XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

PÓ DE RESÍDUO MISTO DE CONSTRUÇÃO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR: ESTUDO EM PASTAS EMPACOTADAS

Mixed construction waste powder as a supplementary cementitious material: study in packaged pastes

Dayana Ruth Bola Oliveira
Universidade Federal do Paraná | Foz do Iguaçu | Brasil | dayruth@gmail.com
Melissa Pastorini Proença
Instituto Federal do Paraná e Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | melissa.proenca@ifpr.edu.br
José Marques Filho
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | jmarquesfilho@gmail.com
Edna Possan
Universidade Federal da Integração Latino-Americana | Foz do Iguaçu | Brasil | epossan@gmail.com

Resumo
Neste estudo avaliou-se a substituição de cimento Portland por RMF (pó de resíduo misto de construção e demolição - ϕ <0,15 mm) calcinado a 800 °C por 0, 0,5, 1, 2 e 3 hs. Os teores de substituição foram definidos pelo empacotamento de partículas, com avaliação da resistência à compressão em pastas aos 28 dias. Foram obtidas resistências superiores à referência com 25% de RMF, sendo 17% in natura e 8% calcinado por 1 e 2 horas. Constatou-se potencial de substituição do cimento pelo RMF, que atua como material de enchimento, trazendo contribuição para pesquisas futuras em outras matrizes cimentícias.

Palavras-chave: Cimento Ecoeficiente. Aproveitamento de Resíduo. Empacotamento de partículas.

Abstract
This study evaluated the replacement of Portland cement by RMF (mixed construction and demolition waste powder - <0.15 mm) calcined at 800 °C for 0, 0.5, 1, 2 and 3 h. The substitution levels were defined by particle packing, with evaluation of the compressive strength in pastes at 28 days. Higher strengths than the reference were obtained with 25% of RMF, 17% in natura and 8% calcined for 1 and 2 hours. The potential for cement replacement by RMF, which acts as a filler material, was verified, bringing contribution to future research in other cement matrices.

Keywords: Ecoefficient Cement. Residue Utilization. Particle packing.

Como citar:
OLIVEIRA, D. R. B.; PROENÇA, M. P.; POSSAN, E. Pó de resíduo misto de construção como material cimentício suplementar: estudo em pastas empacotadas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022, Canela. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1-14.

INTRODUÇÃO

Um ponto associado às questões ambientais na construção civil é a geração de resíduos de construção e demolição (RCD), segundo a ABRELPE [1] no ano de 2021, foram coletados $128x10^6$ kg/dia de RCD em municípios brasileiros. Devido aos problemas ambientais ocasionados pelo manejo inadequado e pela grande quantidade de resíduos gerados, as estratégias de desenvolvimento sustentável devem promover a economia circular do RCD [2, 3], propiciando o correto manejo e aproveitamento para retorno à cadeia produtiva.

Inúmeros estudos da literatura mostram que esse resíduo pode retornar à cadeia da construção, como agregados reciclados de RCD em substituição parcial ou total a agregados naturais [4, 5], tendo-se geralmente preferência pelo emprego de agregados graúdos. Cabe ressaltar que no processamento do agregado reciclado é gerado em torno de 50% de agregado miúdo e 10% de pó [6], sendo importante que sejam valorados para o completo aproveitamento do RCD [7]. Pesquisas recentes mostram que, a partir de tratamentos mecânicos (peneiramento e moagem) e químicos (calcinação, CO_2, entre outros) partículas de RCD com dimensão inferior a 0,15 mm, podem ser empregadas como material cimentício suplementar (MCS) ou material de enchimento nas composições de matrizes cimentícias [8-10].

O uso do pó de RCD como MCS corrobora as demandas da indústria cimenteira, que há décadas é desafiada quanto à redução da carga ambiental relacionada ao seu processo produtivo [11, 12], uma vez que a produção do cimento Portland demanda elevado consumo de energia e matéria-prima, liberando gases poluentes, principalmente CO_2 e materiais particulados. No panorama de emissões de CO_2 originárias dos processos industriais, a indústria cimenteira corresponde a 7% do total global, sendo 60% a 70% decorrentes da fabricação do clínquer e 30% a 40% da queima de combustíveis fósseis [13, 14]. Para se produzir uma tonelada de clínquer são necessárias 1,15 toneladas de calcário, liberando apenas na descarbonatação em torno de 510 kg de CO_2 [15].

A redução das emissões de CO_2 é considerada uma das principais medidas para reduzir as emissões diretas da indústria cimenteira brasileira de uma média atual de 564 kg de CO_2/ton de cimento, para 375 kg de CO_2/ton em 2050. A eficiência energética, a captura e armazenamento de carbono, o uso de combustíveis alternativos e a substituição de clínquer por adições ou materiais cimentícios suplementares (MCS), são as principais alternativas tecnológicas aplicáveis ao setor [16]. Há projeção de que o uso de MCS tenha a maior contribuição (69%) no potencial de redução das emissões [17].

