contexto, este trabalho visa avaliar a utilização do resíduo oriundo da atividade de jateamento abrasivo como agregado miúdo, em substituição a areia natural, na produção de concreto. Definiu-se, para realização desta pesquisa, a especificação de uma relação água/cimento, com posterior utilização do resíduo abrasivo em três diferentes teores de substituição ao agregado miúdo natural, 25%, 50% e 75%. Foram analisados o comportamento em relação à resistência à compressão aos 7, 28 e 91 dias, resistência à tração na flexão aos 28 dias, absorção de água por capilaridade aos 28 dias de idade e a pozzolanicidade do resíduo. Como resultado dos ensaios realizados, constata-se que tanto para a resistência mecânica quanto para a absorção de água por capilaridade, o traço com até 50% de substituição, do agregado miúdo pelo resíduo de jateamento, mostra-se como alternativa adequada tecnicamente que agrega valor ao resíduo e, principalmente, minimiza impactos ao meio ambiente.

Palavras-chave: Abrasivo de Jateamento. Agregado Miúdo. Concreto. Resíduo.

Abstract

In petrochemical industry, the step of abrasive blasting in naphtha storage tanks, in preparation of the surface for application of anti-corrosion coatings generate, by intervention in each tank, approximately 100 tons of waste classified as class II A. Two annual interventions, in average, are carried out in each tank. In this context, the main objective of this paper is to evaluate the use of blasting abrasive wastes as fine aggregate, instead of natural sand, in concrete production. For this research, one water/cement ratio was specified, with subsequent use of the abrasive waste in three different levels, 25%, 50% and 75%, in substitution by natural fine aggregate. The behavior of compressive strength at 7, 28 and 91 days, flexure strength at 28 days, capillary water absorption at 28 days and the pozzolanicity of the waste were analyzed. As a result of the tests realized, it can be seen that for both mechanical strength and water absorption by capillarity, the concrete with up to 50% replacement of fine aggregate by blasting waste, is a technically adequate alternative that adds value to the waste and, mainly, minimizes impacts at the environment.

Keywords: Abrasive blasting. Fine aggregate. Concrete. Waste.

1 Introdução

Os efeitos da degradação ambiental e social são problemas enfrentados pela humanidade e que necessitam de ações para serem minimizados. Para tanto, é necessária uma visão de que o desenvolvimento sustentável deve estar associado ao progresso econômico, o que demanda uma reflexão quanto às técnicas de reutilização, reuso e reciclagem como meio de minimizar impactos ao meio ambiente sem afetar o crescimento da economia de uma nação (PABLOS; SICHIERI; IZELI, 2009). Duan et al. (2019) destacam que a enorme geração de resíduos se tornou um grande desafio em muitas cidades em crescimento, particularmente nos países em desenvolvimento.

A taxa de reciclagem e recuperação de resíduos de construção e de demolição varia significativamente em todo o mundo, de menos de 10% na China e na Índia até acima de 90% no Japão (DUAN et al., 2019). No Brasil, o estudo de tecnologias de reaproveitamento ainda tem muito para avançar. Os principais estudos estão relacionados com a reutilização de resíduos oriundos da construção civil ou de indústrias, em que diferentes materiais, com diferentes propriedades, por exemplo, podem ser utilizados como agregados em concretos (LEITE, 2001). Ainda segundo Leite (2001), a busca por processos sustentáveis está presente em todos os setores industriais, e não diferentemente na construção civil. Tanto a escassez de recursos quanto o alto custo em dar o destino e tratar resíduos, provoca os gestores na busca de redução de recursos, como forma de economia e sustentabilidade nos processos de produção (FAN et al., 2016). Para Mendes e Oliveira (2008), a utilização nos canteiros de obras de RCDs (Resíduos de Construção e Demolição da Construção Civil), conhecidos como entulho, além do ganho econômico, no reaproveitamento de recursos que seriam descartados sem valor, evita-se a degradação ambiental com a extração de rochas para britagem e areias em rios para novos agregados, além de minimizar o envio a aterros, que ocupam vastas áreas mortas para construção em curto prazo. A peculiaridade de se trabalhar com agregados oriundos de resíduos está na composição mineralógica, como no caso de resíduo de britagens, e na composição granulométrica, já que se podem encontrar diferentes materiais dependendo da granulometria do resíduo (SANTOS; LIRA; RIBEIRO, 2012).

No entanto, Fan et al. (2016) destacam a necessidade de estudos que avaliem a taxa de substituição utilizada e a porosidade de agregados reciclados já que, quando utilizados como substituição ao agregado miúdo natural, são fatores importantes que afetam as resistências física e mecânica, além da durabilidade do concreto produzido. Meng et al. (2018) registram que, por exemplo, materiais como concreto reciclado, tijolo triturado, resíduos de cerâmica e azulejo, podem ser utilizados em maiores percentuais de substituição (50 a 100%), principalmente devido às suas propriedades que incluem alta dureza, alta resistência, inércia química, etc. Por outro lado, resíduos

como borracha triturada, lama de concreto, sedimentos marinhos, recomenda-se a utilização de percentuais menores, devido à resistência intrinsecamente baixa e estrutura porosa que esses materiais apresentam. Em petroquímicas e refinarias, a manutenção em tanques de armazenamento de nafta, passa por diversos processos que geram resíduos, como é o caso da etapa de jateamento abrasivo. O jateamento tem o objetivo de criar rugosidade na superfície da chapa metálica do costado e fundo dos tanques, para aderência de revestimentos anticorrosivos. Existem inúmeros abrasivos para jateamento, entre eles, os abrasivos de rocha basáltica, cada qual com propriedades diferentes de acordo com as necessidades do jateamento (GONZAGA, 2016). O tamanho do grão é variável, depende da trituração que se deseja obter para a rugosidade necessária. Além da granulometria, outro fator a ser observado é a dureza do abrasivo, que depende da rocha mãe da qual foi extraída, além do tratamento de sinterização que o abrasivo passou. A dureza do abrasivo é suficiente para conseguir marcar materiais metálicos superficialmente. A combinação do equipamento de jateamento, alta pressão de ar e bicos de jato, influencia neste processo, aumentando a rugosidade esperada. Por outro lado, quanto maior a pressão e vazão de ar, mais os grãos se quebram ao se chocarem com a superfície metálica, liberando poeira de jateamento e grãos com metade do seu tamanho original (SAID, 2018).

