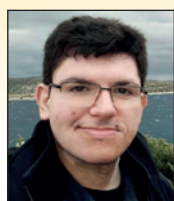
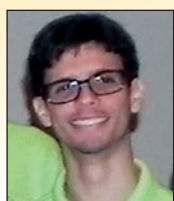


Retarding effect of grinding dust and its influence on the physical-mechanical and rheological properties of cementitious matrices

Efeito retardador do pó de retífica e sua influência nas propriedades físico-mecânicas e reológicas das matrizes cimentícias



R. D. MARIANO^a
raphael_mariano500@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-8961-4866>

J. S. ANDRADE NETO^a
josedasilvaandradeneto@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-9655-2659>

M. R. MORELLI^b
morelli@ufscar.br
<https://orcid.org/0000-0003-4304-7901>

D. V. RIBEIRO^a
verasribeiro@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-3328-1489>

Abstract

The present study evaluated the feasibility of the use of grinding dust (GD), a waste generated in the clutch disc finishing process, as a retardant additive in cementitious matrices. For this, the waste was added in contents of 5%, 10% and 15%, relative to the cement weight, and the setting time was determined by the Vicat method. In addition, the influence of this material on rheology (flow table, squeeze-flow and rotational rheometry) and on the physical-mechanical properties of the hardened matrices was analyzed. The results indicated an increase in setting time and a reduction in the fluidity of the mortars as a function of the addition of GD and the best results for the hardened state properties were verified for the cementitious matrices containing a 5% addition. Therefore, it was observed that GD is effective in retarding the setting time, presenting great potential for use in civil construction, without impairing its properties.

Keywords: waste, grinding dust, retarding admixture, rheology, physical-mechanical properties.

Resumo

O presente estudo avaliou a viabilidade da utilização do pó de retífica (PR), resíduo gerado na produção de revestimentos de discos de embreagem, como aditivo retardador em matrizes cimentícias. Para isso, o PR foi adicionado nos teores de 5%, 10% e 15%, em relação à massa de cimento, e avaliou-se o efeito desta adição no tempo de pega, pelo método de Vicat. Além destes ensaios, foi analisada a influência deste material na reologia (*flow table*, *squeeze-flow* e reometria rotacional) e nas propriedades físico-mecânicas das matrizes endurecidas. Os resultados indicaram um retardo de pega crescente em função de um maior teor de PR adicionado e uma redução na fluidez das matrizes cimentícias, sendo que os melhores resultados para as propriedades no estado endurecido foram verificados para as matrizes cimentícias contendo 5% de adição. Assim, observou-se que o PR é eficaz no retardo da pega, apresentando grande potencial de utilização na construção civil, sem prejudicar as suas propriedades.

Palavras-chave: resíduo, pó de retífica, aditivo retardador, reologia, propriedades físico-mecânicas.

^a Universidade Federal da Bahia, Laboratório de Ensaios em Durabilidade dos Materiais, Salvador, BA, Brasil;

^b Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, São Carlos, SP, Brasil.

1. Introdução

O aproveitamento dos rejeitos industriais como adições ou aditivos às matrizes cimentícias tem sido exaustivamente estudado, apresentando-se promissor em diversos países, com estes resíduos sendo vistos sob uma nova perspectiva, como importantes insumos na produção e, consequentemente, com valor econômico agregado, isto é, sendo considerados subprodutos [1]. Dessa forma, o desenvolvimento de alternativas de aplicação para estes resíduos também se torna foco do processo produtivo.

Dentre os diversos resíduos gerados pela indústria automotiva está o pó de retífica, material pulverulento gerado na produção de revestimentos de discos de embreagem, durante a etapa de usinagem. A geração deste resíduo no Brasil, pela ZF Sachs do Brasil, maior indústria do setor, é de aproximadamente 40 toneladas/mês, de acordo com dados apresentados na Figura 1. A diminuição na geração do PR nos últimos anos provavelmente está associada à recessão econômica do Brasil que impacta diretamente na venda de automóveis e, por conseguinte, na produção de discos de embreagem. O pó de retífica dos discos de embreagem é o resíduo gerado no processo de acabamento, realizado por meio de lixas e na furação. O processo de confecção de um disco de embreagem se inicia com a produção de fibras mistas (compostas por fibras metálicas, fibras poliméricas e fibra de vidro) que são posteriormente entrelaçadas e imersas em um banho de borracha em solução contendo os demais aditivos empregados para conferir a composição final do produto [2]. Os discos são, então, conformados a partir desse pré-produto emborrachado e levados para a torre de prensagem a quente. O produto é perfurado e retificado e o material gerado neste processo é recolhido por um sistema de sucção [2]. O processo de produção de revestimentos de embreagem e geração do PR pode ser visto na Figura 2.

Atualmente, o pó de retífica não está inserido em um plano efetivo de reuso e/ou reciclagem, sendo destinado à incineração, que não se constitui na prática ambientalmente mais adequada para destiná-los, devido à emissão de poluentes e contaminação das comunidades vizinhas [3]. Desta forma, estudos que objetivam o desenvolvimento de alternativas para reuso e/ou reciclagem do pó de retífica são extremamente necessários.

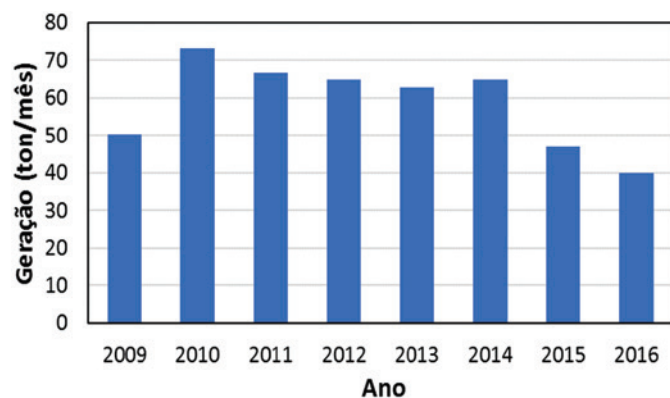


Figura 1

Geração média mensal de pó de retífica pela ZF Sachs do Brasil, a cada ano

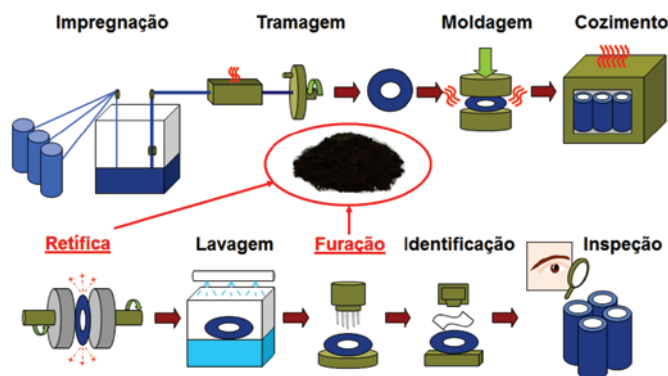


Figura 2

Representação esquemática do processo de produção dos discos de embreagem [2]

Contudo, devido à elevada periculosidade do resíduo e ao reduzido número de locais no mundo que o geram, a quantidade de trabalhos científicos que tratam da utilização do pó de retífica proveniente de discos de embreagem é escassa. RIBEIRO e MORELLI [4, 5] e RIBEIRO *et al.* [6] avaliaram a influência da adição deste resíduo nas propriedades de matrizes de cimento de fosfato de magnésio, como o tempo de pega, a resistência mecânica e a durabilidade, porém, não avaliaram o seu efeito quando adicionado em matrizes de cimento Portland.