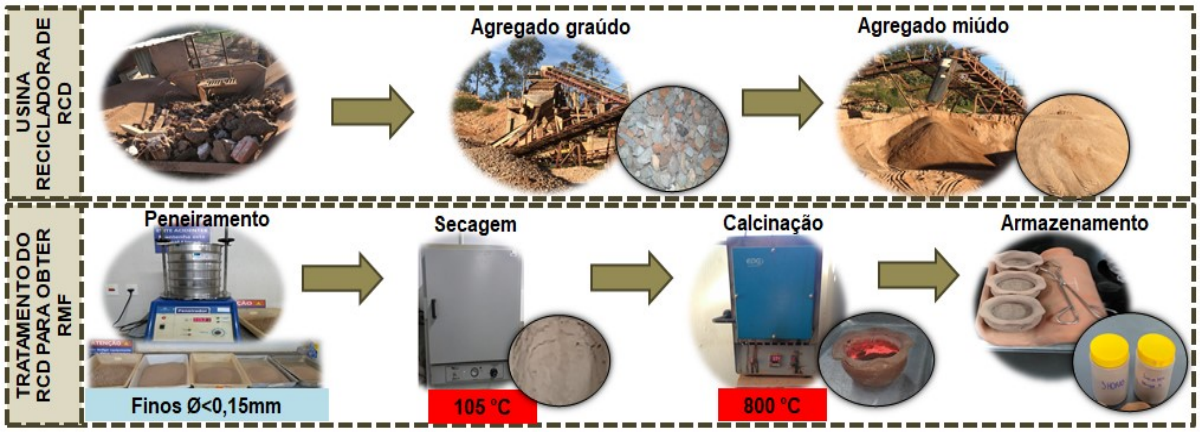
Neste contexto, este estudo objetiva avaliar a aplicação de finos de resíduos mistos de RCD (RMF) (partículas inferiores a 0,15 mm), com e sem tratamento térmico como MCS. Os diferentes teores de substituição foram definidos considerado o empacotamento de partículas para a combinação de resíduos *in natura* e calcinados, com análise da resistência à compressão axial de pastas aos 28 dias.

MATERIAIS

Na produção das pastas utilizou-se cimento Portland comum (CP-I-S-40), conforme NBR 16697 [18], devido ao menor teor de adições. Para a composição das pastas empacotadas empregou-se aditivo superplastificante, tipo SP II, com massa específica entre 1,080 – 1,120 g/cm³.

Os resíduos mistos finos (RMF) utilizados foram disponibilizados por central recicladora, em granulometria de agregado miúdo, oriundo do processo de britagem de RCD "Classe A" misto, constituído majoritariamente por materiais cerâmicos, argamassas e concretos. Para obtenção de granulometria desejada do RMF (<0,15 mm) realizou-se separação granulométrica por peneiramento mecânico. Os finos obtidos no peneiramento passaram por processo de secagem em estufa por 24 horas a 100 °C, e calcinação a 800 °C em mufla, pelos períodos de 0,5, 1, 2 e 3 horas gerando os materiais: RMF-0,5; RMF-1; RMF-2 e RMF-3, e o RMF-0 (material *in natura*) (Figura 1). A temperatura de calcinação foi determinada pela análise termogravimétrica (Figuras 7 e 8).

Figura 1: Processos de tratamento mecânico e térmico do RMF



Fonte: As autoras.

MÉTODO

Após o peneiramento e tratamento térmico dos resíduos, fez-se a caracterização físico-química dos resíduos e do cimento Portland. Foram conduzidos estudos em pasta para a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP), do teor de aditivo e da resistência à compressão. Todas as pastas foram produzidas tendo como procedimento padrão a mistura manual por 60 segundos, seguida de mistura mecânica por 120 segundos em misturador mecânico (Fisatom 713D) a 1600 RPM.

O cimento e o pó de RCD (RMF-0; RMF-0,5; RMF-1; RMF-2 e RMF-3), passaram por determinação das massas específicas conforme NBR 16605 [19]. A análise de granulometria por difração a laser foi conduzida no equipamento Bettersizer S3 Plus. A absorção de água dos finos foi determinada conforme Oliveira [20], adaptado da NBR NM 30 [21]. Para tal, realizou-se aspersão de água nos finos (com umidade e massa inicial conhecida), homogeneizando e aguardando 15 minutos, para verificação da condição de superfície saturada seca com o cone de Kantro. Alcançada

tal condição, as amostras foram dispostas em estufa até constância de massa, sendo assim possível determinar a água absorvida pelas partículas.

A caracterização semiquantitativa da composição química foi realizada por espectrometria por fluorescência de Raio-X (FRX) em espectrômetro Panalytical Axios Max. A análise mineralógica por difração de raios-X (DRX) foi realizada no difratrômetro da marca Panalytical, com radiação Cu Kα e λ = 1,5418 Å. As análises termogravimétricas foram conduzidas no equipamento Percking Elmer – STA 8000, em cadinho aberto de alumina, utilizando-se aproximadamente 50 mg de massa de amostra, pré-tratadas no equipamento em processo isotérmico à 30 °C durante uma hora, evitando influência de água residual não reagida, aplicou-se fluxo de nitrogênio de 30mL.min^{-1}, no intervalo de aquecimento de 30 °C a 1000 °C e taxa de aquecimento do equipamento de 10 °C.min^{-1}.

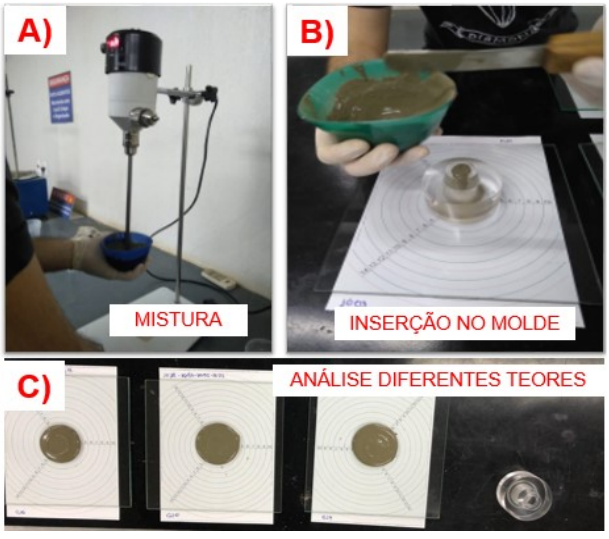
ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA (IAP)

Realizou-se a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) dos resíduos mistos finos *in natura* e calcinados, avaliando-se o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias [22] e a atividade pozolânica com cal aos 7 dias [23].