O abrasivo usado no jateamento dos tanques de nafta é de origem basáltica. A cada intervenção nos tanques, são geradas cerca de cem toneladas de abrasivo residual, e este é descartado como resíduo classificado por classe II A conforme NBR 10004 (ABNT, 2004), gerando alto custo em transporte e tratamento para disposição final em aterro. A grande questão aqui levantada, não é o alto custo para descarte, mas sim o impacto ambiental que estes resíduos geram. Devido a essa grande quantidade de resíduo descartado para aterro ou de forma irregular, o terreno que recebe o material sofre com alterações nas propriedades do solo, como na permeabilidade, fertilidade e, se não bem isolado, contaminações do lençol freático, rios e lagos, além do risco de sofrer com grandes problemas ambientais como a degradação de áreas de preservação, obstruções de vias, queimadas, entre outros (LEVY, 2001).

Com tantos impactos ambientais citados pelo descarte de resíduos em aterro, percebe-se a necessidade de estudos que viabilizem a aplicação de resíduos industriais para fins mais nobres, retornando para processos e reutilização, como é o caso dos RCDs (Resíduos de Construção e Demolição da Construção Civil), oriundos da maior indústria geradora de resíduos no Brasil, mas que busca incorporar os resíduos gerados em concretos e argamassas como agregados miúdos e/ou graúdos (MENDES; OLIVEIRA, 2008). Meng et al. (2018), afirmam que o descarte de vários tipos de resíduos tem chegado a níveis preocupantes pelos impactos ambientais causados. Dependendo do tipo e tamanho das indústrias, grandes quantidades de resíduos são geradas anualmente, o que tem demandado, nos últimos anos grandes esforços de

estudos para reciclar resíduos com possível uso na produção de produtos de concreto. A areia natural é considerada o agregado fino mais adequado para a produção de concreto, porém com a alta demanda surgem sérios problemas ambientais que podem ser minimizados com a utilização de materiais, com mesma faixa de tamanho de partícula, gerados por outras indústrias. Na maioria das vezes, esses materiais são tratados como resíduos e descartados, entretanto apresentam potencial em se tornarem alternativas sustentáveis se utilizados como agregados miúdos (VARDHAN et al., 2019).

Nesse sentido, esta pesquisa tem como objetivo analisar a utilização do resíduo de jateamento abrasivo, usado em manutenções de tanques de armazenamento de nafta, como agregado miúdo no concreto em diferentes teores de substituição, avaliando o desempenho final quanto à resistência à compressão, resistência à tração na flexão e absorção de água por capilaridade.

2 Programa Experimental

Conforme especificado pela NBR 6118 (ABNT, 2014), o concreto para ambiente industrial, caracterizado por classe de agressividade ambiental III, deve apresentar uma relação água/cimento máxima de 0,55. Como o resíduo gerado é oriundo de indústria, optou-se pela definição da relação água/cimento de 0,50 para atender essa prescrição.

2.1 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados foram os que estão disponíveis na região metropolitana de Porto Alegre e são usualmente utilizados na produção de concretos por centrais dosadoras da região.

Os concretos foram produzidos com cimento Portland pozolânico (CP IV 32 RS), com classe de resistência definida em 32,0 MPa. O agregado miúdo utilizado foi uma areia quartzosa, com massa específica de 2,61 kg/dm³ e dimensão máxima característica igual a 2,36 mm com módulo de finura de 2,01. Optou-se pela utilização de agregado graúdo de origem basáltica, definido como brita 1, apresentando massa específica de 2,66 kg/dm³, dimensão máxima de 19,0 mm com módulo de finura de 6,99.

O resíduo, abrasivo de rocha basáltica após o processo de jateamento em tanques de nafta, foi utilizado nas condições em que é gerado, sem nenhum tipo de processamento, caracterizando-se pela presença grãos e finos. A caracterização do resíduo está detalhada na Tabela 1.

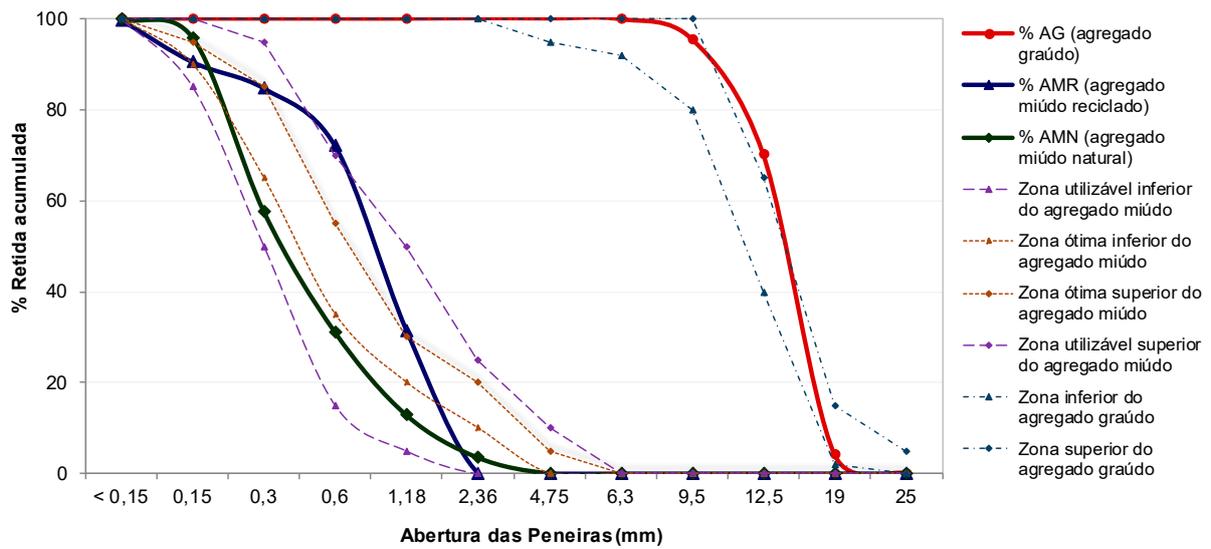
Tabela 1 – Caracterização física e química do resíduo de jateamento abrasivo