As matrizes alcalinas, como o cimento Portland, são comumente utilizadas no condicionamento de resíduos devido ao baixo custo, possuir um grande histórico de utilização e apresentar tecnologia facilmente acessível. A sua elevada alcalinidade, com pH em torno de 12,5, reduz bastante a solubilidade de diversos compostos inorgânicos tóxicos ou perigosos e inibe processos microbiológicos. Além disso, como observado por RIBEIRO e MORELLI [5], o pó de retífica apresenta em sua composição química os óxidos de zinco (ZnO) e de cobre (CuO), além das resinas fenólicas, que são reconhecidos por retardar a pega do cimento [7-22].

Diversas pesquisas [7-16] mostram que a presença do zinco e seus compostos influencia na hidratação do cimento, com a formação de hidróxido de zinco $[Zn(OH)_2]$. Com o decorrer do processo de hidratação, as altas concentrações de Ca^{2+} e OH^- presentes nos poros fazem com que o $Zn(OH)_2$ reaja, segundo a equação (1), formando hidroxizincato de cálcio $[CaZn_2(OH)_6 \cdot 2H_2O]$.



Apesar de algumas pesquisas relacionarem o retardo de pega com a presença do zinco, com a formação do hidroxizincato de cálcio, ainda não há um consenso em relação ao agente ou processo responsável pelo retardo. Para ARLIGUIE e GRANDDET [7] e LI *et al.* [10], o efeito retardador do ZnO é atribuído à precipitação do hidróxido de zinco sobre os grãos de cimento. Já para YOUSUF *et al.* [11] e ASAVAPISIT *et al.* [12], o retardo está relacionado com a precipitação do hidroxizincato. Para ambas as teorias, o retardo é explicado pela formação de uma camada de baixa permeabilidade e solubilidade em torno das partículas anidras de cimento, que dificulta o transporte de íons e água, desacelerando, assim, o processo de hidratação.

De acordo com estudos de STEPHAN *et al.* [13], TREZZA [14] e WEEKS *et al.* [15], o retardo da pega é causado pelo processo de formação do hidroxizincato de cálcio, que utiliza íons cálcio e hidroxila

na reação, consumindo-os e evitando que estes precipitem e formem C-S-H e portlandita. Assim, até que a reação finalize, as concentrações de Ca^{2+} e OH^- são mantidas baixas e não há a supersaturação necessária para que ocorra a precipitação do C-S-H e da portlandita. O óxido de cobre (CuO) e as resinas fenólicas, presentes no pó de retífica, também são responsáveis por retardar o processo de hidratação do cimento [17 – 19; 21, 22]. Assim como o ZnO , o efeito retardador do CuO também não é completamente compreendido e, segundo KAKALI *et al.* [20], se deve à formação de uma camada de $\text{Cu}(\text{OH})_2$ sobre a superfície das partículas de cimento, o que dificulta a difusão de íons e a passagem de água. A atuação das resinas fenólicas se dá nos momentos iniciais de hidratação, quando estas são adsorvidas nas superfícies das partículas de cimento, reduzindo a passagem de água e a difusão de íons cálcio [21, 22].

Assim, em função de suas propriedades físicas, químicas e mineralógicas, o pó de retífica pode ser adicionado às matrizes cimentícias em função de seu potencial como aditivo retardador de pega, agregando valor a este resíduo. No entanto, é fundamental importância observar se a presença do PR, de elevada finura e rico em zinco, cobre, fibras de vidro e resinas fenólicas não influencia negativamente nas propriedades reológicas e físico-mecânicas das matrizes cimentícias.

Espera-se que a adição do pó de retífica ocasione diferentes efeitos na matriz cimentícia, já que suas partículas, de elevada finura, apresentam o potencial de preencher os vazios entre os produtos de hidratação (efeito fíler), diminuindo, assim, a porosidade e, consequentemente, melhorando as propriedades mecânicas. As propriedades mecânicas também podem ser influenciadas positivamente

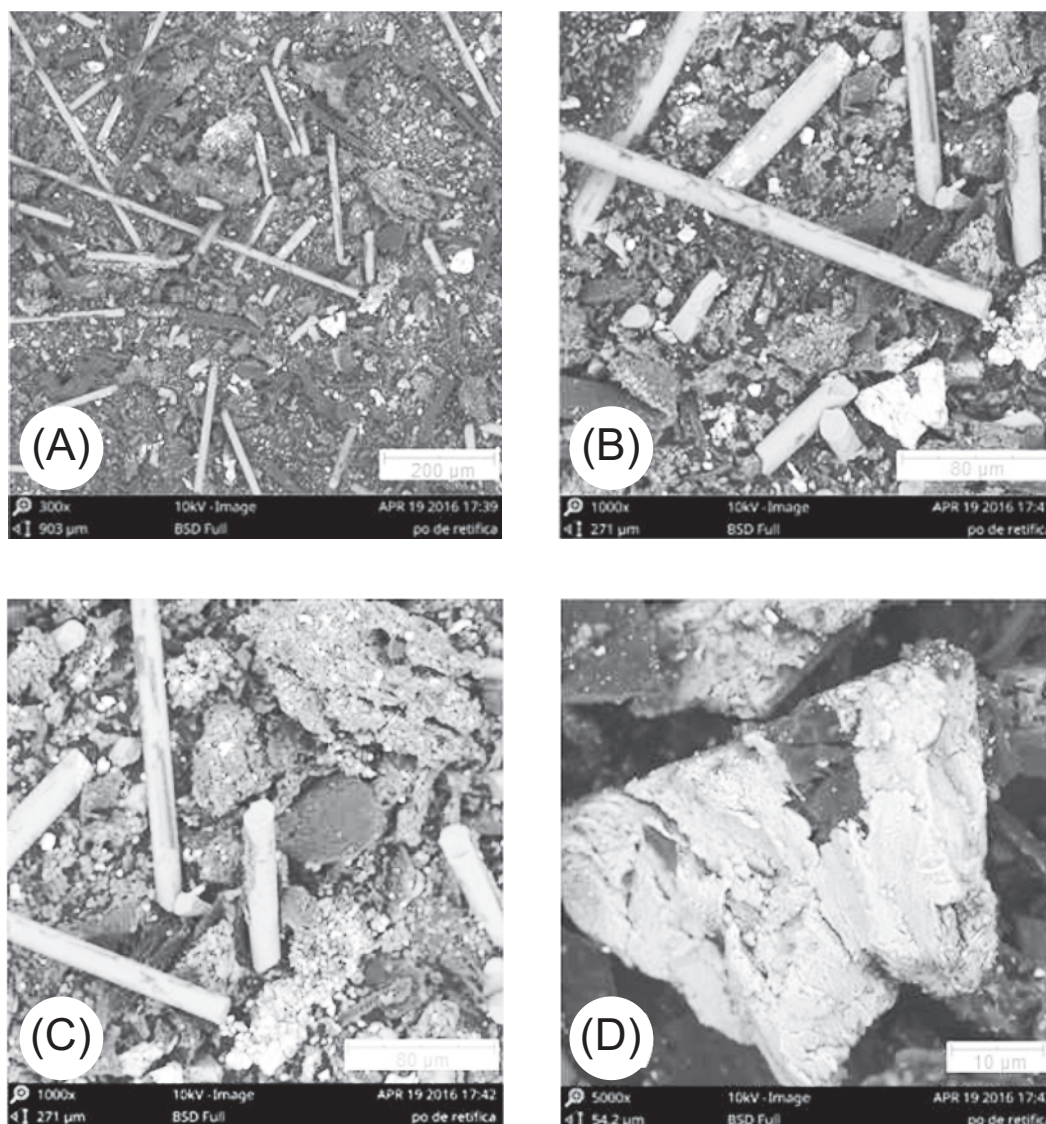


Figura 3

Micrografias do pó de retífica obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostrando: (A) visão geral da morfologia das partículas presentes no pó de retífica; (B) aproximação da visão geral das partículas; (C) partícula com formato de bastão; (D) partícula com formato irregular