TEOR DE SATURAÇÃO DE ADITIVO

A análise do teor de saturação de aditivo foi desenvolvida pelo método do cone de Kantro, usando um molde tronco cônico em acrílico, com base de 40 mm de diâmetro, parte superior com 20 mm de diâmetro e 60 mm de altura. Foram produzidas pastas de 80 gramas de material sólido com CP-I-40-S, RMF-0 e RMF-1, (Figura 2 A). Com a pasta pronta, executa-se o preenchimento do cone (Figura 2 B) sobre uma placa de vidro, onde mede-se dois diâmetros do espalhamento da pasta após remoção do molde, nos tempos 30 e 60 minutos, conforme Figura 2 C, execução do ensaio com diferentes teores.

Figura 2: A – Mistura mecânica; B - Inserção no molde; C – Análise de diferentes teores de aditivo superplastificante



Fonte: As autoras.

Foram testados teores de relação água finos (a/f) para realização do ensaio, sendo adotado para o CPI-S-40 a relação a/f de 0,40, e para o RMF a relação a/f de 0,70. Para o aditivo superplastificante foram analisados os teores de 0,0%, 0,3%, 0,6%, 0,9%, 1,2%, 1,5%, 1,8% e 2,1% (recomendação do fabricante entre 0,3% a 2,0%).

EMPACOTAMENTO DE PARTÍCULAS

Para a determinação do empacotamento de partículas foram utilizados o método experimental Wong e Kwan [24], e o analítico *Compressible Packing Model* (CPM) De Larrard [25]. No método experimental as análises foram realizadas separadamente para cada material sólido, variando-se as relações a/f (água/finos) de 0,06 a 0,12 para o cimento, de 0,18 a 0,25 para o RMF-0, RMF-0,5, RMF-1 e RMF-2 e de 0,17 a 0,25 para o RMF-3. O procedimento consistiu na produção da pasta (Figura 3 A e B), que é vertida em molde (Figura 3 C) e adensada em mesa de consistência com 10 quedas tomando-se a massa do conjunto (Figura 3 D).

Figura 3: A – Mistura manual; B – Mistura mecânica; C – Inserção no molde; D – Pesagem



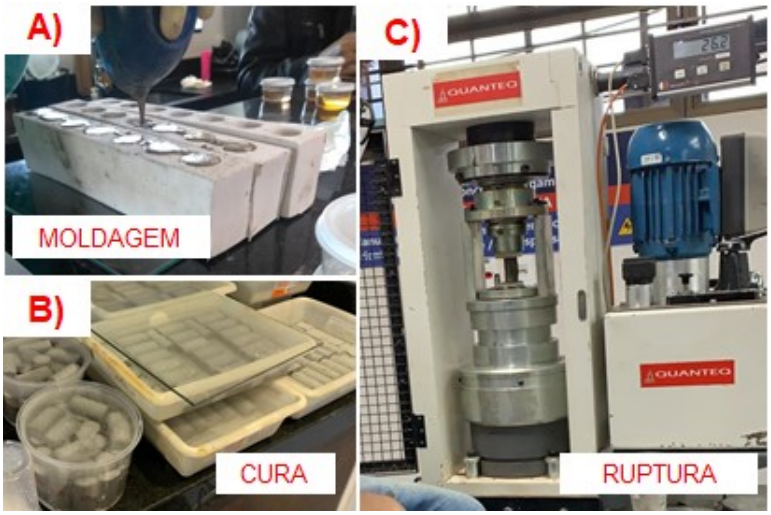
Fonte: As autoras.

Após a definição dos empacotamentos individuais para o método Wong e Kwan [24] de forma experimental, realizou-se a determinação do empacotamento analítico, através do modelo proposto por De Larrard [25]. A determinação analítica, deu-se a partir de combinações de três materiais finos (exemplo: cimento + RMF-0 + RMF-2), contendo em todas as análises o cimento e o resíduo in natura (RMF-0), variando teores de materiais de substituição do cimento de 0 a 65%, em intervalos de 2,5%. As 22 misturas com maior densidade de empacotamento dentro das faixas de substituição de 7, 15, 25, 35, 45, 55 e 65% de cimento pelos finos de RMF estão apresentadas nos resultados (Tabela 4).

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para a análise de resistência à compressão foram moldados 7 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 25x50 mm (Figura 4 A), dispostos em cura submersa em água com cal até data de ruptura (Figura 4 B). A determinação de resistência à compressão (Figura 4 C) foi realizada em prensa hidráulica servo controlada (Modelo Intermetric CT 201.C). A face superior das amostras foi retificada em equipamento adaptado para amostras de pequenas dimensões.

Figura 4: A – Moldagem dos corpos de prova; B- Cura; C- Ruptura dos corpos de prova



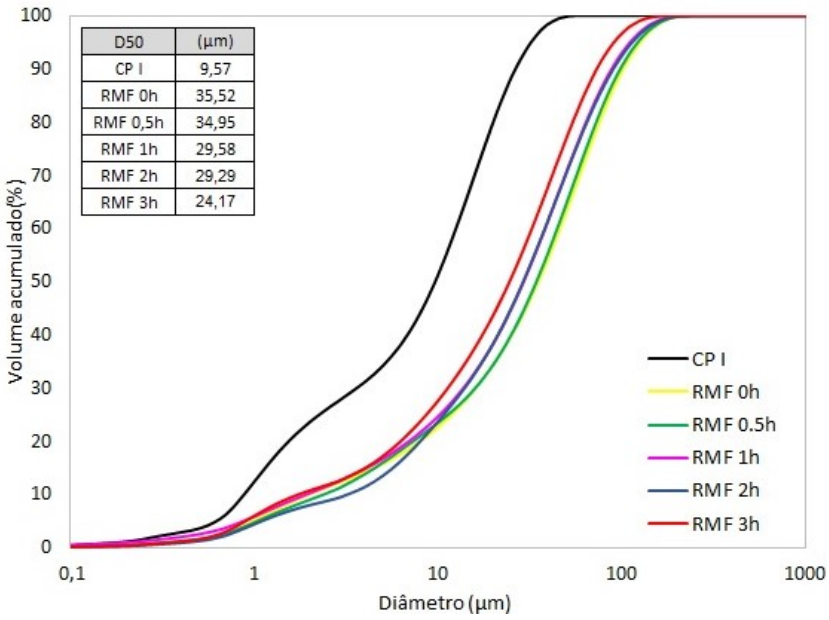
Fonte: As autoras.