Características Físicas				
Dimensão Máxima Característica (mm)			2,36	
Módulo de Finura			2,79	
Massa Específica (kg/dm ³)			2,74	
Massa Unitária (kg/dm ³)			1,18	
NBR 10004:2004 – Massa Bruta				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados	VMP NBR 10004:2004
pH (suspensão 1:1)		2 a 13	9,1	2,0 – 12,5
NBR 10006:2004 – Solubilizado – Parâmetros Inorgânicos				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados	VMP NBR 10006:2004
Alumínio	mg/L	0,01	0,622	0,2
Ferro	mg/L	0,01	1,40	0,3
Demais Parâmetros			Dentro dos VMP NBR 10006:2004	
NBR 10006:2004 – Solubilizado				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados	VMP NBR 10006:2004
pH Final do Solubilizado	---	0 – 14	8,1	---
NBR 10005:2004 – Lixiviado				
Parâmetros	Unidade	LQ	Resultados	VMP NBR 10005:2004
Tempo de Lixiviação	h	---	18	16 – 20
pH Final do Lixiviado	---	---	5,1	---
Parâmetros Inorgânicos – Lixiviado			Dentro dos VMP NBR 10005:2004	
Parâmetros Orgânicos – Lixiviado			Dentro dos VMP NBR 10005:2004	

Fonte: Próprios autores, 2018.

A caracterização apresentou os parâmetros de alumínio e ferro acima dos valores máximos permitidos pela NBR 10006 (ABNT, 2004), no entanto, não influenciou na classificação do resíduo ou reatividade como agregado. Com o objetivo de melhor observar as características físicas do resíduo de jateamento abrasivo, a Figura 1 apresenta sua curva granulométrica, juntamente com as curvas dos agregados utilizados na produção do concreto, e na imagem da Figura 2 a distribuição retida em cada peneira.

Figura 1 – Curva granulométrica dos agregados: Agregado Graúdo (AG), Agregado Miúdo Reciclado (AMR) e Agregado Miúdo Natural (AMN)



Fonte: Próprios autores, 2018.

Figura 2 – Aspecto do resíduo após ensaio de granulometria



Fonte: Próprios autores, 2018.

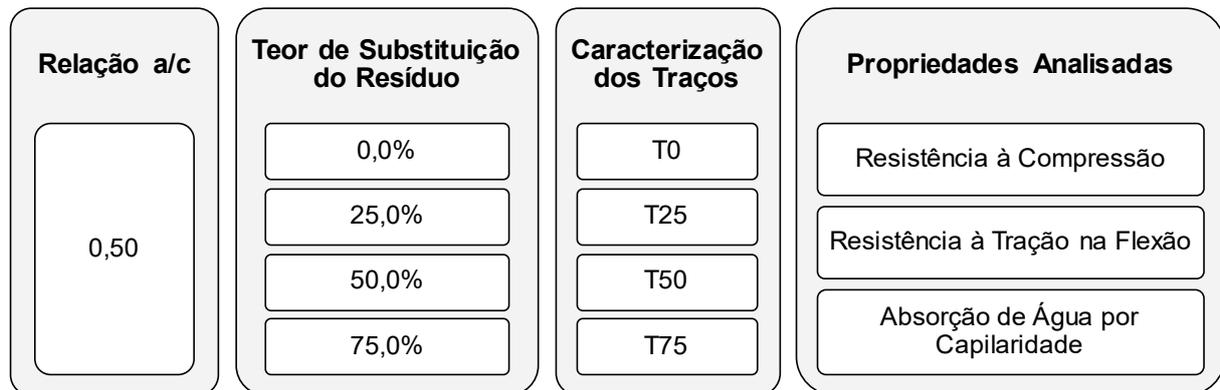
A água usada foi a fornecida pelo abastecimento público da cidade de Novo Hamburgo. Pela importância e benefícios que os aditivos químicos geram, utilizou-se um aditivo plastificante na dosagem do concreto caracterizado, segundo fabricante, como plastificante multidosagem de pega normal com densidade de massa 1,18 g/ml e faixa de dosagem de 0,2% a 1,5% da massa de cimento. Neste estudo adotou-se uma dosagem de 0,30%.

2.2 Planejamento Experimental

Além da definição de uma relação a/c, foram definidos três teores de substituição do agregado miúdo natural pelo resíduo de jateamento como variáveis controláveis da pesquisa. Como variáveis de resposta analisaram-se a resistência à compressão,

resistência à tração na flexão e a absorção de água por capilaridade. Essa estruturação está ilustrada na Figura 3.

Figura 3 – Detalhamento das variáveis da pesquisa



Fonte: Próprios autores, 2018.

Com base em dosagens experimentais apresentadas na literatura (MEHTA; MONTEIRO, 2014; DUARTE; GODINHO, 2015), entretanto adequando-se alguns parâmetros verificados em laboratório para os materiais utilizados nesta pesquisa, definiu-se como referência o traço unitário em massa de 1:1,93:2,50 (cimento:areia:brita), sendo a produção dos concretos realizada em laboratório com betoneira de eixo inclinado, para um volume de 50 litros. O detalhamento dos traços utilizados está na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização das dosagens adotadas na pesquisa

Traço	Teor de argamassa (%)	a/c	Cimento (kg)	Areia (kg)	Resíduo (kg)	Brita 1 (kg)	Aditivo (g)	Água (kg)
T0	54	0,50	20,5	39,66	0,00	51,24	61,5	9,8
T25	54	0,50	20,5	29,74	9,91	51,24	61,5	9,8
T50	54	0,50	20,5	19,83	19,83	51,24	61,5	9,8
T75	54	0,50	20,5	9,91	29,74	51,24	61,5	9,8

Fonte: Próprios autores, 2018.