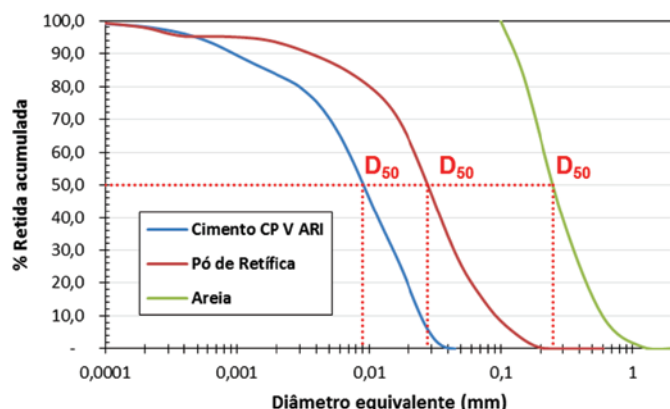


Figura 4

Distribuição do tamanho de partículas do pó de retífica, cimento e areia utilizados

pela presença de fibras de vidro no PR, que promovem o aumento da resistência à tração na flexão, contudo, podem prejudicar a reologia da mistura [23, 24].

Desta forma, o foco do presente artigo é avaliar o potencial de utilização do pó de retífica como aditivo retardador de pega em matrizes cimentícias e, de forma complementar, avaliar o efeito desta adição na reologia e nas propriedades físico-mecânicas, com o intuito de investigar a viabilidade técnica de utilização.

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

Para a confecção das matrizes cimentícias foram utilizados o cimento Portland CP V ARI, areia comercializada na cidade de Salvador-BA, água proveniente da rede pública de abastecimento (Embasa - Empresa Baiana de Água e Saneamento S.A.) e o pó de retífica, gerado pela ZF Sachs do Brasil Ltda., localizada em São Bernardo do Campo, São Paulo.

O cimento Portland CP V ARI utilizado neste trabalho apresentou massa específica de 3,13 kg/dm³ e área superficial específica Blaine de 0,4255 m²/g. Já a areia utilizada possui massa unitária de 1,46 kg/dm³, massa específica de 2,67 kg/dm³, módulo de finura de 1,32 (areia classificada como muito fina), dimensão máxima característica de 1,18 mm e um teor de 2,20% de material pulverulento. O pó de retífica utilizado apresentou massa específica de 2,10 kg/dm³ e área superficial específica Blaine de 0,2954 m²/g. O pó de retífica é um material bastante complexo, cujas partículas apresentam diversas formas e tamanhos devido aos seus diversos constituintes (fibras metálicas, fibras poliméricas e fibra de vidro), como pode ser observado nas micrografias mostradas na Figura 3, que foram obtidas por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca Phenom, modelo Pro-X.

As Figuras 3c e 3d evidenciam essa heterogeneidade de formas e tamanhos, podendo ser observadas, por exemplo, partículas com formato regulares (Figura 3c), como bastões de diferentes tamanhos, e outras, mais irregulares, como exposto na Figura 3d. Observando-se a seção transversal dos bastões presentes no ma-

Tabela 1

Composição química do pó de retífica, em óxidos, determinada por FRX

Constituinte	Teor (%)	Constituinte	Teor (%)
SO ₃	30,40	MgO	1,79
CuO	20,20	Fe ₂ O ₃	0,58
SiO ₂	16,90	K ₂ O	0,32
CaO	13,60	TiO ₂	0,19
ZnO	4,98	CsO ₂	0,19
Al ₂ O ₃	4,20	P ₂ O ₅	0,19
BaO	4,16	V ₂ O ₅	0,10
MnO	2,11	LOI*	37,70

* Perda ao fogo.

terial, percebe-se que estes são maciços, de acordo com a micrografia apresentada na Figura 3c. Essa informação é importante, pois, caso fossem vazados, maior seria a quantidade de água necessária para a elaboração de misturas [2].

Comparando-se as distribuições do tamanho de partículas do pó de retífica e do cimento (obtidos em um granulômetro a laser CL-LAS 1180) com a distribuição da areia (obtida por peneiramento mecânico), obtém-se a representação observada na Figura 4. Os diâmetros médios equivalentes (D_{50}) obtidos para o cimento, pó de retífica e areia foram 0,009 mm, 0,028 mm e 0,25 mm, respectivamente. Em relação ao PR, a distribuição é bastante ampla, variando de 0,04µm a 600µm. Porém, deve-se ter muito cuidado ao analisar esse resultado, já que os diâmetros das partículas, obtidos pelo granulômetro à laser, são dados pelas circunferências que as circunscvem. Desta forma, as partículas alongadas e as partículas com formato de bastão presentes no PR (ver Figura 3) tendem a aumentar o valor do diâmetro médio do resíduo, prejudicando, assim, a análise deste resultado.

A Tabela 1 apresenta a composição química do pó de retífica, em óxidos, determinada com base na técnica de fluorescência de

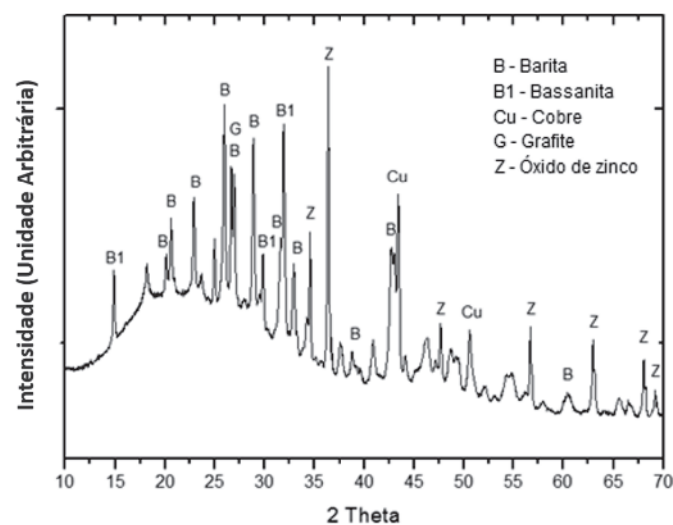


Figura 5

Difrátograma de raios X do pó de retífica (barita: BaSO₄; bassanita: 2CaSO₄·H₂O)

raios X (FRX) por meio de um aparelho Bruker, modelo S2 Ranger. Entre os constituintes do pó de retífica, destaca-se o óxido de cobre (CuO) que é reconhecido por ser um retardador da hidratação do cimento [17 - 19]. Ademais, ressalta-se também a presença do óxido de zinco (ZnO), que mesmo em pequenas quantidades é responsável por retardar a pega do cimento de forma muito eficaz [7 - 16], além da presença de enxofre, na forma de sulfato, que pode gerar degradação da matriz cimentícia caso não esteja quimicamente combinado.