RESULTADOS

CARACTERIZAÇÃO DOS PÓS

A análise granulométrica indica uma pequena redução do diâmetro médio das partículas do RMF conforme o aumento do tempo de calcinação (Figura 5), as quais possuem dimensões superiores às partículas do cimento Portland.

Figura 5: Curvas granulométricas e D_{50} do cimento Portland e pós de RCD



Fonte: As autoras.

Na Tabela 1 verifica-se que o período de calcinação eleva a massa específica e a absorção de água do RMF. A alta absorção de água nos finos de RCD é uma característica prejudicial a sua incorporação nas matrizes cimentícias, pois eleva a demanda água para que seja mantida a trabalhabilidade, promovendo redução da resistência à compressão [26, 27]. A substituição do cimento pelos finos deve

considerar a finura e proporção adequada, reduzindo a porosidade das matrizes e consequentemente a absorção de água [26].

Tabela 1: Massa específica e Absorção de água dos materiais

Material	RMF-0	RMF-0,5	RMF-1	RMF-2	RMF-3	CP-I-S-40
g/cm³	2,46	2,70	2,74	2,83	2,92	3,23
Absorção	20,01%	21,72%	28,23%	33,41%	36,13%	_

Fonte: As autoras.

Na espectrometria por fluorescência de Raio-X (FRX) (Tabela 2), observa-se a na composição do RMF maior presença de sílica e óxido de cálcio, também apresentam pequenas quantidade de óxidos de ferro, alumínio, magnésio e trióxido de enxofre, e outros em menores quantidades.

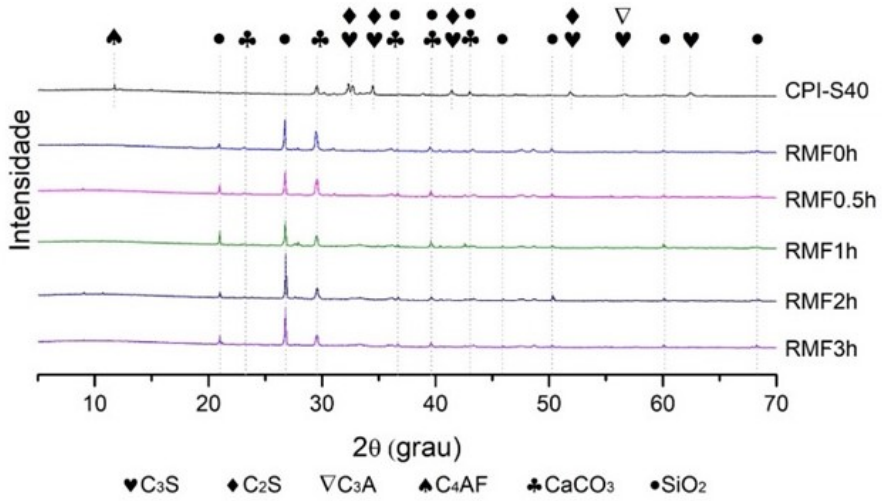
Tabela 2: Fluorescência de Raio-X nos finos

Material	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	Na_2O	TiO_2	K_2O	SO_3	MnO	P. F.
CPI	13,5	64,1	0,3	2,9	3,1	0,0	0,1	1,1	6,5	0,0	8,3
RMF-0	29,7	40,7	1,2	13,9	4,1	0,0	0,9	0,5	4,8	0,0	4,2
RMF-0,5	30,3	45,0	1,4	11,2	0,0	0,0	1,2	0,5	5,0	0,0	5,5
RMF-1	29,8	40,9	1,2	13,4	3,8	0,0	0,9	0,6	4,7	0,0	4,7
RMF-2	31,4	41,9	1,1	12,2	3,9	0,0	1,0	0,5	3,8	0,0	4,2
RMF-3	31,7	41,0	1,1	12,9	3,8	0,0	0,9	0,5	3,7	0,0	4,3

Fonte: As autoras.

Pela difração e Raio-X (Figura 6) constata-se forte presença de sílica na composição do RMF e carbonato de cálcio devido a origem mista do resíduo de construção, tanto materiais cerâmicos, como resíduos de matrizes cimentícias (concretos e argamassas) em geral, e que o período de calcinação maior promove redução no pico do $CaCO_3$.

Figura 6: Difratogramas do cimento Portland e dos pós de RCD



Fonte: As autoras.

Pela análise termogravimétrica (Figuras 7 e 8), observam-se as maiores perdas de massa no RMF-0 e o RMF-0,5, sendo 21,60% e 14,76% respectivamente, os demais finos RMF-1, RMF-2, RMF-3, CP-II-F-32 e CP-I-S-40, ficam com perdas entre 10,49% e 3,42%. Na Figura 8, identificaram-se quatro picos de variação de massa presentes nesses materiais.