A sequência de colocação dos materiais para produção dos concretos obedeceu a seguinte ordem: agregado graúdo + parte da água (mistura) + cimento (mistura) + aditivo plastificante (mistura) + agregado miúdo (mistura) + água final (mistura). Após a adição total dos materiais, deixou-se a betoneira girando por cerca de 5 minutos para mistura e homogeneização dos materiais com posterior verificação da trabalhabilidade de acordo com as prescrições da NBR NM 67 (1998). Definiu-se, com base em experiências de obras para concreto dosado *in loco*, como padrão inicial de abatimento a especificação de 140±20 mm.

Com o abatimento do concreto verificado, moldaram-se os corpos de prova que permaneceram no molde em local protegido durante as primeiras 24 horas

para o processo de cura inicial, quando então foram desmoldados e devidamente identificados. Após identificação foram colocados em tanque de água saturada com cal a uma temperatura ambiente média de 23 ± 2 °C, no LABTEC (Laboratório de Técnicas Construtivas da Universidade Feevale), para cura até as idades de ensaio, conforme prescreve a norma NBR 5738 (ABNT, 2015).

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) nas idades de 7, 28 e 91 dias. Para garantir a planicidade entre as faces dos corpos de prova, durante o ensaio de compressão, utilizou-se o processo de retificação. O ensaio foi realizado com máquina universal para ensaios mecânicos, Modelo EMIC 23-20, com sistema eletromecânico de operação para 2000 kN. Para cada traço, em cada idade analisada, romperam-se dois corpos de prova.

Para a idade de 28 dias, realizaram-se também ensaios de resistência à tração na flexão seguindo as prescrições da NBR 12142 (ABNT, 2010), sendo a moldagem dos corpos de prova prismáticos realizada conforme NBR 5738 (ABNT, 2015). O ensaio de tração na flexão foi realizado com mesma máquina já caracterizada para o ensaio de resistência à compressão, e também foram rompidos dois corpos de prova para cada traço.

Além de avaliar o comportamento mecânico, buscou-se estimar a durabilidade dos concretos através do ensaio de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias de idade, seguindo a NBR 9779 (ABNT, 2013). Aos 27 dias os corpos de prova foram colocados em uma estufa à temperatura de 105 ± 5 °C até remoção total da umidade, com posterior resfriamento a temperatura ambiente média de 23 ± 2 °C. Após este processo, os corpos de prova foram colocados em ambiente com temperatura e umidade controlada, posicionados sobre suportes vazados em recipiente com um nível de água constante de 5 ± 1 mm, atentando para que apenas a parte inferior estivesse em contato com a água, evitando molhagem das outras superfícies. Foram realizadas leituras de absorção por capilaridade em 3, 6, 24, 48 e 72 horas, contados a partir do contato inicial com a água.

Por fim, com objetivo de avaliar a característica de possuir propriedades pozolânicas no agregado reciclado de jateamento abrasivo, realizou-se o ensaio de determinação de índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, segundo prescrições da NBR 5752 (ABNT, 2014). Para a realização desse ensaio, diferentemente do objetivo geral desta pesquisa, os corpos de prova moldados são de argamassa e não concreto, considerando a substituição gradual em diferentes teores, do cimento CP II F 32 pelo material a ser analisado.

3 Resultados e Discussões

Avaliou-se o comportamento do concreto no estado fresco, em relação à trabalhabilidade e densidade de massa, e no estado endurecido, quanto ao comportamento mecânico, densidade de massa e absorção de água por capilaridade. Os resultados obtidos foram analisados através do método de análise de variância (ANOVA), com o Software Statistica 8.0, para constatar estatisticamente se a substituição do agregado natural realmente exerce influência significativa, ou não, sobre as variáveis de resposta, com um nível de confiabilidade de 95%.

3.1 Concreto no Estado Fresco

O abatimento registrado, após mistura e homogeneização dos materiais, para cada um dos traços estudados está detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 – Abatimento do concreto no estado fresco

Traço	T0	T25	T50	T75
Abatimento (mm)	125,0	160,0	140,0	135,0

Observa-se que os abatimentos registrados atendem ao limite de abatimento predefinido de 140 ± 20 mm. Os registros dos valores de abatimento não demonstram linearidade em relação ao teor de substituição, já que, para 50% e 75% de substituição do resíduo o abatimento reduziu em relação ao teor de 25%. Salienta-se que a quantidade de água em todos os traços foi igual e o resíduo foi seco em estufa até constância de massa antes de sua utilização na mistura. Sendo assim, pelo resíduo ter sido utilizado na forma como é gerado, sem a realização de nenhum processamento (Figura 1), atribui-se a variabilidade no resultado de abatimento a esse fato, sendo possível que no traço de 25% de substituição, a amostra de resíduo incorporada apresentou maior quantidade de grãos maiores e menor quantidade de finos, ocasionando menor absorção de água na mistura e maior abatimento.

Ao longo do processo de produção os concretos se mostraram bem argamassados, uniformes, coesos, sem verificação de segregação ou exsudação, apresentando um comportamento adequado. Outro parâmetro verificado foi a densidade de massa dos concretos no estado fresco (Tabela 4).

Tabela 4 – Densidade de massa no estado fresco

Traço	T0	T25	T50	T75
Densidade de Massa (g/cm ³)	2,46	2,47	2,49	2,49
	2,48	2,45	2,55	2,69
Média (g/cm ³)	2,47	2,46	2,52	2,59
Desvio Padrão (g/cm ³)	0,02	0,01	0,05	0,14
CV (%)	0,62	0,56	1,82	5,58

Com base nos valores individuais da densidade, para melhor verificar a influência do percentual de substituição, a Tabela 5 mostra o resultado da ANOVA realizada, do tipo *one-way*.

Tabela 5 – ANOVA da influência do traço na densidade de massa no estado fresco

	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Traço	0,02120	3	0,00707	1,273	0,396642	Não
Erro	0,02220	4	0,00555			

SQ: soma quadrática; GDL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Fcalc: valor calculado de F

Observa-se que não há evidências de diferença nos resultados da densidade de massa no estado fresco, quando se substitui o agregado miúdo pelo resíduo de jateamento nos percentuais sugeridos neste estudo. Tal comportamento ocorre porque a densidade do resíduo utilizado é muito semelhante à do agregado miúdo.