A Figura 5 mostra o resultado do difratograma de raios-X do pó de retífica obtido por meio de um difratômetro D2 Phaser Bruker, com tubo de cobre, varredura de 5° a 70° (2θ), incremento de 0,001°/s, funcionando a 10mA e 30kV. A partir da utilização do software DifracEva da Bruker, com banco de dados centrado no sistema Crystallography Open Database (COD), foi possível realizar a identificação das fases presentes no material, além do teor de material amorfo. Foi observado que o seu grau de amorfização foi de 33,7%, provavelmente associado a presença da fibra de vidro e das resinas fenólicas na composição do PR. Também foi possível observar a presença da barita (BaSO₄) e da bassanita (CaSO₄·1/2H₂O), evidenciando a presença de sulfatos no PR.

Foram realizados, ainda, ensaios de caracterização ambiental (lixivia-

ção/solubilização) com o pó de retífica, segundo as NBR 10005:2004 [25] e 10006:2004 [26]. Os resultados são apresentados na Tabela 2, bem como os limites estabelecidos na NBR 10004:2004 [27].

Não foram detectados elementos em concentrações superiores às permitidas no extrato lixiviado, o que classifica este material como não perigoso (classe II). Observaram-se elevadas concentrações de alumínio, cádmio, chumbo, manganês, ferro e fenóis totais no extrato solubilizado, o que classifica este material como resíduo não perigoso não inerte (Classe II-A), contrário ao que RIBEIRO e MORELLI [5] encontraram em seus estudos. Esse fato se deu em função da mudança do processo produtivo por parte da indústria geradora, influenciada por uma normatização e fiscalização ambientais mais rigorosas e restritivas. O cádmio e os fenóis totais, principalmente, apresentaram valores para solubilização muito maiores que os permitidos pela norma.

2.2 Métodos

2.2.1 Formulação das matrizes cimentícias

Para a avaliação da influência do pó de retífica na reologia e nas propriedades físico-mecânicas da matriz cimentícia, foi utilizado

Tabela 2

Resultados de solubilização e lixiviação do pó de retífica, segundo as NBR 10004:2004, 10005:2004 e 10006:2004

Parâmetros	Solubilizado		Lixiviado	
	Resultado mg/L	VMP mg/L	Resultado mg/L (X)	VMP mg/L (#)
Arsênio	n.d.	0,010	n.d.	1,00
Bário	0,600	0,700	0,90	70,00
Cádmio	0,0-60	0,005	Nd	0,50
Chumbo	0,040	0,010	0,03	1,00
Cobre	1,500	2,000	X	#
Cromo Total	0,030	0,050	0,06	5,00
Manganês	0,630	0,100	#	#
Mercúrio	n.d.	0,001	n.d.	0,10
Selênio	n.d.	0,010	n.d.	1,00
Sódio	63,000	200,000	X	#
Zinco	4,650	5,000	X	#
Ferro	0,590	0,300	X	#
Cianetos	n.d.	0,070	X	#
Cloretos	34,000	250,000	X	#
Fenóis totais	3,590	0,010	X	#
Nitratos	6,300	10,000	X	#
Fluoretos	1,360	1,500	1,36	150,00
Sulfatos	114,770	250,000	X	#
Surfactantes	n.d.	0,500	X	#
Benzeno	X	#	0,20	0,50
Clorobenzeno	X	#	1,30	100,00
Clorofórmio	X	#	0,30	6,00
Tetracloroeto de carbono	X	#	0,06	0,02
Tetracloroetileno	X	#	0,03	4,00
Tricloroetileno	X	#	0,04	7,00

VMP = Valor máximo permitido; # = Ausência de limite pela NBR 10004:2004; x = Não solicitado pela NBR 10004:2004; n.d. = não detectado.

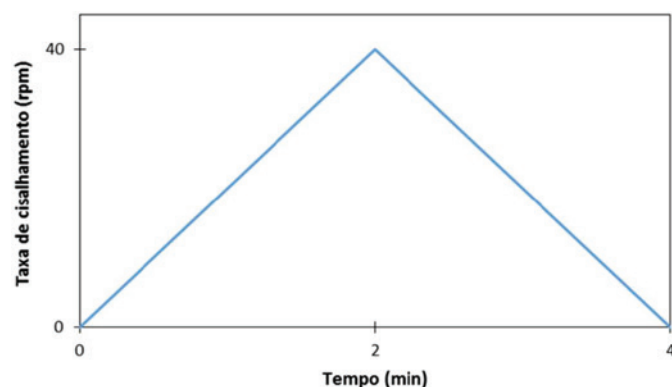


Figura 6

Configuração de ensaio adotada para a realização do ensaio de fluxo no reômetro

um traço 1,0 : 2,6 : 0,59 (cimento : areia : água), com adição de três teores diferentes do pó de retífica (5%, 10% e 15%, em relação à massa de cimento), além de uma mistura de referência (sem adição do resíduo). Não foi especificado um limite para a consistência das matrizes cimentícias.

2.2.2 Caracterização reológica

Os índices de consistência (*flow table*) das matrizes cimentícias com adição de pó de retífica foram determinados por meio do método prescrito pela NBR 13276:2005 ("Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência") [28]. Para tal, utilizou-se uma mesa de consistência automática Contenco, modelo I-3019-B. Os ensaios de *squeeze-flow* foram realizados seguindo as recomendações da ABNT NBR 15839:2010 (Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*) [29], utilizando-se uma máquina universal de ensaios INSTRON, com controle de deslocamento e célula de carga de 5 kN, após 15 minutos da mistura, utilizando-se uma velocidade de deslocamento de 0,1 mm/s.

As propriedades reológicas das pastas com diferentes adições de pó de retífica foram obtidas por meio do reômetro do tipo rotacional Rheotest Medingen GmbH – RN 4.1. Para a realização do ensaio, utilizou-se um procedimento adaptado de Betioli *et al.* [30], conforme apresentado na Figura 6. Os parâmetros reológicos foram obtidos aplicando-se o modelo de Herschel-Bulkley na curva obtida na desaceleração das paletas do reômetro, conforme estudos de Vikan e Jacobsen [31], Liu *et al.* [32] e Andrade Neto e Silva [33].

2.2.3 Influência do PR nas propriedades físico-mecânicas das matrizes cimentícias

Para a caracterização da matriz cimentícia no estado endurecido, foram realizados ensaios de determinação das resistências à tração na flexão e à compressão axial, segundo a ABNT NBR 13279:2005 (Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão) [34]. Para os ensaios de resistência à tração na

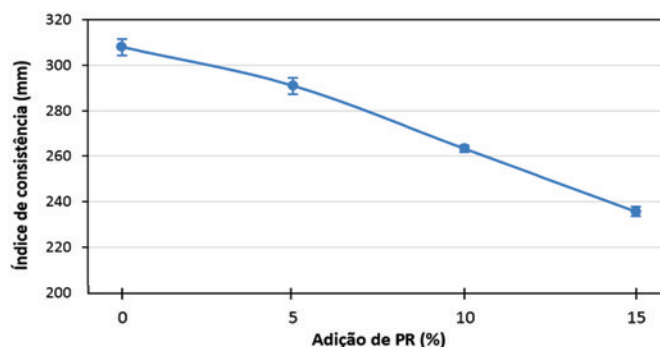


Figura 7

Índice de consistência das matrizes cimentícias em função do teor de pó de retífica adicionado

flexão, foram utilizados 4 (quatro) corpos de prova de dimensões 4 cm x 4 cm x 16 cm. Após a ruptura por flexão destes corpos de prova, cinco das oito metades obtidas foram submetidas à compressão axial. As outras três metades foram submetidas aos ensaios de porosidade e densidade aparentes utilizando-se uma técnica baseada no princípio de Arquimedes. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados utilizando a prensa servo-controlada HD-120T da empresa Contenco, com capacidade de 120 tf.