Figura 7: TG cimento e dos RMFs

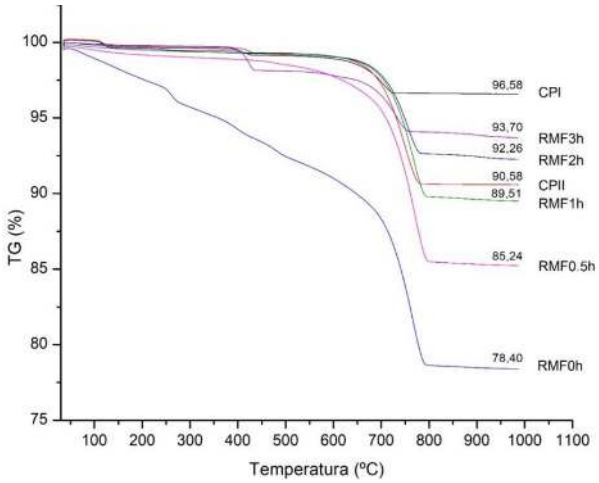
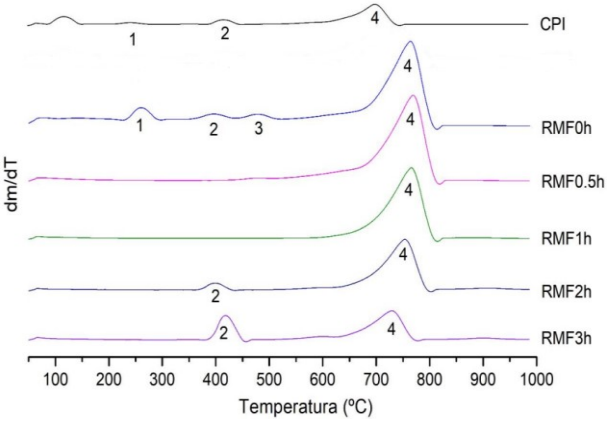


Figura 8: DTG cimento e dos RMFs



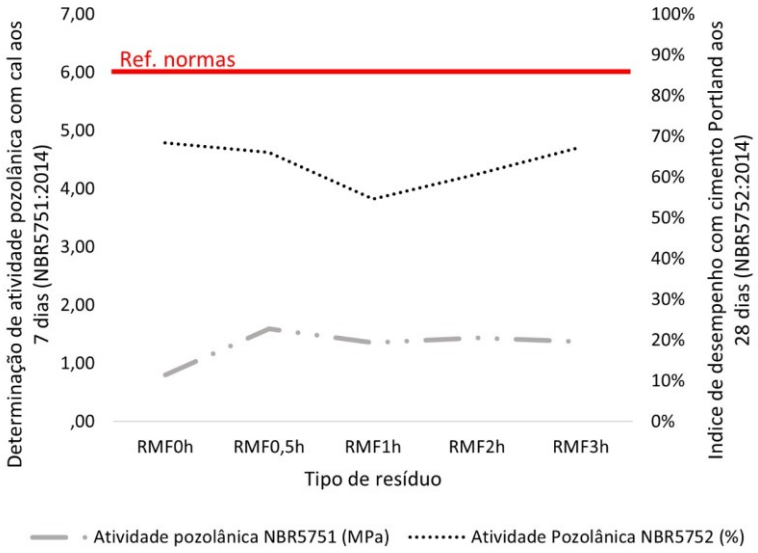
Fonte: As autoras.

Verifica-se a ocorrência de um pequeno pico sem identificação numérica no cimento (Figura 8), podendo ser devido a uma hidratação precoce, relacionada ao armazenamento [28]. No pico 1 (200 °C a 380 °C) tem-se a liberação de água de outras fases hidratadas. A desidroxilação do $Ca(OH)_2$, ocorre entre 380 °C a 500 °C, podendo variar o ponto de início dependendo da cristalinidade, correspondendo aos picos 2 e 3 das curvas [29]. O pico 4 (600 °C a 800 °C) deve-se à decomposição dos carbonatos e formação de óxidos [29]. Observa-se que os picos do RMF-0, RMF-0,5 e RMF-1 são mais acentuados, apresentando maior perda de massa, devido à presença de maiores quantidades de carbonato de cálcio conforme análise de DRX (Figura 6), o que também foi observado por Mazurana [30].

Constata-se que à temperatura de 800 °C tem-se a maior perda de massa do resíduo misto de RCD, sendo a adotada para o tratamento térmico dos pós. Vasconcelos e Rêgo [31], analisando os efeitos da temperatura de calcinação de argilas empregadas como MCS, obtiveram uma maior reatividade na argila calcinada a 800 °C, para a argila in natura em 628 °C inicia-se a desidroxilação (perda de grupos OH, ocorrendo formação de óxidos de alumínio, magnésio e silício) finalizada a 741,8 °C, condição que a torna reativa [32].

Na análise de atividade pozolânica (IAP) do material (Figura 9), observa-se que no desempenho com cimento a calcinação não promoveu valores significativos na atividade pozolânica do resíduo em relação ao RMF *in natura*. Já na resistência média com a cal, o resíduo calcinado por 0,5 horas obteve uma maior resistência comparada aos demais períodos de calcinação.

Figura 9: Análise da pozolanicidade dos RMFs



Fonte: As autoras.

A análise de atividade pozolânica não apresentou resultados que classifiquem o material como pozolânico conforme a NBR 12653 [33]. Logo, seu emprego pode estar mais associado a efeito de preenchimento (empacotamento) que reatividade química na matriz.

ANÁLISE DAS PASTAS EMPACOTADAS

O empacotamento individual de cada material determinado pelo método Wong e Kwan [24], apresentou maior densidade de empacotamento para o RMF-0, com 0,542 e relação a/f de 0,18, sendo apresentado na Tabela 3 os maiores empacotamentos obtidos de forma experimental e a relação a/f necessária.

Tabela 3: Empacotamento ótimo das matérias-primas [24]

Material	CPI	RMF-0	RMF-0,5	RMF-1	RMF-2	RMF-3
Densidade de empacotamento das matérias-primas	0,648	0,542	0,498	0,525	0,501	0,478
a/f	0,07	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18

Fonte: As autoras.

Quanto à determinação do empacotamento real pelo método CPM [25], dentre todas as proporções de misturas analisadas, constatou-se que as misturas com resíduos de calcinados por 0,50 horas apresentam menor empacotamento dentro de uma mesma faixa de substituição, comparado aos demais resíduos. Observa-se um aumento nos valores de empacotamentos em substituições de até 45% geram os maiores empacotamentos. Em geral as misturas com resíduos de 3 horas apresentam os maiores empacotamentos, quando comparado aos demais finos dentro de uma mesma faixa de substituição, podendo ser observados no na Tabela 4 as 22 pastas compostas (T1, T2, T3, [...], T20, T21, T22) e as maiores densidades de empacotamentos reais obtidas para as faixas de substituição de cimento Portland por RMF (0, 7, 15, 25, 35, 45, 55 e 65%) *in natura* e submetidos a quatro diferentes tempos de calcinação (0,5, 1, 2 e 3 horas).