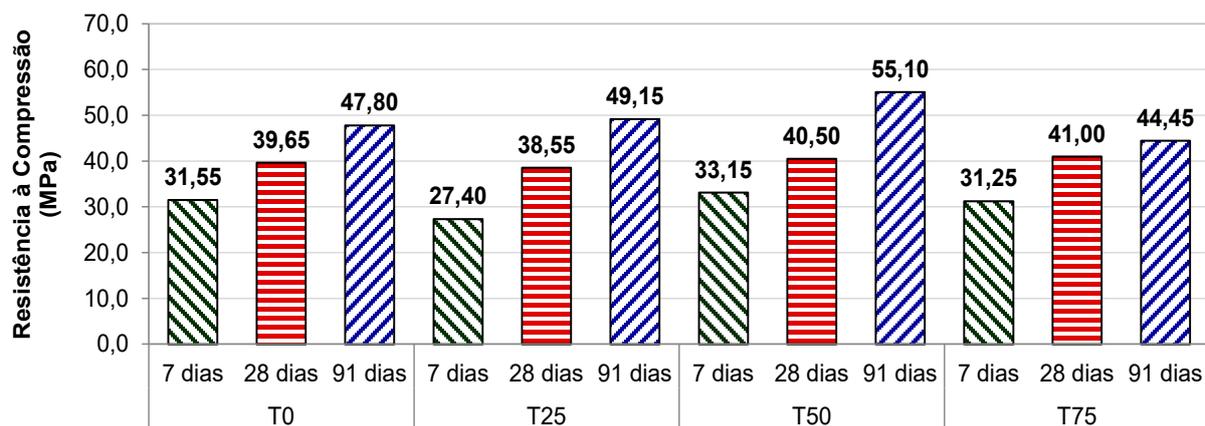
3.2 Concreto no Estado Endurecido

Os resultados individuais de resistência à compressão do concreto analisada em três diferentes idades, 7, 28 e 91 dias, estão detalhados na Tabela 6, enquanto que o gráfico da Figura 4 apresenta a média para cada idade de rompimento.

Tabela 6 – Resultado do ensaio de resistência à compressão

Traço	T0			T25			T50			T75		
	7	28	91	7	28	91	7	28	91	7	28	91
Resistência à Compressão (MPa)	32,30	39,20	52,60	27,00	38,90	47,30	32,80	43,20	54,60	31,30	41,60	49,70
	30,80	40,10	43,00	27,80	38,20	51,00	33,50	37,80	55,60	31,20	40,40	39,20
Média (MPa)	31,55	39,65	47,80	27,40	38,55	49,15	33,15	40,50	55,10	31,25	41,00	44,45
Desvio Padrão (MPa)	1,06	0,64	6,79	0,57	0,49	2,62	0,49	3,82	0,71	0,07	0,85	7,42

Figura 4 – Resistência à compressão média nas idades de 7, 28 e 91 dias



Com os valores individuais obtidos, na Tabela 7 apresenta-se a ANOVA, tipo fatorial, da resistência à compressão dos diferentes traços de concreto e para as diferentes idades de rompimentos dos corpos de prova.

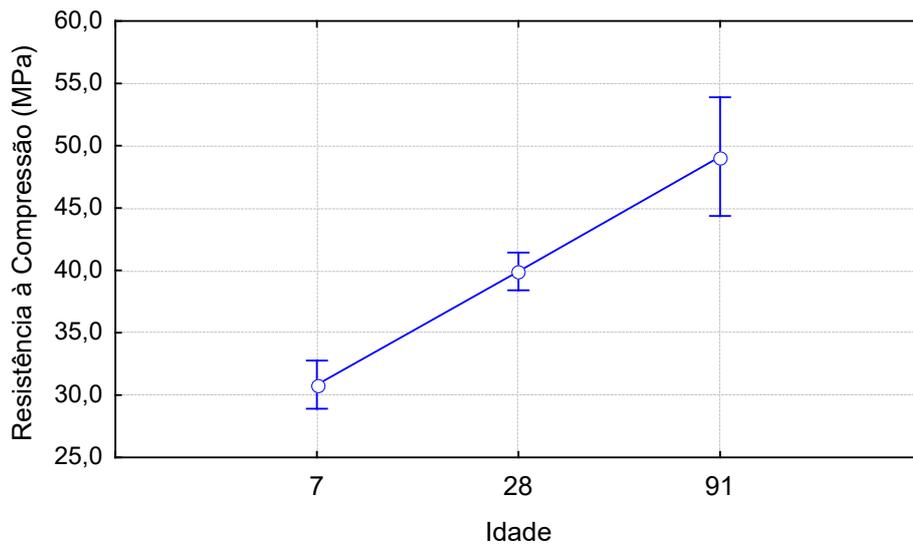
Tabela 7 – ANOVA da influência do traço e da idade de rompimento na resistência à compressão do concreto

	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Idade (dias)	1337,75	2	668,87	63,604	0,000000	Sim
Traço	74,94	3	24,98	2,375	0,121220	Não
Traço x Idade	86,27	6	14,38	1,367	0,302877	Não
Erro	126,20	12	10,52			

SQ: soma quadrática; GDL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Fcalc: valor calculado de F

É possível verificar que para o tipo de traço, definido pelo teor de substituição do resíduo, assim como para a interação entre o teor de substituição e a idade de rompimento não há evidências de alteração na resistência à compressão para as idades analisadas. Porém a idade de ensaio do concreto exerce influência significativa na resistência à compressão. A Figura 5 ilustra esse comportamento da ANOVA.

Figura 5 – Comportamento da idade de ensaio sobre os valores de resistência à compressão



Esse aumento das resistências com o passar do tempo já era esperado, pois o concreto ganha resistência ao longo do tempo em função do processo de hidratação do cimento, comportamento já consolidado pela literatura, em especial para cimentos com pozolanas, que foi o cimento utilizado. O alto teor de pozolana em sua composição retarda as reações de hidratação, justificando o aumento de resistência observado em idades mais elevadas, por exemplo, dos 28 aos 91 dias.