Foram realizados, ainda, ensaios de determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade (absortividade) e altura de ascensão capilar, segundo a ABNT NBR 9779:2012 (Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade) [35]. Para o ensaio de absorção de água por capilaridade, foram utilizados três corpos de prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Ao final do ensaio, os corpos de prova foram rompidos diametralmente, sendo medidas as alturas de ascensão capilar em cada corpo de prova.

2.2.4 Análise do tempo de pega das matrizes cimentícias

A influência do PR no tempo de pega foi mensurada por meio do método de Vicat, segundo a ABNT NBR NM 65:2003 (Cimento Portland – Determinação do tempo de pega) [36]. Os ensaios foram feitos em triplicata para a determinação do tempo de pega, sendo apresentada a média destes resultados. O equipamento utilizado para tal foi o aparelho de Vicat automático da Solotest. Para a realização do ensaio foram preparadas pastas até que se atingisse a "consistência normal" preconizada pela norma e, a seguir, o pó de retífica foi adicionado em três teores diferentes (5%, 10% e 15%, em relação à massa de cimento).

3. Resultados e discussões

3.1 Caracterização reológica das matrizes cimentícias contendo pó de retífica

A Figura 7 apresenta os resultados obtidos para os índices de consistência das matrizes cimentícias por meio da mesa de consistência (*flow table*). Observa-se uma redução de 17 mm (5,5%), 44,7 mm (14,5%) e 72,33 mm (23,5%) nos índices de consistência, em relação

a argamassa de referência, para as matrizes cimentícias contendo 5%, 10% e 15% de pó de retífica (PR), respectivamente. Apesar da limitação da técnica, pelo fato de ser uma avaliação monoponto, é possível observar que a adição do PR impacta na trabalhabilidade da mistura. Na Figura 8, são apresentadas as curvas provenientes do ensaio de *squeeze-flow*. Observa-se que há uma redução da plasticidade em função da adição de pó de retífica nas matrizes cimentícias. Quanto maior o teor de PR, mais rígida a mistura é, precisando, assim, de cargas cada vez maiores para obter a mesma deformação.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos por meio de reometria rotacional para a tensão de escoamento e viscosidade plástica das misturas com diferentes teores de adição de PR para os tempos de 20 minutos e 60 minutos, obtidos a partir da aplicação do modelo de Herschel-Bulkley. Observa-se que, para os tempos avaliados (20 min e 60 min), a tensão de escoamento e a viscosidade plástica das misturas aumentam com a adição de PR.

A redução na plasticidade pela adição de PR, observada nos ensaios de *flow table*, *squeeze-flow* e reometria rotacional, se dá pelo maior teor de finos presentes na mistura. Partículas finas, como o pó de retífica, em água, apresentam uma tendência natural de se aglomerarem devido a forças de van der Waals e a forças capilares [37]. A presença destes aglomerados eleva a viscosidade e a tensão de escoamento da mistura reduzindo, portanto, a plasticidade da mistura [38, 39].

Ademais, a adição de fibras (como as fibras mistas presentes no PR) às matrizes cimentícias também é responsável por provocar uma redução na fluidez da mistura [40-42]. Ao se introduzir fibras na matriz cimentícia ocorrem interações fibra-fibra, fibra-parede do recipiente de mistura e fibra-matriz, o que dificulta o processo de dispersão e homogeneização, devido à formação de aglomerados de fibras e partículas-fibras, reduzindo, assim, a fluidez do sistema [40].

Além disso, as partículas e as fibras mistas do resíduo possivelmente atuam como uma barreira ao escoamento e, com isto, perturbam as linhas de fluxo, que passam a se formar de maneira curvada ao invés de lâminas paralelas, elevando, assim, a viscosidade da mistura, como ilustrado na Figura 9 [43].

Outro fator para a redução da plasticidade é a adsorção de uma parcela da água da mistura pelas partículas de PR, devido a finura e a elevada área superficial do resíduo, que não permite, assim, que esta contribua para a lubrificação das partículas sólidas [39]. A adsorção de uma parcela da água, o formato angular das partículas do PR (Figura 3) e a presença de fibras são responsáveis por aumentar a fricção interna das partículas durante o escoamento e, consequentemente, reduzir a plasticidade da mistura [23, 44].

Tabela 3

Tensão de escoamento e viscosidade plástica das pastas com diferentes teores de pó de retífica (PR)

Pasta	Tensão de escoamento (mN.m) – 20 min		Tensão de escoamento (mN.m) – 60 min		Viscosidade plástica (mN.m.min) – 20 min		Viscosidade plástica (mN.m.min) – 60 min	
	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio	Média	Desvio
Referência	1,86	0,239	3,39	0,271	0,054	0,007	0,100	0,017
5% PR	5,19	1,096	7,36	0,705	0,184	0,064	0,307	0,084
10% PR	8,53	0,115	11,30	1,386	0,205	0,037	0,366	0,035
15% PR	16,77	1,701	24,60	1,952	0,587	0,014	0,770	0,051

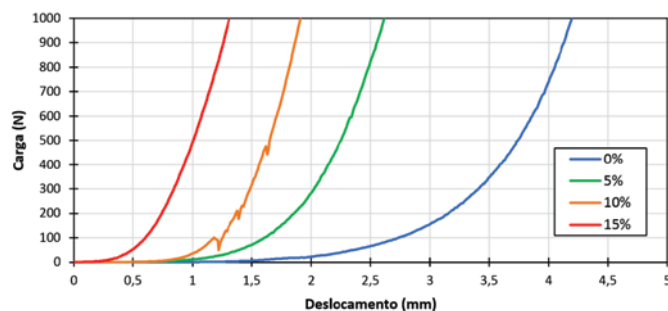


Figura 8

Comportamento reológico das matrizes cimentícias com diferentes teores de adição de pó de retífica (PR), avaliado por meio do ensaio de *squeeze-flow*

3.2 Influência do PR nas propriedades físico-mecânicas das matrizes cimentícias

A Tabela 4 apresenta as propriedades físicas das matrizes cimentícias com diferentes teores de adição de pó de retífica aos 28 dias de cura, e as resistências à tração na flexão e à compressão axial aos 3, 7 e 28 dias.