Tabela 4: Misturas empacotadas e resistência à compressão axial aos 28 dias

Mistura	Cimento	RMF[1]	RMF calcinado		Emp.	a/f	SP (%)	fc (MPa)
		(%)	Teor (%)	Tipo	Real (ϕ)			
REF	100	0	0	_	0,598	0,07	0,60	43,22
T1	75	17	8	RMF-0,5	0,621	0,10	0,75	32,39
T2	85	10	5	RMF-0,5	0,612	0,09	0,69	48,75
T3	93	5	3	RMF-0,5	0,604	0,08	0,64	50,49
T4	75	17	8	RMF-1	0,622	0,10	0,75	**58,61**
T5	85	10	5	RMF-1	0,611	0,09	0,69	52,05
T6	93	5	3	RMF-1	0,605	0,08	0,64	51,66
T7	75	17	8	RMF-2	0,623	0,10	0,75	**53,46**
T8	85	10	5	RMF-2	0,613	0,09	0,69	40,48
T9	93	5	3	RMF-2	0,605	0,08	0,64	**61,52**
T10	75	17	8	RMF-3	0,627	0,10	0,75	41,59
T11	85	10	5	RMF-3	0,616	0,09	0,69	48,11
T12	93	5	3	RMF-3	0,606	0,08	0,64	**60,33**
T13	65	23	12	RMF-0,5	0,627	0,11	0,81	42,43
T14	55	30	15	RMF-0,5	0,631	0,12	0,87	29,69
T15	65	23	12	RMF-1	0,628	0,11	0,81	35,53
T16	55	30	15	RMF-1	0,633	0,12	0,87	19,96
T17	65	23	12	RMF-2	0,630	0,11	0,81	40,48
T18	55	30	15	RMF-2	0,635	0,12	0,87	**43,82**
T19[2]	45	37	18	RMF-2	0,63	0,13	0,93	20,63
T20[2]	35	43	22	RMF-2	0,635	0,14	0,99	21,16
T21	65	23	12	RMF-3	0,636	0,11	0,81	28,32
T22	55	30	15	RMF-3	0,641	0,12	0,87	20,68

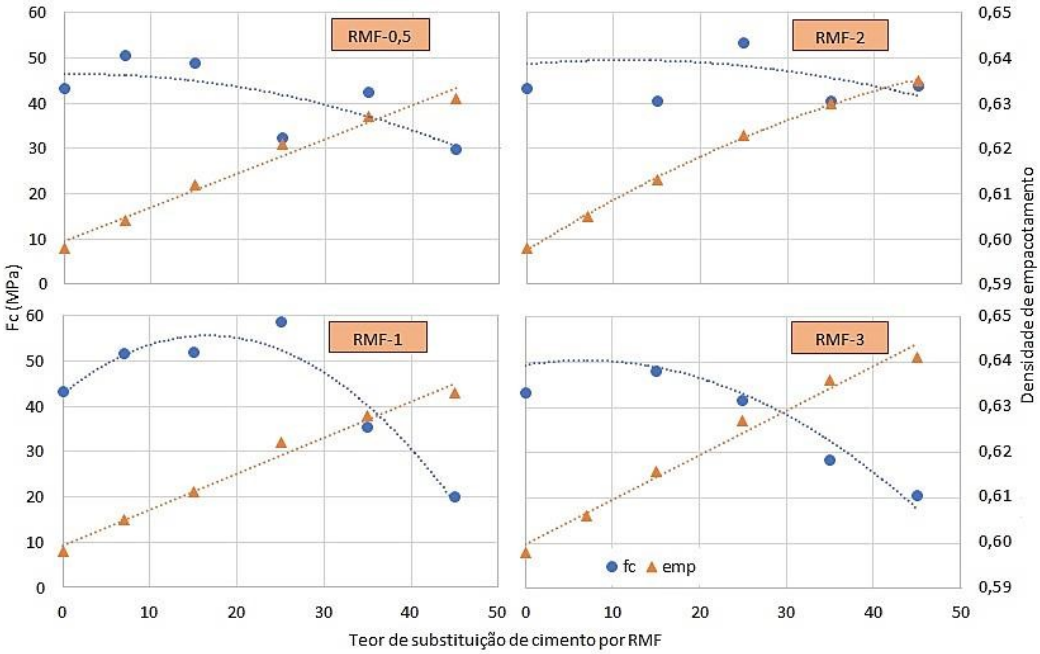
[1)] RMF – resíduo misto fino in natura (não calcinado) passante na malha 0,150 mm. [2)] Misturas com teores máximos de substituição de cimento Portland por RMF. Onde: fc= resistência à compressão axial aos 28 dias | a/f = relação água finos| ϕ = Empacotamento Real | σ = desvio padrão
Fonte: As autoras.

Tem-se destaque par as misturas T4, T7, T9, T12 e T18, que apresentaram as maiores resistências à compressão, dentro das faixas de substituição. A composição T18 possibilitou substituição de 45% de cimento, atingindo 43,82 MPa um alto teor de substituição com resistência próxima a pasta de referência que atingiu 43,22 MPa. Meng et al. [10], com estudo em pastas aplicando RCD moído e ativado quimicamente obteve resistências superiores à 45 MPa para teores de substituição de 30% aos 28 dias, e para teores de 50%, resistências acima de 30 MPa. Oliveira, Dezen e Possan [9], constataram a possibilidade de substituição de um teor de até 25% de cimento Portland por resíduos finos de concreto tratados mecanicamente.