Para a idade de 28 dias, além da resistência à compressão, outra propriedade mecânica verificada foi à resistência à tração na flexão. A Figura 6 apresenta os resultados médios obtidos e a Tabela 8 os resultados da ANOVA, com base nos valores individuais registrados.

Figura 6 – Resistência à tração na flexão média na idade de 28 dias

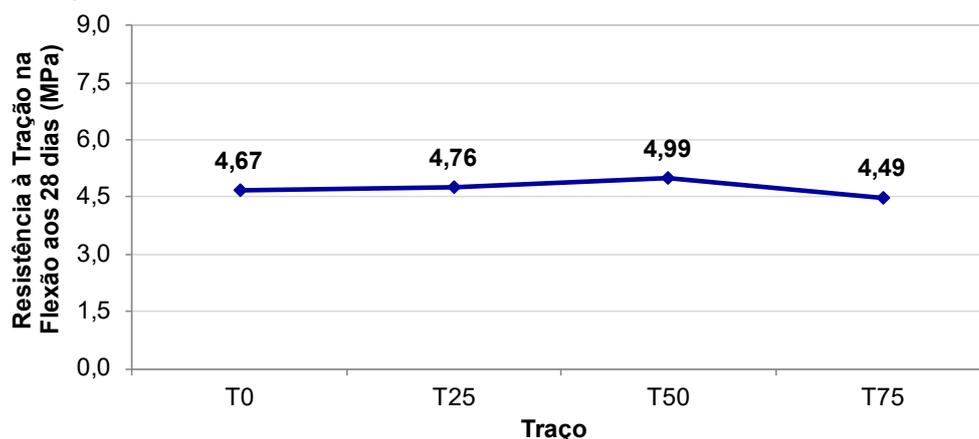


Tabela 8 – ANOVA da influência do traço sobre a tração na flexão aos 28 dias

	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Traço	0,2587	3	0,0862	0,2793	0,8385	Não
Erro	1,2353	4	0,3088			

SQ: soma quadrática; GDL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Fcalc: valor calculado de F

Através da análise dos dados de resistência à tração na flexão apresentados na Tabela 8, pode-se verificar que o teor de substituição do agregado miúdo pelo resíduo (traço) não mostra evidências de diferença na resistência à tração na flexão.

Outro parâmetro analisado foi a densidade de massa no estado endurecido. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Densidade de massa no estado endurecido

Traço	T0	T25	T50	T75
Densidade de Massa (g/cm³)	2,41 2,42	2,40 2,44	2,44 2,50	2,45 2,67
Média (g/cm³)	2,41	2,42	2,47	2,56
Desvio Padrão (g/cm³)	0,01	0,03	0,04	0,15
CV (%)	0,29	1,06	1,80	6,00

Com base nos valores individuais, para melhor verificar a influência do percentual de substituição do resíduo sobre a densidade de massa no estado endurecido, a Tabela 10 mostra o resultado da ANOVA realizada, do tipo *one-way*.

Tabela 10 – ANOVA da influência do traço na densidade de massa no estado endurecido

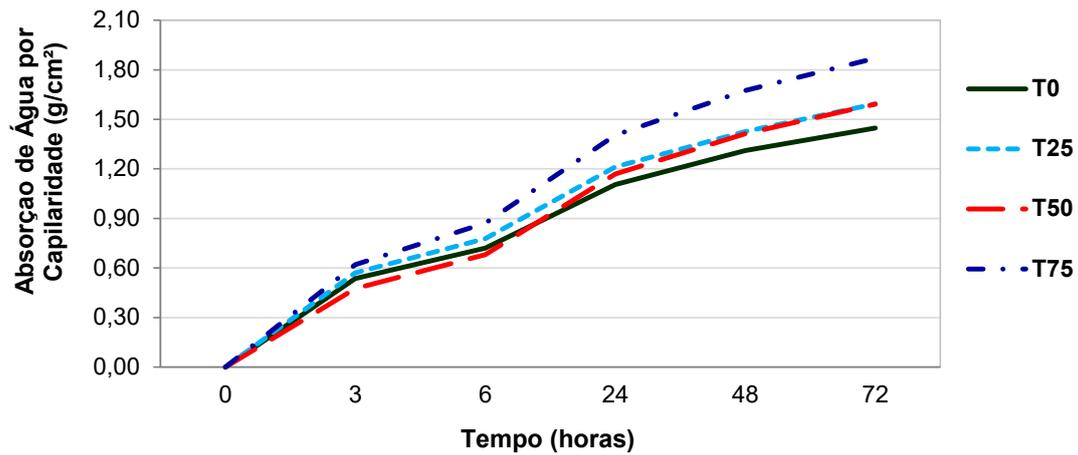
	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Traço	0,0271	3	0,0090	1,348	0,378	Não
Erro	0,0268	4	0,00671			

SQ: soma quadrática; GDL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Fcalc: valor calculado de F

Através do resultado obtido pela análise de variância (ANOVA) apresentado na Tabela 10, é possível afirmar que, assim como verificado para o estado fresco, o teor de substituição não mostra evidências de diferenças no comportamento da densidade no estado endurecido.