Para a mistura com 5% de pó de retífica, a finura das partículas do resíduo possivelmente foi responsável por promover um aumento da compactação da argamassa, resultando em um melhor empacotamento de partículas, o que aumentou a densidade da matriz e, por conseguinte, diminuiu a sua porosidade. Já para os teores de 10% e 15% de PR, a diminuição da trabalhabilidade devido a adição do resíduo gerou dificuldades na moldagem dos corpos de

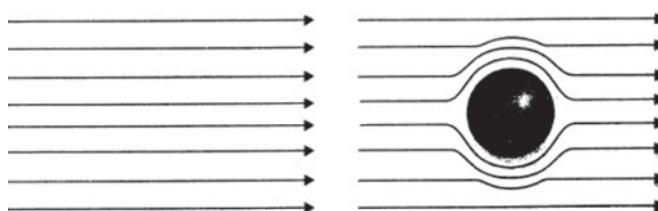


Figura 9

Efeito da presença de uma partícula esférica sobre as linhas de fluxo de um fluido submetido ao cisalhamento. Fluido (a) isento e (b) contendo partículas finas [43]

Tabela 4

Propriedades físico mecânicas das matrizes cimentícias com diferentes teores de adição do pó de retífica (PR)

Propriedade	Referência	5% PR	10% PR	15% PR
Densidade [g/cm ³]	1,97 ± 0,01	1,98 ± 0,01	1,96 ± 0,01	1,96 ± 0,01
Porosidade [%]	14,70 ± 0,87	13,29 ± 0,44	15,10 ± 0,93	15,31 ± 0,46
Coefficiente de absorção [kg/m ² .min ^{1/2}]	0,13 ± 0,01	0,11 ± 0,01	0,13 ± 0,01	0,15 ± 0,01
Altura de ascensão capilar [mm]	3,47 ± 0,16	3,71 ± 0,17	4,75 ± 0,24	5,46 ± 0,15
Resistência à tração na flexão – 3 dias [MPa]	5,59 ± 0,23	5,96 ± 0,21	4,90 ± 0,33	4,58 ± 0,23
Resistência à tração na flexão – 7 dias [MPa]	8,57 ± 0,29	8,85 ± 0,36	7,14 ± 0,21	6,73 ± 0,37
Resistência à tração na flexão – 28 dias [MPa]	8,93 ± 0,41	9,40 ± 0,58	8,14 ± 0,50	7,41 ± 0,10
Resistência à compressão axial – 3 dias [MPa]	26,08 ± 1,56	27,56 ± 2,06	24,56 ± 2,00	24,53 ± 1,61
Resistência à compressão axial – 7 dias [MPa]	31,41 ± 1,09	34,06 ± 0,71	32,00 ± 1,47	30,93 ± 2,07
Resistência à compressão axial – 28 dias [MPa]	35,11 ± 1,46	36,50 ± 1,77	33,61 ± 1,97	32,69 ± 2,07

prova, o que resultou em uma maior porosidade e, consequentemente, menor densidade das matrizes cimentícias.

Em relação ao coeficiente de absorção capilar, observa-se que há uma redução de 10,30% no valor do coeficiente de absorção capilar das matrizes cimentícias com 5% de adição do resíduo, em comparação à argamassa de referência. Porém, para as matrizes cimentícias com adições de 10% e 15% de PR, observam-se aumentos de 1,73% e 16,27%, em relação a argamassa de referência, respectivamente.

Para a mistura com 5% de PR, a obstrução dos poros pelas partículas do resíduo reduziu a sucção capilar, resultando, assim, em um menor coeficiente de absorção. Porém, o mesmo não aconteceu para matrizes cimentícias com teores de 10% e 15% de adição, provavelmente devido à dificuldade de adensamento durante a moldagem, o que pode ter contribuído para o aumento da porosidade. Esse aumento da porosidade deve ter incluído poros capilares ou estabeleceu uma melhor conexão entre os poros existentes.

De acordo com MENG [45], poros com dimensões maiores que 0,1 micrômetros (10⁻⁷ m) e menores que 1 milímetro (10⁻³ m) são mais relevantes para o fenômeno da ascensão da água por capilaridade. Ao observarmos a distribuição granulométrica do pó de retífica, nota-se que parcela significativa das partículas do pó de retífica estão entre 10 µm e 100 µm, isto é, dentro da faixa relevantes à capilaridade segundo MENG [45]. Com a adição do pó de retífica, provavelmente, uma parte dos poros foi obstruída ou teve seu diâmetro reduzido, o que se refletiu nos valores de altura de ascensão capilar que aumentou 6,91%, 36,94% e 57,41% para as matrizes cimentícias com 5%, 10% e 15% de adição de PR, respectivamente, em relação à mistura de referência.

A redução do diâmetro e/ou o aumento da quantidade e da interconexão entre os poros capilares, devido à adição do PR, eleva as pressões capilares [46], o que resulta em uma maior altura de

ascensão capilar, como observado para as matrizes cimentícias com teores de 10% e 15% de adição de PR.

Em relação às resistências à tração na flexão e à compressão axial, é possível observar que os corpos de prova das matrizes cimentícias com um teor de adição de 5% apresentaram os melhores resultados, para todas as idades. Esse comportamento pode ser atribuído ao efeito físico da adição, resultando na melhoria no empacotamento das partículas, como confirmado nos ensaios de densidade e porosidade aparentes. A maior compactidade do material e, consequente, aumento da densidade é resultado do preenchimento dos vazios entre os grãos de areia e entre os produtos de hidratação do cimento pelas partículas do resíduo (efeito filer).

Além disso, a presença das fibras mistas (fibras de poliéster, de vidro e metálicas) provavelmente contribuiu para o aumento na resistência à tração na flexão observado na matriz cimentícia com 5% de PR. Esse comportamento pode ser explicado pela capacidade das fibras de entrelaçar os produtos de hidratação do cimento e dissipar energia, o que dificulta a propagação de microfissuras e, consequentemente, aumenta a resistência à tração na flexão [24].

Observa-se, no entanto, que para as composições contendo 10% e 15% de PR há uma redução na resistência mecânica, o que está associado à redução da plasticidade observada nos ensaios de reologia. Devido à maior dificuldade em dispersar adequadamente as partículas, formaram-se aglomerados, o que dificultou a moldagem dos corpos de prova, proporcionando aumento na porosidade. Segundo CASTRO e PANDOLFELLI [47], a formação de aglomerados pode alterar a curva granulométrica prevista inicialmente, com consequente aumento do diâmetro mínimo efetivo da composição e diminuição da compactidade, com prejuízo do desempenho mecânico pela formação dos aglomerados, que equivalem a partículas vazias e que originam poros na microestrutura.

3.3 Análise do tempo de pega de pastas de cimento

Na Figura 10 observa-se que a adição de pó de retífica ao cimento CP V ARI retarda o início e fim de pega das matrizes cimentícias. Para os teores de adição iguais a 5%, 10% e 15%, houve aumentos de 36,57%, 68,98% e 101,39%, respectivamente, no tempo de início de pega e aumentos de 6,19%, 30,97% e 89,38%, respectivamente, no tempo de fim de pega, medido por meio da agulha de Vicat.

O retardo observado nos tempos de início e fim de pega pode ser atribuído à presença dos óxidos de zinco (ZnO) e de cobre (CuO) e a resina fenólica, presentes no PR e que atuam como retardadores de pega, conforme discutido na revisão de literatura.

A adição do pó de retífica promoveu um aumento no tempo de fim de pega do cimento Portland. Isso ocorre devido à presença de óxido de zinco (ZnO) e de cobre (CuO) no pó de retífica, possivelmente responsáveis pela precipitação de camada amorfa de Zn(OH)_2 e de Cu(OH)_2 , respectivamente, de baixa permeabilidade e solubilidade, que bloqueiam a hidratação do C_3S , retardando, assim, a pega do cimento. A presença de resinas fenólicas no PR também contribui para este retardo, já que, durante a hidratação, são adsorvidas nas partículas de cimento e, assim, dificultam o transporte de água e a difusão de íons cálcio.