Observa-se na Figura 10, que não há proporcionalidade entre a densidade de empacotamento das misturas e resistência à compressão axial, em função dos teores de substituição de cimento RMF (Tabela 4). Nas pastas com RMF-1, ocorre aumento de resistência à compressão até um teor de 25% de substituição, a partir deste ponto um aumento na substituição faz com que haja redução da resistência. Com RMF-3 verifica-se a tendência de redução da resistência conforme o aumento do teor de substituição. Quando os finos têm dimensões maiores que as partículas de cimento

ocorre redução na resistência à compressão conforme aumento da taxa de incorporação da substituição [26].

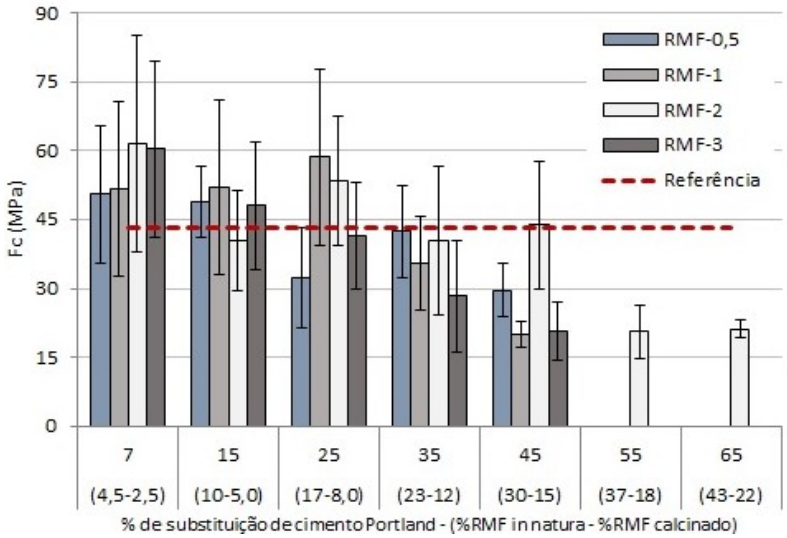
Figura 10: Misturas empacotadas e resistência à compressão axial aos 28 dias



Fonte: As autoras.

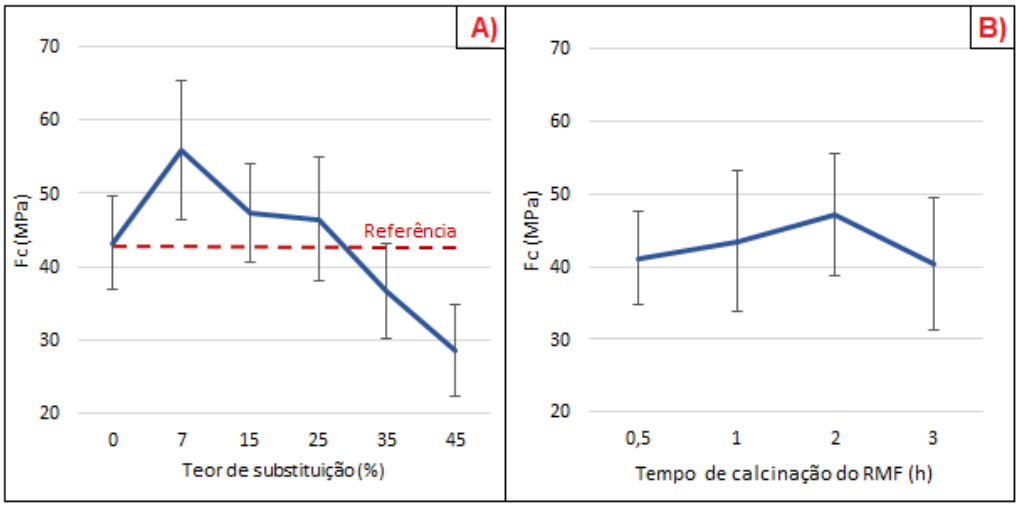
Nas Figuras 11 e 12, observa-se que para teores de até 7% de RMF, independente do período de calcinação, todas as composições obtiveram valores de resistência superiores a pasta de referência (sem resíduo). Verifica-se um potencial de uso do RMF calcinado por 2 horas, que apresentou desempenho mecânico superior à mistura de referência para teores de até 45% de substituição (30% RMF in natura e 15% RMF calcinado). A calcinação por 1 hora resultou em bom desempenho para teores de até 25% de substituição (17% RMF in natura e 8% RMF calcinado).

Figura 11: Resistência à compressão em função do teor de substituição de cimento Portland por RMF *in natura* e calcinado



Fonte: As autoras.

Figura 12: Efeito do: A – teor de substituição de cimento por RMF (à esquerda); B – tempo de calcinação na resistência à compressão (à direita)



Fonte: As autoras.

Pela ANOVA (Figura 12) constatou-se que apenas o teor de substituição tem efeito significativo na resistência à compressão. Considerando que a temperatura de calcinação adotada (800 °C), é inferior à temperatura de clinquerização (1450 °C), são necessários estudos de emissões e energia incorporada a fim de comprovar os ganhos ambientais decorrentes desta aplicação. Também estudos complementares de propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade em matrizes a base de cimento com RMF como MCS devem ser conduzidos a fim de avaliar o desempenho para diversas aplicações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados deste estudo conclui-se:

a) Os resíduos mistos finos de construção e demolição (RMF) na condição em que foram utilizados neste estudo (in natura e calcinados) apesar de não serem classificados como pozolânicos, mesmo quando tratados termicamente, atuaram principalmente como material de enchimento, melhorando o empacotamento das matrizes cimentícias estudadas.

b) Com o empacotamento dos pós in natura e calcinado com o cimento Portland CP I-S-40, foi possível substituir até 45% de cimento por RMF, mantendo a resistência mecânica da mistura de referência (sem resíduo).

c) Substituições de até 25% de cimento pelo RMF, com 17% RMF in natura e 8% de RMF calcinado, apresentaram resistências à compressão superiores à pasta de referência, com significância estatística.

d) Esta pesquisa resultou em parâmetros para estudos futuros, quanto ao desenvolvimento de traços de concretos e argamassas, nesse sentido haverá continuidade de estudos que contemplarão a aplicação na produção de concretos e argamassas, bem como a estimativa de potencial de redução das emissões de CO_2.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES código 001) e à PRPPG Unila pelo fomento à pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. Dezembro de 2021, São Paulo.