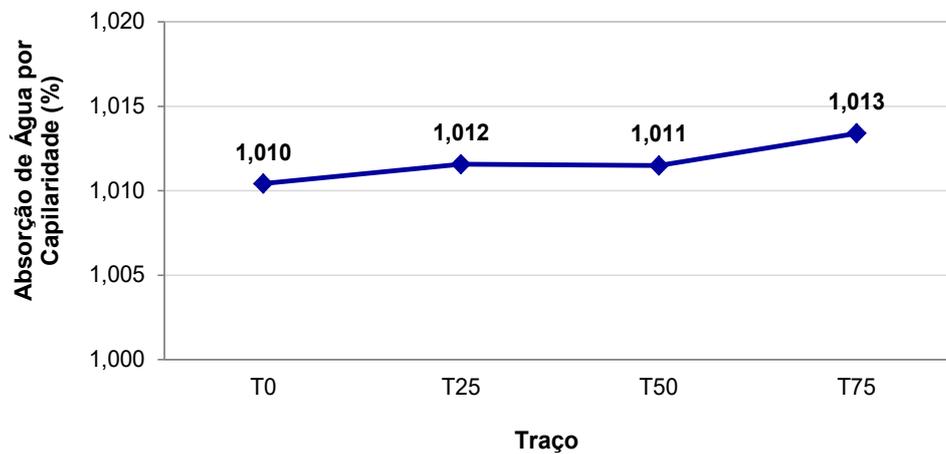
Com o intuito de estimar a durabilidade do concreto em função do teor de substituição do resíduo de jateamento abrasivo, optou-se pelo ensaio de absorção de água por capilaridade. Na Figura 7 apresentam-se os resultados registrados da absorção de água por capilaridade, que representam a massa de água absorvida, no decorrer das 72 horas de ensaio.

Figura 7 – Absorção de água por capilaridade aos 28 dias



Após totalizar 72 horas de ensaio, verificou-se o percentual final obtido para a absorção de água, para cada traço estudado, conforme registrado na Figura 8.

Figura 8 – Percentual de absorção média de água ao final das 72 horas de ensaio



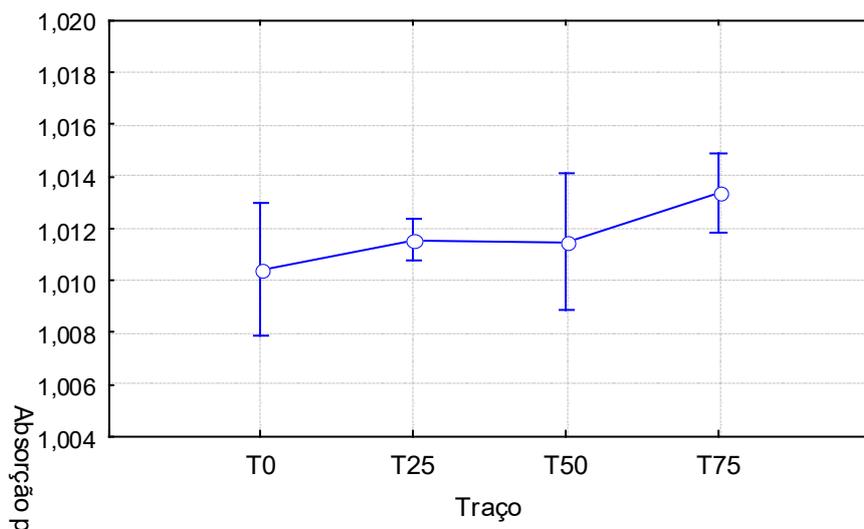
Com os resultados determinados ao final das 72 horas, realizou-se a ANOVA para verificar a influência do uso do resíduo sobre a absorção de água por capilaridade. O resultado está apresentando na Tabela 11 e na Figura 9.

Tabela 11 – ANOVA da influência do traço sobre a absorção de água por capilaridade aos 28 dias

	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Traço	0,000	3,0	0,000	6,96	0,0128	Sim
Erro	0,000	8,0	0,000			

SQ: soma quadrática; GDL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Fcalc: valor calculado de F

Figura 9 – Comportamento da ANOVA da influência do traço sobre a absorção de água por capilaridade aos 28 dias



Através da ANOVA verifica-se que os teores de substituição do resíduo de jateamento nos traços dos concretos exercem influência significativa sobre a absorção de água por capilaridade do concreto. É possível observar, no entanto, que o traço que se mostra com maior discrepância, em relação aos demais, é o traço T75. A maior absorção de água traços com maiores teores de substituição de resíduos, está associada à taxa de absorção de água do próprio resíduo, justificando o resultado observado para 75% de substituição, já que nas demais propriedades não registrou-se essa discrepância no comportamento do T75.

Devido ao observado que o traço T75 apresenta maior discrepância no resultado, foi feita uma nova ANOVA somente com os traços T0, T25 e T50, conforme é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – ANOVA da influência do traço sobre a absorção de água por capilaridade aos 28 dias para os traços T0, T25 e T50

	SQ	GDL	MQ	Fcalc	Fator p	Significativo
Traço	0,000002	2,0	0,000001	2,00	0,269537	Não
Erro	0,000005	6,0	0,000001			

SQ: soma quadrática; GDL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Fcalc: valor calculado de F

Segundo resultados dessa nova análise realizada, observa-se que o resíduo de abrasivo basáltico de jateamento não mostra evidência de mudança na absorção de água por capilaridade do concreto para traços com até 50% de substituição de agregado natural por resíduo, o que já é considerado um excelente teor de substituição quanto ao ganho nas propriedades mecânicas do concreto. Observando a Figura 4, nas idades de rompimento dos corpos de prova para verificação da resistência à compressão aos 28 e 91 dias, os traços até 50% de substituição, mostraram resultados satisfatórios, sendo

o traço de 50%, com resultados superiores ao traço referência, o que nos remete que até este percentual de substituição o concreto possui excelentes resultados nas análises feitas e apresentadas neste trabalho, dentro dos parâmetros fixados.

3.3 Pozolanidade do Resíduo

Segundo NBR 5752 (ABNT, 2014), com o intuito de melhor avaliar o potencial do resíduo utilizado, devem ser preparadas argamassas com duas dosagens diferentes, uma contendo somente cimento e a outra contendo 25% em massa do material pozolânico em substituição à igual porcentagem de cimento. A Tabela 13 apresenta o resultado do ensaio de pozolanidade da argamassa produzida com resíduo de jateamento abrasivo.