Assim, observa-se que o pó de retífica, além de atuar como eficiente retardador de pega, não influencia significativamente nas propriedades das matrizes cimentícias, quando adicionado até o teor de 5%, sendo tecnicamente viável sua incorporação.

4. Conclusões

A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O pó de retífica é classificado como resíduo não perigoso não inerte (Classe II-A);
- A adição do pó de retífica promove um aumento nos tempos de início e fim de pega do cimento Portland, devido à presença dos óxidos de zinco (ZnO) e de cobre (CuO), além da resina fenólica;
- A adição do pó de retífica influencia na reologia das matrizes cimentícias, aumentando a sua viscosidade e tensão de escoamento, pois as partículas e as fibras do resíduo perturbam as linhas de fluxo e promovem uma maior rigidez na estrutura espacial de partículas;
- A adição de até 5% de pó de retífica resultou em uma diminuição na porosidade e um aumento na densidade das matrizes cimentícias estudadas devido ao preenchimento de poros. Contudo, devido à perda de plasticidade e a consequente dificuldade de moldagem, provenientes de uma menor relação água/materiais secos, as misturas com 10% e 15% de PR apresentaram maiores porosidades e menores densidades;
- Houve diminuição do coeficiente de absorção capilar com a adição de 5% do resíduo, comportamento este justificado pelo tamponamento de poros pelas partículas do resíduo;
- A adição do resíduo até 5% contribuiu para o aumento da resistência à tração na flexão e à compressão axial devido ao melhor empacotamento das partículas, visto que o pó de retífica preenche os vazios existentes na matriz no estado endurecido, e devido a presença de fibras mistas que entrelaçam

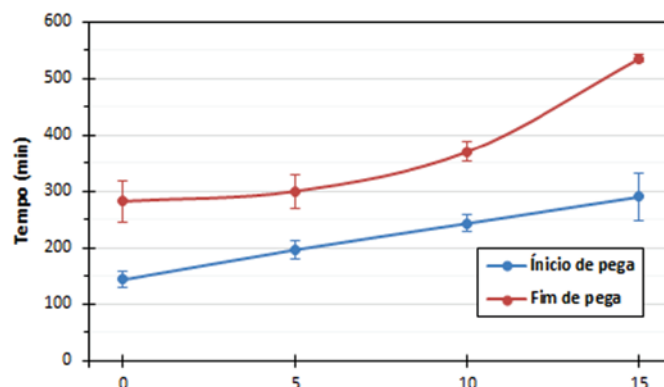


Figura 10

Variação do tempo de pega das pastas de cimento em função do teor de pó de retífica adicionado, utilizando o cimento CP V-ARI

os produtos de hidratação e dissipam energia, dificultando a propagação de microfissuras;

- A queda na resistência verificada para os teores de 10% e 15% do resíduo em relação às composições contendo 5% de adição pode ser decorrente da formação de aglomerados de partículas do resíduo na matriz, o que pode ser compensado com o uso de dispersantes;
- Observa-se que o pó de retífica é um eficaz retardador de pega do cimento. No entanto, são necessários estudos para melhorar a dispersão do material na matriz cimentícia, visto que foi observada a formação de aglomerados com maiores teores de adição, o que impactou nos resultados de propriedades físicas e mecânicas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Bahia (PPEC/UFBA), ao Centro Tecnológico da Argamassa (CETA) e à ZF Sachs do Brasil Ltda.

6. Referências

- [1] DEMAJOROVIC, J. A evolução dos modelos de gestão de resíduos sólidos e seus instrumentos. Cadernos FUNDAP, 1996. Disponível em: <<http://web-resol.org/textos/demajorovic.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2016.
- [2] RIBEIRO, D.V. Influência da adição do pó de retífica em uma matriz de cimento de fosfato de magnésio. 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.
- [3] THOMPSON, J.; ANTHONY, H. The Health Effects of Waste Incinerators. 4th Report of the British Society for Ecological Medicine. Second Edition, 2008.
- [4] RIBEIRO, D.V.; MORELLI, M.R. Performance analysis of

- magnesium phosphate cement mortar containing grinding dust. *Materials Research*, v.12, p. 51-56, 2009.
- [5] RIBEIRO, D.V.; MORELLI, M.R. Influence of the addition of grinding dust to a magnesium phosphate cement matrix. *Construction and Building Materials*, v.23, p. 3094-3102, 2009.
 - [6] RIBEIRO, D.V.; AGNELLI, J.A.M.; MORELLI, M.R. Study of mechanical properties and durability of magnesium phosphate cement matrix containing grinding dust. *Materials Research*, v.16, p. 1113-1121, 2013.
 - [7] ARLIGUIE G.; GRANDET J. Etude de l'effet retardateur du zinc sur l'hydratation de la patê de ciment Portland. *Cement and Concrete Research*, v.12, p. 79-86, 1982.
 - [8] HAMILTON, I.W.; SAMMES, N.M. Encapsulation of steel foundry bag house dusts in cement mortar. *Cement and Concrete Research*, v.29, n.1, p. 55-61, 1999.
 - [9] OLMO, I.F.; CHACON, E.; IRABIEN, A. Influence of lead, zinc, iron (III) and chromium (III) oxides on the setting time and strength development of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, v.31, n.8, p. 1213-1219, 2001.
 - [10] LI, X. D.; ZHANG, Y. M.; POON, C. S.; LO, I. M. C. Study of zinc in cementitious material stabilized/solidified wastes by sequential chemical extraction and microstructural analysis. *Chemical Speciation and Bioavailability*, v. 13, p 1-7, 2001.
 - [11] YOUSUF, M.; MOLLAH, A.; VEMPATI, R.K.; LIN, T.C.; COCKE, D.L. The interfacial chemistry of solidification/stabilization of metals in cement and pozzolanic material systems. *Waste Management*, v.15, p. 137-148, 1995.
 - [12] ASAVAPISIT, S.; FOWLER, G.; CHEESEMAN, C.R. Solution chemistry during cement hydration in the presence of metal hydroxide wastes. *Cement and Concrete Research*, v.27, p. 1249-1260, 1997.
 - [13] STEPHAN, D.; MALEKI, H.; KNOFEL, D.; EBER, B.; HARDTL, R. Influence of Cr, Ni, and Zn on the properties of pure clinker phases part I. C3S. *Cement and Concrete Research*, v.29, p. 545-552, 1999.
 - [14] TREZZA, M.A. Hydration study of ordinary Portland cement in the presence of zinc ions. *Materials Research*, v.10, p. 331-334, 2007.
 - [15] WEEKS, C.; HAND, R.J.; SHARP, J.H. Retardation of cement hydration caused by heavy metals present in ISF slag used as aggregate. *Cement and Concrete Composites*, v.30, p. 970-978, 2008.
 - [16] ATAIE, F. F.; JUENGER, M. C. G.; TAYLOR-LANGE, S. C.; RIDING, K. A. Comparison of the retarding mechanisms of zinc oxide and sucrose on cement hydration and interactions with supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 72, p 128-136, 2015.
 - [17] TASHIRO, C.; TAKAHASHI, H.; KANAYA, M.; HIRAKIDA, I.; YOSHIDA, R. Hardening Property of Cement Mortar Adding Heavy Metal Compound and Solubility of Heavy Metal from Hardened Mortar. *Cement and Concrete Research*, v. 7, p. 283-290, 1977.
 - [18] TASHIRO, C.; TATIBANA, S. Bond strength between C3S paste and iron, copper or zinc wire and microstructure of interface. *Cement and Concrete Research*, v. 13, p. 377-382, 1983.
 - [19] WILDING, C. R.; WALTER, A.; DOUBLE, D. D. A Classification of Inorganic and Organic Admixtures by Conduction Calorimetry. *Cement and Concrete Research*, v. 14, p. 185-194, 1984.
 - [20] KAKALI, G.; TSIVILIS, S.; TSIALTAS, A. Hydration of Ordinary Portland Cements Made from Raw Mix Containing Transition Element Oxides. *Cement and Concrete Research*, v. 28, p. 335-340, 1998.
 - [21] DOUBLE, D. D. New developments in understanding the chemistry of cement hydration. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, v. 310, p. 53-66, 1983.
 - [22] NELSON, E.B.; BARET, J; MICHAUX, M. Cement Additives and Mechanisms of Action. *Developments in Petroleum Science*, v.28, p. 3-1-3-37, 1990.
 - [23] SIMÕES, T.; COSTA, H.; DIAS-DA-COSTA, D.; JÚLIO, E. Influence of type and dosage of micro-fibres on the physical properties of fibre reinforced mortar matrixes. *Construction and Building Materials*, v. 187, p. 1277-1285, 2018.
 - [24] SIVAKUMAR, A.; SANTHANAM, M. Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, p. 603-608, 2007.
 - [25] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. - NBR 10005, Rio de Janeiro, 2004.
 - [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. - NBR 10006, Rio de Janeiro, 2004.
 - [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Resíduos sólidos – Classificação. - NBR 10004, Rio de Janeiro, 2004.
 - [28] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. - NBR 13276, Rio de Janeiro, 2005.
 - [29] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos – Caracterização reológica pelo método squeeze-flow. - NBR 15839, Rio de Janeiro, 2010.
 - [30] BETIOLI, A.M.; JOHN, V.M.; GLEIZE, P.J.P.; PILEGGI, R.G. Caracterização reológica de pasta cimentícia: associação de técnicas complementares. *Ambiente Construído*, v. 9, p. 37-48, 2009.
 - [31] VIKAN, H.; JACOBSEN, S. Influence of rheology on the pumpability of mortar. In: SINTEF Building and Infrastructure. COIN Project report 21, 2010;
 - [32] LIU, Z.; HONG, J.; LIU, J. Rheological Behavior of Fresh Cement Asphalt Mortar. *Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Construction Materials: Design, Performance, and Application*. Sustainable Construction Materials. Wuhan, China, 2012;
 - [33] ANDRADE NETO, J. S; SILVA, V. S. Influência da sequência de mistura nas propriedades de argamassas industrializadas. In: anais eletrônicos do XII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. São Paulo, 2017.
 - [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. - NBR 13279, Rio de Janeiro, 2005.
 - [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da