[2] LEDERER, J.; GASSNER, A.; KLEEMANN, F.; FELLNER, J. Potentials for a circular economy of mineral construction materials and demolition waste in urban areas: a case study from Vienna. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 161, 2020.

[3] RUIZ, L. A.; RAMÓN, X. R.; DOMINGO, S. G. The circular economy in the construction and demolition waste sector – A review and an integrative model approach. **Journal of Cleaner Production**. v. 248, 2020.

[4] KUMAR, Santha.; DEOLIYA, Rajesh.. Recycled cement and recycled fine aggregates as alternative resources of raw materials for sustainable cellular light weight flowable material. **Construction and Building Materials**. v. 326. 2022.

[5] SALGADO, F. A.; SILVA, F. A. Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. **Journal of Building Engineering**. v. 52, 2022.

[6] CHEN, J. J.; LI, B. H.; NG, P. L; KWAN, A. K. H. Adding granite polishing waste to reduce sand and cement contents and improve erformance of mortar. **Journal of Cleaner Production**, v. 279. 2021.

[7] VILLAGRÁAN-ZACCARD, Y. A.; MARSH, A. T. M.; SOSA. M. E.; ZEGA, C. J.; DE BELIE, N.; BERNAL, S. A. Complete re-utilization of waste concretes–Valorisation pathways and research needs. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 177. 2022.

[8] ASENSIO, E.; MEDINA, C.; FRÍAS, M.; ROJAS, M. I. S. Fired clay-based construction and demolition waste as pozzolanic addition in cements. Design of new eco-efficient cements. **Journal of Cleaner Production**. v. 265, 2020.

[9] OLIVEIRA, T. C. F.; DEZEN, B. G. S.; POSSAN, E. Use of concrete fine fraction waste as a replacement of Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 273. 2020.

[10] MENG, T.; HONG, Y.; YING, K.; WANG, Z. Comparison of technical properties of cement pastes with different activated recycled powder from construction and demolition waste. **Cement and Concrete Composites**. v. 120, 2021.

[11] ZHAO, Y.; QIU, J.; XING, J.; SUN, X. Recycling of quarry dust for supplementary cementitious materials in low carbon cement. **Construction and Building Materials**. v. 237, 2020.

[12] KEUN-HYEOK, Y.; JUNG, Y.; CHO, M.; TAE, S. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO2 emissions from concrete. **Journal of Cleaner Production**. v. 103, p. 774-783, 2015.

[13] WBCSD - WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **Low Carbon Technology Roadmap for the Indian Cement Sector: Status Review 2018**. 2018.

[14] CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Indústria Brasileira de Cimento: Base para a Construção do Desenvolvimento**. Brasília, 2017.

[15] JOHN, Vanderley M. Versão editada Capítulo 4. **Materiais de Construção e o Meio Ambiente**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. Isaia, G., editor. IBRACON, 2017.

[16] SCRIVENER, K. L.; JOHN, V.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**. v. 114, p. 2–26, 2018.

[17] SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO E ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO CIMENTO PORTLAND. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. 64 f. Rio de Janeiro, 2019.

[18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 16605: Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.

[20] OLIVEIRA, D. R. B. **Aproveitamento da fração fina de RCD como alternativa para redução das emissões de CO_2 associadas ao cimento Portland**. 2022 (em andamento). Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

[21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

[22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5752: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.

[23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5751: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro, 2015.

[24] WONG, H. H. C.; KWAN, A. K. H. Packing density of cementitious materials: part 1: measurement using a wet packing method. **Materials and Structures**, v. 41, p. 689-701, 2008.

[25] DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: A Scientific Approach**. v. 9. E&FN SPON, London, 1999.

[26] MA, Z.; TANG,Q.; WU, H.; XU, J.; LIANG, C. Mechanical properties and water absorption of cement composites with various fineness and contents of waste brick powder from C&D waste. **Cement and Concrete Composites**. v. 114, 2020.

[27] WANG, L.; WANG, J.; QIAN, X.; FANG, Y.; CHEN, P.; TUINUKUAFE, A. Tea stain-inspired treatment for fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**. v. 262, 2020.

[28] NEVES JUNIOR, A.; TOLEDO FILHO, R. D.; FAIRBAIRN, E. M. R.; DWECK, J. Early stages hydration of high initial strength Portland cement. Part I. thermogravimetric analysis on calcined mass basis. **Journal of Therm Analysis Calorimetry**. v. 108, p. 725-731, 2012.

[29] NEVES JUNIOR, A.; DWECK, J.; TOLEDO FILHO, R. D.; ELLIS, B.; LI, V. Determination of CO2 capture during accelerated carbonation of engineered cementitious composite pastes by thermogravimetry. **Journal of Therm Analysis Calorimetry**. v. 138, p. 97-109, 2019.

[30] MAZURANA, Lissandra. **Captura de CO2 em argamassas de revestimento através da carbonatação natural**. 118 f. 2019. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2019.

[31] VASCONCELOS, Gabriel Alves.; RÊGO, João Henrique da Silva. **Efeito do Processo de Calcinação na Atividade Pozolânica da Argila Calcinada**. Anais do 7º Congresso Brasileiro do Cimento. São Paulo, 2016.

[32] CARDINAUD, Guillemette.; ROZIÈRE, Emmanuel.; MARTINAGE, Olivier.; LOUKILI, Ahmed.; BARNES-DAVIN, Laury.; PARIS, Michael.; DENEELE, Dimitri. Calcined clay – Limestone cements: Hydration processes with high and low-grade kaolinite clays. **Construction and Building Materials 277**. 2021.

[33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.