Tabela 13 – Resultado do ensaio de pozolanidade – NBR 5752 (ABNT, 2014)

Traço	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)	I _{cimento} (%)
T0	43,82	100
T25	19,99	46

O resultado do ensaio mostra que o resíduo apresentou I_{cimento} de 46%, sendo menor que o mínimo de 75% para classificação de propriedades pozolânicas. Salienta-se que o ensaio foi realizado com o resíduo sem nenhum beneficiamento, pois a proposta do trabalho é utilizar o resíduo na forma como é gerado. No entanto, segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014), o material o qual se deseja obter o índice de pozolanidade deve ser peneirado para que somente os finos sejam adicionados à argamassa utilizada para realização do ensaio.

É importante citar que Franco (2011), através de sua pesquisa com a utilização de poeira de jateamento na produção de pavimentos intertravados, concluiu que a poeira possuía propriedades pozolânicas, sendo possível a substituição de 5 a 15% do cimento por poeira de jateamento, garantindo resistência à compressão igual ou maior ao traço referência. Com isso, é possível em trabalhos futuros, a execução do peneiramento do resíduo utilizando somente os finos em substituição ao cimento, conforme prescreve a NBR 5752 (ABNT, 2014), a fim de afirmar ou não que o resíduo de jateamento possui ou não propriedades pozolânicas. Essa possível atividade pozolânica pode justificar o resultado observado para a resistência à compressão média registrada na idade de 91 dias para o concreto produzido com 50% de incorporação de resíduo, já que o resíduo foi incorporado sem tratamento.

4 Considerações finais

O resíduo de jateamento quando utilizado sem nenhum peneiramento, na forma como é gerado, não apresentou propriedade pozolânica, no entanto esta hipótese não

deve ser descartada, necessitando de maiores estudos sobre o assunto, principalmente pela vantagem econômica e ambiental de se reduzir o consumo e conseqüentemente a produção de cimento para construção civil. A substituição do agregado miúdo pelo resíduo em até 50% não mostra evidências de alterações sobre as propriedades mecânicas do concreto aos 28 dias de idade, quando comparado ao traço referência, sem a incorporação do resíduo. Corroborando com esse resultado, ao estimar a durabilidade do concreto pelo ensaio de absorção de água por capilaridade, registrou-se esse mesmo comportamento sobre os resultados finais para os traços estudados com percentual de substituição de até 50%, quando comparados ao concreto sem nenhuma adição do resíduo.

Cabe salientar, que os resultados obtidos neste estudo dizem respeito aos materiais e métodos utilizados e detalhados no programa experimental. Com base nas justificativas listadas acima, é possível concluir que existe viabilidade técnica na substituição de agregado miúdo natural por agregado reciclado de abrasivo de jateamento em até 50%, conforme verificado no resultado das propriedades nos estados fresco e endurecido. Por fim, destaca-se que a substituição do agregado miúdo natural por abrasivo de jateamento reduz seu descarte em aterro, desta forma, sua reutilização mostra-se como uma alternativa sustentável, além de contribuir na redução da exploração dos bancos de areia dos nossos rios.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Feevale que disponibilizou o laboratório de técnicas construtivas para produção do concreto e realização dos ensaios e a empresa Braskem pelo fornecimento do resíduo utilizado, assim como os ensaios de sua caracterização.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro, 2018. 9 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias*. Rio de Janeiro, 2014. 4 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118: Projetos de estruturas de concreto: procedimento*. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro, 2013. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12142: Concreto – Determinação da Resistência à Tração na Flexão de Corpos de Prova Prismáticos*. Rio de Janeiro, 2010. 5p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone*. Rio de Janeiro: ABNT, 1998. 8p.
- DUAN, H.; MILLER, T. R.; LIU, G.; TAM, V. W. Y. Construction debris becomes growing concern of growing cities. *Waste Management*, 83, p. 1-5, 2019.
- DUARTE, M. L.; GODINHO, D. S. S. *Comportamento do Concreto com Substituição do Agregado Miúdo Convencional por Agregado Miúdo Reciclado*. UNESC Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unesc.net/bitstream/1/4077/1/Matheus%20Lucas%20Duarte.pdf>. Acesso em: 21 maio 2018
- FAN, C.; HUANG, R.; HWANG, H.; CHAO, S. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes. *Construction and Building Materials*, 112, p. 708-715, 2016.
- FRANCO, J. M. Utilização de Resíduos de Jateamento na Produção de Paviers. – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. *II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental*, Londrina, 2011.
- GONZAGA, L. Redação, Jateamento, o que é e quais os tipos? Equipe Portal Metálica. Publicada em 2016. Disponível em: http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=1188. Acesso em: 4 mar. 2018.
- LEITE, M. B. *Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição*. Porto Alegre, 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. *Contribuição ao Estudo da Durabilidade de Concretos Produzidos com Resíduos de Concreto e Alvenaria*. São Paulo, 2001.194 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MENDES, O.; OLIVEIRA, E. G.. *Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil e Demolição: Um Estudo de Caso da Resolução 307 Conama*. Goiânia, 2008. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2008. Disponível em: <http://revistas.unipam.edu.br/index.php/cenar/article/viewFile/121/65>. Acesso em: 5 mar. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2.ed. 2014. 751 p.

MENG, Y.; LING, T.; MO, K. H. Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview. *Resources, Conservation & Recycling*, 138, p. 298–312, 2018.

PABLOS, J. M.; SICHIERI, E. P.; IZELI R. L. Reutilização de Resíduo Sólido Industrial, Constituído por Areias de Fundição, na Fabricação de Tijolos Maciços e Peças Decorativas. *Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo*, São Paulo, (10), p. 112-125, 2009.

SANTOS, R. A.; LIRA, B. B.; RIBEIRO, A. C. M. Argamassa com Substituição de Agregado Natural por Resíduo de Britagem de Granito. *Revista Holos*, João Pessoa, v. 5, p. 125-135, 2012. ISSN 1807-1600.

SAID. Catálogo Técnico de Produtos. *Produtos SAID*. Disponível em: http://saidabrasivos.com.br/abrasivo_said_malha_14.asp. Acesso em: 16 jun. 2018.

VARDHAN, K.; SIDDIQUE, R.; GOYAL, S. Strength, permeation and micro-structural characteristics of concrete incorporating waste marble. *Construction and Building Materials*, 203, p. 45–55, 2019.