- absorção de água por capilaridade. - NBR 9779, Rio de Janeiro, 2012.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. - NBR NM 65, Rio de Janeiro, 2003.
- [37] PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; GALLO, J.; PANDOLFELLI, V. C. How Mixing Affects the Rheology of Refractory Castables - Part II. American Ceramic Society Bulletin, v. 80, p 27-31, 2001.
- [38] YANG, M.; JENNINGS, H. M. Influences of Mixing Methods on the Microstructure and Rheological Behavior of Cement Paste. Advanced Cement Based Materials, v.2, p 70-78, 1995.
- [39] CASTRO, A. L.; LIBORIO, J. B. L.; PANDOLFELLI, V. C. Reologia de concretos de alto desempenho aplicados na construção civil – Revisão. Cerâmica, v.57, p 63-75, 2011.
- [40] FRANÇA, M. S.; CARDOSO, F. A.; PILEGGI, R. G. Influence of the addition sequence of PVA-fibers and water on mixing and rheological behavior of mortars. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, v. 9, no. 2, p. 226 – 243, 2016.
- [41] CAO, Q.; CHENG, Y.; CAO, M.; GAO, Q. Workability, strength and shrinkage of fiber reinforced expansive self-consolidating concrete. Construction and Building Materials, v. 131, p. 178-185, 2017.
- [42] AKCAY, B.; TASDEMIR, M. A. Mechanical behavior and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. Construction and Building Materials, v. 28, p. 287-293, 2012.
- [43] OLIVEIRA, R.I.; STUDART, A.R.; PILEGGI, R.G.; PANDOLFELLI, V.C. Dispersão e Empacotamento de Partículas. Princípios e aplicações em processamento cerâmico. São Paulo: Ed. Fazendo Arte Editorial, 2000, 195 p.
- [44] RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. S.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Rheological properties and hydration behavior of Portland cement mortars containing calcined red mud. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 40, p 557-566, 2013
- [45] MENG, B. Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters. Materials and Structure, v.27, p. 125-134, 1994.
- [46] RIBEIRO, D. V. Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. In: RIBEIRO, D. V. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. 1ª edição, Elsevier, Rio de Janeiro, 2014, p. 75-85.
- [47] CASTRO, A.L.; PANDOLFELLI, V.C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. Cerâmica, v.55, p. 18-32, 2009.

7. ANEXO

A Tabela 5, com os resultados ANOVA, valida as informações apresentadas ao longo do artigo, em relação as análises estatísticas, e foi adicionado de forma a auxiliar os revisores no processo de avaliação, não fazendo parte do artigo.

Tabela 5

ANOVA dos resultados avaliando a influência do pó de retífica nas propriedades das matrizes cimentícias

Propriedade	SQ	GL	MQ	F	Valor p	F _c	Efeito significativo
Início de pega	23330,67	3	7776,89	9,70	0,0048	4,07	Sim
Fim de pega	82292,25	3	27430,75	19,71	0,0004	4,07	Sim
Índice de consistência	9081,67	3	3027,22	370,68	0,0000	4,07	Sim
Tensão de escoamento (20 min)	368,04	3	122,69	117,83	0,0000	4,07	Sim
Tensão de escoamento (60 min)	764,60	3	254,87	161,82	0,0000	4,07	Sim
Viscosidade plástica (20 min)	0,05	2	0,02	10,92	0,0150	5,79	Sim
Viscosidade plástica (60 min)	0,69	3	0,23	76,00	0,0000	4,07	Sim
Densidade	0,00038	3	0,00013	5,03	0,0222	3,71	Sim
Porosidade	12,39	3	4,129	8,01	0,0020	3,29	Sim
Coefficiente de absorção	0,01	3	0,01	7,57	0,0262	5,41	Sim
Altura de ascensão capilar	37,42	3	12,47	395,74	0,0000	2,79	Sim
Resistência à tração na flexão – 3 dias	4,80	3	1,60	24,74	0,0000	3,49	Sim
Resistência à tração na flexão – 7 dias	12,96	3	4,32	19,78	0,0000	3,41	Sim
Resistência à tração na flexão – 28 dias	8,32	3	2,77	13,31	0,0003	3,41	Sim
Resistência à compressão axial – 3 dias	67,44	3	22,48	7,12	0,0005	2,81	Sim
Resistência à compressão axial – 7 dias	37,72	3	12,57	11,40	0,0002	3,13	Sim
Resistência à compressão axial – 28 dias	65,67	3	21,89	6,28	0,0027	3,01	Sim

Nota: SQ – Soma quadrada; GL – Graus de liberdade; MQ – Média quadrada; F – Valor calculado de F; Valor p – nível de significância; F_c – F crítico; Se P < 5% e F_c < F o valor é significativo, considerando o intervalo de confiança de 95%.